



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BOR NİTRÜR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAĞ ASİDİ AMİD KATKISININ
ASFALT MODİFİKASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Münir ÖZDEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

EYLÜL 2024

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BOR NİTRÜR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAĞ ASİDİ AMİD KATKISININ
ASFALT MODİFİKASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Münir ÖZDEMİR

(20327470001)

ORCID: 0000-0002-4872-154X

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı**

Danışman: Doç. Dr. Bahadır YILMAZ

ORCID: 0000-0002-3480-1776

EYLÜL 2024



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez çalışmasının bir bölümü Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 231N006 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasının bir bölümü Bursa Büyükşehir Belediyesi Lisansüstü Tez Destek Projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ahmet Münir Özdemir

İmzası:

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının bir bölümü Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 231N006 numaralı projesi ve Bursa Büyükşehir Belediyesi Lisansüstü Tez Destek Projesi ile desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı Bursa Teknik Üniversitesi BAP Birimine ve Bursa Büyükşehir Belediyesi'ne içtenlikle teşekkür ederim.

Doktora çalışmamın ve hayatımın her aşamasında bana yol gösteren, herşeyini benimle cömertçe paylaşan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Bahadır YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik hayatım boyunca bana bir hocadan çok, bir abi gibi yaklaşan, yalnızca akademik konularda değil, hayata dair her konuda bana ilham veren bu değerli insanın rehberliğinde çalışmış ve onunla tanışmış olmanın ne kadar büyük bir şans olduğunu her zaman kalbimde taşıyacağım. Sabrınız, özveriniz ve şartlar ne olursa olsun yanımda olmanız, bu zorlu süreci daha anlamlı ve keyifli kıldı. Bana gösterdiğiniz güven, cesaret ve destek, bugün hayat maceramın bu noktasındaki en büyük güç kaynağı oldu. Sizden öğrendiğim değerler, tüm yaşamım boyunca bana ışık tutacaktır. Bu süreçte gösterdiğiniz anlayış, özveri ve kardeşlik için minnettarım. Emeklerinizin karşılığını kelimelerle ifade etmek güç olsa da, bu çalışmanın her sayfasında ve her satır arasında size olan derin saygımı, sevgimi ve minnettarlığımı bulacaksınız.

Proje ekibinde yer alan ve tez kapsamında elde edilen katkı maddesinin sentezini gerçekleştiren KTÜ Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Kemal SANCAK hocama bize ayırdığı kıymetli vakit ve bilgilerinden dolayı teşekkür ederim. Tez çalışmasına vermiş olduğu desteğe ek olarak, ufkumuzu açan konuşmaları, insanlık ve ruh dünyamızı hatırlatan tutumundan dolayı ayrıca minnettar olduğumu belirtir, kendisiyle tanışmamı büyük bir şans olarak nitelendirdiğimi söylemek isterim.

Bu çalışmada ve akademik hayatımın her aşamasında üzerimde emeği olan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Mehmet YILMAZ, Prof. Dr. Baha Vural KÖK, Doç. Dr. Erkut YALÇIN'a da teşekkürlerimi bir borç bilirim. Sizlerin bilgi ve birikimlerinden faydalanmanın, sizinle vakit geçirmenin bana her zaman doğru yolda olduğumu hatırlattığını belirtmek isterim.

Bursa Teknik Üniversitesi'nde göreve başladığım ilk günden itibaren bana her zaman destek olan, güler yüzü, suhuleti ve derin insani değerleriyle örnek teşkil eden Prof. Dr. Beyhan BAYHAN hocama en derin şükranlarımı sunarım. Kendisiyle tanışmamın şahsım adına büyük bir motivasyon ve ilham kaynağı olduğunu, ve bu tanışmanın tüm hayatımda bir ayrıcalık olarak yerini alacağını belirtir, daima minnet ve dua ile benimseyeceğimi garanti ederim.

Bu süreçte en büyük desteği veren kıymeti ölçülemez aileme sonsuz teşekkür ederim. Özellikle sevgili eşime, sabır, anlayış ve sevgisiyle bu süreci daha katlanılabilir hale getirdiği için minnettarım. Sizlerin varlığı, karşılaştığım her zorlukta bana güç verdi ve başarıya giden yolda en büyük motivasyon kaynağım oldu. Bu çalışmayı sizlerin desteği olmadan tamamlamak mümkün olamazdı.

Son olarak, münevver şahsiyet babam merhum Prof. Dr. Necmi zdemir’e bıraktığı büyük ahlak ve şuur mirasını ölene kadar taşıyacağıma dair söz vermek isterim. Kendisine bir teşekkür metni yazacak dağarcık şahsımda mevcut değildir.

Eylül 2024

Ahmet Münir ÖZDEMİR
İnşaat Yüksek Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Genel Motivasyonu.....	3
1.2 Konunun Özgeçmişi	4
1.3 Bitüm	31
1.4 Bitümün Kimyası	32
1.5 Bitümün Reolojisi	34
1.6 Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	38
1.6.1 Geleneksel bağlayıcı deneyleri	39
1.6.1.1 Penetrasyon deneyi	39
1.6.1.2 Yumuşama noktası deneyi	42
1.6.1.3 Düktilite deneyi.....	45
1.6.1.4 Parlama noktası deneyi	45
1.6.1.5 İnce film halinde ısıtma (Thin film oven test, TFOT) deneyi.....	46
1.6.1.6 Trikloretilende çözünürlük deneyi	46
1.6.1.7 Özgül ağırlık deneyi.....	47
1.6.1.8 Nicholson soyulma deneyi	47
1.6.2 Superpave bağlayıcı deneyleri	48
1.6.2.1 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	49
1.6.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (Pressure ageing vessel, PAV).....	51
1.6.2.3 Dönel viskozimetre deneyi (Rotational viscometer, RV)	51
1.6.2.4 Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR)	53
1.6.2.5 Kiriş eğilme reometresi (Bending beam rheometer, BBR).....	58
1.7 Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)	59
1.7.1 Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen bozulmalar	64
1.8 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler	71
1.8.1 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi	74
1.8.2 İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi (ITSM)	76
1.8.3 Statik sünme deneyi	77
1.8.4 Dinamik sünme deneyi.....	78
1.8.5 İndirekt çekme yorulma deneyi.....	82
1.9 Asfaltın Modifikasyonu Modifiye Asfaltlar ve Özel Asfaltlar	83
1.9.1 Modifikasyon için kullanılacak katkı maddesinin asfalt kaplamalardaki..	85
1.9.2 Katkı maddelerinin sınıflandırılması	87
1.10 Kimyasal ve Fiziksel Karakterizasyon Yöntemleri.....	90

1.10.1 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR).....	91
1.10.2 Nükleer manyetik rezonans (NMR).....	93
1.10.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	94
1.10.4 Termogravimetrik analiz (TGA).....	94
2. MATERİYAL VE METOT	96
2.1 Tez Çalışmasında Kullanılacak Katkı Maddesinin Sentez Süreci	96
2.2 Modifikasyon İşlemi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması	102
2.3 Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması.....	102
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	104
3.1 Sentezlenen Katkı Maddesinin Kimyasal Karakterizasyonu	104
3.2 Katkı Maddesi İçerisindeki İdeal Bor Nitrür Oranının Belirlenmesi	116
3.3 Saf ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Karakterizasyonu	118
3.4 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	126
3.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi Sonuçları.....	127
3.6 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları.....	128
3.7 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları.....	135
3.8 Çoklu-Gerilme Sünme ve Toparlanma (MSCR) Deneyi Sonuçları.....	139
3.9 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları	148
3.10 Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları.....	150
3.11 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları	154
3.12 Marshall Tasarım Yöntemine Göre Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenişi.	156
3.13 Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları	158
3.14 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları.....	161
3.15 İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları	162
3.16 Statik Sünme Deney Sonuçları.....	164
3.17 Dinamik Sünme Deney Sonuçları	165
3.18 İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	167
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	169
KAYNAKLAR	174
ÖZGEÇMİŞ.....	186

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Bağlayıcı deneyleri.....	38
Çizelge 1.2 : Superpave şartnamesi kapsamında bağlayıcı performans sınıfları.....	48
Çizelge 1.3 : Bitümlü bağlayıcı Superpave deneylerinin amaçları ve performans parametresi karşılıkları	49
Çizelge 1.4 : MSCR deneyinde trafiğe bağlı sınıflandırma.....	56
Çizelge 1.5 : Tüm bozulma tipleri, sebepleri ve çözüm önerileri.....	70
Çizelge 1.6 : Katkı maddelerinin genel olarak sınıflandırılması	87
Çizelge 1.7 : Polimer ve polimer olmayan katkı maddelerine örnekler	89
Çizelge 1.8 : Katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkileri	90
Çizelge 2.1 : Agreganın fiziksel özellikleri	103
Çizelge 3.1 : Hayvansal yağın içeriği	104
Çizelge 3.2 : Hayvansal yağın FTIR spektrum verileri	106
Çizelge 3.3 : 1-6 diaminohexan FTIR spektrum verileri	106
Çizelge 3.4 : Sentezlenen katkı maddesinin FTIR spektrum verileri cm^{-1}	108
Çizelge 3.5 : BN ilaveli maddesinin FTIR spektrum verileri cm^{-1}	109
Çizelge 3.6 : Katkı maddesine ait H-NMR verileri	111
Çizelge 3.7 : C^{13} -NMR spektral verileri	114
Çizelge 3.8 : Saf ve %6 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrum verileri, cm^{-1} ...	121
Çizelge 3.9 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve %6 katkılı asfalt bağlayıcıların FTIR spektrum verileri, cm^{-1}	124
Çizelge 3.10 : Bağlayıcı numunelerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	128
Çizelge 3.11 : DSR deneyi verileri	129
Çizelge 3.12 : RTFOT öncesi ve sonrası verilerin gösterimi	136
Çizelge 3.13 : RTFOT sonrası DSR deneyi sonuçları.....	137
Çizelge 3.14 : Saf ve modifiye bağlayıcıların MSCR deney sonuçları	147
Çizelge 3.15 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye bağlayıcıların DSR deneyi sonuçları.....	148
Çizelge 3.16 : BBR deneyi sonuçları.....	151
Çizelge 3.17 : Nicholson soyulma deneyi numunelerinin görüntü analizi sonrası soyulma miktarları	156
Çizelge 3.18 : Saf bağlayıcı kullanılarak elde edilen asfalt karışımların tasarım verileri ve şartname limitlerine göre incelenmesi	157
Çizelge 3.19 : Karışım numunelerinin Marshall verileri	159
Çizelge 3.20 : Karışımların akma sayıları	167
Çizelge 3.21 : Karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrarları.....	168

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Ham petrolün rafine şeması.....	32
Şekil 1.2 : n-heptan kullanılarak ayrılan bir bitümlü bağlayıcıda asfaltten (sağda) ve malten (ortada) fraksiyonları; malten sonrasında aromatik ve reçine olarak ayrılmış.....	33
Şekil 1.3 : Çözünürlük ile SARA ayrımı şeması	34
Şekil 1.4 : Hooke kanununa göre elastik davranış.....	35
Şekil 1.5 : Viskoz malzemenin davranışı	35
Şekil 1.6 : Yükleme hızı ve deformasyon tipleri arasındaki ilişki (Bursa Şehirlerarası Otobüs Terminali).....	37
Şekil 1.7 : Sabit gerilme ve gerilme kaldırıldıktan sonra viskoelastik malzemenin davranışı.....	37
Şekil 1.8 : Penetrasyon deneyi düzeneği	42
Şekil 1.9 : Yumuşama noktası deneyi düzeneği	44
Şekil 1.10 : Düktilite cihazı	45
Şekil 1.11 : Parlama noktası deney cihazı	46
Şekil 1.12 : TFOT deney düzeneği.....	46
Şekil 1.13 : Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi (PG 46- PG 64).....	48
Şekil 1.14 : Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi (PG 70 – PG 82).....	49
Şekil 1.15 : Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Düzeneği	50
Şekil 1.16 : Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Düzeneği	51
Şekil 1.17 : Dönel viskozimetre deneyi düzeneği	52
Şekil 1.18 : Viskozite ölçüm mekanizması.....	52
Şekil 1.19 : Dinamik kayma reometresinin çalışma mekanizması	54
Şekil 1.20 : DSR cihazı.....	54
Şekil 1.21 : Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışının gösterimi	55
Şekil 1.22 : MSCR testinde şekil değiştirme zaman ilişkisi.....	57
Şekil 1.23 : BBR deney cihazı.....	59
Şekil 1.24 : BBR deney numunelerinin hazırlanması ve deney mekanizması	59
Şekil 1.25 : Tipik bir tekerlek izi bozulması örneği	65
Şekil 1.26 : Tipik timsah sırtı çatlak oluşumu ve şiddet göstergesi	66
Şekil 1.27 : Boyuna çatlak örneği.....	66
Şekil 1.28 : Enine çatlaklar	67
Şekil 1.29 : Farklı şiddetlerde kayma çatlakları örnekleri	68
Şekil 1.30 : İndirekt çekme dayanımı deney düzeneği	76
Şekil 1.31 : ITSM deneyi düzeneği	77
Şekil 1.32 : Statik sünme deney düzeneği	78
Şekil 1.33 : Akma sayısının bulunması	79
Şekil 1.34 : Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi	80
Şekil 1.35 : Yük-zaman ve deformasyon arasındaki ilişkinin gösterimi	81
Şekil 1.36 : ITFT düzeneği	82

Şekil 1.37 : Tipik bir yük tekrar sayısı-deformasyon grafiği.....	83
Şekil 2.1 : Sentezlenen bileşiklerin genel şeması	100
Şekil 2.2 : Katkı maddesinin sentez şeması.....	100
Şekil 2.3 : Katkı maddesinin aseton ile kurutulup standart elekten geçirildikten sonraki hali (HY-6)	101
Şekil 2.4 : Bor nitrür ilaveli nihai katkı maddesinin görünümü	101
Şekil 2.5 : Modifikasyon düzeneği	102
Şekil 2.6 : Agrega gradasyonunun grafiksel gösterimi.....	103
Şekil 3.1 : Katkı maddesinin kimyasal yapısı ve bünyesindeki bileşenlerin gösterimi.....	105
Şekil 3.2 : Atık hayvansal yağın FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	105
Şekil 3.3 : 1-6 diaminohekzan FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	106
Şekil 3.4 : HY-6'nın FTIR spektrumu (cm^{-1})	107
Şekil 3.5 : Hekzagonal bor nitrürün FTIR spektrumu (cm^{-1})	108
Şekil 3.6 : Nihai katkı 1-6 BN'nin FTIR spektrumu (cm^{-1})	108
Şekil 3.7 : Katkı maddesi ile bor nitrürün etkileşim mekanizmasının gösterimi.....	109
Şekil 3.8 : Katkı maddesi ile asfalt bağlayıcının muhtemel etkileşimi	110
Şekil 3.9 : Katkının THF-d8 'de alınan ^1H -NMR Spektrumu (THF-d8 NMR Pikleri : 1.77 ve 3.63 ppm).....	110
Şekil 3.10 : Numaralandırılmış halde hedef bileşiğin kimyasal yapısı	111
Şekil 3.10 : Katkının THF-d8-D20 karışımında alınan ^1H -NMR Spektrumu	112
Şekil 3.13 : Katkının THF-d8-TFA karışımında alınan ^1H -NMR Spektrumu	113
Şekil 3.14 : Numunenin THF-d8'de karışımında alınan ^{13}C -APT NMR Spektrumu	114
Şekil 3.15 : Katkı maddelerinin termogravimetrik analiz sonuçları.....	115
Şekil 3.16 : Atık hayvansal yağın ve katkı maddelerinin termal eğrileri	115
Şekil 3.17 : Farklı BN içeriklerine sahip katkıların penetrasyon deneyi sonuçları .	117
Şekil 3.18 : Farklı BN içeriklerine sahip katkıların yumuşama noktası deneyi sonuçları	117
Şekil 3.19 : Farklı BN içerikleri için DSR deneyi sonuçları	118
Şekil 3.20 : Saf asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	119
Şekil 3.21 : %1 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	119
Şekil 3.22 : %2 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	120
Şekil 3.23 : %4 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	120
Şekil 3.24 : %6 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1}).....	121
Şekil 3.25 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	122
Şekil 3.26 : RTFOT ile yaşlandırılmış %1 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	122
Şekil 3.27 : RTFOT ile yaşlandırılmış %2 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	123
Şekil 3.28 : RTFOT ile yaşlandırılmış %4 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	123
Şekil 3.29 : RTFOT ile yaşlandırılmış %6 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})	124
Şekil 3.30 : Saf ve modifiye asfaltların SEM görüntüleri	125
Şekil 3.31 : Penetrasyon deneyi sonuçları	126
Şekil 3.32 : Yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	126
Şekil 3.33 : Saf ve modifiye bağlayıcıların RV deneyi sonuçları.....	127
Şekil 3.34 : Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hesabı	128

Şekil 3.35 : Saf ve modifiye bağlayıcıların kompleks modül (G^*) değerleri.....	129
Şekil 3.36 : Saf ve modifiye bağlayıcıların faz açısı değerleri	130
Şekil 3.37 : Saf ve modifiye bağlayıcılar için tekerlek izi dayanım parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri	130
Şekil 3.38 : Saf ve modifiye bağlayıcıların 40, 50, 60, 70°C sıcaklıkta ve 0.01-10 Hz frekans aralığında kompleks modül değerleri	132
Şekil 3.39 : Saf ve modifiye bağlayıcıların 40, 50, 60, 70°C sıcaklıkta ve 0.01-10 Hz frekans aralığında faz açısı değerleri.....	133
Şekil 3.40 : Tüm bağlayıcı tipleri için 40°C referans sıcaklığında ana eğriler (master curve).....	135
Şekil 3.41 : RTFOT sonrası penetrasyon değerleri	136
Şekil 3.42 : RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri	136
Şekil 3.43 : RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri	138
Şekil 3.44 : RTFOT sonrası faz açısı değerleri.....	138
Şekil 3.45 : Katkı oranı ile $J_{nr0.1}$ değerleri arasındaki ilişki	140
Şekil 3.46 : Sıcaklık ile $J_{nr0.1}$ değerleri arasındaki ilişki	141
Şekil 3.47 : Katkı oranı ile $J_{nr3.2}$ değerleri arasındaki ilişki	141
Şekil 3.48 : $J_{nr3.2}$ değerlerinin sıcaklık ile değişimi ve sınır değerlerin gösterimi	142
Şekil 3.49 : 0.1 kPa gerilme seviyesinde katkı içeriği ile %R değerlerinin ilişkisi.	143
Şekil 3.50 : 0.1 kPa gerilme seviyesinde sıcaklık ile %R değerlerinin ilişkisi.....	144
Şekil 3.51 : 3.2 kPa gerilme seviyesinde katkı içeriği ile %R değerlerinin ilişkisi.	145
Şekil 3.52 : 3.2 kPa gerilme seviyesinde sıcaklık ile %R değerlerinin ilişkisi.....	146
Şekil 3.53 : $J_{nr diff}$ değerlerinin sıcaklık ile değişimi.....	147
Şekil 3.54 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların $G^*.\sin\delta$ değerleri.....	149
Şekil 3.55 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların faz açısı değerleri.....	149
Şekil 3.56 : Sünme rijitliği (S) değerleri.....	151
Şekil 3.57 : Sünme oranı (m-value) değerleri.....	151
Şekil 3.58 : Sünme oranı (m-value) değerleri.....	152
Şekil 3.59 : Nicholson soyulma deneyi sonrası numunelerin görüntüsü.....	154
Şekil 3.60 : Görüntülerin eşikleme işlemlerine örnekler	155
Şekil 3.61 : Görüntü analizi sonrası soyulma alanlarının görünümü	155
Şekil 3.62 : Optimum bitüm oranının belirlenmesi için çizilen grafikler.....	158
Şekil 3.63 : Marshall stabilite ve akma sonuçları	159
Şekil 3.64 : Marshall oranı (MQ) değerleri	160
Şekil 3.65 : Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları.....	161
Şekil 3.66 : Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları.....	162
Şekil 3.67 : ITSM deney sonuçları	163
Şekil 3.68 : Statik sünme deney sonuçları	164
Şekil 3.69 : Karışımların nihai sünme rijitliği değerleri	165
Şekil 3.70 : Dinamik sünme deney sonuçları	166
Şekil 3.71 : Dinamik sünme deneyi sonrası akma sayısının belirlenmesi.....	167
Şekil 3.72 : İndirekt çekme yorulma deneyi sonuçları	168

BOR NİTRÜR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ YAĞ ASİDİ AMİD KATKISININ ASFALT MODİFİKASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Esnek üstyapılar, aşırı ve tekrarlı trafik yükleri, sıcaklık değişimleri, tasarım hataları, ultraviyole ışınlar, çevresel ve kimyasal etkiler gibi sebeplerden dolayı bozulmaya uğramaktadırlar. Söz konusu bozulmalardan büyük oranda asfalt bağlayıcı sorumlu olup viskoelastik ve termoplastik yapısı onu bozulmalara karşı zayıf kılmaktadır. Asfalt bağlayıcının istenilen davranışta ve performans seviyesinde olması amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılarak modifikasyonu sağlanmaktadır. Bu çalışmada atık hayvansal yağın diamin yapılarıyla rejenere edilmesiyle elde edilen katkı maddesinin asfalt bağlayıcı ve karışımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Katkı maddesine termal özelliklerini ve yapısal stabilitesini artırmak amacıyla hekzagonal bor nitrür ilave edilmiştir. Bor nitrür takviyeli yağ asidi diaminleri ve bu maddenin asfalt bağlayıcıya muhtelif oranlarda ve uygun şartlarda ilave edilmesi sonrası elde edilen modifiye bağlayıcılar ve karışımlar üzerinde bir dizi laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen katkı maddesinin yapısal karakterizasyonu, Nükleer Manyetik Rezonans (NMR), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Termogravimetrik (TG) analiz yöntemleri ile ortaya konulmuştur. Modifiye bağlayıcıların morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), modifikasyon mekanizması ve termal performanslarını belirlemek amacıyla FT-IR ve TG analizleri gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcılar üzerinde Dinamik Kayma Reometrisi (DSR), Dönel İnce Film Halinde Yaşlandırma (RTFOT), Dönel Viskozimetre (RV), Basınçlı Yaşlandırma Kabini (PAV), Eğilme Kirişi Reometrisi (BBR) ve geleneksel bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Marshall dizayn yöntemine göre hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall Stabilité ve Akma, Dolaylı Çekme, Su Hasarı, Dolaylı Çekme Mukavemeti, Statik Sünme, Dinamik (Tekrarlı) Sünme, Dolaylı (İndirek) Çekme Yorulma ve Nicholson Soyulma deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar, katkı maddesinin asfaltın kıvamını, kalıcı deformasyon dayanımını, yaşlanma ve yorulma direncini, esneklik ve yük taşıma kabiliyetini, soyulma direncini ve adezyon performansını, düşük sıcaklık dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Katkı içerisindeki ideal bor nitrür oranının %10 olduğu, asfalt modifikasyonu için ideal katkı oranının ise %2 olduğu tespit edilmiştir. Bor nitrürün asfalt ağırlığınca oldukça düşük bir miktarının asfalt performansı üzerindeki etkisi tatmin edici düzeydedir.

Anahtar kelimeler: Modifiye Asfalt, Reoloji, Atık Yağ, Bor nitrür, Bitümlü sıcak karışım

INVESTIGATION OF BORON NITRIDE ENHANCED FATTY ACID AMIDE ADDITIVE FOR ASPHALT MODIFICATION

SUMMARY

Flexible pavements are subject to deterioration due to excessive and repeated traffic loads, temperature changes, design errors, ultraviolet radiation, environmental and chemical effects. The degradation of asphalt binder is primarily attributed to its inherent properties, particularly its viscoelastic and thermoplastic characteristics, which render it susceptible to deterioration. To enhance the performance and behavior of the binder, a range of additives are employed for modification purposes. In this study, the effects of the additive obtained by regenerating waste animal fat with diaminoethane on asphalt binder and mixture were investigated. Hexagonal boron nitride was added to the additive to improve its thermal properties and structural stability. A series of laboratory studies were carried out on boron nitride reinforced fatty acid diamines and modified asphalts. Structural characterization of the synthesized additive was carried out by Nuclear Magnetic Resonance (NMR), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) and Thermogravimetric (TG) analysis. Scanning Electron Microscopy (SEM) was performed to determine the morphological properties of the modified binders, and FT-IR and TG analyses were performed to determine the modification mechanism and thermal performance. Dynamic Shear Rheometer (DSR), Rotational Thin Film Aging (RTFOT), Rotational Viscometer (RV), Pressure Aging Vessel (PAV), Bending Beam Rheometry (BBR) and conventional binder tests were performed on the binders. Marshall Stability and Flow, Indirect Tensile Strength, Static and Dynamic Creep, Indirect Tensile Fatigue and Nicholson Stripping tests were performed on the mixtures. The results showed that the additive improved the consistency, permanent deformation strength, aging and fatigue resistance, flexibility, peeling resistance, adhesion performance and low temperature resistance of asphalt. It was determined that the ideal boron nitride ratio in the additive was 10%, while the ideal additive ratio for asphalt modification was 2%.

Keywords: Modified Asphalt, Rheology, Waste Oil, Boron nitride, Hot mix asphalt.

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımı, modern toplumların en temel altyapı bileşenlerinden biri olup, hem ekonomik kalkınmanın sağlanmasında hem de sosyal yaşamın sürdürülebilirliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Karayolu ağları, ticaretin ve ulaşımın can damarı olarak kabul edilmektedir. Bu ağlar, büyük şehirleri, küçük yerleşim birimlerini ve sanayi bölgelerini birbirine bağlayarak malların, hizmetlerin ve insanların etkin bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır. Türkiye gibi geniş coğrafyaya sahip ülkelerde, karayolu ulaşımı, hem şehir içi hem de şehirlerarası taşımacılıkta vazgeçilmez bir konumdadır.

Karayolu ulaşımı için tercih edilen kaplama tipleri farklılık göstermekte, fakat çok büyük çoğunlukla dünyada olduğu gibi ülkemizde de esnek üstyapılar (asfalt kaplama) tercih edilmektedir. Esnek üstyapıların inşaat ve bakım-onarım işlemleri için büyük yatırımlar yapılmakta, üstyapının erken bozulması durumunda ise kayda değer ekonomik kayıplar meydana gelmektedir. Asfalt kaplamalar aşırı ve tekrarlı trafik yükleri, iklim koşulları, çevresel faktörler, inşaat ve proje aşamasındaki eksiklikler gibi faktörlerden dolayı bozulmalara uğramaktadırlar. Bu bozulmalar enine çatlaklar, boyuna çatlaklar, yorulma çatlakları, tekerlek izi, soyulma, kopma gibi tiplerde meydana gelmektedir.

Asfalt karışımlar; yapısal iskelet görevinde agrega, bağlayıcı görevinde ise asfalttan oluşmaktadır. Esnek üstyapılara “esnek” hüviyetini yükleyen asfalt bağlayıcıdır. Bağlayıcı miktarı yalnızca %4-7 gibi düşük oranlarda olmasına rağmen kaplama performansı ve davranışından büyük oranda sorumludur. Asfalt, yapısı itibarıyla viskoelastik ve termoplastik olmakla birlikte bu iki özelliği onu çeşitli bozulmalara elverişli hale getirmektedir. Doğasındaki bu iki özellik, istenen performansı ve hizmet ömrünü sağlamasını engelleyebilmektedir. Oluşan deformasyonları ve bozulmaları önleyebilmek veya geciktirmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri asfalta ilave edilmektedir. Burada temel motivasyon asfaltın istenilen malzeme davranışını sağlamasıdır.

Asfalt modifikasyonu ve özelliklerinin geliştirilebilmesi için çeşitli polimerler [8-10], karbon bazlı malzemeler, farklı hammaddelerden üretilmiş çeşitli modifiyerler ve atık malzemeler kullanılmaktadır. Dünyada kullanılan modifiyerlerin ortalama %75'ini elastomerik katkılar, %15'ini plastomerik katkılar, geriye kalan %10'unu da kauçuk ve diğer katkılar oluşturmaktadır.

Modifikasyon amacıyla kullanılan atık malzemeler çevresel ve ekonomik faydalar sağlamaktadır. Hem atık maddenin bertarafı ile bir kullanım alanı oluşturulmakta hem de bir mühendislik yapısında kullanımıyla teknik özellikleri geliştirilmektedir. Atık yağlar en yaygın kullanılan atık madde modifiyerleridir. Atık yağlar genellikle yaşlanmış ve servis ömrünü tamamlamış asfalt malzemeleri orijinal özelliklerine döndürmek amacıyla gençleştirici olarak kullanılmaktadır. Gençleştirici olarak kullanılan atık yağ çeşitleri göz önüne alındığında kolay elde edilebilme, yoğun gençleştirme etkisi, maliyet, kolay esterifikasyon gibi sebeplerden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, atık bitkisel yağların asfaltın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek kalıcı deformasyon, nem hasarı, rijitlik kaybı gibi bozulmalara yol açtığı son zamanlarda yapılan araştırmalarca beyan edilmiştir. Bu tez çalışmasında, atık bitkisel yağlara kıyasla daha uzun ve düz zincirlere sahip olması, oda sıcaklığında katı halde bulunması, doymuş kısımların doymamış kısımlara kıyasla daha fazla olması ve asfalt bağlayıcıya nispeten benzer kimyasal yapıya sahip olması gibi sebeplerden dolayı atık hayvansal yağ tercih edilmiştir. Atık hayvansal yağların yapısal olarak güçlendirilmesi ve karbon zincirinin uzatılması amacıyla amidik yapılar (diaminohekzan) ile etkileşime sokulması amaçlanmıştır.

Bor, termal ve yapısal anlamda oldukça kararlı olmakla birlikte dünya rezervlerinin büyük bir kısmı ülkemizde bulunmaktadır. Ancak üretimde ve ekonomik boyutta ülkemizin aldığı pay sahip olduğumuz rezervler ile orantılı değildir. Bor, temizlik ürünlerinden uzay teknolojisine kadar pek çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Buna rağmen ülkemizde bor türevi ürünlerin pazar payı istenilen düzeyde değildir. Milli kaynağımıza yeni kullanım alanları açmak elzemdir.

1.1 Tezin Amacı ve Genel Motivasyonu

Bu çalışmanın amacı, atık nitelikte olan hayvansal yağların yeniden değerlendirilip kullanılması için diamin yapıları ve bor-nitrür bileşiği ile kimyasal etkileşime sokularak sentezlenmiş ve yapısal olarak güçlendirilmiş polimer özellikte yeni bir asfalt katkı maddesinin üretilmesidir. Elde edilen katkı maddesi genel bir ifadeyle bor nitrür ile güçlendirilmiş yağ asidi amidi olarak tanımlanabilir. Katkı maddesi ile asfalt bağlayıcının performans özelliklerinin iyileştirilmesi, yol kaplamalarında artan trafik yükleri, iklim ve çevre koşulları nedeniyle oluşan kalıcı deformasyonların azaltılarak bakım-onarım maliyetlerinin düşürülmesi, asfalt kaplama tabaka kalınlıklarının azaltılması ve buna bağlı olarak yapım maliyetlerinin düşürülmesi çalışma kapsamındadır. Ayrıca katkı maddesinin yağlı yapısıyla düşük sıcaklıklarda asfalt kaplamalarda oluşan çatlama eğiliminin azaltılması, diamin ve bor-nitrür yapılarıyla yüksek sıcaklıklarda oluşan yorulma ve tekerlek izi direncinin artırılması hedeflenmektedir.

Bu çalışma, atık hayvansal yağların yeniden değerlendirilmesi ve ülkemizin önemli rezervlere sahip olduğu bor ve türevlerinden biri olan bor nitrürün birlikte kullanılarak, yeni bir bor içerikli polimerik asfalt katkısının üretilmesini amaçlamaktadır. Bu katkı maddesi, yurtdışından ithal edilen pahalı katkı maddelerine kıyasla daha düşük maliyetli ve pratikte uygulanabilir olması açısından büyük önem taşımaktadır.

Tez çalışması ile erişilmesi beklenen çıktılar:

Bu çalışma ile asfalt bağlayıcı ile örtüşme kabiliyeti yüksek, kolay elde edilebilir, bor nitrür içerikli atık hayvansal yağdan elde edilen polimer özellikte yeni bir asfalt katkısı üretilmektedir.

Elde edilen bu katkı maddesinin asfalt kaplamalarda modifiyer olarak kullanılması ile atık hayvansal yağların çevresel, biyolojik ve ekonomik olumsuzlukları giderilebilecektir.

c) Büyük ölçüde bor rezervine sahip olan ülkemizin bu alanda önemli bir kullanım alanına kavuşması sağlanacaktır.

d) Asfalt kaplamalarda, trafik yüklerinin etkisiyle hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda oluşan deformasyonlara karşı dayanımı geliştirilecektir. Böylece, farklı iklim koşullarında kullanım özelliğine sahip geniş bir uygulama alanı elde edilecektir.

e) Asfalt kaplama kalınlıkları inceltilerek, yapım maliyetleri azaltılacaktır.

f) Türkiye, asfalt modifikasyonu için yoğun çalışmaların yürütüldüğü diğer ülkelere, bu alanda katkı sağlayabilecek ve ihraç edebileceği yeni katkı maddesi pazarı oluşturulabilecektir.

Literatürde amin ve diamin ilavesiyle hayvansal atık yağların kimyasal muamelesini içeren ve sonrasında elde edilen katkının asfaltın modifikasyonunda kullanılmasına yönelik çalışmalara rastlanmamıştır. Ayrıca, amin ve diamin ilavesiyle rejenere edilen malzemeler asfalt modifikasyonunda kullanılmadığı gibi daha uzun karbon zincirlerine sahip diaminler kullanılarak hayvansal atık yağların polimerizasyonuna da rastlanmamıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında, oda sıcaklığında katı bir yağ olması, uzun karbon zincirlerine sahip yağ asitlerinden oluşması, doymuş karbon zincirlerinin doymamış karbon zincirlerine kıyasla daha yoğun olması sebebiyle hayvansal atık yağ tercih edilerek polimer özellikli yeni bir katkı maddesi sentezlenmesi amaçlanmıştır. Yeni bir katkı maddesi sentezlerken temel hedef, asfaltın hidrokarbon yapısıyla birebir bütünleşecek ve örtüşecek moleküler yapıda olan bir katkı elde etmektir. Yağ içerisindeki trigliseritlerin uygun şekilde hidroliz edilip sabunlaştırılmasından sonra muhtelif karbon zincirlerine sahip yapılar ile deformasyona karşı dayanıklı bir bağ olan amit bağları oluşturup bu bağlar vasıtasıyla daha uzun karbon zincirlerine sahip bir yapı oluşturma amacı hedeflenmiştir. Dizayn edilen molekülün dallanmasının az olması, daha az polar yapılar içermesi ve dolayısıyla uzun karbon zincirlerine sahip yapılar olmasının asfalt performansı üzerinde etkili olacağı ön görülmektedir. Bilindiği gibi, elektrostatik kuvvetler ve London kuvvetleri uzun karbon zincirleri boyunca etkili moleküller arası çekim kuvvetleridir. Elektrostatik kuvvetler ne kadar büyükse kullanılacak katkının asfalt ile uyumu o kadar yüksek olacaktır. Ayrıca oluşacak London kuvvetlerinin daha da büyümesi ile bu uyumun güçleneceği ön görülmektedir.

1.2 Konunun Özgeçmişi

Bugüne kadar asfalt malzemelerin performans özelliklerinin geliştirilmesi, sıcaklığa ve yükleme sıklığına, bölge özelliklerine göre istenilen davranışları sağlaması, bozulmalara karşı dayanım göstermesi gibi birçok amaca yönelik olarak katkı maddeleri kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan katkı maddeleri ile ilgili genelden-

özele, çalışmada kullanılacak katkı maddesine doğru bir literatür araştırması sunulmuştur.

Polimerler, uzun zincirler oluşturmak için daha küçük moleküller (monomerler) arasında kimyasal reaksiyon yoluyla sentezlenen makromoleküllerdir. Elde edilen polimerlerin fiziksel özellikleri, monomerlerin kimyasal yapısı ve polimer içerisindeki dizilimlerine göre belirlenir. Rastgele veya blok düzeninde olabilen iki farklı monomerin kombinasyonu kopolimer olarak adlandırılmakla beraber elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu türler yaygın olarak bitüm modifikasyonunda kullanılır. Polimer modifiye bitümler (PmB'ler), bağlayıcı ağırlığının genellikle %3'ü ile %10'unu arasında değişen oranlarda bir veya daha fazla polimerin, bağlayıcı ile mekanik karışımı veya kimyasal reaksiyonu sonucu elde edilir. Mekanik olarak gerçekleştirilen modifikasyonların basit olduğu kabul edilir çünkü sistemdeki iki yapı arasında hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmez. Bu durumda polimer katkısı, karışıma belirli özellikler kazandıran bir dolgu maddesi olarak etki eder. Kimyasal olarak gerçekleştirilen modifikasyonların ise daha karmaşık olduğu kabul edilmekle beraber sistemdeki iki yapı arasında kimyasal reaksiyonlar veya kimyasal etkileşimler meydana gelir [1].

Modifiye bitümler iki fazlı bir sistem olarak karakterize edilir: Yaygın olarak asfaltenik matris olarak bitümlü ve iki farklı bakış açısıyla incelenen polimerik matris; (1) bitüm ve katkı maddesi arasındaki karmaşık etkileşim mekanizması ve (2) sonuçta ortaya çıkan PmB'lerin reolojik performans özelliklerini, sıcaklık duyarlılığını, morfolojisini, termal davranış depolama stabilitesini ve yaşlanmasını incelemeyi amaçlayan farklı tipteki bitüm değiştiricilerin etkisi [2].

Polacco ve arkadaşlarına göre [3] asfalt bağlayıcının çeşitli polimerler ile modifikasyonu, bitüm/polimer etkileşim mekanizması açısından bakıldığında polimerin bitümün hafif bileşenleri olan maltenler tarafından emilerek başlangıç hacminin dokuz katına kadar şişebildiği, termodinamik olarak kararsız fakat kinetik olarak kararlı bir yapının olduğu görülmüştür [4]. Bitümün hafif fraksiyonları için polimerler, orijinal asfaltın doğasına göre asfaltenlerin misel toplanmasını teşvik etme veya birleşme derecelerini arttırma eğilimindedir. Yüksek sıcaklıklarda, erimiş polimerlerle modifiye edilmiş bağlayıcıların viskoziteleri nispeten daha düşüktür. Bu durum benzer yapıya ve polariteye sahip maddelerin, bir başka deyişle şişmiş polimerler ve asfaltenler, kendi alanlarını oluşturmaya olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, bu sistemin termodinamik kararsızlığı, yerçekimi alanının etkisi altında bir faz ayrılmasına (veya çökelmeye) neden olmaktadır. Bu nedenle, ilgili asfaltten miselleri, depolama sırasında karışımın tabanına çökebilir. Bu mekanizmaya göre polimer modifiye bağlayıcıların faz ayrılma derecesi sıcaklık ve zaman gibi saklama koşullarından etkilenebilir. Lu ve diğerleri tarafından gösterildiği gibi, faz ayrımı temel olarak baz bitümün doğasına ve polimerin özelliklerine ve içeriğine göre belirlenecektir [5]. Bugüne kadar bitümün modifikasyonu için farklı tipte katkı maddeleri ve polimerler kullanılmıştır [4]. Kullanılan katkı maddelerinin her biri, bir bitüm katkı maddesi olarak farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Büyük polimer gruplarına ek olarak polifosforik asit (PPA), kükürt, maleik anhidrit ve farklı kil türleri gibi diğer asfalt katkıları da tanıtılmıştır.

Polimerler, çok çeşitli özellik ve tipte elde edilmekte, kendi içinde farklı sınıflara ayrılmaktadırlar. Polimer sınıfları içerisinde asfalt katkısı olarak yaygın biçimde kullanılanlardan birisi termoplastiklerdir. Termoplastikler olarak da bilinen poliolefinik plastomerlerin kategorisi şunları içerir: Polietilen (PE), polipropilen (PP), etilen vinil asetat (EVA), etilen bütül akrilat (EBA) ve polivinil klorür (PVC). Üç formda bulunabilen polietilen; düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) en yaygın plastomerlerdir. PmB'leri elde etmek için plastomerlerin polimer olarak kullanılması, stirenik (polistiren veya stiren türevleriyle ilişkili olan) polimerlerin yüksek maliyetlerinin ve bunların doymamışlıklarından kaynaklanan bozunma olgusunun bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Stirenik polimerler, polimerizasyon süreci tamamlandığında genellikle doymuş hale gelir. Çünkü polimerizasyon sırasında vinil grubundaki çift bağlar kırılarak yeni tekli bağlar oluşur ve monomerler birbirine bağlanarak doymuş polimer zincirlerini meydana getirir. Bu şekilde doymamışlıkları giderilir. Aksine, poliolefinik plastomerler düşük maliyete ve yüksek kullanılabilirliğe sahip olup aynı zamanda stirenik olanlara göre daha yüksek stabilite sunar. Poliolefin polimerlerin eklenmesi genellikle bitümün sertliğini ve iyi bir tekerlek izi direncini artırır [3,4,6]. Bu nedenlerden dolayı plastomerler, katkı maddesi ticari pazarının yaklaşık %15'ini temsil ettikleri PmB'lerde öncü bir rol oynamaktadır. Geri kazanılmış polietilen, düşük yoğunluklu evsel atık polietilen (PE) taşıma torbalarından geri kazanılır. Punith ve Veeraragavan, 80/100 penetrasyon sınıfı asfalt bağlayıcıya farklı oranlarda PE ilave ederek bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir [7].

Karışımlar, Hamburg tekerlek izi testleri, esneklik modülü testleri, dolaylı çekme testi ve sınırsız dinamik sürünme testi kullanılarak test edildi. Sonuç analizi, PE ile modifiye edilmiş asfalt karışımlarının, geleneksel karışımlara göre daha iyi performans özellikleri sergilediğini gösterdi. Her ne kadar polietilen ve polipropilen en yaygın kullanılan plastomerler olsa da bunların polar olmayan yapıları bitümle uyumluluk sorunlarına neden olmakta ayrıca kristalleşme eğilimleri de bitümle etkileşimi derinden kısıtlamaktadır [8,9]. Termoplastiklerin uyumluluk sorunlarının yanı sıra bu tür polimerler bitümün elastikiyetini arttırmada da başarısız olmuştur [4]. Uyumluluk ve kristalleşme problemlerini önlemek amacıyla diğer termoplastik türleri de piyasaya sürülmüştür. Prensip olarak, bu modifiye edilmiş polimerler, asetat gruplarının eklenmesiyle, vinil asetat grubu içeriği %14'ten yüksek olan etilen vinil asetat (EVA), etilen metilakrilat (EMA) ve etilen bütül akrilat (EBA) üretilerek elde edilir. Bu polimerlerde bulunan ester grupları asfaltın yapısındaki polariteyi artırır ve kristalleşme eğilimlerini azaltır [3].

Bu iki durum katkı ile asfalt bağlayıcının uyumunu ve depolama stabilitesini artırır. Genel olarak, plastomerlerin bitümlü matris ile uyumluluğuna ilişkin olarak, ester fraksiyonu ne kadar yüksek olursa, daha düşük bir kristallik elde edildiğine inanılmaktadır. Ancak kristallik derecesinin dikkatli bir şekilde dengelenmesi gerekir. Kristallik derecesi düşükse, kristaller bitümlü fraksiyonla kenetlendikten sonra oluşan kafes erken bozulma eğilimi gösterir. EVA'da ise, optimal kristallik derecesi %14 ile %28 arasında değişen vinil asetat yüzdesi kullanılarak sentez gerçekleşir. Bununla birlikte, EVA ve diğer benzer polimerler kullanılarak elde edilen uyumluluk gibi gelişmiş özelliklere rağmen, polimer ilaveli bitümün elastik geri dönme sorunu hala devam etmektedir [3,4,10]. Ayrıca, asetat içeriğine bağlı olan EVA'nın camsı geçiş sıcaklığı, asfaltın düşük sıcaklık özelliklerini önemli ölçüde iyileştirecek kadar düşük değildir [11]. Bu bağlamda Ameri ve arkadaşları, asfaltın düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncinin %2 ila %4 arasında değişen EVA ilavesiyle artırılabilirliğini, buna karşılık yaklaşık %6 EVA ilavesiyle azaldığını göstermiştir [12].

Termoplastik elastomerler, esneme nedeniyle kalıcı deformasyona karşı direnebilir ve yük kaldırıldığında elastik olarak eski haline döner [4]. Genel olarak modifiyer olarak kullanılan termoplastik elastomerler, mono- veya di-olefinlerin blok kopolimerleridir. Mono-olefin birimi olarak mezomer olarak stiren molekülü kullanılırken, diolefin

olarak normalde bütadien veya izopren birimi kullanılır. İlgili elastomerlere stiren bütadien stiren (SBS), stiren izopren stiren (SIS), stiren-etilen/bütülen-stiren (SEBS) adı verilir. Termoplastik elastomer yapısı genellikle doğrusaldır ve zincirler arası zayıf bağlantı ile karakterize edilir. Bununla birlikte, radyal SBS kopolimeri asfalt bağlayıcı katkı maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

SBS içerisindeki polistirenik bloklar polimerlerin sağlamlığından sorumluyken, polibütadien bloklar elastikiyet verir. Polistirenin (PS) camsı geçişinin üzerindeki sıcaklıklarda ($T_g = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) polistiren yumuşar ve bunun sonucunda PS alanları zayıflar. Bu da asfaltın işlenebilirliğini artırır. Oda sıcaklığına soğutulduktan sonra stirenik bloklar yeniden bir araya gelerek sağlamlık ve esnekliği geri kazandıran sert alanları yeniden oluşturur. SBS polimeri eklendiğinde, asfalt ve SBS arasında bazı etkileşimler meydana gelir. Polistiren bloklar bitümün hafif bileşenlerini emerek şişer ve bu da bitümün sertleşmesine neden olur [13,14].

SBS'nin asfalt bağlayıcı içerisinde nispeten iyi dağılılabirliği (saf bitüm kompozisyonuna bağlı olarak) ve kabul edilebilir maliyeti SBS'yi bir asfalt katkısı olarak popüler hale getirmiştir. Birçok çalışma, asfalt bağlayıcıya SBS eklenmesinin bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklığını artırdığını, penetrasyon değerini bir miktar azalttığını, viskoziteyi artırdığını, termal duyarlılığı ve Frass kırılma noktasını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, SBS'nin kısa ve uzun süreli yaşlandırma ile simüle edilen oksidasyon sürecinden kaynaklanan sertlik artışını hafiflettiği ve RTFO (Dönel İnce Film Halinde Isıtma) işlemlerini takiben neredeyse orijinal özelliklerini koruduğu gözlemlenmiştir.

SBS konsantrasyonu, PmB özelliklerinde temel bir rol oynar. Asfalt modifikasyonu %7'ye kadar elastomer eklenerek yapılabilir ve bazı durumlarda farklı polimerler eş zamanlı olarak kullanılabilir. Yumuşak ve orta sertlikteki modifikasyonlar için polimer miktarları %4,5'ten azdır (penetrasyon değerine göre; yumuşak sertlikteki modifikasyon için yaklaşık %3 ve orta sertlikteki modifikasyon için %4,2). Sert, bir başka ifadeyle şiddetli modifikasyonlar için eklenen miktarlar %5'ten daha yüksektir. Düşük konsantrasyonlarda SBS asfalt içinde ayrı bir faz olarak dağılırken, SBS konsantrasyonunun artırılması bir faz dönüşümüne neden olur ve birbirine kenetlenmiş iki sürekli faz elde edilir: Birincisi tipik olarak bitüm bakımından zengin faz ve SBS bakımından zengin fazdır. İkincisi ise iki alt faz ile karakterize edilir; biri şişmiş bir polibütadien matris ve polistiren alanlarından oluşur [13]. Asfalt modifikasyonu için

SBS kopolimerlerinin kullanımının kanıtlanmış birçok faydası olmasına rağmen, hala mükemmel değildir. Örneğin, asfalt ve SBS arasındaki uyumluluk her zaman o kadar iyi değildir ve düşük miktarda polimer içeren asfaltlar için bile SBS modifiyeli asfaltın depolama stabilitesi kararsızlığı yapılan çalışmalarda gözlenmiştir [15–17]. Başka bir deyişle, farklı baz bitümlerle aynı düzeyde uyumluluk elde edilemeyebilir. Bu bağlamda Airey, SBS/asfalt karışımlarında bitümün hafif bileşenlerini absorbe etmek için termoplastik elastomerler ve asfaltenler arasında bir rekabet olduğunu gözlemlemiştir [14]. Yetersiz miktarda hafif bileşen, modifiye bitümde faz ayrışmasına neden olur. Ayrıca, uyumlu ve stabil bir SBS modifiye asfalt üretmek için yüksek aromatik içeriğin yararlı olabileceği belirtilmiştir [18]. Bu bağlamda, aromatik yağların eklenmesiyle SBS ve düşük aromatik içeriğe sahip bazı bitümler arasındaki uyumlulukta bir iyileşme sağlanabileceği gözlemlenmiştir [19]. Bununla birlikte, modifiye asfalttaki çok yüksek aromatik içerik (%70-80) bazı polistiren blokların şişmesine ve anti plastikleşmesine (yani camsı geçiş sıcaklığında artışa) yol açabilir [20], bu da modifiye bitümün ortaya çıkan özellikleri için iyi değildir. Lu ve arkadaşları, %50-60 aromatik bileşen içeren bitümler için doğrusal SBS'li karışımların radyal SBS kopolimerine göre daha fazla stabilite sağladığı sonucuna varmıştır [21].

Polimerin kimyasal yapısı ve konsantrasyonuna ek olarak, polimerin moleküler ağırlığının da asfalt/polimer uyumluluğu açısından büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Molekül ağırlığındaki artışın entropiyi ve karışım stabilitesini azalttığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, Lu ve arkadaşları tarafından benzer katkı oranlarına sahip lineer ve radyal SBS'ler, ilgili karışım stabilitelerini incelemek için kullanılmıştır. Doğrusal SBS kullanımının radyal olana göre daha yüksek stabiliteye sahip bir karışım ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan doğrusal SBS'nin dallanmış olana göre daha düşük moleküler ağırlığına atfedilmiştir.

Asfalt katkısı olarak kullanılan bir diğer tip polimer ise termoset plastiklerdir. Termoset plastikler (TP), ısıtıldığında katı hale dönüşen veya sertlik kazandıran polimerlerdir. Sertleşmeden önce, TP molekülleri termoplastik moleküller ile aynı doğrusal bir yapıya sahiptir, ancak moleküllerinin boyutu önemli ölçüde daha küçüktür. TP molekülleri kimyasal olarak aktiftir. Çift (doymamış) bağlar ya da kimyasal olarak aktif diğer gruplar içerirler. Bu nedenle, belirli koşullar altında (ısıtma, ışınlama veya sertleştirici ekleme sırasında) termoset molekülleri birbirleriyle reaksiyona girer ve sürekli bir ağ oluşturur. Epoksi, fenol-formaldehit, karbamit,

polyester, silikon ve diğer reçineler TP'ye aittir [22]. Epoksi termoset polimerler asfalt ile harmanlandığında modifiye asfaltın, asfaltın özelliklerinden ziyade epoksinin özelliklerini sergilediği gösterilmiştir [6]. Asfalt, termoset polimerin özelliklerini sergilediğinden modifiye edilmiş bağlayıcının kullanımı için mevcut süre sınırlıdır ve büyük ölçüde karıştırma sıcaklığı belirleyicidir. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, kullanım süresi o kadar kısa olur. Termoset ilaveli asfalt üretildikten sonra 'kürlenmeye' başlar ve uygulandıktan sonra mukavemetini artırır (sertleşir). Kürlenme süresi ortam sıcaklığına göre değişir. Ortam sıcaklığı ne kadar yüksek olursa kürlenme süresi de o kadar uzun olur. Kürlenme tamamlandıktan sonra, asfaltı yumuşatacak olan gelecekteki sıcaklık artışı, termoset ilaveli bağlayıcının sertliğini hiç etkilemez. Tamamen kürlenmiş bağlayıcı, viskoz davranış göstermeyen elastik bir malzeme olarak tanımlanır. Isıyla sertleşen plastikler içeren PmB'ler agregalara nispeten yüksek yapışma özelliğine ve yüksek mukavemete sahip olmalarına rağmen, asfalt kaplama uygulamaları için yaygın değildir. Bunun nedeni, ilk olarak, polimerler girdiğinde uygulanan sertleşme nedeniyle PmB'nin özelliklerinin neredeyse hemen bozulmasıdır. İkinci olarak ise, PmB'nin sertliği düşük sıcaklıklarda artar, bu da termal hassasiyetin artmasına neden olur. Üçüncü olarak ise, TP kullanımı sistemi karmaşılaştırır. Tüm bu maddelere ek ve son olarak, termoset plastiklerin etkinliği genellikle asfalttaki büyük kullanım miktarlarında (ağırlıkça% 10'dan fazla) ortaya çıkmaktadır. Bu durum maliyet açısından da olumsuzluklar doğurmaktadır. Tüm bu dezavantajların dışında, ısıyla sertleşen polimer modifiye bitüm ile üretilen asfalt karışımları mükemmel yapışma kabiliyetine, deformasyona karşı mükemmel direnç, mükemmel yorulma performansına ve yüksek rijitlik modülüne sahiptir [2].

Asfalt katkısı olarak yaygın olarak kullanılan maddelerden birisi de doğal kauçuk polimerleridir. Doğal kauçuk polimeri, izopren moleküllerinin kimyasal reaksiyonu yoluyla kolayca sentezlenmektedir. Elde edilen bileşik, yüksek moleküler ağırlığa sahip $(C_5H_8)_n$ kimyasal formüllü cis-1,4-poliizopren, doğal kauçuğuna benzemektedir [23,24]. Poliizoprenin tekrarlanan her biriminde, çift bağın varlığı polimerin kolayca vulkanizasyon sürecine girmesini sağlar. Vulkanizasyon, doğal kauçuğun özelliklerini bir termosete dönüştürmek için sülfür eklenmesi sürecidir [25]. Fiziksel açıdan bakıldığında, poliizoprenin karmaşık moleküler zincirlerinin varlığı doğal kauçuğa büyük bir elastikiyet ve esneklik özellikler kazandırır [26]. Doğal kauçuğun pratik uygulaması için vulkanizasyon gereklidir. Ancak bu süreçte kauçuk,

zincirler arasında disülfid bağları oluşturarak serbestlik derecesini sınırlar ve zincirler hızla sıkışır. Böylece kauçuk, elastik kuvvetteki artış nedeniyle daha sert ve daha az uzayabilir hale gelir [27].

Katkı maddesi olarak araştırılan polimerlerden bir diğeri olan doğal kauçuk lateks, asfalt endüstrisinde 30 yılı aşkın bir süredir uygulanmaktadır ve asfaltın termal hassasiyetini, esnekliğini, stabilitesini ve soyulma özelliklerini geliştirerek nihai performansını iyileştirmektedir. Termal hassasiyet açısından, düşük sıcaklıklarda meydana gelen gerilmeleri dağıtmaya yardımcı olarak asfalt betonun çatlamasını önlerken, yüksek sıcaklıklarda bir membran görevi görerek asfalt akışını kontrol eder ve kayma direncini artırır [28]. Buna ek olarak, doğal kauçuk lateksin doğal elastomer özellikleri, asfalt betonun uzun vadeli kaplama performansını iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamıştır [29].

Asfalta kauçuk eklenmesinin sadece tekerlek izi direncini arttırmakla kalmadığı, aynı zamanda esneklik modülündeki artışla yorulma ömrünü de arttırdığı tespit edilmiştir [30]. Hem Marshall yöntemi hem de döner kompaktör kullanılarak yapılan bir çalışmada asfalt betonunun mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, doğal kauçuğun asfalt betonlarında optimum bağlayıcı içeriğini azalttığı, yoğunluğunu ve stabiliteyi artırdığı gösterilmiştir [31]. Başka bir bakış açısıyla, sıvı doğal kauçuğun (LNR) asfaltı modifiye etmek amacıyla lateksten daha etkili olduğu bulunmuştur. Bunun temel nedeni, LNR'nin bir bağlayıcı ile daha kolay karışması ve homojen bir bağlayıcı elde edilmesidir [32]. Bu formda, doğal kauçuk geleneksel formuna kıyasla daha fazla faydaya sahiptir ve karışımın özellikleri sentetik kauçuklarla üretilenlerle karşılaştırılabilir.

Sentetik kauçuk, petrol ve diğer minerallerden sentezlenerek üretim tesislerinde üretilen insan yapımı bir kauçuktur. Sentetik kauçuk temelde bir polimer veya yapay bir polimerdir. Stres altında elastik esneme kabiliyeti veya deformasyona uğrama özelliğine sahiptir, ancak aynı zamanda kalıcı deformasyon olmadan önceki boyutuna geri dönebilir. Stiren bütadien kauçuk (SBR), poliizopren ve polibütadien, polikloropren ve lastik kauçuk günümüzde yaygın olarak kullanılan sentetik kauçuklardan bazılarıdır. Söz konusu kategorilerden, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ELT'ler) elde edilen sentetik kauçuk, hem asfaltlama hem de endüstriyel uygulamalar için kauçuk ilaveli asfalt üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bugüne kadar birçok çalışma sentetik kauçukları farklı bakış açılarından incelemiştir. Bu

Çalışmalardan, kauçuğun boyutu ve içeriği [33–35], kimyasal yapı [36,37], partiküllerin yüzey özellikleri [38], karışım üretim yöntemi ve sıcaklık [39] dahil olmak üzere birçok faktörün kauuklu bağlayıcıların performansını ve mekanik özelliklerini etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

Yukarıda bahsedilen faktörler arasında muhtemelen en önemlisi bağlayıcıdaki optimum kauçuk yüzdesidir. Farklı miktarlarda kauçuk içeren karışımların performansını ve mekanik özelliklerini karşılaştıran birçok araştırma çalışması yapılmıştır. Ancak, bu büyük ölçüde uygulama yöntemine (kuru veya ıslak), asfalt karışımlarında ne zaman kullanıldığına ve temel bağlayıcının özelliklerine bağlıdır. Kauçuk ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıyı ASTM D6114 şartnamesi, saf bağlayıcı ve minimum %15 kırıntı kauçuktan (toplam karışımın ağırlığına göre) oluşan malzeme olarak tanımlamaktadır [40]. Buna ek olarak, birçok çalışmada, yaklaşık %4 (asfalt ağırlığına göre) gibi düşük bir kauçuk içeriğinin bağlayıcının performansı ve mekanik özellikleri üzerinde neredeyse hiçbir etkisi olmadığı veya en azından önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varırken, %20'den fazlasının uygun olmadığı görülmüştür.

Asfalt bağlayıcı modifikasyonunda doğal kauçuk kullanımına ilişkin avantajlara rağmen, büyük endüstriyel ölçekte kullanımını sınırlayan bazı dezavantajlar da mevcuttur. Doğal kauçuk diğer biyopolimerlere kıyasla oldukça değerli bir biyo-malzemedir, bu nedenle doğal kauçuk sentetik kauçuk olarak ticarileştirilmiştir. Bunun başlıca nedeni, mevcut üretilen miktar ile talep arasındaki büyük farktır. Başka bir açıdan bakıldığında, çeşitli çalışmalar asfaltlama uygulamaları için doğal kauçuklarla modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar hakkında bazı faydalar göstermiş olsa da, performans sıcaklık aralığı boyunca asfalt beton performansı ve mekanik özellikleri ile ilgili hala bazı şüpheler vardır [31].

Yukarıda bahsedildiği gibi farklı PmB'lerin mekanik, reolojik ve yaşlanma özelliklerinin, sıcaklık hassasiyetinin, morfolojisinin ve termal davranışının sistematik olarak incelenmesi bazı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır [41–45]. Öncelikle, polimer modifikasyonunun bitümün daha iyi elastik geri kazanım, düşük sıcaklıklarda daha yüksek çatlama direnci ve yüksek sıcaklıklarda daha yüksek tekerlek izi direnci gibi bazı özelliklerini geliştirdiği gösterilmiştir [44]. İkinci olarak, termal kararsızlık ve PmB'nin faz ayrımı sorunları gibi bazı dezavantajlar gözlemlenmiştir [17,27]. PmB'nin dezavantajlarının üstesinden gelmek için ilk girişimler 1990'ların başında Giavarini ve arkadaşlarının PmB'lerin polifosforik asit (PPA) eklenerek stabilize

edilebileceğini iddia etmesiyle başlamıştır [46]. Araştırmacılar, PPA'nın bitüm yapısını soldan jele değiştirerek polipropilenle modifiye edilmiş bitümlerin depolama stabilitesini artırmaya yardımcı olabileceğini ön görmekteydi. O zamandan beri, PmB'lerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. Bitüm ve polimerlerin fiziksel karışımlarına ek olarak, bağlayıcı özelliklerini geliştirmenin bir başka yolu da, saf bitümün özelliklerini değiştirmek için kimyasal maddeyi bir katkı maddesi olarak kullanan kimyasal modifikasyondur.

Bugüne kadar asfaltın kimyasal modifikasyonu amacıyla organo-metalik bileşikler, sülfür (S), polifosforik asit (PPA), sülfonik asit, karboksilik anhidritler, silanlar, tiyoüre dioksit, nanokompozit ve reaktif polimerler gibi birçok kimyasal madde tanıtılmıştır. Ancak, yukarıda bahsedilen kimyasal bileşiklerden sadece birkaçı pratikte kullanılmıştır. Kükürt (S), polifosforik asit (PPA), reaktif polimerler, maleik anhidrit (MAH) ve polimer/kil veya polimer/katmanlı silikat (PLS) nanokompozitleri en yaygın kimyasal maddelerdir [2,47].

Bu kısma kadar kullanılan katkı maddelerinin çeşitliliği ve genel olarak asfalt içerisindeki görev ve etkileri açıklanmıştır. Bu kısımdan sonra yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri ile son zamanlarda yapılmış çalışmaların içerikleri sunulmuştur.

Şengöz ve Işıkyakar yapmış oldukları çalışmada, stiren-butadien-stiren (SBS) ve etilen vinil asetat (EVA) kopolimerleri içeren modifiye asfaltın laboratuvar çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Modifiye bağlayıcı numuneleri, polimerin cinsine göre çok amaçlı laboratuvar mikseri yardımıyla hazırlanmıştır. 50/70 penetrasyon dereceli saf asfalt, SBS ve EVA polimerleri ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Numunelerin özellikleri ve morfolojisi, geleneksel ve ampirik test yöntemleri ve floresan mikroskopu kullanılarak belirlenmiş ve karakterize edilmiştir. SBS ve EVA modifiyeli bağlayıcı içeren sıcak karışım asfaltın (HMA) mekanik özellikleri de analiz edilmiş ve saf asfalt içeren HMA ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, modifiye asfaltların morfolojisi ve özelliklerinin yanı sıra polimer modifiye HMA'nın mekanik özelliklerinin, polimer tipine ve polimer içeriğine bağlı olduğunu göstermiştir. Düşük polimer içeriklerinde numuneler, sürekli bir bitüm fazında dağılmış polimer parçacıklarının varlığını ortaya koyarken, yüksek polimer içeriklerinde sürekli bir polimer fazı gözlemlenmiştir. Polimer modifikasyonu, saf asfaltın penetrasyon, yumuşama noktası, sıcaklık duyarlılığı vb. gibi geleneksel özelliklerini geliştirmiştir. Ayrıca SBS modifiyeli asfalt

bağlayıcı ile hazırlanan HMA'nın Marshall stabilite gibi mekanik özelliklerinin artan polimer içeriği ile arttığı sonucuna varılmıştır [48].

Başka bir çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, SBS modifiyeli asfalta kükürt ilavesi, modifiye bağlayıcılarda kimyasal olarak vulkanize edilmiş SBS ağ yapısının oluşmasıyla sonuçlanmış ve bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı iyileştirilmiş ve sıcaklık hassasiyetleri büyük ölçüde azaltılmıştır. SBS içeriğinin asfaltların reolojik özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır. SBS ile modifiye edilmiş asfaltların reolojik özellikleri büyük ölçüde kükürt seviyesine bağlıdır. Artan kükürt seviyeleri, modifiye bağlayıcılarda çapraz bağlanma yoğunluğunun artmasına neden olmuş ve sonuç olarak SBS ile modifiye edilmiş asfaltın reolojik özellikleri iyileştirilmiştir. Üç farklı SBS yapısı ile modifiye edilen asfaltların özellikleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. SBS yapısı, kükürt ilavesiyle iyileştirilen SBS ile modifiye edilmiş asfaltların uyumluluğunu ve depolama stabilitesini etkilemiştir. Dönel viskozimetre ile belirlendiği üzere asfalt viskozitesindeki artış, kükürt ilavesinden önceki ve sonraki SBS içeriğiyle doğrudan orantılı değildir. Optik mikroskop ile karakterize edilen SBS ile modifiye edilmiş asfaltların morfolojisi, SBS ile modifiye edilmiş asfaltın uyumluluğunun ve depolama stabilitesinin kükürt ilavesiyle iyileştirildiğini göstermiştir [15].

Polimer katkıların anti-oksidatif materyaller olarak kullanımları nispeten belirsizliğini korumaktadır. Yapılan çalışmada, yol kaplama yapımında kullanılan polimer modifiyeli asfaltların yaşlanma nedeniyle morfolojisinde ve reolojik tepkisinde meydana gelen değişiklikleri araştırmak amaçlanmıştır. Bir elastomer (radyal stiren bütadien stiren, SBS) ve bir plastomer (etil vinil asetat, EVA) polimeri, üç polimer konsantrasyonunda bir saf asfalt ile karıştırılmıştır. Asfaltlar RTFOT ve PAV yöntemleri ile yaşlandırılmıştır. Sonuçlar, SBS ile modifiye edilmiş asfaltın morfolojisinin, polimer konsantrasyonu ve dispersiyonun bir fonksiyonu olarak yaşlanmayla birlikte bozulduğunu, daha yüksek dispersiyonun daha dirençli olduğunu göstermektedir. EVA ile modifiye edilmiş asfaltın morfolojisi, polimer konsantrasyonuna bakılmaksızın düşük yaşlanma duyarlılığına sahip olmuştur. EVA ile modifiye edilmiş asfaltların MSCR sonuçları, geri kazanılmayan sünme uyumluluğu değerlerinde bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. SBS ile modifiye edilmiş asfalttaki polimer omurgasının bozulması durumu asfaltın sertleşmesini, bitüm fazında dağılan ve ağ oluşturan polimer fazı kadar etkilemektedir. Ayrıca, elastomer

için, ortalama geri kazanım yüzdesi (%R), morfolojinin yaşlanmayla birlikte değişmesiyle orantılıdır. Bu nedenle, polimer ağının bütünlüğünün değerlendirilmesinde değerli bir reolojik indeksi olarak ortalama geri kazanım yüzdesinin kullanılması (%R) savunulabilir [49].

Bitüm modifikasyonunda atık malzemeler çokça tercih edilmektedir. Literatür taramasının bundan sonraki bölümünde ağırlık olarak atık malzemelerin kullanımı ile ilgili olan çalışmalara yer verilecektir. Tez konusunun paralelinde bir ilerleme kaydedilmesi amaçlanmıştır.

Atık  r nlerin asfalt bağlayıcı ve asfalt karışımlarının üretiminde kullanımı ekonomik ve çevresel faydaları nedeniyle yaygınlaşmıştır. Özellikle geri dönüştürülmüş atık plastiğin asfalt bağlayıcılarda ve karışımlarda kullanılması giderek daha fazla ilgi görmektedir. Yapılan bir derleme çalışması, asfalt modifikasyonunda kullanılan çeşitli atık plastik formlarının analizlerini ve karışılaştırmalarını ve hem tekli hem de kompozit modifikasyonlar için atık plastiğin asfalt karışımlarına dahil edilmesine yönelik yaklaşımları sunmaktadır. Çalışmada atık plastiklerin, asfalt bağlayıcıların ve asfalt karışımlarının performans özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Genel olarak, plastik atıkların asfalt karışımlarına dahil edilmesi, yüksek sıcaklık performansını önemli ölçüde artırmakta ve potansiyel ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır. Modifiye asfaltın performansı büyük ölçüde atık plastiğin kaynağı, atık plastik dozajları, karıştırma koşulları ve atık plastik için ön arıtma yöntemleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bunlara ek olarak, bu makale, karışımların stabilitesi, düşük sıcaklık performansı, modifikasyon mekanizması ve laboratuvar problemleri dahil olmak üzere atık plastikle modifiye edilmiş asfalta yönelik mevcut zorlukları da tartışmaktadır. Katkı maddeleri ve işlevselleştirme gibi kimyasal yöntemlerin kullanılması, atık plastikler ile bağlayıcı arasında daha iyi etkileşimler sağlamanın yanı sıra atık plastiklerin daha yüksek yeterlilikte kullanım oranına ulaşmanın etkili bir yolu olarak kabul edilmektedir. Her iki yöntem de stabilite ve yüksek performansla atık plastikle modifiye edilmiş asfalt üretmek için alternatif seçenekler sunsa da, karışımlarda kullanılan malzemelerin optimum oranı ve kompozitle modifiye edilmiş asfaltın mikro ölçekteki mekanizması açık değildir ve daha fazla araştırılmalıdır [50].

Son zamanlarda plastik atıkların, çevresel olarak meydana getirdiği olumsuz etkiler tartışılmaktadır. Bu olumsuzlukları azaltmak için plastik şişe atıklarının ve diğer yerel

malzemelerin yeniden kullanımı önem arz etmektedir. Bu makalede yazarlar, sıcak karışım asfalt (HMA) türü olan aşınma tabakasına (AC-WC) katkı maddesi olarak plastik şişe atıklarından elde edilen polietilen tereftalat (PET) kullanımını araştırmıştır. PET içeren AC-WC numunesi, numunelerin Marshall parametrelerini belirlemek için ıslak yöntem kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada 60/70 penetrasyon sınıfı asfalt kullanılmıştır. Ön çalışmadan elde edilen optimum asfalt içeriğinin (OAC), toplam asfalt ağırlığının %5,7'si olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, plastik şişe atığı kullanıldığında AC-WC karışımının mukavemetinin arttığını göstermektedir, bu da stabilitedeki artışla açıklanmaktadır. Bu bulgu, plastik şişe atıklarının ve diğer yerel malzemelerin yol kaplama malzemesi olarak alternatif bir kullanıma sahip olduğunu göstermektedir [51].

Bir başka atık malzeme olan atık lastiklerin geri dönüşümü, araştırmacıların dünya çapında ele aldığı en büyük endişelerden biridir. Yol malzemeleri alanında çeşitli çözümler üzerinde çalışılmış ancak bunların hepsi büyük ya da küçük bazı sorunlar ortaya koymuştur. Yapılan bir çalışmada, asfalt modifikasyonu için bileşiklerin üretiminde atık lastiklerden kırıntı kauçuğun geri dönüştürülme potansiyeli değerlendirilmiştir. Üç farklı bileşikle modifiye edilmiş asfalt ve bir referans SBS ile modifiye edilmiş asfalt üzerinde fiziksel, reolojik ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, PG, kompleks modül, reolojik parametreler ve yorulma direnci laboratuvarında farklı yaşlanma seviyelerinde ölçülmüştür. Sonuçlar, atık kauçuk ve radyal SBS'den yapılmış bileşiğin ağırlıkça %6'sını içeren asfaltta, fiziksel özellikler, düşük sıcaklık davranışı, sertlik, dayanıklılık, esneklik, yaşlanma hassasiyeti ve yorulma direnci performanslarında önemli artışlar görülmüştür. Bulgular oldukça umut verici olarak değerlendirilmiştir ve gelecekteki araştırmalara rehber olacak niteliktedir [52].

Yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği gibi, elastomerler ve farklı plastomerler, bağlayıcının performansını artırmak için kullanılan en yaygın katkı maddeleridir. Ancak bu katkı maddeleri ile modifiye edilmiş asfaltın kararsız bir yapıda olduğu ve ayrışma problemlerine yol açtığı bilinmektedir. Asfalt, sıcak depolama sırasında yüksek derecede faz ayrımına maruz kalabilen öğütülmüş kauçuk (CR) ile modifiye edildiğinde ayrışma sorunu daha da kötüleşmektedir. Atık lastiklerden geri kazanılan CR'nin asfalta eklenmesi, bazı dezavantajlarına rağmen saf asfaltın özelliklerini kayda değer miktarda geliştirmektedir. Malzeme bileşenlerinin yoğunluklarındaki

değişiklikler aynı zamanda karışımların depolama stabilitesini de etkilemiştir. Depolama stabilitesi performansındaki artış, yumuşama noktası ve X-Ray görüntü analizi sırasında da gözlemlenen CR'nin homojen dağılımına atfedilmiştir. Ayrıca, dodesenil süksinik anhidritin (DDSA) dahil edilmesi, karışımların depolama stabilitesine karşı performansında önemli bir değişiklik sağlamıştır. Çalışma, akıllı ve sürdürülebilir kaplama malzemeleri için uygulanabilir ampirik tekniklere dayanmaktadır [53].

Ren ve ekibinin yapmış oldukları çalışmada, şişme-bozunma derecesinin öğütülmüş kauçukla modifiye edilmiş bitümün (CRMB) reolojik özellikleri ve termal piroliz davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 160 °C'de şişme sürecinde CRMB'nin denge viskozitesi 8 saatte 10,5 Pa.s'dir. 200°C'de bozunma prosedürü sırasında viskozite, 7,5 saatte maksimum 20,58 Pa.s değerine yükseldi ve 35 saat sonra kademeli olarak 11,09 Pa.s'lik sabit bir değere düştü. Şişme ve bozunma süreçleri CRMB'nin reolojik özellikleri üzerinde ters etki gösterir. Üstelik bozunma süreci CRMB'nin piroliz hızını hızlandırdı ancak toksik gaz CO ve hidrokarbonların salınımını engelledi [54].

Başka bir çalışma, asfaltın mekanik performansını arttırmak amacıyla selüloz ve arıtılmış atık selülozun kullanımını kapsamaktadır. Özellikle tarım-gıda endüstrisi atıklarından elde edilen selüloz, ligninin tamamen uzaklaştırılması için ön asit işlemine ve ağartma aşamasına tabi tutulmuştur. Mevcut araştırma, bu biyo-polimerin asfalt için modifiyer olarak etkinliğini göstermektedir. Asfaltın viskoelastik özelliklerini değerlendirmek için 25 °C ila 100 °C sıcaklık aralığında son teknoloji ürünü dinamik kayma reometresine dayanan temel reolojik testler yapılmıştır. Selüloz içeren agregalar, DFT seviyesinde kuantum mekaniği tabanlı hesaplamalar kullanılarak incelenmiştir. Oluşturulan agregaların rehabilitesinden sorumlu olan tüm yerleşik etkileşimleri ölçmek için Azaltılmış Yoğunluk Gradyanı analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelenmeye değer niteliktedir [55].

Bir başka çalışmada yine atık plastiğin asfalt modifikasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada, günümüzde hızlı altyapı büyümesi ve araç sayısının artması nedeniyle olumsuz trafik yüküne ve aşırı hava koşullarına dayanabilecek yolların inşa edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca atık plastiklerin bertarafı günümüzde büyük bir sorundur. Çalışmalar, asfaltta plastiğin etkili kullanımının orijinal özelliklerini iyileştirdiğini bulmuştur. Plastik, asfalta kuru işlem ve yaş işlem olmak üzere iki farklı

yöntem ile ilave edilmektedir. Araştırmaların çoğu kuru işlem üzerine yapılmıştır. Yaş işleme gelince, asfalta atık plastik poşetlerin eklenmesi konusunda bazı araştırma çalışmaları yürütülmüş ve tatmin edici sonuçlar bulunmuştur. Mevcut çalışma, reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için parçalanmış atık plastik su şişelerinin asfalt bağlayıcıya eklenmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmada plastik erime noktasına kadar ısıtılmakta, daha sonra sıvı plastiğe asfalt bağlayıcı eklenerek mekanik karıştırıcı yardımıyla iyice karıştırılmaktadır. Hazırlanan kompozit malzeme (yani plastik modifiye bitüm – PMB) üzerinde yumuşama noktası, duktilite, elastik geri dönme, penetrasyon, özgül ağırlık , parlama ve yanma noktası gibi laboratuvar testleri yapılmıştır . Devamında, ilave edilecek optimum plastik yüzdesinin belirlenmesi için aynı PMB numuneleri üzerinde Marshall stabilite testi yapılmıştır. Son olarak PMB numunesi ile orijinal asfalt bağlayıcı numunesi arasında karşılaştırma yapılmıştır. Mevcut çalışmada, asfalt bağlayıcının %5 ve %7,5 oranında PET plastikte değiştirilmesinin saf asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Marshall testi sonuçlarına göre %7.5 plastik ilavesinin, %5'e kıyasla daha fazla stabilite sağladığı belirlenmiştir. Bu deneysel araştırma sonucunda, PET plastiğinin %7,5'inin, asfaltın reolojik parametrelerinin iyileştirilmesi ve bakım süresinin azaltılması için esnek kaplamalarda asfalta eklenebilecek optimum yüzde olduğu tespit edilmiştir [56].

Polietilen tereftalat (PET) içme şişeleri, lastik lastikler ve beton, genellikle çöplüklere ve stok sahalarına atılan ve çevreye sürekli zarar veren çok yaygın belediye katı atıklarıdır. Bazı çalışmalar, atık PET'in, doğal agregalar içeren asfalt kaplamanın genel özelliklerini, özellikle de nemin neden olduğu hasar direncini iyileştirmek için kimyasal olarak bir katkı maddesine dönüştürülebileceğini göstermiştir. Ancak bu PET katkı maddesinin hala geri dönüştürülmüş beton agregaları (RCA) içeren asfalt için işe yarayıp yaramadığı açık değildir. Bu konuyu iyi bir şekilde ortaya koymak için, bu çalışmada ilk olarak atık PET'in kimyasal olarak geri dönüştürülerek CR ile modifiye edilmiş asfalt (CRMA) bağlayıcıyı değiştirmek için katkı maddesine dönüştürülmesi ve ardından bağlayıcının %100 kaba RCA içeren 13 mm maksimum agregalı taş mastik asfaltla karıştırılması için bir yol izlenmiştir. Karışımları hazırlamak için. PET katkı maddesinin bir dizi fizikokimyasal karakterizasyonundan sonra karışımın nem direnci, tekerlek izi direnci, düşük sıcaklıkta çatlama direnci ve yorulma direnci sistematik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, PET katkı maddesinin

asfaltın neme ve yüksek sıcaklıktaki deformasyona karşı direncini artırabildiğini ve ara yüzey bağlama katmanında nemin neden olduğu hasarı büyük ölçüde azaltmaya yardımcı olduğunu göstermiştir. Daha ayrıntılı olarak belirtmek gerekirse, RCA-CRMAM/1PET'in 72 saatlik daldırma sonrasında kalan Marshall stabilitesi (RMS) değeri, RCA-CRMAM'ın (%77,1) aksine %85'ten daha yüksektir; çekme mukavemeti oranı (TSR) ise RCA-CRMAM/1PET değeri %65,2'ye kıyasla %80'den fazlasını göstermektedir. Ek olarak, yalnızca %1'lik PET katkısı, RCA içeren asfaltın yüksek sıcaklıkta tekerlek izine karşı direncini artırmakta ve nemin neden olduğu hasardan sonra tekerlek izine karşı daha yüksek direnç sağlamaktadır. %1 PET katkısı, düşük sıcaklıktaki bir ortamda RCA-CRMAM'ın taşıma kapasitesinin artırılmasına yardımcı olmakta ve küçük gerilimlerde yorulma ömrünü geciktirmektedir. Genel olarak, PET katkılarının RCA içeren asfalta başarılı bir şekilde dahil edilmesiyle, atık PET, atık lastik kauçuğu ve atık betonun neden olduğu olumsuz etkileri hafifletmek için daha dayanıklı ve sürdürülebilir otoyol kaplamaları üretilebilir ve pratikte uygulanabilir olduğu saptanmıştır [57].

Kentsel atık malzemelerin sıcak karışım asfalt (HMA)'a katkı maddesi olarak kullanılması, istenmeyen atık malzemelerin etkin bir şekilde kullanılmasına ve bertaraf edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, iki atık malzeme, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve atık araç lastiklerinden elde edilen kauçuk (CR), performans iyileştirme, optimizasyon ve maliyet etkinliği açısından HMA'ya katkı maddesi olarak araştırılmıştır. Performans değerlendirmeleri rijitlik modülü karşılaştırılarak yapılmıştır. Geleneksel ve atık malzemeyle değiştirilmiş HMA karışımlarının rijitlik modülleri sünme deneyi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada asfalt bağlayıcı içeriğinin, katkı maddesi içeriğinin ve karıştırma yöntemlerinin etkisi de araştırılmıştır. Deney sonuçları, asfalt bağlayıcı içeriğindeki artışlarla birlikte rijitlik modülünde %22,4'lük bir artış olduğunu göstermiştir. Modifiye edilmiş HMA'lar, geleneksel HMA'lardan daha iyi (%5-15) sonuçlar sunmuştur. İki modifiye karışım arasında, LDPE modifiyeli karışımlar, CR modifiyeli karışımlara göre daha iyi mukavemet (yaklaşık 1,5 kat daha yüksek) göstermiştir. Karıştırma yöntemi-1, yöntem-2'ye göre %9,35 daha düşük sertlik modülü değerleri ile sonuçlanmıştır. Sonuçlar aynı zamanda asfalt bağlayıcının ve atık malzeme katkı maddesinin aşırı kullanımının rijitlik modülünü sırasıyla %21,9 ve %15'e kadar azalttığını göstermiştir. Ayrıca geleneksel HMA karışımlarına atık malzeme

katkılarının eklenmesinin karışımların viskozitesini arttırdığı, bunun sonucunda da rijitlik modülü açısından yük taşıma kapasitesinin arttığı gözlenmiştir [58].

Başka bir çalışmada, katkı maddelerinin sentezlenmesi için PET'in kimyasal geri dönüşümü gerçekleştirilmiş ve asfalt bağlayıcıyı değiştirmek için stiren-butadien-stiren (SBS) ile birlikte kullanılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcının (PS-MB) özellikleri, hem penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve depolama stabilite testleri dahil olmak üzere geleneksel bağlayıcı testleri hem de çoklu gerilim sürünme geri kazanımı (MSCR), tekerlek izi faktörü gibi Superpave bağlayıcı testleri yoluyla karakterize edilmiştir. ($G^*/\sin\delta$), yorulma faktörü ($G^*.\sin\delta$) ve düşük sıcaklık sünme rijitliği (S_m) gibi önemli reolojik göstergeler elde edilmiştir. Bu özellikler daha sonra saf asfalt bağlayıcı ve SBS (S-MB) ile modifiye asfalt bağlayıcıninkilerle karşılaştırılmıştır. PET katkı maddelerinin S-MB'nin fiziksel ve kimyasal yapıları üzerindeki etkilerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak ek analizler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar araştırmasının sonuçları, atık PET'ten türetilen katkı maddelerinin SBS modifiyeli asfalt bağlayıcı için modifiyer olarak kullanılmasının yalnızca atık PET'in geri dönüştürülmesi için işlevsel bir yol sağlamakla kalmayıp aynı zamanda bir kaplama malzemesi olarak SBS modifiyeli asfalt bağlayıcının reolojik özelliklerini de geliştirdiğini göstermiştir [59].

Son yıllarda atık yağlar bitüm ve bitümlü karışım modifikasyonunda çokça tercih edilmektedir. Bunda ana motivasyon atık yağın kolay elde edilebilir olması, çevreye zararının bertaraf edilebilmesi, ucuz olması gibi sebeplerdir. Aşağıda çeşitli atık yağlar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar verilmiştir.

Atık üretimine ilişkin çevresel kaygılar ve petrol rezervlerinin kademeli olarak azalması, yol kaplama endüstrisinde kullanılan bitümlerin kısmen yerini alabilecek yeni atık malzemelerin bulunmasına yol açmıştır. Araçlardan çıkan kullanılmış motor yağı, bu talebe cevap verebilecek bir atık üründür, ancak aynı zamanda asfalt karışımının tekerlek izi potansiyelini artırarak viskoziteyi büyük ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, daha yüksek miktarlarda atık motor yağı kullanıldığında asfalt karışımlarının gerekli performansından ödün vermemek için polimer modifikasyonu kullanılmalıdır. Bu çalışmanın amacı, 35/50 penetrasyon sınıfı asfaltın %10 atık motor yağı ve %5 stiren-butadien-stiren (SBS) ile modifiye edilmesiyle elde edilen bir asfalt bağlayıcı/karışımının performansının değerlendirilmesidir. Aynı zamanda, hızlı

pirolizden elde edilen biyo-yağ ve 64-22 PG'li bağlayıcının kısmi bir ikamesi olarak CR kullanıldığı önceki bir çalışmanın sonuçlarıyla da faydalı bir karşılaştırma yapılmıştır. Asfalt bağlayıcılar, Fourier kızılötesi spektrumları ve dinamik kayma reolojisi aracılığıyla test edilmiştir. Daha sonra elde edilen asfalt karışımlarının suya duyarlılığı, yorulma çatlağı direnci, dinamik modülü ve tekerlek izi direnci performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada incelenen yeni bağlayıcının asfalt karışımının performansını arttırdığı ve esnek kaplama inşaatı için mükemmel bir çözüm haline getirdiği sonucuna varılmıştır [60].

Günümüzde, sıcak karışım asfaltta (HMA) geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) malzemesinin kullanımına ilişkin temel sorun, HMA'da uygulanan RAP yüzdesini sınırlayan asfalt bağlayıcının yaşlanmasıdır. Bu bakımdan bağlayıcının gençleştirilmesi geri dönüşümün en önemli fakat en maliyetli kısmıdır. Bu makale, asfalt bağlayıcıyı gençleştirmek için gıda endüstrisindeki çöplüklerde ve nehirlerde sıklıkla kirletici bir atık malzeme olarak bulunan atık yemeklik yağın (WCO) kullanılmasını araştırmaktadır. Orijinal asfaltın, yaşlandırılmış asfaltın ve gençleştirilmiş asfaltın fiziksel özellikleri, yumuşama noktası, penetrasyon ve Brookfield viskozitesi dahil olmak üzere geleneksel asfalt bağlayıcı testleri ile ölçülüp karşılaştırılmış ve sonuçların değerlendirilmesi için istatistiksel analizler kullanılmıştır. 50/60, 40/50 ve 30/40 penetrasyon derecelerine sahip asfaltlar için kullanılacak atık yemeklik yağın optimum yüzdesi, sırasıyla %1, %3-4 ve %4-5 olarak belirlenmiştir. İstatistiksel analizler ayrıca saf asfalt ile gençleştirilmiş asfalt arasında önemli bir fark olmadığını da doğrulamaktadır [61].

Atık yemeklik yağların (WEO) bertarafı, hem çevresel hem de ekonomik sorunlar nedeniyle küresel bir sorun olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. WEO'nun rafine geri dönüşümü için yeni bir strateji sağlamak amacıyla bu çalışmada, ılık karışım asfalt (WMA) katkı maddesi olarak WEO'dan türetilen palmitamidin fizibilitesi araştırılmıştır. İlk olarak palmitamidin moleküler yapısı ve termodinamik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra farklı palmitamid içerikli bağlayıcılar hazırlanarak sıcaklık hassasiyeti ve reolojik özellikler tespit edilmiştir. Ek olarak, WMA karışımlarının mühendislik performansı araştırılmış ve WEO'dan türetilmiş palmitamidin çevresel faydaları, gaz kromatografisi-kütle spektrometresi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, WEO'dan türetilmiş palmitamidin faz geçiş sıcaklığının 98,87 °C olduğunu göstermiştir; bu, bir WMA katkı maddesi olması açısından büyük bir potansiyele sahip

olduğunu göstermektedir. Palmitamid, asfaltın akış aktivasyon enerjisini azaltarak nispeten düşük sıcaklıklarda inşaata uygun asfalt işlenebilirliği sağlamaktadır. Ayrıca palmitamidin sırasıyla hidrofobikliği ve dolgu etkisi nedeniyle WMA'nın nem hasarı direnci ve deformasyon direnci de artmıştır. Palmitamidin WMA'nın yorulma ve düşük sıcaklık performansını biraz zayıflatması beklenen bir durumdur. Ayrıca WEO türevli palmitamidin uygulanması, asfaltın uçucu organik bileşiklerini karıştırma aşamasında ve sıkıştırma aşamasında sırasıyla %40,3 ve %30,8 oranında azaltmaktadır. Çalışmadan elde edilen bulgular, yol mühendisliğinin sürdürülebilir gelişimine ve atık kaynakları genelgesine katkıda bulunmaktadır [62].

Bir başka çalışmada, atık asfalt kaplama malzemelerinin ve atık biyo-yagların verimli bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla biyo-yag gençleştiricinin bileşimi optimize edilmiştir. Atık biyo-yag gençleştiricinin gençleştirme verimliliği, reolojik özellikler ve kimyasal bileşimden faydalanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca gençleştirme verimliliği için nicel bir değerlendirme endeksi önerilmiştir. Sonuçlar, merkezi kompozit tasarımının ve tepki yüzeyi metodolojisinin gençleştiricilerin bileşimini optimize etmede etkili olduğunu göstermektedir. Gençleştirilmiş asfalttaki atık biyoyag dozajı %9'a kadar çıkmıştır. Diğer iki ticari gençleştiriciyle karşılaştırıldığında atık biyo-yag gençleştirici, yaşlanmış asfaltı daha etkili bir şekilde gençleştirmiştir. Yaşlandırılmış asfaltın reolojik parametreleri incelendiğinde gençleştirme verimliliğinin %100'e yakın olduğu belirlenmiştir. Atık biyo-yag gençleştirici, makromoleküler maddelerin oranını azaltarak yaşlanmış asfaltın performansını geri kazandırmıştır. Aromatiklerin, koloidal instabilite indeksinin ve karbonil fonksiyonel gruplarının gençleştirme etkinliği sırasıyla %57,1, %126,9 ve %78,7 olarak tespit edilmiştir [63].

Yalçın ve Yılmaz'ın yaptıkları çalışmada saf bağlayıcıların ve bu bağlayıcılarla hazırlanan modifiye bitümün çeşitli sıcaklık ve frekanslarda reolojik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada ana bağlayıcı olarak Batman'daki TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı saf bitüm kullanılmıştır. Atık yağlar katkı maddesi olarak %2, %4, %6, %8, %10, %12 ve %14 oranlarında kullanılmıştır. Saf ve modifiye asfalt, 4 farklı sıcaklıkta (40°C, 50°C, 60°C ve 70°C) ve 10 farklı frekansta (0,01 Hz ile 10 Hz arasında) dinamik kayma reometresi (DSR) testlerine tabi tutulmuştur. DSR testleri sonucunda atık motor yağı ile hazırlanan modifiye asfalt bağlayıcının, atık bitkisel yağ ile hazırlanan modifiye asfalt bağlayıcıya göre daha yüksek kompleks kayma modülü

ve daha düşük faz açısı değerlerine sahip olduğu, bu durumun daha yüksek elastik davranışlara işaret ettiği belirlenmiştir. Ayrıca karmaşık kayma modülü değerleri açısından atık bitkisel yağın %2 ve %3 katkı oranlarında daha etkili olduğu, atık motor yağı modifikasyonunun ise %2 ve %4 katkı oranlarında daha etkili olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak atık motor yağının modifiye asfalt bağlayıcı hazırlanmasında atık bitkisel yağa göre daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır [64].

Sun ve ekibinin yaptıkları makalede, atık yemeklik yağdan (WCO) içeren polimer modifiye asfalt bağlayıcının kimyasal ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. Öncelikle deney materyallerinin kimyasal bileşimi ve karıştırma mekanizması fonksiyonel grup perspektifinden analiz edilmiş ve biyo-yagların aktivasyon enerjisine etkisi araştırılmıştır. Daha sonra biyoyağların polimer modifiyeli asfaltın dönel viskoziteleri ve ilgili karışımların yapım sıcaklıkları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak, biyo-yag içeren polimer modifiye asfaltın kayma ve bükülme reolojik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, biyo-yag ve stiren-butadien-stiren (SBS) modifiye asfaltın esas olarak fiziksel olarak karıştırıldığını, biyo-yag ilavesinin SBS modifiye asfaltın aktivasyon enerjisini azalttığını göstermektedir. Ek olarak, biyo-yag içeren SBS modifiyeli asfalt daha düşük viskozite değerleri sunmuş ve ilgili karışımlarda da daha düşük inşaat sıcaklıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, SBS modifiyeli asfalta biyo-yag ilavesi kayma modülünü azaltmış ve eğilme sünme uyumluluğunu (bending creep compliance) arttırmıştır. Bu durum, biyo-yag'ın düşük sıcaklıktaki termal çatlama direnci performansı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu ve yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi direnci performansından da bir miktar ödün verdiği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, WCO bazlı biyo-yagların polimer modifiyeli asfalta dahil edilmesi, düşük sıcaklık sorunlarının daha önemli olduğu soğuk bölgelerde kullanılabilecek umut verici bir tekniktir [65].

Başka bir çalışmada, katkı maddesi olarak palm yağı yakıt külünün uygulandığı karışımdaki bağlayıcı yüzdesini azaltmak için atık yemeklik yağ, atık lastik kauçuk tozu ve palm yağı yakıt külünün eklenmesinin etkisine odaklanılmıştır. Bu üç modifiyer atık malzemelerden elde edilmektedir, piyasada kolayca bulunmakta ve ucuz fiyatlıdır. Atık malzemelerin geri dönüştürülmesine yönelik bu yöntem daha temiz bir çevrenin oluşması için pratik bir uygulama sunmaktadır. Modifiye bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerini kontrol etmek için AASHTO ve ASTM standardına dayalı laboratuvar araştırmaları yapılmıştır. Sonuçlar, endüstriyel ölçekte

kullanılacak yeni karışımın fizibilitesini değerlendirmek için kontrol numunesi olarak saf asfaltla karşılaştırıldı. Bu araştırmadan elde edilen sonuç, asfalt bağlayıcının %15'e kadar modifiye edilmesinin mümkün olduğunu ve bunun stabilite, akış ve tekerlek izi direnci açısından eşit veya daha iyi performans üretebileceğini göstermektedir. Bu çalışma, atık malzemeler kullanılarak geliştirilmiş modifiye bağlayıcı bileşimleri sunarak, esnek kaplama için alternatif bağlayıcının geliştirilmesinde ulaşım ve otoyol alanına doğrudan katkıda bulunmaktadır [66].

Son yıllarda, Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama (RAP), ekonomiye ve çevreye sağladığı faydalar nedeniyle esnek üstyapı inşaatında oldukça popüler hale gelmiştir. Bu çalışma, atık yemeklik yağ (WCO) ve atık motor yağının (WEO) geri dönüştürülmüş asfalt bağlayıcıya gençleştirici ilavesinin fiziksel ve reolojik etkilerini araştırmaktadır. Bu amaçla, katkı içermeyen geri kazanılmış bağlayıcı ve modifiye edilmiş RAP bağlayıcılarının özellikleri, yüksek ve orta sıcaklıklarda çeşitli deneysel yöntemler ile değerlendirilmiştir. WCO ve WEO modifiyeli asfalt üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon, düktilite ve viskozite deneyleri uygulanmıştır. Bu reolojik özelliklere ek olarak, Genlik Taraması, Frekans Taraması, MSCR, Doğrusal genlik taraması (LAS) testi ve Yüksek Sıcaklık Performans Derecelendirmesi (HTPG) Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, hem WCO hem de WEO'nun yaşlanmış asfaltın sertliğini azaltarak işlenebilirliğini ve viskoz davranışını geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, tekerlek izi direnci atık yağların eklenmesiyle azalmıştır. Bunun yanı sıra, WCO ilavesinin bağlayıcının yorulma çatlağı direncini WEO'ya kıyasla daha çok artırmıştır. Genel olarak, WCO, reolojik testlere göre sertleşmiş ve yaşlanmış bağlayıcı özelliklerini geri kazanma hususunda WEO'dan daha iyi performans göstermektedir [67].

Bir başka çalışmada atık plastikle modifiye edilmiş 40/50 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcıya atık motor yağı (WEO) eklenmesinin bağlayıcı performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Amaç, kullanılmış yağın plastik-asfalt bağlayıcı arasında uyumluluğu artırıcı madde olarak kullanılma olasılığını araştırmaktır. Saf ve modifiye bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, RTFOT ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) deneyleri uygulanmıştır. Atık motor yağı ilavesinin, saf asfalta kıyasla daha fazla miktarda plastik katılmasına olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yağ ilavesinin yaşlanma direncini arttırdığını ve düşük sıcaklıktaki çatlama direncini azalttığını göstermiştir [68].

Bir başka çalışmada, atık yemeklik yağ içeren mikrokapsüller (MicroWCO) üretilmiş, yaşlandırılmış asfaltın gençleştirilmesinde kullanılma olasılığı araştırılmıştır. MicroWCO'lar, kabuk malzemesi olarak metanol melamin formaldehitin (MMF) ön polimeri kullanılarak yerinde polimerizasyonla başarıyla üretilmiştir. Kapsüller, morfoloji, boyut, kabuk kalınlığı ve mekanik özellikler, emülsiyon hızı ve çekirdek/kabuk oranlarına göre değerlendirilmiştir. MicroWCO'ların asfaltın erimesi sırasında termal stabiliteye sahip olduğu ve tekrarlanan sıcaklık değişimlerinde bozunmadan kalabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca WCO'nun gençleştirici olarak yaşlanmış asfaltın içine kolayca nüfuz edebildiği gözlenmiştir. Yaşlanmış asfalt, gençleştirme işlemi sonrasında penetrasyon değeri, yumuşama noktası değeri ve viskozite değeri dahil olmak üzere orijinal özelliklerini geri kazanabilmiştir [69].

Bir başka çalışmada asfalt katkısı olarak atık kızartma yağı (WFO) kullanılmıştır. WFO ilavesi ile karışımın optimum bağlayıcı içeriği %5,125'ten %4,575'e düşürülmüştür. Böylece WFO modifiyeli asfalt ile inşaa edilen esnek üstyapılar, karışımda kullanılan asfalt oranının azalması nedeniyle daha sürdürülebilir kaplamalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca asfaltın WFO ile modifiye edilmesiyle yumuşama noktası değerleri azalmış, penetrasyon değerleri ise artmıştır. Modifiye asfalt numunelerinin çekme mukavemeti oranlarının tümü minimum şartname sınırı olan %80'in üzerinde değerler sunmuştur. Son olarak asfaltın WFO ile modifiye edilmesiyle asfaltın kendini iyileştirmesi için gerekli sıcaklık düşürülmüştür. WFO modifiye asfalt ile hazırlanan numuneler, referans numuneyle karşılaştırıldığında iyileşme oranlarının yüksek olduğu belirlenmiştir [70].

Bir başka çalışmada, atık bitkisel yağ ve atık motor yağındaki modifikasyonların saf asfaltın kimyasal bileşimi, fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan modifiye bağlayıcılar, atık bitkisel yağ ve atık motor yağının saf bağlayıcılara 7 farklı oranda eklenmesiyle hazırlanmıştır. Atık bitkisel yağ ve atık motor yağının ana kimyasal bileşimlerini ortaya çıkarmak için gaz kromatografisi-kütle spektrometresi kullanılmıştır. Saf bağlayıcıların ve atık yağ içeren bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve kuvvet duktilite (force ductility) testleri yapılmıştır. Atık bitkisel yağ ve atık motor yağı modifikasyonları ile bağlayıcıların reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi testleri yapılmıştır. Ayrıca, saf bağlayıcı ve modifiye bağlayıcıların fonksiyonel

grupları arasındaki farkları araştırmak için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi kullanılmıştır. Sonuç olarak, atık bitkisel yağ ve atık motor yağının saf asfalta ilavesi, asfalt karışımlarının viskozitesinde ve yumuşama noktasında düşüşlere neden olurken, penetrasyon değerinde artışa neden olmuştur. Ayrıca her iki karışım türünde de katkı maddesi içeriği arttıkça kompleks modül değerleri azalmıştır. Faz açısının artması bağlayıcıların daha viskoz bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Hem atık bitkisel yağ bağlayıcıda hem de atık motor yağı bağlayıcıda katkı miktarı arttıkça elastikiyet değerleri azalmıştır. Son olarak katkı miktarının artmasıyla bağlayıcıların deformasyon enerjisinin azaldığı tespit edilmiştir [71].

Genel olarak geleneksel gençleştiricilerin, yaşlanmış asfaltın eksik bileşenlerini karşılamak için birçok mineral yağ içerdiği söylenmektedir. Mineral yağlar, uzun vadeli bir yaşlanma sürecinden geçerek yaşlanmış asfaltın performansını geri kazanmasına yardımcı olabilmektedir. Ancak, mineral yağların daha yüksek geri dönüşüm sıcaklıklarında uçucu hale gelmesi daha kolaydır. Daha yüksek buharlaşma, gençleştirici etkisini azaltacak ve geri dönüştürülmüş asfalt karışımındaki (RAP içeriği %30'dan az) geri kazanılmış asfalt kaplamanın (RAP) oranını sınırlayacaktır. Bitkisel yağın ana bileşenleri düz zincirli yüksek yağ asitleri ve gliseritlerdir. Düz zincirli yüksek yağ asitleri ve gliserolün esterleri yüksek sıcaklıkta uçucu değildir. Bu nedenle bitümün mikro kimyasal bileşimini ve asfaltın kolloidal stabilitesindeki değişikliği geri kazanmak için kullanılabilirler. Bu çalışmada, madeni yağların, yemeklik atık mısır ve soya fasulyesi yağı ile değiştirilmesiyle iki yeni tür asfalt gençleştiricisi geliştirilmiştir. Ağırlıkça %2-10 oranında yaşlandırılmış asfaltın geri kazanılması için iki tür bitkisel ve mineral gençleştirici kullanılmıştır. Araştırmanın amacı, geri kazanılan asfaltın reolojik özelliklerini, yüksek sıcaklık ve yorulma performansını değerlendirmektir. Dinamik Kayma Reometresi Testi ve Dönel Viskozite Testi AASHTO ve ASTM standartlarına göre yapılmıştır. Ek olarak asfaltın çatlama direnci -12 ve -18°C'de eğilme kırış reometresi (BBR) testi kullanılarak değerlendirilmiştir. ANOVA'nın laboratuvar testi ve istatistiksel analizinin sonucu, bitkisel yağ gençleştiricilerin yaşlanmış asfaltın viskozitesini ve sertliğini etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir. Ek olarak, bitkisel yağ içeriği daha yüksek olduğunda gençleştirici madde, geri kazanılan asfaltın daha düşük viskoziteye ve sertliğe sahip olmasını sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci göz önüne alındığında,

yaşlanmış asfaltın geri kazanılmasında %6 ve %8 oranında bitkisel yağ kullanılması önerilmektedir [72].

Asfalt karışımların en önemli performans özelliklerinden ikisi adezyon ve kohezyondur. Bu çalışmada atık biyo-yag içeren asfalt karışımlarının performansları çeşitli laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Modifiye asfaltın morfolojisi, normal ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri de detaylı olarak incelenmiştir. Ağırlıkça %5-20 oranında biyo-yag ilavesi, viskoz halde bulunan asfalt bağlayıcıda küçük bir akma geriliminin ortaya çıkmasına ve soğutulmuş karışım için içsel sürtünme katsayısında bir azalmaya yol açmaktadır. Aynı zamanda, %5 biyo-yag ilavesi en uygun oran olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi bağlayıcının silikat yüzeyine yapışma mukavemetinde %16-21 oranında bir artış meydana gelmesidir. Ağırlıkça %15'e varan miktarlarda silika nanoparçacıklarının eklenmesi, akma gerilmelerinde daha önemli bir artışa ve ayrıca normal sıcaklıkta bağlayıcının sertliğinde ve elastikliğinde daha da büyük bir iyileşmeye neden olmaktadır. Ayrıca nanopartiküller bağlayıcının kohezyon mukavemetini %60'a kadar arttırmakta ve yüzeylerinin yapısına bağlı olarak yapışma özelliklerini çift yönlü olarak değiştirmektedir [73].

Asfalta yağ ilavesinde en yaygın kullanılan atık yağlardan birisi atık motor yağıdır. Her yıl tonlarca atık motor yağı doğaya salınmaktadır. Asfalt bağlayıcı daha önce atık motor yağıyla modifiye edilmiş ve daha düşük penetrasyon değerleri, daha düşük nem hasarı direnci ve daha düşük tekerlek izi performansı göstermiştir. Bu çalışmada, atık motor yağıyla modifiye edilmiş asfalt ilgili bu soru işaretlerini gidermek amacıyla üç farklı katkı maddesi araştırılmıştır. Polimer, kimyasal ve dolgu tipi (filler) katkı maddeleri olarak Elvaloy, polifosforik asit (PPA) ve sönmüş kireç (HL) kullanılmıştır. Atık motor yağıyla modifiye edilmiş asfalt, üç tip katkı maddesiyle birleştirilerek, viskozite, nem hasarı, dinamik-mekanik ve kimyasal testler kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, atık motor yağının eklenmesinin bağlayıcının kıvamını azalttığını, viskoziteyi azalttığını ve yüksek sıcaklık performansını bozduğunu göstermiştir. Elvaloy'un atık motor yağıyla modifiye edilmiş asfalta eklenmesi, asfaltı sıcaklık değişimlerine karşı daha az duyarlı hale getirmiş, performans derecesini artırmış, sertliği iyileştirmiş, tekerlek izi ve nemin neden olduğu hasarlara karşı direnci kuvvetlendirmiştir. Polifosforik asit ilavesi, atık motor yağı ile modifiye edilmiş bağlayıcının kıvamını iyileştirmiştir. Bağlayıcıyı sertleştirerek kompleks modül değerlerini büyük ölçüde artırmış ve faz açısı değerlerini azaltmıştır. PPA, asfaltın

neme duyarlılığını artırarak, yüksek sıcaklık performansını da geliştirmiştir. Sönmüş kireç, nem direncini ve bağlanma mukavemetini arttırmış ancak daha düşük dozajlarda yüksek sıcaklık performansını iyileştirmede daha az etkinlik göstermiştir. Sonuçlar, atık motor yağı ile bağlayıcı modifikasyonunun polifosforik asit, Elvaloy ve sönmüş kireç gibi diğer katkı maddeleri ile etkili olabileceğini göstermiştir [74].

Bilindiği üzere asfalt bağlayıcının yaşlanma özelliği zamana bağlıdır. Yapılan bir çalışmada 80/100 penetrasyon dereceli asfaltın zamana bağlı kısa süreli yaşlanma özelliği ve yüksek derecede yaşlandırılmış asfalt bağlayıcı performansı için atık motor yağının gençleştirme performansı araştırılmıştır. Penetrasyon derecesi 80/100 asfalttan eşit ağırlıkta dört numune hazırlanmıştır. İlk numune kalite gereksinimleri açısından kontrol edilmiştir. Diğer üç numune, sıcak karışım asfalt üretimi, taşıma ve sıkıştırma sırasındaki gecikmeyi simüle etmek için 85, 115 ve 145 dakika boyunca RTFOT kullanılarak yaşlandırılmıştır. Yüksek derecede yaşlandırılmış asfalt, ağırlıkça %2, %5 ve %10 atık motor yağı ile gençleştirilmiştir. Sonuçlar, yaşlanma süresi arttıkça penetrasyon değerlerinin azaldığını, yumuşama noktasının, parlama noktasının, yanma noktasının ve kütle kaybının arttığını göstermiştir. En yüksek oranda yaşlanan asfaltın 145 dakika boyunca deneye tabi tutulan asfalt olduğu ve %10 atık motor yağının optimum gençleştirici oranı olarak belirlendiği çalışmada ifade edilmiştir. Ayrıca MSCR deneyi, gençleştirilmiş bağlayıcının 70°C'nin üzerinde kaplamada tekerlek izi oluşumuna yatkın olduğunu ve gençleştirmenin 70°C'nin altındaki kaplama sıcaklıklarında etkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenle asfalt bağlayıcının daha uzun süre sıcaklığa maruz kalmasının esnek üstyapının performansını etkilediği sonucuna varılmıştır [75].

Bir başka çalışmada, yaşlanmış asfalt için gençleştirici olarak kullanılmak üzere asit içeriğini azaltmak amacıyla atık yemeklik yağın esterifikasyonunun yararları incelenmektedir. Ayrıca asfalt bağlayıcısındaki asidik bileşiklerin nem duyarlılığını nasıl arttırdığı incelenmektedir. Bazı asidik bileşikler asfaltın doğasında bulunurken, atık pişirme (bitkisel) yağı gibi biyo-modifiye edici maddelerin son zamanlarda yaygın kullanımı, biyo-modifiye asfalttaki asidik bileşiklerin daha da artmasına neden olmuştur. Asidik bileşikler silisli taşları iyi bir şekilde emmekte, ancak bunların yerini kolayca su molekülleri alarak nem hasarına neden olmaktadır. Atık bitkisel yağın asidik bileşiklerinin transesterifikasyon yoluyla azaltılmasının veya uzaklaştırılmasının, yağın nem hasarına karşı direncini önemli ölçüde arttırdığı

bulunmuştur. Çalışma sonuçları, arıtılmış atık yemeklik yağın sadece yaşlanmış asfalt bağlayıcıyla kullanılabilecek bir gençleştirici değil, aynı zamanda nem hasarına karşı da oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca transesterifikasyonun asfaltın asit değerini 12'den 0,27'ye (mg KOH/g) düşürdüğü de bulunmuştur. Bu, neme karşı hassas bir bağlayıcıyı neredeyse neme dayanıklı bir asfalta dönüştürmüştür. 24 saatlik su koşullandırmasının ardından nemin neden olduğu kayma incelmesinde neredeyse hiç değişiklik olmaması da bu sonuçları doğrulamaktadır. Çalışmanın sonucu, asidik bileşiklerin nem hasarındaki önemli rolünü ve dayanıklılıklarını sağlamak için gençleştiricilerin asitliğini hesaba katmanın önemini göstermektedir. Çalışma sonuçları, hem kaynakların korunmasını hem de asfalt geri dönüşümünü teşvik etmek için atık bitkisel yağın sürdürülebilir bir yaklaşım olduğunu doğrulamaktadır [76].

Bir başka çalışmada, belediye katı atıklarından (OFMSW) elde edilen piroliz yağının asfalt üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hammadde, yerel bir atık arıtma tesisinden alınmıştır. Küçük parçacıklar haline getirilen malzeme, yüksek miktarda nem (%51,2) ve kül (%17,4) içermektedir. Malzemeyi işlemek için pilot ölçekli bir ara piroliz sistemi kullanılmıştır. Proses kütle dengesi, piroliz yağı veriminin %10,6 olduğunu göstermiştir. GC-MS ve FTIR deneyleri, hızlandırılmış yaşlandırmanın (24 saat boyunca 80 °C) sıvı kimyasal bileşimde belirgin bir değişikliğe neden olmadığını, ancak katı madde ve nem içeriğinde önemli bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Dinamik viskozite testleri, OFMSW'den türetilen ara piroliz yağının Newtonyen olmayan bir sıvı olduğunu göstermiştir. Piroliz yağının dinamik viskozitesi, sırasıyla WLF fonksiyonu ve Carreau modeli ile modellenebilen sıcaklık veya kayma hızının artmasıyla azalmıştır. Geniş bir kayma hızı aralığında viskozite ana eğrisini oluşturmak için bir kayma hızı-sıcaklık süperpozisyon yöntemi önerilmiş, burada kayma hızı-sıcaklık kayma faktörünü modellemek için WLF fonksiyonu kullanılmıştır. Hızlandırılmış yaşlanma, OFMSW ara piroliz yağının yaşlanması sırasında katı içeriğindeki yarı katı organik topakların ayrışmasından kaynaklanan dinamik viskozitede bariz bir azalmaya neden olmuştur. OFMSW piroliz yağının yaşlanma işlemi sonrası düşen viskozite değerleri, asfalt gençleştirici olarak kullanılma potansiyelinin olduğunu göstermiştir [77].

Son zamanlarda geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin kullanımına büyük önem verilmektedir. RAP malzemelerinin mühendislik özelliklerini geliştirmek için çeşitli tipte modifiyerler kullanılmıştır. Bu çalışma, RAP malzemelerinin farklı

özelliklerini iyileştirmek için iki atık yağın (atık motor yağı ve atık yemeklik yağ) kullanımını incelemektedir. Modifiye bağlayıcıların performansı, farklı test yöntemleri kullanılarak yüksek ve orta sıcaklık aralıklarında değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklık performansı, Superpave tekerlek izi parametresi ve MSCR testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yorulma performansının değerlendirmesi için Superpave yorulma ve doğrusal genlik tarama (LAS) testleri kullanılmıştır. Yağların eklenmesi RAP bağlayıcıların viskozitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Yağların eklenmesinden sonra tekerlek izi direnci açısından çeşitli olumsuzluklar meydana gelmiştir. Ancak yağ ilavesiyle yorulma performansında ve yaşlanmaya karşı dirençte iyileşme gözlenmiştir [78].

Yaşlanma, asfalt karışımların karşılaştığı önemli sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. Kısa süreli yaşlanma aşaması, asfaltın viskozitesinde önemli bir artışa neden olmakta ve bu da erken bozulmalara ve çatlamalara neden olabilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi kısa süreli yaşlanmanın etkilerini azaltmak için yaşlanma karşıtı katkı maddeleri asfalt karışımına ilave edilmektedir. Ancak yaşlanma karşıtı katkı maddelerinin çoğu sağlık açısından zararlı etkilere sahiptir ve aynı zamanda su kalitesini de etkilemektedir. Son zamanlarda atık yemeklik yağ (WCO), peptitleme özelliği göz önüne alındığında potansiyel bir yaşlanma karşıtı katkı maddesi olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, asfalt bağlayıcının reolojik ve kimyasal parametreleri dikkate alınarak WCO'nun yaşlanmayı önleme yeteneği araştırılmıştır. Reolojik deneyler, PG, frekans taraması ve MSCR deneyinden oluşmaktadır. PG 64-10 ve VG30 bağlayıcılar kısa süreli yaşlandırılmış ve sırasıyla %3,0 ve %5,0 WCO ile modifiye edilmiştir. Frekans taraması test verilerinden elde edilen ana eğriler (master curve), bağlayıcılar için optimum WCO içeriğinin varlığını göstermiştir. Asfaltın sünme fazı için oluşturulan Burger modeli, WCO ilavesi optimum değeri aştığında viskoz gerinimde önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Reolojik ve kimyasal parametrelere dayanan yaşlanma endeksleri mükemmel bir korelasyon sunmuştur. Reolojik, kimyasal ve yaşlanma endekslerine dayalı WCO'nun optimum değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu bulunmuştur. Genel olarak WCO'nun, yaşlanma karşıtı bir katkı maddesi olduğu ve optimum değerin ötesinde WCO ilave etmenin kalıcı deformasyona yol açabileceği belirlenmiştir [79].

Son yılların popüler katkı maddelerinden biri olan Reaktif Etilen Terpolimerler (RET), asfaltın performansında önemli bir iyileşme sağlamaktadır. RET modifiyeli asfalt

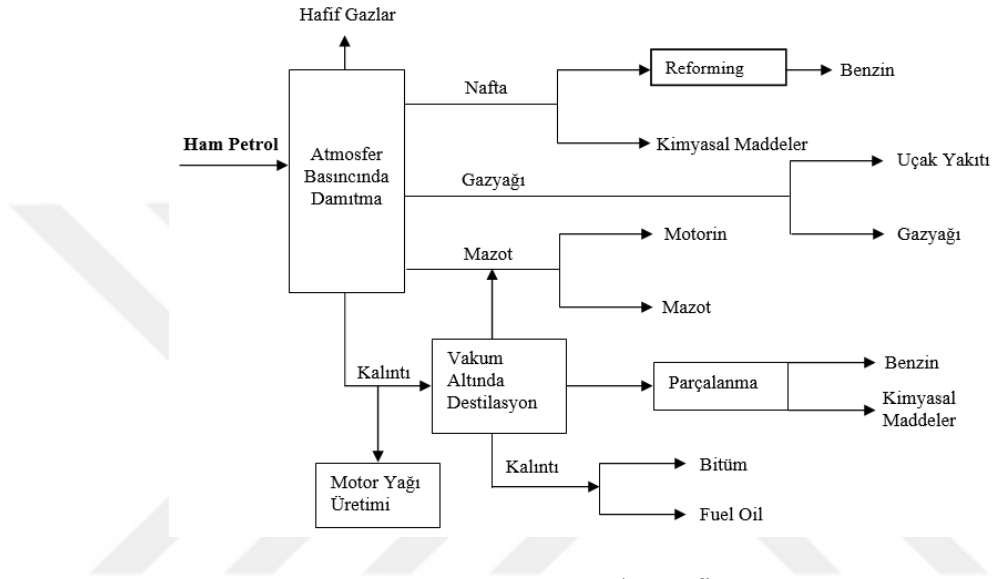
(RETMB) kullanımıyla karışımların işlenebilirliği azalmakta, kaplama yapımı için enerji ihtiyacı ve CO₂ emisyonu artmaktadır. Bu durumun aksine atık yemeklik yağların (WCO) asfaltın viskozitesini azalttığı ve işlenebilirliği artırdığı bilinmektedir. RET modifiyeli bağlayıcıların işlenebilirliğinin arttırılmasına çözüm olarak bu çalışmada RET ve WCO birlikte kullanılmıştır. Çalışmada, asfalta %2'lik artışlarla ağırlıkça %2-8 WCO ilave edilmiş, katalizör olarak ağırlıkça %1,5 RET ve ağırlıkça %0,2 polifosforik asit (PPA) ile modifiye edilmiştir. Modifiye bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda WCO katkısının RETMB'lerin işlenebilirliğini, yorulma ve düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Böylece RET + WCO kompozit modifiye asfaltın özellikle soğuk iklimlerde asfalt kaplama inşaatları için uygun olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu kompozit modifikasyon kullanılarak kaplama yapımı sırasında CO₂ emisyonlarının azaltılması sağlanarak çevre dostu bir yaklaşım sunulmuştur [80].

Bir başka çalışmada, değişen miktarlarda atık yemeklik yağ (WCO) ve atık motor yağının (WEO), yaşlanmış asfaltın gençleştirme etkisi üzerindeki etkileri ve farklı RAP içeriklerine sahip %7 bileşik gençleştirici kombinasyonunun asfalt performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Temel performans testleri atık yağın gençleştirme etkisini ortaya koyarken, mikroskobik test ve kimyasal bileşim analizi gençleştirme işleminin mekanizmasını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca çalışma sonucu, uygun atık yağ dozajının eklenmesinin asfalt performansının etkili bir şekilde artırılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, yaşlanmış asfaltın hafif bileşenlerini destekleyen atık yağın eklenmesiyle, asfaltın farklı yaşlandırma derecelerindeki temel performansının orijinal seviyeye döndürülebileceği belirlenmiştir. Bu arada, atık yağın eklenmesi diğer kimyasal reaksiyonlara neden olmamıştır, ancak aşırı atık yağ eklenmesi asfaltın viskozitesinde istenmeyen bir azalmaya yol açmıştır. Dolayısıyla önerilen atık yağ dozajı %1~%4 olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, bileşik gençleştirici kombinasyonunun %45 oranında RAP kullanımına olanak sağladığını göstermiştir [81].

1.3 Bitüm

Bitüm, doğrusal alifatik, sikloalifatik ve aromatik türevlerden meydana gelmiş bir organik karışım olarak nitelendirilir. Temel olarak hidrokarbon ve türevlerini içermesine ek olarak trikloetilen içerisinde çözünebilen bir maddedir [82]. Fiziksel

olarak siyah veya siyaha yakın koyu bir tonda, katı, yarı-katı, viskoz, doğal veya üretilmiş bir maddedir. Bitümlü bağlayıcılar genellikle ham petrolün rafine edilmesi ile elde edilir [83]. Ham petrolün rafine şeması Şekil 1.1’de verilmiştir. Literatürde terminolojik olarak farklı kullanımlar mevcuttur. Bunlara örnek vermek gerekirse “Asfalt”, “Asfalt Çimentosu”, “Asfalt Bağlayıcı”, “Bitüm”, “Bitümlü Bağlayıcı” olarak ifade edilebilirler. Ancak sıklıkla birbirlerinin yerine kullanımları söz konusudur [84,85].



Şekil 1.1 : Ham petrolün rafine şeması

1.4 Bitümün Kimyası

Bitümün kimyasal bileşimi petrolün coğrafyasına ve rafineriye göre çeşitlilik göstermektedir. Mevcut durumda içerisindeki karmaşık organik yapıya bölgesel farklılıkların da eklenmesi onu anlaşılması güç bir yapı malzemesi haline getirmektedir. Kimyasal yapısının bilinmesi mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde göz ardı edilemez.

Bitüm, genellikle hidrokarbon moleküllere ek olarak bu moleküllere benzer heterosiklik türler, oksijen, nitrojen ve sülfür atomları içeren fonksiyonel yapıların kimyasal bir karışımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Nikel, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi çeşitli metallerin de bitüm içerisinde bulunduğu, bu yapıların inorganik tuzlar veya porfirin yapıları şeklinde ortaya çıktığı bilinmektedir. Genel olarak içeriği sıralanacak olursa %82-88 oranında karbondan, %8-11 oranında hidrojenden, %0-6 oranında sülfürden, %0-1.5 oranında oksijenden ve %0-1 oranında nitrojenden oluşmaktadır [4]. Yukarıda da bahsedildiği gibi ham petrol kaynağının

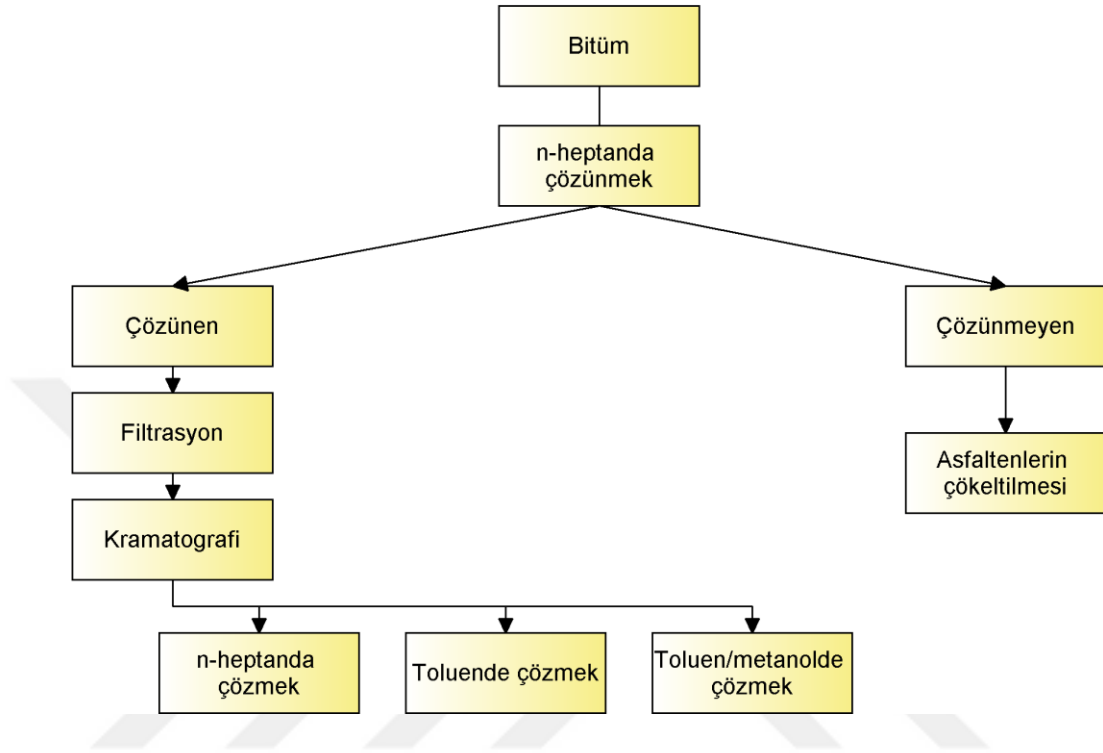
farklılaşması bitümün içeriğinin de yüksek oranda farklılaşması anlamına gelmektedir. Bu yapının aydınlatılması için kompleks analizler gerekmektedir. Basitçe kategorize etmek amacıyla asfaltın ve maltenler olarak iki ana grupta incelemek mümkündür. Şekil 1.2’de tipik bir bitümlü bağlayıcıdan ayrıştırılan asfaltın ve malten fraksiyonları verilmiştir. Maltenler de kendi içerisinde doymuşlar, aromatikler ve reçineler olarak üç gruba ayrılmıştır. Söz konusu bu gruplar çok iyi şekilde örtüşmüşlerdir. Asfaltın ve maltenler yıllar boyunca kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Araştırmanın odak noktası sadece bu fraksiyonların kimyası değil aynı zamanda bitümün mekanik ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileridir.



Şekil 1.2 : n-heptan kullanılarak ayrılan bir bitümlü bağlayıcıda asfaltın (sağda) ve malten (ortada) fraksiyonları; malten sonrasında aromatik ve reçine olarak ayrılmış [85]

Asfaltınlar, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah ve kahverengi amorf katılar olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcı içerisinde yüksek moleköl ağırlığını sağlayan, polar karakteristikte olan maddelerdir. Asfaltın miktarı bitümün mühendislik özellikleri hakkında kayda değer bilgiler sunmaktadır. Hidrokarbon bileşenlerinin bir çözünürlük sınıfı olarak asfaltınlar, en güçlü $\pi - \pi$ etkileşimlerinin yanı sıra en güçlü dispersif etkileşimlere sahip moleküller içerir ve karmaşıktır. Asfaltın molekölü başlı başına bir polisiklik aromatik hidrokarbon çekirdekten oluşmakta, bu yapı aromatik hidrokarbon çekirdeğe bağlı halkalar barındırmaktadır [86–88]. Örneğin, asfaltın miktarının artması daha sert ve dolayısıyla az viskoz bir davranışa sebep olmaktadır. Asfaltınlar, bitümün %5-25’ini oluşturmaktadır. Reçineler ise n-heptan içerisinde çözünen yapılardır. Elektriksel olarak oldukça yüklü olan bu maddeler bitüme yapışkan özelliğini yüklemektedir. Bitüm içerisinde moleköl ağırlığı en az olan bileşenler aromatiklerdir. Genellikle viskoz sıvılar olarak bulunurlar. Doymuşlar ise moleköl ağırlık açısından aromatlara benzerler. Bitümün %5-20’sini oluşturan viskoz yağlar olarak tanımlanabilirler [4]. Görüldüğü üzere sınıflandırmalar genellikle çözünürlük

ile yapılmaktadır. Bu yöntem ile bitüm, doygunlar, aromatikler, reçineler ve asfaltenler olmak üzere dört grupta incelenmiştir. İsimlerin baş harfleri birleştirilerek “SARA” olarak isimlendirilmiş ve fraksiyonlar literatürde bu isimle anılmaktadır. Çözünürlüğe göre yapılan bitüm sınıflandırması Şekil 1.3’te verilmiştir.

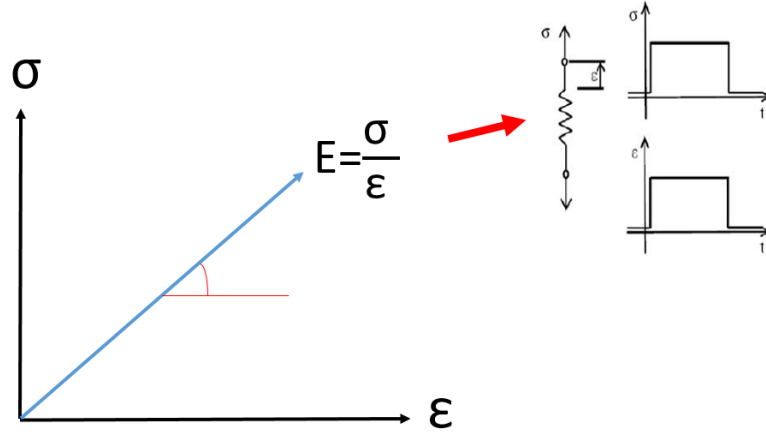


Şekil 1.3 : Çözünürlük ile SARA ayrımı şeması [4,83,89]

1.5 Bitümün Reolojisi

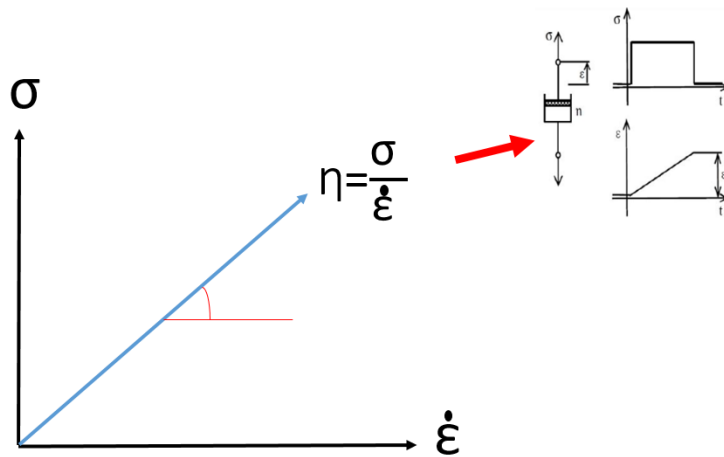
Reoloji, tanımı gereği, kuvvet uygulanması yoluyla gerilmeye maruz kalan, bitüm gibi zamana ve sıcaklığa bağlı malzemelerin akış ve kalıcı deformasyon özelliklerini inceler. Meydana gelen gerilmeler genellikle kayma gerilmesi veya uzama gerilmesidir. Reolojide deformasyon ve akış kavramları belirleyicidir. Deformasyon genellikle katı davranışı ile ilişkilendirilmektedir ve maruz kalınan yüke tepki olarak şekil veya boyuttaki değişimler ile açıklanır. Akış ise sıvı ve gazlar ile ilişkilendirilir. Sıvı ve gazlarda yük uygulandığı sürece devam eden bir deformasyon mevcuttur. Bitümün viskoelastik ve termoplastik yapısı, hem sıcaklık hem de yükleme tipinin değişmesiyle reolojik özelliklerin büyük ölçüde değişmesine yol açar. Bu nedenle bitümün davranışı uygulanan yüke, yükün süresine ve bu süre içindeki sıcaklığa büyük oranda bağlıdır. Bağlayıcı ölçeğindeki bu davranış nihai kaplama performansına yansımaktadır ve bu sebeple bitümlü sıcak karışımlar da viskoelastik malzemeler olarak anılmaktadır [90].

Genel olarak elastik malzemeler yükün etkisi altında deforme olmakta, ancak yükün kaldırılmasıyla birlikte eski hallerine dönmektedirler. İdeal katılar elastik malzemelerdir. Hooke kanununa uygun bu malzemelerde gerilme ve şekil değiştirme arasında lineer bir ilişki mevcuttur (Şekil 1.4). Elastik malzemelerin davranışı genellikle yaya benzetilmektedir.



Şekil 1.4 : Hooke kanununa göre elastik davranış

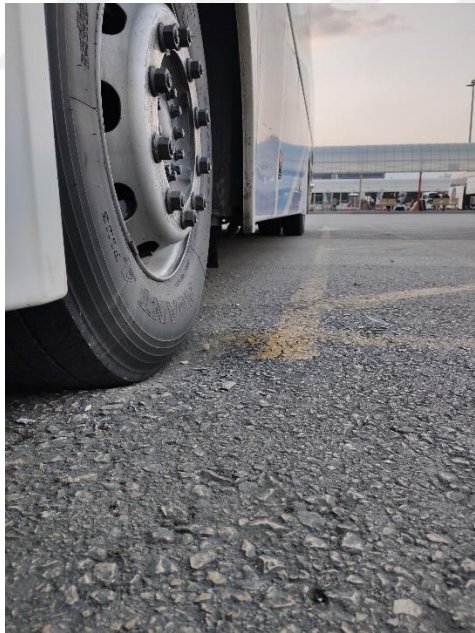
Viskoz malzemelerde yük uygulanırken malzeme deforme olmakta ve yük kaldırıldığında deformasyon aynen korunmaktadır. Yükleme şekilleri ve yükleme süreleri bu deformasyonlarda belirleyicidir. Viskoz malzemelerin davranışları yağ kutusu'na (dashpot) benzetilmektedir. Şekil 1.5'te viskoz malzemelerin davranışı verilmiştir. Kayma şekil gerilmesi ve kayma deformasyonu arasında lineer bir ilişki vardır ve birbirlerine oranları viskoziteyi tanımlar.



Şekil 1.5 : Viskoz malzemenin davranışı

Tam elastik ve tam viskoz malzemeler davranış açısından uç noktalardır. Viskoelastik malzemeler elastik ve viskoz malzemeler için örneklenen yay ve yağ kutusunun birlikte çalışması ile açıklanır [90]. Viskoelastik malzemeler için iki önemli kavram mevcuttur: i)Sünme, ii)Rölaksasyon. Gerilme altında zamana bağlı olarak şekil değiştirme artışına sünme denir. Rölaksasyon ise sabit şekil değiştirme altında gerilmedeki azalmayı temsil etmektedir.

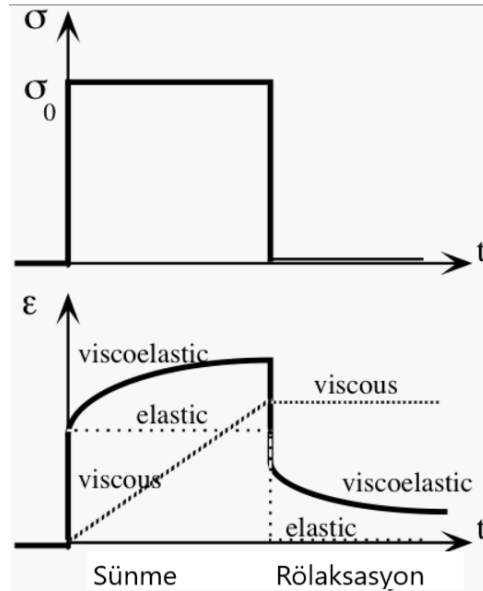
Viskoelastik malzeme davranışı yükleme hızına bağlı olarak oldukça değişken özellik göstermektedir. Hızlı yükleme altında daha elastik davranırken, yavaş yüklemelerde ise viskoz davranış gösterirler. Bu özelliğe örnek vermek amacıyla Bursa ilimiz şehirlerarası terminalinde çektiğimiz birkaç görsel eklenmiştir (Şekil 1.6). Şekil 1.6 incelendiğinde otobüs tekerleklerinin durmaya yakın veya durduğu yerlerde sünme deformasyonu olduğu görülmektedir. Bu durum yukarıda bahsedilen kavramlar ile açıklanabilir. Yükleme hızı (frekans), bir başka deyişle otobüslerin hızı, azaldıkça bitüm viskoz davranmakta ve yüksek miktarda deformasyonlar oluşmaktadır. Otobüslerin hızı (frekansı) arttıkça malzeme daha elastik bir davranış göstererek kalıcı deformasyonlar oluşmamaktadır.





Şekil 1.6 : Yükleme hızı ve deformasyon tipleri arasındaki ilişki (Bursa Şehirlerarası Otobüs Terminali)

Sabit bir yükleme durumu altında viskoelastik malzemenin kompleks davranışı Şekil 1.7’de açıklanmıştır. Şekil 1.7 incelendiğinde hem viskoz hem de elastik davranışın bir arada olduğu, yüke ilk maruz kalındığı anda malzemenin elastik bir tepki verdiği, daha sonra yük kaldırılana kadar viskoelastik davranış oluştuğu görülmüştür. Gerilme kaldırıldığında rölaksasyon, bir başka deyişle gevşeme davranışı meydana gelmektedir.



Şekil 1.7 : Sabit gerilme ve gerilme kaldırıldıktan sonra viskoelastik malzemenin davranışı

1.6 Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Asfalt kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, kaplamanın sadece %4-7'sini oluşturmaya rağmen kaplama performansı ve davranışı açısından büyük önem taşımaktadır [91–93]. Bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiştir ve uzun yıllardır gerek standardizasyonu gerekse elde edilen verilen anlamlılığı üzerine çok sayıda araştırma çalışmaya devam etmektedir. Tüm bu deneyleri iki ana başlık altında özetleyebiliriz. i) Geleneksel bağlayıcı deneyleri, ii) Superpave Bağlayıcı Deneyleri. İki başlık için gerçekleştirilen deneylerin listesi Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Bağlayıcı deneyleri

Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri	Superpave Bağlayıcı Deneyleri
Penetrasyon Deneyi	Dönel viskozite deneyi (Rotational Viscometer, RV)
Yumuşama Noktası Deneyi	Dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rheometer, DSR)
Düktilite Deneyi	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling Thin Film Oven Test, RTFOT)
Parlama Noktası Deneyi	Basıncılı yaşlandırma kabı deneyi (Pressure Aging Vessel, PAV)
İnce film halinde ısıtma deneyi (Thin Film Oven Test, TFOT)	Kiriş eğme reometresi deneyi (Bending Beam Rheometer, BBR)
Trikloretilende çözünürlük deneyi	Direkt Çekme Deneyi (Direct Tensile Test, DTT)
Özgül ağırlık deneyi	
Fraass kırılma noktası deneyi	
Nicholson soyulma deneyi	

Amerikan Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) kapsamında 1987 yılında karayollarının dayanım ve performansını artırmak için 150 milyon dolar bütçe ile bir araştırma ekibi ve programı oluşturulmuştur. Bu program kapsamında geleneksel bağlayıcı deneylerinin sahip olduğu çeşitli olumsuzlukları gidermek amaçlanmıştır. Geleneksel bağlayıcı deneyleri, sınıflandırma işlemini penetrasyon ve viskozite deneyleri ile yapmaktadır. Bitümlü bağlayıcılar için önemli bir kriter olan yüksek sıcaklık dayanımını yumuşama noktası deneyiyle, düşük sıcaklık dayanımı ise Fraas kırılma noktası deneyiyle saptamaktadır. Penetrasyon ve viskozite deneyleri sabit ve tek bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden dolayı farklı sıcaklık değerlerindeki davranışı açıklayamazlar. Bu durumda farklı sıcaklık ve performans karakteristiklerine sahip olsalar bile aynı sınıfta değerlendirilebilirler.

1.6.1 Geleneksel bağlayıcı deneyleri

1.6.1.1 Penetrasyon deneyi

Bitümlü bağlayıcılar, yol yapımı ve bakımı için asfalt karışımlarındaki agregaları bir arada tutmak için kullanılan malzemelerdir. Bitümlü bağlayıcıların özellikleri, asfalt kaplamaların çeşitli çevre ve trafik koşullarındaki performansını ve dayanıklılığını etkiler. Bu nedenle bitümlü bağlayıcıların kıvamlarına ve reolojik özelliklerine göre karakterize edilmesi ve derecelendirilmesi önemlidir.

Bitümlü bağlayıcıların derecelendirilmesinin en eski ve en basit yöntemlerinden biri, bitümün sertliğini veya yumuşaklığını, belirli bir yük, zaman ve sıcaklık altında standart bir iğnenin penetrasyon derinliği ile ölçen penetrasyon testidir. Penetrasyon testi H.C. Bowen tarafından 1888 yılında geliştirilmiş ve ASTM, AASHTO, IP ve EN gibi çeşitli kuruluşlar tarafından standartlaştırılmıştır. Penetrasyon testi, bitümlü bağlayıcıları kaldırım sınıfı, endüstriyel sınıf ve modifiye bitüm gibi farklı sınıflara sınıflandırmak için yaygın olarak kullanılır.

Penetrasyon testi bitümün kıvamının penetrasyon değeri ile ters orantılı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Penetrasyon değeri ne kadar yüksek olursa bitüm o kadar yumuşak olur ve bunun tersi de geçerlidir. Penetrasyon değeri aynı zamanda bitümün sıcaklığa duyarlılığını da gösterir; bu, sıcaklıkla tutarlılığın değişimidir. Penetrasyon değeri ne kadar düşük olursa, sıcaklık hassasiyeti o kadar yüksek olur ve bunun tersi de geçerlidir.

Ancak penetrasyon testinin bazı sınırlamaları ve dezavantajları da mevcuttur:

- Yükleme hızına ve süresine bağlı olarak hem elastik hem de viskoz davranış sergileyen bitümün viskoelastik yapısını tam olarak yansıtamaması,
- Yaşlanmanın/oksidasyonun ve kimyasal modifikasyonun bitümün özellikleri üzerindeki etkilerini tam olarak yansıtamaması,
- Asfalt karışımlarının tasarımı ve analizi için tekerlek izi, yorulma ve düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı direnç gibi olgular hakkında tam olarak bilgi vermemesi gibi sebepler dezavantajları olarak sayılabilir. Ancak, basit ve etkili bir ön bilgi edinme testidir.

Bu nedenle penetrasyon testi sıklıkla bitümün viskozite, kompleks modülü, MSCR gibi reolojik özelliklerini ölçebilen diğer testlerle desteklenir. Bu testler, bitümlü

bağlayıcıların ve bunların asfalt kaplamalardaki performansının daha kapsamlı ve doğru karakterizasyonu sağlamaktadır.

Bitümlü bağlayıcılara penetrasyon testi bölgeye ve uygulamaya bağlı olarak çeşitli standartlara göre yapılmaktadır. En yaygın standartlardan bazıları şunlardır:

- ASTM D5: Bitümlü Malzemelerin Penetrasyonuna İlişkin Standart Test Yöntemidir. Bu standart Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da kullanılmaktadır ve asfalt, katran ve bunların emülsiyonlarının penetrasyonunun belirlenmesine yönelik prosedürü belirtmektedir. Standart penetrasyon iğnesi, yük, süre ve sıcaklık sırasıyla 1,0 mm, 100 g, 5 s ve 25 °C'dir.

- AASHTO T 49: Bitümlü Malzemelerin Penetrasyonuna İlişkin Standart Test Yöntemidir. Bu standart, ASTM D5'e benzer, ancak aynı zamanda diğer sıcaklıklarda asfalt ve asfalt çimentosunun penetrasyonunun belirlenmesi için ek prosedürleri de içerir.

- IP 49: Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar - İğne Penetrasyonunun Tayini. Bu standart Birleşik Krallık ve Avrupa'da kullanılmaktadır ve bitüm ve bitümlü bağlayıcıların kıvamını belirleme prosedürünü belirtmektedir. Standart penetrasyon iğnesi, yük, süre ve sıcaklık sırasıyla 1,0 mm, 100 g, 5 s ve 25 °C'dir. Standart ayrıca 330 × 0,1 mm'nin üzerindeki ve 20 × 0,1 mm'nin altındaki nüfuziyetler için alternatif prosedürler sağlar.

- EN 1426: Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar - İğne Penetrasyonunun Tayini. Bu standart, IP 49'u temel alan uyumlaştırılmış bir Avrupa standardıdır ancak aynı zamanda penetrometre ve iğnenin kalibrasyonu ve doğrulanması için ek gereklilikler de içerir.

Bitümlü bağlayıcılar üzerinde penetrasyon testinin genel prosedürü aşağıdaki gibidir:

- Bitüm numunesi metal tabak veya cam kavanoz gibi uygun bir kapta homojen ve hava kabarcığı kalmayacak şekilde eritip karıştırarak hazırlanır. Bitümün aşırı ısınmasından veya yakılmasından kaçınılmalıdır çünkü özelliklerini değiştirebilir.

- Erimiş bitüm bir penetrasyon kabına veya metal kalıba dökülür ve oda sıcaklığında veya su banyosunda soğuması ve katılaşması sağlanır. Kap veya kalıptaki bitüm tabakasının kalınlığı, beklenen nüfuziyetten en az 15 mm daha fazla olmalıdır.

- Isıtılmış bir bıçak veya spatula ile fazla bitüm kesilerek bitüm numunesinin yüzeyi düzeltilir. Yüzey pürüzsüz ve yatay olmalı, herhangi bir çatlak veya düzensizlik olmamalıdır.

- Bitüm numunesi bir su banyosuna veya hava odasına yerleştirilir ve testten önce sıcaklığı en az 1,5 saat boyunca 25 °C'de tutulur. Sıcaklık $\pm 0,1$ °C d aralığında kontrol edilmelidir.

-İğneyi, pistonu, ağırlığı ve kadrani standarda göre ayarlayarak penetrometre kurulur. İğne temiz, keskin ve bitüm numunesinin yüzeyine dik olmalıdır. Kadran her girişten önce sıfıra ayarlanmalıdır.

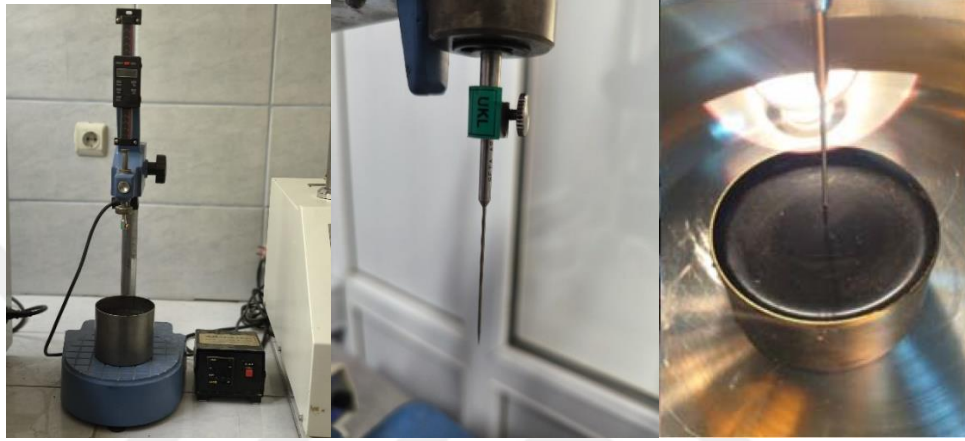
-İğne bitüm numunesinin yüzeyine değene kadar yavaşça indirilir ve ilk okuma kadrana kaydedilir. Daha sonra iğne bırakılır ve 5 saniye boyunca bitüm numunesine nüfuz etmesine izin verilir. Son okuma kadrana kaydedilir ve ilk okuma son okumadan çıkarılarak penetrasyon değeri hesaplanır. Penetrasyon değeri 0,1 mm'lik birimlerle ifade edilir.

Test bitüm numunesinin farklı noktalarında, birbirlerinden en az 10 mm uzakta olacak şekilde en az üç kez tekrarlanır. Ortalama penetrasyon değeri hesaplanır ve test sonucu olarak raporlanır. En yüksek ve en düşük penetrasyon değerleri arasındaki fark $10 \times 0,1$ mm'yi aşarsa test iptal edilir ve yeni bir bitüm numunesi ile tekrarlanır.

Özetlenecek olursa, bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanan penetrasyon testi, bitümlü bağlayıcıların kıvamlarına ve sıcaklık hassasiyetlerine göre sınıflandırılmasında basit ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Test, belirli bir yük, zaman ve sıcaklık altında standart bir iğnenin bitüm numunesine nüfuz etme derinliğini ölçer. Test, test prosedürünü ve ekipmanını belirleyen ASTM D5, AASHTO T 49, IP 49 ve EN 1426 gibi çeşitli standartlara göre gerçekleştirilir. Test sonuçları, bitümlü bağlayıcıları asfaltlama sınıfı, endüstriyel kalite ve modifiye bitüm gibi farklı sınıflara ayırmak için kullanılır. Ancak testin bitümün viskoelastik doğasını yansıtmaması, yaşlanma ve modifikasyonun etkilerini hesaba katmaması ve asfalt karışımlarının tasarımı ve analizi için yeterli bilgi sağlamaması gibi bazı sınırlamaları ve dezavantajları vardır. Bu nedenle test sıklıkla bitümün viskozite, kompleks modül, MSCR gibi reolojik özelliklerini ölçebilen diğer testlerle desteklenir veya değiştirilir. Bu testler, bitümlü bağlayıcıların ve bunların asfalt kaplamalardaki performansının daha kapsamlı ve doğru karakterizasyonu sağlar. Penetrasyon testi cihazı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

ASTM D5 standardına bağlı olarak yapılan bu deneyde bitümün kıvam ve sertlik derecesi belirlenir. Kelime olarak penetre olmak eyleminden türetilen bu deneyde 100

gr ağırlığında standart bir iğne 25°C sıcaklıkta numuneye 5 saniye süreyle batırılır ve batma miktarı tayin edilir. Bu batma miktarı penetrasyon değeridir. Penetrasyon değeri, bitümün sınıflandırmasının yanı sıra performans özellikleri hakkında da bir ön bilgi sunar. Bu değer artması bitümün yumuşadığını, dolayısıyla kalıcı deformasyonlara karşı dayanımının azaldığını ifade ederken, penetrasyon değerinin azalması ise bitümün sertleşerek kalıcı deformasyon dayanımının artacağını ifade eder [94,95]. Deney düzeneği Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8 : Penetrasyon deneyi düzeneği

1.6.1.2 Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların derecelendirilmesi yöntemlerinden biri, bitümün belirli koşullar altında akışkanlık göstermeye başladığı veya yarı katı halden sıvı duruma geçtiği sıcaklığı ölçen yumuşama noktası testidir. Yumuşama noktası testi 19. yüzyılın sonlarında geliştirilmiş ve ASTM, AASHTO, IP ve EN gibi çeşitli kuruluşlar tarafından standartlaştırılmıştır.

Yumuşama noktası testi, bitümün kıvamının yumuşama noktasıyla doğru orantılı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Yumuşama noktası ne kadar yüksek olursa bitüm o kadar sert olur.

En yaygın standartlardan bazıları şunlardır:

- ASTM D36: Bitümün Yumuşama Noktası için Standart Test Yöntemi (Halka ve Bilya Aparatı). Bu standart Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da kullanılmaktadır ve asfalt, katran ve bunların emülsiyonlarının yumuşama noktasının belirlenmesine yöneliktir.

- AASHTO T 53: Bitümün Yumuşama Noktası için Standart Test Yöntemi (Halka ve Bilya Aparatı).

- IP 58: Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktasının Tayini - Halka ve Top Yöntemi. Bu standart Birleşik Krallık ve Avrupa'da kullanılmaktadır ve bitüm ve bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktasının belirlenmesine yönelik prosedürü belirtmektedir.

- EN 1427: Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktasının Tayini - Halka ve Top Yöntemi. Bu standart, IP 58'i temel alan uyumlaştırılmış bir Avrupa standardıdır ancak aynı zamanda halka ve bilye aparatları ile termometrenin kalibrasyonu ve doğrulanması için ek gereksinimleri de içerir.

Bitümlü bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası testinin yapılışı aşağıda sunulmuştur:

- Bitüm numunesi metal tabak veya cam kavanoz gibi uygun bir kapta homojen ve hava kabarcığı kalmayacak şekilde eritip karıştırarak hazırlanır. Bitümün aşırı ısınmasından veya yakılmasından kaçınılır çünkü bu durum, özelliklerinin değişmesine yol açabilir.

- Erimiş bitüm bir penetrasyon kabına veya metal kalıba dökülür ve oda sıcaklığında veya su banyosunda soğuması ve katılaşması sağlanır. Kap veya kalıptaki bitüm tabakasının kalınlığı beklenen yumuşama noktasından en az 15 mm daha fazla olmalıdır.

- Isıtılmış bir bıçak veya spatula ile fazla bitüm kesilerek bitüm numunesinin yüzeyi düzeltilir. Yüzey pürüzsüz ve yatay olmalı, herhangi bir çatlak veya düzensizlik olmamalıdır.

-Bitüm numunesi bir su banyosuna veya hava odasına yerleştirilir ve testten önce sıcaklık en az 15 dakika boyunca 5 °C'de tutulur. Test sırasında sıcaklık $\pm 0,5$ °C aralığında kontrol edilmelidir.

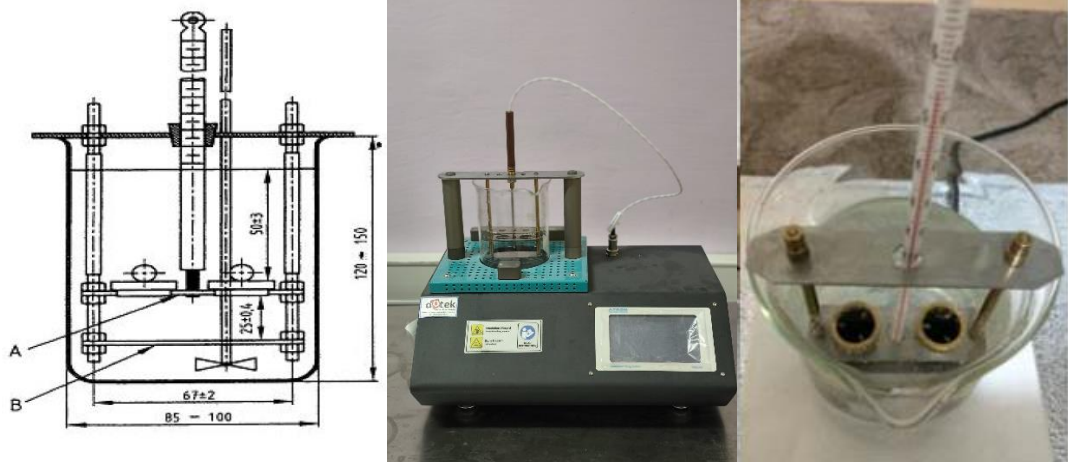
-Halkaları, bilyeleri, ağırlıkları ve termometreyi standarda göre ayarlayarak halka ve bilya aparatı kurulur. Halkalar temiz, kuru olmalı ve ince bir ayırıcı madde tabakasıyla kaplanmalıdır. Toplar temiz, kuru olmalı ve pas içermemelidir. Termometre kullanılmadan önce kalibre edilmeli ve doğrulanmalıdır.

-Halkalar desteğin üzerine yerleştirilir ve toplar halkaların içine yerleştirilir. Toplar ortalanmalı ve halkaların alt kısmına temas etmelidir.

-Banyo veya hazne $5^{\circ}\text{C}/\text{dk} \pm 0,5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla ısıtılmaya başlanır. Termometre banyoya veya hazneye en az 115 mm derinliğe daldırılmalı ve göz hizasında okunmalıdır.

-Her topun yumuşama noktası, termometredeki ilk ve son okumaların ortalamasıdır. Bitüm numunesinin yumuşama noktası, iki topun yumuşama noktalarının ortalamasıdır. İki bilyenin yumuşama noktaları arasındaki fark 1°C 'yi aşarsa testi atılır ve yeni bir bitüm numunesi ile tekrarlanır.

Özetle, ASTM D36 standardına bağlı olarak yapılan bu deneyde bitümün özelliğini kaybederek yumuşamaya başladığı sıcaklık belirlenir. Sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığının da değerlendirildiği bu deneyde standart halkalar içerisine bitüm numunesi yerleştirilerek 3.5 gr ağırlığındaki bilyeler üzerlerine konur. Numuneler $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla ısıtılır. Bitümün yumuşayarak tabana değdiği andaki sıcaklık yumuşama noktası değeridir. Yumuşama noktasının belirlenebilmesi için iki numune üzerinde deney yapılmalı ve sonuç olarak bu iki değerin ortalaması alınmalıdır. Her iki bilyeden elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, yumuşama noktası 80°C 'nin altında olan numuneler için 1°C 'yi, 80°C 'nin üzerinde olan numuneler için ise 2°C 'yi geçerse deneyler tekrar edilmelidir. Yumuşama noktası değerinin yüksek olması bitümün yüksek sıcaklık dayanımının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda tekerlek izi gibi yüksek sıcaklıklarda meydana gelen plastik davranış bozukluklarına karşı dayanıklı olduğu şeklinde yorumlanır [94,96]. Deney düzeneği Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9 : Yumuşama noktası deneyi düzeneği

1.6.1.3 Düktilite deneyi

Bitümlü bağlayıcının belirli bir hız ve sıcaklık altında uzama ve çekilebilme özelliği düktilite deneyi ile belirlenir. Bitümün kohezyon kabiliyeti düktilite ile ilişkilidir. Bu sebeple nihai kaplamanın performansı hakkında da bilgi verebilir. Düktilite değerinin yüksek olması bağlayıcılık özelliğinin de yüksek olduğu anlamına gelir. Düktilite cihazı, içi 25 C sıcaklıkta su ile dolu olan ve bağlayıcı numunesini 5cm/dk hız ile yatay olarak çeken bir sistemdir. Deney sırasında numune briket kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilir. Sıcaklık azaltılarak da bu deney gerçekleştirilebilir. Briket koptuğu anda düktilite cihazının kenarında bulunan cetvelden uzama miktarı cm cinsinden okunur. Bu cihaz aynı anda üç numunenin test edilmesine imk n tanır.    numunenin düktilite sonuçlarının ortalaması, deney yapılan asfalt bağlayıcının düktilitesi olarak kabul edilir. Deney düzeneği şekil 1.10’da verilmiştir.



şekil 1.10 : Düktilite cihazı

1.6.1.4 Parlama noktası deneyi

ASTM D92 standardına bağlı olarak yapılan bu deneyde bitümün alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık belirlenir. Parlama noktası, açık kap deneyleri ile tespit edilir. Deney düzeneği şekil 1.11’de verilmiştir. Açık kap deneyleri, bağlayıcı malzemenin açık bir kaptaki ısıtılması sırasında yüzeyin biraz üzerinde bir kıvılcım tatbik edilmesi şeklindeyir. Yüzeyin herhangi bir noktasında alevin g r ld ğu andaki sıcaklık, deneye tabi tutulmuş olan asfalt malzemenin parlama noktası olarak alınır.



Şekil 1.11 : Parlama noktası deney cihazı

1.6.1.5 İnce film halinde ısıtma (Thin film oven test, TFOT) deneyi

ASTM D2872 standardına bağlı olarak gerçekleştirilen İnce film halinde ısıtma deneyi (TFOT), asfalt tesislerinde agrega ile asfalt karıştırıldığı zaman meydana gelen yaşlanmayı temsil eder. Bu deneyde, 14 cm çapındaki küçük bir tepsinin içine 3.2 mm kalınlığındaki asfalt numunesi konularak tepsinin içine yayılması sağlanır. 5-6 devir/dk hızda dönen bir platform üzerine yerleştirilen numuneler 5 saat süreyle 163°C sıcaklıktaki fırında bekletilir (Şekil 1.12). Bu süre sonunda fırından çıkartılan numuneler tartılır ve yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki ağırlık kaybı 0.01 g hassasiyetle belirlenir.



Şekil 1.12 : TFOT deney düzeneği

1.6.1.6 Trikloretilende çözünürlük deneyi

Bu deney, içeriğinde mineral madde bulunmayan ya da çok az bulunan bağlayıcıların organik çözücüler içerisindeki çözünürlüğünü tespit etmek için yapılır. Kullanılan organik çözücüler triklötilen, benzen ve karbon sülfürdür. Asfalt çimentolarının triklöretilende en az %99 oranında çözünmesi gerekir.

1.6.1.7 Özgöl ağırlık deneyi

Özgöl ağırlık deneyi, TS 1087 ve ASTM D70 standartlarına göre, 25°C’de hacmi bilinen bir asfalt numunesinin ağırlığının, aynı sıcaklık ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı ile elde edilen özgöl ağırlığının tespit edilmesi için yapılmaktadır. Arşimed’ in ortaya koymuş olduğu; yüzen cisimlerin ağırlığı, kapladıkları hacim kadar sıvının ağırlığına eşittir ilkesine dayanır.

Özgöl ağırlık deneyinde piknometre, su banyosu ve terazi kullanılmaktadır. Deneye ilk olarak piknometrenin analitik terazide tartılıp tartımın kaydedilmesi ile başlanılır. Ardından piknometre, 25°C sıcaklıkta su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Su dolu piknometre tekrar tartılır ve kaydedilir. Şayet asfalt numunesi yeterince akıcı değilse, bir miktar ısıtılarak yeterli akışkanlık sağlanır. Piknometre yaklaşık yarısına kadar bu numuneyle doldurulur. Sonrasında piknometre içindeki numune ile birlikte oda sıcaklığına kadar soğutulur ve kapağı ile birlikte tartılır. Piknometrenin içindeki asfalt numunesinin üzeri damıtılmış su ile doldurulur ve kapağı sıkıca kapatılır. Sonrasında sıcaklığı $25\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ’deki su banyosuna tamamen batırılır. 30 dakika sonra piknometrenin dışı iyice kurulanır ve tartılır.

1.6.1.8 Nicholson soyulma deneyi

Nicholson soyulma deneyi, su etkisiyle asfalt bağlayıcının agrega üzerinden ayrılmasına karşı direncini tespit etmek amacıyla yapılır. Nicholson deneyinde, kırılmış agrega numunesinin 9.5-6.3 mm elekler arasında kalan kısmından 200 gr alınır, iyice yıkanır, saf su ile birkaç kez çalkalandıktan sonra 110°C’lik etüvde kurutulur. Beher içinde tartılarak, yıkanmış kurumuş agregadan 100 ± 0.5 gr numune alınır ve ısıtılmak üzere 1 saat 140°C-150°C’lik etüvde bekletilir. Asfalt bağlayıcıdan da beher içinde tartılarak 5.0 ± 0.1 gr elde edilir. Asfalt bağlayıcı içeren beher bir kum banyosuna yerleştirilerek ısıtılır. Asfalt bağlayıcı eriyince, agrega asfalt üzerine dökülür ve bir cam bagetle tüm agregaların üzeri asfaltla kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım eşit olacak şekilde iki petri kabına boşaltıldıktan sonra 10 dk laboratuvar sıcaklığında bekletilir. Sonrasında petri kapları, içerisinde saf su bulunan tepsilere konularak üzerinde en az 3 cm’lik su filmi oluşması sağlanır. Daha sonra petri kaplarını içeren tepsiler 60°C’lik bir etüvde 24 saat bekletilir. 24 saat sonunda petri kabı çıkarılır ve suyu değiştirilir. Yan taraftan gelen bir ışık altında numuneler görsel olarak incelenir. Tüm agrega danelerinin soyulmamış yüzeylerinin, karışımdaki

toplam agrega yüzey alanına oranı soyulmaya karşı dayanıklılığını ya da soyulma direncini ifade eder [94].

1.6.2 Superpave bağlayıcı deneyleri

Superpave yönteminde bağlayıcı sınıfının belirlenmesinde çok çeşitli faktörler hesaba katılır. Bu yöntem ile sınıflandırmanın gösterimi PG X-Y şeklindedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık sınıfını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının performans şartlarını sağladığı düşük sıcaklık sınıfını belirtmektedir. Uygulama bölgesi iklim şartları göz önünde bulundurularak tespit edilen en yüksek kaplama sıcaklığından daha yüksek olan sıcaklık sınıfı ve en düşük kaplama sıcaklığından daha düşük olan sıcaklık sınıfı alınarak bölge için geçerli olan bağlayıcı performans sınıfı tespit edilmektedir. Bağlayıcı performans sınıfları Çizelge 1.2’de verilmiştir. Şekil 1.13 ve 1.14’te performans esaslı sınıflandırma için kullanılan Superpave şartnamesi sunulmuştur.

Çizelge 1.2 : Superpave şartnamesi kapsamında bağlayıcı performans sınıfları

X, Yüksek Sıcaklık Sınıfı için, °C	Y, Düşük Sıcaklık Sınıfı için, °C	Performans Sınıfı Gösterimi
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

PERFORMANS SINIFI	PG 46-	PG 52-	PG 58-	PG 64-
	34 40 46	10 16 22 28 34 40 46	16 22 28 34 40	10 16 22 28 34 40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 46	< 52	< 58	< 64
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -34 > -40 > -46	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40 > -46	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40
ORJİNAL BAĞLAYICI				
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230			
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135			
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46	52	58	64
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI				
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1.00			
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46	52	58	64
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI				
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90	90	100	100
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor			
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24 - 30 - 36	0 - 6 - 12 - 18 - 24 - 30 - 36	- 6 - 12 - 18 - 24 - 30	0 - 6 - 12 - 18 - 24 - 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24 - 30 - 36	0 - 6 - 12 - 18 - 24 - 30 - 36	- 6 - 12 - 18 - 24 - 30	0 - 6 - 12 - 18 - 24 - 30

Şekil 1.13 : Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi (PG 46- PG 64)

PERFORMANS SINIFI	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 70						< 76					< 82				
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34
ORJİNAL BAĞLAYICI																
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230															
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76					82				
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70						76					82				
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinö, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fiziksel Sertleşme, Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı, °C	Rapor															
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24
	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24

Şekil 1.14 : Superpave bitümlü bağlayıcı şartnamesi (PG 70 – PG 82)

Superpave performans kriterlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerin kullanım amaçları Çizelge 1.3’te verilmiştir.

Çizelge 1.3 : Bitümlü bağlayıcı Superpave deneylerinin amaçları ve performans parametresi karşılıkları

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Ölçütü
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

1.6.2.1 Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (Rolling thin film oven test, RTFOT)

Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), bağlayıcıların kısa dönemli yaşlanmalarını simüle etmek için en yaygın kullanılan standartlaştırılmış testlerden biridir. Bu deney, ince bir bitümlü bağlayıcı film üzerinde ısı ve havanın birleşik etkilerini ölçmek düşüncesiyle tasarlanmıştır. Kısa dönemli yaşlandırma olarak adlandırılan karıştırma, taşıma ve sıkıştırma işlemleri sırasında bitümlü bağlayıcının

maruz kaldığı yaşlanmayı simüle etmek amaçlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıdan oluşan hareketli bir film tabakası, sabit bir hava beslemesi ile etüvde belirli bir süre boyunca belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır.

Isı ve havanın etkileri, kütledeki değişime (yüzde olarak) veya bitümlü bağlayıcının etüvdeki süre öncesinde ve sonrasında özelliklerinde meydana gelen değişime göre belirlenir.

RTFOT, birçok bağlayıcı şartnamesinde "serildiği gibi" özellikleri temsil eden bir bağlayıcı numunesi sağlamak için şartlandırma rejimi olarak kullanılır. Standartlaştırılmış test koşulları farklı şartnamelere göre değişmekte ancak genel olarak 75 dakika (EN 12607-1) veya 85 dakika (ASTM D2872, AASHTO T240) için 163 °C'dir (325 °F). Test sırasında bağlayıcı numunesi, daha hafif bileşenlerin buharlaşması nedeniyle kendi bünyesinden malzeme kaybeder ve oksijenle reaksiyona bağlı olarak daha yoğun bir hale gelir. Bu nedenle test yöntemi, kütle kazancı veya kaybı yerine numunenin kütledeki bir değişikliği rapor etmektedir. Bazı durumlarda, özellikle yüksek oranda polimerle modifiye edilmiş bitümlerin kullanıldığı durumlarda, bağlayıcının testte kullanılan cam şişelerden "tırmanması" nedeniyle sorunlar rapor edilmiştir. Ayrıca, farklı bitüm dereceleri belirli bir sıcaklıkta farklı viskozitelere sahiptir ve RTFOT sabit bir sıcaklıkta yürütüldüğünden, şişedeki bitümün film kalınlığı farklı bitümler için farklı olacaktır. Bu, değiştirilmiş RTFOT (M-RTFOT) dahil olmak üzere testin değiştirilmiş versiyonlarının geliştirilmesine yol açmıştır. RTFOT deney düzeneği Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15 : Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Düzeneği

1.6.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (Pressure ageing vessel, PAV)

AASHTO PP1 standardına göre gerçekleştirilen bu deneyde, servis ömrü boyunca meydana gelen oksidasyon kaynaklı sertleşme/yaşlanma simüle edilmektedir. Uzun süreli yaşlanmanın laboratuvara yansması olarak tanımlanan bu deneyde RTFOT çıktısı olan bağlayıcılar kullanılır. Bu sayede kısa dönemli yaşlanmanın ertesi olan uzun dönem yaşlanma uygulanmış olur. Kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşılabilecek koşullar yansıtılır [94,97,98].

Deneyde her bir numune kabına 50 gram bağlayıcı konulmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi bu bağlayıcılar RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılardır. Bitümün sınıfına göre 90°C, 100°C veya 110°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 21 barlık basınç uygulanır. Deney düzeneği Şekil 1.16’da verilmiştir. RTFOT ve PAV deneylerinden elde edilen yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılara DSR ve BBR deneyleri uygulanarak performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir [4,94,99].

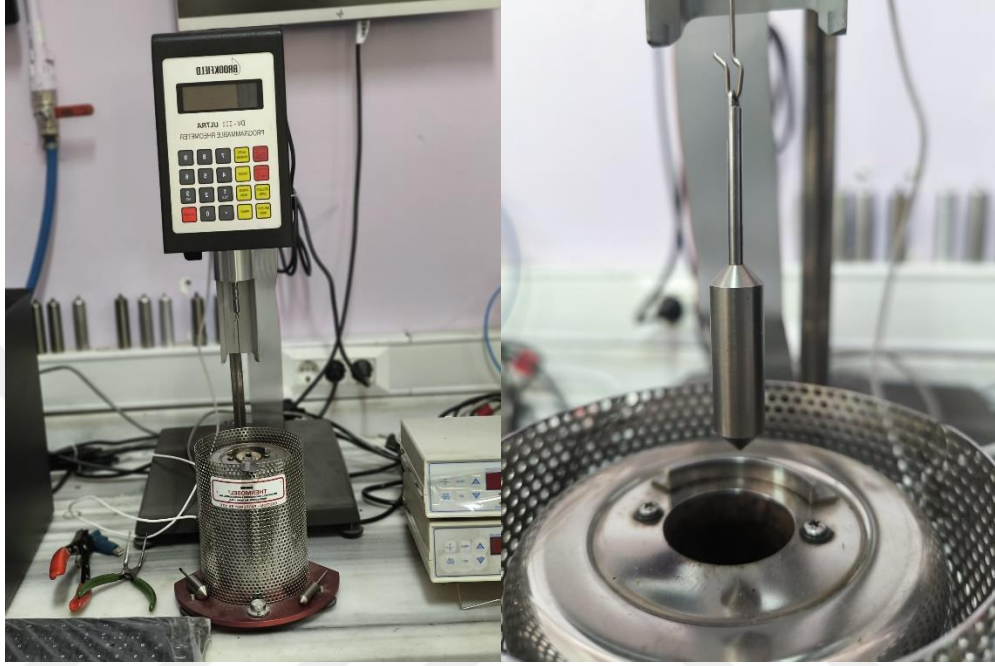


Şekil 1.16 : Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi Düzeneği

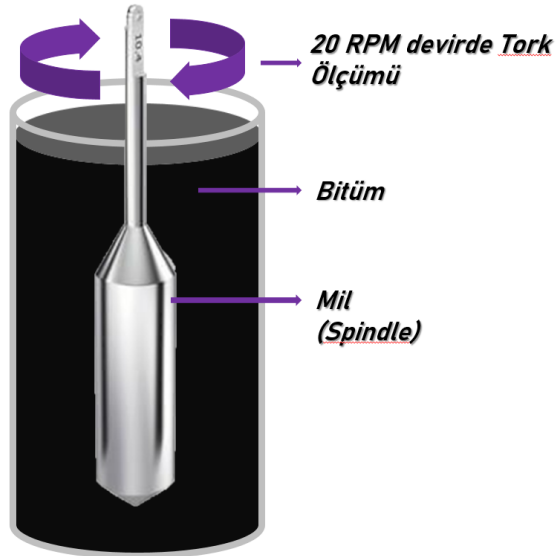
1.6.2.3 Dönel viskozimetre deneyi (Rotational viscometer, RV)

AASHTO TP48 standardına bağlı olarak gerçekleştirilen bu deneyde, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akış özellikleri belirlenmektedir. Bağlayıcının sıcak karışım üretim tesisindeki işlenebilirlik ve pompalanabilirlik özelliklerinin belirlenmesi için yüksek sıcaklıkta ölçüm yapılmaktadır. Deney kapsamında kullanılan cihaz Brookfield viskozimetresidir ve Şekil 1.17’de verilmiştir. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılır ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s’yi (3000 cP)

aşmaması istenir. Dönel viskozimetre değeri, silindirik bir çubuğun sabit bir sıcaklıkta asfalt numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile tespit edilir. Viskozite deneyinde bağlayıcı içerisinde 20 rpm hızla dönen bir milin dönmeye karşı gösterdiği dirençle viskozite değeri elde edilir. Çalışma mekanizması Şekil 1.18’de verilmiştir.



Şekil 1.17 : Dönel viskozimetre deneyi düzeneği



Şekil 1.18 : Viskozite ölçüm mekanizması

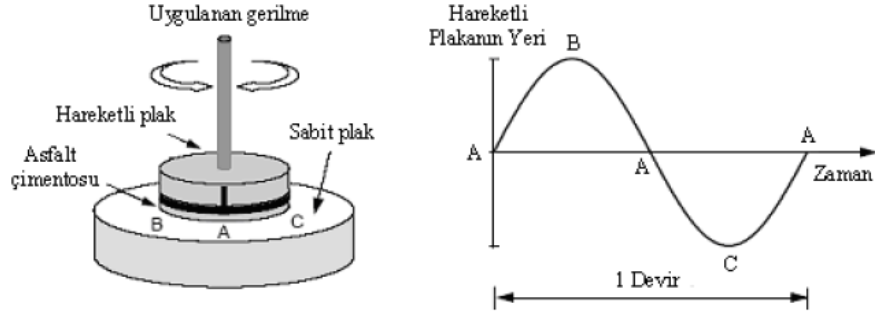
Deney sırasında yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine ulaşıldıktan sonra üç adet okuma yapılır ve bu üç değerın ortalaması alınarak asfalt bağlayıcının viskozite değeri hesaplanır. Viskozite değeri sıcak asfalt karışımların karıştırma ve sıkıştırma

sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu amaçla RV deneyi, genellikle 135°C ve 165°C sıcaklıklar arasında uygulanır. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilir. Asfalt bağlayıcının agrega ile karıştırılmasında 170 ± 20 cP, elde edilen sıcak asfalt karışımların sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması beklenilir. Superpave şartnamesine göre, asfalt bağlayıcının, 135°C sıcaklıkta ölçülen viskozite değerinin 3000 cP değerini aşmaması gerekir.

1.6.2.4 Dinamik kayma reometresi deneyi (Dynamic shear rheometer, DSR)

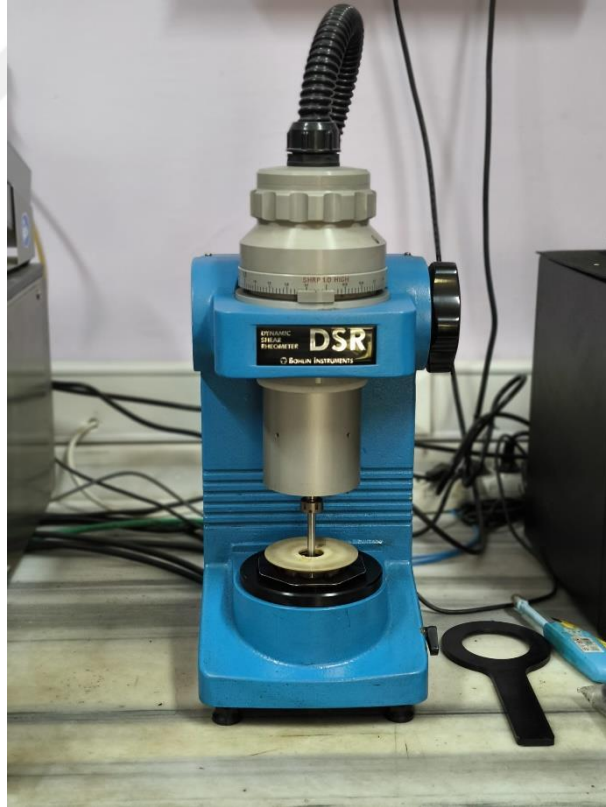
Dinamik kayma reometresi deneyi AASHTO TP-5 standardına göre gerçekleştirilen ve bitümün plastik deformasyonlara, tekerlek izine ve yorulma çatlaklarına karşı dayanımının belirlendiği bir deneydir. Bu deney kapsamında bitümün, esnek kaplama hizmete açıldıktan hemen sonraki tekerlek izi bozulmasına karşı direnci saptanır. Buna ek olarak ileriki dönemlerde orta hava sıcaklıklarında yorulma çatlaklarına karşı direnci belirlenir. Bağlayıcının mekanik davranışı yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden dolayı orta ve yüksek sıcaklıkta elde edilecek reolojik değerler önem arz etmekte, karakterizasyon bu değerler ile yapılmaktadır. Tekerlek izine karşı dayanım belirlenirken herhangi bir işlem görmemiş (yaşlandırmaya tabi tutulmamış, saf) bağlayıcı kullanılırken, yorulma çatlakları belirlenirken ise PAV yöntemi ile yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Tekerlek izi dayanımını tespit etmek için 25 mm çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını tespit etmek için ise 8 mm çapında ve 2000 mikron yüksekliğinde numuneler kullanılmaktadır.

Şekil 1.19’da DSR deney mekanizması verilmiştir. Mekanizma temel olarak sabit bir plaka ve dönebilen bir plakanın arasına yerleştirilen bitümlü bağlayıcının belirli bir ısı ve belirli bir hız şartları altında döndürülmesidir. Plakaya konulan bağlayıcının kalınlığı sabittir. Hareketli plağa gerilme veya deformasyon uygulanabilir. Uygulanan bu gerilme ve deformasyon ile plak A noktasından B noktasına hareket eder. Daha sonra hareketli plan B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. C noktasından da tekrar A noktasına kadar döndürülür. Tüm bu hareket bir devire tekabül eder ve deney boyunca aynı sistemle tekrar edilir [100].



Şekil 1.19 : Dinamik kayma reometresinin çalışma mekanizması [101,102]

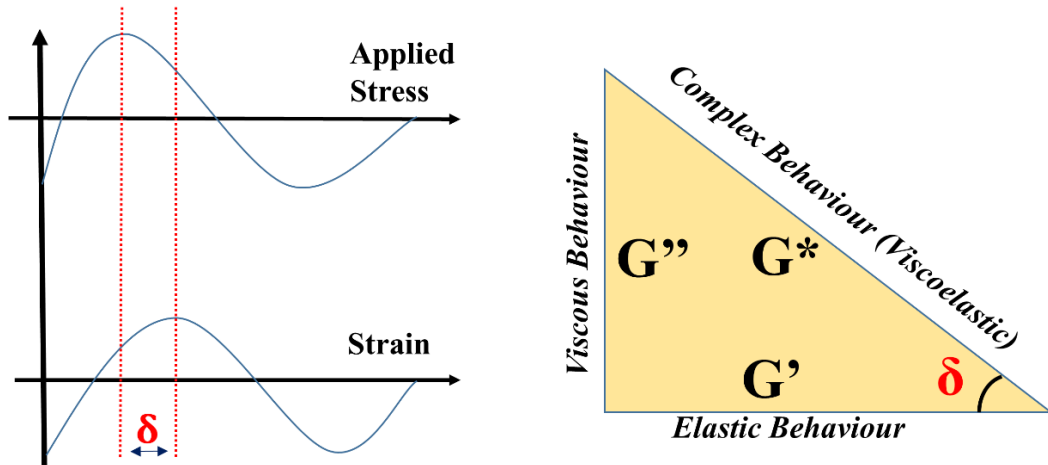
Performans sınıfının belirlenmesi için kullanılan standart frekans değeri 10 rad/sn (1.59 Hz)'dir. Deney cihazı Şekil 1.20'de verilmiştir. inamik kayma reometreleri gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki ayrı türde olabilmektedir. Gerilme kontrollü reometreler, plakayı A noktasından B noktasına hareket ettirecek sabit bir burulma kuvveti ile çalışır. Burulma kuvveti bağlayıcının sertliğine bağlı olarak değişir. Bu nedenle her salınımda farklı yer değiştirme olabilir. Deformasyon kontrollü reometrelerde ise sabit bir deformasyon gerçekleştirilir ve deformasyon sağlayacak kuvvet her salınımda değişebilir [100].



Şekil 1.20 : DSR cihazı

DSR deneyi, asfalt çimentosunun kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerini belirlemek amacıyla yapılmakta ve bitümlü bağlayıcının elastik tepkilerini

belirlenmektedir. G^* , bitümlü bağlayıcıda meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sebebiyle oluşan deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Kompleks kayma modülü, elastik modül (G') ve viskoz (G'') olmak üzere iki kısım ile tanımlanır [101]. Bu kısımlar G^* ve δ değerleriyle ilişkilidir. Faz açısı, uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman farkına eşittir. Faz açısı 0° iken malzemenin davranışının tamamen elastik, 90° iken tamamen viskoz olduğu kabul edilmektedir [103] (Şekil 1.21). Frekans taraması testi asfalt kaplama üzerinde seyreden bir aracın hızını simüle edebilmektedir. 10 Hz'lik yükleme frekansı 60 km/saat'lik hıza tekabül ederken, 15 Hz'lik yükleme frekansı 90 km/saat hıza karşılık gelmektedir. Kompleks modül ve faz açısı değerleri sıcaklık ve frekans ile önemli ölçüde değişmektedir [104]. DSR deneyi sonucunda belirlenen G^* ve δ değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri tespit edilmektedir. $G^*/\sin\delta$ değeri asfaltın tekerlek izi direnç parametresidir. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin\delta$ değeri orijinal bağlayıcılar için en az 1.00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise en az 2.20 kPa olmalıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcının performans seviyesi PG X-Y olarak belirtilir. Burada X bağlayıcının özelliklerini kaybetmeden hizmet verdiği en yüksek sıcaklığı, Y ise en düşük sıcaklığı temsil etmektedir. DSR deneyi sonucunda $G^*/\sin\delta$ değerinin sağlanması gereken en küçük değeri veren en yüksek sıcaklık değeri, bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesini temsil eder [94,96,105,106].



Şekil 1.21 : Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışının gösterimi

Çoklu gerilme günme toparlanması (Multiple Stress Creep Recovery, MSCR) Deneyi

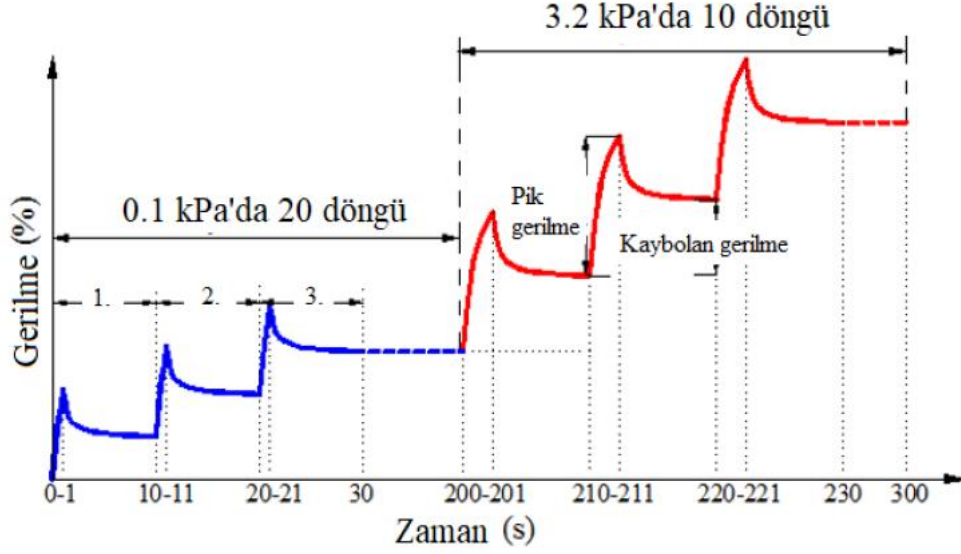
DSR deneyi ile elde edilen $G^*/\sin\delta$ değeri, Superpave şartnamesinde tekerlek izi ile ilişkilendirilmektedir. Bu değer, herhangi bir katkı maddesi ilave edilmemiş bağlayıcılarda daha isabetli ve iyi sonuçlar sunarken modifiye bağlayıcılarda başarısız olmaktadır. Gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar sonucunda $G^*/\sin\delta$ değerinin tekerlek izi ile yüksek oranda bir ilişkisinin olmadığı bulunmuştur. Bunun sebebi DSR deneyinin lineer elastik bölgede gerçekleştirilmesi, buna karşılık tekerlek izi bozulmasının non-lineer davranış sonucu oluşmasıdır. Tüm bunlardan yola çıkılarak MSCR deneyi tasarlanmış, deney sonunda elde edilen $J_{nr3,2}$ değerinin hem modifiye hem de saf bağlayıcılarda arazideki tekerlek izi ile yüksek bir korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir [107].

$J_{nr3,2}$ değeri baz alınarak trafik miktarına göre bağlayıcı standart (S) ağır (H), çok ağır (V) oldukça ağır (E) olacak şekilde sınıflandırılmaktadır. Çizelge 1.4'te trafik miktarına bağlı olarak şartname gereksinimleri verilmiştir.

Çizelge 1.4 : MSCR deneyinde trafiğe bağlı sınıflandırma

Standart trafik, S	Trafik < 3 milyon (ESDY) $V > 70$ km/h	$J_{nr3,2} < 4,5$ kPa-1
Ağır trafik, H	Trafik > 3 milyon (ESDY) $20 < V < 70$ km/h	$J_{nr3,2} < 2,0$ kPa
Çok ağır trafik, V	Trafik > 10 milyon (ESDY) < 20 km/h	$J_{nr3,2} < 1,0$ kPa
Oldukça ağır trafik, E	Trafik > 30 milyon (ESDY) $V < 20$ km/h	$J_{nr3,2} < 0,5$ kPa

Deney ilk önce 0,1 kPa gerilme seviyesinde 20 periyot daha sonra 3,2 kPa gerilme seviyesinde 10 periyot uygulanmaktadır (Şekil 1.22). 0,1 kPa gerilme seviyesinin ikinci 10 periyodu ve 3,2 kPa seviyesinin 10 periyodunun her bir periyotlarında hesaplanan J_{nr} ve %R değerlerinin ortalaması dikkate alınmaktadır [107].



Şekil 1.22 : MSCR testinde şekil değiştirme zaman ilişkisi

$$Jnr_{0,1} = \frac{\sum_{n=11}^{20} [Jnr_{0,1,n}]}{10} \quad (1)$$

$$Jnr_{3,2} = \frac{\sum_{n=21}^{30} [Jnr_{3,2,n}]}{10} \quad (2)$$

$$R_{0,1} = \frac{\sum_{n=11}^{20} [R_{0,1,n}]}{10} \quad (3)$$

$$R_{3,2} = \frac{\sum_{n=21}^{30} [R_{3,2,n}]}{10} \quad (4)$$

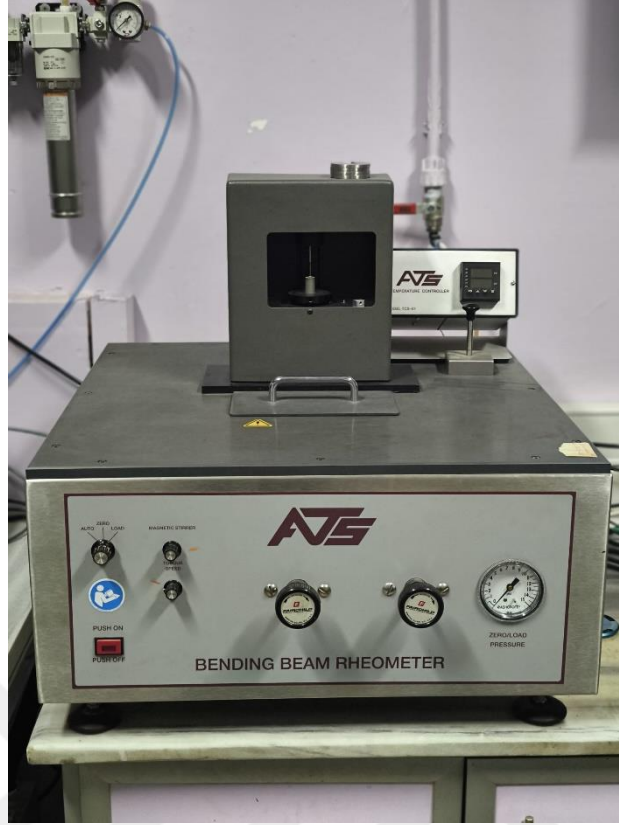
MSCR sisteminde asfalt bağlayıcıların gerilme hassasiyetlerinin göstergesi olan Jnr_{diff} değerinin %75'ten az olması istenmektedir.

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3,2} - Jnr_{0,1})}{Jnr_{0,1}} \times 100 \quad (5)$$

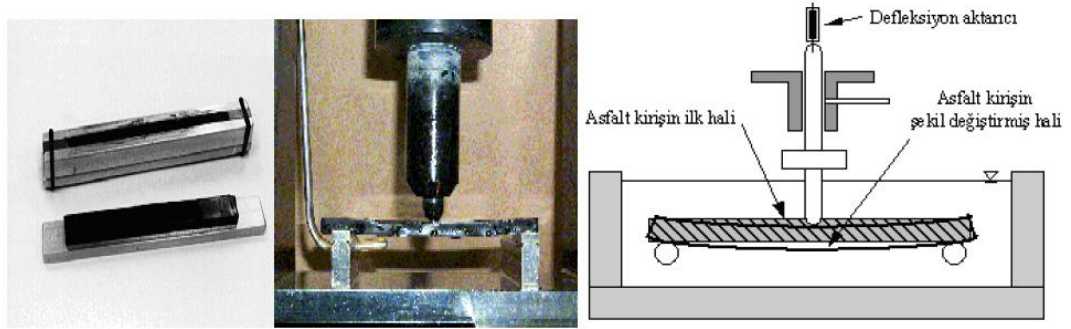
AASHTO T350 ve AASHTO M332 isimleri ile bilinen MSCR yöntemi ile asfalt kaplamaların başlıca bozulmalarından olan tekerlek izi performansını en iyi şekilde temsil edecek bir performans seviyesi tespit edilmektedir. Bu yöntem modifiye bağlayıcılar için gerekli olan elastik geri dönme ve faz açısı prosedürlerini ortadan kaldırmaktadır. Sadece MSCR deneyi bağlayıcının performansı ve içeriğindeki bileşenler hakkında bilgi verebilmektedir. Deney performansı artırmak için gerekli olan bağlayıcıların daha ekonomik olarak belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

1.6.2.5 Kiriş eğilme reometresi (Bending beam rheometer, BBR)

Soğuk iklime sahip olan bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, iklim ve çevre şartları nedeniyle oluşan ve termal çatlak olarak adlandırılan düşük sıcaklık çatlaklarının tespit edilmesi amacıyla kiriş eğme reometresi geliştirilmiştir. BBR deneyi ile asfaltın belli bir sıcaklıkta sabit yük altında sünme ya da defleksiyon özellikleri tespit edilir. BBR deneyi ile, bir bitüm kirişine statik bir gerilim uygulanır ve kirişin rijitliğini elde etmek için gerinim oranı ölçümler. BBR testi, hem kısa süreli yaşlandırmaya tabi tutulan RTFOT sonrası bağlayıcılara hem de uzun dönem yaşlandırılan PAV sonrası bağlayıcı üzerinde gerçekleştirilir. Test kriteri genellikle bağlayıcının sertliğinin 300 MPa olduğu sıcaklık olarak alınır. BBR deneyi, Superpave şartnamesinde düşük servis sıcaklığı kriteri olarak kullanılır, sınıflandırmada belirleyicidir. Ek bir test kriteri "m" değeridir. Bu değer 60 saniyelik yükleme süresindeki sünme eğrisinin eğimidir ve bir bağlayıcının maruz kaldığı gerilmeleri dağıtma veya gevşetme yeteneğinin bir göstergesidir. "m" değerinin en az 0.3 olması istenir. BBR deneyi EN 14771, ASTM D6816, AASHTO T313 standartlarına uyularak gerçekleştirilir [108,109]. BBR deney cihazı Şekil 1.23'te ve deney düzeneği ise Şekil 1.24'te verilmiştir. Deney boyunca asfalt kiriş numunesi bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir [96].



Şekil 1.23 : BBR deney cihazı



Şekil 1.24 : BBR deney numunelerinin hazırlanması ve deney mekanizması [96]

1.7 Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK)

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), esnek özelliklerinden dolayı oldukça konforlu, üst düzeyde servis performansı sunan, stabilite ve durabilite avantajları sunan ve suya karşı dayanımı nedeniyle kaplama tipleri arasında oldukça tercih edilmektedir. BSK'ların mekanik özellikleri kategorize edilerek incelenebilir.

Malzemelerin temel mekanik özellikleri, herhangi bir yapının tasarlanması için gerekli verileri oluşturur. Elastisite modülü, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve kayma dayanımı temel mekanik özellikler olarak tanımlanabilir. Yorulma ve kalıcı

deformasyona karşı dirençleri mekanik performans olarak nitelendirilebilir. Benzer bir durum esnek kaplamaların analitik tasarım yaklaşımı için de geçerlidir. Betonarme veya çelikten oluşan diğer yapılardan temel fark, asfaltların (bitümlü karışımlar) elastik malzeme olarak değil, bitümün varlığı nedeniyle viskoelastik malzeme gibi davranmasıdır. Sıkıştırılmış agregalar, stabilize agregalar veya bitüm dışında bağlayıcılar içeren toprak ve ayrıca işlenmemiş toprak gibi kaplamaların geri kalan yapısal malzemeleri elastik davranışa sahip malzemeler olarak nitelendirilebilir [85,110].

Asfaltların gerilme ve şekil değiştirmeleri ile ilgili temel özelliğine rijitlik modülü adı verilir. Asfaltın mekanik davranışı, yorulma çatlamasına karşı direnç olarak bilinen çekme kuvvetlerine karşı direnç ve kalıcı deformasyona karşı direnç olarak bilinen basınç kuvvetlerine karşı direnç ile belirlenir. Birincisi, yorulma denklemi olarak bilinen, çekme gerinimi ile yükleme sayısı arasındaki ilişkiyle ifade edilir. İkincisi, sünme denklemi olarak bilinen, basınç gerinimi ile yükleme sayısı arasındaki ilişkiyle ifade edilir. Yukarıdaki parametrelerin tümü laboratuvar, yükleme süresi ve koşulları, sıcaklık, katman sıkışma derecesi vb. gibi gerçek saha koşullarını mümkün olduğunca simüle eden testlerle belirlenir. Tezin ilerleyen başlıklarında BSK'ların performans testleri detaylıca anlatılacaktır [4,110].

Asfaltların mekanik özelliklerini ve performansını belirlemeye yönelik testlerin uygulanması, her laboratuvar, bulunmayan karmaşık ve pahalı aparatların kullanılmasını gerektirir. Bu nedenle konuyla ilgili erken geliştirilen nomograflar/denklemeler de halen kullanılmaktadır. Asfaltların temel mekanik özelliklerinin ve davranışının belirlenmesi yalnızca analitik üstyapı tasarım metodolojilerinde kullanılmaz. Günümüzde bunların kullanımı, performans dayalı karışım tasarımı olarak bilinen asfalt karışım tasarımına kadar genişletilmiştir [110]. BSK'ların bazı özellikleri ile ilgili temel açıklamalar aşağıda derlenmiştir.

Stabilite

BSK'ların stabilitesi, mukavemetleri ile yakından ilgilidir. BSK özelinde değerlendirildiğinde maruz kalınan yük trafik yüküdür ve stabilite, kaplamaların trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyonlara gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bir BSK'nın stabilitesinin düşük olması deformasyonların ve dolayısıyla bozulmaların fazla olması anlamına gelir. Stabilite için yükselmesi durumunda sonsuz bir faydadan

söz edilemez. Stabilitenin düşük olmaması gerektiği gibi çok yüksek olması da zararlıdır. Gerilme altında yüksek stabiliteye sahip kaplamalarda esneklik kabiliyeti azalacağından çatlaklar oluşmaktadır. Özellikle düşük sıcaklıklarda bu durum ile fazlasıyla karşılaşilmektedir. Malzemenin viskoelastik karakteri de bu fenomende etkilidir [82,94,111,112].

Rijitlik

“Rijitlik modülü (R_m)”, sıcak asfalt karışımların mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan bir parametredir. Bu karışımlar, sıcaklık ve yükleme hızına bağlı olarak şekil değiştirebilen viskoelastik ve termoplastik malzemelerdir. Kaplama tabakalarına belli bir yük etki ettiğinde, karışımların rijitliği, deformasyon miktarını etkiler. Daha rijit olan karışımlar, daha az deformasyona uğrarken, daha az rijit olanlar, daha fazla deformasyona maruz kalır [112].

Rijitlik genel olarak; yükleme süresinin azalmasıyla (yükleme hızının artmasıyla), sıcaklığın azalmasıyla, karışımın yoğunlaşmasıyla, penetrasyon değerinin azalmasıyla artar. Bu gibi kıyaslar artırılabilir [111].

Esneklik

Bitümlü sıcak karışımların esneklik özellikleri, kaplamaların yük ve sıcaklık değişimlerine karşı gösterdikleri şekil değiştirme kabiliyeti ile ilgilidir. Esneklik, kaplamaların çatlama ve deformasyona karşı dayanımını artıran önemli bir parametredir. Özellikle soğuk bölgelerde, kaplamaların donma-çözülme döngülerine ve termal gerilmelere karşı esnek olması gerekir. Esneklik, bitümlü bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Bitümlü bağlayıcı, yüksek yükleme hızlarında veya düşük sıcaklıklarda daha elastik, düşük yükleme hızlarında veya yüksek sıcaklıklarda daha viskoz davranır [112,113] .

Bu nedenle, esneklik değeri yükleme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Rijitlik modülü ile esneklik arasında ters bir orantı olduğu söylenebilir. Rijitliği yüksek olan bir kaplamanın esnekliği bir o kadar düşüktür denebilir. Bu sebeple bu iki kavram arasındaki denge iyi sağlanmalıdır.

Bitüm miktarının fazla olması ve nispeten açık gradasyonlu agrega yığını kullanılması esnekliği artıracaktır. Esnekliğin düşük olduğu durumlarda yük altında çatlak oluşumu miktarı fazladır. Esnekliğin yüksek olduğu durumlarda ise yorulma çatlakları meydana gelebilir. Kaplamanın esnekliği optimum düzeyde olmalıdır. İdeal koşullarda

kaplamada çatlak oluşumu görülmeden geçici deformasyonlar gözlemlenir. Kısacası esneklik, uzun ömürlü ve konforlu bir kaplama için kritik bir kavramdır [94,114].

Geçirimsizlik

BSK'larda geçirimsizlik kavramı su ve hava geçirgenliğini kapsar. Kaplamaların durabilitesi ve performansına ek olarak yorulma ömürleri için de kritik bir etmendir. BSK içerisindeki boşluk oranı, bağlayıcı oranı, bağlayıcının kalitesi, agrega gradasyonu ve sıkıştırma oranı geçirimsizlik üzerinde etkilidir. Geçirimsizlik oranı arttıkça, kaplama içine su ve hava girişi azalır. Bu da, kaplamanın donma-çözülme döngülerine, termal gerilmelere, oksidasyona ve yorulmaya karşı direncini artırır. Geçirimsizlik oranı azaldıkça, kaplama içine su ve hava girişi artar. Bu da, kaplamanın bozulmasına, çatlamasına, soyulmasına ve deformasyonuna neden olur. Geçirimsizlik oranı, kaplama tipine ve trafik yoğunluğuna göre değişir. Genellikle, aşınma tabakasında %3-5, binder tabakasında %5-7, bitümlü temel tabakasında %7-10 arasında boşluk oranı istenir [115].

İşlenebilirlik

BSK'nın işlenebilirliği, BSK'nın yerleştirilme, sıkıştırılma kolaylığını tanımlayan özellik olarak tanımlanır. İşlenebilirlik, bağlayıcının viskozitesi, sertliği ve elastikiyeti, agregaların şekli ve açısallığı, filler malzemenin tipi ve içeriği, hava boşlukları ve karışımın sıcaklığından etkilenir. İşlenebilirlik, karışımın dış kuvvetler altında deformasyona karşı direnciyle ilgilidir [116].

BSK'nın işlenebilirliğini etkileyen faktörlerden bazıları şunlardır:

- **Bağlayıcı türü ve içeriği:** Bağlayıcı, karışımın reolojik özelliklerini belirleyen ana bileşendir. Bağlayıcının türü ve miktarı karışımın kohezyonunu, yapışmasını ve yağlanmasını etkiler. Genel olarak daha yüksek bağlayıcı içeriği ve daha düşük bağlayıcı viskozitesi, iç sürtünmeyi azaltıp karışımın akışkanlığını arttırdığından BSK'nın işlenebilirliğini artırır. Ancak aşırı bağlayıcı içeriği kanama, tekerlek izi ve çatlama sorunlarına neden olabilir. Geleneksel bağlayıcılardan daha viskoz ve elastik olan polimerle modifiye edilmiş bağlayıcıların kullanılması, özellikle düşük sıcaklıklarda BSK'nın işlenebilirliğini azaltabilir.
- **Agreganın tanelenmesi ve şekli:** Agreganın tanelenmesi ve şekli paketleme yoğunluğunu, yüzey alanını ve agregaların karışımdaki birbirine kenetlenmesini etkiler. Daha kaba ve daha köşeli agregalar, karışımdaki boşlukları ve sürtünmeyi

arttırdığından BSK'nın işlenebilirliğini azaltma eğilimindedir. Daha ince ve daha yuvarlak agregalar, boşlukları doldurarak ve karışımdaki sürtünmeyi azaltarak BSK'nın işlenebilirliğini artırma eğilimindedir. Ancak çok ince veya çok kaba geçişler ayrışma, istikrarsızlık ve geçirgenlik sorunlarına neden olabilir.

- **Dolgu tipi ve içeriği:** Dolgu maddesi 0,075 mm elekten geçen ince malzemedir. Dolgu maddesi türü ve içeriği karışımın sertliğini, kohezyonunu ve neme duyarlılığını etkiler. Dolgu maddesi ayrıca bağlayıcı madde ile etkileşime girerek agregaları birbirine bağlayan bir mastik oluşturur. Kireçtaşı, çimento, uçucu kül vb. gibi farklı dolgu türlerinin BSK'nın işlenebilirliği üzerinde farklı etkileri vardır. Genel olarak, daha yüksek dolgu maddesi içeriği ve daha sert dolgu maddesi türü, karışımın sertliğini ve kohezyonunu arttırdığından BSK'nın işlenebilirliğini azaltır. Ancak çok düşük veya çok yüksek dolgu içeriği kararsızlığa, tekerlek izi oluşumuna ve çatlama sorunlarına neden olabilir.
- **Sıcaklık:** Sıcaklık, bağlayıcının ve mastiğin viskozitesini ve elastikiyetini kontrol ettiğinden BSK'nın işlenebilirliğini etkileyen en kritik faktördür. Daha yüksek sıcaklık, karışımın viskozitesini ve elastikiyetini azaltarak BSK'nın işlenebilirliğini artırır ve karışımı daha akışkan ve deforme edilebilir hale getirir. Ancak aşırı sıcaklık, ısıyla sertleşme, oksidasyon, buharlaşma vb. gibi bağlayıcıya, katkı maddelerine ve çevreye zarar verebilir. Düşük sıcaklık, karışımın viskozitesini ve elastikiyetini arttırdığından BSK'nın işlenebilirliğini azaltır. daha sert ve kırılmandır. Ancak çok düşük sıcaklık sıkışma, çatlama ve dayanıklılık sorunlarına neden olabilir [116].

Kayma direnci

Kayma direnci, lastiğin üzerinde kaymasını önleyen kaplama yüzeyinin özelliğidir. Kayma direnci, özellikle ıslak veya buzlu koşullarda sürücülerin ve yayaların güvenliği açısından önemlidir. Kayma direnci, agregaların türü, boyutu, şekli ve derecelendirilmesinden, bağlayıcı içeriği ve tipinden, sıkıştırma yöntemi ve derecesinden ve kaplama yaşı ve aşınmasından etkilenen kaplamanın makro ve mikro dokusuna bağlıdır. . Kayma direnci çeşitli yöntemlerle ölçülebilir. Asfalt kaplamalar uygun şekilde tasarlanır, inşa edilir ve bakımı yapılırsa yeterli kayma direnci sağlayabilir [117,118].

1.7.1 Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen bozulmalar

Sıcak karışım asfalt (BSK), agrega ve bitümden oluşan bir tür kaplama malzemesidir. BSK, dayanıklılığı, esnekliği ve bakım kolaylığı nedeniyle yol yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak BSK, trafik yükü, çevre koşulları ve inşaat kalitesi gibi çeşitli faktörlerden dolayı da zamanla bozulabilir. BSK'da meydana gelen en yaygın bozulma türlerinden bazıları şunlardır:

Tekerlek izi: Tekerlek izi, tekrarlanan yüklemeler altında BSK katmanının konsolidasyonu veya yanal hareketi nedeniyle kaplama yüzeyinin trafik yönü boyunca **kalıcı deformasyonudur**. Tekerlek izleri sürüş kalitesini, kayma direncini ve kaplamanın drenajını azaltabilir ve suda kızaklama ve kaza riskini artırabilir. Tekerlek izleri yetersiz sıkıştırma, aşırı asfalt veya ince taneler, düşük hava boşlukları, plastik ince taneler veya dengesiz temel malzemeden¹ kaynaklanabilir. Tekerlek izleri bir düz kenar, profilometre veya lazer tarayıcı kullanılarak ölçülebilir. Tekerlek izleri, kaplamanın asfaltla tesviye edilmesi, ince bir kaplama uygulanması veya dengesiz karışımın frezelenmesi ve değiştirilmesi yoluyla onarılabilir. Tekerlek izinin sebepleri aşağıda sıralanmıştır. Tipik bir tekerlek izi bozulması Şekil 1.25'te verilmiştir.

- Yeterli alt zemin desteğinin olmaması
- Zayıf stabilite
- Kötü karışım tasarımı
- Yuvarlak agrega
- Aşırı bağlayıcı kullanımı
- Sıyırılma



Şekil 1.25 : Tipik bir tekerlek izi bozulması örneği

Çatlaklar/Çatlama: Çatlama, BSK katmanının termal, trafik veya çevresel gibi çeşitli gerilmeler nedeniyle kırılmasıdır. Çatlama, kaplamanın yapısal bütünlüğünü, hizmet ömrünü ve estetik görünümünü azaltabilir, su ve havanın tabana ve alt zemine nüfuz etmesine izin vererek daha fazla hasara neden olabilir. Farklı çatlama türleri sıralanacak olursa:

Timsah sırtı çatlaklar: Timsah sırtı çatlaklar, bir timsahın veya timsahın sırtına benzeyen bir desen oluşturan, birbirine bağlı bir dizi çatlaktır. Bu çatlak tipi, yetersiz yapısal destek, zayıf drenaj, soyulma veya aşırı yükleme artışı nedeniyle BSK yüzeyinin tekrarlanan trafik yüklemesi altında yorulma arızasından kaynaklanır. Timsah çatlama, çatlak ölçer veya dijital görüntü analizi kullanılarak ölçülebilir. Timsah çatlak, sorunlu alanın kaldırılıp yerine uygun asfalt karışımı konularak onarılabilir. Tipik bir timsah sırtı çatlak ve mekanizması Şekil 1.26'da verilmiştir.



Şekil 1.26 : Tipik timsah sırtı çatlak oluşumu ve şiddet göstergesi

Boyuna çatlaklar: Boyuna çatlaklar, kaplamanın merkez çizgisine veya döşeme yönüne paralel uzanan çatlaktır. Boyuna çatlaklara kaplama büzülmesi, düşük sıcaklıktaki çatlamlar, yansıma çatlakları, kenar çatlamları neden olabilir. Boyuna çatlak, bir çatlak ölçer veya dijital görüntü analizi kullanılarak ölçülebilir. Boyuna çatlaklar, çatlakların kapatılması, doldurulması veya kaplanması yoluyla onarılabilir. Şekil 1.27’de bir boyuna çatlak örneği verilmiştir.



Şekil 1.27 : Boyuna çatlak örneği

Enine çatlaklar: Enine çatlaklar, kaplamanın merkez hattına veya döşeme yönüne dik olarak uzanan çatlaktır. Enine çatlama, termal büzülme, yansıma çatlakları veya yetersiz inşaat süreci neden olabilir ancak genellikle enine çatlaklar termal çatlaklar olarak bilinir. Enine çatlama, bir çatlak ölçer veya dijital görüntü analizi kullanılarak ölçülebilir. Enine çatlaklar, çatlakların kapatılması, doldurulması veya üzerinin kaplanması yoluyla onarılabilir. Enine çatlaklar düzenli aralıklarla meydana gelir ve sebepleri aşağıda özetlenmiştir:

- Düşük servis sıcaklıklarında asfalt çok sert olması
- Yol yüzeyinin hızla soğuması
- Yüksek sıcaklığa duyarlı asfalt bağlayıcı kullanılması
- Alt zemin tipi
- Kaplamanın servis süresi

Tipik bir enine çatlak oluşumu Şekil 1.28’de verilmiştir.



Şekil 1.28 : Enine çatlaklar

Kayma çatlakları: Kayma çatlağı, araçların frenleme veya dönüş hareketleri nedeniyle BSK katmanının alttaki katman üzerinde kayması sonucu oluşan hilal şeklinde (U şeklinde de denir) çatlama. Kayma çatlama, toz, yağ, kir, su veya diğer yapışkan olmayan malzemelerden dolayı yüzey tabakası ile altındaki katman arasında bağın olmaması veya yapışkan kaplama veya uygun karışım eksikliğinden kaynaklanabilir. Kayma çatlama, bir çatlak ölçer veya dijital görüntü analizi kullanılarak ölçülebilir. Kayma çatlakları, yüzey tabakasının kaldırılması ve bitki karışımlı asfalt malzemesiyle yama yapılmasıyla onarılabilir. Kayma çatlağı örnekleri Şekil 1.29’da verilmiştir.



Şekil 1.29 : Farklı şiddetlerde kayma çatlağı örnekleri

Kopma/Sökülme bozulması: Sökülme, agrega parçacıklarının kaybı sonucunda BSK katmanının yüzeyden aşağıya doğru giderek parçalanmasıdır. Sökülme kaplamanın kayma direncini, sürüş kalitesini ve yapısal gücünü azaltabilir ve gürültü ve toz seviyelerini artırabilir. Sökülme, sıkıştırma eksikliği, soğuk veya yağışlı havalarda inşa edilmesi, kirli agrega, kuru karışım veya karışımın aşırı ısınmasından kaynaklanabilir. Parçalanma görsel inceleme veya kum yama testi kullanılarak ölçülebilir. Bu bozulma tipi BSK yüzeyinin ilerleyici parçalanmasının bir sonucu olarak agrega parçacıklarının karışımda yerinden çıkması şeklinde sonuçlanabilir. Ayrıca sebepleri, yoğunluğun düşük olması nedeniyle yapışma eksikliği, agrega gradasyonunda ince tanelerin bulunmaması, asfalt bağlayıcının yaşlanması olarak bilinmektedir.

Kusma: Kusma, asfalt bağlayıcının kaplama yüzeyine doğru yukarı doğru hareket ederek parlak, siyah bir asfalt filmi oluşturmaktır. Kusma, kaplamanın kayma direncini, sürüş kalitesini ve estetik görünümünü azaltabilir ve suda kızaklama ve kaza riskini artırabilir. Kusmanın nedeni aşırı asfalt bağlayıcı kullanımı, düşük hava boşlukları, aşırı sıcaklık olabilir. Kanama görsel inceleme veya kum yama testi kullanılarak ölçülebilir.

Soyulma: Soyulma, asfalt bağlayıcı ile agregası arasındaki yapışmanın kaybıdır ve asfalt filminin agregası yüzeyinden ayrılmasıyla sonuçlanır. Soyulma, BSK katmanının yapışmasını, gücünü ve dayanıklılığını azaltabilir ve su ve havanın tabana ve alt zemine nüfuz etmesine izin vererek daha fazla hasara neden olabilir. Soyulma; nemden, zayıf agregası kalitesinden, uyumsuz asfalttan veya yetersiz sıkıştırmadan kaynaklanabilir. Soyulma, görsel bir inceleme veya kaynar su testi veya çekme mukavemeti oranı testi gibi bir laboratuvar testi kullanılarak tespit edilebilir. Soyulma önleyici maddeler, sönmüş kireç veya polimerle modifiye edilmiş asfalt kullanılarak soyulma önlenir veya en aza indirilebilir.

Yaşlanma: Yaşlanma, asfalt bağlayıcısının oksidasyon, buharlaşma veya polimerizasyon nedeniyle kimyasal ve fiziksel olarak sertleşmesidir. Yaşlanma, asfalt bağlayıcısının sertliğini, kırılabilirliğini ve viskozitesini artırabilir ve sünekliğini, elastikiyetini ve yapışmasını azaltabilir [4]. Yaşlanma ısıya, havaya, güneş ışığına veya suya maruz kalmaktan kaynaklanabilir. Yaşlanma, penetrasyon testi, viskozite testi, yumuşama noktası testi veya süneklik testi gibi laboratuvar testleri kullanılarak ölçülebilir. Gençleştiriciler, geri dönüşüm veya sıcak karışım asfalt kullanılarak yaşlanma azaltılabilir.

Bunlar sıcak karışım asfaltta meydana gelen ana bozulma türlerinden bazılarıdır. Kaplama mühendisleri ve yöneticileri, bu tür bozulmaların nedenlerini, etkilerini ve çözümlerini anlayarak BSK kaplamalarını daha etkili ve verimli bir şekilde tasarlayabilmekte, inşa edebilmekte ve bakımını yapabilmektedir. Tüm bozulma tiplerinin isimleri ve sebeplerinin derlendiği bilgiler Çizelge 1.5'te sunulmuştur.

Çizelge 1.5 : Tüm bozulma tipleri, sebepleri ve çözüm önerileri [119]

Bozulma	Olası Neden	Bakım-Onarım Önerileri
Çukur/Delik [Pothole]	Zayıf kaplama, yüzey, taban, alt zemin; İnce yüzey; Fazla veya eksik ince kum; Kötü drenaj.	Islak malzemeyi kesin, temizleyin ve asfalt karışımı ile doldurun. Sıkıştırma için hacmin ekstra %25'ini ayırın. Yamayı mevcut yol bölümüne geri yüklemek için düz bir kenar kullanın.
Temel Bozulmaları	Alt zeminin konsolidasyonu; Alanda aşırı yüklenme; Yanal destek eksikliği; Kötü drenaj.	Tüm yüzey ve tabanı ince bir malzemeye kadar kaldırın ve gerekli yapısal tasarıma göre minimum derinliğe kadar asfalt karışımı ile değiştirin.
Sökülme/Sıyrılma	Sıkıştırma eksikliği; Soğuk veya yağışlı havalarda inşaat yapılması; Kirli agrega; Kuru karışım; Aşırı ısıtma karışımı.	Yüzey yaması, fog seal/slurry seal uygulamaları. Tüm proje için gerekiyorsa ince bir kaplama tabakası gerekebilir.
Kusma	Aşırı asfalt bağlayıcı kullanımı; Düşük hava boşlukları.	Elekleyle lekeleyin, talaş yüzey işlemi uygulayın veya ince kaplama yapın. Proje itiyorsa veya diğer plastik hareket belirtileri varsa roto-freze/overlay uygulayın.
Oluklanma	Plastik karışım; Düşük hava boşlukları; Aşırı asfalt veya ince taneler; Stabil olmayan temel malzeme.	Plastik karışımı roto-mill ile temizleyin ve uygun karışımla değiştirin. Temel malzeme sorumluya, kaplamayı kaldırın, kazıyın ve yeniden sıkıştırın.
Çökmeler	Alt zeminin sağlamlaştırılması; Kötü inşaat; Kötü drenaj..	Bölgeyi temizleyin, yapıştırın ve sıcak karışımlı bir yüzey yaması yerleştirin. Yamanın sınırlarını belirlemek için bölge ipe çevrilmelidir.
Timsah sırtı çatlaklar	Zayıf yüzey, taban veya alt zemin; İnce yüzey veya taban; Kötü drenaj.	Tüm sıkıntılı alanı sert malzeme derinliğine kadar kaldırın ve sıkıştırma için yama derinliğinin %25 katına izin vererek uygun asfalt karışımı ile değiştirin.
Kuru Yüzey/Çatlama	Eski ve kurumuş karışım; Karışım çok kuru yerleştirilmiş.	Fog seal, slurry seal ya da yeniden yüzey kaplaması.
Kenar çatlakları	Yanal destek eksikliği; Altta yatan malzemenin oturması; Kuruyan toprağın büzülmesi.	Drenajı iyileştirin. Kenara yakın ağaçları, çalıları vb. kaldırın. Çatlakları asfalt emülsiyon bulamacı veya emülsifiye asfalt ile doldurun.

1.8 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Sıcak karışım asfaltların performans özelliklerinin değerlendirilmesi ve asfalt kaplamaların kalitesinin sağlanması için laboratuvar testleri önemlidir. Bu testler, dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamaların tasarlanması için çok önemli olan BSK'nın farklı koşullar altındaki davranışının anlaşılmasına yardımcı olur. BSK'nın özelliklerini değerlendirmek için çeşitli test yöntemleri uygulanmakta ve bu yöntemler belirli standartlara göre gerçekleştirilmektedir. Standartlar, test sürecinde tutarlılık ve doğruluk sağlayarak sonuçların farklı laboratuvarlar ve projeler arasında güvenilir bir şekilde karşılaştırılmasına olanak tanır [110,120]. Sıcak karışım asfaltlar üzerindeki laboratuvar testleri aşağıdaki nedenlerden dolayı hayati öneme sahiptir:

- **Kalite Güvencesi:** BSK'nın gerekli performans ve dayanıklılık standartlarını karşılamasını sağlamaya yardımcı olurlar.
- **Performans Tahmini:** BSK'nın performans özelliklerini değerlendiren bu testler, asfalt kaplamaların çeşitli trafik ve çevre koşulları altındaki davranışının tahmin edilmesine yardımcı olur.
- **Karışım Tasarımı Optimizasyonu:** Test sonuçları BSK'nın karışım tasarımını optimize etmek için kullanılır ve bu da belirli proje gereksinimlerine göre uyarlanmış asfalt karışımlarının geliştirilmesine yol açar [121,122].

BSK performans değerlendirmesine yönelik laboratuvar testlerini iki kategoriye ayırmak mümkündür: “Hacimsel testler ve mekanik testler”. Hacimsel testler, BSK'nın hava boşlukları, mineral agregadaki boşluklar (VMA), asfaltla doldurulmuş boşluklar (VFA) ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerini ölçer. Bu testler BSK'nın tasarım kriterlerine uygunluğunu kontrol etmek, üretim ve yerleştirme kalitesini kontrol etmek amacıyla kullanılır. Mekanik testler, BSK'nın çeşitli yükleme ve çevre koşulları altında mukavemetini, sertliğini ve deformasyon direncini ölçer. Bu testler BSK'nın tekerlek izi, yorulma, çatlama, nem duyarlılığı ve yaşlanma açısından potansiyel performansını değerlendirmek için kullanılır.

BSK performans değerlendirmesi için Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Yetkilileri Birliği (AASHTO), Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), Avrupa Standardizasyon Komitesi gibi farklı kurum ve kuruluşlar tarafından geliştirilen çeşitli test yöntemleri ve standartları bulunmaktadır. Bu test yöntemleri ve standartları, numune hazırlama, test ekipmanı, yükleme konfigürasyonu, test sıcaklığı ve

performans kriterleri açısından farklılık gösterebilir. Bu nedenle bu test yöntemleri ve standartlar arasındaki benzerlik ve farklılıkların anlaşılması ve spesifik BSK ve uygulamasına en uygun olanların seçilmesi önemlidir.

Aşağıda, BSK performans değerlendirmesi için en sık kullanılan test yöntemlerinden ve standartlarından bazıları incelenmiş, bunların avantajları ve sınırlamaları tartışılmıştır.

- Hacimsel testler: Bu testler sırasıyla AASHTO T 166, AASHTO T 209 ve AASHTO R 35 standartlarına göre BSK karışımının kütle özgül ağırlığının, maksimum özgül ağırlığının ve hava boşluklarının belirlenmesini içermektedir. Bu testler, AASHTO T 312 standardına göre Superpave döner kompaktör (SGC) aracılığıyla sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilir. SGC, dikey bir basınç ve bir dönme açısı uygulayarak BSK karışımının alan sıkıştırmasını simüle eden bir cihazdır. SGC, yoğunluk-boşluk eğrisini oluşturmak ve BSK karışımının optimum asfalt içeriğini belirlemek için kullanılabilen farklı sıkıştırma seviyelerine sahip numuneler üretir.

- Tekerlek izi testleri: Bu testler, BSK'nın yüksek sıcaklıklarda tekrarlanan veya statik yükleme altında kalıcı deformasyonunu ölçer. Bu testler arasında tek eksenli penetrasyon kesme testi (UPST), serbest sıkıştırma testi (UCT), dinamik modül testi (DMT), akış numarası testi (FNT), asfalt kaplama analiz cihazı (APA) testi ve Hamburg tekerlek testi yer almaktadır. UPST ve UCT, numuneye sabit bir yük veya stres uygulayan ve zaman içindeki gerinim veya deformasyonu ölçen statik sünme testleridir. UPST ve UCT sırasıyla ASTM D 4123 ve ASTM D 6931 standartlarına göre gerçekleştirilir. DMT, FNT, APA ve HWTT, numuneye döngüsel bir yük veya stres uygulayan ve yanıtı modül, akış sayısı, tekerlek izi derinliği veya geçiş sayısı cinsinden ölçen dinamik testlerdir. DMT, AASHTO T 342 standardına göre gerçekleştirilir, FNT, AASHTO TP 79 standardına göre gerçekleştirilir, APA, AASHTO TP 63 standardına göre gerçekleştirilir ve HWTT, AASHTO T 324 standardına göre gerçekleştirilir.

- Yorulma testleri: Bu testler, BSK karışımının ara sıcaklıklarda tekrarlanan yüklemeler altında çatlama direncini ölçer. Bu testler dört nokta eğilme testini (FPBT), dolaylı çekme testini (IDT) ve yarı dairesel bükme testini (SCB) içerir. FPBT ve IDT, numuneye döngüsel bir yük veya gerilim uygulayan ve modül, faz açısı, dağılan enerji ve arızaya kadar olan döngü sayısı açısından tepkiyi ölçen eğilme testleridir. FPBT ve

IDT, sırasıyla AASHTO T 321 ve AASHTO T 322 standartlarına göre gerçekleştirilir. SCB, numuneye monotonik bir yük veya yer değiştirme uygulayan ve kırılma enerjisi, kırılma tokluğu ve kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi açısından tepkiyi ölçen bir kırılma testidir. SCB ASTM D 8044 standardına göre gerçekleştirilir.

- Çatlama testleri: Bu testler, BSK karışımının düşük sıcaklıklarda termal veya çekme yüklemesi altında çatlama direncini ölçer. Bu testler arasında termal gerilim sınırlandırılmış numune testi (TSRST), disk şekilli kompakt gerilim testi (DCT) ve yarım daire eğilme testi (SCB) yer alır. TSRST ve DCT, numuneyi sabit bir hızda soğutan ve tepkiyi stres, gerinim, kırılma sıcaklığı ve kırılma mukavemeti açısından ölçen termal testlerdir. TSRST ve DCT sırasıyla AASHTO TP 10 ve ASTM D 7313 standartlarına göre gerçekleştirilir. SCB, numuneye monotonik bir yük veya yer değiştirme uygulayan ve kırılma enerjisi, kırılma tokluğu ve kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi açısından tepkiyi ölçen bir kırılma testidir. SCB ASTM D 8044 standardına göre gerçekleştirilir.

- Neme duyarlılık testleri: Bu testler, suyun BSK karışımı üzerindeki etkisini mukavemet, sertlik ve dayanıklılık açısından ölçer. Bu testler, çekme mukavemeti oranı testini (TSR), kaynar su testini (BWT) ve değiştirilmiş Lottman testini (MLT) içerir. TSR ve BWT, numuneye monotonik bir yük veya stres uygulayan ve tepkiyi çekme mukavemeti, çekme gerilimi ve çekme mukavemeti oranı cinsinden ölçen dolaylı çekme testleridir. TSR ve BWT sırasıyla AASHTO T 283 ve AASHTO T 324 standartlarına göre gerçekleştirilir. MLT, numuneyi tekrarlanan donma ve çözülme döngülerine maruz bırakan ve tepkiyi tutulan güç, tutulan sertlik ve dayanıklılık indeksi açısından ölçen döngüsel bir donma-çözülme testidir. MLT, AASHTO T 283 standardına göre gerçekleştirilir.

- Yaşlandırma testleri: Bu testler, yaşlanmanın BSK karışımı üzerindeki etkisini kimyasal ve fiziksel özellikler açısından ölçer. Bu testler, yuvarlanan ince film fırın testini (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı testini (PAVT) ve disk şekilli kompakt gerilim testini (DCT) içerir. RTFOT ve PAVT, asfalt bağlayıcıyı yüksek sıcaklıklara ve basınçlara maruz bırakan ve viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası ve süneklik açısından tepkiyi ölçen yaşlandırma testleridir. RTFOT ve PAVT, sırasıyla AASHTO T 240 ve AASHTO R 28 standartlarına göre gerçekleştirilir. DCT, numuneye monotonik bir yük veya yer değiştirme uygulayan ve tepkiyi kırılma enerjisi, kırılma

tokluğu ve kritik çatlak ucu açılma yer değiştirmesi açısından ölçen bir kırılma testidir. DCT ASTM D 7313 standardına göre gerçekleştirilir [110,112,123–128].

Yaygın olarak kullanılan ve birçoğu bu tez çalışmasında tercih edilecek deney yöntemleri daha detaylıca anlatılmak istenmiştir. Bu kapsamda tezin ilerleyen bölümünde deney yöntemleri tanıtılacaktır.

1.8.1 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti testi, asfalt karışımlarının çekme mukavemetini belirlemek için kullanılan bir laboratuvar testidir. Test, silindirik bir asfalt numunesinin, kırılana kadar sabit bir deformasyon hızıyla (50 mm/dakika) kenarına yüklenmesiyle gerçekleştirilir. Maksimum yük kaydedilir ve dolaylı çekme mukavemetinin hesaplanmasında kullanılır. Test, asfalt karışımlarının göreceli kalitesini değerlendirmek ve sahadaki nem hasarı potansiyelini belirlemek için kullanılır. Test, laboratuvarda üretilmiş veya sahadan elde edilen asfalt karışım çekirdeklerinin hazırlanmasına ve test edilmesine yönelik prosedürleri kapsayan AASHTO T 283'e göre gerçekleştirilir. ITS dayanımı değerleri, kaplamanın çatlama direnci açısından asfalt karışımlarının göreceli kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir. Test sonuçları aynı zamanda sahadan alınan karışımların nem hasarı potansiyelini belirlemek için de kullanılabilir. Bu standardın ürettiği sonuçların kalitesi, kullanılan ekipmanın kalibrasyon ve bakım yeterliliğine bağlıdır. Deney sonucunda öğrenilen asfalt özellikleri arasında, kaplamanın çatlama direncinin belirlenmesinde önemli bir faktör olan asfalt karışımının çekme mukavemeti de bulunmaktadır [129,130]. Deney düzeneği ve hazırlama süreci Şekil 1.30'da verilmiştir.

Dolaylı çekme deneyi, asfalt karışımların neme karşı dayanımlarının araştırıldığı ve 25°C sıcaklıkta gerçekleştirilen bir deney yöntemidir. Sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybının araştırıldığı deney sonuçları asfalt karışımların uzun dönemli servis ömründeki performansı ve soyulmaya karşı hassasiyetlerini belirler. Bu amaçla yaygın olarak tercih edilen deney yöntemlerinden biri AASHTO T 283 standardına göre Modifiye Lottman deneyidir. Modifiye Lottman deneyinde asfalt karışım numuneleri donma-çözünme döngüsüne tabi tutulur. Her test grubundan 3'er adet koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olmak üzere 6 adet numune hazırlanmaktadır. Sıkıştırılmamış agrega ve asfalt karışımı (loose mix) 25°C sıcaklıkta 2 saat bekletip soğutulur. Daha

sonra 60°C sıcaklıktaki etüve konularak 16 saat bekletilir. Viskozite deneyinden sonra belirlenen sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekledikten sonra %6-8 oranında boşluk olacak şekilde sıkıştırılır. Bu sıkıştırma için Marshall tokmağı ile 50 vuruş idealdir. Koşullandırılmamış numuneler 25°C'lik su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulup kırılır. Koşullandırılmış numuneler hazırlanırken 13-67 kPa emme basıncındaki vakum ile 5-10 dakika süre vakum uygulanır ve %70-80 oranında suya doymun hale getirilir. Doymun numuneler -18°C sıcaklıkta 16 saat süreyle dondurucuya konur. Daha sonra numuneler 60°C'lik su banyosunda 24 saat bekletilir. Çıkarılan numuneler 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kırılır. Koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetine oranı ile TSR (Tensile Strength Ratio, Çekme Dayanım Oranı) belirlenir. Şartname, TSR değerinin en az %80 olması gerektiğini belirtmektedir. Bu değerden daha az TSR değeri sunan karışımların nem hasarına karşı dayanıksız olduğu söylenebilir.

Dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonrasında, mukavemet değeri Formül 6 ile hesaplanırken, çekme dayanımı oranı ise Formül 7 ile hesaplanır:

$$ITS = \frac{2.P_{max}}{\pi.h.d} \quad (6)$$

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kg/cm²)

P_{max} : Maksimum yük (kg)

h : Numune yüksekliği (cm)

d : Numune çapı (cm)

$$TSR = \left(\frac{ITS_{koşullandırılmış}}{ITS_{koşullandırılmamış}} \right) * 100 \quad (7)$$



Şekil 1.30 : İndirekt çekme dayanımı deney düzeneği

1.8.2 İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi (ITSM)

Asfalt karışımların gerilme-şekil değiştirmelerinin ölçüm tiplerinden birisi rijitlik modülünün indirekt çekme modunda ölçülmesidir. Karışımın elastik özelliklerinin değerlendirilmesi için önemli bir parametredir.

Deney UTM cihazında gerçekleştirilmektedir. Karışım numuneleri 3 saat deney sıcaklığında koşullandırılmaktadır. Numune yüksekliği, numune çapı, tahmini poisson oranı, yük etki süresi, yük artış süreleri, hedef yatay deformasyon ve tahmini rijitlik modülü gibi değerler yazılıma girildikten sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilmektedir. Ardından yatay deformasyonu ölçen LVDT'ler uygun konuma ayarlandıktan sonra deney başlatılmaktadır. İlk olarak, numunelere 5 defa tekrarlanan ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. Böylece cihaz tarafından numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yük belirlenmektedir. Ardından numuneye cihazın belirlediği yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri tespit edilmektedir. İndirekt çekme rijitlik modülünün hesabı Formül 8'de, deney düzeneği ise Şekil 1.31'de verilmiştir.

$$S_m = \frac{F(R+0.27)}{L*H} \quad (8)$$

Sm: İndirekt çekme rijitlik modülü (MPa),

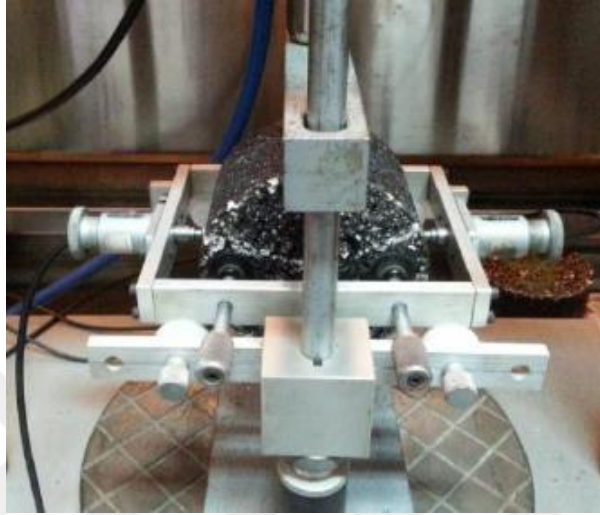
F: Maksimum dikey yük (N),

H: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm),

L: Ortalama numune yüksekliği (mm),

R: Poisson oranıdır (0,35).

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmakta ve numunenin ITSM değeri, aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalaması alınarak belirlenmektedir.



Şekil 1.31 : ITSM deneyi düzeneği

1.8.3 Statik sünme deneyi

Statik sünme deneyi, sıcak asfalt karışımların statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla numune üzerine belirli bir sürede sabit bir yük altında oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanır. Bu deney, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yükleme altında sünme rijitliği değerinin belirlenmesini içermektedir. Karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla da kullanılmaktadır. Statik sünme deneyi sonucunda elde edilen sünme rijitliği değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki sertliğinin tahmininde, çatlama potansiyeli veya tekerlek izinin hesaplanmasında kullanılır.

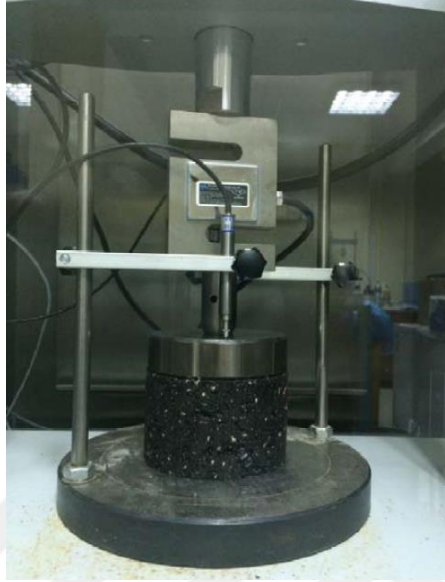
Deney sırasında bir saatlik süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel gerilme (σ) uygulanarak, zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Numunenin ilk yüksekliği belli olduğundan, eksenel şekil değiştirme (ϵ) ve sıcaklık ile yükleme zamanına bağlı olarak, Sünme rijitliği (E_{cq}) değeri Formül 9'daki gibi hesaplanır. Statik sünme deney düzeneği Şekil 1.32'de verilmiştir.

$$E_{cq}(t) = \sigma / \epsilon_c(t) \quad (9)$$

$E_{cq}(t)$: t anındaki sünme rijitliği (MPa)

σ : Uygulanan gerilme (MPa)

$\epsilon_c(t)$: t anında oluşan toplam kalıcı deformasyon (mm/mm)

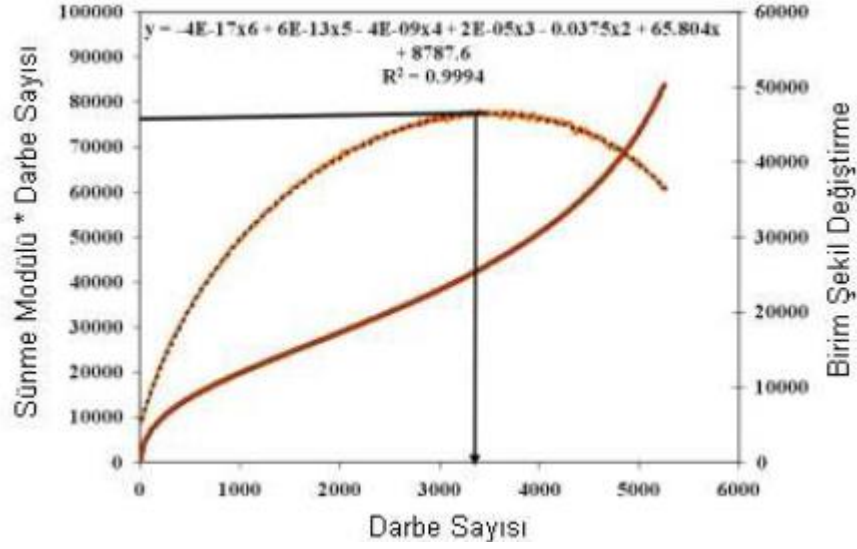


Şekil 1.32 : Statik sünme deney düzeneği

1.8.4 Dinamik sünme deneyi

Dinamik (tekrarlı) sünme testi, tekrarlı yükleme altında asfalt karışımlarının kalıcı deformasyonunu veya tekerlek izi direncini ölçen bir laboratuvar testidir. Test, Amerika Birleşik Devletleri'nde Ulusal Kooperatif Karayolu Araştırma Programı (NCHRP) tarafından geliştirilen P07 2001 protokolüne göre gerçekleştirilmektedir [131]. Protokol, dinamik (tekrarlı) sünme testi için numune hazırlama, test cihazı, test prosedürü ve veri analiz yöntemlerini belirtmektedir. Dinamik sünme deney düzeneği Şekil 31'de verilen statik sünme deney düzeneğine benzerdir.

Test, silindirik bir asfalt karışım numunesine sabit bir sıcaklık ve frekansta tekrarlanan bir eksenel yük uygulanmasını içermektedir. Yük, her biri bir yük süresi ve bir dinlenme süresinden oluşan döngüler halinde uygulanır. Yük süresi ve dinlenme süresi, yükleme konfigürasyonuna bağlı olarak değişebilir. Test, akış sayısı (flow number) ile tanımlanan belirli bir kalıcı gerilme seviyesine ulaştığında sonlandırılır. Akış sayısı, numunede üçüncül akışı veya kalıcı gerininin hızlı birikimini başlatmak için gereken yük döngüsü sayısıdır (Şekil 1.33) [83,132].



Şekil 1.33 : Akma sayısının bulunması [83]

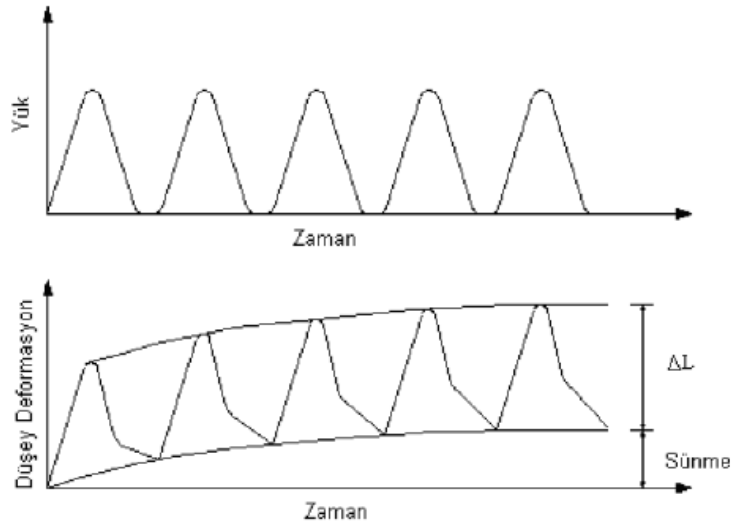
Numunede bozulma meydana gelinceye kadar devam eden deney sonucunda Şekil 1.34'te görüldüğü gibi yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 1.34'te görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, numunenin sahip olduğu boşluklardan dolayı konsolidasyon meydana gelerek bu bölgede karışımın hacmi azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta önemli oranda artmakta daha sonra azalmaktadır. İkinci bölgede uygulanan tekrarlı yük sonucu toplam şekil değiştirmede lineere yakın bir değişim gözlenmektedir. Üçüncü bölge ise ikinci tür kalıcı deformasyonun olduğu bölge olup bu bölgede kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Yorulma deneyinde de görüldüğü üzere üç aşamalı kalıcı deformasyon davranışı bitümlü karışımların temel özelliğidir. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı “akma sayısı” olarak isimlendirilmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda kalıcı birim şekil değiştirme ve akma sayısı ile tekerlek izi oluşumu arasında bir bağlantı olduğu, akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu belirlenmiştir [133].



Şekil 1.34 : Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi

Dinamik (tekrarlı) sünme testi, asfalt karışımlarının performans ve bozulma özelliklerini tekerlek izi direnci açısından değerlendirmek için kullanılır. Tekerlek izi, trafik yükü ve çevresel koşullar altında asfalt tabakalarının kalıcı deformasyonundan kaynaklanan esnek kaplamalarda yaygın bir bozulma tipi olarak nitelendirilir. Tekerlek izi, yol kullanıcılarının sürüş konforu ve güvenliğinin yanı sıra kaplamaların hizmet ömrünü ve bakım maliyetini de etkiler [134].

Dinamik sünme deneyinde sabit bir değerdeki yük, laboratuvarında üretilen ya da araziden alınan silindirik numunenin üzerine tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Deney farklı sıcaklıklarda ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Tekrarlı sünme deneyi öncesinde sıcaklığın numune bünyesine tam anlamıyla işleyebilmesi için numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, ön yükleme süresi, uygulanacak gerilme, ön yükleme gerilmesi, yük artış süresi ve yük periyodu gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde ilk olarak girilen süre ve gerilme değerinde ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması hedeflenmektedir. Ön yükleme süresinin sonunda normal gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanmaktadır [94,96]. Uygulanan yük ile numunede oluşan deformasyonların zamana göre değişimi Şekil 1.35'te gösterilmiştir.



Şekil 1.35 : Yük-zaman ve deformasyon arasındaki ilişkinin gösterimi
Sünme ve esneklik modül değerleri Formül 9-13 ile hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1)/G \quad (9)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_N)/[G - (L3_n - L1)] \quad (10)$$

$$\sigma = F/A \quad (11)$$

$$E_c = \sigma/\varepsilon_c \quad (12)$$

$$E_r = \sigma/\varepsilon_r \quad (13)$$

ε_c : Toplam plastik (kalıcı) aksenal birim şekil değiştirme

ε_r : Toplam elastik aksenal birim şekil değiştirme

E_c : Sünme modülü (sertliği)

E_r : Esneklik modülü (sertliği)

G : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)

$L1$: LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)

$L2_n$: n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik+plastik)

$L3_n$: (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik)

σ : Maksimum düşey gerilme (kPa)

F : Maksimum düşey yük (N)

A : Numunenin kesit alanı (cm²)

1.8.5 İndirekt çekme yorulma deneyi

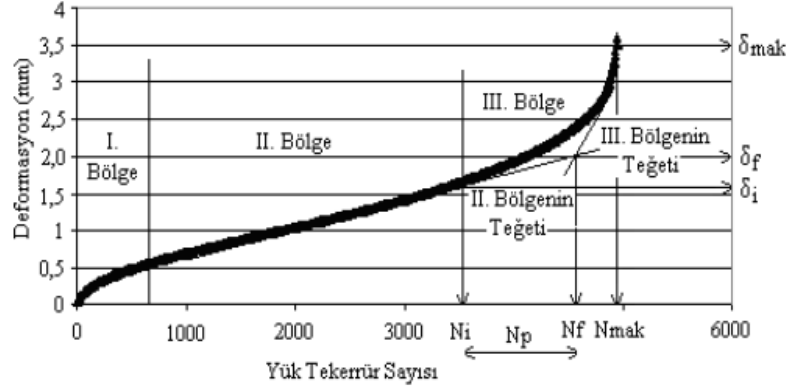
Bilindiği üzere asfalt karışımlar servis ömürleri boyunca en çok tekrarlı yüklere maruz kalmakta, bu yükler mikro düzeyden başlayarak yorulma hasarlarına sebep olmaktadır. Servise açılmış asfalt kaplamaların en çok karşılaştığı bozulma türü yorulma çatlaklarıdır.

Dolaylı çekme yorulma testi (ITFT), asfalt karışımlarının yorulma direnci özelliklerini araştırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Silindirik bir numuneye çap yönünde döngüsel bir yük uygulanmasına ve numunenin merkezinde bir çekme gerilmesi ve şekil değiştirme oluşmasına dayanır. Deney, çalışmanın amacına bağlı olarak gerilme veya şekil değiştirme kontrollü modunda gerçekleştirilebilir. Numune yüksekliği, numune çapı, yük periyodu, yük artış süreleri ve gerilme değerleri yazılıma girildikten sonra numune yük çerçevesine yerleştirilip deney başlatılır. LVDT'ler sayesinde düşey deformasyon ölçülür, numune kırılincaya kadar deney devam eder. Yorulma deneyi düzeneği Şekil 1.36'da verilmiştir.



Şekil 1.36 : ITFT düzeneği

İndirekt çekme yorulma deneyi sonucunda numunenin kırıldığı noktaya kadar etki eden yük tekrar sayısı olarak tanımlanan yorulma ömrü değeri hesaplanır. Ayrıca her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmalara neden olan yük tekerrür sayıları tespit edilmektedir (Nf) [94,96]. Yorulma deneyi sonucunda Şekil x'te verilen temsili yük tekrar sayısı-deformasyon grafiği elde edilir. Yorulma ömrü (Nf), yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. bölge ve III. bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [135,136].



Şekil 1.37 : Tipik bir yük tekrar sayısı-deformasyon grafiği

I. bölgede numunedeki boşluklar nedeniyle önce aşırı deformasyon değişimi oluşmakta ardından eksenel deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon mevcuttur ve yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. bölgede çatlak oluşumu başlamıştır. Bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır. Çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısını belirtmektedir. Çatlak ilerleme oranı Formül 14'de verilmiştir. Çatlak ilerleme oranı çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir [94,96,135].

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (14)$$

r_p : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı, mm)

N_p : Çatlama ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

δ_f : Bozulma anında toplam deformasyon (mm)

δ_i : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyon (mm)

1.9 Asfaltın Modifikasyonu Modifiye Asfaltlar ve Özel Asfaltlar

Modifiye bitümler, üretim sırasında bir veya daha fazla kimyasal madde (modifiye ediciler) kullanılarak reolojik özellikleri değiştirilen bitümlerdir. Modifikasyon, belirli bitüm özelliklerini değiştirir ve geliştirir, bu da ilgili bitümlü karışımın veya uygulamanın iyileştirilmesine ve dolayısıyla inşaat kalitesinin artmasına neden olur.

Modifiye bitümlerin kullanılması gerekliliği ilk olarak 1970'lerde, çok sayıda bitüm kaynağı ve üretim kaynağı nedeniyle bitüm özelliklerinde değişkenlik fark edildiğinde

ortaya çıkmıştır. Ayrıca, aynı dönemde enerji krizi nedeniyle bitümün fiyatı da artmıştır.

Bunlardan ilki, bitüm kalitesine bağlı olarak birçok üstyapı arızasına neden olurken, ikincisi toplam inşaat maliyetinin artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, kalitatif stabilitenin sağlanması ve inşaat kalitesinin iyileştirilmesi için bitüm kalitesinin iyileştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Trafik hacminin ve eksenel yüklemenin hızla artması, kullanıcıların daha iyi ve sabit sürüş kalitesi taleplerinin artması ve bakım çalışmaları sırasında kullanıcıların rahatsız olması gibi faktörler, bitüm özelliklerinin ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların iyileştirilmesi ihtiyacını zorunlu hale getirmiştir [4].

Gerekli iyileştirmeler bitümün sıcaklığa duyarlılığı, sertliği, esnekliği, yapışkanlığı ve yaşlanması ile ilgilidir; başka bir deyişle, bitümün yüksek sıcaklıklarda çok yumuşak olmaması, sıfırın altındaki sıcaklıklarda kırılgan hale gelmemesi veya çatlamaması, yükleme altında daha az deforme olması, agregalara daha iyi yapışması ve daha yavaş yaşlanması. Kimya endüstrisi yukarıda belirtilen talepleri karşılamış ve her biri yukarıdaki gereksinimlerin bir kısmını veya neredeyse tamamını karşılayan çok çeşitli kimyasal katkı maddeleri (modifiye ediciler) sunmuştur [110].

CEN EN 12597'ye göre özel bitümler, asfaltlama veya endüstriyel uygulamalar için katı gereklilikleri karşılayan özel özellikler kazandırmak üzere seçilen hammaddelerden ve işlemlerle üretilen bitümlerdir.

Modifiye bitüm, bitüm işlerinin tamamında, yani bitümlü karışımların (sıcaktan soğuğa) üretilmesinde, yüzey kaplamalarında, yüzey sızdırmazlığında, su yalıtımında vb. kullanılabilir. Modifiye bitümler 'doğrudan' veya cut-back veya emülsiyon şeklinde kullanılabilir veya örneğin doğal asfaltla karıştırılabilir.

Modifiye bitümün asfaltlamadaki rolü temel olarak dört yönlüdür: asfaltın kalıcı deformasyona karşı direncini artırmak, asfaltın yorulma ömrünü iyileştirmek, asfaltın sertlik modülünü artırmak ve bitüm ile agrega parçacıkları arasındaki yapışmayı iyileştirmek. Yukarıdaki tüm görevler, mümkünse karışımın işlenebilirliğini etkilemeden yerine getirilmelidir. Bu oldukça karmaşık ve zor görevleri yalnızca belirli modifiye ediciler tam olarak yerine getirebilir.

Asfaltın kalıcı deformasyon direncinin artırılması, yüksek-orta trafik hacmine ve normal-yüksek ortam sıcaklıklarına sahip bölgelerde tipik olarak gelişen tekerlek izi sorununu çözer.

Asfaltın yorulma ömrünün iyileştirilmesi, kaplamanın yorulma çatlağının gelişimini geciktirir.

Asfaltın rijitlik modülünün artması, asfalt tabakasının yük yayma kabiliyetini geliştirir; dolayısıyla, alt zemine daha düşük gerilmeler aktarılır. Bu, belirli bir alt zemin mukavemeti ve belirli trafik koşulları altında asfalt tabakasının kalınlığını ve dolayısıyla kaplamanın kalınlığını azaltma yeteneği olarak yorumlanabilir.

Son olarak, bitüm ve agrega partikülleri arasındaki yapışmanın iyileştirilmesi, açık gradasyonlu ve gözenekli asfaltların yanı sıra yüzey kaplamalarının ömrünü olumlu yönde etkiler ve ravelling gelişimini ortadan kaldırır.

Modifiye bitümler nispeten yüksek üretim ve tedarik maliyeti ile karakterize edilir. Ancak, bu caydırıcı bir faktör olarak görülmemelidir, çünkü maliyetleri gradasyonlu bitümün maliyeti ile değil, gelecekteki bakım maliyetini de içeren toplam kaplama yapım maliyeti ile karşılaştırılmalıdır.

Belirtildiği gibi, modifiye bitüm tüm bitümlü karışımlarda veya bitüm işlerinde kullanılabilir. Bununla birlikte, maliyet/fayda optimizasyonu için, yüksek stresli alanlar (otoyollar, havaalanları, köprü tabliyeleri, vb.) için asfaltlarda veya yüksek kaliteli/maliyetli sert agregalı asfaltlarda veya yüksek kaliteli/maliyetli mıcırly yüzey kaplamalarında kullanılması tavsiye edilir [110].

1.9.1 Modifikasyon için kullanılacak katkı maddesinin asfalt kaplamalardaki rolü

Ham petrolerin damıtılmasından elde edilen geleneksel bitümler yeterli performans özelliklerine sahiptir, ancak yüksek sıcaklık performansının artırılması bazen bitümün düşük sıcaklık performans özelliklerini azaltabilir. Bu etkiye karşı koyacak adımların geliştirilmesi, yollarda kullanılmak üzere PMB'lerin geliştirilmesinin ilk aşamalarını yönlendiren teşvik olmuştur. Modifiye edilmiş bağlayıcılar, orijinal bitüme eklendiğinde kimyasal yapısını ve fiziksel ve/veya mekanik özelliklerini değiştiren bir kimyasal madde kullanılarak özellikleri değiştirilmiş bağlayıcılardır. Bitümlü bağlayıcı, asfaltların visko-elastik davranışından sorumlu olduğundan, yol

performansının birçok yönünü, özellikle de kalın kaplamaların yapısal başarısızlığının en yaygın iki nedeni olan deformasyon ve çatlamaya karşı direnci belirlemede büyük rol oynar. Genel olarak, asfaltta viskoz akışa (yani geri kazanılamayan akışa) atfedilebilecek herhangi bir indüklenmiş gerilmenin oranı hem yükleme süresi hem de sıcaklıkla artar. Birçok bitüm modifiye edicinin başlıca rollerinden biri, bitümün veya asfaltın diğer sıcaklıklardaki özelliklerini olumsuz etkilemeden asfaltın yüksek yol sıcaklıklarında deformasyona karşı direncini artırmaktır. Bu, her ikisi de kalıcı gerilmede bir azalma ile sonuçlanan aşağıdaki iki yöntemden biri ile elde edilir. İlk yaklaşım bitümün sertleştirilmesidir, böylece asfaltın toplam visko-elastik tepkisi azaltılır. İkinci yaklaşım ise bitümün elastik bileşenini artırarak viskoz bileşenini azaltmaktır. Bitümün sertliğinin artırılması aynı zamanda asfaltın dinamik sertliğini de artıracaktır. Bu, malzemenin yük yayma kabiliyetini geliştirecek, yapısal mukavemeti artıracak ve kaplamanın beklenen hizmet ömrünü uzatacaktır. Alternatif olarak, daha ince bir tabaka ile aynı yapısal mukavemeti elde etmek mümkün olabilir. Bitümün elastik bileşeninin artırılması asfaltın esnekliğini artıracaktır. Bu, yüksek gerilme gerilmelerinin olduğu yerlerde önemlidir [4].

Modifiye edicinin (polimer, katkı maddeleri) etkili olması ve kullanımının hem uygulanabilir hem de ekonomik olması için:

- kolayca erişilebilir olması
- uygun maliyetli olması
- bitüm ile iyi bir uyum sağlaması
- karıştırma sıcaklıklarında bozulmaya karşı dirençli olması
- karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında bitümü çok viskoz hale getirmeden veya düşük yol sıcaklıklarında çok sert veya kırılgan hale getirmeden yüksek yol sıcaklıklarında akmaya karşı direnci iyileştirmesi
- bağlayıcı kohezyonunu veya yapışma özelliklerini iyileştirmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, modifiye edici, bitüm ile harmanlandığında:
 - geleneksel ekipman kullanılarak işlenebilmeli,
 - depolama, nakliye, uygulama ve hizmet sırasında üstün özelliklerini korumalı

- depolama, nakliye, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak kararlı olmalıdır.

1.9.2 Katkı maddelerinin sınıflandırılması

Asfalt modifikasyonu için kullanılacak katkı maddelerini sınıflandırmak mümkündür. Son yıllarda çok çeşitli katkı maddeleri kullanılsa da sınıflandırma yapmak önemlidir. Çizelge 1.6’te yaygın olarak kullanılan asfalt katkı maddeleri verilmiştir.

Çizelge 1.6 : Katkı maddelerinin genel olarak sınıflandırılması

Tip	Örnek Katkı Maddeleri	Asfalt Kıvamına Etkisi
1. Filler	• Sülfür • Karbon siyahı • Mineral filler: Taş tozu Kireç Portland çimentosu	Sertleştirme
2. Ekstender (Genleştirici)	• Sülfür • Lignin (Odun özütü)	Sertleştirme
3. Kauçuk	• Doğal kauçuk	
a. Doğal lateks	• Dönüştürülmüş kauçuk	
b. Yapay lateks	• Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	
c. Blok kopolimer	• Stiren-Butadien-Rubber	-
d. İşlenmiş kauçuk	(SBR)	
4. Plastik	POLİMERLER • Polietilen • Polipropilen • Polivinil-Klorid (PVC) • Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	Sertleştirme
5. Bileşim	• 3 ve 4 deki polimerlerin karışımı	-

Çizelge 1.6 (devamı) : Katkı maddelerinin genel olarak sınıflandırılması

	Doğal fiber	
	Asbest	
	Taş yünü	
6. Fiber	Yapay	Sertleştirme
	Fiberglas	
	Polyester	
	Polipropilen	
7. Oksidan	Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	- Karbon - Kalsiyum tuzu - Kurşun karışımları	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	- Sertleştirme ve doğal asfaltlar - Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları	Yumuşatma sertleştirme veya
10. Soyulma önleyici	- Kireç - Aminler	Yumuşatma

Katkı maddelerini polimer veya polimer olmayan diye ayırmak yanlış olmayacaktır. Genelde en çok kullanılan katkı maddeleri polimer malzemelerdir. Çizelge 1.7’de bir ön bilgi olması amacıyla katkı maddeleri sunulmuştur.

Çizelge 1.7 : Polimer ve polimer olmayan katkı maddelerine örnekler

Modifikasyon tipi	Örnekler
1. Polimer modifikasyon	
A. Plastikler	
a. Termoplastikler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil-Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen-Vinil-Asetat (EVA)
b. Termosetler	Epoksi reçineler
B. Elastomerler	
a. Doğal kauçuklar	Stiren-Butadien-Rubber (SBR)
b. Yapay elastomerler	Stiren-Butadien-Stiren (SBS) İsobüten-İsopren kopolimer (IIR)
C. İşlenmiş kauçuklar	Polyester fiberler, Polipropen fiberler
D. Fiberler	
2. Polimer olmayan katkı ile modifikasyon	
A. Fillerler	Kil, uçucu kül, karbon siyahı
B. Soyulma önleyici katkıları	Amidler ve organik aminler
C. Ekstender (Genleştiriciler)	Sülfür, lignin
D. Antioksidanlar	Aminler, çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, fenolikler
E. Organo-metal bileşimleri	Organo-manganez bileşimleri
F. Diğerleri	Organo-karbon bileşimleri
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu	Katkı reaksiyonu (Asfalt+Monomer) Vulkanizasyon (Asfalt+Sülfür) Nitrasyon reaksiyonu (Asfalt+Nitrik asit)

Ayrıca, katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkilerini özetlemek amacıyla Çizelge 1.8 sunulmuştur.

Çizelge 1.8 : Katkı maddelerinin bağlayıcı üzerindeki etkileri

Modifiyer	Modifiyerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi
Yağ	Asfaltın yapısı, bağlayıcılık, viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası
Fiberler	Tiksotropik, çatlak direnci, viskozite
Solvent	Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak), sertlik (soğuk), bağlayıcılık, adezyon
Filler tozu	Yumuşama noktası, sertlik, viskozite, yoğunluk, maliyet, mekanik sağlamlık
Emülsifikasyon	Viskozite, ıslatma kabiliyeti, uygulama sıcaklığı
Islatma ajanları	Islatma kabiliyeti, adezyon
Ataktik-Polipropilen (APP)	Sertlik, penetrasyon, Frass kırılma noktası, yumuşama noktası
Etilen-Vinil-Asetat (EVA)	
Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	Penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönüş, düşüş sıcaklık kırılma noktası

1.10 Kimyasal ve Fiziksel Karakterizasyon Yöntemleri

Asfalt bağlayıcının kimyasal, fiziksel, morfolojik karakterizasyonu nihai performansı hakkında bilgi sahibi olmak için oldukça önemlidir. Konu kapsamı içerisinde bir modifikasyon yapılacağından dolayı yapısında meydana gelen değişiklikler özenle ve dikkatle takip edilmelidir. Bağlayıcılar için kullanılan karakterizasyon yöntemleri aşağıda sıralanmıştır ve açıklamaları yapılmıştır. Katkı maddesi ilavesiyle orijinal asfalt bağlayıcının yapısındaki kimyasal değişimler FT-IR analizi ile ortaya konulmuştur. Katkı maddesinin, asfalt içerisinde homojen olarak dağılımının gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek ve katkı maddesi ile asfalt arasında faz ayrımının olup olmadığını, diğer bir deyişle modifiye işleminin doğru şartlar altında gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit etmek amacıyla SEM analizi yapılmıştır. Ayrıca,

asfalt bağlayıcıların ısıl bozunma sıcaklıkları ve kütleli değişimleri TG/DTG analizi ile incelenmiştir.

1.10.1 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

FT-IR testi veya Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi, kızılötesi absorpsiyon spektrumunu ölçerek bir numunedeki kimyasal bağları ve fonksiyonel grupları tanımlamak için kullanılan bir tekniktir. Aşağıda FT-IR testinin temel prensipleri, avantajları ve uygulamaları açıklanmıştır.

FT-IR testinin ilkeleri

FT-IR testi, görünür ışık ile mikrodalgalar arasındaki elektromanyetik spektrumun bir parçası olan kızılötesi ışığa maruz kaldığında moleküllerin farklı frekanslarda titreştiği gerçeğine dayanır. Bu titreşimler, moleküldeki kimyasal bağların türü ve kuvvetinin yanı sıra moleküler yapı ve ortamın karakteristiğidir. Bir numuneye kızılötesi ışık demeti göndererek ve her frekansta ışığın ne kadarının emildiğini tespit ederek, numunenin moleküler parmak izini ortaya çıkaran bir kızılötesi emme spektrumu elde edilebilmektedir.

Bununla birlikte, tek renkli bir ışık demeti (yalnızca tek bir dalga boyundan oluşan bir ışın) kullanmak ve her frekansı tek tek taramak yerine, FT-IR testi aynı anda birçok ışık frekansını içeren geniş bantlı bir ışık kaynağı kullanır. Işık, bir ışın ayırıcı, sabit bir ayna ve hareketli bir aynadan oluşan Michelson interferometresi adı verilen bir cihazdan geçer. Işın ayırıcı, ışığı biri sabit aynadan, diğeri hareketli aynadan yansıyan iki ışına böler. Daha sonra iki ışın, ışın ayırıcıda yeniden birleşerek birbirine müdahale ederek, farklı zamanlarda farklı frekans kombinasyonları içeren modüle edilmiş bir ışık demeti oluşturur. Modüle edilmiş ışın daha sonra numunenin içinden geçer ve hareketli aynanın konumunun bir fonksiyonu olarak ışığın yoğunluğunu kaydeden bir dedektöre ulaşır. Bu verilere interferogram denir ve orijinal ışıdaki ışığın tüm frekansları hakkında bilgi içerir.

Kızılötesi absorpsiyon spektrumunu interferogramdan çıkarmak için Fourier dönüşümü adı verilen matematiksel bir işlem uygulanır. Fourier dönüşümü, verileri zaman alanından (hareketli aynanın konumu) frekans alanına (ışığın dalga sayıları) dönüştürür. Sonuç, numunenin titreşim modlarına karşılık gelen tepe ve vadileri gösteren, numunenin dalga numarasına karşı absorbansı veya geçirgenliğinin bir grafiğidir.

FT-IR testinin avantajları

FT-IR testinin, ışığı farklı dalga boylarına ayırmak ve bunları sırayla ölçmek için bir prizma veya ızgara kullanan dispersif spektroskopi gibi diğer kızılötesi spektroskopi yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. FT-IR testinin faydalarından bazıları şunlardır:

Daha yüksek hassasiyet ve sinyal-gürültü oranı, çünkü dedektör aynı anda dar bir dalga boyu aralığı yerine ışığın tüm frekanslarını aynı anda ölçer. Bu aynı zamanda daha hızlı veri toplama ve analiz olanağı sağlar.

Daha yüksek çözünürlük ve doğruluk, çünkü çözünürlük ve doğruluk, optik bileşenlerin dağılımı ve hizalanmasından ziyade yalnızca interferometrenin ve dedektörün kalitesine bağlıdır. Çözünürlük ve doğruluk, hareketli aynanın kat ettiği mesafe olan interferometrenin maksimum yol farkı değiştirilerek de ayarlanabilir.

Daha geniş spektral aralık ve dinamik aralık, çünkü geniş bantlı ışık kaynağı, monokromatik bir kaynaktan daha geniş bir frekans aralığını kapsayabilir ve dedektör, dağıtıcı bir spektrometreye göre daha geniş bir yoğunluk aralığını ölçebilir.

-Daha basit ve daha sağlam tasarım çünkü interferometre, dispersif spektrometreye göre daha az hareketli parçaya ve optik bileşene sahiptir ve mekanik ve termal kaymalara ve titreşimlere daha az eğilimlidir.

FT-IR testinin uygulamaları

FT-IR testi kimya, biyoloji, fizik, malzeme bilimi, tıp, adli tıp, çevre bilimi ve kalite kontrol gibi bilim ve endüstrinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

FT-IR testinin bazı uygulamaları şunlardır:

- Organik, polimerik ve inorganik bileşiklerin spektrumlarını veritabanları veya kütüphanelerdeki referans spektrumlarla karşılaştırarak tanımlanması ve karakterizasyonu.
- Spektrumu bireysel bileşenlerin katkılarına ayırtmak için temel bileşen analizi (PCA) veya kısmi en küçük kareler (PLS) gibi çok değişkenli yöntemler kullanılarak karışımların miktarının belirlenmesi ve analizi.
- Numunenin farklı bölgelerini ve derinliklerini araştırmak için zayıflatılmış toplam yansıma (ATR), iletim, yansıma, dağınık yansıma veya fotoakustik

spektroskopi gibi farklı teknikler kullanılarak moleküler yapı ve etkileşimlerin araştırılması.

- Zaman içinde ve farklı koşullar altında reaktanların ve ürünlerin spektrumlarındaki değişiklikleri ölçmek için çevrimiçi veya yerinde FT-IR testi kullanılarak kimyasal reaksiyonların ve süreçlerin izlenmesi.
- İstenmeyen veya zararlı maddelerin varlığı açısından numuneleri taramak ve taramak için FT-IR testini kullanarak kirletici maddelerin, safsızlıkların, katkı maddelerinin veya kirletici maddelerin tespiti ve tanımlanması [137].

1.10.2 Nükleer manyetik rezonans (NMR)

Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) kimya, biyoloji ve tıp dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan güçlü ve çok yönlü bir spektroskopik tekniktir. Radyo frekansı dalgaları şeklinde elektromanyetik radyasyona maruz kalan atom çekirdeklerinin içsel spin özelliklerini araştırmak için büyük bir mıknatıs kullanır. Hidrojen ve karbon gibi bu çekirdekler, rezonans frekansları olarak bilinen karakteristik frekanslarda enerji emmelerine ve yaymalarına izin veren belirli manyetik özelliklere sahiptir.

NMR süreci aşağıdaki adımlara ayrılabilir:

1. Nükleer spinlerin hizalanması: NMR'da kullanılan manyetik alan, bir numunedeki atomların nükleer spinlerini hizalayarak belirli frekanslarda rezonansa girmelerine neden olur.
2. Nükleer spinlerin pertürbasyonu: Nükleer spinlerin hizalanmasını bozan zayıf bir salınımlı manyetik alan veya radyo frekansı (RF) darbesi uygulanır.
3. Tespit ve analiz: Numunenin çekirdekleri tarafından yayılan elektromanyetik dalgalar tespit edilir ve moleküllerin yapısı, dinamikleri, reaksiyon durumu ve kimyasal ortamı hakkında bilgi sağlamak için analiz edilir.

NMR spektroskopisi, yüksek hassasiyet, yüksek çözünürlük ve moleküler yapılar ve etkileşimleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlama yeteneği gibi çeşitli avantajlar sunar. Küçük moleküller, proteinler ve diğer karmaşık moleküller de dahil olmak üzere çok çeşitli maddeleri incelemek için kullanılmıştır.

Tıp alanında NMR, Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) gibi tanısal görüntüleme tekniklerinde özellikle yararlı olduğunu kanıtlamıştır. MRG, insan vücudunun, özellikle de yumuşak dokuların ayrıntılı görüntülerini oluşturmak için NMR kullanan, invazif olmayan bir görüntüleme tekniğidir. Bu görüntüler çeşitli tıbbi durumların teşhis ve tedavisi için değerli bilgiler sağlar.

NMR ayrıca saflıkları, yapıları ve nicelikleri dahil olmak üzere malzemelerin incelenmesine de uygulanmıştır. Kimyagerler, sinyallerin rezonans frekanslarını ve yoğunluklarını analiz ederek bir bileşiğin bileşimini ve yapısını belirleyebilirler.

Özetle, NMR kimya, biyoloji ve tıp dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama alanı bulan güçlü ve çok yönlü bir tekniktir. Moleküler yapılar, etkileşimleri ve moleküllerin kimyasal çevresi hakkında ayrıntılı bilgi sağlama yeteneği, onu bu alanlardaki araştırmacılar için paha biçilmez bir araç haline getirmektedir.

1.10.3 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüzeylerin görüntülenmesi ve karakterizasyonu için kullanılan bir tekniktir. SEM, yüksek enerjili elektronlar kullanarak numunelerin yüzeylerindeki topografik, morfolojik ve kimyasal özellikleri incelemek için kullanılır. SEM, numunelerin yüzeylerindeki detayları yüksek çözünürlükte görüntüleyebilir ve bu nedenle malzeme biliminde, nanoteknolojide, biyolojide, tıpta ve diğer birçok alanda yaygın olarak kullanılır. SEM, elektron tabancası, tarama bobini, numune sahnesi, detektörler ve görüntü işleme yazılımı gibi temel bileşenlerden oluşur. Numune yüzeyine odaklanan elektronlar, numunenin yüzeyinden yansıyan veya saçılan elektronlar tarafından algılanır ve bu sinyaller, görüntü işleme yazılımı tarafından yüksek çözünürlüklü görüntüler halinde işlenir. SEM, yüzeylerin incelemesi için önemli bir araçtır ve malzeme karakterizasyonu, kalite kontrol, araştırma ve geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılır [138,139].

1.10.4 Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik Analiz (TGA), kontrollü bir atmosfer altında sıcaklık veya zamanın bir fonksiyonu olarak bir maddenin kütledeki değişiklikleri izleyerek polimerler de dahil olmak üzere malzemelerin termal stabilitesini ölçmek için kullanılan güçlü bir tekniktir. TGA sırasında, bir numune ısıtılırken sürekli olarak tartılır ve numunede

meydana gelen reaksiyonlardan kaynaklanan gaz halindeki yan ürünleri gidermek için üzerinden inert bir gaz atmosferi geçirilir. Bu teknik, kemisorpsiyon, termal ayrışma ve oksidasyon ve indirgeme süreçleri de dahil olmak üzere katı-gaz reaksiyonları gibi çeşitli termal ve kimyasal olaylara ilişkin değerli bilgiler sağlar. TGA, kullanılan spesifik TGA tekniğine bağlı olarak, sıcaklığı sabit bir oranda veya sıralı adımlarla değiştirilirken numunenin kütlesini sürekli olarak ölçen bir termogravimetrik analizör kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntem, malzeme karakterizasyonu, çevresel analiz ve araştırma ve geliştirme alanlarında yaygın olarak kullanılmakta olup, çok çeşitli malzemelerin termal özelliklerini incelemek için önemli bir araçtır [140].



2. MATERYAL VE METOT

2.1 Tez Çalışmasında Kullanılacak Katkı Maddesinin Sentez Süreci

Daha önce yapılan çalışmalarda yağ asitleri diamin ile kimyasal tepkimeye sokularak daha kuvvetli moleküler bağlar elde edilmeye çalışılmıştır. Anyaogu ve ekibi yaptıkları çalışmada, soya yağını çeşitli diaminler ilave ederek tiksotropik bir kaplama elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda soya yağı önce N_2 (Azot) ve I_2 (İyot) ile dimerize edilmiş olup daha sonra bu yapıya aromatik diaminler ilave edilmiştir. Süreç sonrasında bu kaplama yapısının daha gelişmiş akış özellikleri gösterdiği, yüksek depolama stabilitesine ve film sertliğine sahip olduğu görülmüştür [141]. Bir diğer çalışmada Alam ve ekibi, atık keten tohumu yağını dietanolamin ile tepkimeye sokarak Poli(amin-amit) reçinesi elde etmişlerdir. Sürdürülebilir bir kaynaktan elde edildiğine vurgu yapılan çalışmada, geleneksel poliesteramit kaplamalara göre yüksek alkali direnci elde edilmiştir [142]. Bunun gibi çok sayıda çalışmada amin ve amit yapıları ile yağların rejenerasyonunun mümkün olduğu, bu sayede daha kuvvetli bağ yapıları olduğu görülmüştür. Souza ve ekibi, hint yağının aromatik aminler ile fonksiyonelleştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş, sonuç olarak yeni molekül yapılarının basit bir şekilde elde edildiğini vurgulamışlardır. Fizikokimyasal analizlerin sonucunda aromatik aminlerin hidroksil gruplarına ek olarak ilavesinin bileşiğin termal ve oksidatif stabilitesini artırdığını belirlemişlerdir [143].

Bilindiği gibi ülkemiz bor rezervi açısından dünya rezervinin yaklaşık % 72'sini oluşturarak, ilk sırada yer almaktadır. Borun çok sayıda bileşiği olmakla beraber teknik olarak büyük miktarlarda üretilen ve uluslararası pazarda söz sahibi olan beş ana bileşiği vardır. Sanayide kullanılmak üzere veya laboratuvar araştırmaları için üretilen diğer bor ürünleri ise genellikle bu 5 ana bileşikten üretilirler. Bunlar; Borik Asit (H_3BO_3), Boraks Dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), Boraks Pentahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$), Susuz Boraks ($Na_2B_4O_7$) ve Bor Oksittir [144]. Yukarıda asfaltın performansını iyileştirmeye yönelik asfalta katılan bazı katkı maddelerine değinilmiştir. Ülkemizin bor rezervi açısından çok önemli bir yere sahip olması, çalışmamızda asfalta bor ve bor türevlerinin ilave edilerek modifikasyonunun amaçlanmasında büyük bir etken

oluşturmuştur. Literatür incelendiğinde asfalta borik asit veya bor katılarak yürütülen çalışmaların ağırlıklı olarak 1940-1960'lı yıllarda yapıldığı, son yıllarda ise bu alanda tekrar çalışma yapılmaya başlandığı görülmüştür. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir:

Lentz, asfaltlı malzemeden oluşan ürünlerin (çatı kaplaması, yol kaplaması vb.) adezyon ve kohezyonunu iyileştirmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Asfalta %0,25-%3 arasında değişen oranlarda borik asit katılarak penetrasyon ve yumuşama noktası arasındaki ilişkisi incelenmiştir. 177 °C üzerindeki sıcaklığa sahip akışkan asfalta (okside asfalt) borik asit ilave edilmiş ve karıştırılmıştır. Sonuç olarak, borik asidin küçük bir miktar kullanılmasıyla asfaltlı malzemelerin yumuşama noktası ve penetrasyon ilişkisinin büyük oranda iyileştiği ve malzemenin hava etkisiyle oluşan aşınmaya karşı direncinin arttığı görülmüştür. Ayrıca çalışma sonucunda borik asidin, asfalt ya da asfaltlı malzemelerle kimyasal olarak reaksiyona girdiği ifade edilmiştir. Lentz bu ifadesinden tam olarak emin olmamakla beraber, bu inancını borik asidin asfalttan süzülerek geri kazanılmaması gözlemine dayanarak, güçlendirmiştir [145]. Doyle ve ekibi tarafından yapılan çalışmada, asfalt çimentosunun yüksek sıcaklıklarda agrega ile karışımı sırasında oluşan düktilite kayıplarını azaltmak ve kaplamadaki çatlak oluşumuna karşı direnci artırmak için, agrega ile asfaltın karışımı uygulamasından önce asfalt çimentosuna bor içerikli kimyasal ajanlar ilave etmişler ve asfalt çimentosunda oluşan düktilite kayıplarını azalttığını bulmuşlardır (Doyle vd. (1963)). Boykin, asfaltlı bileşimlerin nötron tutucu olarak, radyasyon emen bariyerlerde, nötron yavaşlatıcılarda, reaktör kontrol ve nötron azaltma elemanlarında kullanılabilmesi için, 210 °C'ye kadar ısıtılmış asfalt bileşimine bor oksit/bor elementi emdirmişlerdir. Bunun için borik asit kullanmışlardır. Sonuç olarak, asfalta emdirilen borik asidin, asfaltla kimyasal bağ yaptığını ve asfalt bileşiminin %1-25 arasında bor oksit ya da bor elementi konsantrasyonu içerdiğini belirtmişlerdir [147]. Marzocchi ve ekibi asfaltın, cam fiber parçacıklarıyla (filler olarak katılmasıyla) güçlendirmesini öngörmüşlerdir fakat cam fiberin yüksek oranda su seven özellikte olması, asfaltla kimyasal ve fiziksel bağ yapmasını engellemiştir. Bu bağı oluşturmak için (asfaltın adezyon özelliğini iyileştirmek için) organik metal bileşimlerinden olan orto esterle bir borat ester kimyasal reaksiyona sokularak oluşan boratlı reaksiyon ürününü asfaltı modifiye etmek için kullanmışlardır [148]. Arslan ve ekibi asfalta iki katkı maddesi olarak, organik esaslı kalsiyum bileşimi ve organik esaslı borik asit bileşimi ilave

ederek modifiye etmişlerdir. Asfaltın viskozite ve yumuşama noktası değerlerinde azalma, düktilite değerinde artış ve reolojik özelliklerinde iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [149]. Bir başka çalışma Toyen ve Saenboonruang tarafından gerçekleştirilmiş, çalışma kapsamında bor oksit ilaveli parafin ve parafin/bitüm kompozitleri hazırlanmıştır. Çalışmada termal özellikleri geliştirmek amaçlanmış ve bor oksit içeriğinin artmasıyla termal koruma parametreleri kayda değer miktarda artmıştır. Sonuç olarak parafin/bitüm kompozitlerinin etkili bir termal nötron koruma malzemesi olabileceği belirlenmiştir [150]. Güncel olarak bazı çalışmalarda bor içerikli katkı maddeleri geliştirilmiş ve asfalt bağlayıcı üzerindeki etkileri farklı bakış açıları ile değerlendirilmiştir. Bozdemir ve ekibi, çam ağaçlarından elde edilen doğal reçine ve bor oksitin birleşimiyle yeni bir katkı maddesi elde etmiş ve farklı oranlarda bağlayıcıya ilave etmişlerdir. Sonuçlar, %3 katkı maddesi ilavesinin asfaltın sıcaklık hassasiyetini %48 oranında azalttığını ve bu katkının işlenebilirlik özelliklerine herhangi bir olumsuzluk doğurmadığını göstermiştir. Ayrıca, modifiye asfalt bağlayıcıların tekerlek izine karşı göstermiş oldukları direncin saf asfalta kıyasla oldukça arttığını belirlenmiştir [151].

Ülkemiz için çok önemli bir ulusal kaynak olan bor, temizlik maddelerinden uzay teknolojisine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bor türevi maddeler içerisinde yer alan bor nitrür, yüksek sıcaklıklarda termal ve kimyasal olarak kararlılık göstermesi, farklı formlarda bulunabilmesi, kübik formunun doğada bulunan en sert maddelerden biri olması, optik karakteri gibi özelliklerinden dolayı önemli bir yer tutmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Aşındırıcı malzeme, termal yalıtkanlar, lubrikantlar, savunma sanayi ekipmanlarının üretimi gibi çok çeşitli alanlarda tercih edilmektedir ve nanoteknolojide yüksek potansiyelli bir kullanım sunmaktadır. Bor nitrür, boron ve nitrojen atomlarının düzenindeki farklılıklardan dolayı çok sayıda formda bulunabilir. Bunların içinde en kararlı kristal form, altıgen formudur ve hegzagonal bor nitrür (h-BN) olarak adlandırılır. h-BN, termal iletkenlik ve stabilite, ultra yüksek mekanik mukavemet ve sertlik, geçirimsizlik, iyi bir biyo-uyumluluk ve biyolojik olarak doğada çözünebilir özelliklere sahiptir [152–154].

Çalışmada, geniş bir literatür taraması yapılmasına rağmen, hayvansal yağların bir katkı malzemesi üretiminde ve özel olarak asfalt modifikasyonunda kullanımı ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Çeşitli atık bitkisel yağların doğrudan geri dönüştürülmüş

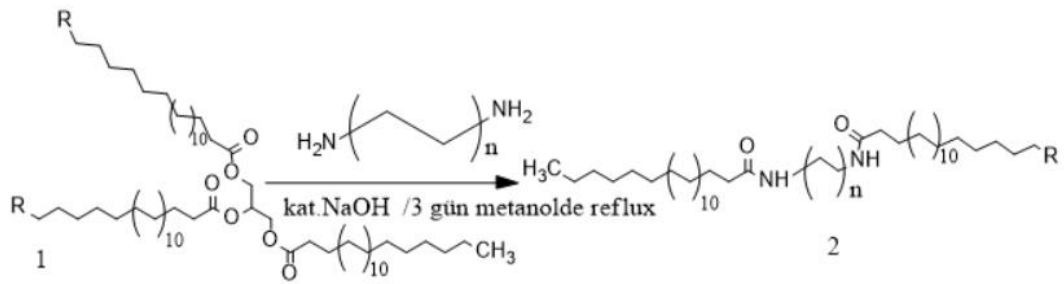
asfalt kaplamalarda gençleştirici bir ajan olarak kullanıldığı bilinmektedir. Ancak, bu yağların doğrudan asfalt karışıma ve/veya asfalt bağlayıcıya ilavesi sonrası reolojik ve mekanik özelliklerinde dramatik oranda azalmalar görülmektedir. Bu sebeple, asfalt katkısı olarak kullanılacak yağın hem kolay elde edilebilir bir kaynaktan olması, hem de asfaltın mekanik ve reolojik özelliklerini iyileştirecek özelliğe sahip olması gerekmektedir. Oda sıcaklığında katı bir yağ olan hayvansal atık yağ, bitkisel yağlara kıyasla daha uzun karbon zincirlerine sahip yağ asitlerinden oluşmaktadır. Yağ içerisindeki trigliseritlerin NaOH ile tepkimesi sonucu hidroliz edildikten sonra sabunlaştırılması sürecini takiben diamin yapısı ilave edilmiştir. Deformasyona ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı bir bağ olan amit bağları oluşacaktır.

Ana maddenin elde edilişi:

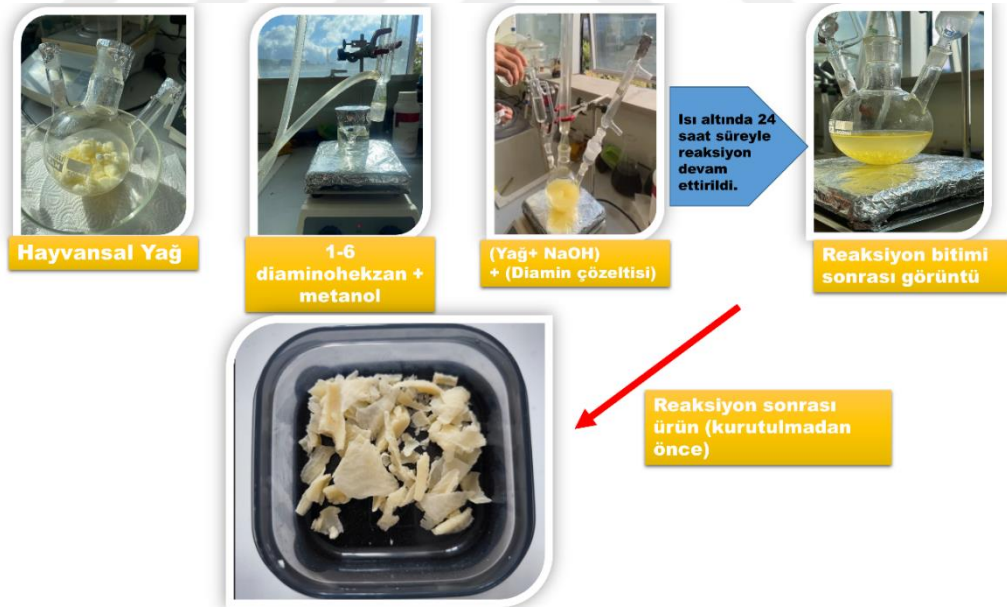
Çalışma kapsamında, Şekil 2.1’de sentezlenen bileşiklerin genel elde şeması verilmiştir. Hayvansal yağ (1) no’lu bileşik (oleik asit cinsinden 0.025 mol), absolu metanolde çözülüp 1-6 diamino hekzan (0.0705 mol) ile katalitik miktarda NaOH (0.2 gr) eşliğinde geri soğutucu altında ve kurutucu eşliğinde 3 gün reflux edildi. Reaksiyon sonucunda soğutulan çözeltiden madde çöktürüldü, süzüldü ve kurutuldu. (2) no’lu bileşik olarak elde edildi. İlgili bileşiğin yapısal karakterizasyonu FTIR, ¹H-NMR (D₂O exchange ve TFA protonasyonu), ¹³C-NMR, TGA kullanılarak teyit edildi.

Öncelikle, 0.075 mol hayvansal yağ alınarak NaOH’ta çözdürüldü. 24.5 g 1-6 diaminohekzan, absolu metanolde çözülerek damlatma hunisinden 1 saat süreyle damlatıldı. Sistem yavaş yavaş ısıtıldı. Reaksiyon 24 saat süreyle devam ettirildi ve petrol eteri ile reaksiyona girmeyen kısımlar alındı. Kalıntıdaki diaminlerin çözünmesi için saf su kullanıldı. Bu sayede hem saflaştırma hem de fazla diaminin uzaklaştırılması ucuz ve ulaşılabilir bir şekilde yapılabilmiş olundu. Daha sonra filtre kağıdı ile süzülerek maddeler ayrıştırıldı. Nihai olarak elde edilen katkı maddesi kısmen yağlı bir yapıda idi. 1-6 diamin + hayvansal yağ ilaveli katkı maddesine ek olarak ağırlıkça farklı yüzdelerde (%5, %10, %15) hegzagonal bor nitrür (BN) ilave edildi. BN ilavesi sıcaklık altında karıştırmak suretiyle gerçekleştirildi. Nihai katkı maddesinin sıcaklık altında eridiği, tamamen sıvı hale döndüğü gözlemlendi. Ancak, malzemenin erime sıcaklığında bozulmadığı görülmüş, bunun önemli bir avantaj olduğu sonucuna varılmıştır.

Elde edilen katkı maddesinin sentez şeması ve elde edilen katkı Şekil 2.2’de verilmiştir. Katkı maddesi aseton ile kurutulup sonrasında öğütülmüştür. Asetonla kurutulma işleminde ilk aşamadaki madde nispeten hayvansal yağın daha katı kısımlarından oluşan fraksiyonları temsil eder. Doymamış kısımların, bir başka deyişle çifte bağların ilk koptuğu kısımlar katkı maddesinin üretiminde kullanılmıştır. Bu kısımlar stearik asit, oleik asit gibi nispeten katı formlardır. Kurutulan kısım standart bir elekten geçirildikten sonra Şekil 2.3’teki hali almıştır. Katkının bu haline hayvansal yağ ve 1-6 diaminohekzan içerdiğinden dolayı HY-6 adı verilmiştir. Bu yapı Şekil 2.1’deki (2) no’lu bileşiğe karşılık gelmektedir.



Şekil 2.1 : Sentezlenen bileşiklerin genel şeması



Şekil 2.2 : Katkı maddesinin sentez şeması



Şekil 2.3 : Katkı maddesinin aseton ile kurutulup standart elekten geçirildikten sonraki hali (HY-6)

Çalışmanın asıl amacı doğrultusunda HY-6'ya bor nitrür ilave edilmiş olup bor elementinin tabiri caizse misafir odası olan diamin yapısındaki azotun serbest orbitallerine elektrostatik olarak bağlanarak bir etkileşim oluşturacağıdır. Bor nitrür (BN) ilaveli katkı maddesinin görüntüsü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Bor nitrür ilaveli nihai katkı maddesinin görünümü

2.2 Modifikasyon İşlemi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

B 70/100 penetrasyon sınıfı bitüm 150°C sıcaklıkta akışkan hale getirilmiştir. Aynı sıcaklıkta koşullandırılan ve muhafaza edilen karıştırma kabının içerisine belirli bir miktar bağlayıcı ilave edilmiştir. Üretilen katkı maddeleri için gerçekleştirilen termogravimetrik analiz sonucu belirlenen yaklaşık bozulma sıcaklıkları baz alınarak modifikasyon sıcaklığı 160°C olarak belirlenmiştir. Özetle katkı maddesi ile bağlayıcı 160°C sıcaklıkta, 1000 devir/dakika hızda, 1 saat boyunca karıştırılmış, modifiye bitümler elde edilmiştir. Modifikasyon işlemi sıcaklığı ayarlanabilir ve sabit tutulabilir 4 bıçaklı mekanik karıştırıcılı düzenekte gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Modifikasyon düzeneği

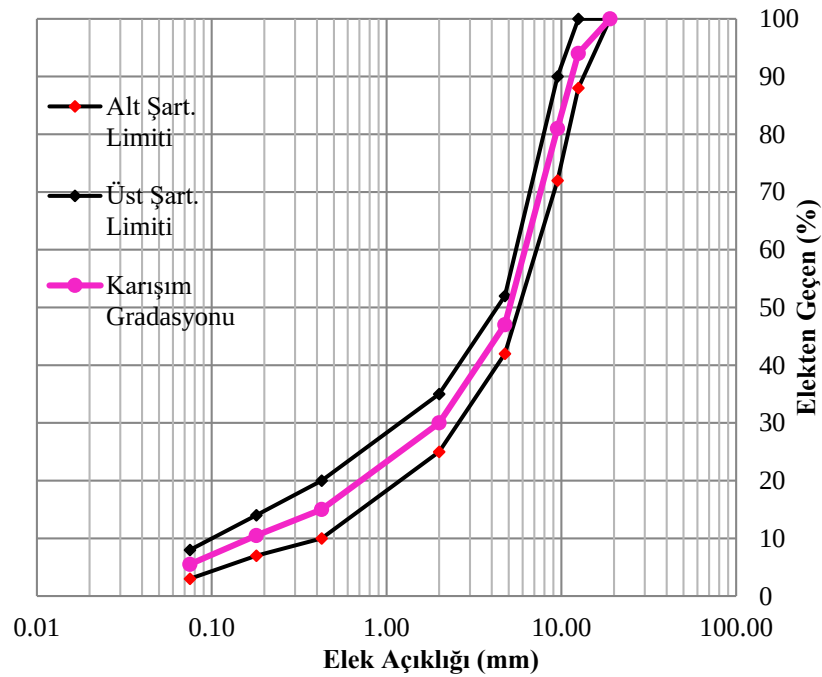
2.3 Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada Elazığ ili Karayazı bölgesinde bulunan taş ocağından temin edilen agrega kullanılmış olup, fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Kaba Agregası	İnce Agregası	Filler
Aşınma Kaybı (%) (LosAngles)	ASTM C131	29.0	-	-
Donma Kaybı (%) (Na ₂ SO ₄)	ASTM C88	4.5	-	-
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)				
Hacim özgül ağırlık	ASTM C127	2.533	-	-
Zahiri özgül ağırlık		2.717		
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)				
Hacim özgül ağırlık	ASTM C128	-	2.619	-
Zahiri özgül ağırlık			2.701	
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)				
Zahiri özgül ağırlık	ASTM D854	-	-	2.732
Su Emme (%)	ASTM C127	1.37	1.52	-
Yassılık indeksi (%)	BS 812	4	5	-

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlar için Karayolları Teknik Şartnamesinde bulunan aşınma tabakası Tip-1 gradasyon limitleri tercih edilmiştir. İdeal gradasyon eğrisine göre karışım gradasyonu oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan agrega granülometrisi grafik olarak Şekil 2.6’da sunulmuştur.

**Şekil 2.6 : Agregası gradasyonunun grafiksel gösterimi**

3. BULGULAR VE İRDELEME

Tez çalışmasının bu bölümünde, sentezlenen katkı maddesinin yapısal karakterizasyon sonuçları, katkı maddesinin asfalt üzerindeki etkisinin belirlenmesine ve optimum parametrelerin saptanmasına yönelik ön çalışma sonuçları, daha sonra nihai modifiye asfalt bağlayıcı ve karışımlar üzerinde gerçekleştirilen performans deneylerinin sonuçları sunulmuştur.

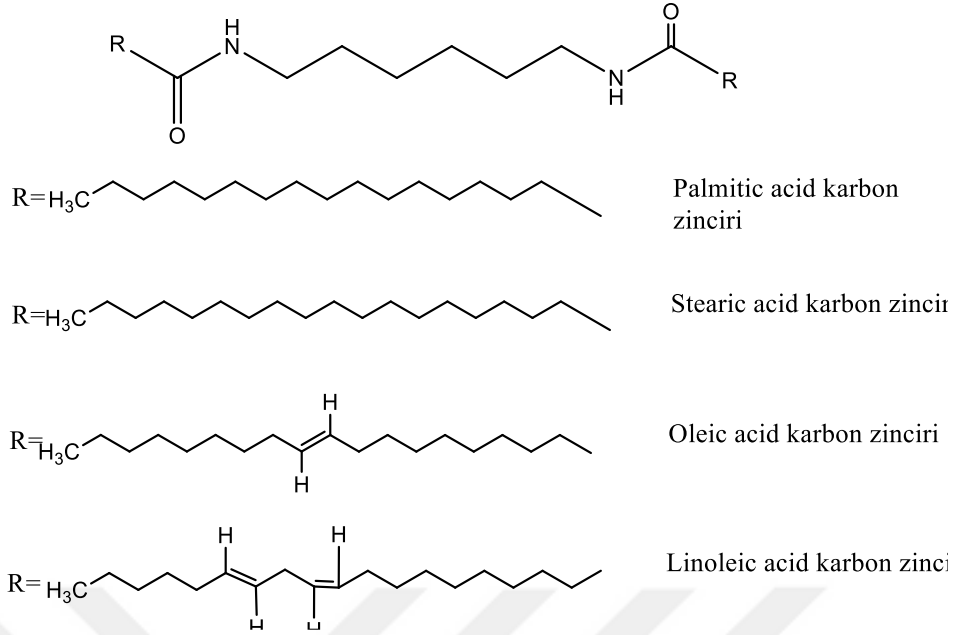
3.1 Sentezlenen Katkı Maddesinin Kimyasal Karakterizasyonu

FTIR eğrileri ve NMR verileri değerlendirilmeden önce katkı maddesinin sentezi için kullanılan atık hayvansal yağın içeriği hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Literatür incelendiğinde çok çeşitli ve farklı oranlarda içerik tayinleri mevcuttur. Çizelge 3.1’de hayvansal yağın içerisinde bulunan yağ asitlerinden yaklaşık olarak en yüksek oranda bulunanlar sunulmuştur [155].

Çizelge 3.1 : Hayvansal yağın içeriği [155]

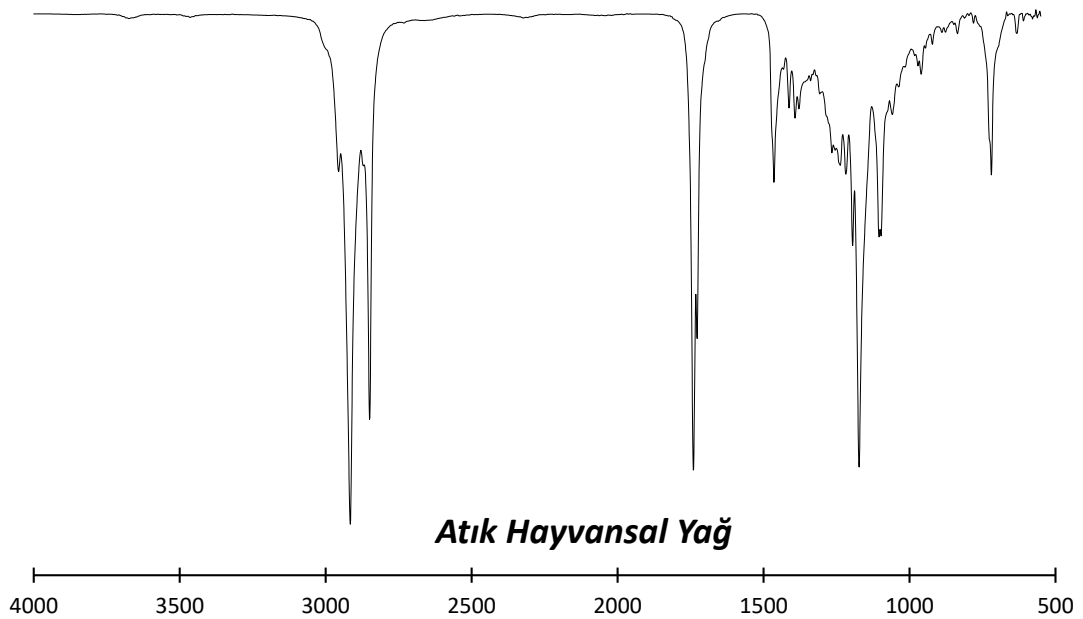
Yağ Asidi	Kimyasal Formül	% içerik
Oleik asit	$C_{18}H_{36}O_2$	44.5
Palmitik asit	$C_{16}H_{32}O_2$	29
Stearik asit	$C_{18}H_{36}O_2$	15
Linoleik asit	$C_{18}H_{32}O_2$	6.5

Katkı maddesinin sentezi sonrası elde edilen muhtemel bileşiğin (HY-6) kimyasal yapısı ve yağ bünyesindeki fragmentler Şekil 3.1’de verilmiştir. Yaklaşık hayvansal yağ trigliserit esterinin %95’lik bölümünü içeren yağ asitleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Katkı maddesinin kimyasal yapısı ve bünyesindeki bileşenlerin gösterimi

Atık hayvansal yağ, diamin yapıları ve bor nitrür kullanılarak elde edilen katkı maddesinin FT-IR, ^1H -NMR, ^{13}C -NMR ve TG/DTA analizleri bu bölümde verilmiştir. Şekil 3.2’de hayvansal yağın, Şekil 3.3’de 1-6 diaminoheksan’ın, Şekil 3.4’de HY-6’nın FT-IR spektrumları sunulmuştur. Ayrıca aynı sırayla Çizelge 3.2, 3.3 ve 3.4’te gerilim bantlarının gözlendiği değerler verilmiştir.

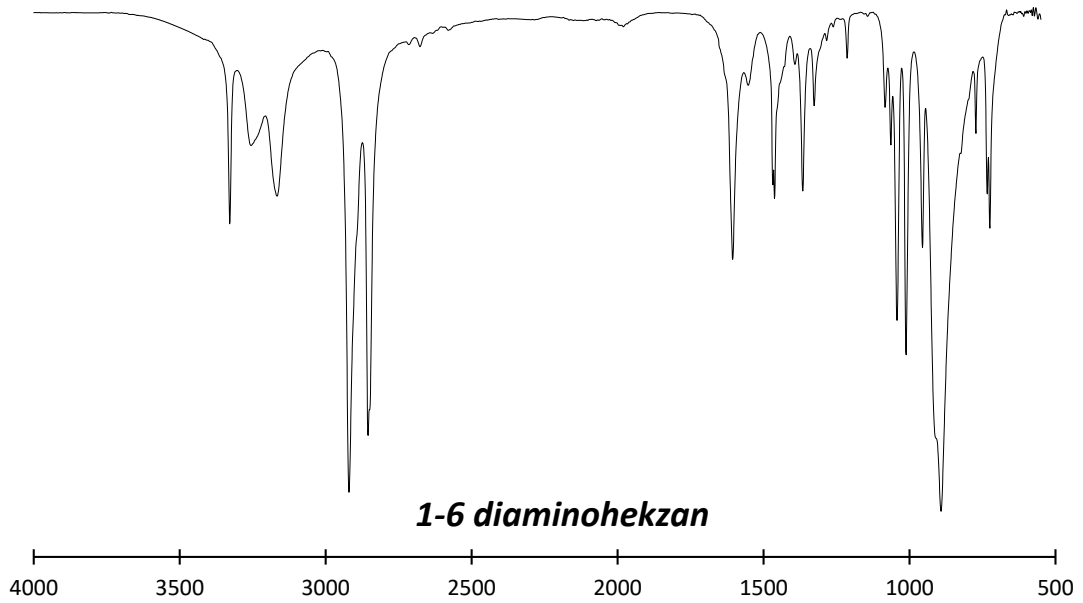


Şekil 3.2 : Atık hayvansal yağın FTIR spektrumu (cm^{-1})

Çizelge 3.2 : Hayvansal yağın FTIR spektrum verileri

CH=CH	C-H	C=O	CH ₂ -CH ₃ def.
2995	2917 ; 2850	1741 ; 1728	1471 ; 1399

Atık hayvansal yağda yukarıda çizelgede gösterildiği gibi karbon iskeletine ait CH gerilim bantları sırasıyla 2995, 2917 ve 2850 cm⁻¹'de ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık trigliserit ester yapısındaki esterik C=O gerilim bandı 1741 cm⁻¹ ve 1728 cm⁻¹ yağı tanımlayan en önemli esterik pikler niteliği taşımaktadır. Nitekim bu pik sentez sonucu elde edilen katkıda tamamen ortadan kaybolmaktadır. Aşağıda Şekil 3.3'te katkı için gösterilen FTIR verilerinde görüldüğü gibi 1633 cm⁻¹'e kaydığı gözlenmektedir.

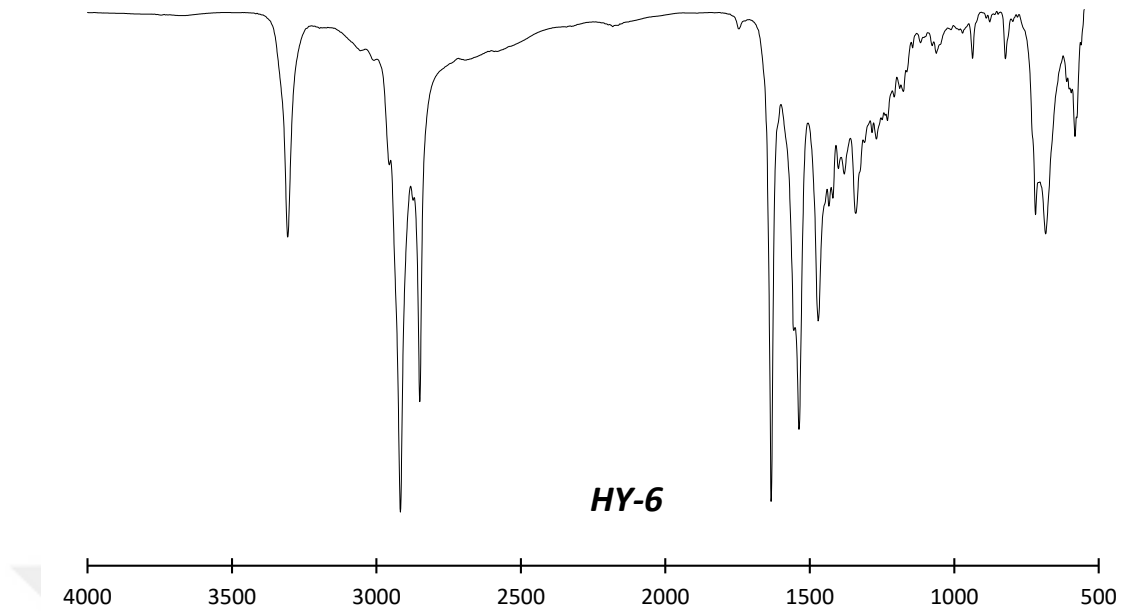


Şekil 3.3 : 1-6 diaminoheksan FTIR spektrumu (cm⁻¹)

Çizelge 3.3 : 1-6 diaminoheksan FTIR spektrum verileri

NH ₂	C-H	C=O	C-C	CH ₂ def.
3255 ; 3166	2920 ; 2855	1741 ; 1728	1606	1471 ; 1367

Katkının elde edilmesinde kullanılan ana bileşen niteliğindeki 1-6 diaminoheksan için alınan FTIR spektrumunda görüldüğü gibi en belirgin pik olarak ortaya çıkan NH₂ gerilim bandının katkıda (Şekil 3.4) kaybolduğu ve yerine beklendiği şekilde NH gerilim bandının ortaya çıktığı gözlenmektedir.

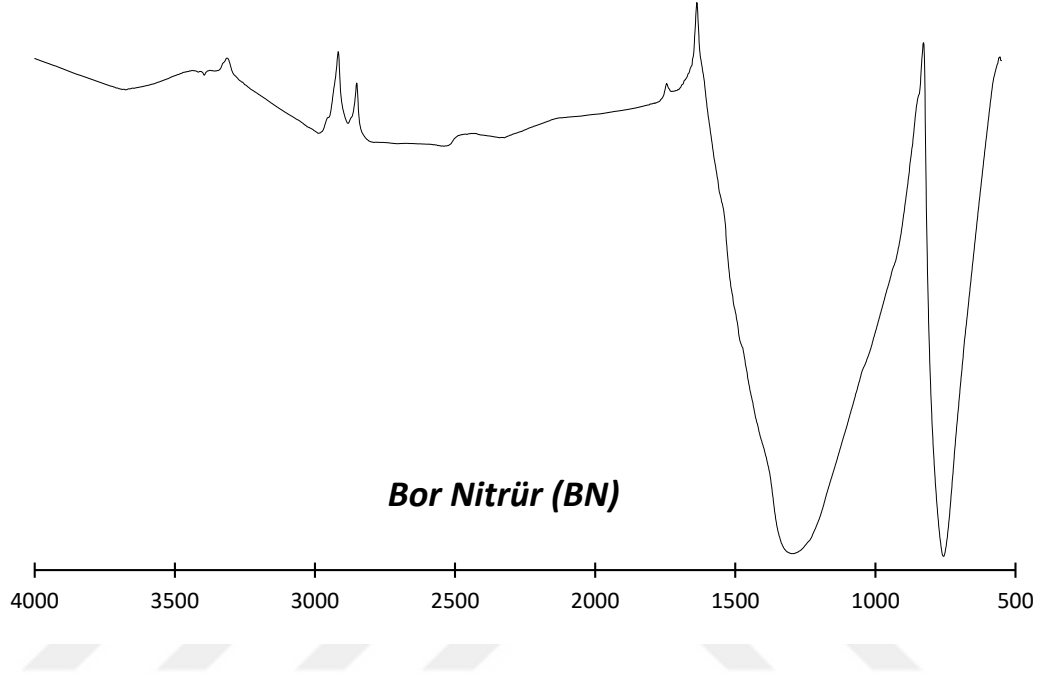


Şekil 3.4 : HY-6'nın FTIR spektrumu (cm⁻¹)

Katkı maddesinin FTIR spektrumu incelendiğinde önerilen hedef yapıyı teyit edici verilerin sunulduğu net bir şekilde görülmektedir. En yüksek dalga sayısı değerinde 3307 cm⁻¹'de görülen N-H gerilim bandı katkı sentezi için en önemli spektral veri olarak gözlemlenmektedir. Bunun yanında yağ bünyesinde yer alan fragmentlerden oleik asit ve linoleik asitin yapısında bulunan vinilik CH=CH gerilim bantları 3030 cm⁻¹ pikinde gözlenmiştir. Diğer yandan uzun karbon zincirlerini (CH₂ ve CH₃ gruplarına ait) alifatik C-H gerilim bantları 2916 cm⁻¹ ve 2849 cm⁻¹ piklerinde ortaya çıkmıştır. Sentez sonucu katkıda ortaya çıkan amidik C=O gerilim bandı 1633 cm⁻¹'de gözlenmiştir. Karbon iskeletinin C-C gerilim bantları 1537 cm⁻¹'de gözlenmiştir. Uzun karbon zincirlerinin (CH₂ ve CH₃ gruplarına ait olmak üzere) deformasyon pikleri ise 1471 ve 1399 cm⁻¹'de gözlemlenmiştir. FTIR'dan elde edilen veriler katkı için önerdiğimiz yapıyı desteklemektedir. Burada görülen pik katkı sentezi için öngörülen reaksiyonun başarıyla gerçekleştiğini ve diamin yapılarının hayvansal yağla başarıyla tutunduğunu göstermektedir. Yaklaşık 1740 cm⁻¹'larda gözlenen spektral bandın ise başlangıç maddesinden amitleşmeyen bir kısım hayvansal yağ bölümüne karşılık geldiği düşünülmektedir.

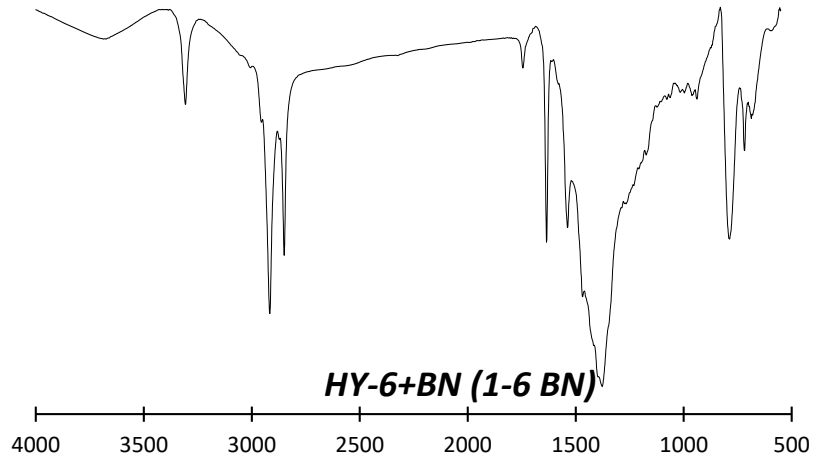
Çizelge 3.4 : Sentezlenen katkı maddesinin FTIR spektrum verileri cm^{-1}

N-H	CH=CH	C-H	C=O	C-C	CH ₂ -CH ₃ def.
3307	3001	2916 ; 2849	1633	1537	1471 ; 1399



Şekil 3.5 : Hekzagonal bor nitrürün FTIR spektrumu (cm^{-1})

Hekzagonal bor nitrür için alınan FTIR spektrumunda belirgin olarak iki temel pik ortaya çıkmaktadır. Bunlardan bir tanesi 1300 cm^{-1} 'deki düzlem içi B-N gerilim bandı, bir diğeri 756 cm^{-1} 'de ortaya çıkan B-N-B bağına karşılık gelen düzlem dışı eğilme titreşimi olarak ortaya çıkmaktadır.



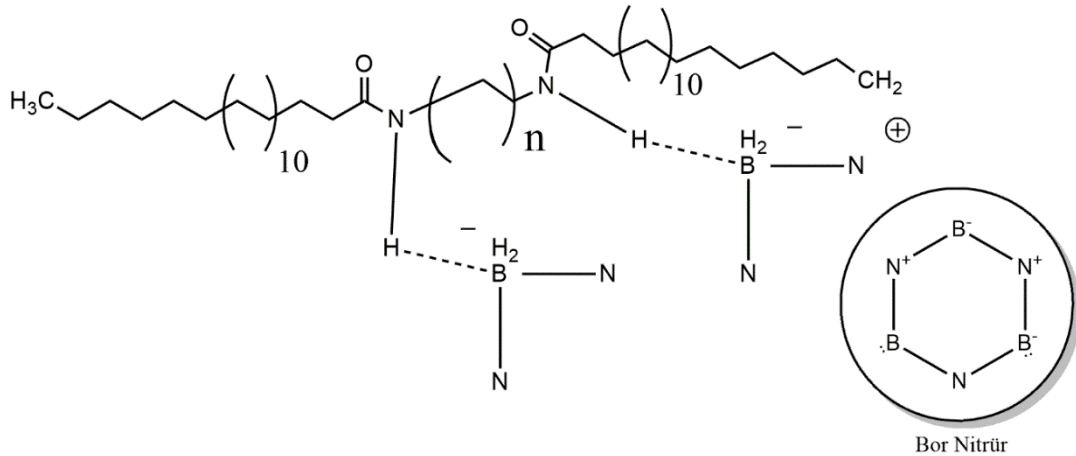
Şekil 3.6 : Nihai katkı 1-6 BN'nin FTIR spektrumu (cm^{-1})

Katkı miktarının ağırlıkça %10'u kadar bor nitrür ilaveli nihai katkı maddesinin FTIR spektrumuna ait veriler Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5 : BN ilaveli maddesinin FTIR spektrum verileri cm^{-1}

N-H	CH=CH	C-H	C=O	C-C	CH ₂ -CH ₃ def.	B-N	B-N-B
3308	3000	2917 ; 2851	1634	1537	1471 ; 1399	1376	788

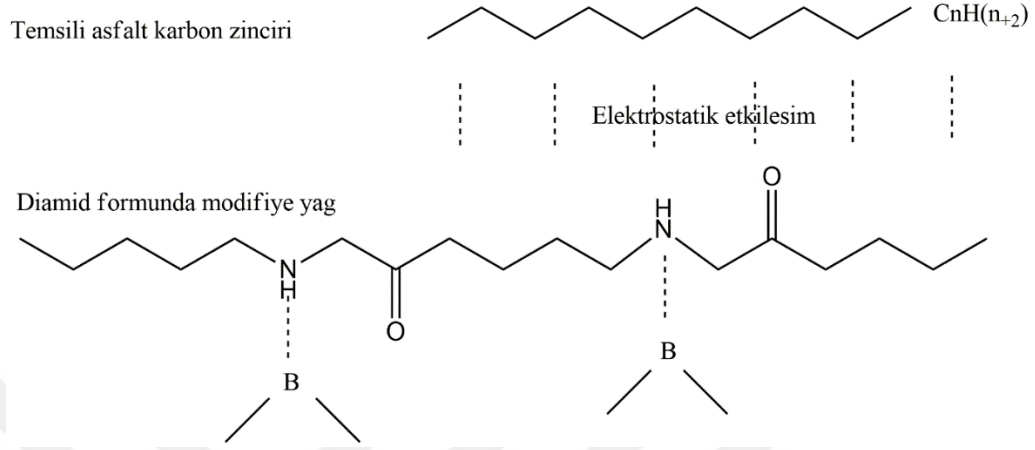
Yukarıdaki verilerde saf BN'ye ait 1300 cm^{-1} 'deki düzlem içi B-N gerilim bandının önemli oranda kaydığı 1376 cm^{-1} 'de ortaya çıktığı gözlenirken, aynı şekilde 756 cm^{-1} 'de ortaya çıkan B-N-B bağına karşılık gelen düzlem dışı eğilme titreşiminin de 788 cm^{-1} 'e kaydığı gözlenmektedir. Bu sonuç bize katkı maddesindeki NH-CO gruplarıyla bor nitrürün B-N-N şeklinde bir etkileşime girdiğini göstermektedir. Ortaya çıkan bu verilere paralel şekilde, bor nitrür ile azot içeren bileşikler arasında B-N-N şeklinde bir etkileşimin olduğuna dair bilgiler literatürde bildirilmektedir [156]. Şekil 3.7'te bu muhtemel etkileşim görselleştirilmiştir.



Şekil 3.7 : Katkı maddesi ile bor nitrürün etkileşim mekanizmasının gösterimi

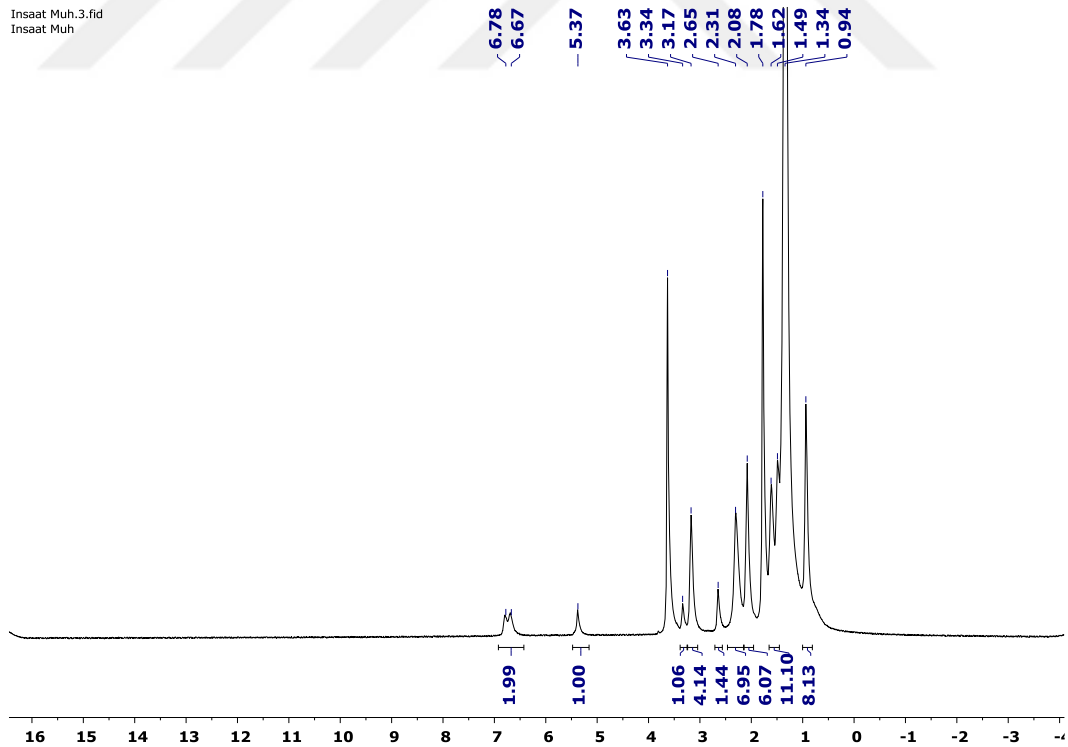
Tez çalışmasının ana motivasyonlarından birisi asfalt bağlayıcı ile birebir örtüşecek benzerlikte bir katkı maddesinin sentezlenmesidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, çalışmada hayvansal yağın tercih edilmesinin sebebi bitkisel yağla kıyasla daha uzun karbon zincirlerine sahip olması ve doymuş kısımların doymamış kısımlara oranla daha yüksek oranda bulunmasıdır. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere asfaltın temsili karbon zincirinin hedef katkı maddesine yüksek oranda benzediği görülmektedir. Katkı maddesi ile asfalt bağlayıcının birbiriyle olan ilişkisinin elektrostatik çekim kuvvetlerine dayandığı düşünülmektedir. Ayrıca, yukarıda da bahsedildiği gibi, bor

nitrürün katkı maddesine muhtemel B-N-N etkileşimi ile bağlandığı düşünülmektedir. Nitekim bor katkılı malzemede bu düşüncüyü teyit edici önemli spektral veriler elde edilmiştir. Bor elementinin, azot atomundaki serbest orbitaller üzerinden sisteme dahil olması muhtemeldir.



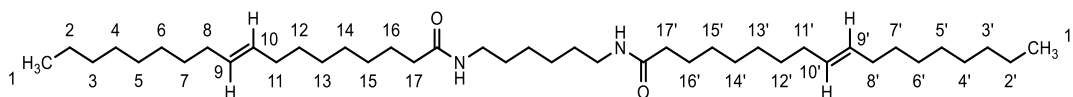
Şekil 3.8 : Katkı maddesi ile asfalt bağlayıcının muhtemel etkileşimi

Katkı maddesine ait kaydedilen proton NMR spektrumu aşağıda Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9 : Katkının THF-d8 ‘de alınan ^1H -NMR Spektrumu (THF-d8 NMR Pikleri : 1.77 ve 3.63 ppm)

Katkıya ait ^1H -NMR verileri aşağıda detaylarıyla sunulmuştur. Hedef katkı maddesinin kimyasal yapısı Şekil 3.10'da sunulmuştur. Her bir atom isimlendirilerek NMR analizinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Ayrıca katkı maddesine ait H-NMR verileri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

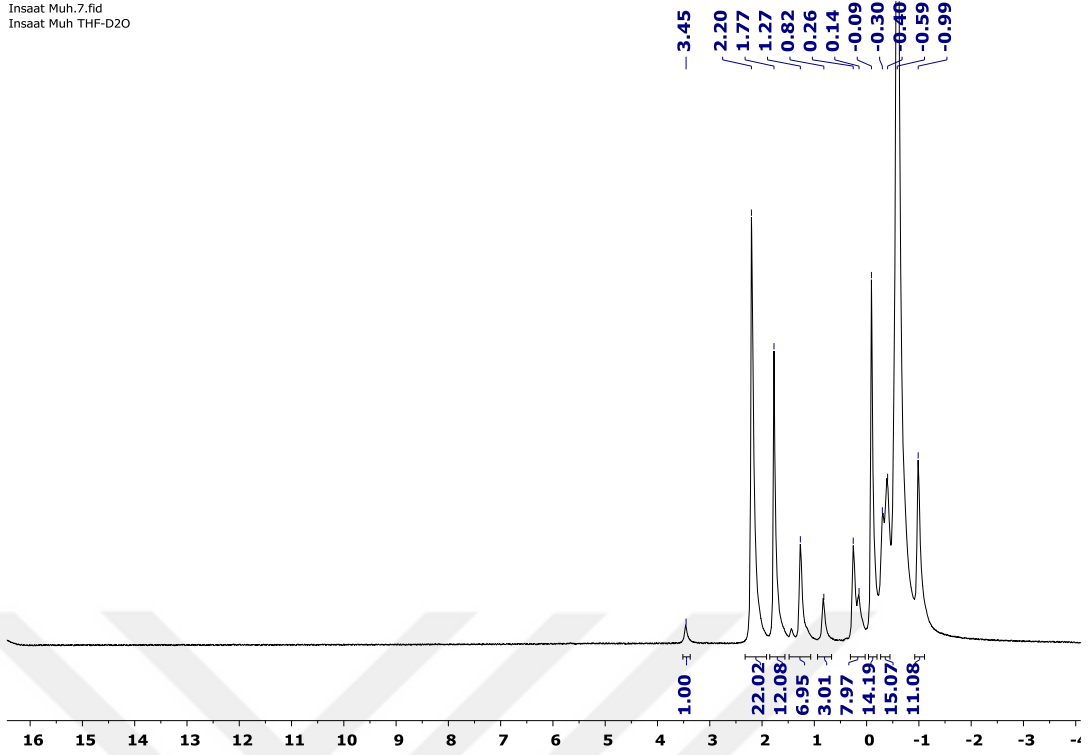


Şekil 3.10 : Numaralandırılmış halde hedef bileşiğin kimyasal yapısı

Çizelge 3.6 : Katkı maddesine ait H-NMR verileri

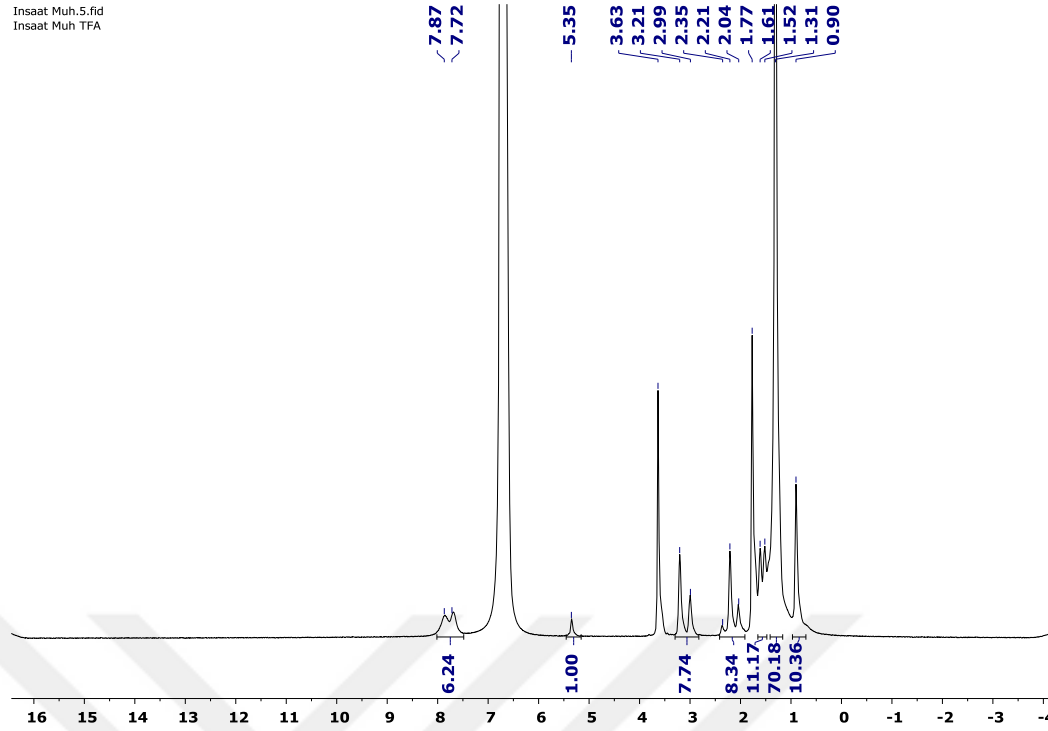
CH_3 (1-1')	0.94, s, 6H
CH_2 (2-2'), CH_2 (3-3'), CH_2 (4-4'), CH_2 (5-5'), CH_2 (7-7'), CH_2 (12-12'), CH_2 (14-14'), CH_2 (15-15')	1.34-1.62, m, 32H
CH_2 (6-6'), CH_2 (13-13'), -N- CH_2 - CH_2	1.78-2.08, m, 12H
-N- CH_2 - CH_2 - CH_2 , CH_2 (16-16')	2.31-2.65, m, 8H
CH_2 (8-8') CH_2 (11-11'), CH_2 (17-17')	3.17, s, 12H
-N- CH_2	3.34, s, 4H
$\text{CH}=\text{CH}$ (9-9'), $\text{CH}=\text{CH}$ (10-10')	5.37, s, 2H
-N-H	6.78, s, 2H

Veriler incelendiğinde katkıya ait en önemli verinin, amitleşmenin başarıldığına ait olmak üzere NH proton sinyallerinin oldukça aşağı alanda 6.78 ppm'de ortaya çıkması olduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanında yağ bünyesinde yer alan oleik asit ve linoleik fragmentlerinin $\text{CH}=\text{CH}$ doymamışlığını ortaya koyan 5.37 ppm'deki proton sinyalidir. Bunun yanında diğer karbon zincirine ait proton sinyalleri detaylarıyla Çizelge 3.7'de verilmiştir.



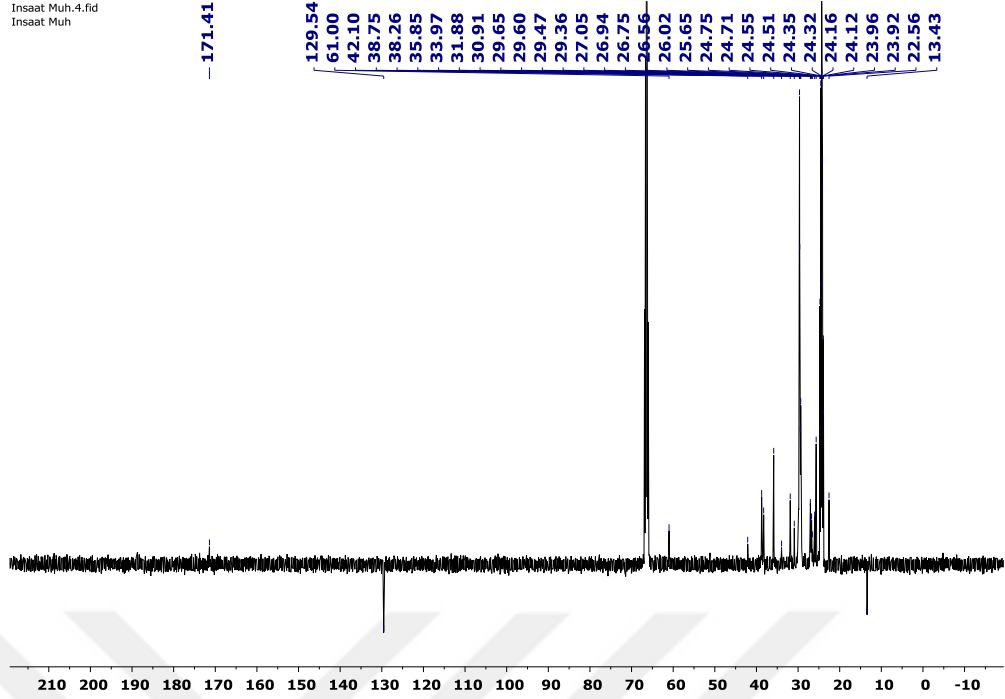
Şekil 3.10 : Katkının THF-d8-D20 karışımında alınan ^1H -NMR Spektrumu

Katkının D_2O (döteryumlu su) ile yapılan izotop değişimi (Exchange) sonucu alınan ^1H -NMR spektrumunda dikkate değer davranışlar ortaya çıkmıştır. Nitekim, Şekil x'te verilen ^1H -NMR spektrumunda yaklaşık 6.67 ve 6.78 ppm'de ortaya çıkan N-H proton sinyalinin tamamen spektrumdan kaybolduğu gözlenmektedir. Bu davranış, kuvvetli elektronegatif atomlara bağlı protonlarda beklenen bir davranıştır. Bu davranış biçimi amidik bir NH varlığını kesin bir şekilde teyit etmektedir. Spektrumda standart 0 (sıfır) noktasının bir miktar yukarı alana kaydırılması sebebiyle $\text{CH}=\text{CH}$ grubuna ait proton sinyalleri 3.45 ppm'de kaydedilmesine karşılık gerçek değer 5.43 ppm olduğu görülmektedir. Bu spektrum NH protonlarının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.



Şekil 3.13 : Katkının THF-d8-TFA karışımında alınan ^1H -NMR Spektrumu

Hedeflenen katkının oluştuğuna dair en önemli verinin NH protonları olması sebebiyle NH protonlarının ilave teyidi yapılmak amacıyla TFA (triflorasetikasit)'da NH protonlarının ilave protonlanmasıyla amidinyum katyonunun oluşması ve bu katyona ait proton sinyallerinin aşağı alana kayması hedeflenmiştir. Nitekim spektrumda daha önce Şekil 3.12'de verilen spektrumda görüldüğü gibi 6.67 ve 6.78 ppm'de gözlenen piklerin yukarıdaki spektrumda (Şekil 3.13) 7.72 ve 7.87 ppm şeklinde aşağı alana kayması yapıyı mutlak suretle teyit edici bir veri olarak sunulmuştur.

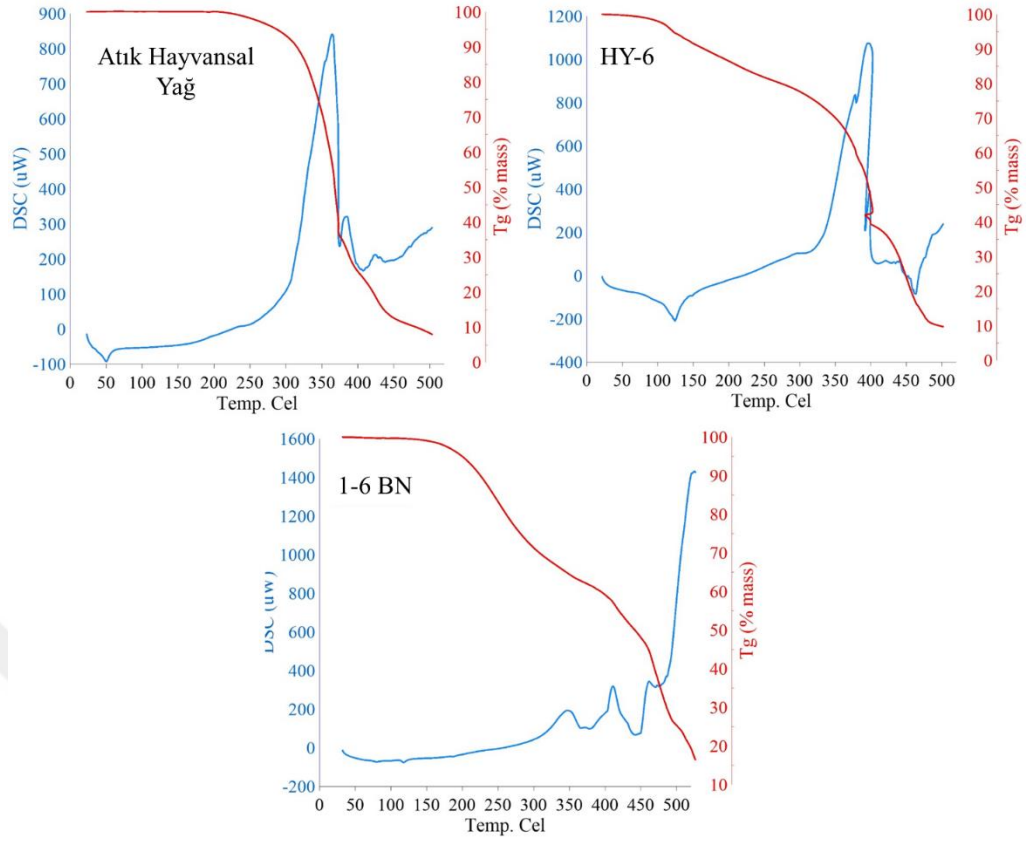


Şekil 3.14 : Numunenin THF-d8’de karışımında alınan ^{13}C -APT NMR Spektrumu

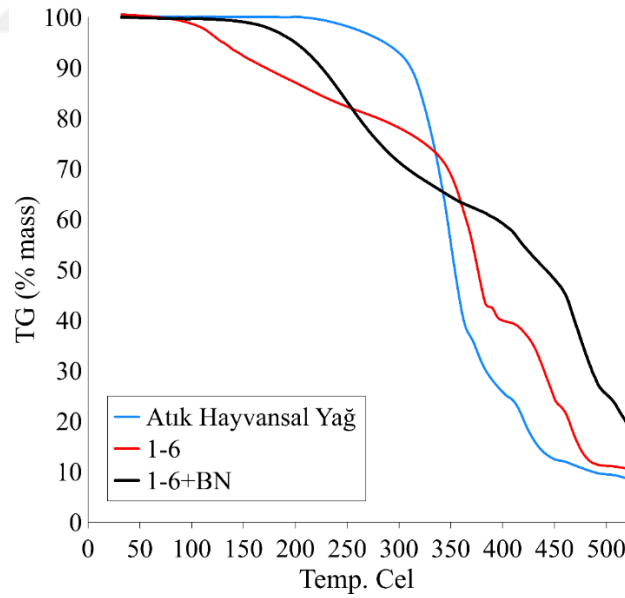
Çizelge 3.7 : C^{13} -NMR spektral verileri

$\text{C}(\text{CH}_3)$ (1-1') (13.43) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (2-2') (22.56) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (3-3') (23.92) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (4-4') (23.96) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (5-5') (24.12) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (6-6') (24.16) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (7-7') (24.32) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (12-12') (24.35) ; CH_2 (13-13') (29.65) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (14-14') (24.51) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (15-15') (24.55) ; $\text{C}(\text{CH}_2)$ (16-16') (25.65)
-N- CH_2 - CH_2 - CH_2 , CH_2 - CH_2 - CH_2 -N $\text{C}(\text{NCH}_2)$ (42.10)
-N- CH_2 - CH_2 - CH_2 , CH_2 - CH_2 - CH_2 -N $\text{C}(\text{C-CH}_2)$ (30.91)
-N- CH_2 - CH_2 - CH_2 , CH_2 - CH_2 - CH_2 -N $\text{C}(\text{C-CH}_2)$ (26.56)
$\text{C}(\text{CH}_2\text{-CH=CH})$ (8-8') (31.88), $\text{C}(\text{CH}_2)$ (11-11') (33.97), $\text{C}(\text{CH}_2)$ (17-17') (38.75)
$\text{C}(\text{CH=CH})$ (9-9' ; 10-10') (129.54)
$\text{C}(\text{C=O})$ (171.41)

Hedeflenen katkının elde edildiğine dair en önemli spektral veri amidik C=O grubuna ait karbon pikinin en aşağı alanda 171.41 ppm’de gözlenmesidir. Bunun yanında yağ yapısında yer alan bazı trigliserit esterlerinin (oleik asit ve linoleik asit) karbon zincirinde yer alan CH=CH grubuna ait karbon pikleri ise beklendiği gibi yine aşağı alanda 129.54 ppm’de ortaya çıkmaktadır. Tabloda sunulan ve yağ zinciri ile amid zincirine ait CH_2 ve CH_3 grubu karbon pikleri detaylarıyla Çizelge 3.7’de sunulmuştur. İlgili veriler hedeflenen bileşiği teyit edici niteliktedir.



Şekil 3.15 : Katkı maddelerinin termogravimetrik analiz sonuçları



Şekil 3.16 : Atık hayvansal yağın ve katkı maddelerinin termal eğrileri

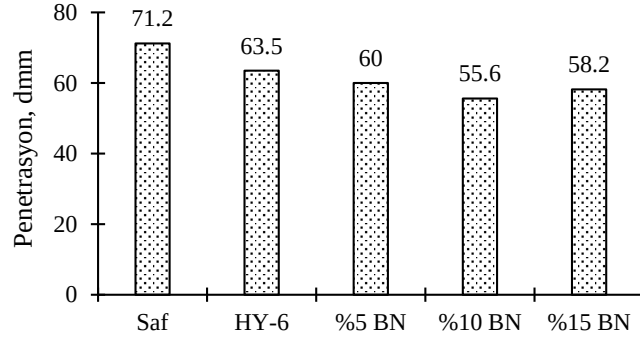
Şekil 3.15'te katkı maddesinin sentezinde kullanılan atık hayvansal yağ, atık yağa 6 karbonlu diamin (diaminoheksan) ilave edildikten sonra nihai reaksiyon ürünü olan katkı maddesi (1-6) ve 1-6'ya hegzagonal bor nitrür ilavesi sonrası elde edilen, tez çalışmasının ana katkısı olan 1-6 BN olmak üzere 3 farklı maddenin termogravimetrik

analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 3.16’da bu üç eğri birlikte sunulmuştur. Şekil 3.15 incelendiğinde bozunma süreci bittiğinde atık hayvansal yağ kütlesinin neredeyse %90’ının kaybolduğu görülmüş, bu bozunma miktarını 1-6 takip etmiştir. Deney bitiştirinde bozunmadan kalan kısım miktarı en yüksek olan madde 1-6+BN olmuştur. Atık yağın bozunmaya başladığı sıcaklık nispeten diğerlerinden yüksek olsa da bozunmaya başladıktan sonra eğri dik bir iniş sergilemiştir. 1-6’nın bozunmaya başladığı sıcaklık diğer iki maddeye göre daha erkendir. Bu durum modifikasyon için belirlenen 160°C sıcaklık değeriinde olumsuzluğa yol açabilir. Ancak, bu olumsuzluk bor nitrür ilavesiyle önemli oranda giderilmiş, Şekil 3.16’dan da görüldüğü üzere 1-6’ya kıyasla bozunma daha geç sıcaklıklarda başlayarak eğrinin daha yatay seyretmesini takiben maddenin %20’ye yakının bozunmadan kalması sağlanmıştır. Genel olarak, TGA’nın amacı asfalt modifikasyonu için tercih edilen modifikasyon sıcaklığında katkı maddesinin herhangi bir bozunmaya uğrayıp uğramayacağını belirlemesidir. TGA sonuçları çalışmanın ana katkısı olan 1-6+BN’nin bu sıcaklıklarda herhangi bir olumsuzluk yaşanmadan asfalta ilave edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, bor nitrürün uygun koşullarda ilave edildiği maddenin termal özelliklerini önemli oranda geliştirdiği ve kendi başına da olağanüstü termal dayanıma sahip olduğu bilinmektedir. Literatürdeki verilerde hekzagonal bor nitrürün termal dayanımından detaylıca bahsedilmektedir [157,158].

3.2 Katkı Maddesi İçerisindeki İdeal Bor Nitrür Oranının Belirlenmesi İçin

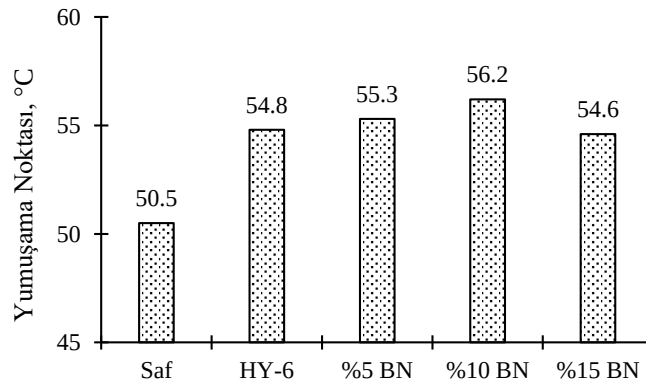
Yapılan Ön Çalışma Sonuçları

Elde edilecek katkı maddesi içerisinde ilk olarak %10 oranında bor nitrür kullanılmış, yapısal karakterizasyonu tamamlandıktan sonra ideal oranın belirlenmesi için asfalt bağlayıcı üzerinde çeşitli performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her bir katkı maddesinden asfalt bağlayıcıya ağırlıkça %2 oranında ilave edilmiştir. %5, %10 ve %15 oranlarında BN içeren 3 farklı katkı maddesi sentezlenmiştir. Bu bağlayıcılara ek olarak bor nitrür içermeyen katkı maddesinin etkisini de görmek amacıyla aynı oranda bu katkı maddesinden de ilave edilmiştir. Modifiye asfalt bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmış, sonuçlar Şekil 3.17-3.19’da verilmiştir.



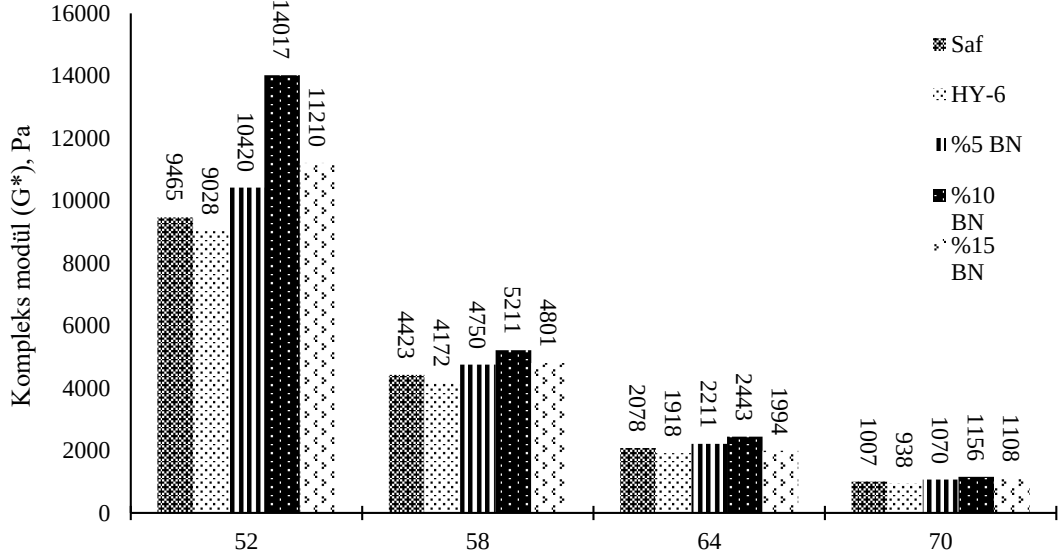
Şekil 3.17 : Farklı BN içeriklerine sahip katkıların penetrasyon deneyi sonuçları

Şekil 3.17 incelendiğinde katkı maddesi kullanımının saf asfaltın penetrasyon değerini azalttığı görülmüştür. HY-6'daki diamin yapılarının asfalttaki sertleşmeye yol açtığı düşünülmektedir. BN oranları incelendiğinde her üç BN oranında da penetrasyon değerlerinin saf asfalta göre azaldığı, katkı maddesinin asfaltın kıvamını artırdığı görülmüştür. En düşük penetrasyon değeri %10 BN oranında görülmüş, %15 BN ilavesinden sonra bu eğilim tersine dönmüştür. Penetrasyon deneyi sonuçlarına göre ideal BN oranı %10 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.18 : Farklı BN içeriklerine sahip katkıların yumuşama noktası sonuçları

Şekil 3.18'e göre en yüksek yumuşama noktası değeri %10 BN ilaveli katkı maddesinde elde edilmiştir. Diğer tüm katkı maddelerinde saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek değerler görülmesi sevindiricidir. Yumuşama noktası deneyi sonuçlarına göre ideal BN oranı %10 olarak belirlenmiştir.

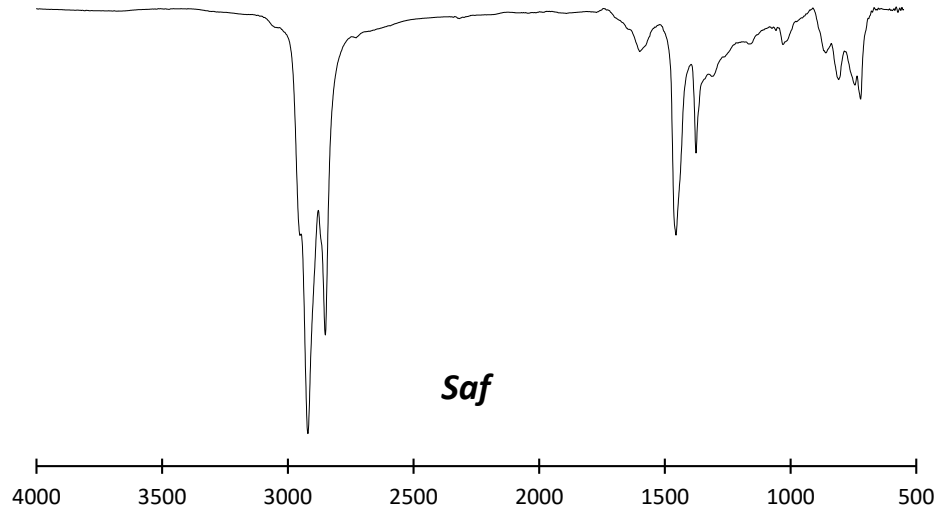


Şekil 3.19 : Farklı BN içerikleri için DSR deneyi sonuçları

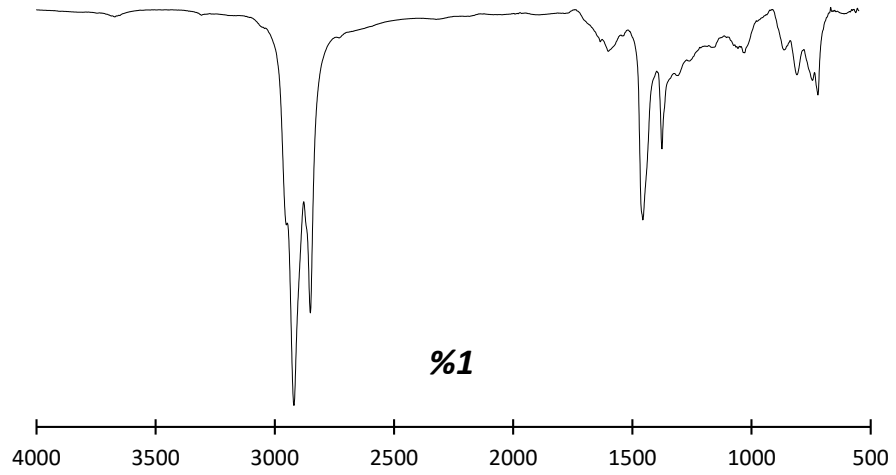
Şekil 3.19’da farklı BN içeriklerine sahip katkıları için DSR deneyi sonuçları verilmiştir. HY-6 bağlayıcısı hariç diğer tüm bağlayıcılar saf asfalta kıyasla daha yüksek G^* değerleri sunmuştur. BN oranının artmasıyla G^* değerleri artmış ancak %15 BN oranında bu artış tersine dönmüştür. 52°C sıcaklıkta saf asfalta kıyasla %5 BN bağlayıcısı %10.09, %10 BN bağlayıcısı %48.09, %15 BN bağlayıcısı ise %18.44 daha yüksek G^* değeri sunmuştur. Tüm bu sonuçlar ideal BN oranının %10 olduğunu göstermiştir. Çalışmanın geri kalanında katkı maddesinin sentezlenmesi için %10 oranında BN ilave edilecek, tüm bağlayıcı ve karışım deneyleri bu nihai katkı maddesi kullanılarak elde edilen modifiye bağlayıcılar ile gerçekleştirilecektir. Yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda katkı maddesinin asfalt bağlayıcıya %1, %2, %4 ve %6 oranında ilave edilmesine karar verilmiştir.

3.3 Saf ve Modifiye Asfalt Bağlayıcıların Yapısal Karakterizasyonu

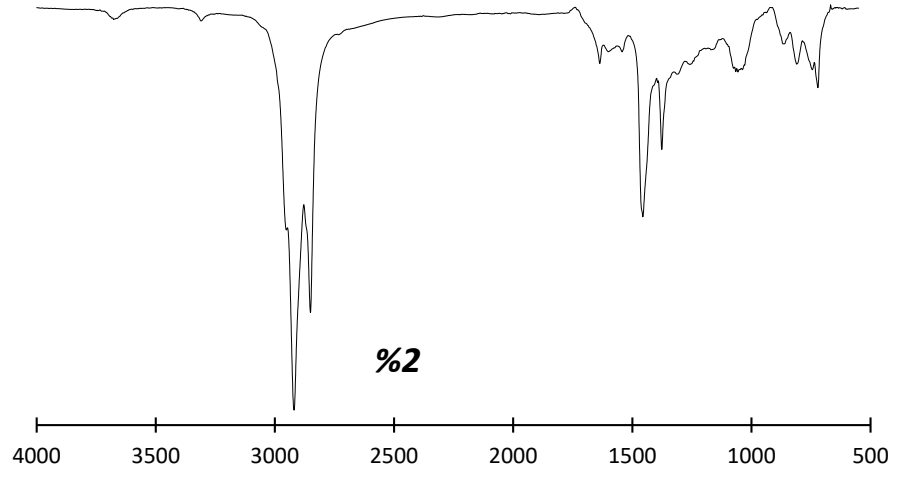
Saf ve BN içeren katkı ilaveli asfalt bağlayıcıların FTIR spektrumları aşağıda sunulmuştur.



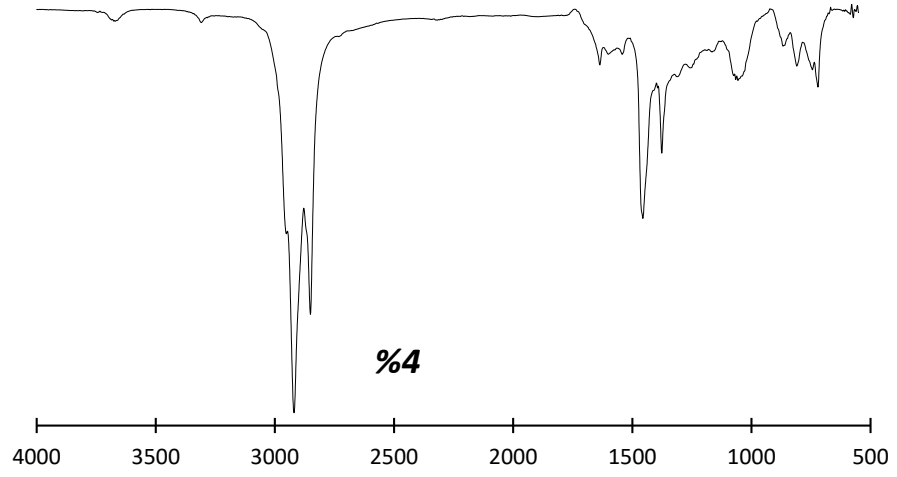
Şekil 3.20 : Saf asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



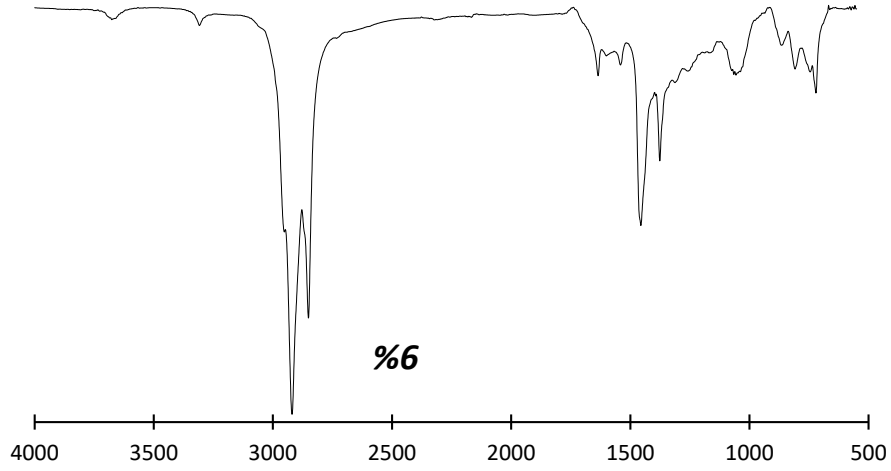
Şekil 3.21 : %1 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



Şekil 3.22 : %2 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



Şekil 3.23 : %4 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



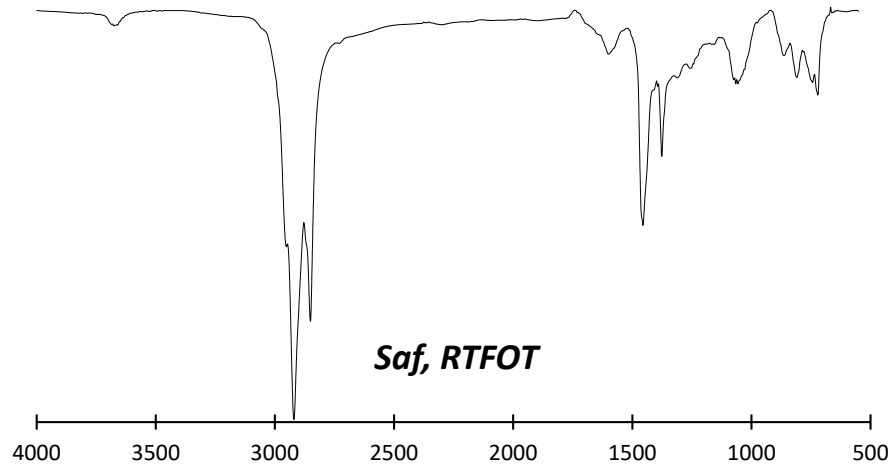
Şekil 3.24 : %6 katkı içeren asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})

Yaşlandırılmamış saf asfalt bağlayıcının ve %6 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrum verileri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

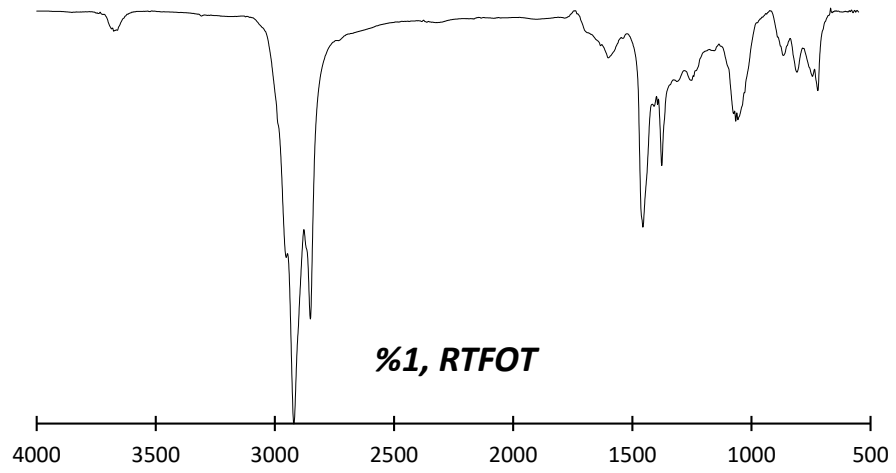
Çizelge 3.8 : Saf ve %6 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrum verileri, cm^{-1}

Asfalt adı	N-H	CH	C=O	CH ₂ -CH ₃ def.
Saf asfalt	-	2920 ; 2852	1598	1455 ; 1376
%6 katkılı asfalt	3307	2920 ; 2852	1636	1455 ; 1377

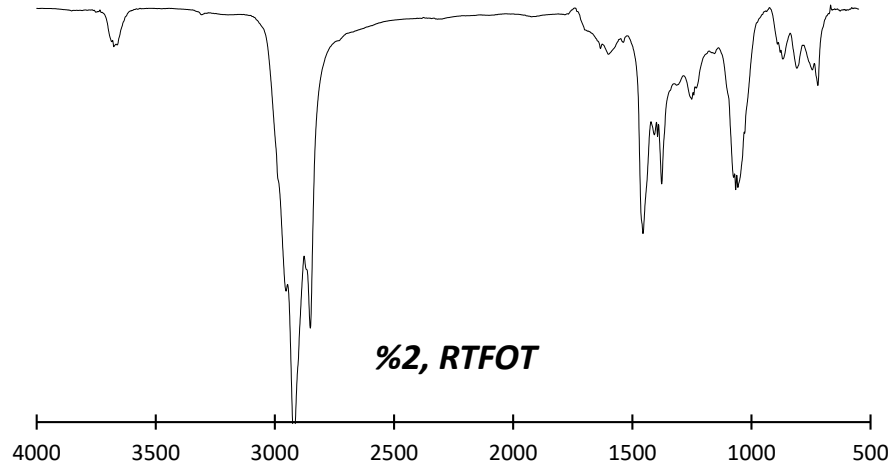
Çizelge 3.8 incelendiğinde asfalt bağlayıcıda alifatik hidrokarbon içeriğinden dolayı açığa çıkan CH gerilim bantları 2920 ve 2852 cm^{-1} ’de gözlenmiştir. CH₃ ve CH₂ gruplarına ilişkin deformasyon bantları 1455 ve 1376 cm^{-1} ’de gözlenmiştir. Şekillerde ve Çizelge 3.8’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile birlikte beklenen şekilde NH amidik pikleri gözlenmiş, katkı oranının artmasıyla pik derinliği artmıştır. NH amidik pikleri 3307 cm^{-1} ’de gözlenmiştir. Katkıya ilişkin belirgin pik olan C=O gerilim bandı saf bağlayıcıda 1598 cm^{-1} ’de gözlenirken, %6 katkı kullanımında bu pik 1636 cm^{-1} olarak gözlenmiştir.



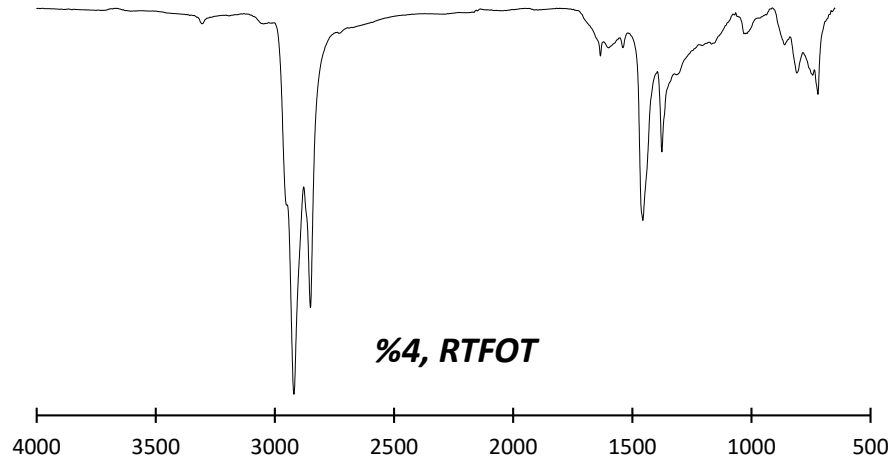
Şekil 3.25 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



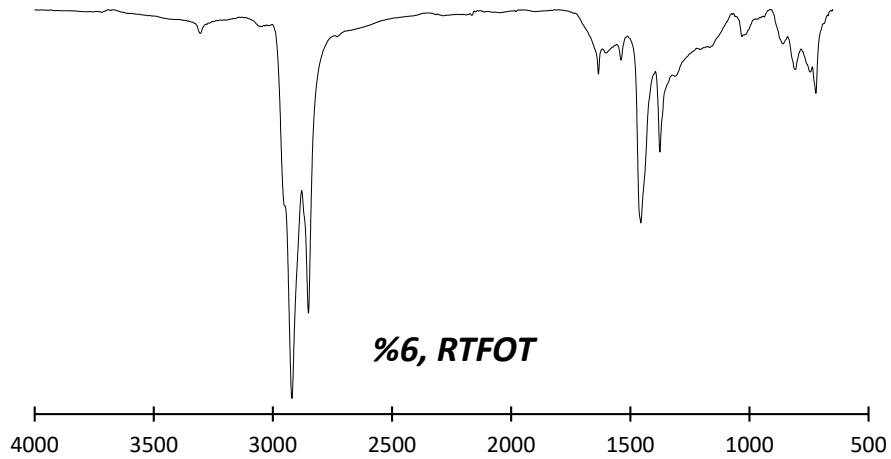
Şekil 3.26 : RTFOT ile yaşlandırılmış %1 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



Şekil 3.27 : RTFOT ile yaşlandırılmış %2 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



Şekil 3.28 : RTFOT ile yaşlandırılmış %4 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm⁻¹)



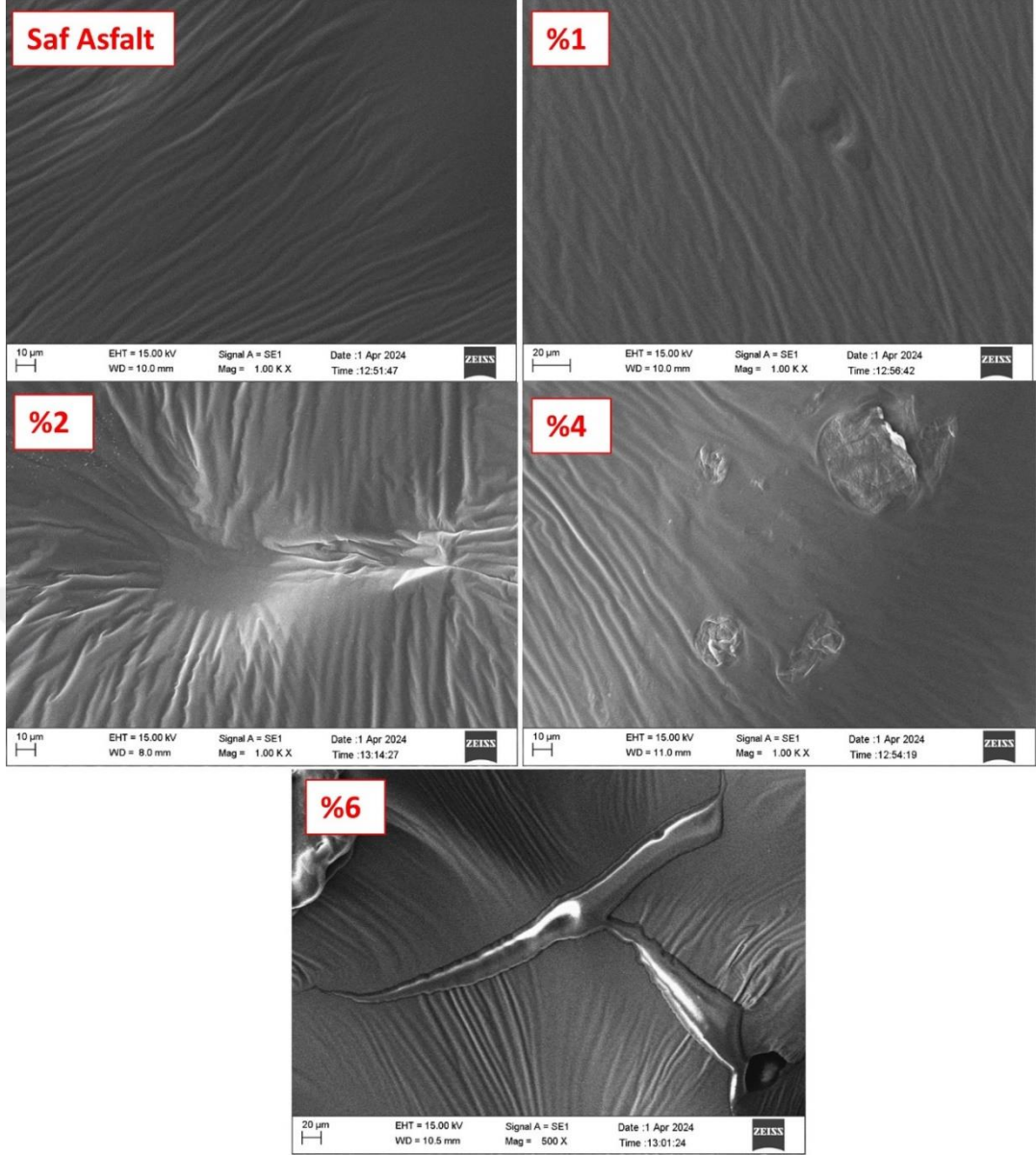
Şekil 3.29 : RTFOT ile yaşlandırılmış %6 katkılı asfalt bağlayıcının FTIR spektrumu (cm^{-1})

Çizelge 3.9 : RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve %6 katkılı asfalt bağlayıcıların FTIR spektrum verileri, cm^{-1}

Asfalt adı	N-H	CH	C=O	CH ₂ -CH ₃ def.
Saf asfalt	-	2920 ; 2852	1598	1455 ; 1376
%6 katkılı asfalt	3307	2920 ; 2852	1634	1455 ; 1377

Çizelge 3.9 incelendiğinde asfalt bağlayıcıda alifatik hidrokarbon içeriğinden dolayı açığa çıkan CH gerilim bantları 2920 ve 2852 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. CH₃ ve CH₂ gruplarına ilişkin deformasyon bantları 1455 ve 1376 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi katkı kullanımı ile birlikte beklenen şekilde 3307 cm^{-1} 'de NH amidik pikleri gözlenmiştir. Katkı maddesinin varlığına işaret eden C=O pikleri saf bağlayıcıda 1598 cm^{-1} 'de gözlenirken, %6 katkılı bağlayıcıda 1634 cm^{-1} 'de gözlenmiştir.

Elde edilen katkı maddesi asfalt bağlayıcıya %1, %2, %4 ve %6 oranlarında ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Katkının asfalt bağlayıcı içerisinde homojen dağılıp dağılmadığını, herhangi bir yapısal veya yüzeysel problem meydana gelip gelmediğinin belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 3.30'da verilmiştir.

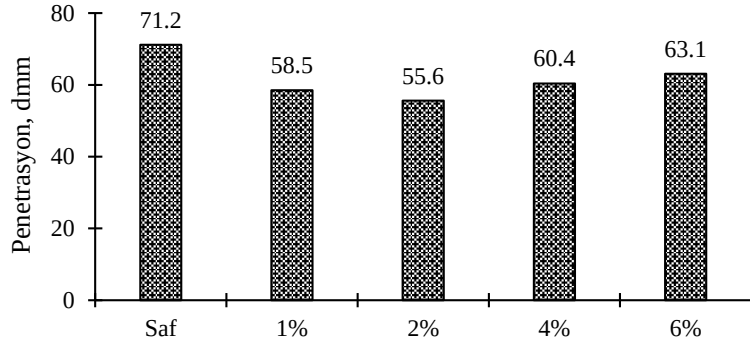


Şekil 3.30 : Saf ve modifiye asfaltların SEM görüntüleri

Şekil 3.30 incelendiğinde farklı oranlarda katkı maddesinin varlığı net bir şekilde görülmektedir. %1 ve %2 oranında katkı ilavesinin asfaltın matris fazında herhangi bir olumsuzluğa yol açmadığı, %4 ve %6 katkı ilavesinde faz ayrımlarının başlayarak kısım kısım aglomerasyonlar meydana geldiği görülmektedir. Özellikle %6 katkı ilavesinin asfalt matrisinde derin yırtıklar şeklinde kendini gösterdiği gözlemlenmiştir. %1 ve %2 oranında katkı kullanımının ve modifikasyon şartlarının (1000 rpm, 160°C ve 1 saat) uygun olduğu ve katkının asfalt bağlayıcı içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir.

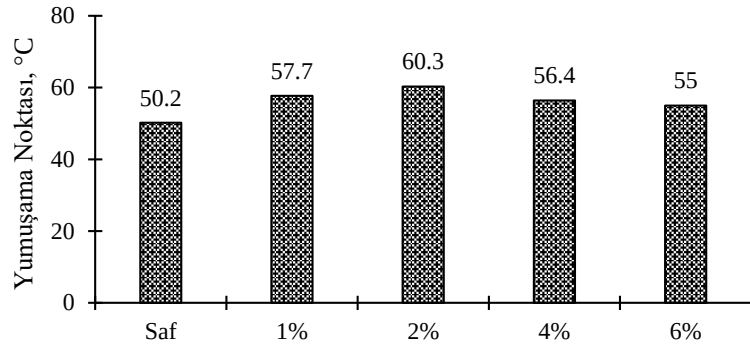
3.4 Penetrasyon ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Saf ve %1, %2, %4, %6 oranında katkı içeren modifiye asfalt bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi sonuçları Şekil 3.31 ve 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.31 : Penetrasyon deneyi sonuçları

Şekil 3.31’e göre %1 ve %2 katkı oranları için penetrasyon değerlerinin azaldığı, %4 ve %6 için bu artışın terse döndüğü görülmüştür. Saf bağlayıcıya kıyasla %1 oranında katkı kullanımında penetrasyon değeri %17.84 azalırken, %2’de bu durum %21.91’dir. Tüm katkı oranlarında saf bağlayıcıya kıyasla daha düşük penetrasyon değerleri elde edilmiştir. Genel olarak %2 katkı ilavesiyle en düşük penetrasyon değerleri elde edilmiş, asfalt bağlayıcının kıvamı kayda değer miktarda artmıştır.



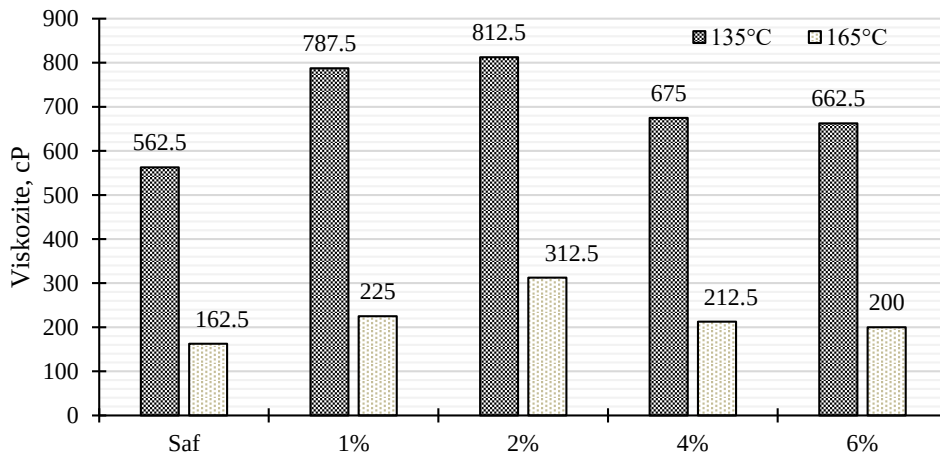
Şekil 3.32 : Yumuşama noktası deneyi sonuçları

Yumuşama noktası değeri, asfaltın viskoz hale gelerek özelliklerini kaybettiği sıcaklık olarak tanımlanır. Bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri verilen Şekil 3.32 incelendiğinde en yüksek yumuşama noktası değerinin %2 katkı içeren bağlayıcıda elde edildiği görülmektedir. Saf asfalta kıyasla tüm numunelerde yumuşama noktası değeri artmış, bu artış katkı içeriğine göre sırasıyla %14.94, %20.12, %12.35 ve %9.56 olarak belirlenmiştir.

Genel olarak penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı ilavesiyle penetrasyon değerlerinde azalma ve yumuşama noktası değerlerinde artma meydana geldiği görülmüştür. Bu durum katkının asfaltın kıvamını ve sertliğini artırarak kalıcı deformasyon oluşumlarına karşı dayanım sağlayacağını göstermektedir.

3.5 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi Sonuçları

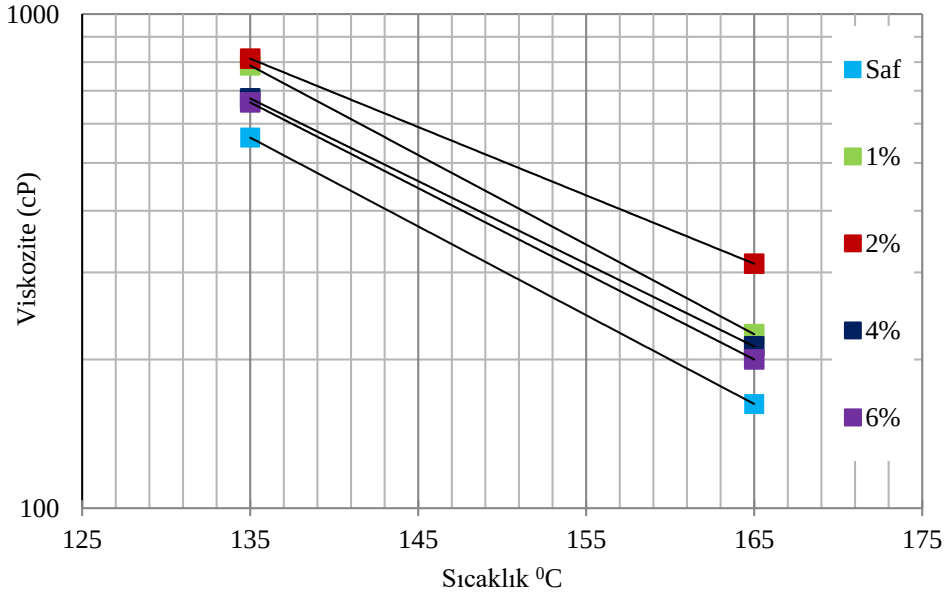
Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki (135°C, 165°C) viskozite değerleri bulunmuş, Şekil 3.33'te sunulmuştur. Elde edilen değerler logaritmik sıcaklık-viskozite grafiği çizilerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının bulunmasında kullanılmıştır. Grafikte sırasıyla 170±20 cP ve 280±30 cP değerlerine karşılık gelen değerler karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları aralıklarını sunar (Şekil 3.34). Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları Çizelge 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.33 : Saf ve modifiye bağlayıcıların RV deneyi sonuçları

Şekil 3.33 incelendiğinde her iki sıcaklıkta da katkı maddesi içeren asfalt bağlayıcılar saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek viskozite değerleri sunmuştur. En yüksek viskozite değeri %2 katkı içeren asfaltta görülmüştür. Saf asfaltın 135°C'deki viskozite değerleri %1, %2, %4,%6 katkı içeriğinde sırasıyla %40, %44.4, %20 ve %17.78 olarak belirlenmiştir. 165°C sıcaklıkta ise %38.46, %92.31, %30.77 ve %23.08'dir. Hiçbir bağlayıcı şartname değeri olan 3000 cP'yi aşmamıştır. %1 ve %2 katkı içeriklerinde önemli oranlarda viskozite artışı meydana gelmiştir. Bu durum katkı ilavesiyle asfaltın yüksek sıcaklık dayanımının arttığı ve kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanım elde ettiğini göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar asfalta

çeşitli yağların ilave edilmesinin asfaltı yumuşatacağını göstermektedir. Bu tez çalışmasındaki katkı maddesinin içeriği düşünüldüğünde yağsı kısmın artık reaksiyon ürününe dönüşerek tamamen farklı bir özellik gösterdiği söylenebilmektedir.



Şekil 3.34 : Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hesabı

Çizelge 3.10 : Bağlayıcı numunelerinin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

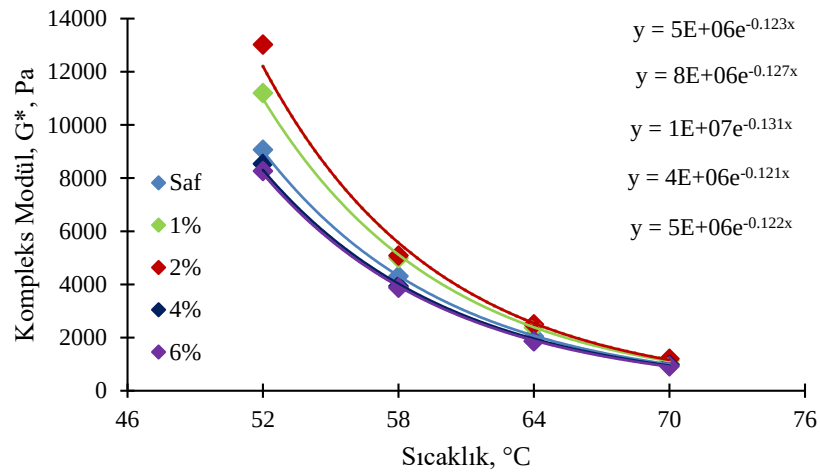
Bağlayıcı Adı	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
Saf	165.6	153.4
%1	170.9	159
%2	183.5	167.8
%4	168.9	156.1
%6	168.9	156.4

3.6 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi Sonuçları

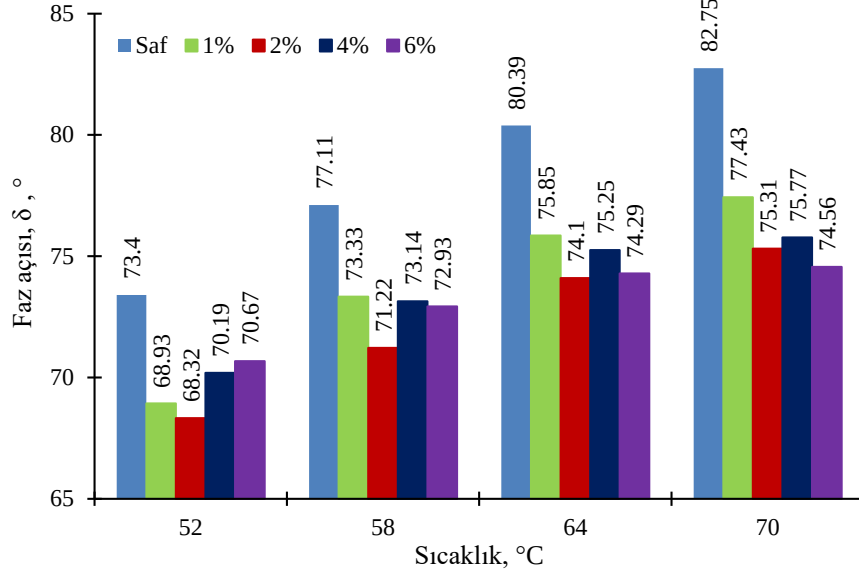
DSR deneyi, 52°C, 58°C, 64°C ve 70°C sıcaklıklarda 1.59 Hz (10 rad/s) frekansta, 25 mm plaklar ve plaklar arası boşluk 1 mm ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda asfalt bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanımlarının bir ölçüsü olan $G^*/\sin\delta$ değeri elde edilmiştir. Bu parametrenin hesaplanması için gerekli elastik modül (G'), viskoz modül (G''), kompleks modül (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri de DSR yazılımı tarafından sunulmaktadır. DSR deneyi sonuçları Çizelge 3.11'de verilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcılara ait DSR deney verileri grafik olarak Şekil 3.35-3.37'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : DSR deneyi verileri

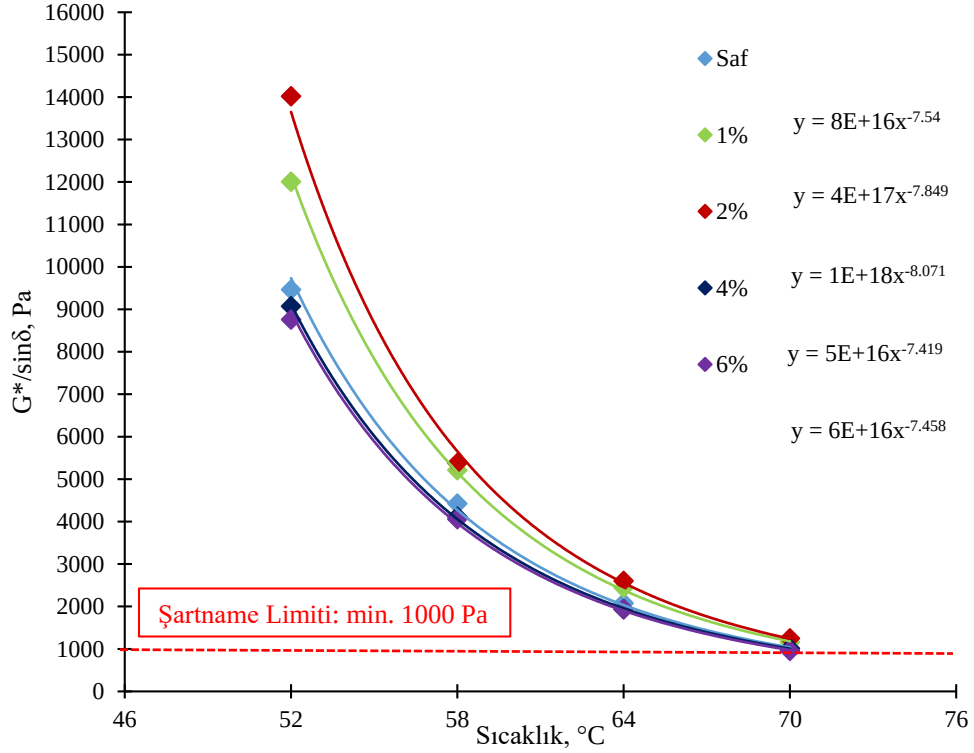
Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Saf	52	9070	73.4	9465	1000 min.
	58	4312	77.11	4423	
	64	2049	80.39	2078	
	70	999	82.75	1007	
%1	52	11201	68.93	12004	
	58	4992	73.33	5211	
	64	2369	75.85	2443	
	70	1128	77.43	1156	
%2	52	13025	68.32	14017	
	58	5090	71.22	5376	
	64	2501	74.1	2601	
	70	1206	75.31	1247	
%4	52	8536	70.19	9073	
	58	3937	73.14	4114	
	64	1870	75.25	1934	
	70	977	75.77	1008	
%6	52	8266	70.67	8760	
	58	3877	72.93	4056	
	64	1867	74.29	1939	
	70	919	74.56	953	



Şekil 3.35 : Saf ve modifiye bağlayıcıların kompleks modül (G*) değerleri



Şekil 3.36 : Saf ve modifiye bağlayıcıların faz açısı değerleri



Şekil 3.37 : Saf ve modifiye bağlayıcılar için tekerlek izi dayanım parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri

Şekil 3.35 incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla tüm bağlayıcı numunelerinde kompleks modül değerlerinin azaldığı görülmüştür. %1 ve %2 katkı kullanımıyla birlikte bu düşüş sınırlandırılmış, saf bağlayıcıya kıyasla her sıcaklıkta daha yüksek kompleks kayma modülü değerleri elde edilmiştir. %4 ve %6 katkı içeriklerinde bu durum tersine dönmüş, saf bağlayıcıdan daha düşük G^* değerleri gözlemlenmiştir. En

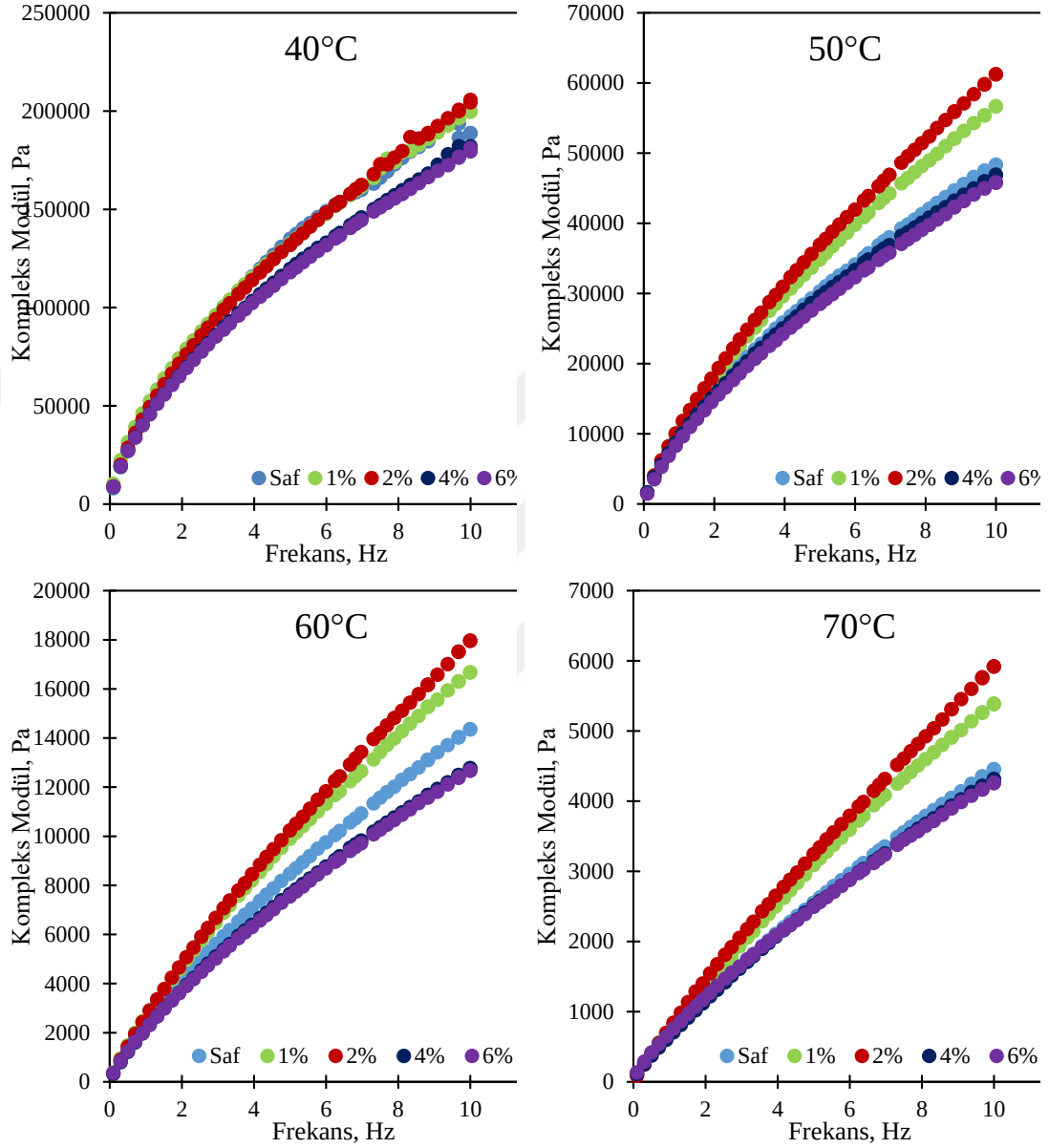
yüksek G^* değerleri %2 katkı içeren bağlayıcıda elde edilmiştir. Faz açısı değerleri incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla faz açısı değerlerinin de arttığı, her sıcaklıkta en yüksek faz açısı değerlerinin saf bağlayıcıda elde edildiği görülmüştür. Kompleks modülün artması ve aynı zamanda faz açısı değerlerinin düşmesi asfalt bağlayıcıların elastik özelliklerinin geliştiği şeklinde yorumlanır. Faz açısı, yük uygulanmasıyla deformasyon oluşumu arasında geçen süreyi temsil eder ve bu değer azalması malzemenin elastikleştiğini gösterir. %1 ve %2 katkı oranlarında G^* değerleri kayda değer miktarda artarken faz açısı değerleri de azalmaktadır. Diğer katkı oranlarında faz açısı değerleri nispeten elastik bir davranışın olduğunu göstermektedir fakat kompleks modül değerlerinde görülen düşük değerler bu performansı sınırlandırmaktadır.

Superpave şartnamesine göre $G^*/\sin\delta$ değerinin 1000 Pa'nın üstünde olması gerekmektedir ve bu değeri son sağlayan sıcaklık bağlayıcının PG'sini göstermektedir. Şekil x ve Tablo x incelendiğinde %6 katkı içeren bağlayıcının 70°C'de 1000 Pa şartını sağlamadığı, diğer tüm bağlayıcıların bu şartı sağladığı görülmektedir. %1 ve %2 katkı oranları özelinde değerlendirme yapılırsa PG açısından herhangi bir olumsuzluk yaşanmadığı belirlenmiştir.

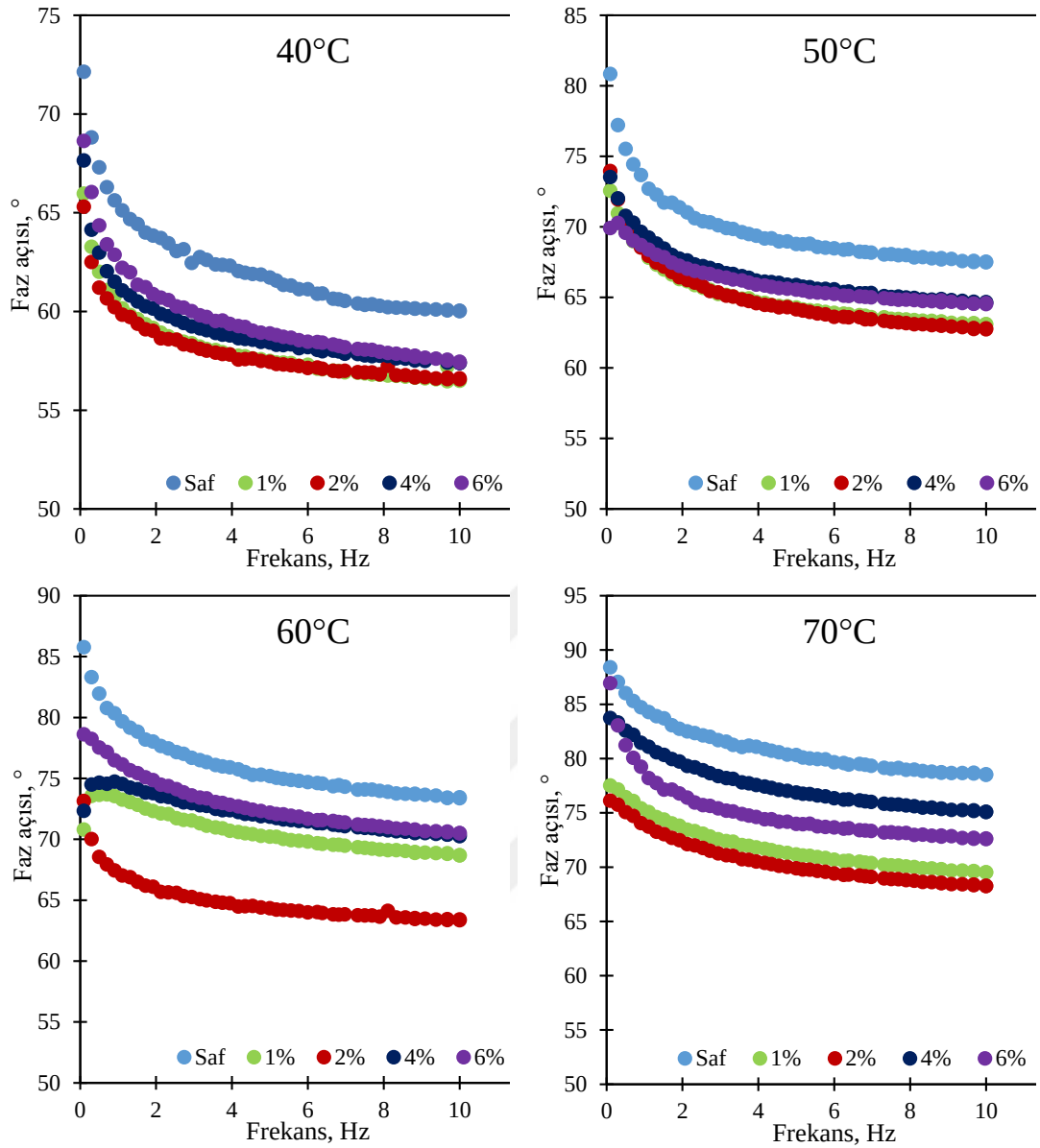
Genel olarak, %1 ve %2 katkı kullanımıyla asfaltın elastik özelliklerinin önemli oranlarda gelişerek tekerlek izi dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. Faz açısı değerlerinin tüm katkı oranlarında saf bağlayıcıdan önemli oranlarda düşük çıkması malzemenin elastikleştiğinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bağlayıcıların PG'lerinde herhangi bir olumsuzluk görülmemiştir. Katkı maddesi yağ içerikli olduğundan bu durum olumlu olarak karşılanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda asfalta yağ ilavesinin yumuşatma etkisine sebep olduğu ve yüksek sıcaklık dayanımı açısından oldukça ciddi problemler doğurduğu bilinmektedir. Bu çalışmanın temel motivasyonu hem yüksek sıcaklık hem de düşük sıcaklık performansını artıracak idealleştirilmiş bir katkı maddesi elde etmek olduğundan DSR sonuçları sevindiricidir. Ayrıca faz açısı değerleri de bunu doğrulamaktadır.

DSR deneyi performans sınıfının belirlenmesi ve genel reolojik karakterizasyon için sabit frekansta gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında asfalt bağlayıcıların farklı sıcaklık ve yükleme hızı (frekans)'lardaki davranışını incelemek amacıyla tüm numuneler 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda, 0.01-10 Hz yükleme hızlarında frekans taraması (frequency sweep) testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar

aşağıda derlenmiştir. Deney çıktıları farklı frekanslarda elde edilmiş G^* ve faz açısı değerleridir. Farklı frekans ve sıcaklıklarda elde edilen kompleks kayma modülü değerleri Şekil 3.38’de, faz açısı değerleri ise Şekil 3.39’da verilmiştir.



Şekil 3.38 : Saf ve modifiye bağlayıcıların 40, 50, 60, 70°C sıcaklıkta ve 0.01-10 Hz frekans aralığında kompleks modül değerleri



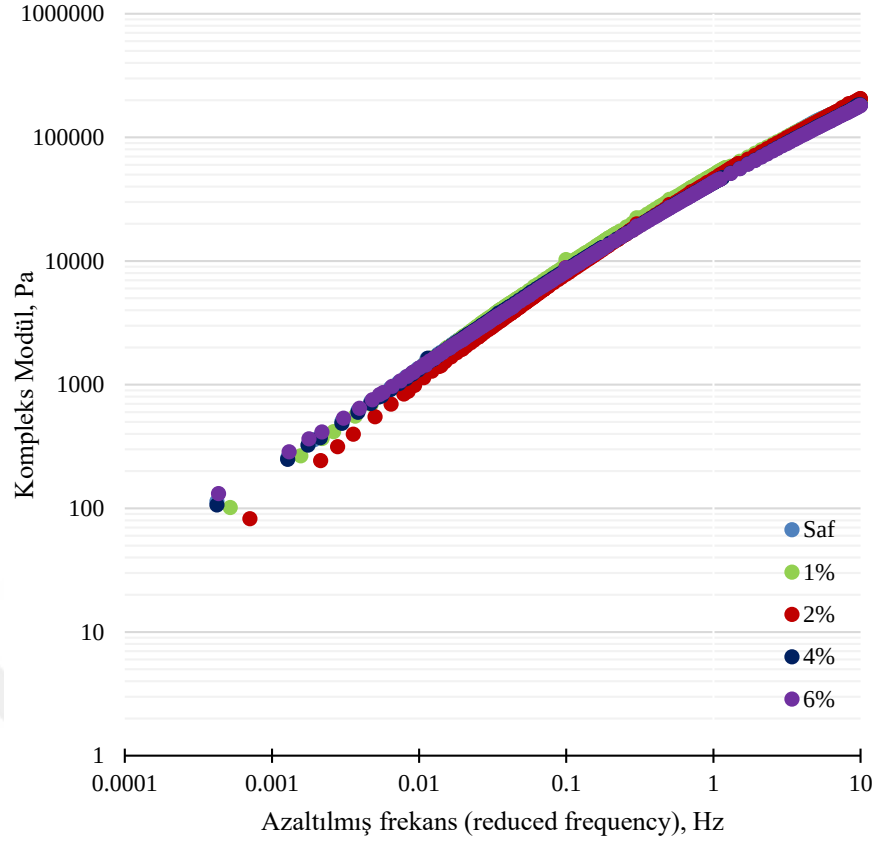
Şekil 3.39 : Saf ve modifiye bağlayıcıların 40, 50, 60, 70°C sıcaklıkta ve 0.01-10 Hz frekans aralığında faz açısı değerleri

Düşük frekans, düşük yükleme hızına bir başka deyişle yüksek yükleme süresine karşılık gelirken, yüksek frekans, yüksek yükleme hızına, bir başka deyişle düşük yükleme süresine karşılık gelir. Asfalt bağlayıcının davranışının viskoelastik özelliği sebebiyle sıcaklık, yükleme hızı, zaman değişkenleriyle birlikte kompleks bir denklem halini almaktadır. Bu sebeple deney yöntemleri bu davranışın aydınlatılmasına paralel olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.38’de 0.01-10 Hz aralığında olmak üzere 10 farklı frekansta ve 4 farklı sıcaklıkta kompleks kayma modülü değerleri verilmiştir. Şekil 3.38 incelendiğinde frekans değerlerinin artmasıyla G^* değerlerinin arttığı görülmektedir. Sıcaklığın artması G^* değerlerinde azalmaya sebep olmuştur. Aynı sıcaklık değerlerinde değerlendirme yapılırsa her sıcaklık değeri için en yüksek G^*

değerleri %2 katkı içeren asfalt bağlayıcıda görülmüştür. Bunu %1 katkılı bağlayıcı takip etmiştir. Her bir frekans değerinde en yüksek G^* değerini %2 katkılı bağlayıcı sunmuştur. Sıcaklık değerlerinin artmasıyla %2 katkılı bağlayıcının davranışı diğer bağlayıcılardan gözle görünür şekilde ayrılmıştır. Bu durum yüksek sıcaklık dayanımı açısından daha performanslı olduğunu göstermektedir.

Faz açısı değerleri incelendiğinde (Şekil 3.39) benzer şekilde her bir sıcaklık ve frekans değerinde en düşük faz açısı değerlerini %2 katkılı asfalt bağlayıcı verirken, en yüksek faz açısı değerlerini saf bağlayıcı vermiştir. %4 ve %6 katkı içeren bağlayıcılar genellikle birbirlerine yakın sonuçlar sunmuştur. Ancak yine de saf asfalttan daha düşük faz açısı değerlerine sahip olmaları, katkı maddesinin elastik davranışı geliştirdiğini göstermektedir.

Farklı sıcaklık ve frekanstaki bu davranışın tek ve basit bir şekilde sunulduğu eğrilere “ana eğri (master curve)” adı verilmektedir. Çeşitli veri manipülasyonları ile elde edilen bu eğriler tüm sıcaklık değerleri için bir referans değer alınarak diğer değerlerin bu sıcaklık değerlerine “kaydırılması” ile elde edilmektedir. Bu sayede tek bir egride reolojik davranış özetlenmektedir. Özellikle katkı maddelerinin asfalt bağlayıcı performansı üzerindeki etkisinin incelendiği durumlarda katkı maddesinin rolünü vurgulamak amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde bu yöntem “time-temperature superposition principle (TTSP)” olarak adlandırılmaktadır. Saf ve modifiye bağlayıcılar için ana eğriler Şekil 3.40’da verilmiştir. Referans sıcaklık 40°C olarak alınmıştır.



Şekil 3.40 : Tüm bağlayıcı tipleri için 40°C referans sıcaklığında ana eğriler (master curve)

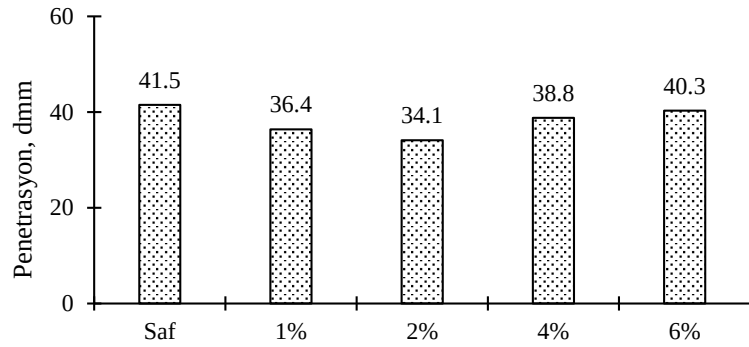
3.7 Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) Sonuçları

RTFO deneyine tabi tutulan asfalt bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, DSR deneyleri tatbik edilmiştir. DSR cihazı kullanılarak standart PG deneyi ve çoklu-gerilme sünme ve toparlanma (MSCR) deneyi uygulanmıştır. MSCR deneyi detaylıca ayrı bir başlık altında incelenecektir. RTFOT öncesi ve sonrası deney sonuçları Çizelge 3.12’te sunulmuştur.

RTFOT sonrası penetrasyon deneyi sonuçları Şekil 3.41’de, yumuşama noktası deneyi sonuçları ise Şekil Şekil 3.42’te verilmiştir.

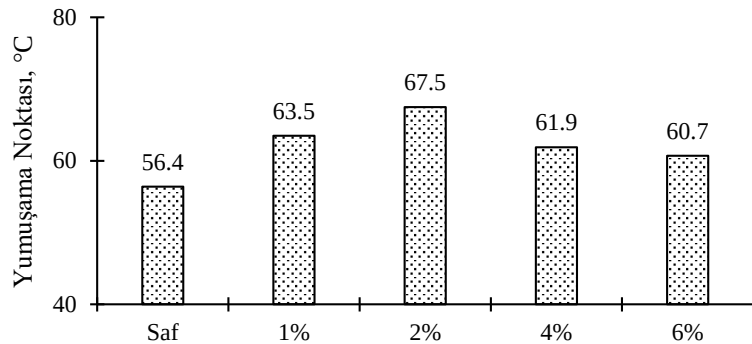
Çizelge 3.12 : RTFOT öncesi ve sonrası verilerin gösterimi

	Saf		%1		%2		%4		%6	
RTFOT	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
Penetrasyon	71.2	41.5	58.5	36.4	55.6	34.1	60.4	38.8	63.1	40.3
Kalıcı Penetrasyon (%)	58.29		62.22		61.33		64.24		63.87	
Yumuşama Noktası	50.2	56.4	57.7	63.5	60.3	67.5	56.4	61.9	55	60.7
ΔS (°C)	6.2		5.8		7.2		5.5		5.7	



Şekil 3.41 : RTFOT sonrası penetrasyon değerleri

Şekil 3.41 incelendiğinde artan katkı oranına bağlı olarak %1 ve %2 oranları için penetrasyon değerlerinin düştüğü, %4 ve %6 oranları için bu düşüşün terse dönerek RTFOT öncesi deney sonuçlarına benzer şekilde elde edildiği görülmektedir. Saf bağlayıcının kalıcı penetrasyon değeri %58.29 iken, %1 katkı oranında %62.22, %2 katkı oranında %61.33, %4 katkı oranında %64.24 ve %6 katkı oranında %63.87 olarak elde edilmiştir. En düşük penetrasyon değeri %2 katkı içeren bağlayıcıda elde edilirken en yüksek değer saf bağlayıcıda görülmüştür.



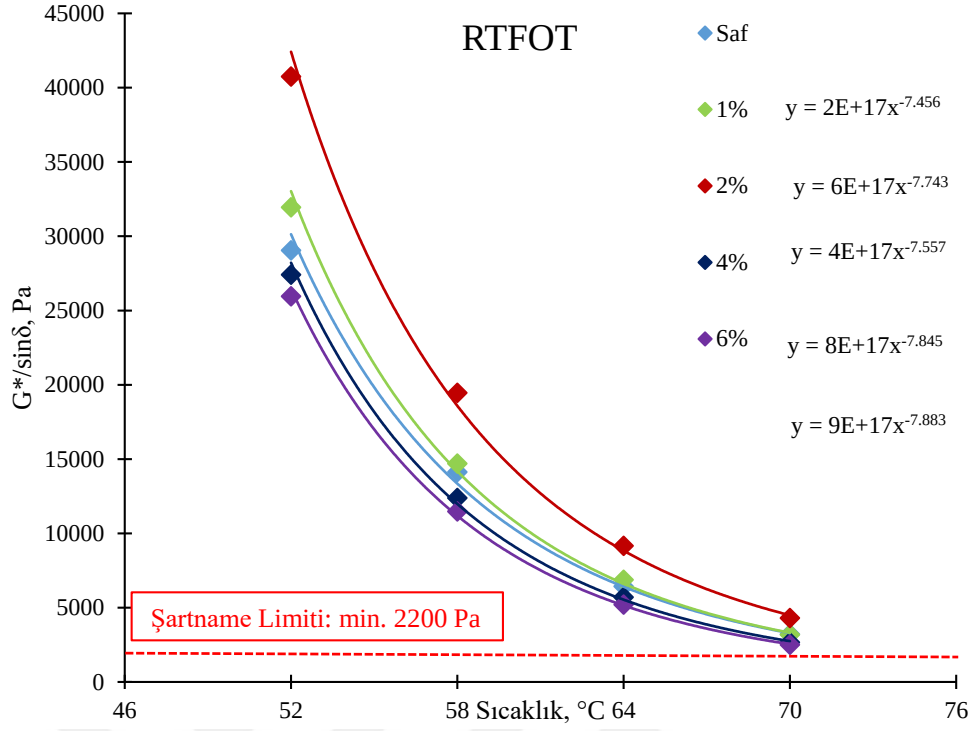
Şekil 3.42 : RTFOT sonrası yumuşama noktası değerleri

Şekil 3.42'e göre %1 ve %2 katkı oranlarında yumuşama noktası değerleri gözle görülür bir şekilde artmış, diğer bağlayıcı numunelerinde de saf asfalta kıyasla daha yüksek yumuşama noktası değerleri elde edilmiştir. Saf bağlayıcıya kıyasla %1 katkı oranında %12.59, %2 katkı oranında %19.68, %4 katkı oranında %9.75, %6 katkı oranında ise %7.62'lik bir artış söz konusudur. Çizelge 3.12'deki ΔS değerleri incelendiğinde yumuşama noktası sıcaklık farklarının saf asfalta göre %2 katkı oranı hariç diğer tüm oranlarda azaldığı görülmektedir. Bu durum oksidatif yaşlanma esnasında asfaltın fonksiyonel gruplarındaki moleküllerin yapısal değişime uğradığını göstermektedir. RTFOT sonrası yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri katkı kullanımının yaşlanmaya karşı direnci artırdığını göstermektedir. Bu durumun katkı maddesinin içerisindeki yağısı kısımdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

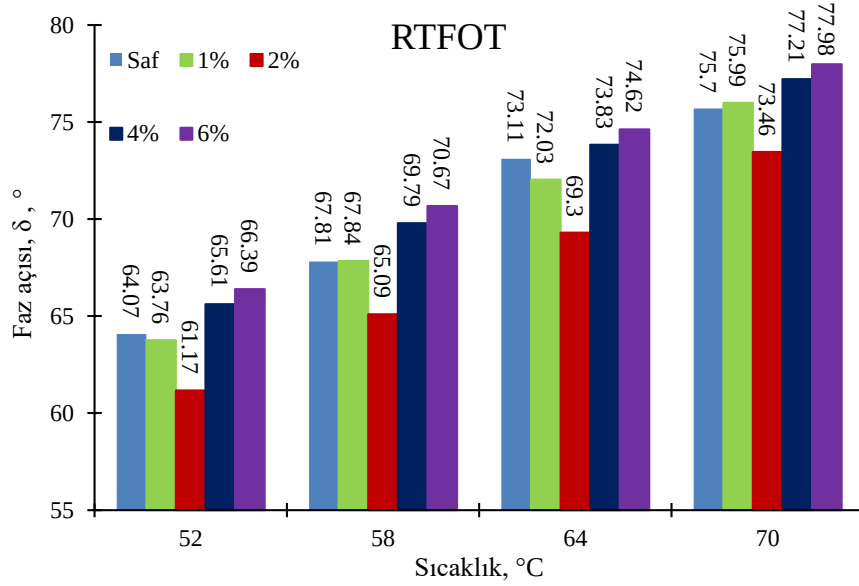
RTFOT sonrası saf ve modifiye asfaltlar üzerinde uygulanan DSR deneyi sonuçları Çizelge 3.14'te verilmiştir. RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri Şekil 3.43'te, faz açısı değerleri ise Şekil 3.44'te verilmiştir.

Çizelge 3.13 : RTFOT sonrası DSR deneyi sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa) (AASHTO T5)
Saf	52	26121	64.07	29045	2200 min.
	58	13076	67.81	14122	
	64	6149	73.11	6427	
	70	3110	75.7	3210	
%1	52	28647	63.76	31939	
	58	13605	67.84	14691	
	64	6534	72.03	6870	
	70	3084	75.99	3179	
%2	52	35698	61.17	40749	
	58	17645	65.09	19455	
	64	8568	69.3	9160	
	70	4122	73.46	4300	
%4	52	24961	65.61	27408	
	58	11615	69.79	12378	
	64	5468	73.83	5694	
	70	2594	77.71	2655	
%6	52	23776	66.39	25949	
	58	10822	70.67	11469	
	64	5018	74.62	5205	
	70	2442	77.98	2497	



Şekil 3.43 : RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri



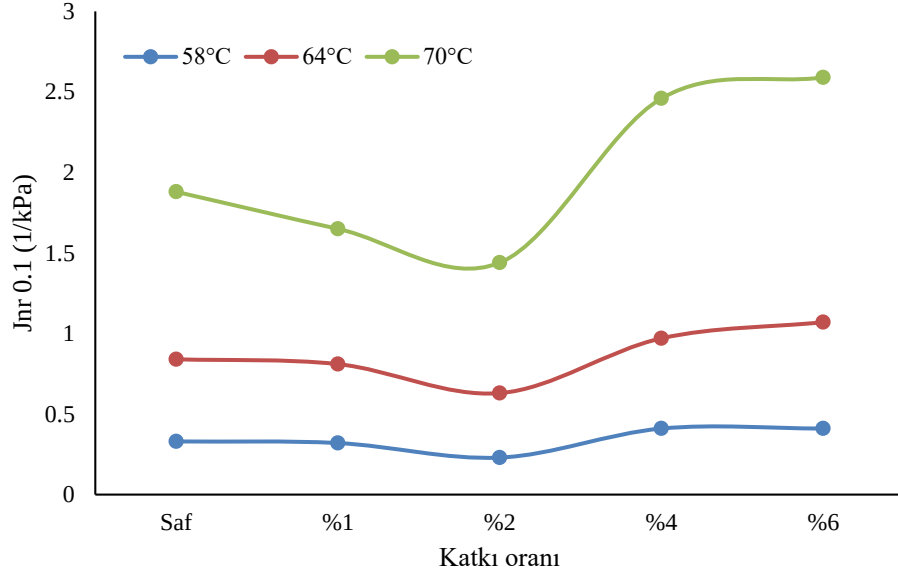
Şekil 3.44 : RTFOT sonrası faz açısı değerleri

Çizelge 3.13 incelendiğinde G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1 ve %2 katkı oranlarında kayda değer miktarda artış göstermiş, %4 ve %6 katkı oranlarında saf bağlayıcıdan daha düşük bulunmuştur. Şekil 3.43 ve Çizelge 3.13te görüldüğü üzere şartname limiti olan minimum 2200 Pa değerini tüm bağlayıcılar 70°C sıcaklıkta sağlamıştır. 70°C sıcaklıkta en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerini %2 bağlayıcısı sunmuştur. Bu

sıcaklıkta saf bağlayıcıya kıyasla %1, 2, 4 ve 6 oranları için sırasıyla %0.97 azalma, %35 artma, %17 azalma ve %22 azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar diğer deney sonuçlarına göre katkı maddesinin kullanımı için belirlenen oranın doğrulanması açısından oldukça ayırt edici olmuştur. Bu durumu açıklamak gerekirse, %2 katkı maddesinin yüksek sıcaklıkta bağlayıcının elastik özelliklerini önemli oranda iyileştirdiği ve yaşlandırma işlemi sonrasında en yüksek tekerlek izi dayanımı değerini sunduğu belirlenmiştir. Şekil 3.44'teki faz açısı değerleri de bunu doğrulamaktadır. Her sıcaklıkta en düşük faz açısı değerlerini %2 katkı oranı sunmuştur. Diğer katkı oranlarında saf bağlayıcıya oldukça yakın sonuçlar elde edilmiş, %4 ve %6 oranda katkı içeren bağlayıcılarda oransal olarak daha fazla yağsı yapının bulunması bağlayıcıyı yumuşatarak yaşlandırma işlemi sırasında malzemenin sertleşmesini önlemektedir. Buna ek olarak, yumuşatmasına rağmen 2.2 kPa'lık şartname limitinin altında da kalınmamıştır. Yağsı yapının varlığı çalışmanın ana amaçlarından olan düşük sıcaklık performansının yükseleceğini işaret etmektedir. Bu durum yaşlanmaya karşı direncin artmasıyla ilişkilendirilebilir.

3.8 Çoklu-Gerilme Sünme ve Toparlanma (MSCR) Deneyi Sonuçları

Metot bölümünde açıklandığı gibi DSR cihazı kullanılarak 0,1 ve 3,2 kPa kesme gerilmesi altında MSCR deneyi gerçekleştirilmiştir. MSCR deneyi, saf ve modifiye bağlayıcıların DSR deneyindeki performans seviyeleri dikkate alınarak 52, 58, 64 ve 70°C olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.45'te saf ve %1, %2, %4, %6 katkı içeren asfalt bağlayıcıların düşük gerilme seviyesinde (0.1 kPa) sünme toparlanma değerlerinin katkı içeriği ile değişimi verilmiştir.

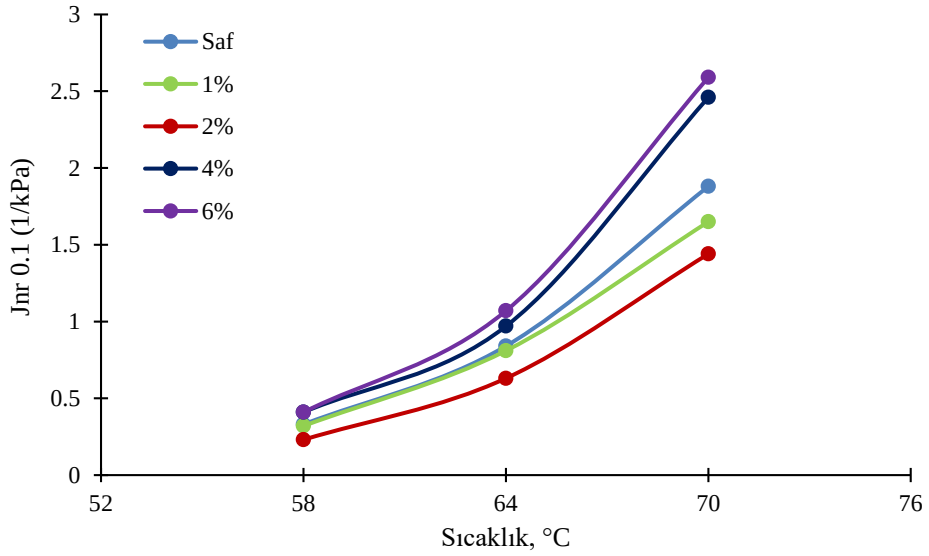


Şekil 3.45 : Katkı oranı ile Jnr0.1 değerleri arasındaki ilişki

Şekil 3.45'e göre katkı içeriğinin %1 ve %2 olduğu asfalt bağlayıcılarda Jnr0.1 değerlerinin azaldığı, %4 ve %6 katkı oranlarında ise saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek Jnr 0.1 değerleri görülmüştür. Her katkı oranı için en yüksek Jnr0.1 değeri 70°C sıcaklıkta görülürken, en düşük Jnr0.1 değeri ise 58°C sıcaklıkta görülmüştür. Özellikle 70°C sıcaklıkta katkı oranlarının rolü daha net görülmüş, %4 ve %6 katkı içeren bağlayıcının nispeten daha olumsuz bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Saf bağlayıcıya kıyasla %1 katkılı bağlayıcının Jnr0.1 değerleri 58°C'de %3.03, 64°C'de %3.57, 70°C'de %12.23 azalmıştır. %2 katkılı bağlayıcının Jnr0.1 değerleri 58°C'de %30.30, 64°C'de %25, 70°C'de %23.40 azalmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere %2 katkılı bağlayıcı saf asfalta kıyasla oldukça düşük Jnr0.1 değerleri sunmuştur. Bu durum, %2 katkılı bağlayıcının düşük gerilmelerde dahi elastik kalibiyetinin arttığını göstermektedir.

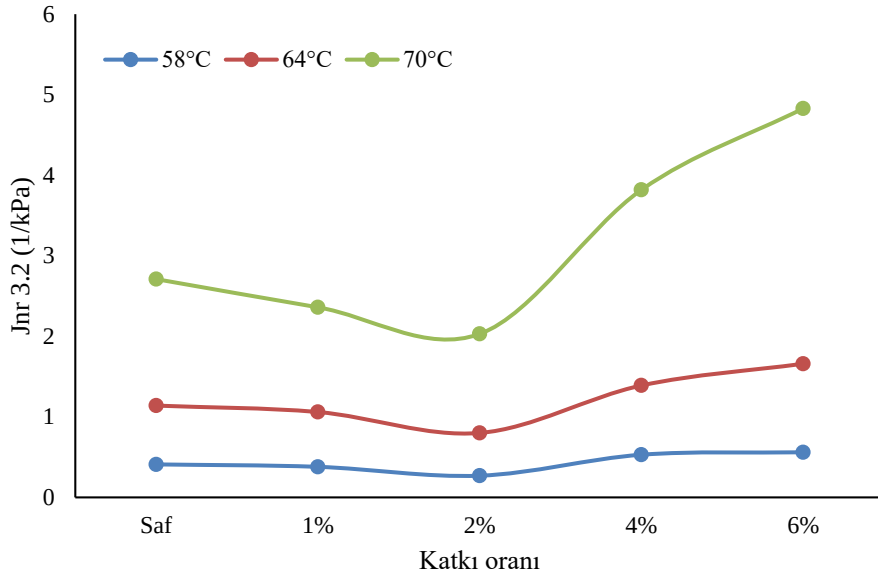
Şekil 3.46'da saf, %1, %2, %4 ve %6 katkılı asfalt bağlayıcıların Jnr0.1 değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir. Sıcaklığın artması durumunda asfalt bağlayıcıların Jnr değerleri artmaktadır. Deney sıcaklığının nispeten daha yüksek olduğu durumda (70°C) bağlayıcıların Jnr0.1 değerlerindeki ayırım derinleşmiştir. Tüm bağlayıcı tipleri incelendiğinde en fazla artış %6 katkı oranında tespit edilmiş, bunu %4 katkı içeren bağlayıcı takip etmiştir. Her sıcaklık değerinde en düşük Jnr0.1 değerlerini %2 katkılı asfalt sunmuştur. %1 ve %2 katkılı asfalt bağlayıcılar saf bağlayıcıya kıyasla her sıcaklık değerinde düşük Jnr0.1 değerleri sunmuş, bu durum

%1 ve %2 katkı içeren bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve düşük gerilme durumunda tekerlek izine karşı daha dayanıklı olacağını göstermektedir.



Şekil 3.46 : Sıcaklık ile Jnr0.1 değerleri arasındaki ilişki

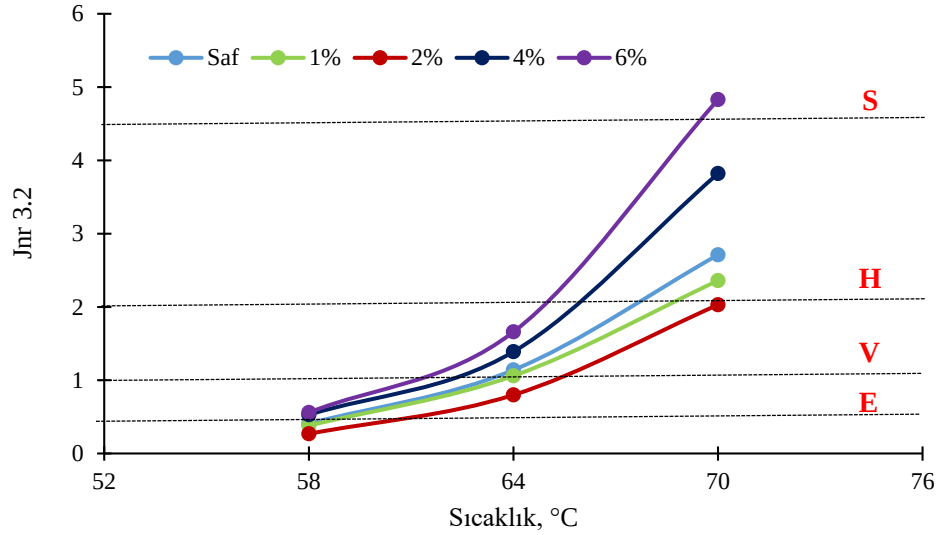
MSCR deneyi kapsamında bağlayıcılar 0.1 kPa gerilme seviyesinde teste tabi tutulduktan sonra 3.2 kPa değerinde, daha yüksek gerilme seviyelerinde teste tabi tutulmaktadır. Tüm bağlayıcı tiplerinin 3.2 kPa yüksek kesme gerilmesinde katkı içeriği bile Jnr değerleri arasındaki ilişki Şekil 3.47’de verilmiştir.



Şekil 3.47 : Katkı oranı ile Jnr3.2 değerleri arasındaki ilişki

Şekil 3.47 incelendiğinde Jnr0.1 değerlerine kıyasla Jnr3.2 değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Jnr3.2 değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1 ve %2 katkı

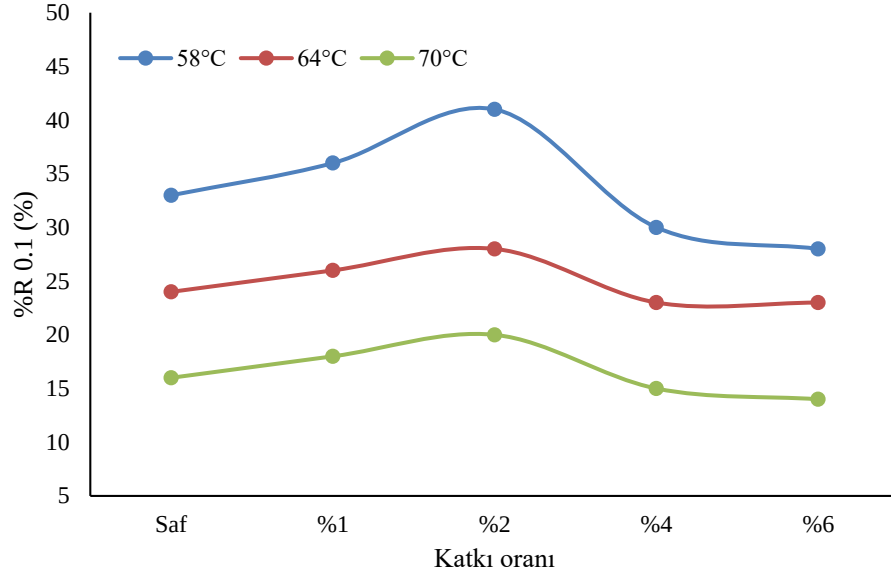
içeriklerinde azalırken, %4 ve %6 katkı oranlarında bu değerler artmıştır. Özellikle 70°C sıcaklıkta %4 ve %6 katkı oranlarında bu değerler diğer sıcaklıklardaki değerlerden oldukça farklılaşmıştır. Bu durum %4 ve %6 katkı oranlarında istenilen tekerlek izi performansının sağlanmayacağını gösterebilir. Katkı oranının sağlamış olduğu performans farklılıkları açığa çıkarılmak istenirse, düşük sıcaklıklarda katkı oranı Jnr değerleri üzerinde pek fazla etkili olmazken, yüksek sıcaklıklarda katkı oranının rolü daha net açığa çıkmaktadır. Testin yapıldığı en yüksek sıcaklık olan 70°C’de en düşük Jnr3.2 değerini %2 katkı içeren bağlayıcı sunmuş, bu değer saf bağlayıcıya kıyasla %25.09 daha az olarak tespit edilmiştir. Jnr3.2 değeri MSCR testi ile bağlayıcıların performans karakterizasyonunda oldukça önemli bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.48’te bağlayıcıların Jnr3.2 değerleri ve buna bağlı olarak performans seviyelerini gösteren limit değerleri sunulmuştur.



Şekil 3.48 : Jnr3.2 değerlerinin sıcaklık ile değişimi ve sınır değerlerin gösterimi

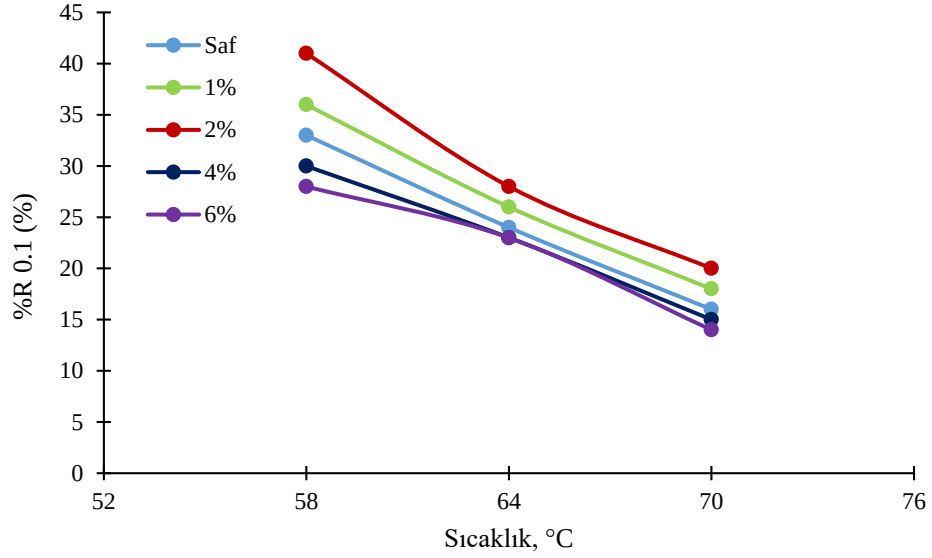
Şekil 3.48 incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla birlikte diğer sonuçlara benzer olarak Jnr3.2 değerlerinin arttığı görülmüştür. Her sıcaklık değerinde en düşük Jnr değerleri %2 katkılı bağlayıcıda, en yüksek Jnr değerleri ise %6 katkılı bağlayıcıda görülmüştür. Ayrıca Şekil 3.48’de hacim ve ağırlıktaki trafiği taşıma kabiliyetlerinin bir sınıflandırması olan MSCR harflendirme sistemine göre değerlendirme kriterleri işaretlenmiştir. Sonuçlara göre, 70°C sıcaklıkta %6 katkılı bağlayıcının standart trafiği ifade eden “S” sınıfına dahi sahip olamadığı, saf, %1 ve %4 bağlayıcılarının ise “S” sınıfına dahil oldukları belirlenmiştir. Bağlayıcıların PG’si olan 70°C sıcaklıkta %2 katkılı bağlayıcı ağır trafiği temsil eden “H” sınıfına girmiştir. Bu durum %2 katkılı bağlayıcı ile hazırlanan asfalt kaplamaların tekerlek izine karşı diğer bağlayıcı tiplerine

kıyasla daha mukavemetli olacağını göstermektedir. 70°C sıcaklıkta hiçbir bağlayıcı çok ağır trafik ve oldukça ağır trafik sınıfı olan “V ve E” sınıflarına dahil olamamıştır. Bir alt sıcaklık değeri olan 64°C sıcaklıkta ise %2 katkılı bağlayıcı “V” sınıfına dahil olmuştur. 58°C sıcaklıkta saf, %1 ve %2 bağlayıcıları “E” sınıfına dahil olmuşlardır. Ancak bu sıcaklıkta %4 ve %6 katkı oranına sahip bağlayıcılar “E” sınıfına dahil olamamışlardır.



Şekil 3.49 : 0.1 kPa gerilme seviyesinde katkı içeriği ile %R değerlerinin ilişkisi

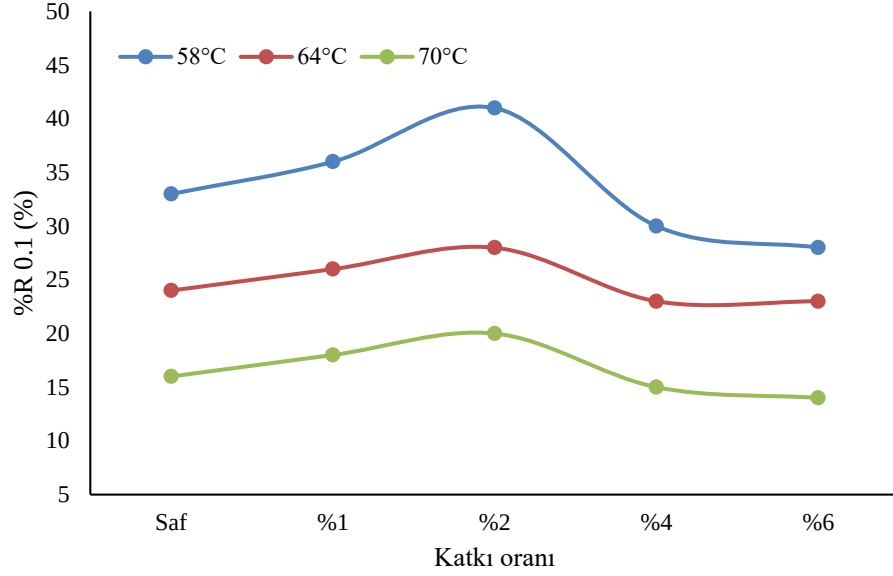
Şekil 3.49’da saf ve modifiyeli bağlayıcıların 0.1 kPa gerilme seviyesinde elastik geri dönme değerlerinin katkı oranı ile ilişkisi sunulmuştur. Elastik geri dönme (%R) değerleri katkı içeriği %2 olana kadar artmış, bu orandan sonra tersine bir düşüş meydana gelmiştir. Elastik geri dönme değerlerinin artması istenen bir durumdur. Şekil 3.50’de 0.1 kPa gerilme seviyesinde %R değerleri ile sıcaklık arasındaki ilişki sunulmuştur.



Şekil 3.50 : 0.1 kPa gerilme seviyesinde sıcaklık ile %R değerlerinin ilişkisi

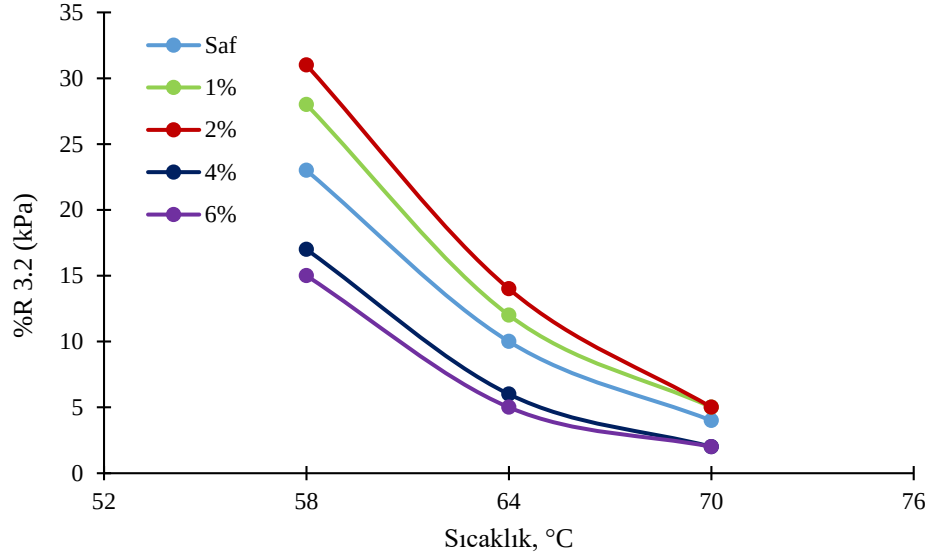
Şekil 3.50 incelendiğinde sıcaklığın artması durumunda esneklik kabiliyeti en yüksek bağlayıcıların %1 ve %2 olduğu görülmektedir. %6 katkı içeren bağlayıcı her bir sıcaklık değerinde en düşük %R değerlerini sunmuştur. 58°C sıcaklıkta %R_{0.1} değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1, %2, %4 ve %6 bağlayıcıları için sırasıyla %9.09 artmış, %24.24 artmış, %9 azalmış ve %15.15 azalmıştır. 64°C sıcaklıkta ise %R_{0.1} değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1, %2, %4 ve %6 bağlayıcıları için sırasıyla %8.33 artmış, %16.67 artmış, diğer bağlayıcılar için %4.17 azalmıştır. 70°C sıcaklıkta %R_{0.1} değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1, %2, %4 ve %6 bağlayıcıları için sırasıyla %12.50 artmış, %25 artmış, %6.25 azalmış ve %12.50 azalmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde özellikle %1 ve %2 katkı oranlarında yüksek sıcaklıkta %R değerlerindeki artışın da fazla olması malzemenin yüksek sıcaklıklarda elastik yeteneklerini başarıyla koruyabileceğini ve bu sayede kalıcı deformasyonlara karşı daha dayanıklı olabileceğini göstermektedir.

Saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa kesme gerilmesi altındaki %R değerlerinin (%R_{3.2}) katkı içeriği ile değişimi Şekil 3.51’de verilmiştir. Gerilmenin 3.2 kPa seviyesine çıkmasıyla J_{nr} değerlerinin aksine %R değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kesme gerilmesinin artmasıyla bağlayıcıların elastik geri dönme değerlerinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.51 : 3.2 kPa gerilme seviyesinde katkı içeriği ile %R değerlerinin ilişkisi

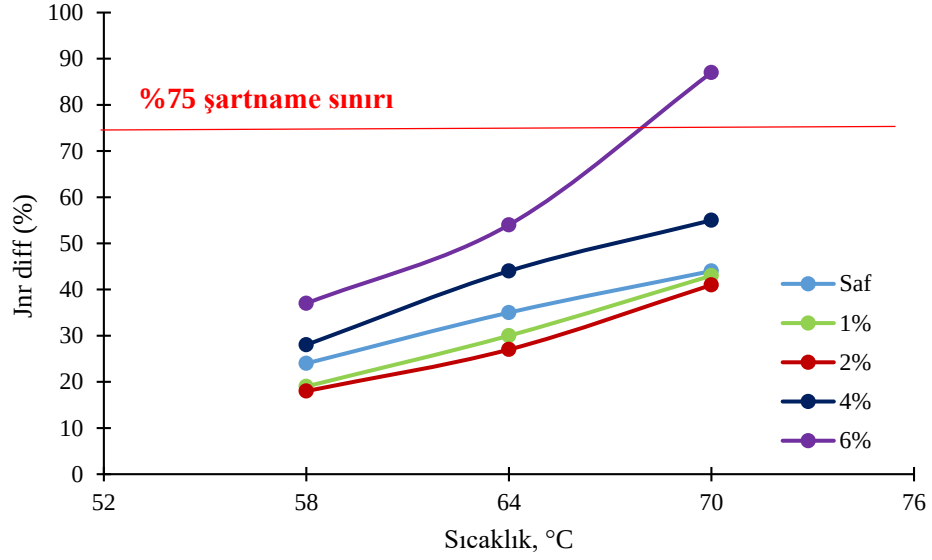
Şekil 3.51 incelendiğinde yüksek gerilmelerde katkı oranının %2 olmasının daha etkili olduğu, %2 katkı oranında her sıcaklık değerinde en yüksek %R değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Yukarıda da bahsedildiği gibi gerilmenin artmasıyla elastiklik değerleri azalmaktadır. Saf bağlayıcı için %R değeri 58°C sıcaklıkta 0.1 kPa gerilme seviyesinde %33 iken, 3.2 kPa gerilme seviyesinde bu değer %23 olmuştur. 64°C sıcaklıkta ise %24'ten %10'a düşen bir elastik geri dönme oranı söz konusudur. 70°C sıcaklıkta bu düşüş iyice derinleşerek %16'dan %4'e gerilemiştir. Gerilme seviyesinin artması sonucu düşüş gözlenen %R değerleri diğer bağlayıcı türleri olan %1, %2, %4 ve %6 için sırasıyla 58°C sıcaklıkta %36'dan %28'e, %41'den %31'e, %30'dan %17'ye, %28'den %15'e gerilemiştir. 64°C sıcaklıkta ise %26'dan %12'ye, %28'den %14'e, %23'den %6'ya ve %23'ten %5'e gerilemiştir. 70°C sıcaklıkta düşüşler iyice derinleşmiş, bu durum gerilme seviyesinin artmasına ek olarak sıcaklığın da artmasına atfedilmiştir. 70°C sıcaklıkta %18'den %5'e, %20'den %5'e, %15'ten %2'ye, %14'ten %2'ye gerilemiştir. %4 ve %6 katkı oranlarında bu düşüşlerin miktarı diğer bağlayıcılara kıyasla oldukça fazladır. Şekil 3.52'de saf ve modifiye bağlayıcıların 3.2 kPa gerilme seviyesinde elde edilen %R derğerlerinin sıcaklık ile birlikte değişimi sunulmuştur.



Şekil 3.52 : 3.2 kPa gerilme seviyesinde sıcaklık ile %R değerlerinin ilişkisi

Şekil 3.52'ye bakıldığında %R değerlerinin sıcaklık ile birlikte düzenli olarak azaldığı görülmektedir. Her bir sıcaklık değerinde en yüksek %R değerlerinin %2 katkı oranında elde edildiği, buna karşılık en düşük %R değerlerinin ise %6 katkı oranında elde edildiği tespit edilmiştir. Sıcaklık değerinin 58°C'den 70°C'ye yükselmesiyle saf, %1, %2, %4 ve %6 bağlayıcıları esnekliklerinin sırasıyla %82.61'ini, %83.87'sini, %82.14'ünü, %88.24'ünü ve %86.67'sini kaybetmişlerdir. Esnekliğini en az oranda kaybeden bağlayıcı %2 katkı içeren bağlayıcıdır. Düşük gerilme seviyesinde olduğu gibi yüksek gerilme seviyesinde %1 ve %2 oranında katkı içeren bağlayıcılar sıcaklığın artmasına karşılık esnekliklerini daha iyi bir şekilde koruyabilmektedir.

MSCR değerlendirme sisteminin en önemli parametrelerinden birisi Jnrdiff değeridir. Jnrdiff değeri metodolojide de anlatıldığı üzere 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme toparlanmaları arasındaki farktır ve bu farkın %75'ten büyük olması durumunda ilgili bağlayıcının tekerlek izi bozulması davranışı sergileme ihtimali oldukça yüksektir. Bir başka deyişle Jnrdiff değeri %75'ten fazla ise tekerlek izine karşı hassas bir bağlayıcıdır denebilir. Şekil 3.53'te saf ve modifiye bağlayıcıların Jnrdiff değerleri sunulmuştur.



Şekil 3.53 : Jnr diff değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Şekil 3.53 incelendiğinde şartname sınırı olarak kabul edilen %75'lik değerin yalnızca 70°C sıcaklıkta %6 katkı içeren asfalt bağlayıcıda görüldüğü belirlenmiştir. En düşük Jnr diff değerleri her sıcaklık değerinde %2 katkılı asfalt bağlayıcıda tespit edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm bağlayıcı tiplerinde Jnr diff değerleri artmıştır. Jnr diff değerleri incelendiğinde bir istisna hariç tüm bağlayıcıların %75'lik kriteri sağlaması sevindiricidir. %6 katkı oranında 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyeleri arasındaki davranış farkının daha derin olmasından dolayı bu kriteri sağlamadığı düşünülmektedir. MSCR yöntemine göre bağlayıcıların performans seviyeleri Çizelge 3.14'te verilmiştir. Jnr diff değerleri DSR deneyi ile belirlenen AASHTO T315 PG sıcaklığındaki değer olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.14 : Saf ve modifiye bağlayıcıların MSCR deney sonuçları

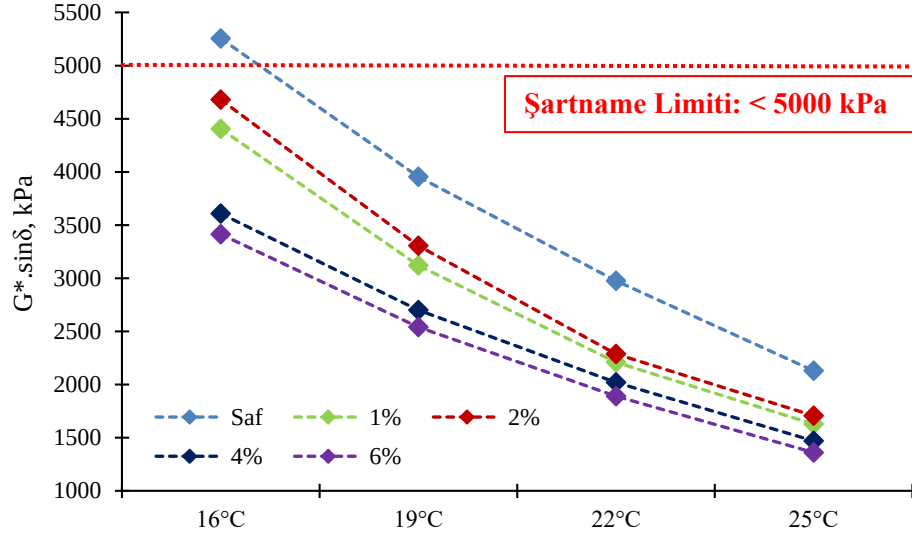
Bağlayıcı tipi	Sıcaklık, °C	AASHTO T315		AASHTO T350	
		PG		Jnr _{diff}	PG
Saf	58	70		24	58-E
	64			35	64-H
	70			44	70-S
%1	58	70		19	58-E
	64			30	64-H
	70			43	70-S
%2	58	70		18	58-E
	64			27	64-V
	70			41	70-H
%4	58	70		28	58-V
	64			44	64-H
	70			55	70-S
%6	58	64		37	58-V
	64			54	64-H
	70			87	-

3.9 Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi Sonuçları

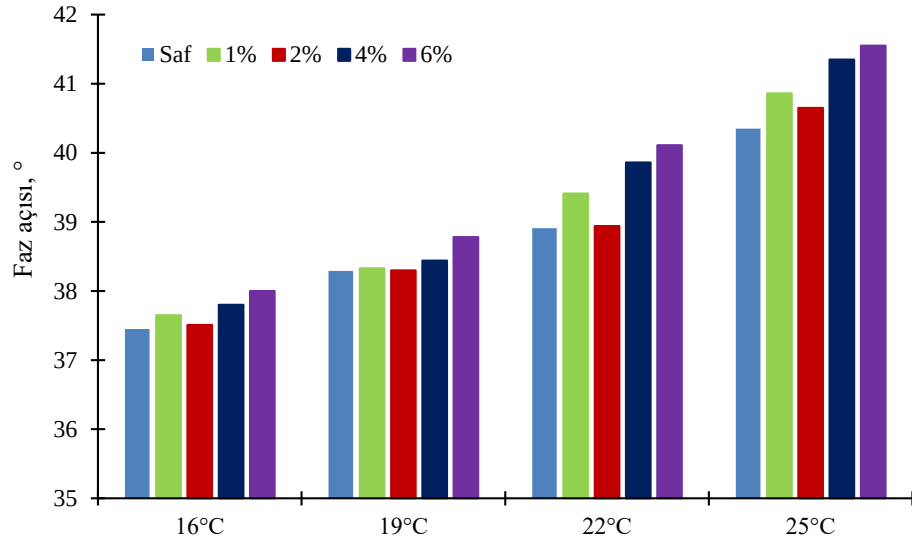
Deneyisel çalışma kapsamında RTFOT ile kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulan asfalt bağlayıcı numuneleri daha sonra PAV deneyine tabi tutulmuştur. PAV deneyi uzun dönem yaşlanma sürecini simüle etmektedir ve PAV numuneleri üzerinde DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. BBR deneyi sonuçları bir sonraki başlıkta incelenecektir. PAV deneyi sonrası saf ve modifiyeli bağlayıcıların DSR deney verileri Çizelge 3.15’te sunulmuştur. Deney sonuçları grafik olarak Şekil 3.54-3.55’te verilmiştir.

Çizelge 3.15 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye bağlayıcıların DSR deneyi sonuçları

Numune Adı	Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*.sin δ (kPa)	Şartname Limiti (kPa) (AASHTO T5)
Saf	16	8599	37.45	5256	<5000 kPa
	19	6383	38.29	3955	
	22	4738	38.91	2976	
	25	3290	40.35	2130	
%1	16	7211	37.65	4405	%2
	19	5031	38.33	3120	
	22	3481	39.41	2210	
	25	2488	40.86	1628	
%2	16	7696	37.51	4680	%4
	19	5358	38.3	3306	
	22	3625	38.94	2287	
	25	2619	40.65	1706	
%4	16	5887	37.8	3608	%6
	19	4343	38.44	2700	
	22	3152	39.86	2020	
	25	2225	41.35	1470	
%6	16	5451	38	3414	
	19	4055	38.78	2540	
	22	2934	40.11	1890	
	25	2050	41.55	1360	



Şekil 3.54 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye bağlayıcıların $G^*.sin\delta$ değerleri



Şekil 3.55 : PAV deneyi sonrası saf ve modifiye bağlayıcıların faz açısı değerleri

DSR deneyi sonucunda incelenen ve asfaltın performansı hakkında nihai bilgiyi bizlere sunan parametre $G^*.sin\delta$ değeridir. Bu değer, uzun vadeli yaşlandırılmış numunelere uygulandığından kaplamanın yorulma performansı ile ilişkilendirilir. Yorulma ile ilişkilendirilmesi açıklanacak olursa: Kaplamaya gelen yükleri çatlak oluşturmadan taşıyabilmek için daha yumuşak elastik bir bağlayıcıya ihtiyaç duyulur. Bunun için DSR sonuçlarından G^* 've faz açısının azaltılması gerekmektedir. Bu sebeple bu iki değerın çarpımı yorulmaya işaret eder. Superpave asfalt bağlayıcı şartnamesine göre $G^*.sin\delta$ değerinin 5000 kPa'dan düşük olması gerekmektedir. Çizelge 3.15 incelendiğinde her sıcaklıkta saf bağlayıcının G^* değerlerinin diğer tüm

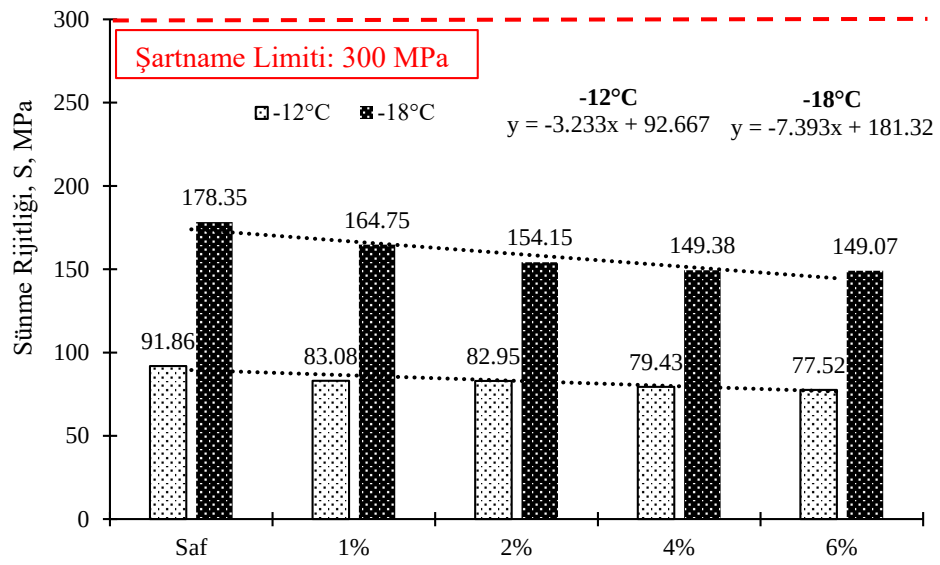
katkı oranlarından daha yüksek çıktığı görülmüştür. Katkı kullanımı ile birlikte yaşlandırılmış bağlayıcıların nispeten düşük sıcaklıklarda daha yumuşak olduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 3.55'te verilen faz açısı değerlerinden de anlaşılmaktadır. Şekil 3.55 incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla tüm bağlayıcıların faz açısı değerlerinin arttığı, saf asfalta kıyasla %2 katkı içeriğinde daha düşük veya yakın faz açısı değerleri elde edildiği görülmektedir. Diğer katkı oranlarında faz açısı değerleri saf asfalta kıyasla oldukça yüksektir. Diğer katkı oranlarında G^* değeri saf bağlayıcıya kıyasla daha düşüktür fakat faz açısı değerleri için aynı şey söylenememektedir. Şekil 3.54'te Superpave yorulma kriteri olan $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri verilmiştir. 16°C'de saf bağlayıcı 5000 kPa'lık şartname limitini sağlayamamıştır. Ancak diğer tüm katkı oranları bu değerin altında kalarak şartname limitlerini sağlamıştır. Her sıcaklık değerinde en yüksek $G^* / \sin \delta$ değerini saf bağlayıcı sunarken, en düşük sonuçlar %6 katkı içeren bağlayıcıda elde edilmiştir. Tüm modifiye bağlayıcıların daha düşük $G^* \cdot \sin \delta$ değeri sunması, katkı maddesinin asfalt bağlayıcıyı yumuşatarak yaşlanma direncini artırdığını göstermektedir. Ancak, bu yumuşatma etkisi sınırlandırılmalıdır. %2 katkı oranında bu yumuşama etkisi sınırlandırılmış, $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri diğer tüm bağlayıcılardan daha yüksek elde edilmiş ve en önemlisi saf bağlayıcıya oldukça yakın ya da nispeten daha düşük faz açısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum %2 katkı oranında malzemenin gevrek kırılmalara sebebiyet vermeden gelen yükleri karşılayabileceğini, yorulma performansının arttığını ve yaşlanmaya karşı direncinin geliştiğini göstermektedir.

3.10 Kiriş Eğilme Reometresi (BBR) Deneyi Sonuçları

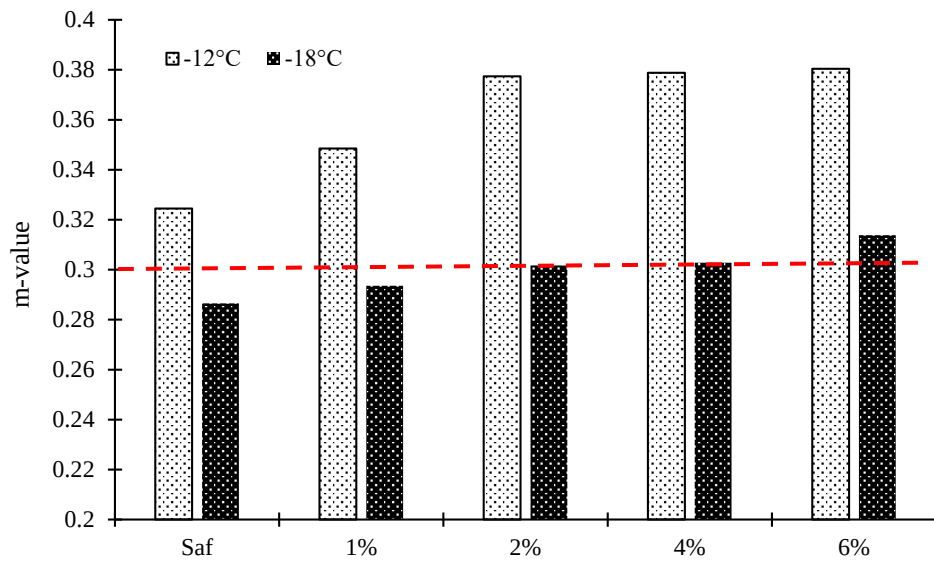
PAV deneyine tabi tutulan saf ve modifiyeli asfalt bağlayıcılara AASHTO TP1 standardına bağlı kalınarak BBR deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda sünme rijitliği (S) ve sünme oranı (m-value) değerleri elde edilmektedir. BBR deneyi -12°C ve -18°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. BBR deneyi sonuçları Çizelge 3.16'da verilmiştir. Sünme rijitliği (S), sünme oranı (m-value) ve bu iki değer birbirine bölümünden elde edilen lamda (λ) değerleri Şekil 3.56-3.58'de sunulmuştur.

Çizelge 3.16 : BBR deneyi sonuçları

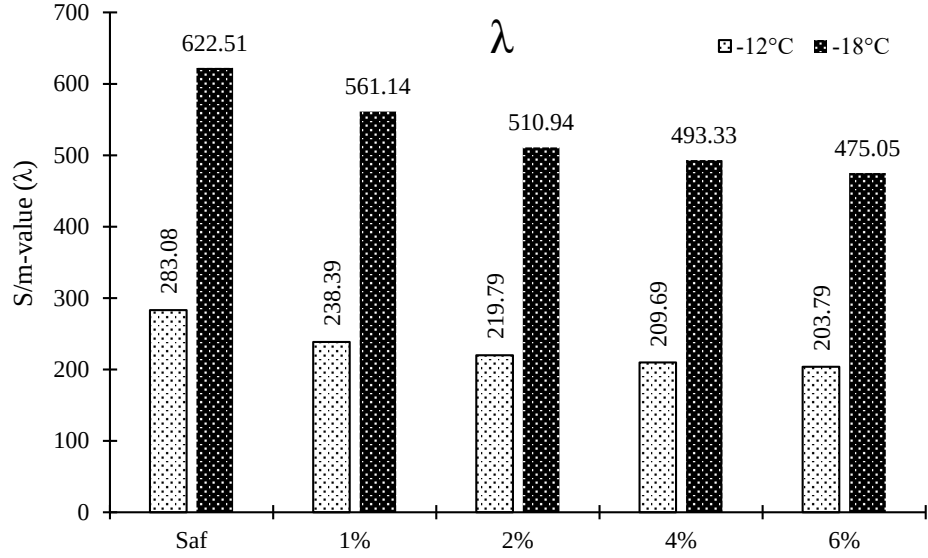
Bağlayıcı	Sıcaklık (°C)	Sünme Rijitliği, S (MPa), ≤ 300	Sünme oranı, m-value, ≥ 0.3	S/m= λ (lamda)
Saf	-12	91.86	0.3245	283.08
	-18	178.35	0.2865	622.51
%1	-12	83.08	0.3485	238.39
	-18	164.75	0.2936	561.14
%2	-12	82.95	0.3774	219.79
	-18	154.15	0.3017	510.94
%4	-12	79.43	0.3788	209.69
	-18	149.38	0.3028	493.33
%6	-12	77.52	0.3804	203.79
	-18	149.07	0.3138	475.05



Şekil 3.56 : Sünme rijitliği (S) değerleri



Şekil 3.57 : Sünme oranı (m-value) değerleri



Şekil 3.58 : Sünme oranı (m-value) değerleri

Düşük sıcaklıklarda esnek kaplamaların mümkün olduğunda “yumuşak/esnek” davranması istenir. Bu sebeple Superpave bağlayıcı şartnamesinde sünme rijitliği değerinin (S) 300 MPa’dan yüksek olmaması gerekmektedir. S değerinin 300 MPa’dan yüksek olması durumunda gevrek kırılmaların oluşması ve dolayısıyla çatlak oluşumunun hızlanması kaçınılmazdır. Benzer şekilde sünme oranı (m-value) değerinin en az 0.3 olması gerekmektedir. “m” değeri düşük sıcaklık sünme eğrisinin eğimini ifade eder ve bu eğimin artması asfaltın sertliğinin azalması anlamına gelir. λ değeri, sünme rijitliği ve m-value’nin dengesiz veya tutarsız olması gibi durumlarda verilerin regülasyonunu sağlar. Bu değer S/m formülasyonu ile elde edilir ve bu iki değer oranlanması sayesinde düşük sıcaklık performansı hakkında daha net bilgi sahibi olunabilir. Asfalt bağlayıcının düşük sıcaklık performansının geliştiği λ değerinin düşük olması ile ilişkilendirilebilir.

Şekil 3.56 incelendiğinde sıcaklık değerlerinin azalmasıyla bağlayıcıların rijitlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Sıcaklığın düşmesi asfalt bağlayıcıyı daha da rijitleştirerek gevrek kırılmalara karşı daha savunmasız hale getirmektedir. Şekil 3.56’ya göre her iki sıcaklıkta da en yüksek sünme rijitliği değerinin saf bağlayıcıda elde edildiği görülmektedir. Bu durumda -12°C ve -18°C sıcaklıkta en sert bağlayıcının saf bağlayıcı olduğu söylenebilir. Katkı oranının artmasıyla birlikte S değerlerinde düzenli bir azalma söz konusudur. Katkı maddesi asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda esneklik özelliğini kaybetmesini engellemiş ve çatlak oluşumuna karşı dayanımını artırmıştır. Bu durumun, katkı maddesi içerisindeki yağsı kısımdan

kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkı oranının artmasıyla rijitlik değerlerinin düşmesi de bunu doğrulamaktadır. Superpave şartnamesinde belirtilen 300 MPa'lık sınır değer için hiçbir bağlayıcıda olumsuz bir durum görülmemiştir. Tüm bağlayıcı numuneleri şartname değerini sağlamıştır. -12°C'de S değerleri saf bağlayıcıya kıyasla %1, %2, %4 ve %6 katkı içeren bağlayıcılar için sırasıyla, %9.56, %9.70, %13.53 ve %15.61 oranlarında azalmıştır. -18°C sıcaklıkta ise %7.63, %13.57, %16.24 ve %16.42 oranlarında azalmıştır.

Şekil 3.57'te "m" değerleri verilmiştir. "m" değerinin artması asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda sertliğinin azalarak gevrek kırılmalara daha az müsaade edeceğini göstermektedir. Şekil 3.57 incelendiğinde en düşük m değerlerinin her iki sıcaklık değerinde de saf bağlayıcıda elde edildiği görülmektedir. Katkı kullanımı ile birlikte m değerlerinin düzenli bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu durumda katkı maddesinin düşük sıcaklık performansını kayda değer miktarda artırdığı söylenebilir. Sıcaklık değerinin artmasıyla m değerleri azalmıştır. Superpave şartnamesinde m değerinin 0.30'dan yüksek olması istenmektedir. Şekil 3.57 incelendiğinde -12°C sıcaklıkta tüm bağlayıcı numunelerinin 0.30'dan yüksek m değerleri sunarak şartname kriterini sağladığı görülmektedir. -18°C sıcaklıkta ise saf ve %1 katkı içeren bağlayıcının 0.30'dan daha düşük m değeri sunduğu ve şartname kriterlerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Diğer tüm katkı oranlarında yüksek m değerleri elde edilmiştir. λ değeri, S ve m değerlerindeki dalgalanmalar veya tutarsızlıkları önlemek amacıyla ortaya atılmış bir orandır. Şekil 3.58 incelendiğinde S ve m değerlerine benzer sonuçlar elde edilmiş, katkı kullanımı ile birlikte λ değerlerinde düzenli bir azalma görülmüştür. Bu sonuçlar da katkı maddesinin asfalt bağlayıcının düşük sıcaklık dayanımını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak BBR deneyi sonuçları incelendiğinde katkı maddesinin düşük sıcaklık performansını önemli oranlarda iyileştirdiği, en rijit ve kırılğan bağlayıcının saf asfalt olduğu ve katkı kullanımıyla bu iyileşmenin düzenli olarak arttığı görülmüştür. Katkı maddesinin içerisindeki yağsı kısmının düşük sıcaklık performansını artırdığı düşünülmektedir. Daha önce yapılan asfalt bağlayıcı performans deneyleri ile birlikte değerlendirildiğinde, %1 ve %2 katkı oranının yüksek sıcaklık dayanımını artırmasına rağmen düşük sıcaklıklarda saf bağlayıcıya kıyasla daha olumlu sonuçlar sunduğu belirlenmiştir. Ancak, -18°C sıcaklıkta %1 katkı içeren bağlayıcı şartname kriterlerini sağlayamamıştır. Tüm asfalt bağlayıcı performans deneyleri birlikte değerlendirilirse

%2 katkı oranının en ideal oran olduğu rahatlıkla söylenebilir. %2 katkı içeren bağlayıcı yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi dayanımını önemli oranda artırarak kalıcı deformasyon dayanımı sağlamış, buna ek olarak düşük sıcaklıklarda malzemenin gereğinden fazla rijitleşmesini engelleyerek gevrek kırılmalara, çatlamalara karşı mukavemetli hale getirmiştir. Bu açıdan bakıldığında %2 oranında katkı ilavesinin oldukça idealleştirilmiş bir asfalt bağlayıcı sunarak ülkemiz iklim koşulları için istenen performansı sunacağı düşünülmektedir. Sentezlenen katkı, yaz aylarında meydana gelebilecek kalıcı deformasyonlara karşı kaplamayı güçlendirecek, kış aylarında meydana gelebilecek çatlak oluşumlarına karşı kaplamayı esnek kimliğinden uzaklaştırmayacak bir katkı maddesi olarak nitelendirilebilir.

3.11 Nicholson Soyulma Deneyi Sonuçları

Karışımlarda kullanılan bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyonun su etkisindeki değişimini incelemek amacıyla Nicholson soyulma deneyi yapılmıştır. Deney kapsamında saf, %1, %2, %4 ve %6 katkı içeren bağlayıcılar ile 100 gr uygun gradasyondaki agrega yığını karıştırılmış ve deney prosedürüne tabi tutulmuştur. Şekil 3.59'da 60°C sıcaklıkta 24 saat bekletilen numunelerin görüntüleri verilmiştir.

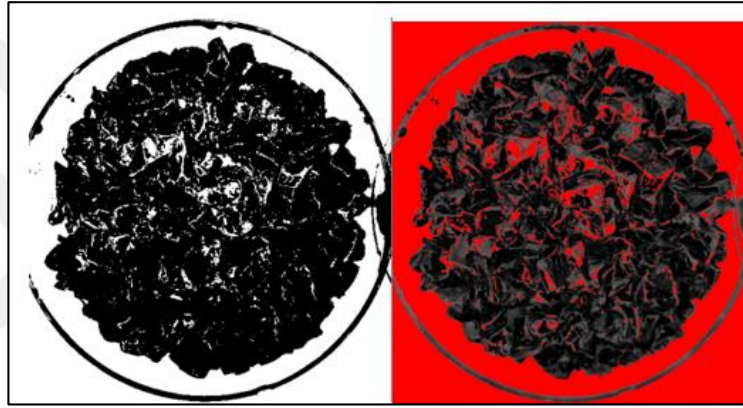


Şekil 3.59 : Nicholson soyulma deneyi sonrası numunelerin görüntüsü

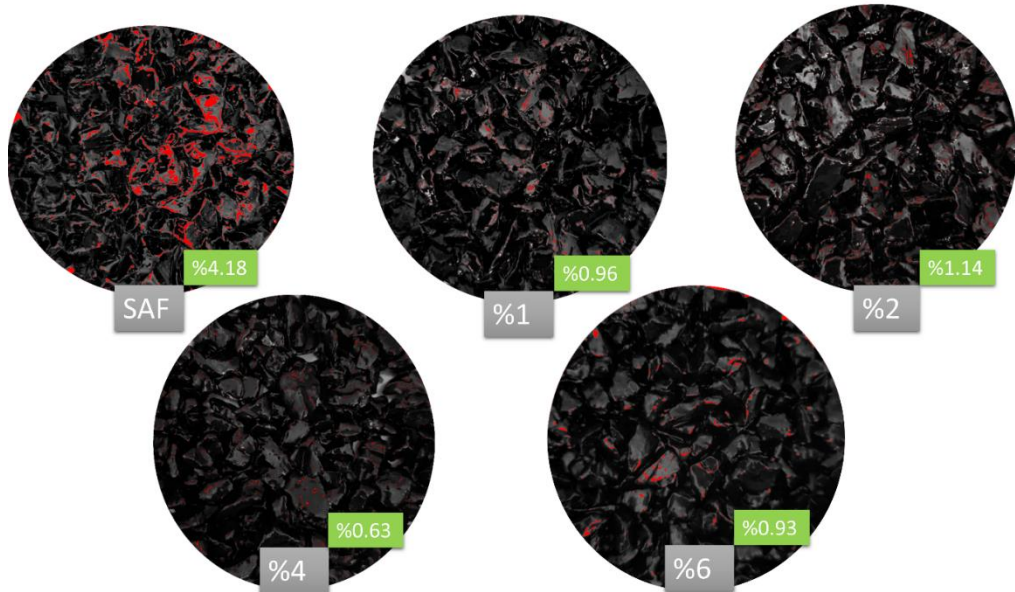
Şekil 3.59 incelendiğinde saf bağlayıcı ile hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numunesinde soyulma miktarının diğer bağlayıcı tiplerinden daha fazla olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu görsel değerlendirme katkı maddesinin asfaltın yapışma

kabiliyetini artırarak, asfalt ile agregası arasındaki yapışmanın ölçüsü olan adezyon performansını geliştirdiğini göstermektedir.

Katkı oranları arasında görsel olarak bir kıyaslama pek mümkün değildir. Bu amaçla, gerek soyulma miktarını sayısal bir tabana dayandırmak, gerekse katkı maddeleri arasındaki adezyon performansı farkını ortaya çıkarmak amacıyla görüntü işleme (image processing) yöntemi kullanılarak soyulma alanı belirlenmiştir. Numunenin görüntü işleme yönteminde ilk olarak arka plandan ayıklanmış ve eşikleme işlemine (threshold) tabi tutulmuştur (Şekil 3.60). Şekil 3.61’de görüntü analizi ve soyulma yüzdeleri sonuçları verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.17’de sayısal olarak bu veriler sunulmuştur.



Şekil 3.60 : Görüntülerin eşikleme işlemlerine örnekler



Şekil 3.61 : Görüntü analizi sonrası soyulma alanlarının görünümü

Çizelge 3.17 : Nicholson soyulma deneyi numunelerinin görüntü analizi sonrası soyulma miktarları

Numune tipi	Soyulan (%)	Soyulmayan (%)
Saf	4.18	95.82
%1	0.96	99.04
%2	1.14	98.86
%4	0.63	99.37
%6	0.93	99.07

Şekil 3.61 ve Çizelge 3.17 incelendiğinde saf karışımın soyulma miktarının görüntü işleme yöntemiyle başarılı bir şekilde detaylandırıldığı ve sayısal olarak ifade edildiği görülmektedir. Bu sayede gözle görünmeyen ve nicelik olarak ifade edilemeyen soyulma alanları tespit edilmiştir. Çizelge 3.17'ye göre saf karışımın %4.18'i Nicholson deneyi sonrası soyulmaya maruz kalırken diğer karışım tiplerinin %99'u soyulmadan adeziv özelliklerini muhafaza edebilmiştir. Bu durum modifikasyon etkisini işaret etmekte ve katkı maddesinin agrega ve asfalt arasındaki yapışma kabiliyetini artırdığını göstermektedir.

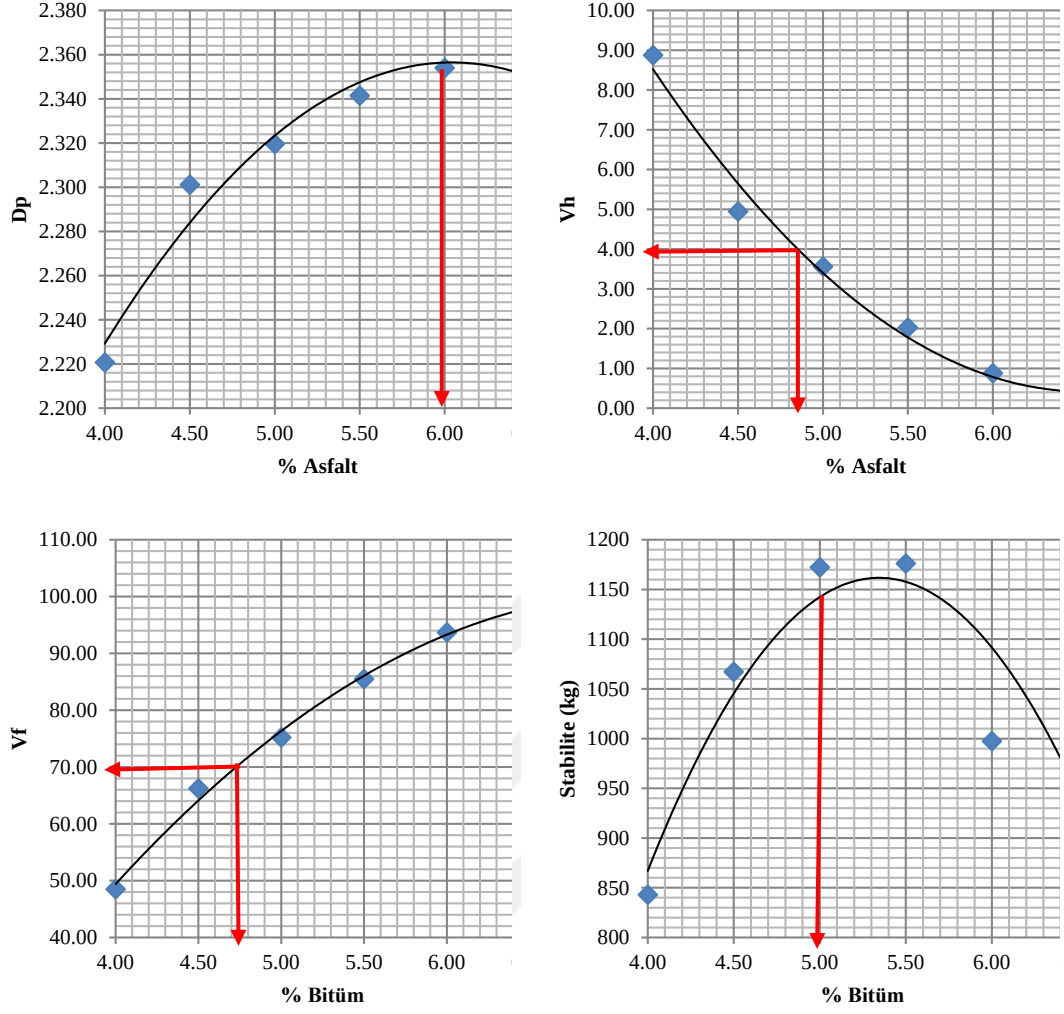
3.12 Marshall Tasarım Yöntemine Göre Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi

Marshall briketleri üretilirken uygun bağlayıcı içeriğini belirlemek önem arz etmekte, bu amaçla Marshall tasarımı yapılmaktadır. Tez çalışmasında toplam agrega ağırlığının %4-6.5 oranları arasında asfalt bağlayıcı %0.5'lik artışlarla ilave edilmiş ve her bir asfalt içeriğinde üçer adet Marshall briketi hazırlanmıştır. Hazırlanan briketlerin yoğunluk-boşluk analizleri yapılarak daha sonrasında stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Stabilite ve akma değerleri kullanılarak Marshall oranları hesaplanmıştır. Optimum asfalt içeriğinin belirlenmesi için elde edilen veriler Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.18 : Saf bağlayıcı kullanılarak elde edilen asfalt karışımların tasarım verileri ve şartname limitlerine göre incelenmesi

Karışım Özelliği	Şartname Kriteri		Asfalt İçeriği (%)					
	Min.	Maks.	4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hacim Özgül								
Ağırlık (Dp- g/cm³)	-	-	2.221	2.301	2.320	2.341	2.354	2.370
Hava								
Boşluğu (Vh-%)	3	5	8.87	4.94	3.56	2.03	1.20	1.13
Asfaltla								
Dolu Boşluk (Vf-%)	65	75	48.50	66.23	75.22	85.50	93.68	98.09
Agregalar								
Arası Boşluk (VMA-%)	14	16	17.23	14.64	14.37	13.97	13.92	14.33
Stabilite (kg)	900	-	843	1067	1172	1176	997	992
Akma (mm)	2	4	4.40	3.88	4.61	5.52	5.38	7.19
Marshall								
Oranı (kg/mm)	-	-	191.59	275	254.23	213.04	185.32	137.97

Çizelge 3.18'deki verilerden yararlanarak hacim özgül ağırlık, hava boşluğu, asfaltla dolu boşluk ve stabilite değerlerine ait grafikler çizilmiş ve Şekil 3.62'de gösterilmiştir. Grafiklerde kırmızı ile işaretlenen yerler Karayolları Teknik Şartnamesi'nde yer alan kriterleri temsil etmektedir. Bu değerlere karşılık gelen asfalt içerikleri işaretlenmiştir. Her bir grafikte bu içeriklere karşılık gelen değerlerin ortalamaları alınarak optimum asfalt içeriği belirlenmiştir. Şekil 3.62 incelendiğinde optimum asfalt içeriği %5.1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.62 : Optimum bitüm oranının belirlenmesi için çizilen grafikler

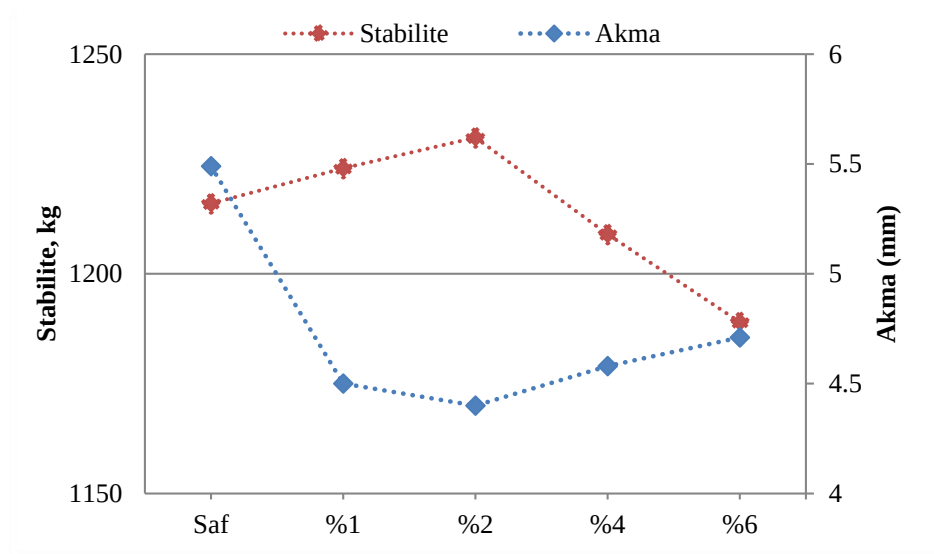
3.13 Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Saf ve modifiye asfaltlar %5.1 asfalt içeriğinde uygun gradasyondaki agrega ile karıştırılarak Marshall briketleri elde edilmiştir. Bağlayıcı miktarından dolayı meydana gelebilecek farklılıkların ve tutarsızlıkların önüne geçmek için tüm karışım numuneleri aynı asfalt içeriğinde hazırlanmıştır. Tüm karışım numuneleri için Marshall verileri Çizelge 3.19’te sunulmuştur.

Çizelge 3.19 : Karışım numunelerinin Marshall verileri

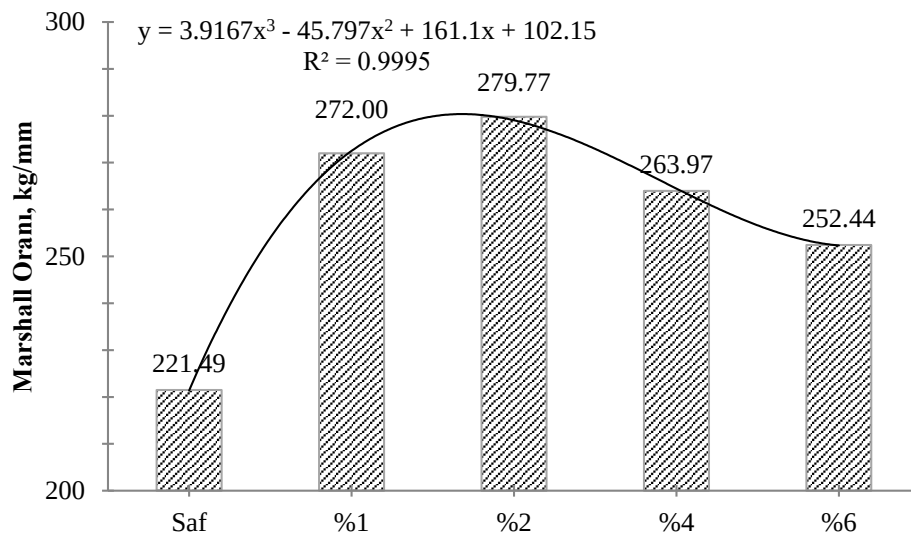
Karışım Özellikleri	Numune Adı				
	Saf	%1	%2	%4	%6
Bağlayıcı Özgül Ağırlığı (Gb-g/cm ³)	1.022	1.025	1.025	1.028	1.034
Optimum Asfalt İçeriği (%)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
Hacim Özgül Ağırlık (Dp-g/cm ³)	2.311	2.341	2.357	2.360	2.361
Hava Boşluğu (Vh-%)	4.85	3.51	3.24	3.10	3.58
Asfaltla Dolu Boşluk (Vf-%)	66.97	74.12	75.06	75.90	74.63
Agregalar Arası Boşluk (VMA-%)	14.67	13.57	12.99	12.85	13.17
Stabilite (kg)	1216	1224	1231	1209	1189
Akma (mm)	5.49	4.5	4.4	4.58	4.71
Marshall Oranı (kg/mm)	221.49	272	279.77	263.97	252.44

Çizelge 3.19 incelendiğinde asfalt karışım numuneleri özgül ağırlık konusunda önemli bir farklılık barındırmamaktadır. Tüm karışım numunelerinin şartname limitlerini sağladığı görülmektedir. Şekil 3.63'te saf ve modifiye asfalt karışımların Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları, Şekil 3.64'te ise Marshall oranı değerleri sunulmuştur.

**Şekil 3.63 : Marshall stabilite ve akma sonuçları**

Şekil 3.63'teki saf ve modifiye asfalt karışım numunelerine ait stabilite-akma grafiği incelendiğinde katkı oranının %2'ye kadar artmasıyla stabilite değerlerinin arttığı, %4 ve %6 oranlarında stabilite değerlerinin azaldığı görülmektedir. %4 ve %6 katkı oranlarında saf karışımdan daha düşük stabilite değerleri elde edilmiştir. Saf karışıma kıyasla %1 ve %2 katkı oranlarında sırasıyla %0.66 ve %1.23 artış görülürken, %4 ve %6 oranlarında %0.58 ve %2.22 düşüş görülmüştür. Akma değerleri incelendiğinde tam tersi bir durum görülmüş, %1 ve %2 katkı içeriklerinde akma değerlerinin azaldığı, diğer oranlarda ise bu değerin arttığı belirlenmiştir. Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları %1 ve %2 oranlarında katkı maddesi kullanımının asfaltın adezyon kuvvetini artırarak agregayı sarma yeteneğini geliştirdiği şeklinde yorumlanmaktadır.

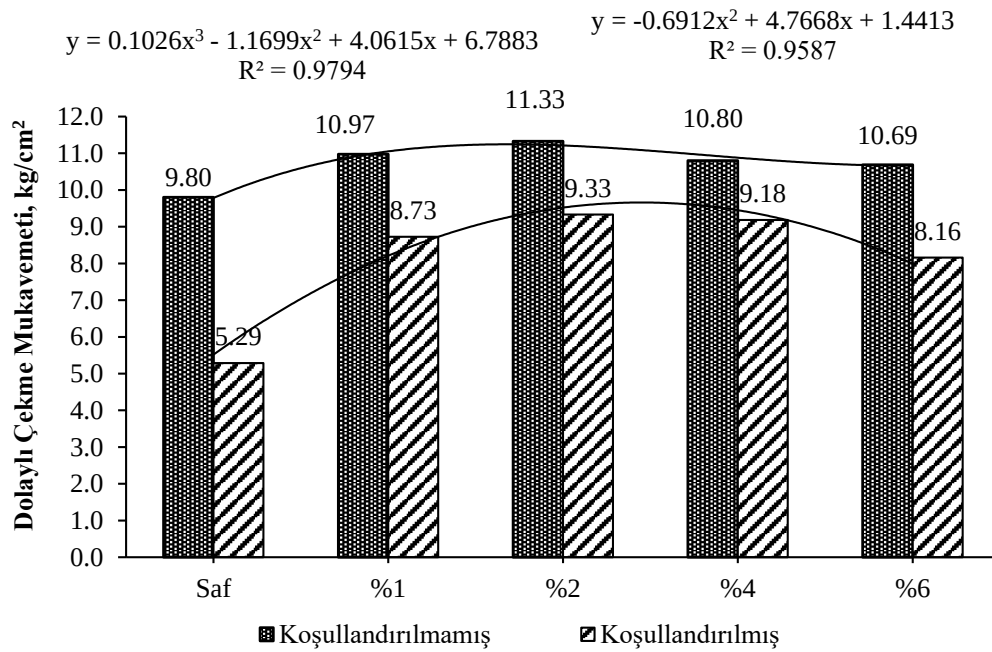
Marshall stabilite ve akma değerleri kullanılarak Marshall oranı [MQ] (kg/mm) elde edilmekte, MQ değeri esnek üstyapının servis ömrü boyunca kalıcı deformasyonlara karşı dayanımını temsil etmektedir. Şekil 3.64'te MQ oranları verilmiştir. %1 ve %2 katkı oranlarında stabilite değerlerinin artmasına karşılık akma değerlerinin düşmesi sebebiyle MQ oranları saf karışıma kıyasla yükselmiştir. %4 ve %6 katkı oranlarında MQ değerleri azalmıştır. Ancak, bu oranlarda stabilite değerleri saf karışımdan daha düşük elde edilmesine rağmen MQ değerlerinde daha yüksek değerler gözlemlenmiştir. Bu durum katkı maddesinin akma değerlerindeki olumsuzlukları sınırlandırarak malzemenin nihai performansında olumlu bir rol alacağını göstermektedir.



Şekil 3.64 : Marshall oranı (MQ) değerleri

3.14 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Sonuçları

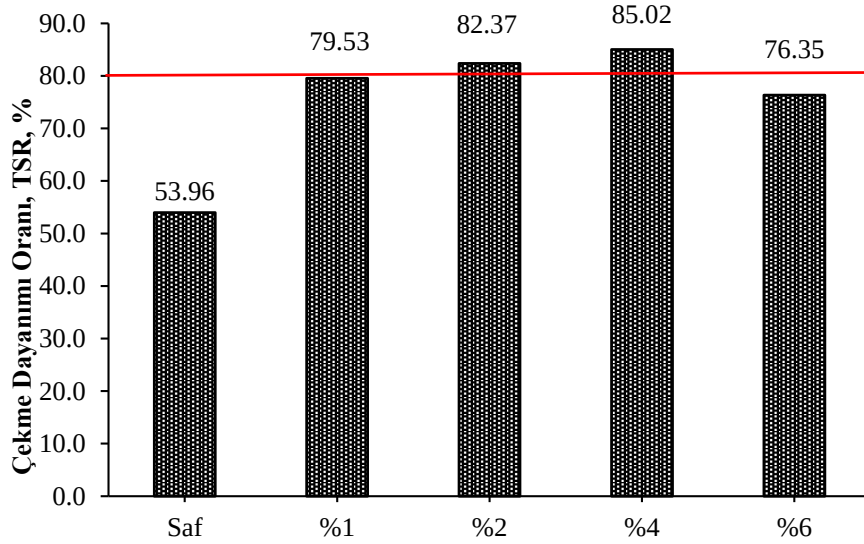
Koşullandırılmamış ve Modifiye Lottman deneyine göre koşullandırılmış saf ve modifiyeli asfalt karışımlar dolaylı çekme deneyine tabi tutulmuştur. 25°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyde numuneler 50 mm/dk yükleme hızında kırılmış, pik yük değerleri kaydedilmiştir. Her bir karışım türü için 3 adet numune deneye tabi tutulmuş, 3 karışımın sonuçlarının ortalaması alınarak nihai değer elde edilmiştir. Koşullandırma işleminden önce ve sonra dolaylı çekme dayanımı değerlerinin katkı içeriğiyle birlikte değişimi Şekil 3.65'te, çekme dayanım oranı (TSR) değerleri ise Şekil 3.66'da verilmiştir.



Şekil 3.65 : Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

Şekil 3.65'te görüldüğü üzere hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış asfalt karışım numunelerinde katkı maddesinin içeriğinin artmasıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Koşullandırılmamış numunelerin sonuçları incelendiğinde %1 ve %2 katkı oranlarında çekme mukavemeti değerlerinin saf karışıma göre arttığı, %4 ve %6 katkı oranlarında bu artışın yavaşladığı ve ivmenin terse döndüğü söylenebilmektedir. %1, %2, %4 ve %6 katkı oranlarında saf bağlayıcıya kıyasla %11.94, %15.61, %10.20 ve %9.08 artış meydana gelmiştir. Koşullandırılmış numunelerin sonuçları incelendiğinde katkı maddesinin rolü daha net ortaya çıkmaktadır. Artış oranları katkı oranları için sırasıyla %65.03, %76.37, %73.53 ve %54.25 olmuştur. Katkı maddesinin performansı koşullandırma işlemine karşı dayanımlar ile ilişkilendirildiğinde ortalama

4-5 kat daha iyi performans sağladığı görülmektedir. Koşullandırma işlemi kapsamındaki donma-çözünme periyodunda asfalt karışımın maruz kalacağı nem ve sıcaklık hasarlarına karşı katkı maddesinin önemli etkiler gösterdiği söylenebilir.

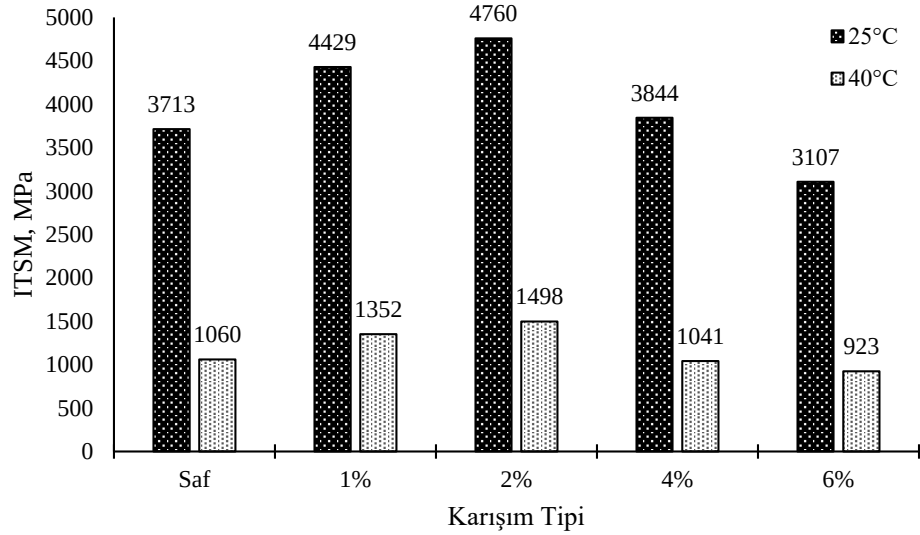


Şekil 3.66 : Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları

TSR değerleri nem hasarına karşı dayanımın bir ölçüsüdür ve şartnameye göre bu değerler %80'in üstünde olması ilgili karışımın nem hasarına karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Şekil 3.66 incelendiğinde saf karışımın bu değerin oldukça altında olduğu, diğer tüm karışımların %80'lik limit değerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. %2 ve %4 oranlarında katkı kullanımıyla TSR değerleri kayda değer miktarda artmıştır.

3.15 İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları

Saf ve %1, %2, %4, %6 katkı içeren asfalt karışımların ITSM deney sonuçları Şekil 3.67'te verilmiştir.



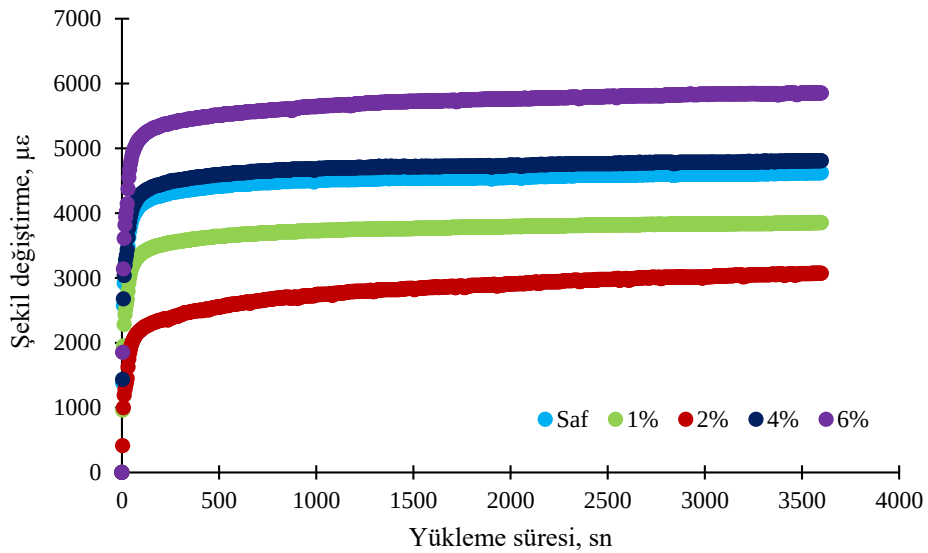
Şekil 3.67 : ITSM deney sonuçları

25°C ve 40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi ise 124 ms olarak seçilmiştir. ITSM deneyi deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiş, hedef deformasyon 5 µm olarak girilmiştir. Şekil 3.67’de görüldüğü üzere her iki sıcaklık değerinde de katkı içeriği %1 ve %2 iken ITSM değerlerinin saf karışıma kıyasla arttığı, %4 ve %6 katkı oranlarında ise bu değerlerdeki artışın terse döndüğü belirlenmiştir. En düşük ITSM değeri %6 katkı oranında tespit edilmiştir. Saf ve modifiye asfalt karışımların termoplastik özelliklerinden dolayı sıcaklığın artmasıyla ITSM değerleri azalmıştır. 25°C sıcaklıkta saf karışıma kıyasla ITSM değerleri %1 katkı oranı için %19.28 artmış, %2 katkı oranı için %28.20 artmıştır. %4 katkı oranında saf karışıma kıyasla kayda değer bir değişim gözlenmezken, %6 katkı oranında ise %16.32 oranında bir azalma görülmüştür. 40°C sıcaklıkta ise saf karışıma kıyasla ITSM değerleri %1 katkı oranı için %27.55 artmış, %2 katkı oranı için %41.32 artmıştır. %4 katkı oranında 25°C sıcaklıkta olduğu gibi saf karışıma kıyasla kayda değer bir değişim gözlenmezken, %6 katkı oranında ise %12.92 oranında bir azalma görülmüştür. Genel olarak her iki sıcaklıkta da %1 ve %2 katkı oranında ITSM değerlerinin artması bu sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı direncin arttığını göstermektedir. Böylece, özellikle %2 oranında katkı maddesi ilave edilmiş modifiye asfalt bağlayıcı kullanılarak elde edilen asfalt kaplamalarda trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin sebep olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncin arttığı, esneklik

modülünün artmasıyla asfalt kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin geliştiği söylenebilir. Bilindiği üzere malzemelerin yorulma ömrünü artırmak malzemelerin elastik bileşen oranını ya da rijitliğini artırmak ile mümkündür. Her iki sıcaklıkta da %1 ve %2 katkı oranlarında rijitlik değerlerinin artması, bu oranlarda, özellikle %2, elde edilecek asfalt kaplamaların saf bağlayıcı içeren kaplamalara kıyasla daha yüksek yorulma ömrüne sahip olacağı fikrini bizlere önceden sağlamaktadır.

3.16 Statik Sünme Deney Sonuçları

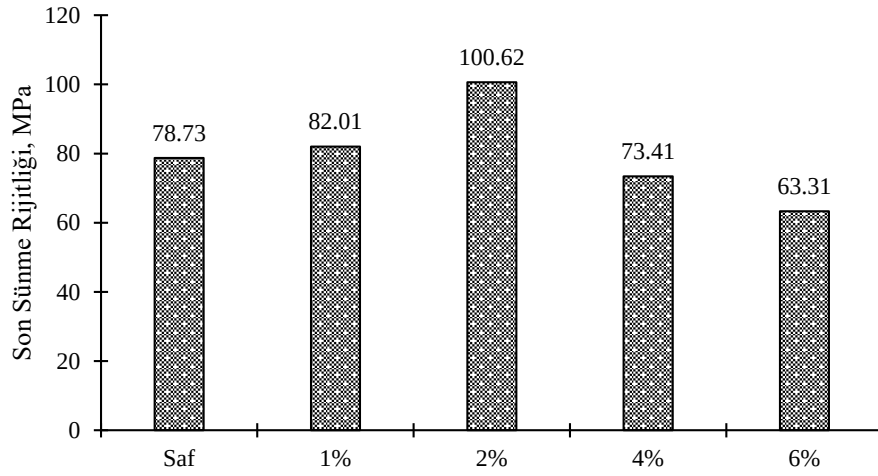
Saf ve modifiye asfalt karışımlar 50°C sıcaklıkta, 400 kPa sabit gerilme altında 1 saat süreyle tek eksenli statik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Bilindiği üzere asfalt karışımlar termo-viskoelastik malzemelerdir ve malzemenin deformasyon karakteristikleri, fiziksel ve mekanik özellikleri sıcaklık ve yükleme süresi ile doğrudan ilişkilidir. Asfalt karışımların statik sünme performansı kalıcı deformasyon ve tekerlek izi oluşumu ile ilişkilendirilir. Farklı sıcaklık, gerilme ve yükleme sürelerinde değişimler incelenmektedir. Şekil 3.68’te statik sünme deneyi sonucunda elde edilen şekil değiştirme-yükleme süresi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.68 : Statik sünme deney sonuçları

Şekil 3.68 incelendiğinde karışım numunelerine sabit yük uygulanmaya başladığında ani bir deformasyon artışı oluşmaktadır. Bu kısım bazı çalışmalarda lineer elastik tepki olarak adlandırılır. Daha sonra bu artış yavaşlayarak viskoelastik deformasyon oluşumu meydana gelir. Nihai şekil değiştirme miktarları incelendiğinde katkı

maddesinin rolü açığa çıkmaktadır. Saf karışıma kıyasla %1 ve %2 katkı oranlarında deformasyon miktarları önemli oranda düşmüş, %4 ve %6 katkı oranlarında ise saf karışıma kıyasla daha yüksek deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu durum, katkı maddesinin %1 ve %2 oranlarında kullanımının tekerlek izi dayanımını artıracak şekilde açıklanabilir. En düşük deformasyon değerleri %2 katkılı karışımda elde edilirken, en yüksek deformasyon değerleri %6 katkılı karışımda elde edilmiştir. Şekil 3.69'da deney sonundaki sünme rijitliği değerleri verilmiştir. Bu değer, plastik deformasyon dayanımı ile ilişkilendirilir.

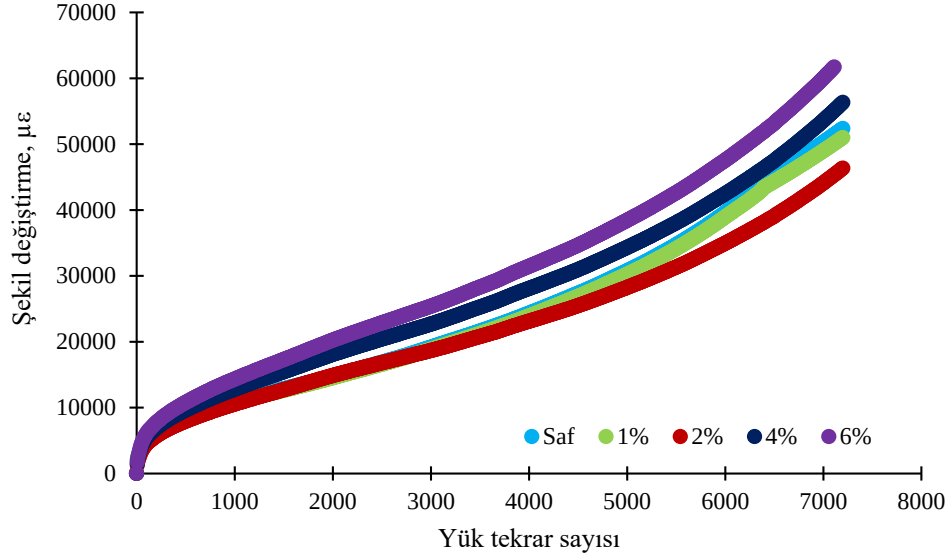


Şekil 3.69 : Karışımların nihai sünme rijitliği değerleri

Şekil 3.69 incelendiğinde en yüksek rijitlik değerinin %2 katkılı karışımda sunulduğu, en düşük rijitlik değerinin ise %6 katkılı karışımda sunulduğu görülmektedir. Saf karışıma kıyasla %1 ve %2 katkı oranlarında rijitlik değerleri sırasıyla %4.17, %27.80 artmış, %4 ve %6 oranlarında ise %6.76, %19.59 azalmıştır. Statik sünme deneyi sonuçlarına göre %2 oranında katkı kullanımının 70/100 penetrasyon dereceli asfalt karışımının tekerlek izi dayanımını önemli oranda artıracak sonucuna varılmıştır.

3.17 Dinamik Sünme Deney Sonuçları

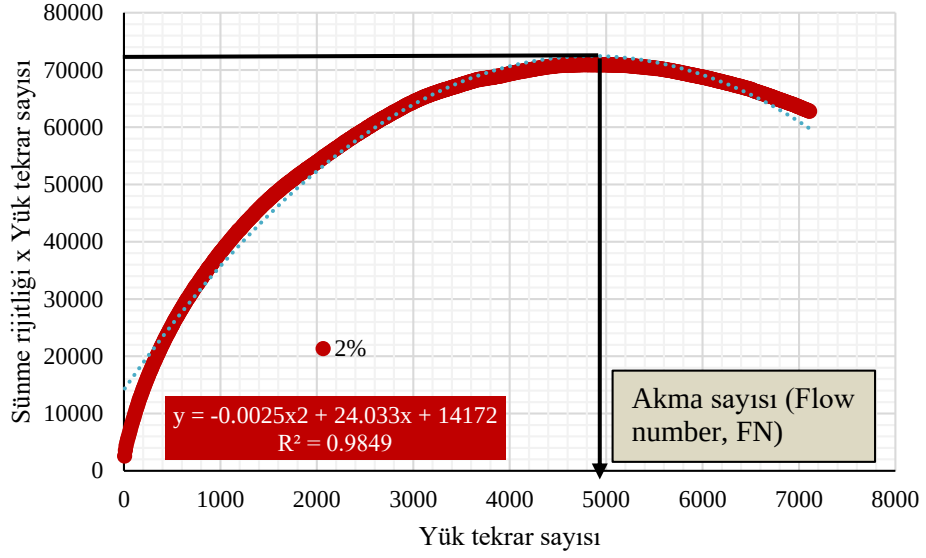
Saf ve modifiye karışımlar 50°C sıcaklıkta 400 kPa sabit gerilme ile dinamik (tekrarlı) sünme deneyine tabi tutulmuştur. Dinamik sünme deney sonuçları Şekil 3.70'te verilmiştir.



Şekil 3.70 : Dinamik sünme deney sonuçları

Bilindiği üzere esnek üstyapılar tekrarlı yüklemelere maruz kalmakta ve malzemenin viskoelastik yapısı sebebiyle kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Dinamik sünme deneyi performansı asfalt karışımların tekerlek izi dayanımları ile ilişkilendirilir. Şekil 3.70 incelendiğinde katkı oranının değişmesinin tekrarlı yükleme altında asfalt karışımının davranışını bariz biçimde etkilediği görülmektedir. %2 katkı içeren karışımın en düşük şekil değişimi değerlerini sunduğu, %6 katkı içeren karışımın ise en yüksek şekil değişimi değerlerini sunduğu görülmektedir. Bu durumda %2 katkı oranına sahip karışımın en yüksek tekerlek izi dayanımını sunacağı söylenebilmektedir. Dinamik sünme metodolojisinde anlatıldığı gibi sünme davranışı 3 bölümden oluşmaktadır. Şekil 3.70'e göre sünme eğrisinde 3. Bölgenin oluştuğu gözlemsel olarak mümkündür. Bununla bağlantılı olarak daha önce bahsedilen ve kalıcı deformasyonun başladığı tekrar sayısı olarak tanımlanan akma sayısı (flow number, FN) belirlenmiştir.

Bilindiği ve daha önce metodoloji bölümünde bahsedildiği üzere asfalt karışımların akma sayısı (FN), yük tekrar sayısı*sünme rijitliği, yük tekrar sayısı grafiğindeki eğrinin dönüm noktası olarak tanımlanır. Bu değer karışımların tekerlek izi dayanımları ile ilişkilidir [159,160]. Şekil 3.71'de tez çalışmasındaki karışım tiplerinden biri üzerinden örnek bir FN hesabı verilmiştir. Diğer tüm karışım tiplerinin akma sayıları bu yöntemle belirlenerek sonuçlar Çizelge 3.20'de sunulmuştur.



Şekil 3.71 : Dinamik sünme deneyi sonrası akma sayısının belirlenmesi

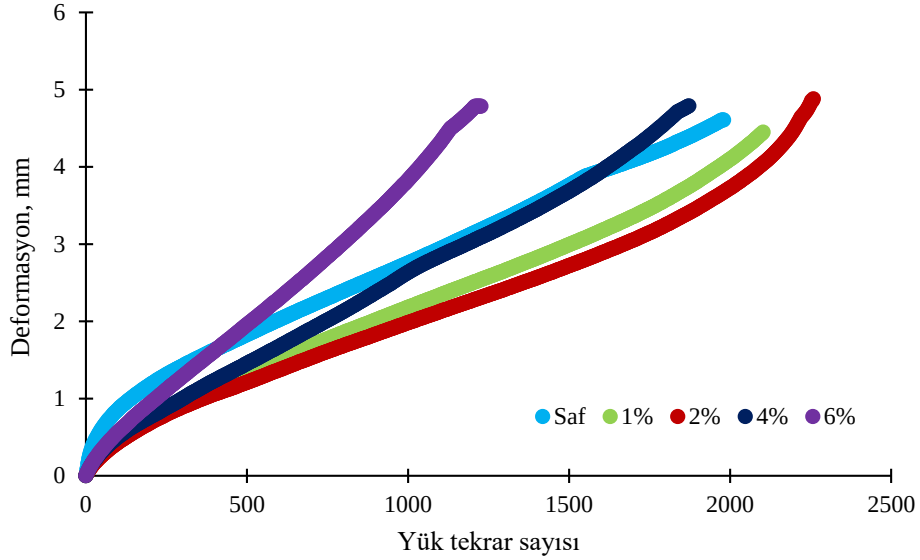
Çizelge 3.20 : Karışımların akma sayıları

Karışım tipi	Akış sayısı, FN
Saf	4515
%1	4806
%2	4943
%4	3874
%6	3799

Çizelge 3.20 incelendiğinde katkı kullanımı %1 ve %2 oranlarındayken saf karışıma kıyasla daha yüksek akma sayıları elde edilmiş, %4 ve %6 oranlarında saf karışıma kıyasla daha düşük akma sayıları tespit edilmiştir. Bu durumda %1 ve %2 oranlarında katkı içeren karışımın tekerlek izine karşı daha dayanıklı olduğu söylenebilir. Saf karışıma kıyasla akma sayıları %1 ve %2 oranları için sırasıyla %6.45 ve %9.48 artarken, %4 ve %6 için sırasıyla %14.20 ve %15.86 azalmıştır.

3.18 İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında saf ve %1, %2, %4, %6 katkı içeren asfalt karışımlar indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Her bir karışım tipinden 3 adet numuneye deney tatbik edilmiş ve bu 3 numunenin değerlerinin ortalaması alınarak Şekil 3.72'deki deformasyon-yük tekrar sayısı grafiği elde edilmiştir. Deney, 25°C sıcaklıkta 300 kPa gerilmede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.72 : İndirekt çekme yorulma deneyi sonuçları

Şekil 3.72 incelendiğinde katkı kullanımının saf asfalt karışımının kırılması için gereken yük tekrar sayısını önemli oranda değiştirdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak yorulma ömürlerinin de farklılaştığı ve katkının rolünün bariz bir şekilde ortaya çıktığı belirlenmiştir. Yük tekrar sayısı özelinde inceleme yapıldığında numunenin kırılmadan dayanabileceği yük tekrar sayısı en yüksek %2 katkı içeren asfalt karışımında görülmüştür. En düşük yük tekrar sayısı ise %6 katkı içeren asfalt karışımında elde edilmiştir. Detaylı bir karşılaştırma yapılması amacıyla saf ve modifiyeli karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayıları Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.21 : Karışımların 4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayıları

Karışımın adı	4 mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayısı
Saf	1641
%1	1968
%2	2091
%4	1620
%6	1038

Çizelge 3.21 incelendiğinde 4mm deformasyona karşılık gelen yük tekrar sayılarının saf karışıma kıyasla %1 ve %2 katkı oranları için %19.93, %27.42 artmış, %4 ve %6 katkı oranları için %1.28 ve %36.75 azalmıştır. Bu sonuçlara göre %1 ve %2 katkı içeriğinde hazırlanan asfalt karışımların saf karışıma kıyasla kayda değer miktarda yorulma dayanımı elde edeceği ve tekrarlı yükler altında oluşacak yorulma çatlaklarına karşı daha uzun ömürlü kaplamalar olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada atık hayvansal yağ ve bor nitrür içeren katkı maddesinin asfalt kaplamalarda kullanımı araştırılmış, laboratuvar ortamında çeşitli kimyasal süreçlerden geçirilerek elde edilen katkı maddesi kullanılarak elde edilen saf ve modifiye asfaltların fiziksel, kimyasal, reolojik ve mekanik özellikleri ortaya konmuştur. Katkı maddesi asfalt bağlayıcı ağırlığınca %1, %2, %4 ve %6 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen çıkarımlar aşağıda derlenmiştir:

- Katkı maddesinin sentezi için kullanılacak bor nitrür oranının belirlenmesi amacıyla temel asfalt bağlayıcı deneyleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar ideal bor nitrür içeriğinin katkı maddesinin ağırlığınca %10 olduğu saptanmıştır.
- Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri sonucunda %1 ve %2 katkı oranında katkı kullanımı ile asfaltın penetrasyon değerlerinin azaldığı ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı görülmüştür. %4 ve %6 katkı oranlarında bu performans artışı tersine dönmüştür. Sonuç olarak %1 ve %2 katkı kullanımı asfalt bağlayıcının sertliğini ve kıvamlılığını artırarak sıcaklık hassasiyetini azaltmıştır. Ancak yine de, %4 ve %6 katkı içeren bağlayıcıların penetrasyon değerleri saf bağlayıcıdan düşük, yumuşama noktası değerleri de saf bağlayıcıdan yüksektir.
- RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi sonuçları katkı kullanımının yaşlanmaya karşı dayanım sağladığını göstermiştir. Bu durum katkı içerisinde varlığını sürdüren yağı kısıma atfedilmiştir.
- Dönel viskozimetre (RV) sonuçları katkı maddesi kullanımının bağlayıcıların viskozite değerlerini artırdığını göstermiştir. 135°C ve 165°C sıcaklıkta gerçekleştirilen viskozite deneyinde her iki sıcaklık değeri için de en yüksek viskozite değeri %2 katkı oranında görülmüştür. %4 ve %6 katkı içeriklerinde her ne kadar saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek viskozite değerleri gözlene de pik viskozite değeri olan %2 katkı kullanımından sonra değerler düşmüştür. Ancak, tüm bağlayıcı tipleri için şartname limitleri sağlanmış ve asfaltın işlenebilirliği açısından herhangi bir olumsuzluk görülmemiştir.

- DSR deneyi katkı maddesinin etkisinin daha detaylı incelenmesini sağlamıştır. DSR sonuçları incelendiğinde, %1 ve %2 katkı içeriklerinde saf bağlayıcıya kıyasla daha yüksek tekerlek izi dayanım değerleri elde edilmiş, %4 ve %6 katkı içeriklerinde ise saf bağlayıcıdan daha düşük dayanım değerleri gözlenmiştir. Ayrıca %6 katkı içeren bağlayıcı hariç diğer tüm bağlayıcılar 70°C sıcaklıkta şartname limitlerini (1000 Pa) sağlamıştır.
- DSR deneyi sonucu elde edilen faz açısı değerleri incelendiğinde en yüksek faz açısı değerleri saf bağlayıcıda görülmüştür. %1 ve %2 katkı oranlarında kompleks modülün artmasına karşılık faz açısı değerleri önemli oranda azalmış, bu durum bağlayıcının elastik davranışının geliştiğini göstermiştir. Diğer katkı oranlarında da faz açısı değerleri saf bağlayıcıya göre oldukça düşüktür, ancak, G^* değerlerindeki zayıf performans elastik özelliklerin kayda değer miktarda gelişmediği sonucunu bizlere anlatmaktadır.
- RTFOT sonrası DSR sonuçları %2 katkı içeren bağlayıcının en yüksek G^* değerlerini sunduğunu, yüksek sıcaklıkta bağlayıcının elastik özelliklerini kayda değer miktarda geliştirdiğini göstermiştir. Katkı içerisindeki muhtemel doymamış yağ asitlerinin yaşlanmayı kısmen önlediği düşünülmüş, ancak buna rağmen hiçbir bağlayıcı 2.2 kPa'lık şartname limitinin altında kalmamıştır.
- PAV sonrası bağlayıcıların DSR sonuçları incelendiğinde katkı maddesinin etkisi daha net görülmüştür. Yorulma direncini temsil eden $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri incelendiğinde her sıcaklıkta en yüksek değerlerin saf bağlayıcıda elde edildiği görülmüştür. Yaşlandırılmamış ve RTFOT sonrası bağlayıcılarda görülen artış burada gözlenmemiş, bu durum oldukça olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda tüm modifiye bağlayıcıların saf bağlayıcıdan daha düşük $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri sunması katkı maddesinin asfalt bağlayıcının yaşlanma direncini artırdığını göstermektedir. Ancak, bu yumuşama etkisinin sınırlandırılması önem arz etmektedir. Bu açıdan bakıldığında %2 katkı oranında bu yumuşama etkisinin sınırlandığı, diğer tüm katkı oranlarından daha yüksek $G^* \cdot \sin \delta$ değeri sunduğu görülmektedir. %2 katkı oranı için malzemenin gevrek kırılmalara sebebiyet vermeden kaplamaya gelen yüklere karşı dayanım sağlayacağı ve yaşlanmaya karşı direnç göstererek yorulma ömrünü de artıracığı söylenebilmektedir.

- Saf ve modifiye asfaltların düşük sıcaklık performansının araştırılması amacıyla BBR deneyi gerçekleştirilmiştir. BBR deneyi -12°C ve -18°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş, sonuçlar her iki sıcaklıkta da en yüksek sünme rijitliği değerlerinin saf bağlayıcıda elde edildiğini, katkı oranının artmasıyla rijitlik değerlerinin düzenli bir şekilde azaldığını göstermiştir. Katkı maddesi asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda esneklik özelliklerini kaybetmesini önlemiş, çatlak oluşumuna karşı dayanımını artırmıştır. Tüm bağlayıcılar 300 MPa'lık şartname limitini sağlamıştır. "m-value" değerleri incelendiğinde -12°C 'de tüm bağlayıcıların 0.30'dan yüksek değerler sunarak kriterleri sağladığı görülmüştür. Her iki sıcaklık değerinde de en düşük m değeri saf bağlayıcıda görülmüştür. Katkı kullanımı ile m değerleri artmış, bu durum düşük sıcaklık performansının geliştiğini göstermiştir.
- BBR deneyi sonuçlarının detaylı değerlendirilmesi katkı maddesinin sentezlenmesi için benimsenen temel motivasyonu desteklemek için önem arz etmektedir. BBR sonuçları özetlenirse, katkı maddesinin düşük sıcaklık performansını önemli oranda iyileştirdiği, en rijit ve kırılğan bağlayıcının saf bağlayıcı olduğu görülmüştür. Katkı maddesinin bünyesinde bulunan çifte bağlar ve dallanmış yapılar içeren doymamış yağ asitlerinin düşük sıcaklık performansının artışıdaki temel neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık deneylerinin sonuçları ile birlikte değerlendirdiğimizde, %1 ve %2 katkı oranı yüksek sıcaklık dayanımını artırmış, fakat, düşük sıcaklıkta saf bağlayıcıya kıyasla daha olumlu sonuçlar sunmuştur. Bu sonuçlar %2 katkı içeren asfalt bağlayıcı yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanım sağlamakla beraber, düşük sıcaklıkta meydana gelebilecek gevrek kırılmalara karşı da bağlayıcının esnekliğini korumaktadır.
- Saf ve modifiye asfalt bağlayıcılar kullanılarak asfalt karışımlar elde edilmiştir. Karışımlar üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve akma deney sonuçları incelendiğinde en yüksek stabilite değerinin %2 katkı oranında elde edildiği görülmüştür. %1 ve %2 katkı oranlarında stabilite değerleri saf karışıma kıyasla artmış, %4 ve %6 oranlarında azalmıştır. Akma değerleri incelendiğinde en düşük akma değeri %2 katkılı karışımda görülmüştür.
- Dolaylı çekme mukavemeti sonuçları incelendiğinde koşullandırılmamış numunelerde her bir katkı oranında saf asfalt karışıma kıyasla daha yüksek mukavemet değerleri gözlenmiştir. En yüksek dolaylı çekme mukavemeti değeri %2 katkılı karışımda elde edilmiştir. Koşullandırılmış numunelerde katkının rolü daha

net ortaya konmuştur. %2 katkı oranında saf karışıma kıyasla çekme dayanım oranı değeri %76 daha yüksektir. Bu sonuçlar sentezlenen katkı maddesi ile hazırlanan asfalt kaplamaların nem ve sıcaklık hasarlarına karşı daha dayanıklı olacağını göstermektedir.

- ITSM sonuçları incelendiğinde katkı kullanımı ile karışımların rijitlik değerlerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Deney sıcaklığının 25°C'den 40°C'ye yükseltilmesi karışımların rijitlik değerlerini azaltmış, bu durum asfalt karışımların termoplastik doğasına atfedilmiştir. Ancak, her iki sıcaklık değerinde de en yüksek rijitlik değerlerini %2 katkı içeren karışım sunarken, en düşük rijitlik değerleri diğer deney sonuçlarını da doğrular biçimde %6 katkı oranı içeren karışımda görülmüştür.
- Statik sünme deney sonuçlarına göre, saf karışıma kıyasla %1 ve %2 katkı oranlarında deformasyon miktarları azalmış, %4 ve %6 katkı içeren karışımlarda ise daha yüksek deformasyon değerleri elde edilmiştir. Statik sünme deneyi sonuçlarına göre %1 ve %2 katkı kullanımı ile tekerlek izine karşı mukavemetli asfalt kaplamalar elde edilebileceği söylenebilir. Nihai sünme rijitliği değerleri incelendiğinde en yüksek rijitlik değerinin %2 katkılı asfalt karışımda elde edildiği görülmüş, bu artış saf karışıma göre %27.80 olarak belirlenmiştir.
- Dinamik sünme deneyi sonuçlarına göre, tekrarlı yükler altında en düşük kalıcı şekil değiştirme değerleri %2 katkılı karışımda görülmüştür. %1 ve %2 katkı kullanımı ile asfalt karışımında tekrarlı yükler altında plastik deformasyon oluşumuna karşı dayanım sağlanırken %4 ve %6 katkılı karışımda bu durum gözlenmemiştir.
- İndirekt çekme yorulma deneyi sonuçları incelendiğinde, %1 ve %2 katkı oranında asfalt karışımının kırılması için gereken yük tekrar sayısı artmış, %4 ve %6 katkı oranlarında bu sayı azalmıştır. 4 mm'ye karşılık gelen yük tekrar sayıları incelendiğinde ne yüksek değer %2 katkılı asfalt karışımda görülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle %2 oranında katkı kullanımıyla asfalt kaplamalarda görülen en yaygın bozulmalardan biri olan yorulma çatlaklarına karşı dayanım elde edileceği söylenebilir.

Bakım onarım işlemleri ülkemizdeki karayolu harcamalarının büyük kısmını oluşturmakta ve ülkemizdeki yol ağının günden güne gelişmesiyle de her geçen yıl daha da artmaktadır. Bakım-onarım periyotlarının azaltılması ve dolayısıyla maliyetlerinin düşürülmesi dayanıklı asfalt kaplamaların elde edilmesiyle

mümkündür. Tez çalışması kapsamında sentezlenen katkı maddesinin (özellikle %2 oranında) tercih edilmesiyle hem yüksek sıcaklık hem de düşük sıcaklık performansının kayda değer miktarda geliştiği, buna bağlı olarak asfalt karışımın tekerlek izi, çatlak oluşumu, nem hasarı gibi olgulara karşı oldukça mukavemetli olacağı aşıkardır. Bu sayede ülkemiz karayolu harcamalarının önemli bir miktarını oluşturan yeniden yapım ve rehabilitasyon maliyetlerinin kayda değer miktarda azalacağı düşünülmektedir. Ayrıca, katkı maddesinin atık bir malzemedan elde edildiği düşünüldüğünde ekonomik faydalarına ek olarak çevresel açıdan da faydacıdır. Söz konusu katkı maddesinin ve bu katkı maddesiyle inşa edilecek ulaşım yapılarının son yıllarda ülkemizin ana eylem planlarından olan “sürdürülebilir kalkınma” hedeflerine yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Boutevin, B., Pietrasanta, Y., & Robin, J.-J.** (1989). Bitumen-polymer blends for coatings applied to roads and public constructions. *Progress in Organic Coatings*, 17(3), 221–249.
- [2] **Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Rossi, C. O.** (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4).
- [3] **Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., & Zanzotto, L.** (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41(12), 2831–2844.
- [4] **Hunter, R., Self, A., & Read, J.** (2015). The Shell Bitumen Handbook, 6th edition. In *The Shell Bitumen Handbook, 6th edition*.
- [5] **Lu, X., Isacsson, U., & Ekblad, J.** (1999). Phase Separation of SBS Polymer Modified Bitumens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 51–57.
- [6] **Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G.** (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72–112.
- [7] **Punith, V. S., & Veeraragavan, A.** (2007). Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500–507.
- [8] **Lesueur, D.** (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1–2), 42–82.
- [9] **Lesueur, D., Gérard, J.-F., Claudy, P., Létoffé, J.-M., Martin, D., & Planche, J.-P.** (1998). Polymer modified asphalts as viscoelastic emulsions. *Journal of Rheology*, 42(5), 1059–1074.
- [10] **Isacsson, U., & Lu, X.** (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art. *Materials and Structures*, 28(3), 139–159.
- [11] **Stastna, J., Zanzotto, L., & Vacin, O. J.** (2003). Viscosity function in polymer-modified asphalts. *Journal of Colloid and Interface Science*, 259(1), 200–207.
- [12] **Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H.** (2012). Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology. *Construction and Building Materials*, 36, 1001–1007.
- [13] **Chen, J.-S., Liao, M.-C., & Shiah, M.-S.** (2002). Asphalt Modified by Styrene-

Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 224–229.

- [14] **Airey, G. D.** (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16(8), 473–487.
- [15] **Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., & Fan, Y.** (2002). Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts. *Polymer Testing*, 21(3), 295–302.
- [16] **Wang, T., Yi, T., & Yuzhen, Z.** (2010). The Compatibility of SBS-Modified Asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 28(7), 764–772.
- [17] **Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., & Moeini, A.** (2010). Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, 24(3), 300–307.
- [18] **Kraus, G.** (1982). Modification of Asphalt by Block Polymers of Butadiene and Styrene. *Rubber Chemistry and Technology*, 55(5), 1389–1402.
- [19] **Luo, J., Li, Q., Ali, M. A., Alizadeh, A., Raise, A., Alali, A. F., Almojil, S. F., Almohana, A. I., & Almoalimi, K. T.** (2023). Experimental investigation of the rheological behaviors of bitumen and stone matrix asphalt mixtures using waste material. *Construction and Building Materials*, 365, 130003.
- [20] **Wloczyński, P., Vidal, A., & Papirer, E.** (1997). Relationships between rheological properties, morphological characteristics, and composition of bitumen-styrene butadiene styrene copolymers mixes. II. A thermodynamical interpretation. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(8), 1609–1618.
- [21] **Lu, X., & Isacsson, U.** (1997). Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Materials and Structures*, 30(10), 618–626.
- [22] **Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C.** (2019). Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. *Applied Sciences*, 9(4), 742.
- [23] **Chan, C.H.; Sabu, T.; Pothan, L.A.; Maria, H. J.** (2013). *Natural Rubber Materials* (S. Thomas, C. Han Chan, L. Pothan, J. Joy, & H. Maria (eds.); Vol. 2). Royal Society of Chemistry.
- [24] **Kohjiya, S., & Ikeda, Y.** (2014). *Chemistry, manufacture and applications of natural rubber*.
- [25] **Van Krevelen, D. W., & Te Nijenhuis, K.** (2009). *Chapter 1 - Polymer Properties* (D. W. Van Krevelen & K. B. T.-P. of P. (Fourth E. Te Nijenhuis (eds.); pp. 3–5). Elsevier.
- [26] **Mark, J.** (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook* (J. E. Mark (ed.)). Springer New York.
- [27] **Studebaker, M. L.** (1966). Effect of Curing Systems on Selected Physical Properties of Natural Rubber Vulcanizates. *Rubber Chemistry and*

Technology, 39(5), 1359–1381.

- [28] **Wen, Y., Wang, Y., Zhao, K., & Sumalee, A.** (2017). The use of natural rubber latex as a renewable and sustainable modifier of asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(6), 547–559.
- [29] **Shaffie, E., Ahmad, J., Arshad, A. K., Kamarun, D., & Kamaruddin, F.** (2015). Stripping Performance and Volumetric Properties Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Mix Design Using Natural Rubber Latex Polymer Modified Binder (NRMB). In *InCIEC 2014* (pp. 873–884). Springer Singapore.
- [30] **Ali, S. A., Yusof, I., Hermadi, M., B.S.Alfergani, M., & Sinusi, A. A.** (2013). Pavement performance with carbon black and natural rubber (Latex). *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(3), 124–129.
- [31] **Ansari, A. H., Jakarni, F. M., Muniandy, R., & Hassim, S.** (2021). A review on the application of natural rubber as asphalt modifier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1075(1), 012031.
- [32] **Okieimen, F. E., & Akinlabi, A. K.** (2002). Processing characteristics and physicomechanical properties of natural rubber and liquid natural rubber blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 85(5), 1070–1076.
- [33] **Kök, B. V., & Çolak, H.** (2011). Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3204–3212.
- [34] **Wang, H., You, Z., Mills-Beale, J., & Hao, P.** (2012). Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber. *Construction and Building Materials*, 26(1), 583–590.
- [35] **Mashaan, N. S., & Karim, M. R.** (2014). Waste tyre rubber in asphalt pavement modification. *Materials Research Innovations*, 18(sup6), S6-6-S6-9.
- [36] **Grechanovskii, V. A., Poddubnyi, I. Y., & Ivanova, L. S.** (1974). Molecular Structure and Macroscopic Properties of Synthetic Cis-Poly(Isoprene). *Rubber Chemistry and Technology*, 47(2), 342–356.
- [37] **Flory, P. J.** (1946). Effects of Molecular Structure on Physical Properties of Butyl Rubber. *Industrial & Engineering Chemistry*, 38(4), 417–436.
- [38] **Hernández-Olivares, F., Witoszek-Schultz, B., Alonso-Fernández, M., & Benito-Moro, C.** (2009). Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(4), 277–288.
- [39] **Abdul Hassan, N., Airey, G. D., Putra Jaya, R., Mashros, N., & A. Aziz, M. M.** (2014). A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. *Jurnal Teknologi*, 70(4).
- [40] **ASTM D6114-97.** (2002). *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*.
- [41] **Bouldin, M. G., Collins, J. H., & Berker, A.** (1991). Rheology and Microstructure of Polymer/Asphalt Blends. *Rubber Chemistry and*

Technology, 64(4), 577–600.

- [42] **Aglan, H.** (1993). Polymeric Additives and Their Role in Asphaltic Pavements. Part I: Effect of Additive Type on the Fracture and Fatigue Behavior. *Journal of Elastomers & Plastics*, 25(4), 307–321.
- [43] **Bonemazzi, F., Braga, V., Corrieri, R., Giavarini, C., & Sartori, F.** (1996). Characteristics of Polymers and Polymer-Modified Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1535(1), 36–47.
- [44] **Siddharthan, R. A. J., & Stroup-gardiner, M.** (1991). Investigation of Rutting Potential Using Static Creep Testing on Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixtures. *Transport Res Record: J Transport Res Board*, 1317, 100–108.
- [45] **Adedeji, A., Grünfelder, T., Bates, F. S., Macosko, C. W., Stroup-Gardiner, M., & Newcomb, D. E.** (1996). Asphalt modified by SBS triblock copolymer: Structures and properties. *Polymer Engineering & Science*, 36(12), 1707–1723.
- [46] **Giavarini, C., De Filippis, P., Santarelli, M. L., & Scarsella, M.** (1996). Production of stable polypropylene-modified bitumens. *Fuel*, 75(6), 681–686.
- [47] **Rojo, E., Fernández, M., Peña, J. J., Peña, B., Muñoz, M. E., & Santamaría, A.** (2004). Rheological aspects of blends of metallocene-catalyzed atactic polypropylenes with bitumen. *Polymer Engineering & Science*, 44(9), 1792–1799.
- [48] **Sengoz, B., & Isikyakar, G.** (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897–1905.
- [49] **Cuciniello, G., Leandri, P., Filippi, S., Lo Presti, D., Losa, M., & Airey, G.** (2018). Effect of ageing on the morphology and creep and recovery of polymer-modified bitumens. *Materials and Structures*, 51(5), 136.
- [50] **Xu, F., Zhao, Y., & Li, K.** (2021). Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review. *Materials*, 15(1), 110.
- [51] **Machsus, M.** (2021). IMPROVEMENT FOR ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE USING PLASTIC BOTTLE WASTE. *International Journal of GEOMATE*, 20(79).
- [52] **Carpani, C., Bocci, E., Prosperi, E., & Bocci, M.** (2022). Evaluation of the rheological and performance behaviour of bitumen modified with compounds including crumb rubber from waste tires. *Construction and Building Materials*, 361, 129679.
- [53] **Memon, N. A., Yusoff, N. I. M., Jafri, S. F., & Sheeraz, K.** (2021). Rheological Findings on Storage Stability for Chemically Dispersed Crumb Rubber Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, 305, 124768.
- [54] **Ren, S., Liu, X., Lin, P., & Erkens, S.** (2022). Influence of swelling-degradation degree on rheological properties, thermal pyrolysis kinetics, and emission components of waste crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 337, 127555.

- [55] **Caputo, P., Algieri, V., Maiuolo, L., De Nino, A., Sicilia, E., Ponte, F., Calandra, P., & Oliviero Rossi, C.** (2023). Waste additives as biopolymers for the modification of bitumen: Mechanical performance and structural analysis characterization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 663, 131079.
- [56] **Ponnada, S., & Vamsi Krishna, K.** (2020). Experimental investigation on modification of rheological parameters of bitumen by using waste plastic bottles. *Materials Today: Proceedings*, 32, 692–697.
- [57] **Chen, G., Peng, Y., Yang, N., Xu, G., Gong, K., & Xu, X.** (2023). Innovative Use of Waste PET-Derived Additive to Enhance Application Potentials of Recycled Concrete Aggregates in Asphalt Rubber. *Polymers*, 15(19), 3893.
- [58] **Naveed, M., Raza, M. A., & Mehmood, R.** (2022). Performance analyses of conventional hot mix asphalt with waste additives. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00850.
- [59] **Padhan, R. K., Leng, Z., Sreeram, A., & Xu, X.** (2020). Compound modification of asphalt with styrene-butadiene-styrene and waste polyethylene terephthalate functionalized additives. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124286.
- [60] **Fernandes, S., Peralta, J., Oliveira, J., Williams, R., & Silva, H.** (2017). Improving Asphalt Mixture Performance by Partially Replacing Bitumen with Waste Motor Oil and Elastomer Modifiers. *Applied Sciences*, 7(8), 794.
- [61] **Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M. R.** (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 37, 398–405.
- [62] **Zhao, Y., Chen, M., Wu, S., Zhu, Y., Zhou, X., Yang, C., Zhao, Z., Zhang, J., & Chen, D.** (2023). Feasibility assessment of palmitamide derived from waste edible oil as a warm mix asphalt additive. *Construction and Building Materials*, 401, 132972.
- [63] **Guo, M., Liang, M., Liu, H., & Du, X.** (2023). Optimization and validation of waste bio-oil based high-performance rejuvenator for rejuvenating aged bitumen. *Materials and Structures*, 56(5), 99.
- [64] **Yalçın, E., & Yılmaz, M.** (2021). Investigation of the rheological properties of bitumen modified with different waste oils under various frequencies and temperatures. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(6), 676–682.
- [65] **Sun, Z., Yi, J., Chen, Z., Xie, S., Xu, M., & Feng, D.** (2019). Chemical and rheological properties of polymer modified bitumen incorporating bio-oil derived from waste cooking oil. *Materials and Structures*, 52(5), 106.
- [66] **Rahman, M. T., Hainin, M. R., & Bakar, W. A. W. A.** (2017). Use of waste cooking oil, tire rubber powder and palm oil fuel ash in partial replacement of bitumen. *Construction and Building Materials*, 150, 95–104.

- [67] **Kumar, V., & Aggarwal, P.** (2023). Characteristics of Waste Oil-rejuvenated RAP Bitumen: An Experimental Study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(3).
- [68] **Nouali, M., Derriche, Z., & Ghorbel, E.** (2021). Effect of Used Engine Oil Addition on the Rheological Properties of a Plastic Bag Waste–Modified 40/50 Grade Bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3).
- [69] **Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y.-Y.** (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. *Construction and Building Materials*, 74, 83–92.
- [70] **Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S., & Saltan, M.** (2017). Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(4), 863–870.
- [71] **Yalcin, E., & Yilmaz, M.** (2022). Characteristics of Bituminous Binders Modified with Waste Oils: Physical, Chemical, and Rheological Properties. *International Journal of Civil Engineering*, 20(12), 1377–1395.
- [72] **Suo, Z., Chen, H., Yan, Q., Tan, Y., Li, X., & Zhang, A.** (2021). Laboratory Performance Evaluation on the Recovering of Aged Bitumen With Vegetable Oil Rejuvenator. *Frontiers in Materials*, 8.
- [73] **Yadykova, A. Y., & Ilyin, S. O.** (2022). Rheological and adhesive properties of nanocomposite bitumen binders based on hydrophilic or hydrophobic silica and modified with bio-oil. *Construction and Building Materials*, 342, 127946.
- [74] **Abbas, S., Zaidi, S. B. A., & Ahmed, I.** (2023). Performance evaluation of asphalt binders modified with waste engine oil and various additives. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2).
- [75] **Tadele, B., & Quezon, E. T.** (2021). Evaluation of waste engine oil rejuvenation for highly short term aged asphalt binder. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 225–234.
- [76] **Oldham, D., Rajib, A., Dandamudi, K. P. R., Liu, Y., Deng, S., & Fini, E. H.** (2021). Transesterification of Waste Cooking Oil to Produce A Sustainable Rejuvenator for Aged Asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105297.
- [77] **Yang, Y., Zhang, Y., Omairey, E., Cai, J., Gu, F., & Bridgwater, A. V.** (2018). Intermediate pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste and rheological study of the pyrolysis oil for potential use as bio-bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 187, 390–399.
- [78] **Mohi Ud Din, I., Bhat, F. S., & Mir, M. S.** (2023). A study investigating the impact of waste cooking oil and waste engine oil on the performance properties of RAP binders. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 295–309.
- [79] **Jain, S., Dabbiru, S., & Chandrappa, A. K.** (2023). Effects of Waste Cooking Oil on the Antiageing Ability of Bitumen. *Advances in Civil*

- [80] **Kumandaş, A., Çavdar, E., Oruç, Ş., Pancar, E. B., & Kök, B. V.** (2022). Effect of WCO addition on high and low-temperature performance of RET modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 323, 126561.
- [81] **Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., & Zou, X.** (2021). Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 276, 122138.
- [82] **Geçkil, T.** (2008). *Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [83] **Çeloğlu, M. E.** (2020). *Farklı biyokütlelerin pirolizinden elde edilen biyoçarların bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [84] **Kim, Y. R.** (2009). *Modeling of Asphalt Concrete* (Y. R. Kim (ed.); First edit). McGraw-Hill Education.
- [85] **Little, D. N., Allen, D. H., & Bhasin, A.** (2017). Modeling and design of flexible pavements and materials. In *Modeling and Design of Flexible Pavements and Materials*.
- [86] **Mullins, O. C.** (2011). The Asphaltenes. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 4(1), 393–418.
- [87] **Redelius, P., & Soenen, H.** (2015). Relation between bitumen chemistry and performance. *Fuel*, 140, 34–43.
- [88] **Lu, X., Soenen, H., Sjövall, P., & Pipintakos, G.** (2021). Analysis of asphaltenes and maltenes before and after long-term aging of bitumen. *Fuel*, 304, 121426.
- [89] **Kleinschmidt, L. R.** (1955). Chromatographic method for the fractionation of asphalt into distinctive groups of components. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 54(3), 163.
- [90] **Al Musawi, A. A. A.** (2020). *Investigation of mixing and compaction temperatures of asphalt through different viscosity models*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [91] **Vural Kök, B., Aydoğmuş, E., Yılmaz, M., & Akpolat, M.** (2021). Investigation on the properties of new palm-oil-based polyurethane modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 289, 123152.
- [92] **Hao, H., Chen, Z., Cong, P., & Han, Z.** (2022). Rheological, chemical and short-term aging properties of waste polyurethane particles modified asphalt binder with or without SBS. *Construction and Building Materials*, 357, 129363.
- [93] **Liu, Z., Sun, L., Li, J., & Liu, L.** (2022). Effect of key design parameters on high temperature performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 348, 128651.
- [94] **Yılmaz, B.** (2016). *Bor İçerikli Organik Katkıyla Modifiye Edilen Asfaltın Performans Özelliklerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik

- [95] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2021). *Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı*. KGM Yayınları.
- [96] **Yılmaz, M.** (2011). *Asfaltitin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [97] **Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Nayan, M. N., & Mohd Rosli, H.** (2013). Short Term and Long Term Aging Effects of Asphalt Binder Modified with Montmorillonite. *Key Engineering Materials*, 594–595, 996–1002.
- [98] **Ge, D., Yan, K., You, L., & Wang, Z.** (2017). Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, 143, 419–428.
- [99] **ASTM D6373-16.** (2021). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials.
- [100] **McGennis, R. B., Shuler, S., & Bahia, H. U.** (1994). Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods. *Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-SA-94-069*, July, 91.
- [101] **Zaniewski, J., & Pumphrey, M.** (2004). *Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol*.
- [102] **Erkuş, Y.** (2021). *Üç Farklı Katkının Birlikte Kullanımının Bitümün Ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [103] **Yalçın, E.** (2020). Saf ve Modifiye Bitümlerin Farklı Frekans ve Sıcaklıklardaki Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 901–909.
- [104] **Huang, W., Wang, D., He, P., Long, X., Tong, B., Tian, J., & Yu, P.** (2019). Rheological Characteristics Evaluation of Bitumen Composites Containing Rock Asphalt and Diatomite. *Applied Sciences*, 9(5), 1023.
- [105] **Oruç, Ş., Yılmaz, B., & Sancak, K.** (2016). Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 810–824.
- [106] **Geçkil, T., Alataş, T., & Ahmedzade, P.** (2011). Superpave Sisteminde Bölge Meteorolojik Hava Verileri Kullanılarak Performans Dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi. In *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* (Vol. 27, Issue 1, pp. 88–106). Erciyes Üniversitesi.
- [107] **Furtana Yalcin, B.** (2021). *SIS VE CR Modifiyeli Bitümün Geleneksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Fırat Üniversitesi.
- [108] **Yan, T., Marasteanu, M., & Turos, M.** (2021). Obtaining asphalt binder rheological properties from BBR strength test—the effect of loading rate. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 25(4), 617–630.
- [109] **Southern, M.** (2015). A perspective of bituminous binder specifications. In *Advances in Asphalt Materials* (pp. 1–27). Elsevier.

- [110] **Nikolaides, A.** (2014). *Highway Engineering*. CRC Press.
- [111] **Tunç, A.** (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayınevi.
- [112] **Fwa, T. F.** (2005). *The Handbook of Highway Engineering* (T. F. Fwa (ed.)). CRC Press.
- [113] **Gedik, A.** (2021). Soğuk Bölgelerde Kullanılacak Saf Bitümün Modifikasyonu Ve Beton Asfalt Üretiminde Kullanımı: B70/100 Bitüm Örneği. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 548–559.
- [114] **İSFALT.** (2002). *Asfalt El Kitabı*. İSFALT Bilimsel Yayınları.
- [115] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. KGM Yayınları.
- [116] **Gudimetta, J. M., L. Allen Cooley, J., & Brown, E. R.** (2003). *Workability of Hot Mix Asphalt*.
- [117] **Rosta, S., & Gáspár, L.** (2023). Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Eng*, 4(2), 1597–1615.
- [118] **Song, W.** (2022). Correlation between morphology parameters and skid resistance of asphalt pavement. *Transportation Safety and Environment*, 4(1).
- [119] **Asphalt Institute.** (n.d.). *Pavement Distress Summary*. <https://www.asphaltinstitute.org/engineering/maintenance-and-rehabilitation/pavement-distress-summary/>
- [120] **Walubita, L. F., Zhang, J., Faruk, A. N. M., Alvarez, A. E., & Scullion, T.** (2014). Laboratory Hot-Mix Asphalt Performance Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2447(1), 61–73.
- [121] **Jimenez, R. , & Gallaway, B.** (1965). *Road And Laboratory Tests On Hot-Mix Asphaltic Concrete*.
- [122] **CSTA.** (2014). *Method Of Test For Preparation Of Hma For Test Specimens*.
- [123] **Brown, E. R., Kandhal, P., & Zhang, J.** (2001). *Performance Testing For Hot Mix Asphalt (Executive Summary)*.
- [124] **Hall, K.** (2012). *Development Of Quality Control Procedures For Hot-Mix Asphalt*.
- [125] **Zhang, Y., Sun, L., & Cheng, H.** (2020). Laboratory Performance Evaluation of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Different Design Parameters. *Applied Sciences*, 10(9), 3038.
- [126] **BSI.** (2023). *BS EN 12697 - Bituminous mixtures. Test methods*. British Standards.
- [127] **BSI.** (2013). *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt Part 41 : Resistance to de-icing fluids*.
- [128] **Oglesby, C., & Hicks, R.** (1982). *Highway Engineering* (4th ed.). Wiley.
- [129] **Veropalumbo, R., Viscione, N., & Russo, F.** (2019). Indirect tensile strength method for defining a proper practice of asphalt mixtures design. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 124, 255–265.

- [130] **ASTM D6931-17.** (2017). *ASTM D6931-17 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures.*
- [131] **Kavussi, A., & Motevalizadeh, S. M.** (2020). *Application of Dynamic Creep Testing to Investigate Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixes* (pp. 761–770).
- [132] **Hischke, G.** (2019). *Understanding Creep in Asphalt Concrete.*
- [133] **Alavi, A. H., Ameri, M., Gandomi, A. H., & Mirzahosseini, M. R.** (2011). Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1338–1355.
- [134] **Mallick, R., Ahlrich, R., & Brown, E.** (n.d.). Potential of Dynamic Creep to Predict Rutting. In *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to their Performance* (pp. 194-194–19). ASTM International.
- [135] **Erdoğan Yamaç, Ö.** (2021). *Atık Yağ İçeren Kapsüllerin Kendini Onarabilen Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi.* Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [136] **Aragão, F. T. S., Lee, J., Kim, Y.-R., & Karki, P.** (2010). Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Construction and Building Materials*, 24(4), 538–544.
- [137] **Nishikida, K., Nishio, E., & Hannah, R. W.** (2019). *Selected Applications of Modern FT-IR Techniques.* CRC Press.
- [138] **Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C.** (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.* Springer New York.
- [139] **Pennycook, S. J., & Nellist, P. D. (Eds.).** (2011). *Scanning Transmission Electron Microscopy.* Springer New York.
- [140] **Yoe, J. H.** (1963). Inorganic Thermogravimetric Analysis, Second and Revised Edition. *Journal of the American Chemical Society*, 85(23), 3905–3905.
- [141] **Anyagou, I. D., Ejikeme, P. M., & Ibemesi, J. A.** (2010). Development of Thixotropic Coatings Using Dimerized Soybean Oil Fatty Acids: The Case of Polyamide of 1,2-Phenylene Diamine. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(2), 104–115.
- [142] **Alam, M., Ray, A. R., Ashraf, S. M., & Ahmad, S.** (2009). Synthesis, Characterization and Performance of Amine Modified Linseed Oil Fatty Amide Coatings. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(6), 573–580.
- [143] **de Andrade Souza, L., Moreira, D. R., Ricardo, N. M. P. S., Maier, M. E., Filho, P. R. C. F. R., Luna, F. M. T., & Petzhold, C. L.** (2023). Esters from castor oil functionalized with aromatic amines as a potential lubricant. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 100(2), 175–184.
- [144] **Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu.** (2006). *Dokuzuncu Kalkınma Planı-*

- [145] **Lentz, A.** (1945). *Asphaltic compound* (United States Patent Office, Patent number: 2375117).
- [146] **Doyle, P., River, R., Hook, E., Falls, C., & Hardman, H.** (1963). *Asphaltic cement* (United States Patent Office, Patent number: 3094427).
- [147] **Boykin R. O., Glendale, S., Osborne, P. S.** (1964). *Neutron Absorbing Asphaltic Composition* (3152093).
- [148] **Marzocchi A., Roberts, G. M., Bolen, C. E.** (1982). *Boron Modified Asphalts* (4360473).
- [149] **Arslan, D., Gürü, M., & Kürşat Çubuk, M.** (2012). Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens. *Fuel*, 102, 766–772.
- [150] **Toyen, D., & Saenboonruang, K.** (2017). Development of paraffin and paraffin/bitumen composites with additions of B₂O₃ for thermal neutron shielding applications. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54(8), 871–877.
- [151] **Bozdemir, M. G., Oruc, S., & Yesilcicek, H.** (2023). Physical and Microstructural Properties of New Boron Resin Compound Synthesized Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2).
- [152] **Liu, Z., Dibaji, A., Li, D., Mateti, S., Liu, J., Yan, F., Barrow, C. J., Chen, Y., Ariga, K., & Yang, W.** (2021). Challenges and solutions in surface engineering and assembly of boron nitride nanosheets. *Materials Today*, 44, 194–210.
- [153] **Lu, T., Wang, L., Jiang, Y., Liu, Q., & Huang, C.** (2016). Hexagonal boron nitride nanoplates as emerging biological nanovectors and their potential applications in biomedicine. *Journal of Materials Chemistry B*, 4(36), 6103–6110.
- [154] **Zhang, H., Liu, Y., Sun, K., Li, S., Zhou, J., Liu, S., Wei, H., Liu, B., Xie, L., Li, B., & Jiang, J.** (2023). Applications and theory investigation of two-dimensional boron nitride nanomaterials in energy catalysis and storage. *EnergyChem*, 5(6), 100108.
- [155] **Cheng, X., Blake, G. M., Brown, J. K., Guo, Z., Zhou, J., Wang, F., Yang, L., Wang, X., & Xu, L.** (2017). The measurement of liver fat from single-energy quantitative computed tomography scans. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery; Vol 7, No 3 (June 30, 2017): Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*.
- [156] **Solozhenko, V. L., Le Godec, Y., Klotz, S., Mezouar, M., Turkevich, V. Z., & Besson, J. M.** (2002). In situ studies of boron nitride crystallization from BN solutions in supercritical N-H fluid at high pressures and temperatures. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 4(21), 5386–5393.
- [157] **Ysiwata-Rivera, A. P., Hernández-Hernández, E., Cadenas-Pliego, G., Ávila-Orta, C. A., González-Morones, P., Jesús, J. A. V., Cuara-Díaz, E., Gallardo-Vega, C. A., & Mata-Padilla, J. M.** (2020). Effect of Modified Hexagonal Boron Nitride Nanoparticles on the Emulsion

Stability, Viscosity and Electrochemical Behavior of Nanostructured Acrylic Coatings for the Corrosion Protection of AISI 304 Stainless Steel. *Coatings*, 10(5), 488.

- [158] **Kostoglou, N., Polychronopoulou, K., & Rebholz, C.** (2015). Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*, 112, 42–45.
- [159] **Erkuş, Y., Kök, B., & Yılmaz, M.** (2022). The Effects of Iraq Natural Asphalt on Mechanical Properties of Bituminous Hot Mixtures. *Teknik Dergi*, 33(2), 11641–11660.
- [160] **Witczak, M. W.** (2007). Simple performance tests for permanent deformation of hot mix asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*.

