



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



FENOLİK REÇİNESİ KULLANILARAK MODİFİYE EDİLEN BİTÜMÜN REOLOJİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Polen ÇİFTÇİOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**FENOLİK REÇİNESİ KULLANILARAK
MODİFİYE EDİLEN BİTÜMÜN REOLOJİK VE
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Polen ÇİFTÇİOĞLU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Polen Çiftçioğlu tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Fenolik Reçinesi Kullanılarak Modifiye Edilen Bitümün Reolojik Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş vetarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

:

.....

Raportör Üye

:

.....

Üye

:

.....

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fenolik Reçinesi Kullanılarak Modifiye Edilen Bitümün Reolojik Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

.... / / 20..

İmzası

Polen Çiftçioğlu

ÖZET

FENOLİK REÇİNESİ KULLANILARAK MODİFİYE EDİLEN BİTÜMÜN REOLOJİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÇİFTÇİOĞLU, Polen

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perviz Ahmedzade

Aralık 2019, 126 sayfa

Karayolu mühendisliğinin en önemli ilgi alanlarından bir tanesi olan kaplama tasarımı artan karayolu taşımacılığı ile daha da önem kazanmaktadır. Bu durum karayolu mühendislerini, gerek stabilite gerekse performans yönünden daha iyi özellikler gösteren esnek kaplamalar tasarlamaya teşvik etmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda esnek kaplamalarda meydana gelen bozulmaları azaltmak ve kaplamaların performansının artırılması için bitümün değişik malzemelerle modifiye edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Tez çalışması kapsamında fenolik reçine ilavesinin bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, B1 ve B2 penetrasyona sahip saf bitümler, ağırlıkça %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında fenolik reçine ile modifiye edilerek, saf bitümler ile birlikte toplam 12 adet bitümlü bağlayıcı hazırlanmıştır. Hazırlanan bitümlü bağlayıcılar üzerinde yumuşama noktası, penetrasyon, dönel ince film halinde ısıtma etüvü, dönel viskozite, dinamik kayma reometresi, basınçlı yaşlandırma kabı ve çoklu gerilme sünme toplanma ve burulma sünme deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda bitümlü bağlayıcıların sertleşme, yaşlanma, viskozite gibi fiziksel özellikleri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Fenolik reçine, bitüm, reoloji, bitüm performans sınıfı, termoset.

ABSTRACT
INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL AND PHYSICAL
PROPERTIES OF BITUMEN MODIFIED BY PHENOLIC RESIN

ÇİFTÇİOĞLU, Polen

Ms in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

December 2019, 126 pages

Pavement design, which is one of the most important areas of interest in highway engineering, is becoming more important with increasing highway transport. This encouraged highway engineers to design flexible pavements with better properties both in terms of stability and performance. As a result of the studies, it has become necessary to modify the bitumen with different materials in order to reduce the deterioration of the flexible pavement and increase the performance of the pavement.

The aim of this thesis is to investigate the effect of phenolic resin addition on the physical and rheological properties of bitumen. In this respect, B1 and B2 penetration grade bitumen was modified with 2%, 4%, 6%, 8% and 10% phenolic resin and a total of 12 bitumen binders were prepared together with pure bitumen. Softening point, penetration, rolling thin film oven (RTFO), rotational viscosity (RV), dynamic shear rheometer (DSR), pressure aging vessel (PAV) and multiple shear creep recovery test (MSCR), were applied on the prepared bituminous binders. As a result of the experiments, physical properties of bituminous binders such as hardening, aging and viscosity were investigated. Then high temperature performance grade of the binders was determined.

Keywords: Phenolic resin, bitumen, rheology, performance grade of bitumen, thermoset

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin tez aşaması safhasın geldiğim zaman tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Perviz Ahmedzade ile gerçekleştirdiğimiz fikir jimnastikleri sonucunda yaptığımız literatür araştırması neticesinde “Fenolik Reçinesi Kullanılarak Modifiye Edilen Bitümün Reolojik Ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı tez konusunu belirleyerek tez önerisini bölüm aracılığı ile enstitüye ulaştırdık. Tez konusunun kabul edilmesine müteakip kullanılacak bitüm ve fenolik reçine katkısının teminini gerçekleştirdik.

Çalışma kapsamında öncelikle geleneksel deneylerini uygulayarak sonuçları tablolar halinde kaydettim. Bitüm numuneleri üzerinde Superpave Bağlayıcı Şartnamesi kapsamında yer alan deneyleri gerçekleştirdim. Tüm deneysel çalışmaların tamamlanmasının ardından sonuçları çizelge ve şekillere işleyerek yorumladım. Tüm bu işlemlerin ardında tez çalışmasını Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez kazım kurallarına uygun olarak sunuma hazır şekle getirdim.

İZMİR

.../.../20..

Polen Çiftçioğlu

İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	i
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxi
1.GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	2
2.1. Bitüm.....	2
2.1.2 Bitümün kimyasal yapısı	3
2.2 Bitümün Reolojik Özellikleri	8

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2.1 Düşük sıcaklık davranışı.....	9
2.2.2 Yüksek sıcaklık davranışı.....	10
2.2.3 Orta sıcaklık davranışı.....	11
2.2.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı	15
2.3 Bitüm Özelliklerinin Hizmet Aşamasındaki Bitümlü Karışımlar üzerindeki etkisi.....	17
2.3.1 Tekerlek izinde oturma.....	19
2.3.2 Yorulma çatlağı oluşumu.....	20
2.3.3 Termal çatlak oluşumu	21
2.4 Bitümlü Malzemelerin Modifikasyonu	22
3.TERMOSSETLERİN BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANILMASI	27
3.1 Fenolik Reçinelerin Özellikleri.....	27
3.2 Literatür Taraması.....	27
4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	33
4.1 Geleneksel Test Yöntemleri	33

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

4.1.1 Penetrasyon deneyi	33
4.1.2 Yumuşama noktası deneyi.....	35
4.1.3 Penetrasyon indeksi (PI).....	36
4.2. Bitüm Performans Sınıflamasının Geleneksel Sınıflandırmaya göre Üstünlükleri.....	37
4.3. Superpave Test Yöntemleri	39
4.3.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)	45
4.3.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi	47
4.3.3 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi	50
4.3.4 Dönel viskozite (RV) deneyi	58
4.4 İleri Test Yöntemleri.....	61
4.4.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi (Ana Eğri)	61
4.4.2 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) testi	62
5. TERMOSET KATKILARLA BİTÜM MODİFİKASYONU	66
5.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	66
5.2. Fenolik Reçineli Bağlayıcıların Hazırlanması.....	67

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI	69
6.1 Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları.....	69
6.2 Saf ve Fenolik Reçine Katkılı Bitümlerin Dönel İnce Film Etüvü ile Yaşlandırılması Sonucuna İlişkin Deney Sonuçları	74
6.3 Fenolik Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlerin Dönel Viskozimetre (RV) Cihazıyla Viskozitelerinin Belirlenmesi	80
6.4 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Cihazı Kullanılarak Saf ve Fenolik Reçine ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi	84
6.5 Saf ve Fenolik Reçine ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin PAV (Basıncılı Yaşlandırma Kabı) ile Yaşlandırılmasının Ardından Dinamik Kayma Reometresi ile (DSR) Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi	92
6.6 Fenolik Reçine Katkılı Bağlayıcıların Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme (MSCR) Deneyiyle Elastik Özelliklerinin Tespit Edilmesi.....	95
6.7 RTFOT' la yaşlandırılmış fenolik reçine ilaveli bitümlü bağlayıcıların DSR cihazı ile MSCR metodu kullanılarak performans (PG plus) sınıflarının belirlenmesi	100
6.8 Fenolik Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların DSR Cihazı İle Farklı Frekans Deney Sonuçlarının İncelenmesi	103
7. BULGULAR.....	111

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

8. SONUÇLAR 116

KAYNAKLAR DİZİNİ 119

TEŞEKKÜR 125

ÖZGEÇMİŞ 126





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bitümlü bağlayıcıların temel yapısı.	5
2.2 Bitümün a) yapısı ve b) bileşenleri.	5
2.3 Asfaltinin kimyasal yapısı	6
2.4 Farklı sertlikte ki bitümlerin kimyasal yapısı.....	6
2.5 Aromatiklerin kimyasal yapısı	7
2.6 Doygun hidrokarbonların kimyasal yapısı	7
2.7 Bitümlü bağlayıcıların farklı süre ve sıcaklıklardaki davranışı.....	8
2.8 Bitümün visko-elastik davranışı.	9
2.9 Elastik malzemelerde yük ve zamana bağlı geçici deformasyon oluşumu	10
2.10 Elastik malzemelerde yük-deformasyon ilişkisi	10
2.11 Bitümün moleküler düzeyde akışı.	11
2.12 Viskoz malzemelerde yük ve zamana bağlı kalıcı deformasyon oluşumu. ..	11
2.13 Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli.	12
2.14 Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi	13
2.15 Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi	144

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.16 Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi.	14
2.17 Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi.	16
2.18 Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresinde yaşlanması.	17
2.19 Bitümlü karışımda farklı sıcaklıklardaki hareketler.....	18
2.20 Bitümün üstyapı bozulmalarına etkisi.	19
2.21 Esnek kaplamada meydana gelen tekerlek izi oluşumu.	20
2.22 Hem esnek kaplamada hem de alt tabakalarda meydana gelen tekerlek izi oluşumu.	20
2.23 Şiddetlerine göre timsah sırtı çatlaklar a) düşük b) orta c) yüksek.	21
2.24 Şiddetlerine Göre Enine Çatlaklar a) Düşük b)Orta c) Yüksek.	21
2.25 İdeal bitüm modifikasyonu.	24
4.1 Penetrasyon deney aleti.....	35
4.2 Yumuşama noktası deneyi aleti	36
4.3 Farklı bağlayıcıların sıcaklık- viskozite değişim grafiği.	39
4.4 Yol esnek üst yapısı bozulma tipine göre yapılan performans sınıflama deneyleri.	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.5 RTFO deney cihazı	45
4.6 RTFO deney cihazında kullanılan cam şişeler	46
4.7 PAV deney aleti.....	48
4.8 Gaz alma (degas) cihazı	49
4.9 DSR cihazının görünümü	50
4.10 DSR cihazının çalışma prensibi.....	51
4.11 Kompleks kayma modülü ve bileşenleri	52
4.12 Kompleks kayma modülü bileşenleri.....	53
4.13 Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi	53
4.14 Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi.	54
4.15 Kayma gerilmesi, deformasyon ve faz açısı ilişkisi	54
4.16 25 mm çapındaki DSR numuneleri	58
4.17 Dönel viskozimetre cihazı ve sıcaklık ünitesi	59
4.18 RV cihazının çalışma prensibi.	59
4.19 Logaritmik viskozite- sıcaklık eğrisi	60
4.20 MSCR deneyi deformasyon - zaman eğrisi.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Fenolik reçine katkısı	66
5.2 Silverson L5M karıştırma aleti	67
6.1 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B1 bitümlü bağlayıcı geleneksel deney sonuçları	71
6.2 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B2 bitümlü bağlayıcı geleneksel deney sonuçları	73
6.3 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği	76
6.4 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği	76
6.5 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait geleneksel deney sonuçları	79
6.6 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait geleneksel deney sonuçları	80
6.7 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi.....	81
6.8 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi.....	82
6.9 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

6.10 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri	88
6.11 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri	89
6.12 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri	89
6.13 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B1 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık - tekerlek izi parametresi ilişkisi.....	90
6.14 Saf ve fenolik reçine katkılı RTFO ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık- tekerlek izi parametresi ilişkisi	90
6.15 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B2 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık - tekerlek izi parametresi ilişkisi.....	91
6.16 Saf ve fenolik reçine katkılı RTFO ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık- tekerlek izi parametresi ilişkisi	91
6.17 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcılarının sıcaklık- yorulma çatlağı parametresi ilişkisi.....	92
6.18 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcılarının sıcaklık- yorulma çatlağı parametresi ilişkisi.....	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

6.19 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 30° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi.....	106
6.20 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 60° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi.....	106
6.21 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların 30° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi.....	109
6.22 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların 60° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi.....	110



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bitümlerin Elementsel Analiz Sonuçları	4
2.2. Bitüm kimyasal bileşimi ile üstyapı performansı arasındaki ilişki	4
2.3 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	25
2.4 Bitüm modifikasyon tipleri	26
4.1 Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları	41
4.2 SUPERPAVE bağlayıcı deneylerinde kullanılacak numuneler	42
4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesine ilişkin deneyler ve şartname kriterleri	43
4.4 Bağlayıcı sınıflarına PAV deney sıcaklıkları	49
4.5 Trafik hızlarına eşdeğer frekanslar	62
4.6. AASHTO MSCR standartları	65
5.1 Bağlayıcı türleri ve özellikleri	66
6.1 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuçları	70
6.2 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuçları	73

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.3 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı deney sonuçları.....	75
6.4 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı deney sonuçları.....	75
6.5 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	77
6.6 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri.....	77
6.7 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri	78
6.8 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	78
6.9 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları.....	83
6.10 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları.....	83
6.11 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları	85
6.12 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları	86

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.13 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcıların performans sınıfı değerleri.....	92
6.14 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcıların performans sınıfı değerleri.....	95
6.15 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyi J_{nr} değerleri.....	97
6.16 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyi J_{nr} değerleri.....	97
6.17 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyi R değerleri.....	98
6.18 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyi R değerleri.....	98
6.19 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerleri.....	99
6.20 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerleri.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

6.21 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyine göre yüksek sıcaklık PG sınıfları.....	101
6.22 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların MSCR deneyine göre yüksek sıcaklık PG sınıfları.....	101
6.23 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 ve B2 bitümlü bağlayıcılarının 25 °C’de MSCR için $G^* \sin \delta$ değerleri	102
6.24 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların farklı frekans verileri.....	104
6.25 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların farklı frekans verileri.....	108

xxx



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
τ	Kayma gerilmesi
F	Uygulanan kuvvet
A	Plaka alanı
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı
η	Viskozite
E	Elastisite modülü
ε_{E1}	Elastik deformasyon
$\varepsilon_{\eta 1}$	Kalıcı deformasyon
G^*	Kompleks kayma modülü
G''	Depolama modülü
G'	Kayıp modülü
δ	Faz açısı
$G^*/\sin \delta$	Tekerlek izi parametresi
ZSV	Sıfır kayma viskozitesi
a_T	Kaydırma faktörü
C_1, C_2	Ana eğri denklem sabitleri
ΔH	Aktivasyon enerjisi
ω	Açısal frekans
η_0^*	Sıfır kayma viskozitesi
R	Ortalama elastik geri dönme
J_{nr}	Geri dönmeyen sünme uygunluğu
$J_{nr,diff}$	İki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uygunluğu farkı
R_{diff}	İki yükleme arasındaki geri kazanılan deformasyon farkı
$G^*\sin \delta$	Yorulma Çatlağı Parametresi

Kısaltmalar

KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	Bitümlü sıcak karışım
SBS	Stiren-butadien-stiren
EVA	Etilen Vinil Astatat
SBR	Styrene butadiene rubber
SEBS	Styrene ethylene butadiene styrene

PVC	Polivinil Klorür
FR	Fenolik reçine
ASTM	Amerikan Test ve malzeme kurumu
PI	Penetrasyon İndeksi
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
AC	Asfalt Çimentosu
CA	Aktif Karbon
RV	Dönel viskozimetre
DSC	Fark Tarama Kalorimetresi
DSR	Dinamik kayma reometresi
LVE	Lineer viskoelastik limit
PAV	Basınçlı yaşlandırma kabı
BBR	Kiriş eğme reometresi
MSCR	Çoklu gerilme sünme-toparlanma deneyiyle
NCHRP	Ulusal ortak karayolu araştırma programı
PG	Performans sınıfı
DTT	Doğrudan Çekme Deneyi
AASHTO	Amerikan Devlet karayolu ve taşımacılık birliği



1.GİRİŞ

Tez çalışması kapsamında, fenolik reçinenin bitümlü bağlayıcıların reolojik ve fiziksel özellikleri üzerinde ne gibi etkiler yarattığı tespit etmek amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, fenolik reçinenin bir türevi olan koresin reçinesi kullanılmıştır. Fenolik reçine malzemesi, B 50/70 ve B 160/220 penetrasyona sahip bitümlerin her birine bitüm ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Bu şekilde beşer adet fenolik reçine katkı B 50/70 ve B 160/220 bağlayıcı elde edilmiştir. Fenolik reçine malzemelerin bitüme ilave oranları literatür çalışmaları sonucunda belirlenmiştir.

Hazırlanan fenolik reçine katkı bağlayıcılara, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, dönel ince film halinde ısıtma (RTFO) deneyi ile bitümlerin kısa süreli yaşlandırılması işlemleri, dönel viskozite (RV) ile bitümlerin kıvam değerlerinin tespiti, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yardımı ile bitümlerin uzun süreli yaşlandırılması işlemleri, dinamik kayma reometresi (DSR) cihazlarıyla bitümlü bağlayıcıların PG sınıflarının tespit edilmesi çalışmaları yapılmıştır. Fenolik reçine katkı bağlayıcıların deney sonuçları ile saf 50/70 ve saf 160/220 bitümlere ait deney sonuçları karşılaştırılarak fenolik reçine ilavesinin bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirilerek, fenolik reçine katkısının bitümlü bağlayıcılar içerisindeki ideal kullanım oranları belirlenmiştir. İdeal katkı oranlarına sahip bağlayıcılar üzerinde DSR farklı frekans deneyleri ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyleri gerçekleştirilerek, bağlayıcıların reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, uygulama safhasında bitüm ile birlikte kullanılması mümkün olan fenolik reçine ilavesinin miktarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

2.GENEL BİLGİLER

Gelişen ve değişen dünya koşulları incelendiğinde, bir ülkenin sahip olduğu ulaşım alt yapısı ve ulaştırma sistemleri, orada yaşayan toplumun ekonomik yapısı, gelişmişliği ve yaşam kalitesi gibi birçok dinamiğinin belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Dünya üzerindeki nüfus ve ticari hareketliliğin çok olduğu ülkeler incelendiğinde ulaştırma sistemlerinin son derece gelişmiş olduğu görülmektedir. Yük ve yolcu taşımacılığı göz önüne alındığında, ulaştırma sistemleri içerisinde karayollarının önemli bir konumda olduğu görülmektedir. Son yıllarda tıpkı diğer gelişmekte olan ülkeler gibi Türkiye' de de yük ve yolcu taşımacılığı hızlı bir şekilde artmaktadır. Yük ve yolcu taşımacılığındaki ihtiyaçlar doğrultusunda karayolu alanında yapılan yatırımlarda artmaktadır. Dünya üzerindeki karayolu tasarım en kesitleri incelendiğinde kaplama tabakası olarak esnek (asfalt) ve rijit (beton) kaplama türleri tercih edilmektedir. Ancak, Dünya genelinde birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de karayolları inşaatının kaplama tabakasında genel olarak esnek kaplama tercih edilmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

Esnek üstyapı tabakası, yaya ve araç trafiğine uygun yuvarlanma yüzeyi sağlayarak trafikten gelecek yükleri alt temel, temel vb. gibi karayolu altyapısını oluşturan tabakalara aktaran tabakadır. Esnek üstyapı tabakaları kaba, ince, filler türü agregalar ile bitümlü malzemelerin belirli oranlarla karıştırılması ile elde edilirler. Esnek üst yapı tabakası, trafik güvenliğinin sağlanabilmesi için; trafik yüklerinin yanında sıcaklık, su ve don gibi ilkim koşullarına karşıda yolun stabilitesini korumalıdır (Umar ve Ağar, 1982).

2.1. Bitüm

Bitüm,"American Society fot Testing and Materials" (ASTM) Amerikan Malzeme ve Test Birliği tarafından asfaltlar, katranlar, ziftler ve asfaltitler gibi ağır hidrokarbonlardan oluşan ağır moleküllü bir malzeme olarak açıklanmaktadır. ASTM bu tanımlamasında bitümü, siyah veya koyu renkli, doğal ya da üretilmiş, yeryüzünde katı, yarı katı veya viskoz olarak bulunabilen

bağlayıcı madde olarak açıklamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar, katran ve asfalt olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Asfaltlarsa doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar (rafineri asfaltları) olmak üzere iki gruba ayrılabilirler (Orhan, 2005).

Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile ham katran olarak elde edilmektedirler. Katranların yol inşaatında esnek üst yapı elemanı olarak kullanılabilmeleri için ikinci bir damıtma işleminden geçirilmeleri gerekmektedir (Whiteoak, 2004).

Asfaltların ASTM tarafından yapılan tanımlamasında koyu kahve ile siyah arasında bir renklenme gösterdiği, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı özellik gösteren bitümün asfaltın ana maddesi olduğu tanımlanmaktadır (İlcalı, 2001).

Petrolün rafinerilerde damıtılmasıyla oluşan yapay petrol asfaltlar Asfalt çimentosu (AC) olarak da isimlendirilebilirler. Asfalt çimentoları yol esnek üst yapılarında kullanılabilen petrol asfaltları olmakla birlikte katı veya yarı katı olarak elde edilmektedir (Tunç, 2007).

2.1.2 Bitümün kimyasal yapısı

Çoğunlukla ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen bitüm kompleks bir yapıya sahiptir. Bitüm, fazla miktarda hidrokarbon ve daha düşük miktarda oksijen, nitrojen, sülfür elementlerin yanı sıra heterosiklik bileşikler içeren kompleks bir kimyasal yapıdan oluşmaktadır.

Bitüm içersinde bu elementlere ek olarak, demir, nikel, kalsiyum ve vanadyum gibi metaller ve inorganik tuzlarda bulunabilmektedir. Bitümlerin kimyasal bileşimleri ve içerisinde bulunan elemanların oranları (ağırlıkça) elde edildikleri rafineriye göre farklılıklar göstermekle birlikte genel olarak Çizelge 2.1 de gösterilmiştir (Read and Whiteoak, 2003).

Çizelge 2.1 Dört farklı bitümün kimyasal kompozisyonu (Altaş, 2002).

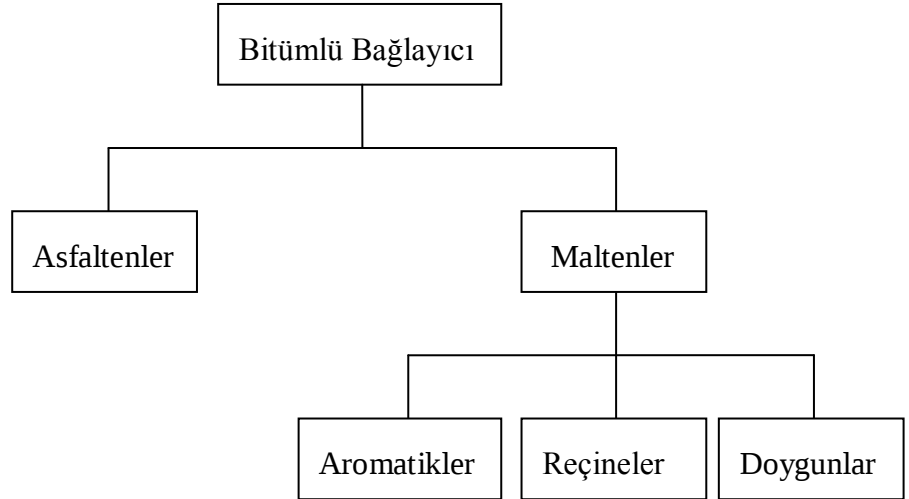
Element Adı	Bitüm Numunesi			
	A	B	C	D
Karbon (%)	83,77	85,78	82,09	86,77
Hidrojen (%)	9,91	10,19	10,45	10,93
Azot (%)	0,28	0,26	0,78	1,1
Kükürt (%)	5,25	3,41	5,43	0,99
Oksijen (%)	0,77	0,36	0,29	0,2
Vanadyum (milyonda)	180	7	1380	4
Nikel (milyonda)	22	0,4	109	6

Bitümün kimyasal kompozisyonu, yol esnek üst yapı kaplama performansı üzerinde son derece etkilidir. Bitümün içerisinde bulunan elementler ile yol esnek üst yapı kaplamasında meydana gelen bozulma türleri arasında ki ilişki aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bitüm kimyasal bileşimi ile üstyapı performansı arasındaki ilişki (Kennedy et. al 1994).

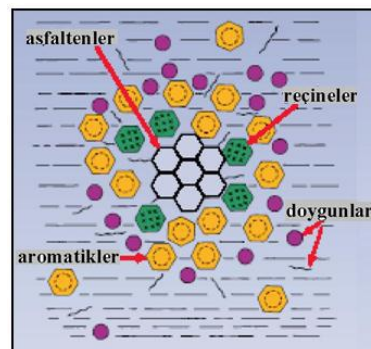
Bitüm Özellikleri	Üstyapı bozulma türleri				
	Termal Çatlama	Yorulma Çatlağı	Kalıcı Deformasyon	Adhezyon ve Su hassasiyeti	Yaşlanma
Vandanyum/ Nikel Oranı	Az önemli	Çok Önemli	Az önemli	Az önemli	Çok Önemli
Sülfür İçeriği	Çok Önemli	Az önemli	Önemsiz	Önemsiz	Önemli
Sıcaklık Hassasiyeti	Çok Önemli	Az önemli	Çok Önemli	Önemsiz	Az önemli
Nitrojen İçeriği	Önemsiz	Çok Önemli	Önemsiz	Çok Önemli	Önemsiz

Bitüm, farklı molekül ağırlıklarına sahip hidrokarbonlardan oluşan, kimyasal kompozisyonu çok karmaşık bir karışımdır. Bu hidrokarbonlarsa n-heptan' da çözülebilme özelliğine göre ikiye ayrılmaktadır. N-heptan' da çözülebilen hidrokarbonlar malten, n-heptan' da çözünmeyen kısmına da asfalten adı verilir. Maltenleri kendi içersinde kısımlara ayırmak gerekirse; aromatikler, reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluştuğu görülebilmektedir (Hofko et. al 2016).



Şekil 2.1 Bitümlü bağlayıcıların temel yapısı (Tunç, 2004).

Esasen karbon ve hidrojenden oluşan asfaltenler gri-siyah renkte olup n-heptan' da çözülmezler. Asfaltenler bitümün %5 ila % 25'ini oluştururlar. Az miktarda oksijen, azot ve kükürt içeren aromatikler, koyu kahve viskoz yağ şeklindedir. Bitümün %40 ile %60'ını oluşturarak, asfaltenlerin yayılmasını sağlarlar. Reçineler n-heptan' da çözünebilir. Açık siyah renginde katı veya yarı katı kıvamdadırlar. Bitümün ağırlıkça %20 ile %30'unu oluştururlar. Doymuş hidrokarbonlar bitümün %5 ile %20'sini oluştururlar. Hidrokarbonlar renksiz yağlı yapıda olup parafinik ve naftanik yağ halkaları içerirler (Whiteoak and Read, 2003).



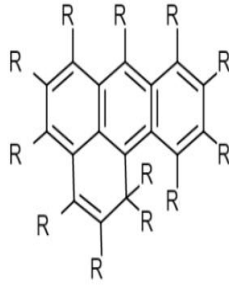
(a)

Bitüm	Asfaltenler	15%
	Reçineler	20%
	Aromatikler	60%
	Doygunlar	5%

(b)

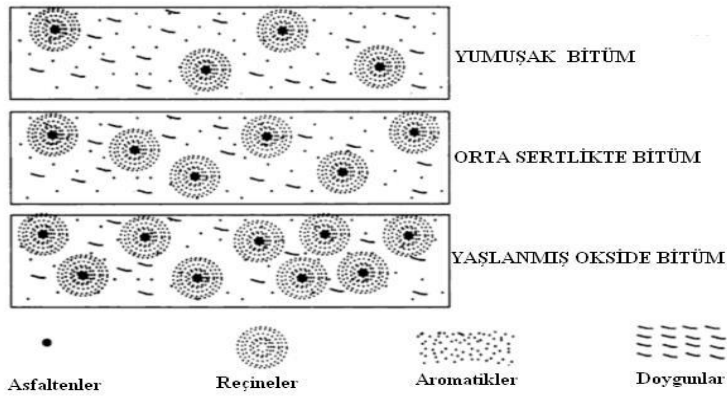
Şekil 2.2 Bitümün a) yapısı ve b) bileşenleri (Whiteoak and Read, 2003).

Asfaltlenler genellikle oldukça yüksek molekül ağırlıklı, polar ve kompleks aromatik maddelerdir. Asfaltlen fazı, sahip olduğu özelliklerden dolayı bitümlü malzemelerin reolojik özelliklerini önemli derecede etkiler. Bitüm içerisinde ki asfaltlen miktarının artmasıyla, bitüm sertleşerek penetrasyon değeri düşer ve yumuşama noktasın değeri artar. Bu şekilde daha viskoz bir malzeme elde edilir. Düşük miktarda asfaltene sahip bitümler ise daha yumuşak ve dolayısıyla düşük viskozite değerine sahip olmaktadır (Malkoç, 1996).



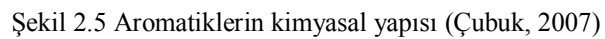
Şekil 2.3 Asfaltlenin kimyasal yapısı (ubuk, 2007)

Şekil 2.4'te açıkça görüldüğü gibi sert bitümlerde asfaltlen miktarının daha fazlayken yumuşak bitümlerde asfaltlen miktarı daha azdır. Şekil 2.4 detaylı şekilde incelendiği zaman yaşlanma sürecindeki bitüm içersinde yer alan aromatikler ve asfaltlenlerin çevresini saran reçinelerin havayla olan reaksiyonları sonrasında asfaltlenler oluşmakta bu nedenle bitüm kompozisyonunda asfaltlenlerin oranı zamanla artmaktadır (Nicholls, 1998).



Şekil 2.4 Farklı sertlikte ki bitümlerin kimyasal yapısı (Nicholls, 1998)

Asfalt çimentosunun bileşiminde bulunan düşük molekül ağırlıklı naftanik aromatik bileşikler aromatikler diye adlandırılmaktadır. Aromatikler, düşük molekül ağırlığına sahip olmaları nedeniyle asfalttenlerin yayılmasını sağlarlar. Diğer yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlara göre daha yüksek çözünme özelliğine sahiptirler (Malkoç vd., 1996).

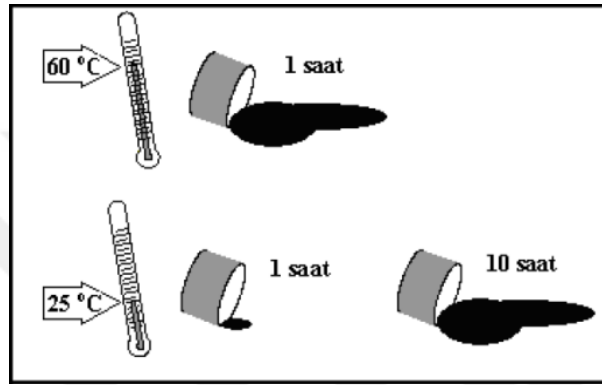


The image shows two chemical structures. The top structure is cyclohexane, a six-membered carbon ring with two hydrogen atoms attached to each carbon. The bottom structure is butane, a four-carbon chain with hydrogen atoms attached to each carbon to satisfy the four bonds per carbon.

Şekil 2.6 Doygun hidrokarbonların kimyasal yapısı (Çubuk, 2007)

2.2 Bitümün Reolojik Özellikleri

Bitüm, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme süresine ve hava sıcaklığına bağlı olarak visko-elastik davranış gösteren termo-plastik bir malzemedir. Bitümün davranışı sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olduğundan dolayı aynı trafik yüklerine maruz kalmasına rağmen trafik yüklerinin farklı sürelerde uygulanmasından dolayı bitüm farklı özellikler sergileyecektir.

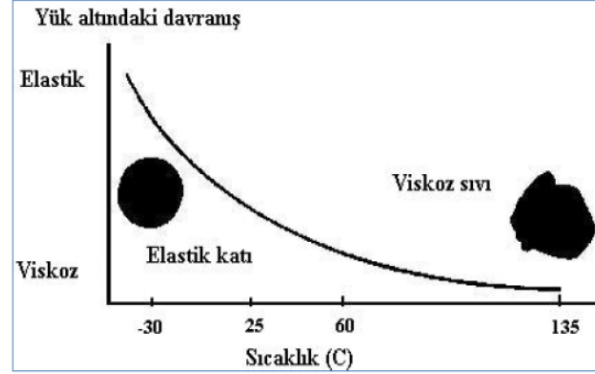


Şekil 2.7 Bitümlü bağlayıcıların farklı süre ve sıcaklıklardaki davranışı (Altaş, 2002; McGennis, et al., 1995)

Şekil 2.7’de açıkça görüldüğü üzere 10 saat boyunca 25°C sıcaklığa maruz kalmış bitüm ile 1 saat boyunca 60°C sıcaklığa maruz kalmış bitümün akış miktarları aynı olmaktadır. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık ve uzun sürede yapmış olduğu davranış ile yüksek sıcaklık ve kısa sürede göstermiş olduğu davranış, birbirine benzer olmaktadır (Geçkil, 2008).

Bitüm yukarıdaki örnekten de anlaşılacağı üzere, yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Başka bir deyişle bitüm, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterir. Şekil 2.8’ den de anlaşılacağı üzere yükleme süresi ve sıcaklık, bitümün rijitliğine doğrudan etki etmektedir. bitümün bu reolojik özelliği

bitümlü karışımların da visko- elastik özellik göstermesine neden olmaktadır (Geçkil, 2008).

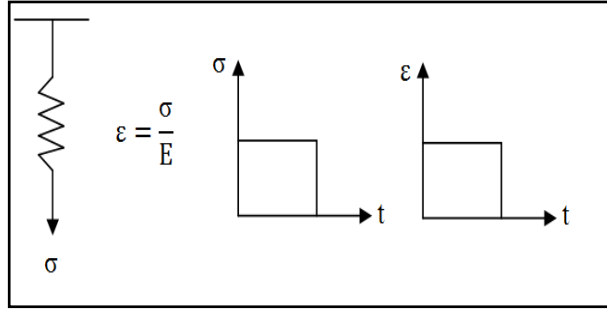


Şekil 2.8 Bitümün visko-elastik davranışı (McGennis et al., 1995; The Asphalt Institute, 1996; Zeng and Isacsson, 1997).

2.2.1 Düşük sıcaklık davranışı

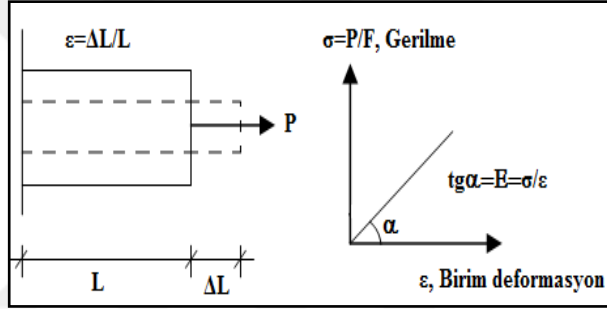
Bitümlü bağlayıcılar, yüksek hızlarda hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında veya soğuk hava koşullarında elastik bir katı gibi davranış gösterir. Bu tip durumlara maruz kalan bitümlü bağlayıcılara taşıma kapasitesinden daha fazla trafik yüklemesi yapıldığında, bitümlü bağlayıcı bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Bu nedenden dolayı düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı özelliği gösterse de, asfalt çimentosu aşırı yüklenmeden dolayı kırılgan özellik göstererek çatlayabilir. Bu sebeplerden dolayı esnek üst yapı kaplamalarında soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Söz konusu çatlakların görülmesine düşük sıcaklık sebebiyle kaplama yüzeyinin büzölmeye çalışmasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur (Altaş, 2002; Dinç, 1999).

Şekil 2.9' da gösterildiği gibi bir elastik malzeme üzerine herhangi bir yük uygulandığında, malzeme üzerindeki deformasyon yük miktarı ile doğru orantılı olarak artar ancak malzeme üzerindeki yük kaldırıldığında deformasyon ortadan kalkarak malzeme eski haline geri döner (Altaş, 2002; Dinç, 1999).



Şekil 2.9 Elastik malzemelerde yük ve zamana bağlı geçici deformasyon oluşumu

Bu tür malzemeler Şekil 2.10'da gösterilen yük-deformasyon arasında lineer bir ilişki bulunan Hooke kanununa uyarlar.



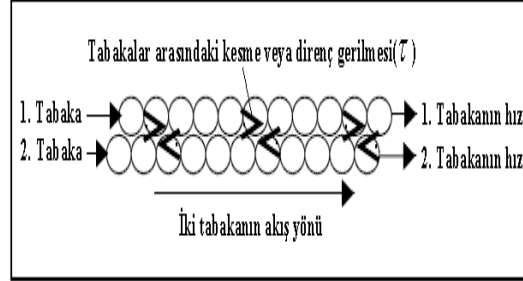
Şekil 2.10 Elastik malzemelerde yük-deformasyon ilişkisi (Uncu, 2017).

2.2.2 Yüksek sıcaklık davranışı

Sıcak hava koşullarına ya da park halindeki, yavaş hareketli ve/veya ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yük koşullarına maruz kalan esnek üst yapı kaplamalarına sahip yollarda, bitümlü bağlayıcı viskoz davranır. Bu durumda yol esnek üst yapısını oluşturan bitümlü sıcak karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Sıcak bitümün yavaş akış hareketi güçlü bir mikroskop altında incelenirse, molekül tabakalarının Şekil 2.11' de gösterildiği gibi birbirlerinin üzerinden kayarak ayrıştığı görülebilir.

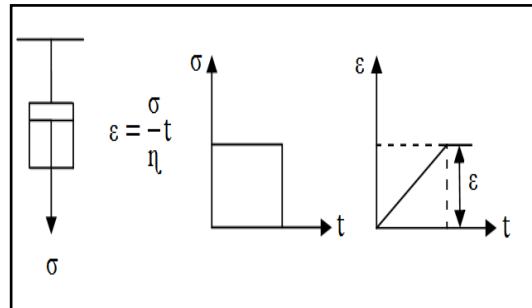
Molekül tabakaları arasındaki sürtünme ya da kayma direnci kuvveti, birbirleri üzerinde kayan tabakaların bağıl hızı ile ilgilidir. Bu direnç üstteki

tabaka alttaki tabakayı ileri doğru çekmeye çalışırken alttaki tabaka üsttekini yerinde tutmaya çalışmasıyla tanımlanmaktadır (Dinç, 1999).



Şekil 2.11 Bitümün moleküler düzeyde akışı (Berkers, 2005; Fitzgerald, 2000).

Viskoz malzemelerin gösterdiği bu davranış yağ kutusu modeli ile açıklanmaktadır. Viskoz malzemelere yük uygulandığında, malzemede deformasyon başlar ve yükün uygulama süresince deformasyon artmaya devam eder. Malzeme üzerine uygulanan yük kaldırıldığında, malzemede meydana gelen deformasyon kalkmaz ve Şekil 2.12' de gösterildiği şekilde kalıcı deformasyon oluşur. Viskoz davranış sergileyen bitüm İdeal bir sıvı gibi hareket eder. İdeal sıvı haldeki malzemeler şekil değiştirdikleri zaman enerji depolayamazlar, şekil değişimleri geri dönüşümsüz ve kalıcı olur (Choquet, 1994).

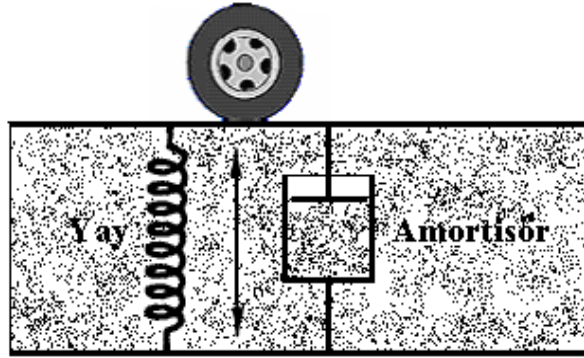


Şekil 2.12 Viskoz malzemelerde yük ve zamana bağlı kalıcı deformasyon oluşumu (Uncu, 2017).

2.2.3 Orta sıcaklık davranışı

Dünya geneli incelendiğinde iklim koşullarının ne aşırı soğuk nede aşırı sıcak olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenden dolayı bitümlü bağlayıcı, hem

kıvamlı sıvı hem de elastik katı özelliklerini birlikte sergiler. Bu davranış şekli nedeniyle bitüm, esnek üstyapı kaplamalarında kullanmak için mükemmel bir yapışkan malzemeyken gösterdiği özellikler nedeniyle bir o kadar da anlaşılması ve açıklanması zor bir malzemedir. Bitüm bu özelliklerinden dolayı viskoelastik bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bitüm ısıtıldığı zaman, kolay şekil alabildiğinden dolayı düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edebilecek şekilde karıştırmaya uygun bir malzemedir. Bu durum agrega yüzeyinin bitümle kaplanmasına ve kolay sıkıştırılabilmesine olanak sağlamaktadır. Soğuduğunda viskoz bir katı gibi davranan bitüm agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir.. Bitümün yük etkilerine karşı gösterdiği bu davranış kavramsal olarak Şekil 2.13'de gösterildiği gibi “yay-amortisör” modeliyle açıklanabilir.



Şekil 2.13 Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli (Avcı, 2009).

Trafik yüklerine maruz bir bitümlü sıcak karışımda bitümün ilk elastik tepkisi yay tarafından temsil edilirken, amortisör ise bitümün özellikle sıcak havalardaki daha yavaş viskoz tepkisini sembolize eder. Bitüm bazı durumlarda plastik davranış gösterse de çoğu durumda trafik yükleri altında elastik veya viskoelastik malzeme gibi verir. Yani yol esnek üst yapısında meydana gelen deformasyonlar, kaplamaya etkiyen yüklerin şiddetine göre zamanla eski durumuna gelir veya kısmen kaybolur (Avcı, 2009). Viskoelastik malzemelerin davranışlarını incelemek için; Maxwell ve Kelvin modelleri kullanılmaktadır.

Maxwell modelinde Şekil 2.14'te gösterildiği gibi birbirine seri olarak bağlanmış bir yay ve yağ kutusu bulunmaktadır. Maxwell modelinde ilk kuvvet

uygulanmasının ardından meydana gelen ani ve elastik deformasyon yay tarafından temsil edilmektedir. Uygulanan kuvvetin devam etmesi ile deformasyon sonsuz viskoz özellikteki yağ kutusuna aktarılır. Model üzerindeki yüklemenin kaldırılmasının ardından yay eski haline döner, ancak yağ kutusunun hareketi durmasına rağmen oluşan değişim geri dönmez. Bu durum yol esnek üst yapısı üzerinde meydana gelen kalıcı deformasyonu temsil etmektedir (Mezger, 2011).

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değişirme
$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E + \sigma / \eta$		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

Şekil 2.14 Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi(Öner, 2016).

Viskoelastik davranışı temsil eden bir diğer model ise Kelvin modelidir. Kelvin modelinde ise, Şekil 2.15' te gösterildiği şekilde yay ve yağ kutusu bu kez paralel olarak bir araya gelmektedir. Bu modelde sisteme yükleme uygulandığında deformasyon miktarı yavaş yavaş artarken, yük kalktığında ise deformasyonda yayın etkisiyle hızlı bir azalma gözlenmektedir.

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değiştirme
$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E$ $\varepsilon_2 = \sigma_2 / \eta$ $\eta \dot{\varepsilon} + E\varepsilon = \sigma$		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir

Şekil 2.15 Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi (Öner, 2016).

Bitümlü sıcak karışımların viskoelastik davranışını modellemekte bu iki modelin yetersiz kalmasından dolayı Maxwell ve Kelvin modelleri birlikte göz önünde bulundurularak birbirlerine Şekil 2.16' da ki gibi seri olarak bağlanmıştır. Oluşturulan bu modele Burger modeli olarak tanımlanmıştır. Model içerisinde yer alan baştaki yay ani elastik deformasyonu, birbirine paralel olarak bağlanmış yay ve yağ kutusu zamana bağlı deformasyonu (viskoz ve gecikmiş elastik deformasyonu), sondaki yağ kutusu ise viskoz (kalıcı)deformasyonu temsil edecek şekilde dört farklı elemandan oluşturulmuştur.

Denklem	Gösterim	Zaman Bağımlılığı	Şekil Değiştirme
$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)$ $+ \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right]$ $t_0 = \frac{\eta_0}{E_0}$ $t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$		Zamanla bağımlı	Geri dönebilir / Geri dönebilme yok

Şekil 2.16 Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi (Öner, 2016).

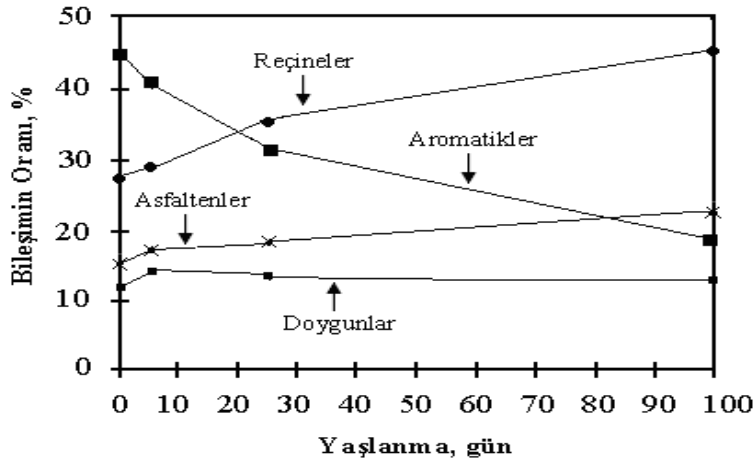
Bu tür reolojik modeller tam olarak bitümün reolojik davranışlarını temsil edememektedir. bu modeller sadece viskoz ve elastik deformasyonların oluşumu

ve gerilme deformasyon zaman ilişkisi ile ilgili genel bir fikir vermektedir (Tunç, 2007).

2.2.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı

Yol esnek üst yapı kaplamalarının hizmet ömürlerini bozulmadan tamamlamaları istenir. Bu durumun gerçekleşmesi ise bitümün depolama, üretim ve hizmet ömrü boyunca aşırı derecede sertleşmemesi gerekir. Ancak, bitüm organik bir malzeme olduğundan dolayı, oksijen, ultraviyole ışınlar ve sıcaklık değişimleri gibi atmosferik dış etkenlerden etkilenecek sertleşme eğilimi göstermektedir. Bitüm söz konusu atmosferik etkenler nedeniyle yavaş yavaş oksidasyona uğrar. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterir. 100°C'nin üzerindeki her 10°C' lik artış bitümün oksitlenme veya oksidasyon oranını iki katına çıkarmaktadır. Bitümün yaşlanmasında en önemli etken olan oksidasyon, bitümün daha gevrek olmasına ve yaşlanma sürecinin başlamasına neden olur. Bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha kırılgan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Bu sertleşme nedeniyle eski bitümlü sıcak karışımlar çatlamaya karşı daha hassas olurlar (Dinç, 1999; Whiteoak and Read, 2003).

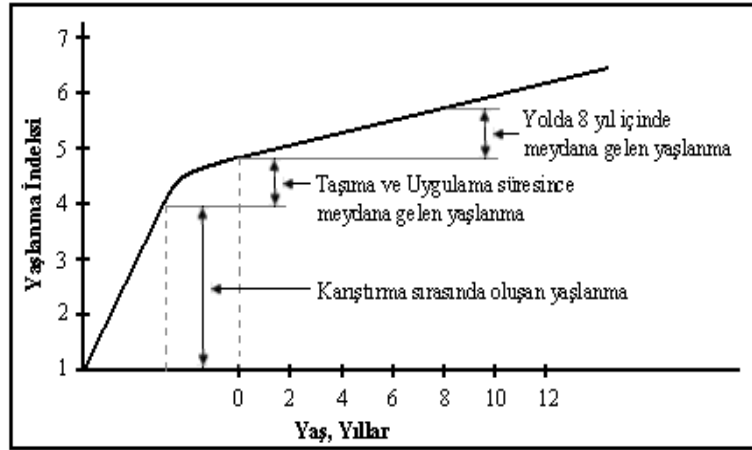
Bitüm içerisindeki uçucu bileşenlerin, sıcaklık etkisi ve havayla temas ederek buharlaşması sonucunda bitüm içerisindeki bileşenlerin oranları da değişmektedir. Şekil 2.17'de asfalt çimentosunun 85°C sıcaklıkta 100 günlük süre içerisinde meydana gelen yaşlanma neticesinde, farklı sürelerde alınan numunelerdeki bileşenlerinin % olarak miktarları verilmiştir. Bitümün yaşlandığı süre boyunca , bünyesindeki asfalt ve reçinelerin yüzdeleri artarken, aromatikler azalmakta ve doygunlar ise yaşlanma süresince fazla etkilenmemektedir (Alqudah, 2016).



Şekil 2.17 Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi (Zeng and Isacsson, 1997).

Uygulamada, bitüm sertleşmesinin büyük bir kısmı agrega ile bitümün karıştırılması sırasında, daha az bir kısmı ise karışımın depolanması ve taşınması sırasında, başka bir değişle sıcak karışım yola serilmeden önce meydana gelir. Bitümlü sıcak karışımların hazırlık aşamaları incelendiğinde, asfalt çimentosu agregaya katılarak belirli bir süre yüksek sıcaklıklarda karıştırılır. Karıştırma sırasında, asfalt çimentosu agregayı 5 mikron ile 15 mikron kalınlığında ince bir film tabakası şeklinde sararak kapsar. Bu karıştırma işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve bol hava ile karşılaşan ince asfalt tabakası, oksitlenmeye maruz kalarak içerisinde bulundurduğu ve uçucu bileşenleri kaybetmekle karşı karşıya kalır. Bunun sonucunda bitüm sertleşerek kırılgan hale gelir (Dinç, 1999).

Bitümün karıştırması, depolanması, taşınması ve uygulaması için geçen sürede meydana gelen yaşlanma kısa süreli yaşlanma olarak adlandırılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresindeki yaşlanması Şekil 2.18’de görülmektedir. Bu süre zarfında meydana gelen yaşlanma, topla yaşlanmanın yaklaşık %70 düzeyindedir. Bu süreçte boyunca yaşlanmış asfaltın viskozitesi orijinal viskozitesine göre yaklaşık beş kat yüksektir. Bitümlü karışımların 8 yıllık hizmet süresi boyunca oluşan uzun süreli diye adlandırdığımız yaşlanma, toplam yaşlanmanın %30’u kadardır (Whiteoak and Read, 2003).



Şekil 2.18 Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresinde yaşlanması (Whiteoak and Read, 2003).

Bitümün sertleşmesinin bir diğer nedeni ise olumsuz koşullardır. Olumsuz hava koşulları altında yol esnek üst yapısındaki hatalı ve yetersiz sıkıştırma kusurlarından dolayı kaplama içerisinde hava boşlukları kalır. Kaplamalar içerisinde birbiriyle bağlantılı hava boşlukları havanın karışım içine daha fazla nüfuz etmesine neden olur. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki karışım içerisinde %5'in altındaki boşluk oranlarında, hizmet aşamasında çok küçük miktarlarda sertleşme meydana gelmektedir. Ancak boşluk oranlarının %9'dan yüksek olduğu durumlarda, asfaltın penetrasyon değerinin 70 düzeyinden 25'in altına düştüğü tespit edilmiştir (Whiteoak and Read, 2003).

2.3 Bitüm Özelliklerinin Hizmet Aşamasındaki Bitümlü Karışımlar üzerindeki etkisi

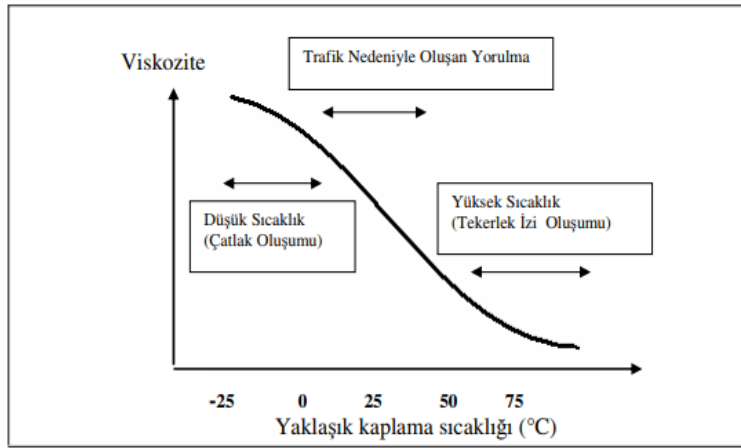
Başta Amerika ve Avrupa da yapılan araştırmalar bitümlü bağlayıcıların sadece penetrasyon değerlerine bakılarak sınıflandırılması yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu nedenden dolayı bilim insanları yaptıkları çalışmalar neticesinde bitümün sınıflandırılmasında temel dayanak olarak viskozite değerlerinin alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Viskozite, sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Farklı hava sıcaklığı aralıklarında bitümün viskozitesi değişmektedir. Viskozitenin değişmesi akışkanlığın değişmesi anlamına gelmektedir.

Akışkanlığın değişmesi bitümlü kaplamalarda düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumu, orta sıcaklıklarda trafik nedeniyle çatlak oluşumu, yüksek sıcaklıklarda ise tekerlek izi oluşumu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hizmet aşamasında bitümlü kaplamaların, kaplama sıcaklıkları yaklaşık, -25°C ile 0°C arasında olduğu zaman, Şekil 2.19' da açıkça görüldüğü gibi karışımın viskozitesi oldukça yüksektir. Bu sebeple düşük sıcaklık aralığında, esnek kaplama üzerinde düşük sıcaklık çatlakları diye adlandırılan çatlak oluşumu gözlenmektedir. Esnek kaplamaların sıcaklığı yaklaşık 10°C ile 40°C arasında olduğu zamanlarda, bitümlü karışımların viskozitesi azalmakta ve karışım yumuşamaktadır. Bu sıcaklık aralıklarındaki karışımda, kaplama üzerinde trafik yükü etkisi ile yorulma çatlak oluşumu artmaktadır.

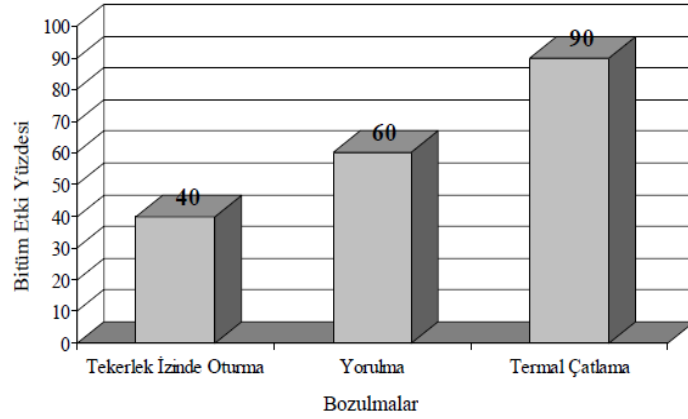
Esnek kaplamaların sıcaklığı yaklaşık, 40°C' nin üzerine çıktığı zaman karışımın viskozitesi giderek azalmakta dolayısıyla kaplamada üzerinde taşıt ağırlığı ve hızından dolayı tekerlek izi oluşumu hızlanmaktadır (Balta, 2014).



Şekil 2.19 Bitümlü karışımda farklı sıcaklıklardaki hareketler (Balta, 2014).

Esnek üstyapı kaplamalarının temel bileşenlerinden biri olan bitümün özellikleri, hizmet süresi boyunca kaplamanın performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Kaplamanın performansını belirleyen termal çatlak, yorulma çatlak ve tekerlek izi oluşumunda bitümün çok önemli etkileri vardır. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi bitümün tekerlek izinde oturma üzerindeki etkisi %40, yorulma

çatlağı oluşumu üzerindeki etkisi %60, termal çatlak oluşumu üzerindeki etkisi ise %90 gibi çok yüksek bir seviyede olmaktadır. Bu nedenle bitümlü karışımlarda kullanılacak bitüm cinsinin seçimi son derece önemlidir (Sağlık ,2008).



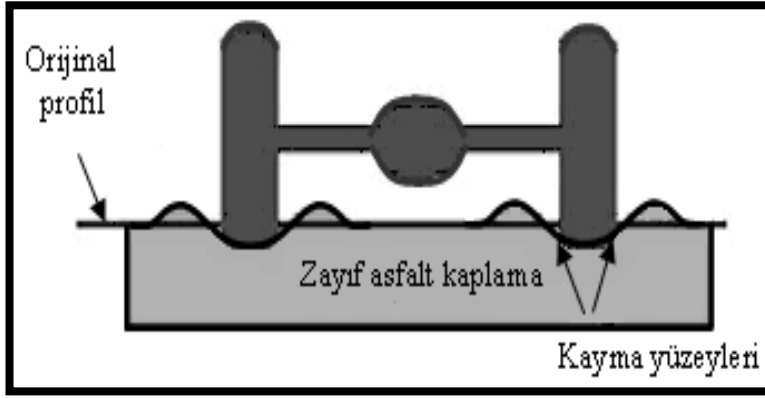
Şekil 2.20 Bitümün üstyapı bozulmalarına etkisi (Sağlık ,2008).

2.3.1 Tekerlek izinde oturma

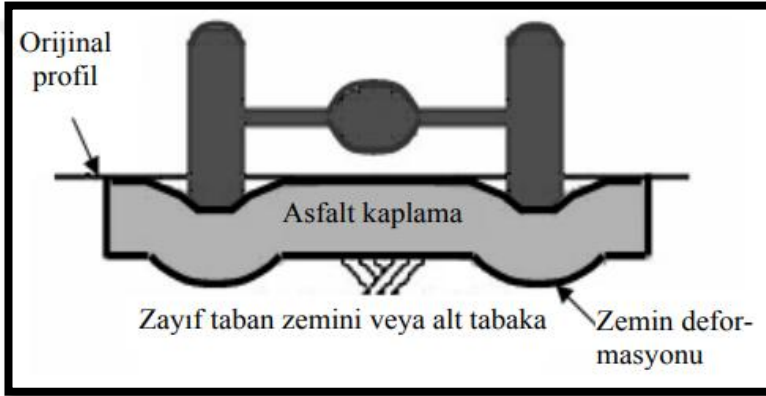
Tekerlek izi oluşumu, sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda sıklıkla görülen bozulma türüdür. Tekerlek izi oluşumunun temel nedenleri aşağıda belirtildiği gibidir.

- Ağır trafik ve tekerrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı,
- Yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli bitüm,
- Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- Aşırı bitüm ve filler yüzdesi veya filler/ bitüm yüzdesi,
- Yuvarlak dere malzemesi,
- Yetersiz sıkıştırma.

Şekil 2.21'de gösterildiği gibi sadece asfalt kaplamada bozulma oluşması durumunda kaplama içersindeki bitümün viskozitesi ile ilgili bir sıkıntı olduğu düşünülmektedir. Ancak tekerlek izi oluşumu Şekil 2.22'de ki gibi alt tabakalara da zarar verdiği durumlarda bu tabakalarında gözden geçirilmesi gerekmektedir. (Kutluhan ve Ağar, 2009).



Şekil 2.21 Esnek kaplamada meydana gelen tekerlek izi oluşumu (Kutluhan ve Ağar, 2009).



Şekil 2.22 Hem esnek kaplamada hem de alt tabakalarda meydana gelen tekerlek izi oluşumu (Kutluhan ve Ağar, 2009).

2.3.2 Yorulma çatlağı oluşumu

Ağır tekerlek yüklerinden dolayı Bitümlü kaplamalara uygulanan tekrarlı yükler sebebiyle kaplama üzerinde oluşan çekme gerilmeleri sonucunda meydana gelen bozulmalardır. Bu tip çatlaklar Şekil 2.23' de gösterildiği gibi birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı ve ya kümes teli görünümündedirler. Yol esnek üst yapısı üzerinde meydana gelen bu çatlaklar zamanla bünyesine su alarak trafik ve suyun hidrostatik basıncı etkisiyle parçalanmakta kaplama üzerinde soyulmalara neden olmaktadır.



Şekil 2.23 Timsah sırtı çatlak (Bağdatlı, 2010).

2.3.3 Termal çatlak oluşumu

Soğuk iklim koşullarında bitümlü kaplamaları büzülmesi sonucunda kaplamada artan çekme gerilmeleri sonucunda oluşan trafik akışına dik yönde meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen termal çatlak oluşumu Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Termal çatlak oluşumu.

Reolojik özelliklerinden kaynaklanan bu deformasyonların; yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi, düşük sıcaklıklarda ise çatlak oluşumlarının önüne geçilebilmek amacıyla bitümlü bağlayıcılara modifikasyon işlemi uygulanması gündeme gelmiştir (Uncu, 2017).

2.4 Bitümlü Malzemelerin Modifikasyonu

Son yıllarda esnek üstyapı kaplamaları üzerinde artan trafik yükü etkisi altında, yüksek ve düşük sıcaklıklarda tekerlek izi, termal çatlaklar gibi bozulmalar meydana gelmektedir. Bu tür bozulmalar karşısında normal penetrasyon dereceli bitümler yetersiz kalmakta bu nedenle geliştirilmiş performans gösteren bağlayıcılara olan ihtiyacı artmaktadır. Söz konusu bozulmaları önlemek, kaplama performansını arttırmak trafik yükleri, Geliştirilmiş bağlayıcı özelliklerini elde etmek için yapılan araştırmalar geniş bir bitüm modifikatör yelpazesinin değerlendirilmesine, geliştirilmesine ve kullanılmasına yol açmıştır (Ahmedzade vd., 2008).

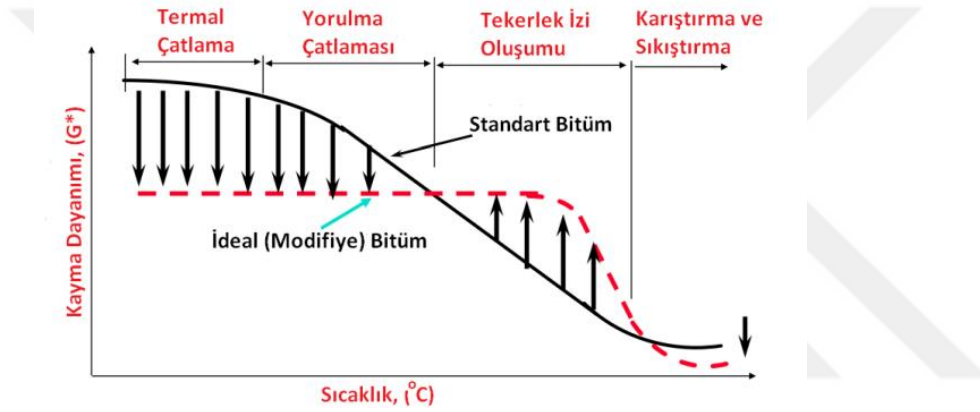
Ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda yol esnek üst yapısının özelliklerinin geliştirilmesi, artan trafik yükleri ve iklim koşulları nedeniyle kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenden dolayı esnek kaplamaların temel bileşeni olan bitümün fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle daha sağlam esnek üst yapılar elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bitümün bu özelliklerinin iyileştirilmesi, modifiye edilmesiyle sağlanmaktadır. Yol esnek üst yapılarında modifiye bitümlerin kullanılmasının amaçları aşağıda verilmiştir (Ertekin, 2003). Buna göre,

- Daha yumuşak karışımlar elde ederek kaplamaların düşük sıcaklık davranışını geliştirmek ve düşük sıcaklık çatlaklarının oluşumunu azaltmak
- Sıcak iklim koşullarına uygun olacak şekilde daha sert bağlayıcılar oluşturup daha mukavim esnek üst yapılar tasarlamak bu şekilde tekerlek izi oluşumunu azaltmak.
- Yapım sırasında bitümün viskozitesini düşürerek agrega ile daha kolay karışım imkanı sağlamak.
- Viskozitenin düşürülmesiyle daha kolay iş işlenebilen ve sıkıştırılabilen bir karışım elde etmek.
- Trafik yükleri altında karışımın daha stabil ve daha dayanıklı olmasını sağlamak.

- Karışım içerisindeki agregaları daha iyi sararak agrega soyulmasını ve agrega kopmasının önüne geçmek.
- Servis ömrü boyunca kaplamada meydana gelebilecek düşük sıcaklık çatlaklarını azaltmak.
- Karışım yorulmaya karşı dayanımın artırarak, servis ömrünü uzatmak.
- Asfalt çimentolarının kalitesini dolayısıyla kaplamanın kalitesini artırmak.
- Yaşlanmış bağlayıcıların özelliklerini geliştirerek tekrar kullanımını sağlamak.
- Bitümlü karışımların ömrünü artırmak.
- Agregada üzerinde kalın bir asfalt filmi oluşturarak agregalar arasındaki hava boşluğu miktarını azaltmak.
- Sıcak hava koşulları altında asfalt kaplamalarda meydana gelen kuma olayını azaltmak.
- Kaplama üzerinde meydana gelen çatlakların kapatılması için kaliteli bir dolgu malzemesi oluşturmak.
- Araçlardan dökülen kimyasallara karşı daha dayanıklı bir asfalt kaplama örtüsü yaratmak.
- Esnek üst yapıların yaşlanma ve oksidasyona karşı olan dayanımını artırmak.
- Asfalt tabaklarının kalınlıklarını azaltarak daha ekonomik bir kaplama oluşturmak.
- Genel olarak kaplamaların bütün performanslarını iyileştirmek.

Yukarıda sıralanan modifikasyonun amaçları dikkatlice incelendiğinde, modifiye edilmiş bitümlü bir bağlayıcının sıcaklık değişimine ile ilişkili olarak sergilemesi beklenen ideal davranış Şekil 2.25'te verilmiştir. Şekil 2.25' ten de açıkça görüldüğü üzere düşük sıcaklıklarda meydana gelen termal çatlak oluşumunun azaltılması için modifiye edilmiş bitümün normal bitüme göre daha yumuşak olması istenmektedir. Modifiye bitümleri orta ve yüksek sıcaklık koşullarında normal bitüme göre daha iyi performans göstererek deforme

olmaması için normal bitüme göre sertlik derecesinin daha yüksek olması istenir. Bu şekilde modifiye bitümler normal bitüme göre yorulma çatlağı oluşumu ile tekerlek izi oluşuma karşı daha mukavim hale gelirler. Bitümlü kaplamaların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları düşünüldüğünde normal bitüme göre daha akıcı olması istenmektedir. Bu şekilde modifiye bitüm agregaların etrafını daha iyi sarabilecektir. Akıcılığın sağlanması için modifiye bitümün yüksek sıcaklıklarda normal bitüme göre daha az sert olması istenmektedir. Bilinmesi gerekir ki söz konusu modifikasyon işleminin ideal olduğu uygulama sırasında bunun birebir gerçekleşmesinin mümkün olmadığı bilinmelidir (Günay, 2016).



Şekil 2.25 İdeal bitüm modifikasyonu (Airey, 2006).

Bitüm içerisinde kullanılan katkı maddeleri farklı gruplar halinde Çizelge 2.3' te verilmiştir (İlcalı, 2001). Çizelge 2.4'te bitüm modifikasyonunda kullanılan malzemelerin sınıflandırılması detaylı olarak yapılmıştır (İlcalı, 2001).

Çizelge 2.3 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Bostancıoğlu, 2012).

Türü	Örnekler	Katkı etkisi
1. Filler türü malzemeleri	Mineral Filler Kireç Portland Çimentosu Uçucu Küller Karbon Siyahı Sülfür	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	Sülfür Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER SBS EVA SBR Doğal Kauçuk SIS Dönüştürülmüş Kauçuk Atık Tekerlek Lastikleri Polietilen Polipropilen EVA PVC	-
4. Plastik		Sertleştirme
5. Bileşim		-
6. Fiber	Doğal: Asbest Taş Yünü Cam fiber Yapay: Polipropilen	Serleştirme
7. Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	Kurşun Karışımları Karbon Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	Aminler Kireç	Yumuşatma

Çizelge 2.4 Bitüm modifikasyon tipleri (Bostancıoğlu, 2012).

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer Olmayan Katkıyla Modifikasyon a. Fillerler b. Soyulma Önleyici Katkılar c. Genleştiriciler (Ekstendenler) d. Antioksidanlar e. Organo-metal Bileşimleri f. Diğerleri	Kil, Siyah Karbon , Uçucu Kül Organik Aminler ve Amidler Ligrin ve Sülfür Çinko ve Kurşun Antioksidanları Fenolikler, Aminler Organo Manganer Bileşimleri Organo Karbon Bileşimleri
II. Polimer Katkıyla Modifikasyon a. Plastikler 1. Termoplastikler 2. Termosetler b. Elastomerler 1. Doğal Kauçuklar 2. Yapay Elastomerler 3. İşlenmiş Kauçuklar 4. Fiberler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA), Epoksi Reçineler, Fenolik Reçineler, Poliüretan Reçineler, Polyester Reçineler, Amino Reçineler Sentetik Butadien kopolimer (SBR), Stiren Butadien Stiren Kopolimer (SBS), Etilen Prokplendien Harmoliper (EPDM), İzobüten İzopren Kopolimer (IIR) Polyester, Fiberler, Polipropen Fiberler
III. Kimyasal Reaksiyon Modifikasyonu	Katkı Reaksiyonu (bitüm + monomer) Vulkanizasyon (bitüm + sülfür) Nitrosyon Reaksiyonu (bitüm + nitrik asit)

Çizelgelerde de görüldüğü gibi polimer malzemelerin bitüm içerisinde kullanımı son derece yaygındır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki stiren-butadien-stiren (SBS), etilen vinil asetat (EVA), polipropilen, düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen, gibi birçok farklı polimer bitümün modifikasyonu için tercih edilmektedir (Airey, 2003; Morales et al., 2006, Hussein et al., 2005; Khan and Sharma, 2011). Bunların dışında bir başka polimer kökenli ürün olan termoset polimerlerinin de kullanımı zaman geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

3.TERMOSETLERİN BİTÜM MODİFİKASYONUNDA KULLANILMASI

Esnek üst yapı kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların modifiye edilerek, kaplama özelliklerinin iyileştirilmesi ve servis ömürlerinin geliştirilmesi maksadıyla pek çok çalışma yapılmakta ve bu çalışmalar kapsamında bitüm, pek çok modifiyer malzeme ile modifiye edilmektedir. Tez kapsamında bitüm modifikasyonu için bir termoset türü olan fenolik reçine kullanılmıştır.

3.1 Fenolik Reçinelerin Özellikleri

Fenolikler termoset reçineler olup, fenolün bir aldehit (genellikle formaldehit) katalizör yardımıyla reaksiyonu sonucu üretilirler. Fenolik reçineler, iyi ısı direnci, yangın dayanımı, su direnci ve yalıtımı, iyi asit direnci, zayıf alkali direnci ve iyi mekanik özelliklere sahiptirler.

Fenol-formaldehit reçineleri başta inşaat sektörü olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptir. Özellikle, inşaat kalıplarında, OSB üretiminde, nedeniyle marine tipi kontrplak üretimlerinde, kompakt laminat ve dekoratif laminat üretimlerinde, cam yünü ve taş yünü üretimlerinde, döküm sanayinde, refrakter tuğla üretiminde, köpük üretiminde ve yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadırlar(Mağdala, 2009)

Fenolik reçinelerin iyi ısı direncine ve iyi mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı bitüm içerisine ilave edilmesi durumunda iyi sonuç vereceği düşünülmüş ve tez çalışması bu konu üzerinde yapılmıştır.

3.2 Literatür Taraması

Bu bölümde literatürde termoset malzeme kullanılarak modifiye edilen bitümler ile ilgili yapılan çalışmalar, kullanılan malzemeler ve sağlanan iyileştirmeler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Evcin (2017), yaptığı çalışmada termosetleri, fenolik reçineler, epoksi reçineler, amino reçineler, poliüretan reçineler, polyester reçineler ve silikon polimerler olarak sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma çerçevesinde yapılan literatür çalışması sonucunda termoset kullanılarak yapılan modifikasyon çalışmaları ve elde edilen bulgular bu bölümde özetlenmiştir.

Dessouky et al., (2013), yaptıkları çalışmada PG 64-22 performans sınıfı saf bitüme ağırlığının %3 ü kadar SBR, SBS, SEBS, HP1, HP2, HP3 ve ağırlığının %3 ü kadar SBR ile %2 si kadar HP2 modifiyer malzemeleri ilave edilerek bitümü modifiye etmiştir. Modifikasyon işleminin bitümün reolojik yapısı üzerindeki etkilerini; RV, DSR, BBR, RTFO ve PAV deneyleri ile incelemiştir. Modifikasyon işlemi için 500 gr PG 64-22 bitüm kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunu 143 derecede 3 saat süre ile 2500 devir dakikada olacak şekilde karıştırıcı yardımı ile yapmıştır. Yapılan çalışma neticesinde bitümün SBS, SBR, SEBS, HP1 ve SBR-HP2 ile modifiye edildiğinde viskozitesinin saf bitüme göre önemli ölçüde arttığı, HP2 ve HP3 ile modifiye edildiğinde bitüm viskozitesinin saf bitüme kıyasla azaldığı tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan DSR deneyinde bitümlü malzemenin $G^*/\sin \delta$ değerini yaşlandırılmamış bitüm, RTFO ile yaşlandırılmış bitüm ve RTFO+PAV ile yaşlandırılmış bitüm numuneleri için hesaplamıştır. DSR deneylerinde saf ve modifiye bitümlerin orijinal, RTFOT ile yaşlandırılmış ve RTFOT+PAV ile yaşlandırılmış numunelerinin tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$), kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerini incelenmişlerdir. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için 25 mm çapta başlık ve 1mm aralık kullanılarak 76°C deney sıcaklığında test uygulamışlardır. RTFOT ve PAV ile yaşlandırılan numunelere içinse 8mm çapında 2 mm yüksekliğinde başlık kullanılarak 31°C de deneyler uygulanmıştır. Tekerlek izi parametresi $G^*/\sin \delta$ ve yorulma parametresi $G^*\sin \delta$ belirlenmiştir. Deney sonucunda yaşlandırılmamış numuneler için Sünme parametresi $G^*/\sin \delta$ değerinin tüm katkılarda saf bitüme göre arttığı, RTFOT ile yaşlandırılan numuneler de SBR, SBS, SEBS VE SBR-HP2 katkıları ile modifiye edilen numunelerde arttığı HP1, HP VE HP3 katkıları ile modifiye edilen bitümde

azaldığı belirlenmiştir. RTFOT ve PAV ile yaşlandırılan numuneler için yorulma parametresi G^* sin δ değeri 31°C incelendiğinde SBS, SEBS ve HP3 ile modifiye edilen numunelerde arttığı diğer numunelerde azaldığı tespit edilmiştir (Dessouky et al., 2013).

Asmael ve Waheed (2018), 40/50 penetrasyon değerine sahip saf bitüm ile polivinil klorür (PVC), fenol reçinesi ve polistiren polimerinin her birinden 2%,4% ve 6% ağırlıkça katılarak modifiye edilen 40/50 penetrasyonlu bitüm kullandıkları çalışmalarında, hazırladıkları numunelere 25°C ve 45°C sıcaklık değerlerinde dolaylı çekme dayanımı ve stabilite testleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda polistiren polimerinin 2% oranında, fenol reçinesi 6% bitüme ilave edilmesiyle bitümün çekme dayanımının ve stabilitesinin her iki sıcaklık içinde arttığı gözlemlenmiştir. Bitüm içersine %4 oranında PVC katılması durumunda bitümün stabilitesinin her iki sıcaklık değeri içinde arttığı ancak çekme dayanımında herhangi bir farklılık oluşmadığı tespit edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde polistiren polimerinin bitümün dayanımını artırdığını ancak yüksek sıcaklıkta deformasyona karşı olan direncini azalttığını tespit etmişlerdir. Fenol reçinesi ve PVC ilavesinin bitüm sıcak havalardaki deformasyona karşı direncini, ağır trafik yükleri altındaki dayanımını ve durabilitesini artırdığını tespit edilmiştir.

Ciesin'ska (2016), yapmış olduğu çalışmada kömürün damıtılmasıyla elde edilen saf bitüm (Pitch) ile %2 oranında fenol formaldehit reçinesi ile modifiye edilen Pitch bitümünün reolojik yapısında meydana gelen değişimler incelemiştir. Bu çalışma kapsamında 1 adet saf (Pitch) ve 4 adet modifiye edilmiş karışım (Pitch/25PF/0, Pitch/25PF/0,5, Pitch/25PF/1,0 ve Pitch/25PF/2,0) kullanılmıştır. Modifikasyon işlemi 160°C sıcaklıkta farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Buna göre hazırlanan 4 adet modifiye bitüm numunesi, bitüm ile fenol formaldehitin homojen şekilde karışabilmesi için 140-160°C 30 dakika boyunca karıştırıldı. Bu karıştırma işleminin tamamlanmasından sonra Pitch/25PF/0,5, Pitch/25PF/1,0 ve Pitch/25PF/2,0 numuneleri sırasıyla 30,60,120 dakika daha 160°C derece sıcaklıkta karıştırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin hazırlanmasına müteakip tüm bitümlere DSR deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde

fenol formaldehit reçinesinin bitümün viskozitesini, sıcaklığa ve trafik yüklerine karşı dayanımını artırdığını tespit edilmiştir.

Epoksi reçinenin %1-6 oranlarında bitüm içerisine katıldığı bu çalışmada bitüm, epoksi reçine ile 150°C sıcaklıkta, 1 saat süreyle karıştırılarak modifiye edilmiştir. Modifikasyon işleminin tamamlanmasının ardından modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, DSR, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), RTFOT, PAV ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde optimum epoksi reçine oranı %2 olarak tespit edilmiştir. Buna göre %2 epoksi reçine ilavesinin bitümün viskozite, yumuşama noktası ve stabilite değerlerini artırdığı belirlenmiştir. Ancak, epoksi reçine ilavesiyle bitümün sıcaklık hassasiyeti, penetrasyon ve soyulma değerlerini ise azalttığı tespit edilmiştir. Özet olarak bitümün epoksi reçine ile ilave edilmesi sonucunda, bitümün tekerlek izi parametresi değerinin arttığı, nem hassasiyetini, çatlama, kuma ve soyulma potansiyelini düşürdüğü belirtilmiştir (Çubuk vd., 2009).

Bostancıoğlu, 2012 yılında yapmış olduğu çalışmada Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanmıştır. %4, %5 ve %6 oranlarında furan reçinesi eklendi DSR sonuçları incelendiğinde orijinal bağlayıcının yüksek sıcaklık performans seviyesi 64°C olarak belirlenmiştir. CA modifikasyonunda modifiyer oranının %10 olduğu karışımlarda yüksek sıcaklık performans seviyesi 70°C' ye yükselirken diğer CA oranlarında ve tüm furan reçinesi oranlarında yüksek sıcaklık performans seviyesinin iki sınıf yükseldiği ve 76°C' ye ulaştığı tespit edilmiştir. Hem CA hem de furan reçinesi modifikasyonunda modifiyer oranının artması yüksek sıcaklıktaki performansı artırmıştır. Orijinal ve modifiye bağlayıcılara ait faz açıları incelendiğinde, tüm bağlayıcıların faz açılarının yüksek olduğu ve viskoz davranışa daha yatkın oldukları belirlenmiştir. Ancak furan reçinesi katkılı bağlayıcıların diğer bağlayıcılara oranla faz açılarının daha düşük olduğu ve furan reçinesinin elastik davranışa katkı sağlayan bir modifiyer olduğu da gözlenmiştir. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki işlenebilirliklerinin tespiti amacıyla yapılan RV deneyinde CA ve furan reçinesi modifikasyonlarının, orijinal bağlayıcının sertliğini artırdığı ve

işlenebilirliğini azalttığı tespit edilmiştir. 0.125-0.25 mm boyutundaki CA'ların kullanımı diğer modifiyerlere kıyasla daha düşük RV değerleri sağlamış ve bu durum granüler CA'ların yüksek sıcaklıkta çökeldiği ve bitüm içerisindeki homojenliğini kaybettiği sonucunu doğurmuştur.

Polyester reçine kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer çalışmada bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki performansları incelenmiştir. Çalışma kapsamında bitüm %0.75-3.0 arasında değişen oranlarda polyester reçine ile modifiye edilerek RTFO yöntemiyle yaşlandırılmıştır. Orijinal ve RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerine gerçekleştirilen DSR deneyleri sonucunda bitüm içerisindeki polyester reçine miktarının artması ile doğru orantılı olarak, tekerlek izi parametresinin de ($G^*/\sin \delta$) arttığı belirlenmiştir (Ahmedzade vd., 2008).

Çubuk, 2007 yılında yaptığı çalışmada bitümlü bağlayıcıları epoksi reçinesi, Mg abietat bileşiği, politetrafloretlen (PTFE) ve fenolformaldehit katkıları kullanarak modifiye etmiştir, Katkı maddelerinin bitüm reolojik gelişimi üzerindeki etkilerini viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kayma reometresi (DSR), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), döner ince film halinde ısıtma (RTFO) deneyi, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi, kırış eğme reometresi (BBR) deneyi ve yüzey enerjisi deneylerini uygulayarak tespit etmiştir. Modifiye edilmiş bitümün agrega ile karıştırılarak oluşturulan sıkıştırılmamış karışımlara Nicholson soyulma deneyi uygulanarak adezyon performansları incelenmiştir. Ayrıca, orijinal ve modifiye edilmiş bitümler ile Marshall yöntemiyle hazırlanan karışımların stabiliteleri belirlenmiştir.

Çubuk'a (2007) göre kütlece %2'lik epoksi reçine ilavesi bitümlü bağlayıcının viskozite değerini artırmış, bitümlü bağlayıcının adezyon özelliklerini geliştirerek, bitümlü bağlayıcıların stabilite değerini, tekerlek izi oluşumuna karşı direncini, yorulma çatlakları oluşumuna karşı direncini ve soyulma direncini artırmıştır. Bitümlü bağlayıcının kütlece %2'lik fenolformaldehit reçine ile modifiye edilmesi durumunda, bitümün viskozite değerinin arttığı, adezyon özelliklerini geliştiği ve tekerlek izi oluşumuna karşı

direnci, yorulma çatlağına karşı direnci ve, soyulmaya karşı direncini artırdığı trafik yükleri ve iklim koşullarına karşı stabiliteyi artırdığını belirlemiştir.. Bitümün kütlece %3'lük PTFE katkısı ile modifiye edilmesi durumunda bitümün viskozitesi artırmış, tekerlek izi ve yorulma çatlaklarına karşı direnci artırmıştır.



4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1 Geleneksel Test Yöntemleri

Bitümlü bağlayıcıların çeşitli özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bitüm üzerine yapılan temel deney yöntemlerine geleneksel test yöntemleri denir. Penetrasyon deneyi bitümlü bağlayıcıların kıvamını belirlemek amacı ile, yumuşama noktası deneyi ise bitümün yüksek sıcaklıkta ki davranışlarını belirlemek için yapılan deneylerdir. Söz konusu iki deney kadar sık kullanılmasa da; depolama stabilitesi deneyi bitümün depolama, taşıma ve serme sırasında bitüm ile modifiyer malzeme arasında faz ayrışmasının olup olmadığını tespit etmek amacı yapılmaktadır. Bu deneylere ek olarak parlama noktası deneyi, bitümün ısıtılması ve tatbikatı sırasında, bitümlü bağlayıcının tutuşma ve yangın tehlikelerini önlemek ve gerekli önlemlerin hangi sıcaklıktan itibaren alınacağını belirlemek üzere yapılmaktadır.

4.1.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi bitüm özelliklerinin tayininde kullanılan geleneksel test yöntemlerindendir. Bitümün penetrasyon değerini ölçmek için kullanılan cihaza penetrometre denir. Penetrasyon deneyi ile bitümün sertlik derecesi belirlenir. Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar, azaldıkça bitüm sertleşir.

Ülkemizde penetrasyon deneyi; TS EN 1426, “Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-iğne batma derinliği tayini” şartnamesine göre yapılmaktadır. Penetrasyon deneyi uygulanacak olan bitümlü bağlayıcı, deney kabına homojen şekilde dökülebilecek kıvama gelene kadar çok fazla yaşlanmalara neden olmayacak şekilde 100-110°C’ ye gelinceye kadar etüv içerisinde ısıtılır. Yeterli akıcılığa getirilen bitümlü bağlayıcı, standart penetrasyon kabına hava kabarcıklarının oluşması engellenecek şekilde titizlikle dökülür. Bitümlü

bağlayıcı penetrasyon kabına dökülmesine müteakip oda sıcaklığında (25°C)' de 1,5- 2 saat soğumaya bırakılır (TS EN 1426, 2008).

Penetrasyon deneyi, deney ortamının sıcaklığına bağlı olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Eğer ki deneyin yapılacağı ortam sıcaklığı, oda sıcaklığına eşit ise, penetrasyon deneyi penetrasyon kabının içerisinde penetrasyon cihazına yerleştirilerek yapılabilir. Ancak, deney ortamının sıcaklığı ile oda sıcaklığı eşit değil ise deneyin daha güvenli olması için, bitümlü bağlayıcı numunesi 25°C' lik sıcaklıktaki saf su banyosunda 1-1,5 saat bekletilir. Daha sonra boş bir beher içerisine su banyosunda su alınır ve içerisinde bitümlü bağlayıcı bulunan penetrasyon kabı su banyosundan çıkarılarak beher içerisine yerleştirilir.

Penetrasyon deneyine başlanmadan önce penetrasyon aletinin göstergesi sıfırlanır ve düzgün olarak çalışıp çalışmadığı kontrol edilir. Bu kontrolün ardından üzerinde 100 gr ağırlık bulunan penetrasyon iğnesi hassas hareketli başlık üzerine takılır. Penetrasyon iğnesinin cihaza takılmadan önce temiz olmasına azami özen gösterilir. Daha sonra iğne, hassas hareketli başlık yardımıyla yavaşça aşağıya doğru hareket ettirilerek bitümlü bağlayıcı numunesine temas etmeyecek şekilde hemen üzerinde sabitlenir. Tüm bu işlemlerin ardından iğne, cihaz üzerindeki sayaç yardımıyla 5 saniye boyunca serbest bırakılır. 5. saniyenin tamamlanmasına müteakip cihaz sabitlenerek göstergedeki batma miktarı okunur. Aynı işlem, aynı numune üzerinde üç farklı noktada tekrarlanmalıdır. Bu nedenle penetrasyon iğnesi hassas hareketli başlık üzerinden çıkarılıp üzerindeki bitüm kalıntıları çakmak veya benzeri bir ısıtıcı kullanılarak eritilir ve silerek temizlenir. Temizleme işleminin tamamlanmasına müteakip ısıtma işlemi sırasında ısınan iğnenin soğuması için birkaç saniye beklenmelidir. İğnenin soğuması için yeterli zaman ayrılmadığı durumlarda sıcak iğne ile yanlış değer ölçümü yapılabilmektedir. İğnenin temizlenmesinden sonra deney tekrar edilir ve bu şekilde kabın kenarlardan ve birbirlerinden en az bir santimetre uzak olacak şekilde üç farklı noktadan okuma yapılır. İğnenin bitüm içerisine batma miktarı dmm cinsinden hesaplanarak bu üç okumanın aritmetik ortalaması alınır. Şekil 4.1'de yarı otomatik kontrollü penetrasyon cihazı verilmiştir (TS EN 1426, 2008).



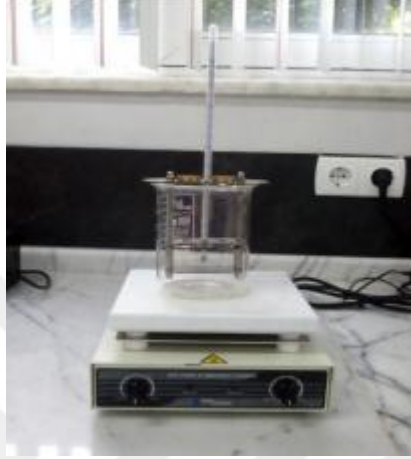
Şekil 4.1 Penetrasyon deney aleti

4.1.2 Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık değişmelerine karşı olan duyarlılıklarını tespitinde kullanılan ve hangi sıcaklıkta akmaya başladıklarının tespitinde kullanılan geleneksel deneylerden bir diğeri de yumuşama noktası deneyidir. (Önal ve Kahramangil, 1993).

Yumuşama noktası deney aleti; ısıtıcı, 2 adet standart bilye, 2 adet standart halka, halkaların içine yerleştirildiği çelik düzenek ve termometreden oluşmaktadır. Yumuşama noktası deneyine başlamadan önce deneyde kullanılacak bitümlü bağlayıcı çok fazla yaşlanmaya neden olmayacak şekilde homojen karıştırılabilecek kıvama gelinceye kadar 100-110°C’ de etüv yardımıyla ısıtılır. Bitümün ısıtılması devam ederken standart halkalar daha önce gliserin-pudra karışımı ile yağlanmış bir seramik plaka üzerine yerleştirilir. Akışkan hale gelen bitüm iyice karıştırıldıktan sonra, iki adet standart yumuşama noktası halkası içine hiçbir boşluk kalmayacak şekilde dikkatlice dökülür. Bitümlü bağlayıcı malzeme ile doldurulan halkalar, buzdolabı içine yerleştirilerek deney sıcaklığı olan 5°C ye gelinceye kadar soğutulur. Buzdolabından çıkartılan

halkaların içerisinde taşan bitümün fazla kısmı ısıtılmış bir ıspatula yardımı ile düzgün bir şekilde kesilip atılır. Numuneler hazırlanırken TS EN 1427'nin öngördüğü hususlar dikkate alınır. Yumuşama noktası deney aleti Şekil 4.2'de görülmektedir (TS EN 1427, 2008).



Şekil 4.2 Yumuşama noktası deneyi aleti

Bitümün yumuşama noktasının belirlenmesi bitümün sıcak havalarda ne kadar deformasyona uğrayacağını tespiti için önemli bir veridir. 25 °C deki penetrasyonları aynı olan iki bitümlü bağlayıcıdan yumuşama noktası yüksek olan bağlayıcı, sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıdır. Bu nedenle esnek üst yapı kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların penetrasyon aynı sıcaklıkta penetrasyon değerleri aynı olmasına rağmen yumuşama noktası düşük olan bitümlü bağlayıcı viskoz davranış gösterir ve kalıcı deformasyon (tekerlek izi oluşumu) erken başlar. Yumuşama noktasındaki 5-6 °C lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir (Çubuk, 2007).

4.1.3 Penetrasyon indeksi (PI)

Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı olan hassasiyetlerini belirlemek amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin kullanılmasıyla Penetrasyon İndeksi (PI) değeri hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında penetrasyon

indeksini bulmak için (PI) Pfeiffer ve Van Doormal tarafından geliştirilen formül 4.1 kullanılmıştır.

Formüldeki "YN" değeri ise bitümün yumuşama noktasını temsil ederken "Pen25" değeri, bitümün 25°C' deki penetrasyon değerini göstermektedir. Başka bir deyişle PI değeri bitümlü bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları ile PI değerleri arasında ters orantı vardır. Penetrasyon İndeksi değerinin -2'den küçük olması bitümlü bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının arttığını, +2'den büyük olması ise bitümlü bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının azaldığı göstermektedir (Read and Whiteoak, 2003).

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times YN}{50 \times \log(Pen_{25}) - YN - 120} \quad (4.1)$$

4.2. Bitüm Performans Sınıflamasının Geleneksel Sınıflandırmaya göre Üstünlükleri

Geleneksel sınıflamalarda kullanılan düktilite, penetrasyon ve viskozite gibi deneyler bitümlü bağlayıcılar üzerinde uzun yıllar sonucunda elde edilen tecrübelerle dayanarak geliştirilen deneylerdir. Ancak, bu tip ampirik deneyler, servis ömrü boyunca bitümlü bağlayıcıların maruz kaldığı trafik yükleri ve iklim koşullarını dikkate almadan geliştirilen deneylerdir. Bu sebeple geleneksel test yöntemleri trafik ve iklim koşullarının değişkenlik göstermediği durumlarda doğru sonuçlar vermektedir.

Dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de günün getirdiği trafik koşulları, hem trafik hacmi hem de trafik yükü bakımından penetrasyon ve viskozite sınıflandırmasının yapıldığı yıllardan çok daha kompleks bir yapıya ulaşmıştır.

Benzer şekilde iklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklık ve yağış rejimlerinde ki değişikliklerden dolayı geleneksel sınıflandırmaya göre sınıflandırılmış bitümler yol esnek üst yapısında öngörülenden çok daha erken zamanda bozulmakta ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Tüm bu

nedenlerden dolayı bitümlü bağlayıcıların performans sınıflamasında hem trafik hem de iklim koşulları dikkate alınarak sınıflandırma yapılmaktadır.

Geleneksel sınıflandırma sisteminin iki temel deneyi incelendiğinde penetrasyon deneyinin 25 °C' de, viskozite deneyinin ise 60 °C' de gerçekleştirildiği görülmektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere geleneksel test yöntemlerinde sadece birer sıcaklık değerleri için bitümün özellikleri tespit edilmekte, diğer sıcaklık değerlerinde bitümün özellikleri ile ilgili herhangi bir bilgi vermedikleri anlaşılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcılar daha öncede belirtildiği şekilde viskoelastik malzemelerdir. Bu nedenle farklı sıcaklık ve trafik yükleri altında farklı davranış gösterirler. Yükün uygulama süresinin uzunluğu bitümün daha yüksek sıcaklıktaki davranışına karşılık gelmemektedir. Geleneksel metotlarda yükün uygulanma süresi dikkate alınmamaktadır. Ancak, performans sınıflamasında ise yükün etki süresi de dikkate alınmaktadır.

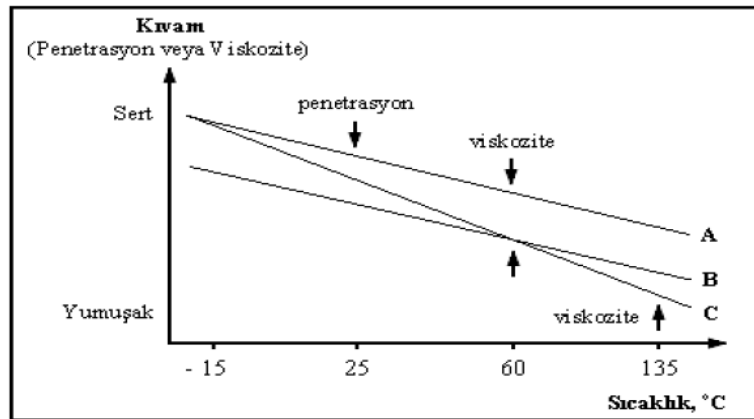
Yol esnek üst yapısında kullanılan bitümler, elde edildikleri petrol rezervleri bakımından farklılık göstermektedir. Bu nedenle bitümler büyük ölçüde birbirlerinden farklı özellikler göstermektedirler. Tam da bu noktada geleneksel yöntemlerin bitümün özelliklerinin tanımlanmasında yetersiz kaldıkları ortaya çıkmaktadır. Farklı ham petrol kaynaklarından elde edilen bitümler geleneksel test yöntemlerine göre aynı penetrasyon ve viskozite sınıfında yer almalarına rağmen Superpave performans sınıflandırmasına göre trafik yükleri altında birbirlerinden farklı performans gösterebilmektedirler.

Geleneksel sınıflandırma sistemlerinde sadece karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını temsil eden “İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (TFOT)” ile bulunan kısa dönemli yaşlanma hariç, bitümün trafik ve çevre şartları altında uzun dönemli yaşlanması (servis ömrü boyunca meydana gelecek yaşlanma miktarı) tespit edilememektedir. Ancak, SUPERPAVE performans sınıflaması ile “Döner İnce Film Etüvü (RTFO)” deneyi ile bitümün kısa dönemli yaşlanması, “Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)” deneyi ile ise uzun dönemli yaşlanması

belirlenebilmektedir. Superpave performans sınıflandırması (PG); yüksek sıcaklık değerlerinde tekerlek izinde oturma, orta sıcaklık değerlerinde yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık değerlerinde termal çatlak olmak üzere kaplama performansına etki eden üç ana bozulma türüne göre sınıflandırma yapmaktadır (Güngör ve Öztürk, 2009).

4.3. Superpave Test Yöntemleri

Yukarıda da bahsedildiği gibi geleneksel bitümlü bağlayıcı şartnameleri dikkate alındığında, bitümlü bağlayıcılar, farklı sıcaklık değerlerinde farklı fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen aynı sınıf içerisinde yer alabilmektedirler. Bu durum geleneksel bağlayıcı şartnamelerinin bitümün özelliklerini tanımlamada yetersiz kaldığının en büyük göstergesidir. Örneğin, Şekil 4.3'te A, B ve C diye adlandırılan üç farklı bitümlü bağlayıcının sıcaklık ile kıvam (sertlik) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir (Cominsky et al., 1994). Şekil 4.3 bitümün davranışını doğru olarak tanımlayabilmek adına son derece önemlidir. Şekil üzerinden 25°C'de gerçekleştirilen penetrasyon deneyine ait değerlere bakıldığında bitümlerin sertliklerine göre A, C, B şeklinde sıralandığı görülmektedir. Oysa aynı bitümlerin 135°C' de gerçekleşen viskozite deneyi dikkate alındığında sertliklerinin sırasıyla A, B, C şeklinde olduğu görülmektedir (Cominsky et al., 1994), (Zaniewski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.3 Farklı bağlayıcıların sıcaklık- viskozite değişim grafiği (Cominsky et al.,1994).

Uzun yıllar boyunca yapılan uygulamalar neticesinde, geleneksel bitüm sınıflama sistemlerinin yetersiz kaldığının anlaşılması üzerine 1987-1993 yılları arasında yapılan çalışmalar sonucunda A.B.D. 'de ki Stratejik Karayolu Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) superpave (Üstün Performanslı Asfalt Kaplama) Performans Sınıflandırma Sistemi oluşturulmuştur. SHRP tarafından geliştirilen bu sınıflandırma sisteminin ham, geri dönüşümlü, yoğun gradasyonlu, saf ve katkılı sıcak karışım asfaltlara uygulanabileceği gibi aynı zamanda mevcut kaplama üzerine inşa edilen taş mastik asfalt üzerine de uygulanabileceği belirlenmiştir.

Superpave standartlarının diğer bitümlü bağlayıcı standartlarına göre en önemli avantajı, deneylerin kaplamanın hizmet vereceği bölgenin sıcaklık değerlerini dikkate alarak yapılmasıdır. Kaplamanın hizmet edeceği bölgenin sıcaklık değerlerine göre deneylerin yapılması bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri ile çevresel etkilere karşı direncinin daha doğru şekilde tespit edilmesini sağlayacaktır (Altas, 2002).

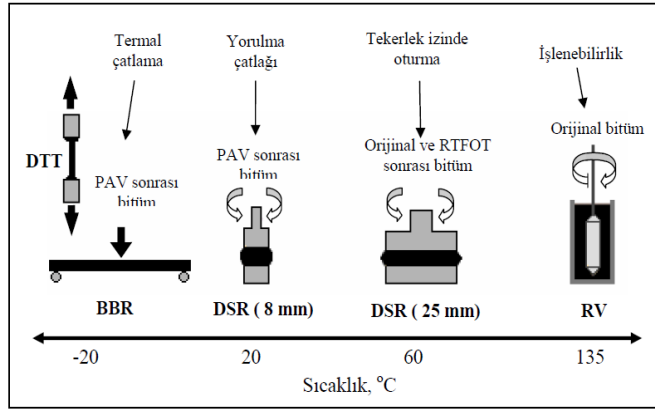
Performans sınıfına (PG) göre sınıflandırılan bağlayıcıların seçiminde, kaplamanın hizmet edeceği bölgenin iklim ve sıcaklık koşulları son derece önemlidir. Yüksek performanslı bitümlü kaplama (superpave) yönteminde bitümlü bağlayıcılar, sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılmıştır. Bu nedenle, bu tür bitümlere "Performans Sınıfı (Performance Grade)" bitüm adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Bu sistemde, bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler sonucunda bitümden beklenen özellikler aynı olmakla birlikte özelliklerin beklendiği sıcaklık değerleri farklıdır. Yani, performans sınıfı bitümlerde fiziksel özellikler sabit kalır; ancak, bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar kaplamanın yapılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık gösterir. Örneğin PG 64-22 olarak adlandırılan bitümde; 64°C ve -22°C' ler de beklenen performans, PG 46-40 bitümü için 46°C ve -40°C 'ler de beklenir. PG simgesini takip eden rakamlar, bağlayıcının hizmet vereceği yerdeki en yüksek ve en düşük kaplama sıcaklıkları ile ilgilidir (Güngör ve Sağlık, 2008). Çizelge 4.1'de

Superpave sisteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Superpave bağlayıcı deneyleri, kullanım amaçları ve performans parametreleri (Dinç, 1999; The Asphalt Institute, 1996; McGennis et al, 1994).

Deney Adı	Deney Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Etüvü (RTFO)	BSK üretimi ve yapımı sırasında bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek (kısa süreli yaşlanma)	Yapım sırasında Yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü sırasında bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek (Uzun süreli yaşlanma)	Hizmet ömrü sırasında yaşlanma direnci
Dinamik Kayma (Kayma) Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta Sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük hizmet sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci (Düşük sıcaklık çatlakları)
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük hizmet sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci (Düşük sıcaklık çatlakları)

Superpave bağlayıcı şartnamesinin temel aldığı araştırma kapsamı, esnek üst yapı kaplama tabakalarında görülen üç temel bozulma türünün analiz edilmesidir. Söz konusu bozulma türleri; düşük sıcaklıkta meydana gelen termal çatlama, ortalama servis sıcaklığında oluşan yorulma çatlağı ve yüksek sıcaklıkta oluşan tekerlek izinde oturma şeklinde gözlemlenen bozukluk ve kusurlardır. Esnek üst yapıda görülen bu tip kusurlardan anlaşılabileceği üzere, bitümün ömrü boyunca karşılaşacağı üç kritik sıcaklık ve buna bağlı olarak da üç farklı bozulma durumu dikkate alınmaktadır. Şekil 4.1 de hangi sıcaklıkta hangi deneyin yapıldığı ve ne tür bozulmayı gösterdiği belirtilmiştir (Sağlık, 2009).



Şekil 4.4 Yol esnek üst yapısı bozulma tipine göre yapılan performans sınıflama deneyleri (Sağlık, 2009).

Çizelge 4.2 SUPERPAVE bağlayıcı deneylerinde kullanılacak bitüm türleri (Sağlık, 2009).

Deney Adı	Kullanılacak Bitüm Türü
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Orijinal Bitüm
	RTFO Uygulanmış Bitüm
	PAV Uygulanmış Bitüm
Dönel Viskozimetre (RV)	Orijinal Bitüm
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	PAV Uygulanmış Bitüm
Doğrudan Çekme Deneyi (DTT)	PAV Uygulanmış Bitüm

Superpave bağlayıcı şartnamesine göre bitümlü bağlayıcıların sınıflandırılması da diğer bağlayıcı şartnamelerine göre farklılık göstermektedir. , Superpave bağlayıcı şartnamesinde sınıflandırma performans derecesi (PG) olarak sınıflandırılmaktadır. Örnek verecek olursak, PG 70-16 gibi bir sınıflandırma söz konusudur. İlk sayı, 70, "yüksek sıcaklık derecesi" ni temsil etmektedir. Bu sayı, bağlayıcının 70°C' deki sıcaklığa kadar gerekli reolojik ve fiziksel özellikleri taşıdığını göstermektedir. Bu sayı aynı zamanda bitümlü bağlayıcının hizmet etmesi beklenen iklim koşullarındaki en yüksek kaplama sıcaklığını tanımlamaktadır. Benzer şekilde, ikinci sayı (-16) "düşük sıcaklık derecesi"dir ve bağlayıcının gerekli reolojik ve fiziksel koşulları -16°C' lik kaplama sıcaklığında sağlayacağını göstermektedir. Çizelge 4.2'de gösterilen Superpave bağlayıcı şartnamesine ilişkin deneyler ve bağlayıcının sağlaması beklenen şartname kriterleri verilmiştir (Altaş, 2002).

Çizelge 4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesine ilişkin deneyler ve şartname kriterleri (Geçkil, 2008).

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 Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum Kaplama Dizayn 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*/sinδ, 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*/sinδ, 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*/sinδ, 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

Çizelge 4.3 Superpave bağlayıcı şartnamesine ilişkin deneyler ve şartname kriterleri (devam).

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 Dizayn Sıcaklığı, °C	< 70						< 76					< 82				
Minimum Kaplama Dizayn 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*/sinδ, 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*/sinδ, 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* sinδ, 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,	Rapor															
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı,	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24
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

4.3.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)

Superpave bağlayıcı şartnamesi kapsamında uygulanan Dönel İnce Film Etüvü Deneyi, bitümlü bağlayıcının üretim, karıştırma, taşıma ve uygulanması aşamalarında meydana gelen kısa süreli yaşlanmayı temsil etmek amacı ile uygulanan bir deneydir. Ayrıca RTFO deneyi daha sonra uygulanacak deneyler için kısa dönem yaşlanmayı temsil eden bitümlü bağlayıcı numunesi elde etmek amaçları ile uygulanan bir deneydir (Altaş, 2002). RTFO deneyi ile ilgili standartlar ASTM D2872 şartnamesinde belirtilmiştir (ASTM D2872, 2012) . ASTM D2872 standartına göre deneyde, ince bir film halindeki bağlayıcıda, sıcaklık ve hava tesiri altında meydana gelen kütle kaybı belirlenerek kısa dönem yaşlanmayı temsil edecek şekilde yaşlandırılmış bağlayıcı üzerinde yeniden penetrasyon, yumuşama noktası ve DSR deneyleri yapılarak, bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik değişimlerinin belirlenmektedir (Kennedy et al., 1994).

RTFO deney cihazı; numunelerin yaşlandırılmasını sağlayan özel bir etüv içerisine dikey olarak yerleştirilmiş daire şeklinde ve kendi etrafında dönen, üzerinde numune kaplarının yerleştirilebileceği 8 adet boşluğu olan çift katmanlı bir tablaya sahiptir. RTFO deney cihazı içerisinde numunelerin yaşlanmasını sağlayan hava üfleme aparatı yerleştirilmiştir. RTFO deney cihazı ile birlikte standart boyutta 8 adet cam şişe deney cihazı düzeneğinin bir parçasıdır.



Şekil 4.5 RTFO deney cihazı

RTFO deneyine başlamadan evvel, RTFO cihazı 16 saat önceden 163 °C sıcaklığa ayarlanarak ön ısıtma yapılır (Dinç, 1999). Bu sürenin sonunda RTFO deney cihazımız hazır hale gelmiş olur. RTFO cihazına yerleştirilecek olan cam şişeler içerisine dökülecek, bitüm numuneleri 150 ° C' ye gelinceye kadar etüvde ısıtılır. 150 ° C' ye kadar ısıyan bitüm numuneleri homojenliği sağlayacak şekilde karıştırılarak, 2 tanesi önceden boş olarak tartılmış olan toplam 8 adet cam şişe içerisine 35'er gram (0,5 g hassasiyetle) olacak şekilde dökülür.



Şekil 4.6 RTFO deney cihazında kullanılan cam şişeler

Bitüm ile doldurulan cam şişeler 60 dakika oda sıcaklığında dik şekilde bekletilir. 60 dakikanın dolmasına müteakip kütle kaybının belirlenmesi için ayrılmış olan iki şişe yine tartılır. Tartım işleminden sonra cam şişeler yatay şekilde etüve yerleştirilir. Cam şişelerin RTFO deney cihazı içerisine yerleştirilmesi sırasında sıcaklık kaybı olacağından Sıcaklık tekrardan 163°C gelinceye kadar beklenir. Sıcaklık istenilen değere ulaştıktan sonra dönel tabla, 15 dev/dk sabit dönüş hızıyla 85 dakika boyunca sürekli olarak dönecek şekilde çalıştırılır. Aynı zamanda, bitümlere 4000±200 ml/dk olacak şekilde hava püskürtülecek şekilde cihaz ayarlanır. Tablanın dönme hareketi sayesinde akıcı olan bitüm şişenin yüzeyinden hareket ederek ince bir film haline gelir ve yüksek sıcaklıkta püskürtülen hava sayesinde bitümler yaşlandırılır. Deneyin tamamlanmasına müteakip tüm numuneler cihazdan çıkartılır. 8 adet RTFO şişesindeki numunelerden daha önce tartılmış olan 2 tanesi yaşlandırma sonrası

kütle kaybının belirlenmesi için oda sıcaklığında bir saat yatay olarak soğumaya bırakılır. Geriye kalan 6 adet numune şişesi içerisindeki bitüm soğumaya mahal vermeden sonra ki deneylerde kullanılmak üzere boş kaplara alınır. Soğumaya bırakılan 2 adet numune şişesi kütle kaybını belirlemek için tekrar tartılarak çıkarılan değer not edilir. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasına müteakip bu iki şişe bitüm akıcı hale gelip kaplara alınabilecek duruma gelinceye kadar 150°C sıcaklıktaki etüv içerisinde ısıtılır ve akışkan hale gelen bitüm kaplara boşaltılır. Bitümlü bağlayıcıların RTFO deney aleti ile yaşlandırılmasının ardından, kütle kaybı hesabı için her iki şişeden alınan bitümler için aşağıdaki formül ayrı ayrı uygulanarak, iki değer ortalama alınır ve bu şekilde bitümlü bağlayıcının kütle kaybı değeri hesaplanmış olur (ASTM D2872, 2012);

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

RTFO deneyinin tamamlanmasına müteakip, kütle kaybının belirlenmesi işlemleri için kullanılmayan diğer 6 şişe penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kayma reometresi, basınçlı yaşlandırma kabı gibi deneylerin yapımında kullanılmak üzere bir kaba koyularak saklanır (ASTM D2872, 2012).

4.3.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

Esnek üstyapıları temel bileşenlerinden olan bitümlü bağlayıcılar üzerinde servis ömrü boyunca meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı tespit etmek amacıyla SHRP tarafından geliştirilen deney, basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi olarak isimlendirilmektedir. PAV deneyi, RTFO deney cihazı ile kısa süreli yaşlanması sağlanan bitümlü bağlayıcılar üzerinde, özel fırını içerisinde sabit sıcaklık ve basınç altında 20 saat süreyle gerçekleştirilen bir deneydir (Erkens et al., 2016).

Basınçlı yaşlandırma kabı, içerisinde çelik tepsileri bulunan bir raf düzeneği ve etüvden oluşmaktadır. Basınçlı yaşlandırma kabı içerisindeki hava basıncı, basınç düzenleyici boşaltma ve tedrici boşaltma valfli aracılığı ile sağlanmaktadır PAV deney cihazı Şekil 4.7 gösterilmektedir.



Şekil 4.7 PAV deney aleti

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyinde kullanılacak olan bitümlü bağlayıcılar (RTFO ile önceden kısa süre yaşlandırılmaya maruz bırakılmış) akıcı hale gelinceye kadar ısıtılır (yaklaşık 135°C). Akıcı hale gelen bağlayıcılar homojen hale gelinceye kadar karıştırılır. Bitümlü bağlayıcıların yerleştirileceği kaplar öncede etüv (yaklaşık 135°C). içerisinde bekletilerek ısınmaları sağlanır. Böylece bitümün deney öncesinde ısı kaybına uğraması engellenmiş olur. Etüvden çıkartılan bitümlü bağlayıcılar, yine etüv içerisinden çıkartılan 140 mm çapındaki kaplara $3,2\pm 0,1$ mm kalınlıkta ve $50\pm 0,5$ gr ağırlıkta olacak şekilde doldurulur. Bitümlü bağlayıcıların kapların içerisine dökülmesine müteakip numune kapları önceden ısıtılmış (yaklaşık 135°C) raf içerisine yavaşça yerleştirilir. Daha sonra raf, yaklaşık 4 saat önceden açılarak deney sıcaklığına (90°C , 100°C ve 110°C) seçilir kadar ısıtılan PAV deney aleti içerisine yerleştirilir ve kapak kapatılarak vidaları iyice sıkılır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkan sıcaklık kaybı yeniden kazanılana kadar beklenir. Deney sırasında uygulanacak sabit hava basıncı değeri $2,1\pm 0,1$ mPa ($305\pm 0,5$ psi) olacak şekilde ayarlanır. Deney sıcaklığı iklim ve kullanılacak bağlayıcı sınıfına bağlı olarak 90°C , 100°C ve 110°C değerlerinden bir tanesi olacak şekilde seçilir. Deney sıcaklıkları,

bağlayıcıların daha önceden DSR cihazıyla belirlenen yüksek sıcaklık sınıflarına bağlı olarak Çizelge 4.5'e uygun şekilde seçilmektedir (Erkens et al., 2016).

Çizelge 4.4 Bağlayıcı sınıflarına göre PAV deney sıcaklıkları

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

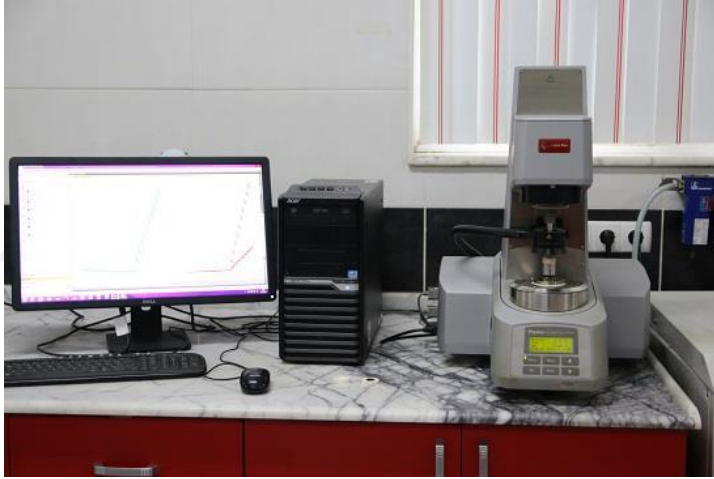
Basıncılı yaşlandırma kabı (PAV) deneyinin tamamlanmasının ardından cihaz içerisindeki basınç yavaşça boşaltılmalıdır. Aksi takdirde hava basıncının boşaltılması sırasında, numuneler üzerinde hava kabarcıkları oluşabilmektedir. Cihaz içerisindeki havanın boşaltılmasına müteakip vidalar yavaşça çözülerek cihazın kapağı kaldırılır ve numuneler kaptan çıkartılır ve Şekil 4.8’de gösterilen gaz alma (degas) cihazına yerleştirilerek 30 dakika süre ile numuneler içerisinde sıkışmış olan hava kabarcıklarından arındırılmış olur (Günay, 2016).



Şekil 4.8 Gaz alma (degas) cihazı

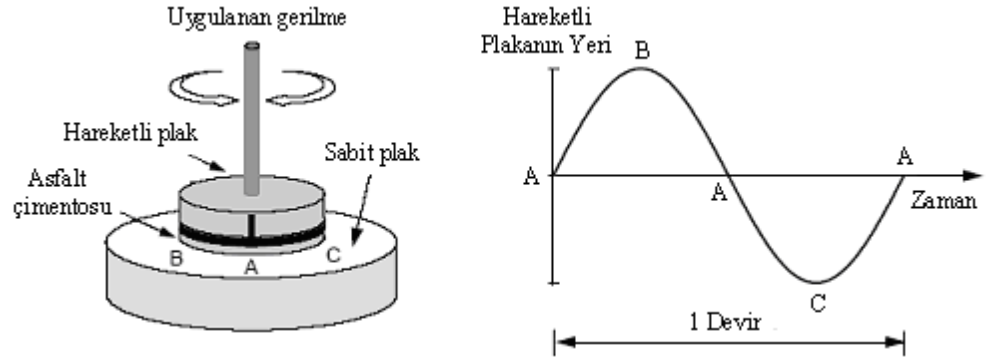
4.3.3 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi

Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi, Superpave bağlayıcı şartnamesinin temel ve önemli deneylerinden bir tanesidir. DSR deneyinin temel amacı, belirli bir sıcaklık ve kayma gerilmesi altında bitümlü bağlayıcıların elastik ve viskoz davranışını belirlemektir. Geçmişten günümüze kadar bitümlü bağlayıcılar üzerinde yapılan araştırmalar, yükleme süresi ve sıcaklık değişimi bitümlü bağlayıcıların davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Bu nedenden dolayı, Superpave bağlayıcı şartnamesinde bu iki faktörü göz önünde bulundurarak dinamik kayma deneyi geliştirilmiştir (Sağlık, 2009).



Şekil 4.9 DSR cihazının görünümü

DSR cihazında bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri gerçekleşen salınım (oscillation) hareketiyle ölçülmektedir. Şekil 4.10'da DSR cihazının çalışma prensibi verilmiştir. Buna göre, alt kısım sabit olan plaka üzerine yerleştirilen bitümlü bağlayıcı, üst kısım hareketli plaka yardımı ile sıkıştırılır. İki plaka arasında kalan bağlayıcı, hareketli plaka yardımıyla A noktasındayken B noktasına daha sonra tekrar A noktasına, ardından, A noktasından C noktasına ve tekrar A noktasına geri döndürülerek bir devir tamamlanır (Zaniewski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.10 DSR cihazının çalışma prensibi (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).

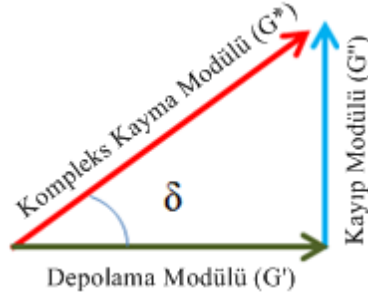
DSR deneyini geleneksel test yöntemlerinden ayıran en önemli özellik bitümlü bağlayıcıların reolojik parametrelerini belirleyen kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) gibi değerleri elde edilmektedir. Bu parametreler yardımı ile bağlayıcıların hem termoplastik hem de viskoelastik davranışları belirlenmektedir (McGennis et al., 1994).

Söz konusu parametreleri detaylı olarak inceleyecek olursak, kompleks kayma modülü (G^*); bitümlü bağlayıcıların sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine maruz kalması durumunda meydana gelen deformasyona karşı gösterdiği toplam direnci temsil etmektedir (Sağlık, 2009).

DSR deney cihazı yüksek sıcaklık sınıfının belirlenmesinde kullanıldığında hareketli üst plaka 10 rad/sn'lik sabit frekansta ve 10 kez üst üste olacak şekilde salının hareketi yapmaktadır. Burada frekans, bağlayıcıya uygulanan yükleme süresi anlamına gelmektedir. Bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan 10 rad/sn'lik bir frekans, gerçekte 80 km/saat hızla geçen bir aracın bitümlü bağlayıcı üzerindeki yükleme süresini temsil etmektedir. DSR deney aletinin uyguladığı hareketin sonucunda oluşan kayma gerilmesi deney aleti tarafından otomatik olarak ölçülerek kaydedilir. Bu sayede kompleks kayma modülü (G^*) değeri hesaplanır.

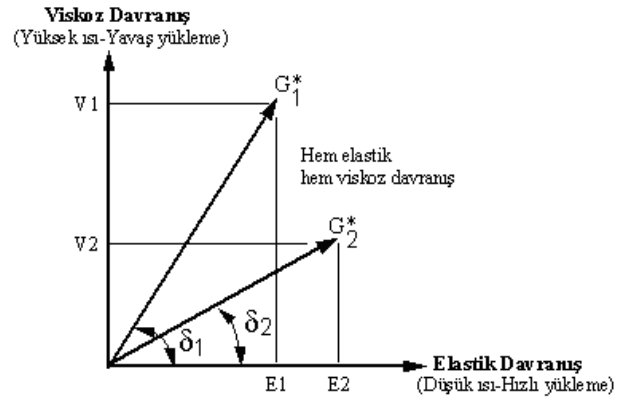
Kompleks kayma modülü (G^*); bağlayıcının elastik davranışının ölçütü olan depolama modülü (G') ve viskoz davranışının ölçütü olan kayıp modülü (G'')

olmak üzere iki farklı bileşenden oluşmaktadır. Depolama modülü (G') her bir yükleme devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını göstermekteyken kayıp modül (G'') ise her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).



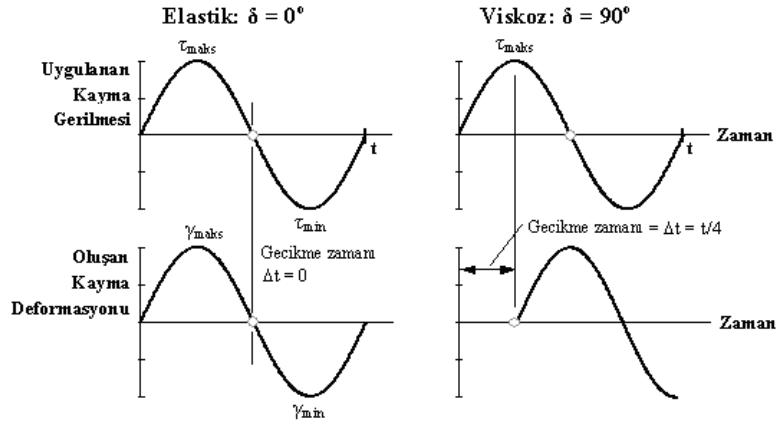
Şekil 4.11 Kompleks kayma modülü ve bileşenleri

Yapılan araştırmalar sadece kompleks kayma modülü değerinin bilinmesi ile bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin açıklanamayacağını gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte gösterilmiş olan G_1^* ve G_2^* vektörleri iki farklı bağlayıcının kompleks kayma modülünü davranışlarını temsil etmektedir. Grafik dikkatlice incelendiğinde her iki bitümünde viskoelastik özellik göstermesine rağmen, 2 numaralı bitüm daha küçük faz açısına sahip olmasından dolayı 1 numaralı bitüm'e göre daha elastik bir davranış göstermektedir. Elastik davranışı temsil eden bileşenin daha büyük olmasından dolayı 2 numaralı bitümün yük altındaki deformasyonlarının yük kaldırıldıktan sonra geri dönmesi, 1 numaralı bitümüne göre daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere tek başına kayma modülü (G^*) değeri bitümün davranışını açıklamakta yeterli olmamaktadır. Bu nedenden dolayı bitümün davranışının sağlıklı şekilde belirlenmesinde kompleks kayma modülü (G^*) ile birlikte faz açısı (δ) değerinin de tespit edilmesi gerektiği açıkça görülmektedir (Tunç, 2001; McGennis et al., 1994).

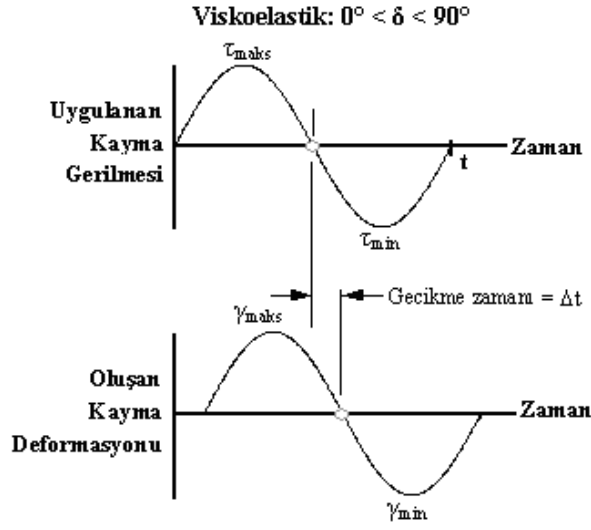


Şekil 4.12 Kompleks kayma modülü bileşenleri

Faz açısı (δ), bitümlü bağlayıcılara uygulanan kayma gerilmesi ile meydana gelen kayma deformasyonu arasındaki zaman farkı (Δt) olarak açıklanmakla birlikte viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının bir göstergesidir. Faz açısının 0° olması bitümlü bağlayıcının elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise bitümlü bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellik gösterdiklerinden dolayı normal şartlarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişmektedir (Tunç, 2001; Kennedy et al., 1994).

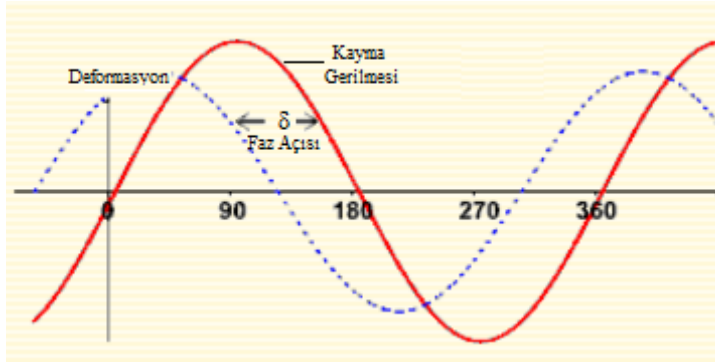


Şekil 4.13 Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (Tunç, 2001; Kennedy et al., 1994).



Şekil 4.14 Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (McGennis et al., 1994; Kennedy et al., 1994).

Yukarda açıklanan nedenlerden dolayı, bitümün viskoelastik özelliği belirlenirken, G^* ve δ değerleri birlikte göz önünde bulundurulmalıdır. Bitümlü bağlayıcıların normal sıcaklık ve trafik yükleri altındaki davranışını daha iyi açıklayabilmek için kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan " $G^*/\sin\delta$ " belirlenmektedir.



Şekil 4.15 Kayma gerilmesi, deformasyon ve faz açısı ilişkisi (Mezger, 2011).

DSR deneyleri gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Gerilme kontrollü deneylerde belirli bir kayma gerilmesi sabit olarak bağlayıcıya etkimektedir. Deformasyon kontrollü deneyde ise, deney sırasında bağlayıcıda meydana gelecek deformasyonun aşılması ve buna göre bağlayıcıya uygun miktarda kayma gerilmesi uygulanması gerekmektedir. Burada

esas olan, malzemelerin lineer viskoelastik (LVE) özellik gösterdiği sınırın geçilmemesi ve bu şekilde numune üzerinde kalıcı deformasyonun meydana gelmemesidir. Böylelikle, DSR deneylerinde farklı sıcaklık değerleri kullanılmasına rağmen her bir bağlayıcı türüne ait tek bir numuneyle bağlayıcının PG sınıfının belirlenmesi mümkün olmaktadır (Günay, 2016).

Dinamik Kayma Reometresi , bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıklarda farklı bozulma türlerine karşı dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık değerlerin tekerlek izi oluşumuna, normal sıcaklıklarda ise yorulma çatlaklarına karşı dayanımını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır (Taşçı, 2010). DSR deneyi, yüksek ve orta sıcaklık değerlerinde bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen tekerlek izi oluşumu ve yorulma çatlakları oluşumunun belirlenmesinde farklı sınır değerler ve numune özellikleri kullanılmaktadır. Söz konusu sınır değer ve özellikler aşağıda verilmiştir.

Yüksek sıcaklık ve tekrarlı trafik yükleri altında esnek üst kaplamalarında bitümlü malzemenin viskoz davranış göstermesinin sonucunda meydana gelmektedir. Superpave şartnamesinde, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve kalıcı deformasyona karşı direnci belirlemede bağlayıcı kıvamının ölçüsünü temsil eden tekerlek izi faktörünün (" $G^*/\sin\delta$ ") gerekli olduğunu belirtilmiştir. $G^*/\sin\delta$ tekerlek izi faktörünün belirlenmesinde kullanılan, kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri DSR deneyi ile kolayca belirlenmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin\delta$ değeri orijinal bitümler için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bitümler için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Tekerlek izi faktörü (" $G^*/\sin\delta$ ") kayma modülü değeri ile doğru orantılıyken faz açısı değeri ile ters orantılıdır (McGennis et al.,1994).

Asfalt kaplama üzerinde meydana gelen en önemli bozulma türlerin bir tanesi de yorulma çatlaklarıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre, bitümlü bağlayıcıların yorulma çatlaklarına karşı direncini belirlemek amacıyla kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri kullanılmaktadır. Kaplama olarak asfalt kullanılan yolların hizmete açılmasından sonra, asfalt kaplama üzerinde normal ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşmasından dolayı

Superpave şartnamesi, DSR deneylerinde RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı numunelerin kullanılmasını gerektiğini belirtmektedir. Superpave şartnamesinde yorulma çatlağı oluşumu “ $G^* \sin \delta$ ” faktörü ile temsil edilmektedir. Bu değerin 5000 kPa değerini aşmaması istenmektedir. Bu değer PAV sonrasındaki (servis ömrü boyunca) bitümlü bağlayıcının elastik özellik göstermesini yani yorulma çatlaklarına karşı direncinin yüksek olması gerektiğini göstermektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere yorulma çatlaklarına karşı büyük direnç göstermesi için düşük G^* ve δ değerlerin tercih edilmesi gerekmektedir (McGennis et al., 1994).

DSR deneyine tabi tutulacak bağlayıcılar etüv içerisinde yaklaşık 105°C-110°C ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Viskoz hale gelen bitümlü bağlayıcılar, 25 mm çapında 1 mm kalınlığındaki DSR numune kaplarına dökülerek oda sıcaklığında (25°C) soğumaya bırakılmaktadır. Oda sıcaklığına kadar soğuyan numuneler cihazının alt plakasına yerleştirilerek alt ve üst plakalar deney konumuna (1mm aralık kalacak şekilde) getirilir. Plakaların deney konumuna getirilmesine müteakip bitümlü bağlayıcı numunesi kolayca kesme (trimming) işlemi uygulanabilecek sıcaklığa getirilir. Bu işlem DSR cihazına yerleştirilen numunenin fazla olan kısmının atılması işlemi olup 50- 60°C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılmalıdır. Kesme işlemi için cihazın hareketli plakası (spindle) yazılım yardımıyla deneyin uygulanacağı plaka aralığına sabit hızla getirilmektedir. İki plak arasındaki boşluk azaldıkça bitümün fazla olan kısmı dışarı taşmaktadır. İki plak arasındaki mesafe sabitlenince dışarıya taşan fazla kısım bir bıçak yardımıyla kesilerek alınır. Bu şekilde numunenin kalınlığı deney kalınlığına getirilmiş olur. Deney aletinin alt ve üst plakalarının 0,1°C hassasiyetle deney sıcaklığına ulaşmasına müteakip numunenin de aynı sıcaklığa ulaşması beklenir ve ardından deney başlatılır (AASHTO T 315, 2012).

Bitümlü bağlayıcıların PG sınıflarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen DSR deneylerinde, 46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C ve 82°C’lik sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Cihaza içerisindeki yazılım sayesinde bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan gerilme ve buna karşılık bitümlü bağlayıcının göstermiş olduğu deformasyon arasındaki ilişki yardımı ile bitümlü

bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi ($G^*/\sin\delta$) parametreleri hesaplanmakta, bununla birlikte başlangıç sıcaklığı olan 46°C ' den başlayarak 6°C ' lik artışlar ile en yüksek test sıcaklığı olan 82°C 'ye ulaşmaktadır. Fakat, cihaz içerisindeki yazılım deney sürdüğü sırada Superpave şartname limitlerini de kontrol ettiğinden dolayı limitlerinin sağlanmadığı sıcaklıkta deneyi sonlandırmakta ve bitümlü bağlayıcının hangi sıcaklıkta limitleri sağlamadığının raporunu vermektedir (Günay, 2016).

DSR deneyleri daha önce de belirtildiği üzere hem orijinal hem de yaşlandırılmış numuneler üzerinde yapılmaktadır. AASHTO TP5-98 standardına göre " $G^*/\sin\delta$ " değerinin yaşlandırılmamış bağlayıcılar için minimum 1000 Pa (1kPa), RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmış bağlayıcılar için ise 2200 Pa (2.2kPa) olması gerekmektedir (Kuloğlu vd., 2008).

PG sınıflarının belirlenmesinde hem orijinal, hemde yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar için şartname kriterlerine bakılmakta, kriterin sağlandığı son sıcaklık değerleri arasında karşılaştırmalar yapılarak küçük olan değer seçilmektedir.

Ayrıca bitümlü bağlayıcıların yorulma sıcaklığını değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış numuneler için her bir deney sıcaklığı arasında 3°C ' lik farklar olacak şekilde sıcaklık aralığı 4 ile 40°C arasında DSR deneyi uygulanır.

DSR deneyleri için sıcaklık değerlerine göre, 8 mm çapında ve 2 mm kalınlığında veya 25mm çapında ve 1 mm kalınlığında iki farklı ebatta bitümlü bağlayıcılar kullanılır. bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıfının belirlenmesinde 25mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki numuneler, PAV ' da yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar üzerine yapılacak olan DSR deneyleri için 25mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki numuneler kullanılmaktadır. Şekil 4.16'te 25 mm çapındaki DSR numunelerinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.16 25 mm çapındaki DSR numuneleri

DSR deneyinin uygulandığı her bir sıcaklık değeri için saptanan kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri çalışmadaki tüm bağlayıcı türleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4.3.4 Dönel viskozite (RV) deneyi

Dönel viskozite deneyi, bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklıkta, plentteki yapım aşaması ve uygulama sırasında ne derece pompalanabilir ve işlenebilir olduğunu belirlemek amacıyla geliştirilmiştir (ASTM D4402).

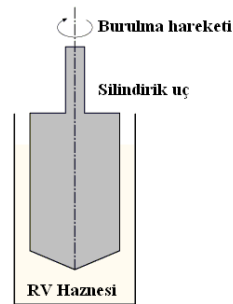
Dönel viskozite deneyinin uygulanması için iki tip viskozimetre deney aleti bulunmaktadır. Bunlar, Brookfield (döner mil) viskozimetre deney aleti ve kapiler viskozimetre deney aletidir. Söz konusu iki deney aletinden Brookfield Viskozimetre Deney aleti en yaygın olarak kullanılan deney aletidir. Şekil 4.10 da ASTM D4402 standardına uygun olan Brookfield viskozimetresi gösterilmektedir. Dönel viskozite deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır (Uncu, 2017).

Dönel viskozite deneyi, Brookfield viskozimetre aleti ve termosel ısıtıcısı olmak üzere iki üniteden oluşan cihaz ile gerçekleştirilmektedir. Brookfield viskozimetre aleti; motor, mil, kontrol paneli ve dijital gösterge olmak üzere 4 parçadan oluşmaktadır.



Şekil 4.17 Dönel viskozimetre cihazı ve sıcaklık ünitesi

Motor, mili döndürerek bitümlü bağlayıcı üzerindeki burulma kuvvetini oluşturmaktadır. Brookfield viskozimetre aletinde şekil olarak şakule topuzuna benzeyen mil kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcının viskozitesi tespitinde kullanılan silindirik mil, No. 21 ve No. 27 olmak üzere iki tiptir. Motor yardımı ile 20 devir/dakika (20 rpm) hızla döndürülen mil bitümlü bağlayıcının viskozite değerinin dijital gösterge yardımı ile otomatik olarak okunabilmesini sağlamaktadır. Viskozite deneyi sırasında yaygın olarak No. 27 mm’lik mil tercih edilmektedir (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004; Petersen, 1994).



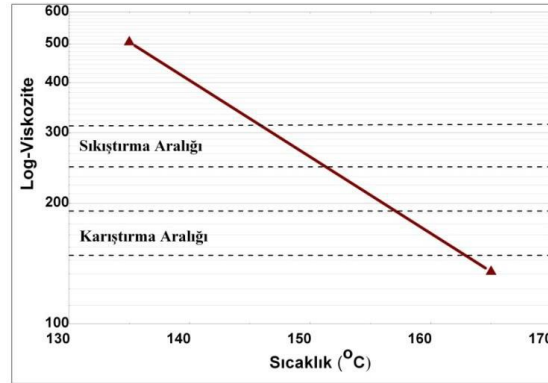
Şekil 4.18 RV cihazının çalışma prensibi (ASTM D4402, 2015).

RV deneyinde hesaplanan viskozite değeri santipois (cP) biriminde iken, performans esaslı bağlayıcı sınıflamasında paskal.saniye (Pa.s) birimi

kullanılmaktadır. Bu nedenle, santipois (cP) ile paskal.saniye (Pa.s) arasındaki ilişkiyi kurmak için “1000 cP = 1 Pa.s” eşitliği kullanılmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre 135°C sıcaklıkta elde edilen viskozite değeri 3 Pa.s’yi aşmaması gerekmektedir. Bu viskozite değerinin aşılması durumunda, bu bağlayıcılarla hazırlanacak olan karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ideal değerlerin üzerinde olacaktır (McGennis et al., 1994).

RV deneyleri, bitümün işlenebilirliği dikkate alınarak 135°C ve 165 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta gerçekleştirilir. Bu şekilde bitümlü bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklık değişimi ile olan ilişkisi belirlenmiş olur. 135°C ve 165 °C’de gerçekleştirilen viskozite deneylerinin tamamlanmasına müteakip, bitümlü bağlayıcıların logratirmik ölçekte viskozite-sıcaklık grafiği oluşturulur.

Bu grafik yardımı ile , bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılacak ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerleri belirlenmiş olur. Viskozite deneyi sonrası çizilen log.viskozite sıcaklık grafiğinin bir örneği Şekil 4.19’da verilmiştir (Zaniewski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.19 Logaritmik viskozite- sıcaklık eğrisi (Uncu Dilay. 2017)

Dönel viskozite deneyinde kullanılacak yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar 135°C sıcaklığa kadar etüv içerisinde ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı etüv içerisinde ısıtılırken aynı zamanda dönel mil ve Numunenin konulacağı RV kabı da etüv içerisinde ısıtılır. Akışkan hale gelen bitümlü bağlayıcı RV kabı içerisine kullanılacak mile göre 8-11 gr arasında dökülür.

İçerisinde bitüm olan numune kabı daha önceden sıcaklığı ayarlanmış olan termoselin içerisine yerleştirilir. Termoselin terazide olmasına dikkat edilir. Deney parametreleri girildikten sonra, öncelikli olarak viskozimetrenin bağlantı noktasında bulunan vida ile silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak viskozimetre sıfırlanır. Viskozimetrenin sıfırlanmasına müteakip, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki bitüm içerisine daldırılır. Numunenin, deney için gerekli olan 135°C ye kadar ısınması için beklenir. Bekleme süresi boyunca silindirik milin dönme hızı 20rpm olarak ayarlanır. Numune sıcaklığı dengeye ulaştığında birer dakika ara ile üçer okuma yapılır. Çıkan sonuçlar Brookfield viskozimetre deney aletine ait program tarafından otomatik olarak kaydedilir.

4.4 İleri Test Yöntemleri

4.4.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi (Ana Eğri)

Bilindiği üzere bitüm, yüksek yükleme hızlarında ve düşük sıcaklıkta elastik malzeme gibi davranarak yüksek mukavemet , düşük yükleme hızları ve yüksek sıcaklıkta viskoz malzeme gibi davranarak düşük mukavemet gösterir. Orta yükleme hızlarında ve orta sıcaklık değerlerindeyse visko elastik davranış göstererek orta sertlikte bir malzeme olarak tanımlanır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklık koşulları ve trafik yükleri altındaki performanslarının belirleyebilmek için DSR cihazı kullanılarak saf ve modifiye bitümler üzerinde farklı frekans deneyi diye adlandırılan bazı ek deneyler yapılmaktadır. Uygulanan bu test yöntemleri sayesinde, bitümlü bağlayıcılarının davranış biçimi yükleme süresine bağlı olarak daha ayrıntılı olarak incelenebilmektedir. Farklı frekans deneylerinde, bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini belirleyen faz açısı (δ), kompleks kayma modülü (G^*) ve tekerlek izi parametreleri ($G^*/\sin\delta$) tespit edilerek bitümün tekerlek izi oluşuna karşı göstermiş oldukları direnç farklı trafik yükleri ve sıcaklık koşulları için ayrı ayrı saptanmaktadır (Günay, 2016).

Tez çalışması kapsamında yapılan farklı frekans DSR deneylerinde, Çizelge 4.5'te gösterilen trafik hızlarına eşdeğer kabul edilen frekanslar

kullanılmıştır. Farklı frekans deneyleri için DSR deney cihazına 25 mm plaka çaplı başlık takılmış ve 25 mm çapında, 1 mm kalınlığında numune kullanılmıştır. Farklı frekans deneyleri için 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C olmak üzere 6 farklı sıcaklık değeri seçilerek deney bu sıcaklık değerleri için uygulanmıştır (Günay, 2016).

Çizelge 4.5 Trafik hızlarına eşdeğer deney frekansları

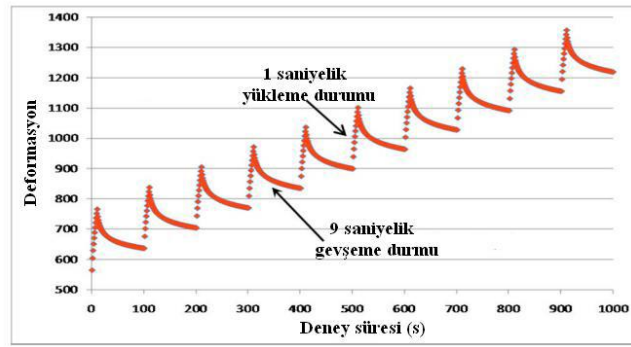
Trafik hızı, km/sa		
Düşük, 10km/sa	Orta, 40 km/sa	Yüksek, 100 km/sa
Trafik hızlarına eşdeğer frekanslar, Hz (rad/sn)		
1,25 rad/sn	5 rad/sn	12,5 rad/sn

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere trafik hızları, farklı frekans deneyinde trafik hızlarına eşdeğer frekanslar tarafından temsil edilmektedir. Bu çalışma kapsamında öncelikle sıcaklık değeri sabit tutularak tabloda yer alan her 3 farklı frekans değeri için deney uygulanmasından sonra farklı deney sıcaklığına geçilmiştir.

4.4.2 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) testi

DSR cihazıyla gerçekleştirilen salınım (oscillation) deneylerinde elde edilen G^* parametresi, kayma gerilmelerine karşı bağlayıcının ne ölçüde direnç göstereceği ifade etmektedir. Ancak, G^* değeri, yükün uygulanması sonrası meydana gelen deformasyonun elastik veya kalıcı olma durumunu belirtmekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, farklı mertebede kayma gerilmelerinin kullanılmasıyla meydana gelen deformasyonun ayrıntılı bir biçimde incelenemediği, çoklu gerilmeli sünme geri dönme deneyi (MSCR) ulusal ortak karayolu araştırma programı (NCHRP) tarafından geliştirilmiştir. MSCR deneyiyle bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansının elastik deformasyonların da hesaba katılarak değerlendirilmesi ve kalıcı bozulmaların tahmin edilmesi sağlanabilmektedir (NCHRP, 2010).

MSCR deneyleri, tekrarlı sünme ve toparlanma (repeated creep recovery) deneyleri üzerine geliştirilmiştir. 3,2 kPa ve 0,1 kPa olmak üzere iki farklı kayma gerilmesi bitümlü bağlayıcıya uygulanmaktadır. Buna göre, önce 0,1 kPa'lık kayma gerilmesi 1 sn boyunca numuneye etki etmekte ardından 9 sn'lik yüksüz bir toparlanma süresi gelmektedir. Bu döngü 10 defa tekrar edildikten sonra, bitüm numunesine yine 10 tekrar olmak üzere 1 sn'lik 3.2 kPa'lık yük ve 9 sn'lik yüksüz toparlanma süresi uygulanmaktadır. Şekil 4.23'de verilen MSCR deneyine tabi tutulan bir bitümlü bağlayıcının tipik deformasyon vs. zaman eğrisi verilmiştir (AASHTO TP 70, 2013).



Şekil 4.20 MSCR deneyi deformasyon - zaman eğrisi (FHWA, 2011).

Buna göre, 1sn'lik yükleme anında bağlayıcıda, belirli bir miktar deformasyon meydana gelmekte, ardından 9 sn'lik toparlanma süresiyle meydana gelen deformasyonun bir kısmı zamana bağlı yavaşlayan şekilde geri dönmekte, bir kısım deformasyon ise kalıcı olmaktadır. Bir sonraki döngüde, tekrar yük etkimesiyle kalan deformasyon miktarı sürekli olarak artmaktadır.

Bu deney yöntemi çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi vasıtasıyla bitümlü bağlayıcının elastik geri dönme (R) ve geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) tayinini kapsamaktadır. MSCR deneyi belirli sıcaklıklarda dinamik kayma reometresini kullanarak gerçekleştirilmektedir. Bu deney yöntemi bağlayıcıdaki elastik davranışın yapısını ve iki farklı gerilme seviyesindeki elastik davranış değişimini tespit etmek için kullanılmaktadır. Geri dönmeyen sünme

uyumluluğu, bir bitümlü bağlayıcının tekrarlı yükler altında kalıcı deformasyonuna karşı direncinin bir göstergesi olduğunu göstermektedir (Alqudah, 2016).

MSCR deneyinde, geri dönen deformasyon ve kalan deformasyon miktarlarının ölçütü olarak başta ortalama elastik geri dönme (R) ve geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) olmak üzere bazı temel reolojik parametreler hesaplanmaktadır. Buna göre, R bitümlü bağlayıcının elastik özelliklerini ifade ederken, J_{nr} , yüksek sıcaklık koşulları altında bitümlü malzemede oluşacak kalıcı deformasyonu göstermekte ve dolayısıyla şartname kriteri olarak bu değer kullanılmaktadır. R ve J_{nr} parametreleri aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır (Król, et al., 2015).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} \epsilon_{\tau}(\tau, N)}{10}$$

$$\epsilon_r = (\epsilon_1 - \epsilon_{10}) * 100 / \epsilon_1$$

$$J_{nr} = \frac{\sum_{i=1}^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10}$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \epsilon_{10} / \tau$$

burada;

τ , Kayma gerilmesi,

N , Döngü sayısı,

ϵ_1 , 1. saniye sonrası oluşan deformasyon miktarı,

ϵ_{10} , 10. saniyedeki deformasyon miktarını göstermektedir.

Ayrıca deney sonrasında bağlayıcının polimer modifikasyonunun yeterli olup olmadığı R vs. J_{nr} grafiği oluşturulup bu grafikte $R = 29.37 * J_{nr}^{-0.26}$ eğrisinin çizilmesiyle tespit edilebilmektedir. Buna göre, bu eğrinin üzerinde kalan R değerleri, bağlayıcının elastikiyet özellik kazanmasına yeterli seviyede polimer modifikasyonun yapıldığını göstermektedir. Hesaplanan R değeri eğrinin

altında kalıyorsa, kullanılan deney sıcaklığı için polimer modifikasyon yetersiz olduğu anlaşılmaktadır.

Superpave şartnamesinde bulunan bağlayıcıların yüksek sıcaklık sınıflarının belirlenmesinde, yaşlandırılmış numunelerin en az 2.2 kPa değerinde tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) şartını sağlaması kriteri, MSCR deney kriteriyle güncelleştirilmiştir (Domingos and Faxina, 2015). Ayrıca, Superpave şartname kriterlerine eklenen MSCR deneyiyle birlikte DSR deneyleriyle bulunan PG sınıfları da değiştirilmiştir. Trafik yoğunluğunun da dikkate alındığı yeni şartname limitleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Buna göre, şartnamede, standart (S), ağır (H), çok ağır (V) ve aşırı ağır (E) trafik olmak üzere dört farklı trafik yoğunluğu tanımlanmış ve bu trafik yoğunlukları için belirli bir $J_{nr,3.2}$ (3.2 kPa yük ile gerçekleştirilen MSCR deneyinde hesaplanan) değerinin aşılmaması gerektiği görülmektedir. Ayrıca, iki yük arasındaki (0,1 kPa ve 3.2 kPa) J_{nr} , farklılıklarını ifade eden $J_{nr diff}$, değerinin %75'den az olmaması istenilmektedir.

Çizelge 4.6. AASHTO MSCR standartları (AASHTO MP 19, 2010).

Sınıf	Standart (S)	Ağır (H)	Çok Ağır (V)	Aşırı Ağır (E)
Trafik Seviyesi	Trafik < 3 milyon ESAL veya >72 km/s	Trafik > 3 milyon ESAL veya 24-72 km/s	Tafik > 10 milyon ESAL veya < 24 km/s	Trafik > 30 milyon ESAL ve < 24 km/s
$J_{nr, 3.2, \max}$	4,0	2,0	1,0	0,5
$J_{nr diff, \max}$	75	75	75	75

5. TERMOSET KATKILARLA BİTÜM MODİFİKASYONU

5.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmalarda bağlayıcı malzeme olarak Petkim Petrokimya Holding A.Ş.'den temin edilen B 50/70 ve B 160/220 penetrasyon sınıfına ait bitüm kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcıya ait fiziksel özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Bağlayıcı türleri ve özellikleri

Özellikler	Bağlayıcı	
	50/70	160/220
Penetrasyon (dmm)	64,5	199
Yumuşama Noktası °C	42,5	34,75
Penetrasyon İndeksi (PI)	-2,36	-2,02
Özgül Ağırlık	1,03	1,01
Parlama Noktası °C	252	245

Tez çalışmasında bitüm modifiyeri olarak kullanılan termoset katkı maddesi merkezi İstanbul da bulunan Özşahin Suni Kösele Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan termoset katkı türü fenolik reçine (koresin) malzemesidir. Kimyasal bileşimi bütül fenol ve asetilen olan sarı ve kahve renkte topak ve toz şeklinde, ortalama birim hacim ağırlığı 1.04 g/cm³'tür. DIN52011 standardına göre yumuşama noktası 135 –150 °C' tir. Özşahin firmasından alınan bilgiye göre fenolik reçinenin kilogram fiyatı 7,50 Euro' dur. Şekil 5.1.' de fenolik reçine katkısı görülmektedir.



Şekil 5.1 Fenolik reçine katkısı

5.2. Fenolik Reçineli Bağlayıcıların Hazırlanması

Fenolik reçine katkıli bitümlü bağlayıcıları hazırlaması maksadıyla ilk olarak, B 50/70 penetrasyona sahip saf bitüm aşırı yaşılanmaya neden olmayacak şekilde 150-155 °C' de, B 160/220 penetrasyona sahip saf bitüm ise 130-135 °C sıcaklığa sahip etüv içerisinde bitümlü bağlayıcılar homojen şekilde karışabilecek kıvama gelinceye kadar ısıtılarak akıcı hale getirilmiştir. Akıcı hale gelen bitümlü bağlayıcı, karıştırıcı cihazın sıcaklık kontrollü kabına yaklaşık olarak 450-500 gr ağırlıkta olacak şekilde boşaltılmıştır. Karıştırma işlemleri için, Şekil 5.2' de gösterilen Silverson L5M marka yüksek devirli karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Silverson L5M karıştırma aleti

Kap içerisindeki bitümlü bağlayıcı 160 °C' ye kadar ısıtılarak içerisinde fenolik reçine katkı maddesi eklenmiştir. Katkı maddesinin eklenmesi sırasında karıştırıcı hızı 800 dev/dk hızdayken fenolik reçine katkıları literatüre uygun olarak %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında saf bitüme 15 dakikalık süre içerisinde ilave edilmiştir. Fenolik reçine katkısının ilave edilmesine müteakip karıştırıcı hızı 1800-1900 dev/dak hıza çıkarılmış ve karıştırma işlemi bu hızda 50 dakika boyunca devam ettirilmiştir. Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcı 160°C' ye ayarlı etüv içerisinde 15 dakika dinlendirilmeye bırakılmıştır. Bu işlemin ardından fenolik reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcılar metal kaplara boşaltılarak üzerleri streç film örtülü

şekilde muhafaza edilmiştir. Deney kapsamında hazırlanan fenolik reçine katkı bağlayıcıların isimlendirmesi aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

B 50/70 saf bitüm-“B1”

B 50/70 saf bitüm + %2 Fenolik Reçine- “B1-2FR”

B 50/70 saf bitüm + %4 Fenolik Reçine- “B1-4FR”

B 50/70 saf bitüm + %6 Fenolik Reçine- “B1-6FR”

B 50/70 saf bitüm + %8 Fenolik Reçine- “B1-8FR”

B 50/70 saf bitüm + %10 Fenolik Reçine- “B1-10FR”

B 160/220 saf bitüm-“B2”

B 160/220 saf bitüm + %2 Fenolik Reçine- “B2-2FR”

B 160/220 saf bitüm + %4 Fenolik Reçine- “B2-4FR”

B 160/220 saf bitüm + %6 Fenolik Reçine- “B2-6FR”

B 160/220 saf bitüm + %8 Fenolik Reçine- “B2-8FR”

B 160/220 saf bitüm + %10 Fenolik Reçine- “B2-10FR”

6. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deney sonuçları verilmiştir. Çalışma kapsamında, bir önceki bölümde detaylı olarak anlatıldığı şekilde hazırlanan, fenolik reçine (FR) katkılı bitümlü bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve superpave sistemi çerçevesinde kullanılan test yöntemleri uygulanmıştır.

Tez çalışması kapsamında hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bitümlü bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile fenolik reçine katkısının iki farklı bitüm üzerinde (B1 ve B2) etkileri tespit edilmiştir.

6.1 Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları

Bu çalışma kapsamında, öncelikle saf ve fenolik reçine katkılı bitümlü bağlayıcılara geleneksel test yöntemlerinden yumuşama ve penetrasyon deneyleri uygulanmış, deney sonuçları Çizelge 6.1 ve 6.2 'de verilmiştir.

Daha öncede bahsedildiği üzere tez çalışması kapsamında fiziksel ve reolojik özellikleri bakımında B1 ve B2 olmak üzere iki farklı bitüm kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında saf B1 bitümün penetrasyon değeri 64,5 dmm, saf B2 bitümün penetrasyon değeri ise 199 dmm olarak ölçülmüştür. Bu durum, deney sonucu ölçülen her iki bitümün penetrasyon değerleri istenilen sınırların içerisinde olduğunun bir göstergesidir.

Saf B1 bitümü ile saf B2 bitümlerinin yumuşama noktası değerleri karşılaştırıldığında, daha yumuşak bitüm türü olan saf B2 bitümün yumuşama noktası değerinin sert bitüm olan B1' e göre daha düşük olması beklenir. Nitekim, sonuçlar incelendiği zaman saf B2 bitümün yumuşama noktası değeri 34,75 °C' iken saf B1 yumuşama noktası değeri 42,5 °C' dir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinin her bitüm türü için ayrı ayrı incelemesi yapıldığında, Çizelge 6.1 ve 6.2 'de açıkça görüldüğü gibi tüm fenolik

reçine katkılı bağlayıcıların penetrasyon değeri saf bitüme göre azalırken, yumuşama noktası değeri artış göstermiştir. Bu durum, saf bitüm içerisine ilave edilen fenolik reçine yüzdesinin artması ile doğru orantılı olarak bitümlü bağlayıcıların da fiziksel özelliklerinin daha da gelişerek bitümün sertleştiğinin bir göstergesidir (Airey, 2002).

Çizelge 6.1 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuçları

Özellikler	Bağlayıcı					
	B1	B1-2FR	B1-4FR	B1-6FR	B1-8FR	B1-10FR
Penetrasyon (dmm)	64,5	43	35	27,5	22,5	16
Yumuşama noktası, °C	42,5	45,75	47,5	49	50,75	53,25
Penetrasyon İndeksi	-2,36	-2,30	-2,25	-2,32	-2,27	-2,28

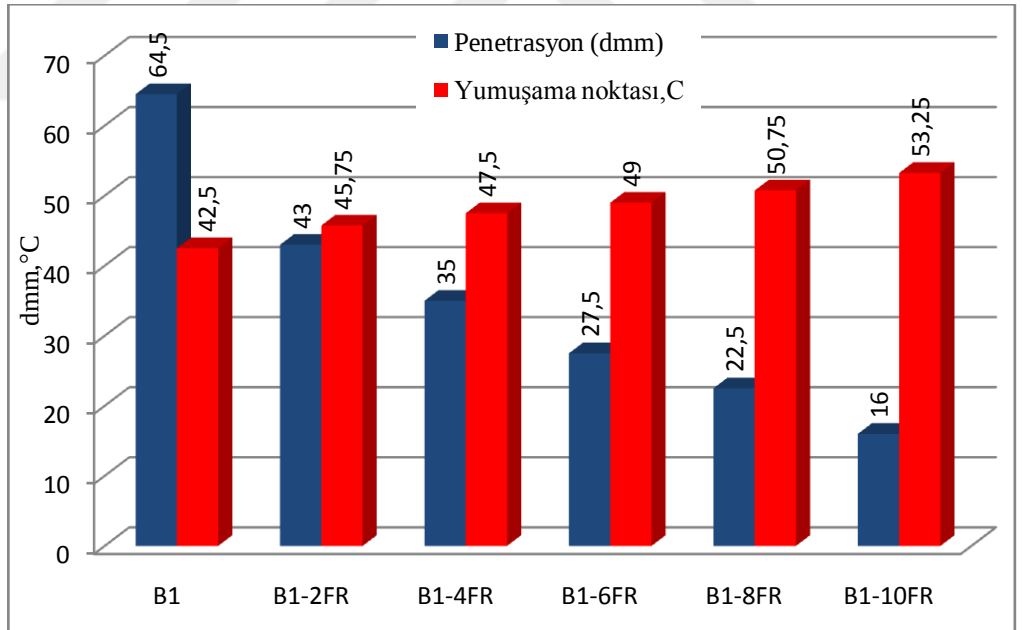
Deney sonuçları incelendiğinde saf B1 bitümü için, penetrasyon değeri 64,5 dmm, yumuşama noktası değeri ise 42,5 °C olarak tespit edilmiştir. B1-6FR modifiye edilmiş bitümü için ise penetrasyon deneyi 27,5 dmm, yumuşama noktası değeri ise 49 °C olarak bulunmuştur. B1-10FR için de penetrasyon deneyi 16 dmm, yumuşama noktası değeri ise 53,25 °C olarak belirlenmiştir.

Buna göre % 6 ve %10 oranında fenolik reçine ilavesinin orta sıcaklık (25 °C) deneyi olan penetrasyon deneyine tabi tutulan B1 bitümlü bağlayıcısının penetrasyon değeri üzerinde önemli derecede etkili olmaktadır. B1 bitüm ile B1-6FR (%6 fenolik reçine) ilaveli bitüm arasında 37 dmm fark (yaklaşık olarak % 57) oluşmaktadır. Benzer şekilde B1 bitüm ile B1-10FR (%10 fenolik reçine) ilaveli bitüm karşılaştırıldığı zaman iki bitüm arasında 48,5 dmm fark (yaklaşık olarak % 75) oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar orta sıcaklık değerlerinde fenolik reçine ilavesinin B1 bitümünün sertliğini oldukça fazla artırdığını göstermektedir.

Fakat, benzer durum yumuşama noktası deneyi için söz konusu değildir. Çizelge 6.1' de verilen değerler incelendiği zaman her üç bitümlü bağlayıcı karşımı (B1, B1-6FR ve B1-10FR) için de yumuşama noktası değerinin bitüm içerisindeki fenolik reçine miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Yumuşama

noktası değeri B1 ve B1-6FR bağlayıcıları arasında 6,5 °C (yaklaşık olarak % 15), B1 ve B1-10FR karışımları incelendiğinde ise 10,75 °C değiştiği (yaklaşık olarak %25) gözlemlenmiştir. Özetlemek gerekirse, yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri sonucunda elde edilen veriler ışığında fenolik reçine ilavesinin orta sıcaklık değerlerinde bitümün sertleşmesini %75' e kadar artırabildiği ancak yüksek sıcaklık değerlerinde sadece %25'e kadar artırdığını göstermiştir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları ile hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) değerleri incelendiğinde B1 bitüm için -2,36 belirlenmiştir. B1-2FR, B1-4FR, B1-6FR, B1-8FR, B1-10FR bağlayıcıları için ise sırası ile; -2,30, -2,25, -2,32, -2,27 ve -2,28 olarak hesaplanmıştır. Deney sonucunda hesaplanan PI değerleri incelendiği zaman birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir. Bu durum fenolik reçine ilavesinin B1 bitümünün ısı hassasiyeti üzerinde pek bir etkisi olmadığını göstergesidir.



Şekil 6.1 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B1 bitümlü bağlayıcı geleneksel deney sonuçları

Şekil 6.1 incelendiğinde B1 saf bitüme ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktası değerinin de arttığı görülmektedir.

Tez kapsamında kullanılan diğeri bir bitüm türü, B2 için yapılan çalışmada; saf B2 bitümü için, penetrasyon değeri 199 dmm, yumuşama noktası değeri ise 34,75 °C olarak tespit edilmiştir. B2-6FR modifiye edilmiş bitümü penetrasyon değeri 87,5 dmm, yumuşama noktası değeri ise 41,25 °C olarak bulunmuştur. B2-10FR için de penetrasyon deneyi 57,5 dmm, yumuşama noktası değeri ise 46, 25 °C olarak bulunmuştur. Saf B2 ve modifiye edilmiş B2 bitümleri için yapılan yumuşama noktası ve penetrasyon deneyi sonuçları Çizelge 6.2 de verilmiştir.

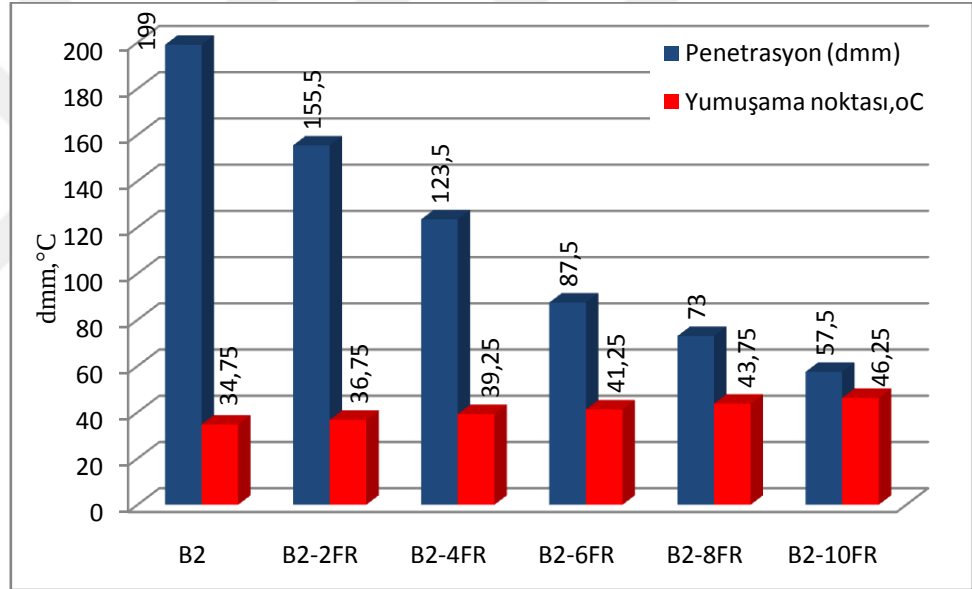
Buna göre % 6 ve %10 oranında fenolik reçine ilavesinin orta sıcaklık (25 °C) deneyi olan penetrasyon deneyine tabi tutulan B2 bitümlü bağlayıcısı üzerine önemli derecede etki etmektedir. B2 bitümü penetrasyon değeri ile B2-6FR (%6 fenolik reçine) ilaveli bitümün penetrasyon değeri arasında 111,5 dmm fark (yaklaşık olarak % 56) oluşmaktadır. Benzer şekilde B2 bitüm ile B2-10FR (%10 fenolik reçine) ilaveli bitüm arasında 141,5 dmm penetrasyon farkı (yaklaşık olarak % 71) oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlardan orta sıcaklık değerlerinde fenolik reçine ilavesi ile B-160/200 bitümünün sertliğinin oldukça fazla arttığı görülmektedir.

Saf ve modifiye edilmiş B2 bitümleri için yumuşama noktası deneyi gerçekleştirildiğinde yüksek sıcaklık değerleri için bitümün sertliğinin, fenolik reçine ilavesi oranının artışı ile orantılı olarak az miktarda da olsa arttığı saptanmıştır. Her üç bitümlü bağlayıcı karşımı (B2, B2-6FR ve B2-10FR) incelendiğinde yumuşama noktası değerinin, B2 ve B2-6FR bağlayıcıları arasında 6,5 °C değiştiği (yaklaşık olarak % 19) gözlemlenmiştir. B2 ve B2-10FR karışımları incelendiğinde ise yumuşama noktası değerinin 11,5 °C değiştiği (yaklaşık olarak %33) gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında fenolik reçine ilavesinin yüksek sıcaklıklarda bitümün sertliğini orta sıcaklık değerlerinde olduğu kadar belirgin olmasa artırdığını göstermiştir.

Çizelge 6.2 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların geleneksel deney sonuçları

Özellikler	Bağlayıcı					
	B2	B2-2FR	B2-4FR	B2-6FR	B2-8FR	B2-10FR
Penetrasyon (dmm)	199	155,5	123,5	87,5	73	57,5
Yumuşama noktası,°C	34,75	36,75	39,25	41,25	43,75	46,25
Penetrasyon İndeksi	-2,02	-2,00	-1,72	-2,01	-1,68	-1,54

Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları ile hesaplanan penetrasyon indeksi (PI) değerleri incelendiğinde B2 bitüm için -2,02 olarak belirlenmiştir. B2-2FR, B2-4FR, B2-6FR, B2-8FR, B2-10FR bağlayıcıları için ise sırası ile; -2,00; -1,72; -2,01; -1,68 ve -1,54 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B2 bitümlü bağlayıcı geleneksel deney sonuçları

B2 saf bitüme ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktası değerinin de azda olsa arttığı Şekil 6.2 net bir şekilde görülmektedir.

Orta sıcaklık (25°C) deneyi olan penetrasyon deneyi sonuçları karşılaştırıldığında %10 fenolik reçine ilavesinin her iki bitüm türünün sertleşmesine katkısı hemen hemen aynı oranda (B2 için %71, B1 için %75) olmuştur. Fakat yüksek sıcaklık deneyi olan yumuşama noktası deneyi sonuçları

incelendiği zaman %10 fenolik reçine ilavesi beklenildiği üzere yumuşak bitümün sertleşmesi üzerinde daha fazla (B2 için %33, B1 için %25) etkili olmuştur.

Her iki bitüm türü ve bunlara ait modifiye edilmiş bitümler incelendiğinde fenolik reçine katkılı bağlayıcıların PI değerlerinin saf bitüme çok yakın olduğu veya biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere yüksek PI değerleri, bitümün ısı hassasiyetinin azalması anlamı taşımaktadır (Isacsson and Lu, 1999). Bu sonuçlar incelendiğinde fenolik reçine katkısının bitümün ısı hassasiyetinin azalmasını sağladığı görülmektedir.

Isı hassasiyetinin azalması bitümlü bağlayıcıların daha geniş sıcaklık bir aralığında kullanılabileceğinin bir göstergesidir. Fakat, daha sağlıklı bir yorum yapabilmek adına sıcaklık performans değerlerinin DSR ve BBR gibi daha kapsamlı deneylerle incelenerek kesin sonuca varmak gerekmektedir.

6.2 Saf ve Fenolik Reçine Katkılı Bitümlerin Dönel İnce Film Etüvü ile Yaşlandırılması Sonucuna İlişkin Deney Sonuçları

Orijinal bitümlü bağlayıcılar üzerindeki geleneksel testlerin tamamlanmasının ardından, saf ve fenolik reçine katkılı bitümlerin dönel ince film etüvü (RTFO) deneyi yardımı ile kısa süreli yaşlanması sağlanmıştır. Yaşlandırılan saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcılarda meydana gelen kütle kaybı değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.3-4). Buna ek olarak, RTFO yardımıyla yaşlandırılmış saf ve fenolik reçine modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmış ve bu değerler orijinal (yaşlandırılmamış) olan bağlayıcıların yumuşama ve penetrasyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde, kısa süreli yaşlanmaya maruz kalmış bağlayıcıların fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Çizelge 6.3 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı deney sonuçları.

Özellikler	Şartname sınırı (%)	Bağlayıcı					
	maks. 1.0	B1	B1-2FR	B1-4FR	B1-6FR	B1-8FR	B1-10FR
İlk kütle, gr		35,210	35,146	35,468	34,770	35,478	35,430
Son kütle, gr		35,200	35,133	35,448	34,745	35,450	35,397
Kütle kaybı, %		0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09

Karayolları Genel Müdürlüğünün yayımlamış olduğu “Polimer Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesinde” polimer katkılı bağlayıcıların kütle kaybı değerinin en fazla %1 olması gerektiğini belirtmiştir (KGM, 2016). Tez kapsamında yapılan deneyler sonucunda saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılması sonrası meydana gelen kütle kaybı değerleri incelendiğinde tüm bağlayıcıların kütle kaybı değerlerinin %1’in altında olduğu tespit edilmiştir.

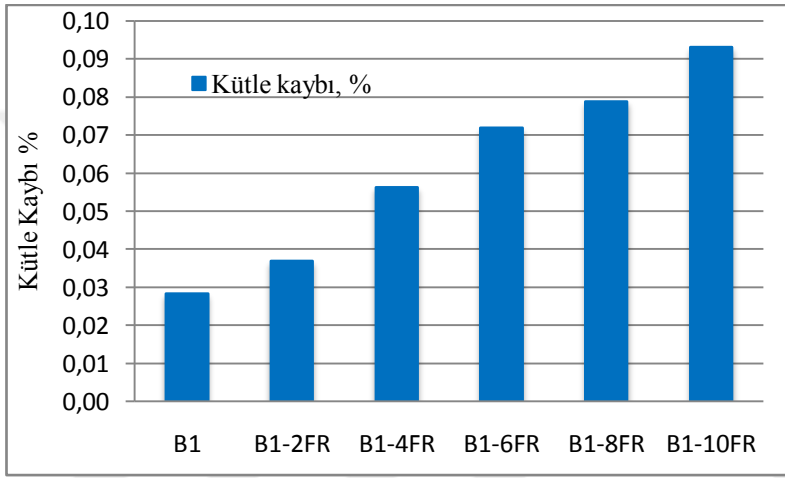
Çizelge 6.4 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı deney sonuçları

Özellikler	Şartname sınırı (%)	Bağlayıcı					
	maks. 1.0	B2	B2-2FR	B2-4FR	B2-6FR	B2-8FR	B2-10FR
İlk kütle, gr		35,275	35,076	35,301	35,013	35,240	35,123
Son kütle, gr		35,234	35,030	35,251	34,960	35,180	35,061
Kütle kaybı, %		0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18

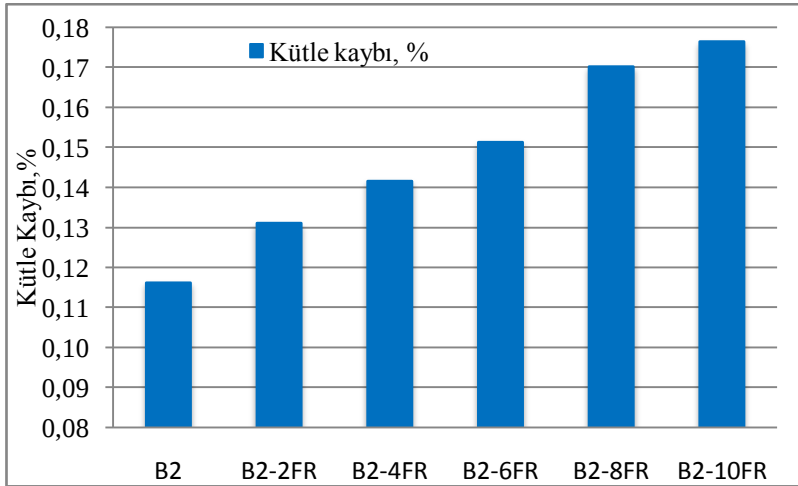
Çizelge 6,3 ve 6,4 incelendiğinde saf B1 penetrasyonlu bitümün kütle kaybı değerinin % 0,03, saf B2 penetrasyonlu bitümün kütle kaybı değerinin %0,12 olduğu tespit edilmiştir. Buna göre saf B1 bitümün kütle kaybı değeri, B2 bitüme göre daha az oldu aşırıdır. Bu sonuç, daha önce belirlediğimiz gibi yüksek sıcaklık değerlerinde sert bitümün (B1), yumuşak bitüme (B2) göre daha dayanıklı olduğunun bir kanıtıdır.

Her iki bitüm türü içinde fenolik reçine katkılı bağlayıcılarda, kısa süreli yaşlanma sonrası meydana gelen kütle kaybı değerinin ilave edilen katkı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, fenolik reçine ilavesinin bitüm içerisindeki aromatikler gibi, hafif molekül ağırlıklı yapıların buharlaşmasını hızlandırıldığı anlamına gelmektedir. Ancak bu artış %1 değerinin

altında kaldığından dolayı herhangi bir olumsuz sonuç teşkil etmemektedir (Shahabadi et al., 2010). Ancak, Çizelge 6,3 ve 6,4 detaylı şekilde incelendiğinde B1-10FR için kütle kaybı değeri % 0,09'ken, B2-10FR bitüm için kütle kaybı değeri % 0,18'e yükselmektedir. Bu durum, RTFO deneyinin yüksek sıcaklıkta bitümün kısa dönem yaşlanmasını sağladığı göz önüne alınarak sert bitümlerin yüksek sıcaklık değerlerinde daha dayanıklı olması ile açıklanabileceği gibi bitümleri kimyasal kompozisyonundan dolayı da kaynaklanabilmektedir.



Şekil 6.3 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği



Şekil 6.4 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı grafiği

Orijinal bitümler üzerinde gerçekleştirilen yumuşama ve penetrasyon deneylerinin tamamlanmasına müteakip orijinal bitümler RTFO cihazı ile

yaşlandırılarak yeniden yumuşama ve penetrasyon deneylerine tabi tutulmuşlardır. Çizelge 6.5-8' da RTFO cihazı yardımıyla kısa süreli yaşlandırılan saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri yaşlandırma öncesi değerlerle birlikte verilmiştir.

Kısa süreli yaşlandırma işleminin ardından penetrasyon değerlerinde meydana gelen değişim belirlenmesi amacıyla, yaşlandırılmış numunenin penetrasyon değerinin, orijinal numunenin (yaşlandırılmamış) penetrasyon değerine bölünüp yüz ile çarpılmaktadır. Bu hesaplama işlemi sonucunda “kalan penetrasyon” değeri belirlenmektedir. Yumuşama noktası değerlerinde meydana gelen değişim ise doğrudan yaşlandırma sonrası ve öncesindeki fark alınarak hesaplanmaktadır. Yapılan bu hesaplamalar neticesinde bitümlü bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırma sonrası ne ölçüde sertleştiği tespit edilmiştir.

RTFO sonuçları incelendiğinde, saf ve fenolik reçine katkılı bitümlü bağlayıcılarda, kısa süreli yaşlandırma işleminin ardından tahmin edildiği gibi bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinin arttığı, penetrasyon değerlerinin ise azaldığı görülmektedir.

Çizelge 6.5 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bağlayıcı					
	B1	B1-2FR	B1-4FR	B1-6FR	B1-8FR	B1-10FR
Orijinal	64,5	43	35	27,5	22,5	16
Yaşlanmış	37,75	32,5	26,5	20	14	8
Kalan pen. %	59	76	76	73	62	50

Çizelge 6.6 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bağlayıcı					
	B1	B1-2FR	B1-4FR	B1-6FR	B1-8FR	B1-10FR
Orijinal	42,5	45,75	47,25	48,25	50,25	52,75
Yaşlanmış	47,25	50,5	52,75	54,25	56,25	58,25
Fark	4,75	4,75	5,50	6,00	6,00	5,50

Bağlayıcıların sertleşmesi anlamına gelen bu durumun, genel olarak fenolik reçine katkı bağlayıcılarda da meydana geldiği ancak, yaşlanma sonrası sertleşmenin saf bağlayıcıya oranla daha az olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, B1 saf bağlayıcının yaşlandırma sonrası penetrasyon değeri 64,5 dmm' den 37,75 dmm' ye (% 58,5 kalan penetrasyon) düşerken, yumuşama noktası değeri 42,5°C' den 47,25°C' ye (fark 4,75 °C) yükselmiştir. B1-6FR bağlayıcısının ise yaşlandırma sonrası penetrasyon değeri 54,2 dmm, kalan penetrasyon değeri % 73,5 iken yumuşama noktası 48,25 °C' den 54,25°C' ye (fark 6°C) yükselmiştir. B1-10FR bağlayıcısı için ise 16dmm'den 8 dmm'ye düşerken (kalan penetrasyon % 50) yumuşama noktası 52,75°C' den 58,25°C' ye (fark 5,5°C) yükselmiştir. Bu sonuç fenolik reçine katkıların yaşlanma azaltıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

B2 saf bağlayıcının yaşlandırma sonrası penetrasyon değeri 199 dmm' den 102 dmm' ye (% 51 kalan penetrasyon) düşerken, yumuşama noktası değeri 34,75 °C' den 41,25 °C' ye yükselmiştir. B2-6FR bağlayıcısının ise kalan penetrasyon değeri % 66 iken yumuşama noktası 41,25 °C' den 45,25 °C' ye yükselmiştir. B2-10FR bağlayıcısı için ise kalan penetrasyon değeri % 52 iken yumuşama noktası 46,25 °C' den 49,5 °C' ye yükselmiştir.

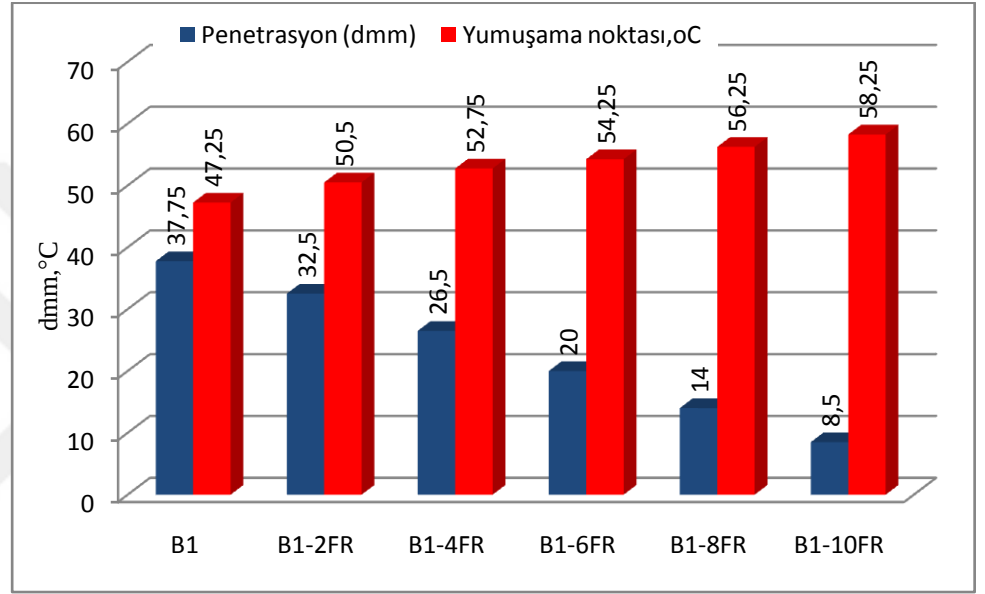
Çizelge 6.7 Saf ve fenolik reçine katkı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bağlayıcı					
	B	B-2FR	B-4FR	B-6FR	B-8FR	B-10FR
Orijinal	199	155,5	123,5	87,5	73	57,5
Yaşlanmış	110	100	76,5	53,5	42	30
Kalan pen. (%)	55	64	62	61	58	52

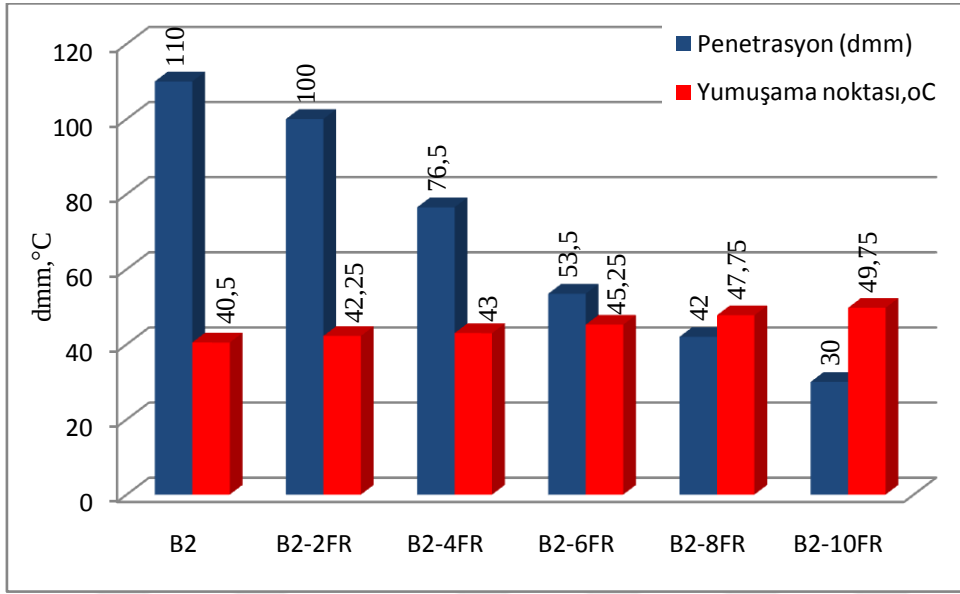
Çizelge 6.8 Saf ve fenolik reçine katkı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bağlayıcı					
	B2	B2-2FR	B2-4FR	B2-6FR	B2-8FR	B2-10FR
Orijinal	34,75	36,75	39,25	41,25	43,75	46,25
Yaşlanmış	41,25	42,25	43	45,25	47,75	49,5
Fark	6,50	5,50	3,75	4,00	4,00	3,25

Şekil 6.5-6 detaylı olarak incelendiğinde tıpkı orijinal (yaşlandırılmamış) bitümlü bağlayıcılarda olduğu gibi, bitüm içerisine ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça yumuşama noktası değerinin düzenli olarak arttığı, penetrasyon değerinin ise düzenli olarak azaldığı görülmektedir. Özetle, saf bitümlü bağlayıcılara fenolik reçine ilavesiyle birlikte, tıpkı orijinal halde olduğu gibi RTFO işlemi sonrasında sertlikleri artmaktadır.



Şekil 6.5 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait geleneksel deney sonuçları



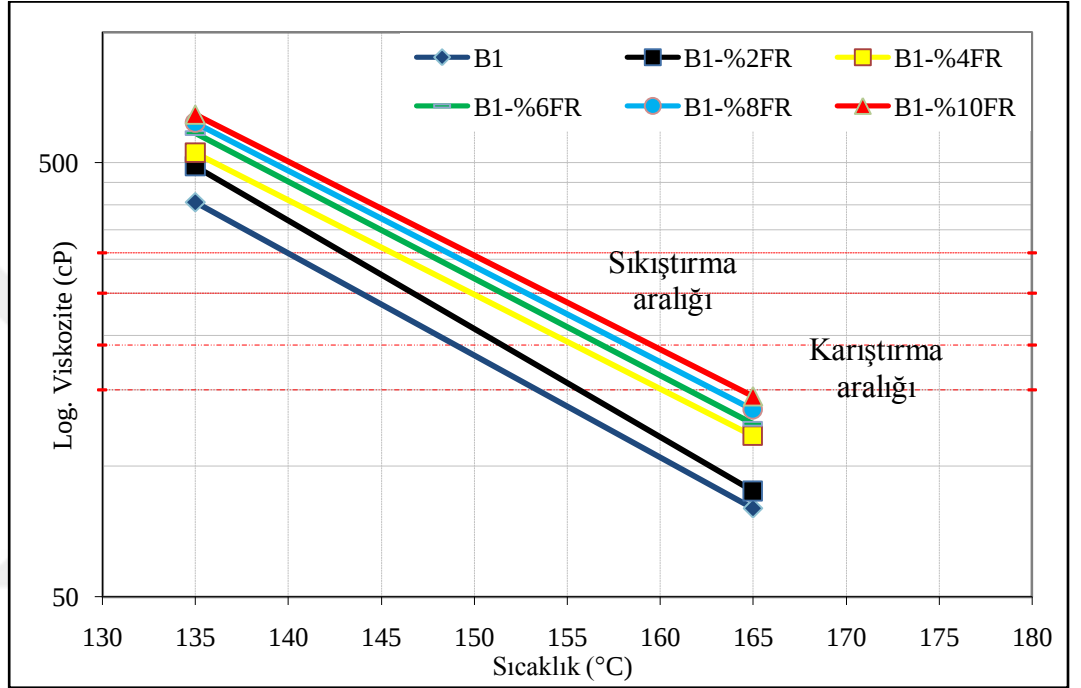
Şekil 6.6 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait geleneksel deney sonuçları

Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, hem orijinal hem de RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için penetrasyon değerlerindeki değişimlerin yüksek, yumuşama noktasındaki değişimlerin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Superpave Şartnamesine göre polimer katkılı bağlayıcılar için belirlenen yaşlanma şartname sınırlarının kalan penetrasyon değeri için %50, yumuşama noktası farklı için -5 °C/ +12 °C olduğu göz önüne alındığında, fenolik reçine katkısının bitümün kısa süreli yaşlanması üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2019).

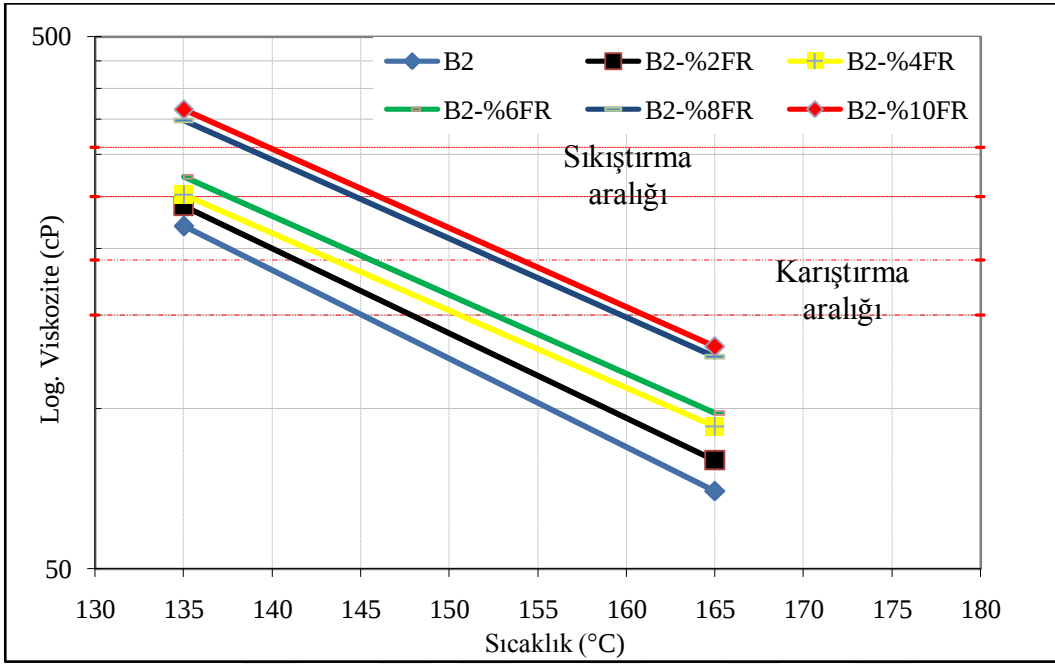
6.3 Fenolik Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlerin Dönel Viskozimetre (RV) Cihazıyla Viskozitelerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında saf ve fenolik reçine katkılı bitümlü bağlayıcıların viskozite değerleri 135°C ve 165°C sıcaklık altında The Brookfield DV-II+Pro Extra Rotational Viscometer (RV) cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Deney sonucunda, RV cihazının kendi yazılımı tarafından kaydedilen veriler ışığında Şekil 6.7-8 'de gösterilen bitümlü bağlayıcılara ait logaritmik viskozite-sıcaklık eğrileri çizilmiştir. Superpave bağlayıcı şartnamesinde yer alan 170 ± 20 cp karıştırma viskozitesi ve 280 ± 30 cp sıkıştırma viskozitesi değerleri de Şekil

6.7-8 üzerine işlenmiştir. Çizilen grafikler yardımıyla saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların bitümlü sıcak karışımların, karıştırılması ve sıkıştırılması için gereken ideal sıcaklıklar hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, bağlayıcıların viskozite ve modifikasyon indeksi değerleriyle birlikte Çizelge 6.9-10'da gösterilmiştir (ASTM D4402, 2015).



Şekil 6.7 Saf ve fenolik reçine katkılı B1bitümlü bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi



Şekil 6.8 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların log-viskozite-sıcaklık eğrisi

Çalışma kapsamında referans bağlayıcılar olarak kullanılan saf B1 ve saf B2 bitümleri karşılaştırıldığında B1 bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 405 cP ve 80 cP olarak belirlenmişken B2 bitümü için bu değerler 220 cP ve 70 cP olarak tespit edilmiştir. Bu neticeler sonucu değerlendirdiğinde B1 bitümü daha sert bitüm olduğundan dolayı viskozite değeri B2 bitümünden daha yüksek olması beklenen bir değerdir.

Çizelge 6.9-10' da görüldüğü gibi her iki bitüm türü için de saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcıların viskozite değerleri incelendiğinde, fenolik reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcıların viskozite değerlerinin her iki sıcaklıkta da saf bağlayıcılara göre viskozite değerlerinin, karıştırma ve sıkıştırma değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Bu durum fenolik reçine ilavesiyle bitümün sertliğinin arttığını bir diğer göstergesidir.

Saf B1 bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 405 ve 80 cP olarak belirlenmişken, B1-6FR bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 585 ve 125 cP (%45 ve %56 artış) olmuştur. Benzer şekilde B1-10FR bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 645 ve 145 cP (%60 ve

%81 artış) olmuştur. Bu sonuçlar saf B1 bitüme %10 fenolik reçine ilavesi yapıldığında sertliğinin artığının bir diğer göstergesidir.

Çizelge 6.9 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları

Bağlayıcı	Viskozite (cP)		ηmodifiye / ηsaf		Sıkıştırma Sıcaklığı(°C)	Karıştırma Sıcaklığı(°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B1	405,00	80,00	1	1	139,5-143,5	149-153,5
B1-2FR	490,00	87,50	1,21	1,09	143-147	152-155,5
B1-4FR	527,50	117,50	1,30	1,47	145,5-150	155,5-160
B1-6FR	585,00	125,00	1,44	1,56	147,5-152	157-161,5
B1-8FR	617,50	135,00	1,52	1,69	149-152,5	158-163
B1-10FR	645,00	145,00	1,59	1,81	150-154	160-164,5

Çizelge 6.10 incelendiğinde saf B2 bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 220 ve 70 cP olarak belirlenmişken, B2-6FR bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 272,5 cP ve 98 cP (%24 ve %40 artış) olmuştur. Benzer şekilde B1-10FR bitümünün 135°C ve 165°C viskozite değerleri sırasıyla 365 cP ve 131 cP (%66 ve %87 artış) olmuştur. Bu sonuçlar saf B2 bitüme %10 fenolik reçine ilavesi yapıldığında sertliğinin artığının bir diğer göstergesidir.

Çizelge 6.10 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların dönel viskozite deney sonuçları

Bağlayıcı	Viskozite (cP)		ηmodifiye / ηsaf		Sıkıştırma Sıcaklığı(°C)	Karıştırma Sıcaklığı(°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B2	220,00	70,00	1	1	127-133	139-145
B2-2FR	240,00	80,00	1,09	1,14	128-134	142-148
B2-4FR	252,50	92,50	1,15	1,32	129-135	144-150,5
B2-6FR	272,50	98,00	1,24	1,40	132-138	145,5-152
B2-8FR	347,50	125,00	1,58	1,79	138,5-145	152,5-160
B2-10FR	365,00	131,00	1,66	1,87	140-146	154-161,5

Sonuç olarak, her iki referans bitümünün de, akmaya karşı direnç olarak ifade edilen viskozite değerinin, fenolik reçine ilavesi ile belirgin şekilde arttığı, yani bitümlerin sertleştiği anlaşılmaktadır.

6.4 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Cihazı Kullanılarak Saf ve Fenolik Reçine ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında her iki bağlayıcı türü içinde saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları DSR cihazı yardımıyla belirlenerek deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 6.11-12’de sunulmuştur. Söz konusu çizelgelerde bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları ile birlikte, şartname limit değerleri ile bağlayıcının reolojik özelliklerini açıklamaya yardımcı olan kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri de verilmiştir. DSR deneyleri her iki bitüm türü içinde hem orijinal hem de yaşlandırılmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Superpave şartnamesine göre orijinal numuneler üzerinde yapılan DSR deneylerinde tekerlek izi parametresi değerinin ($G^*/\sin\delta$) orijinal numuneler için en az 1.0 kPa, yaşlandırılmış numunelerde ise 2.20 kPa olmalıdır (McGennis et al, 1994).

Tez çalışmasında, saf B1 ve B2 bağlayıcılarının yüksek performans sınıfları sırasıyla PG 64-Y ve PG 52-Y, olarak belirlenmiştir. Bu sonuç saf B1 bitümünün yüksek sıcaklık değerlerinde saf B2 bitümüne göre tekerlek izine karşı daha dayanıklı olduğunun bir göstergesidir. Bu durum önceki deneylerde de açıklandığı üzere bitümün sertliği ile alakalıdır. Çizelge 6.11-12 de görüldüğü gibi bitüm içerisindeki fenolik reçine miktarı artması ile birlikte bitümün sertleştiği ve performans sınıfının her iki bitüm içinde 2 sınıf artarak sırası ile PG 76-Y ve PG 64 -Y olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada, B1 bitüm numuneleri için deney başlangıç sıcaklığı 52°C, B2 bitüm numuneleri için ise 46°C olarak belirlenmiştir. Deney, bitüm numunelerinin tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri yukarıda belirtilen sınır değerlerin altına düştüğü sıcaklığa kadar 6°C'lik artışlarla devam ettirilmiş, tekerlek izi parametresi değerleri yukarıda belirtilen sınır değerlerin altına düştüğü anda DSR cihazı tarafından otomatik olarak sonlandırılarak bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfları kaydedilmiştir.

Çizelge 6.11 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G*(kPa)	δ (°)	G*/sin δ(kPa)	Yenilme Sıcaklığı (°C)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B1	Orijinal	52	8,00	86,40	8,05	67,3	≥1.00	PG 64-Y
		58	3,30	87,40	3,35			
		64	1,50	88,20	1,50			
		70	0,70	89,00	0,72			
	Yaşlandırılmış	52	16,20	83,80	16,33	65,9	≥2.20	
		58	6,60	85,70	6,62			
		64	2,80	87,00	2,83			
B1-2FR	Orijinal	52	11,90	85,90	11,97	69,5	≥1.00	PG 64-Y
		58	4,80	87,20	4,80			
		64	2,10	88,20	2,05			
		70	0,90	88,80	0,94			
	Yaşlandırılmış	52	25,10	82,80	25,30	67,9	≥2.20	
		58	10,00	85,00	10,02			
		64	4,20	86,50	4,23			
B1-4FR	Orijinal	52	17,10	85,60	17,14	71,6	≥1.00	PG 70-Y
		58	6,60	87,00	6,64			
		64	2,80	88,10	2,70			
		70	1,20	88,90	1,23			
	Yaşlandırılmış	76	0,60	89,30	0,57	71,1	≥2.20	
		52	36,30	82,00	36,68			
		58	14,20	84,20	14,29			
B1-6FR	Orijinal	64	5,80	86,00	5,86	73,3	≥1.00	PG 70-Y
		70	2,50	87,30	2,53			
		76	1,20	88,30	1,16			
		52	21,60	85,20	21,68			
	Yaşlandırılmış	58	8,40	86,70	8,42	73,1	≥2.20	
		64	3,50	87,80	3,50			
		70	1,50	88,60	1,53			
B1-8FR	Orijinal	76	0,70	89,10	0,71	74,7	≥1.00	PG 70-Y
		52	50,40	81,70	50,93			
		58	19,20	84,00	19,36			
		64	7,80	85,70	7,78			
	Yaşlandırılmış	70	3,30	86,90	3,32	74,9	≥2.20	
		76	1,50	87,90	1,50			
		52	28,20	85,00	28,31			
B1-10FR	Orijinal	58	10,60	86,60	10,66	76,7	≥1.00	PG 76-Y
		64	4,30	87,80	4,30			
		70	1,90	88,70	1,86			
		76	0,80	89,20	0,84			
	Yaşlandırılmış	52	73,60	81,20	74,53	77,5	≥2.20	
		58	27,20	83,70	27,37			
		64	10,50	85,60	10,58			
B1-10FR	Orijinal	70	4,30	87,00	4,33	76,7	≥1.00	PG 76-Y
		76	1,90	88,00	1,88			
		82	0,50	89,60	0,51			
		52	116,00	80,10	117,74			
	Yaşlandırılmış	58	42,00	82,90	42,32	77,5	≥2.20	
		64	15,80	85,00	15,90			
		70	6,30	86,60	6,33			
B1-10FR	Yaşlandırılmış	76	2,70	87,80	2,67	77,5	≥2.20	PG 76-Y
		82	1,20	88,60	1,20			

Çizelge 6.12 Saf ve fenolik reçine katkı B2 bitümlü bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G*(kPa)	δ (°)	G*/sin δ(kPa)	Yenilme Sıcaklığı (°C)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B2	Orijinal	46	4,10	86,30	4,08	56,0	≥1.00	PG 52-Y
		52	1,70	86,90	1,74			
		58	0,80	87,70	0,76			
	Yaşlandırılmış	46	8,90	83,60	8,97	55,6	≥2.20	
		52	3,70	85,30	3,69			
		58	1,60	86,70	1,56			
B2-2FR	Orijinal	46	5,30	86,40	5,34	58,2	≥1.00	PG 58-Y
		52	2,30	87,10	2,29			
		58	1,00	87,60	1,03			
		64	0,50	88,10	0,48			
	Yaşlandırılmış	46	12,80	83,00	12,91	57,9	≥2.20	
		52	5,20	85,00	5,21			
		58	2,20	86,40	2,25			
		64	0,90	87,80	0,92			
B2-4FR	Orijinal	46	7,40	86,20	7,44	60,3	≥1.00	PG 58-Y
		52	3,10	87,10	3,09			
		58	1,40	87,70	1,35			
		64	0,60	88,20	0,62			
	Yaşlandırılmış	46	17,90	82,80	18,08	60,0	≥2.20	
		52	7,10	84,90	7,11			
		58	2,90	86,30	2,93			
		64	1,20	87,60	1,24			
B2%6FR	Orijinal	46	10,20	86,00	10,26	62,1	≥1.00	PG 58-Y
		52	4,10	87,10	4,10			
		58	1,70	87,70	1,74			
		64	0,80	88,20	0,78			
	Yaşlandırılmış	46	27,00	82,20	27,21	61,8	≥2.20	
		52	10,30	84,50	10,31			
		58	4,00	86,20	4,02			
		64	1,70	87,40	1,67			
B2-8FR	Orijinal	46	16,60	85,10	16,67	64,8	≥1.00	PG 64-Y
		52	6,40	86,50	6,39			
		58	2,60	87,50	2,62			
		64	1,10	88,30	1,11			
		70	0,50	89,00	0,50			
	Yaşlandırılmış	46	41,20	81,30	41,68	64,4	≥2.20	
		52	15,20	84,00	15,30			
		58	5,80	86,00	5,80			
		64	2,30	87,50	2,33			
		70	1,00	88,50	1,01			
B2-10FR	Orijinal	46	21,20	85,10	21,31	66,3	≥1.00	PG 64-Y
		52	8,00	86,60	8,00			
		58	3,20	87,60	3,23			
		64	1,36	88,30	1,36			
		70	0,60	88,80	0,60			
	Yaşlandırılmış	46	58,00	80,80	58,79	66,0	≥2.20	
		52	21,20	83,40	21,16			
		58	7,90	85,80	7,89			
		64	3,10	87,30	3,08			
		70	1,30	88,40	1,29			

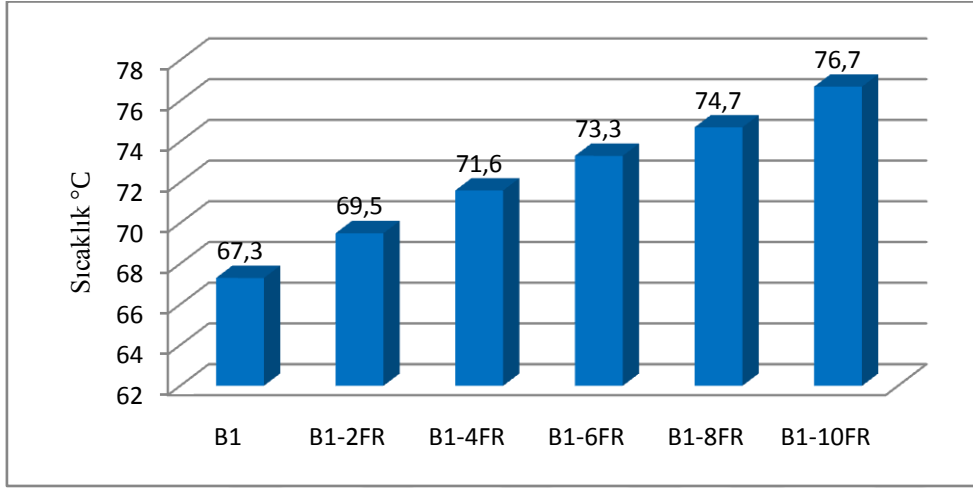
Fenolik reçine ilavesinin bitüme üzerinde sağlamış olduğu sertleşme etkisinin yanı sıra faz açısı (δ) değerleri incelendiğinde saf bitümlere göre fenolik reçine ilave bitümlerin daha elastik olduğu görülmektedir. Buna göre, aynı sıcaklık değerlerinde hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılarda B1-10FR bağlayıcısının δ değerlerinin B1 bağlayıcısına göre yaklaşık olarak $2-3^\circ$ daha düşük olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde B2-10FR bağlayıcısının δ değerleri B2 bağlayıcısına göre yaklaşık olarak $2-3^\circ$ daha düşük olduğu belirlenmiştir. Daha öncede açıklandığı üzere faz açısı (δ), 0° ye yaklaştığı zaman bitümün elastik özelliği artmaktadır. Yani faz açısının düşmesi bitümün elastik özelliğini artırmakta bu şekilde tekerlek izi oluşumunu azaltmaktadır.

Çalışma kapsamında modifiye edilen her iki referans bağlayıcının da G^* değerlerinin ilave edilen katkı miktarının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Bilindiği üzere G^* değeri bağlayıcının uygulanan kayma gerilmelerine karşı direncini gösterir. Bu parametrenin artması bitümün daha az deformasyona uğrayacağını ifade etmektedir.

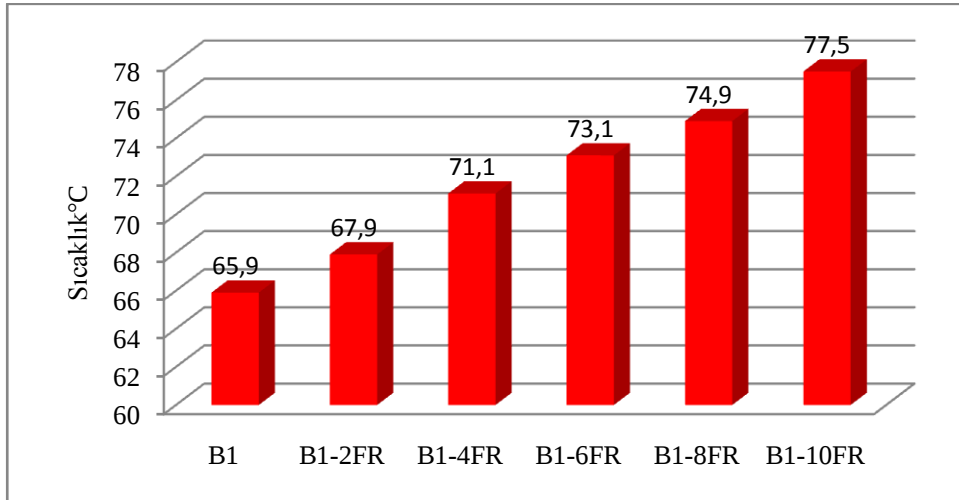
Çizelge 6.11–12’de verilen fenolik reçine katkılı bitümlere ait deney sonuçları incelendiğinde, her beş katkı oranında da bitüm içerisine ilave edilen katkı miktarının artmasıyla bitümlerin kompleks kayma (G^*) modüllerinde büyük artışların meydana geldiği, bu artışların tekerlek izi parametrelerini ($G^*/\sin\delta$) de etkileyerek bitümlerin yüksek sıcaklık sınıflarını sürekli olarak arttırdığı görülmektedir. Örneğin, Çizelge 6.11 incelendiğinde saf B1 bitüme %4 oranında fenolik reçine (B1-4FR) katkısı ilave edildiği zaman bitümün yüksek sıcaklık sınıfını PG 64-Y’ den PG 70-Y’ ye yükseldiği görülmektedir. Benzer biçimde saf B1 bitüme %10 oranında fenolik reçine (B1-10FR) katkısı ilave edildiği zaman bitümün yüksek sıcaklık sınıfının PG 76-Y’ ye yükseldiği açıkça görülmektedir.

Çizelge 6.12 incelendiğinde zaman, saf B2 bitümüne %2 oranında fenolik reçine katkısı eklendiğinde (B2-2FR) bitüm sınıfını PG 52-Y’ den PG 58-Y’ ye, %8 fenolik reçine ilavesi ise (B2-8FR) bitüm sınıfını PG 52-Y’ den PG 64-Y’ ye çıkarmaktadır.

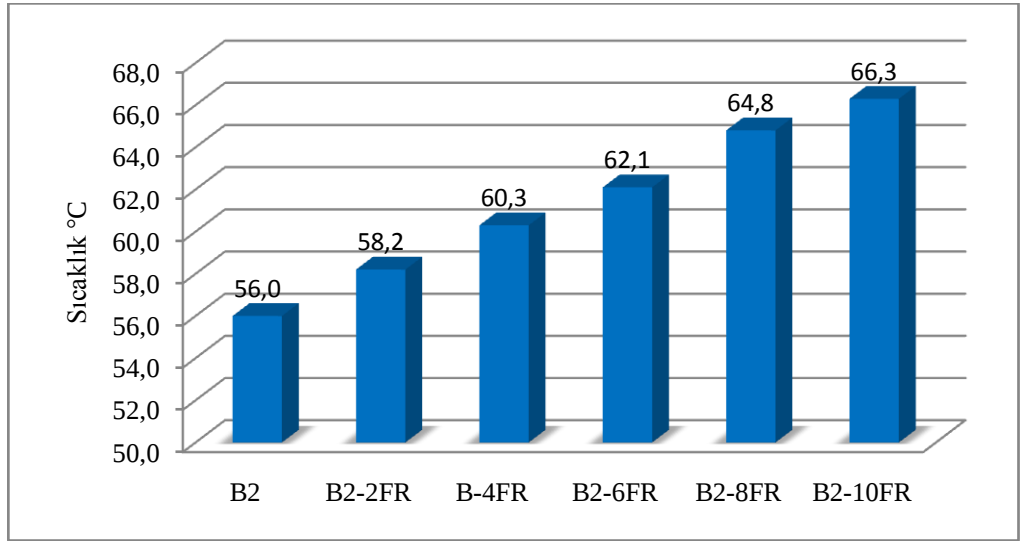
Şekil:6.9-12 incelendiğinde her iki bağlayıcı türü için hem saf hem de yaşlandırılmış numunelere ait sonuçlar incelendiğinde şartname limitlerine ulaşma sıcaklığı düzenli olarak artmıştır. Bu durum fenolik reçine ilavesinin her iki bitüm türünde sertliğini diğer bir değişle performans sınıfını artırdığının bir diğer göstergesidir.



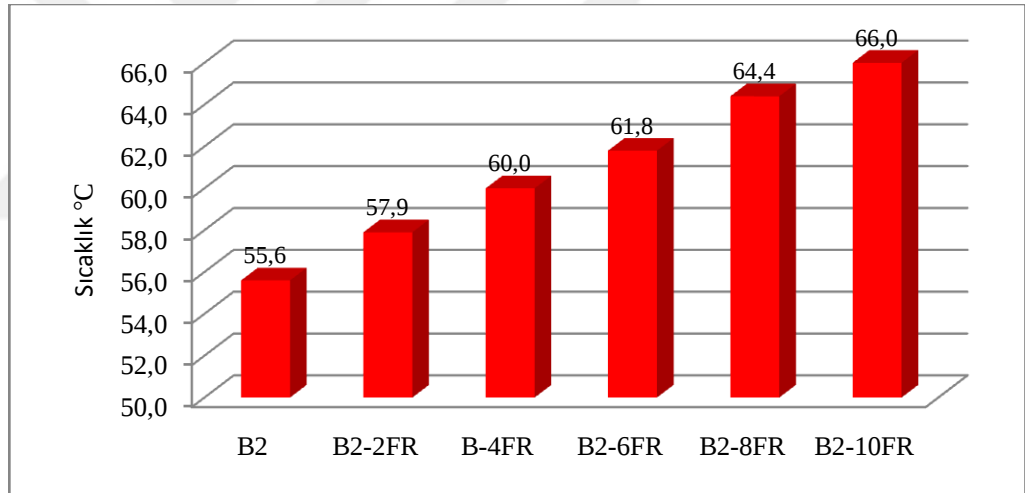
Şekil 6.9 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri



Şekil 6.10 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri

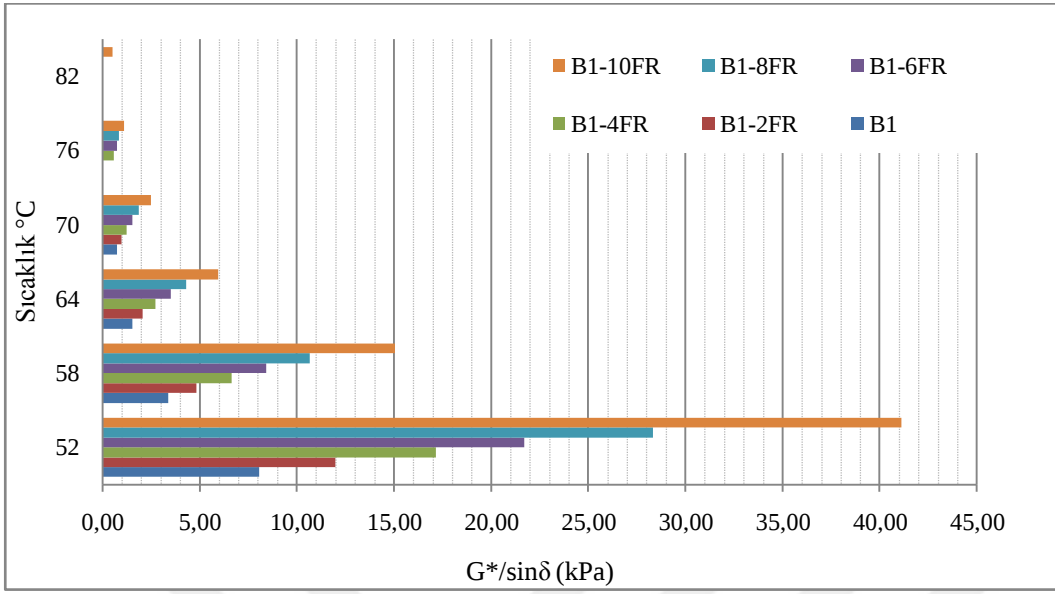


Şekil 6.11 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların orijinal numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri

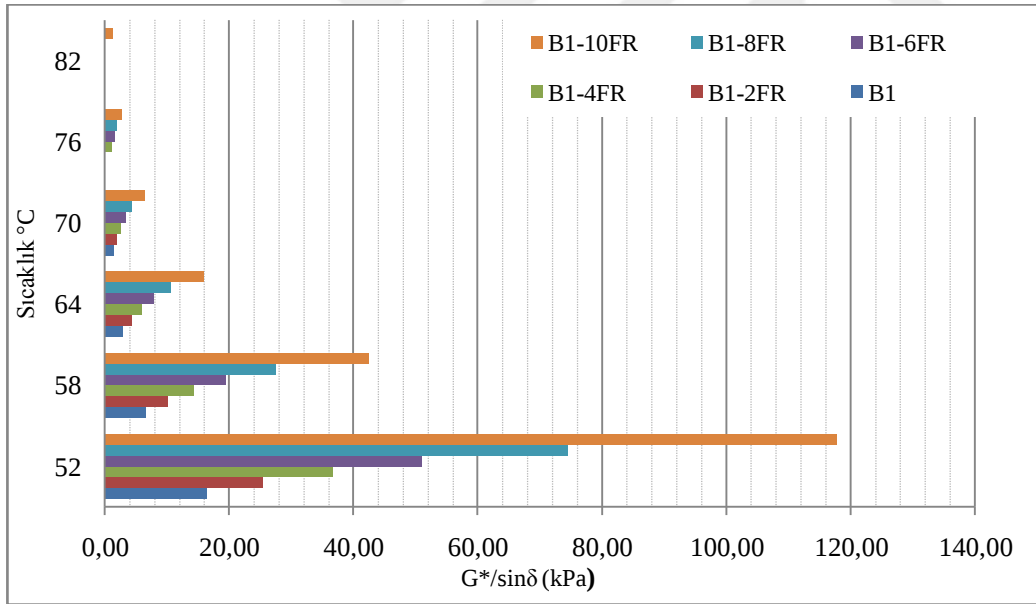


Şekil 6.12 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların RTFO ile yaşlandırılmış numunelerine ait yenilme sıcaklığı değerleri

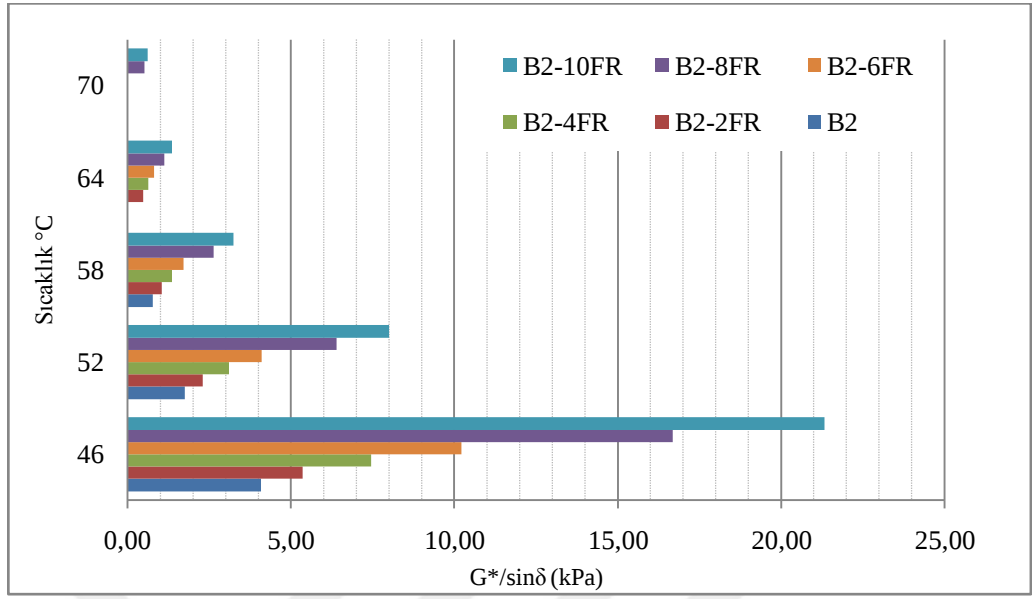
Şekil 6.13-6.16 incelendiğinde aynı sıcaklık değerleri için referans bitümleri ile fenolik reçine ilaveli bitümler karşılaştırıldığı zaman tekerlek izi parametrelerinin ($G^*/\sin\delta$) düzenli olarak artmaktadır. Bu artışlar bitüm içerisindeki fenolik reçine miktarı arttıkça bitümün sertleştiğinin bir diğer göstergesidir.



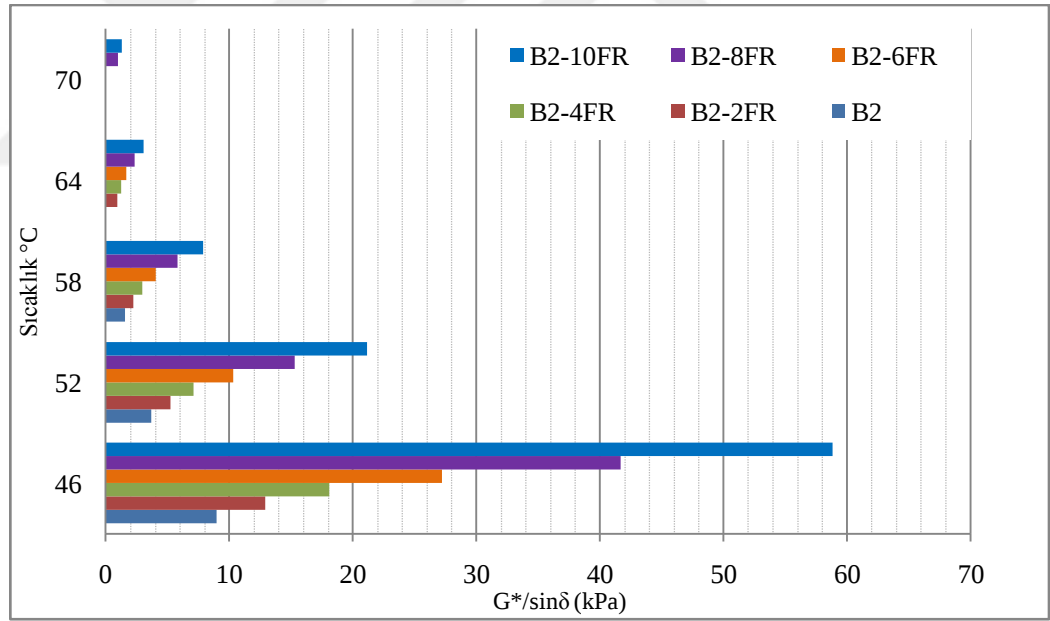
Şekil 6.13 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B1 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık (°C) - tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi



Şekil 6.14 Saf ve fenolik reçine katkılı RTFO ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık (°C) - tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi



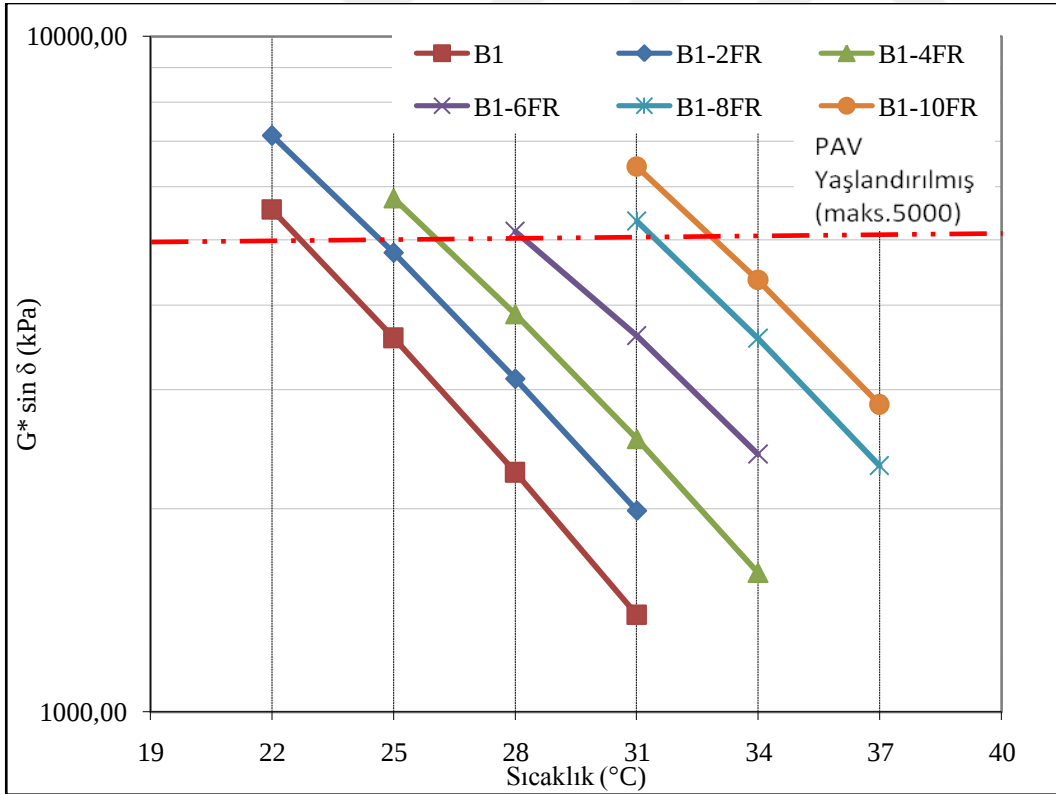
Şekil 6.15 Saf ve fenolik reçine katkılı orijinal B2 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık (°C) - tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) ilişkisi



Şekil 6.16 Saf ve fenolik reçine katkılı RTFO ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcıların sıcaklık - tekerlek izi parametresi ilişkisi

6.5 Saf ve Fenolik Reçine ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin PAV (Basınçlı Yaşlandırma Kabı) ile Yaşlandırılmasının Ardından Dinamik Kayma Reometresi ile (DSR) Yüksek Sıcaklık Performans Sınıflarının Belirlenmesi

Yol kaplamasında servis ömrünün ilk yılları (5-10 yıl) boyunca bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanması (uzun süreli yaşlanma) belirlemek üzere geliştirilen PAV deneyi, bitümün uzun süreli yaşlanmasını temsil etmektedir. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcıların RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmasından sonra uygulanan DSR deneyinde bulunan $G^* \sin \delta$ değerinin maksimum 5000 kPa olması şartı aranmaktadır. DSR deneylerinden elde edilen yorulma çatlağı ($G^* \sin \delta$) parametreleri ile ilgili sonuçlar Çizelge 6.13-14 ve Şekil 6.17-18’de verilmiştir.



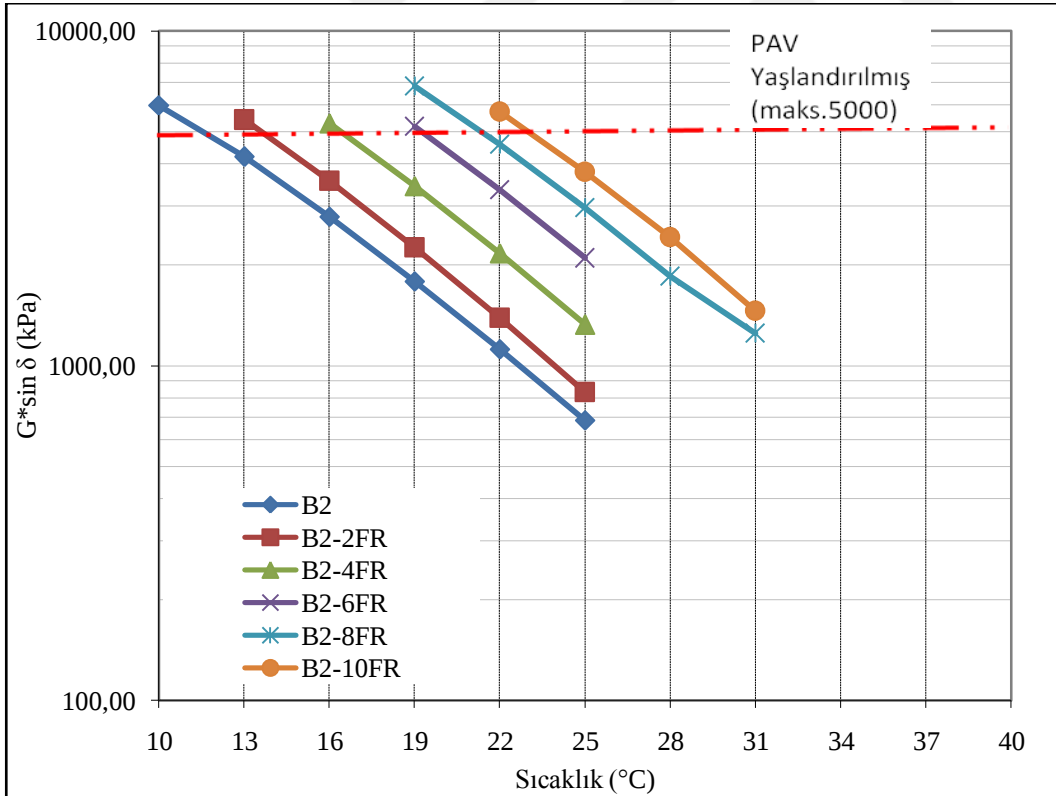
Şekil 6.17 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcılarının sıcaklık - yorulma çatlağı parametresi ilişkisi

Şekil 6.17 incelendiğinde saf B1 ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlerin tümü içinde sıcaklık arttıkça, yorulma çatlağı parametresinin ($G^* \sin \delta$) azaldığı görülmektedir. Şekil 6.17'de görüldüğü gibi bitüm içersindeki fenolik reçine miktarının artmasıyla doğru orantılı olarak bitümün yorulma çatlağı parametresinin artarak 5000 kPa değerinin üzerine çıkmasıdır. Bitüm içersindeki fenolik reçine miktarı arttıkça bitümün yorulma çatlağı oluşumuna karşı direnci azalmaktadır. Çizelge 6.13 ve Şekil 6.17 dikkate alındığında 31°C 'de saf B1 bitüm için yorulma çatlağı parametresi ($G^* \sin \delta$) 1391,22 kPa değerindeyken, B1-2FR, B1-4FR, B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR bitümleri için sırasıyla; 1985,99kPa, 2536,11kPa, 3602,79kPa, 5331,54kPa ve 6409,03kPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerden de anlaşıldığı gibi 31°C 'de B1-8FR ve B1-10FR bitümleri yorulma çatlağı parametresi sınır değeri olan 5000kPa'nın üzerine çıkmakta yani yorulma çatlaklarına karşı dayanımları azalmaktadır.

Çizelge 6.13 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B1 bitümlü bağlayıcılarının performans sınıfı değerleri

Bağlayıcı		Sıcaklık	G^*	δ	$G^* \sin \delta$	Limit değerler	Sınıf
		$^\circ\text{C}$	(kPa)	($^\circ$)	(kPa)	(kPa)	
B1	Yaşlandırılmış	31	1594,10	60,80	1391,22	≤ 5000	PG 64-Y
		28	2692,00	57,20	2261,67		
		25	4457,70	53,40	3576,60		
		22	7303,90	49,30	5539,72		
B1-2FR	Yaşlandırılmış	31	2344,50	57,90	1985,99	≤ 5000	PG 64-Y
		28	3849,10	54,10	3116,64		
		25	6243,80	50,00	4784,58		
		22	9929,60	45,90	7128,90		
B1-4FR	Yaşlandırılmış	34	1885,30	58,50	1607,05	≤ 5000	PG 70-Y
		31	3112,10	54,60	2536,11		
		28	5030,00	50,50	3883,47		
		25	7961,70	46,40	5767,27		
B1-6FR	Yaşlandırılmış	34	2846,50	54,00	2408,52	≤ 5000	PG 70-Y
		31	4602,50	51,50	3602,79		
		28	6913,80	48,00	5140,42		
B1-8FR	Yaşlandırılmış	37	2753,60	57,20	2313,33	≤ 5000	PG 70-Y
		34	4476,70	52,90	3569,70		
		31	7110,30	48,60	5331,54		
B1-10FR	Yaşlandırılmış	37	3460,18	54,90	2850,92	≤ 5000	PG 76-Y
		34	5650,60	50,50	4358,38		
		31	8928,60	45,90	6409,03		

Şekil 6.18 incelendiğinde saf B2 ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlerin tümü içinde sıcaklık arttıkça, yorulma çatlağı parametresinin ($G^* \sin \delta$) azaldığı görülmektedir. Şekil 6.18 incelendiğinde bitüm içersindeki fenolik reçine miktarının artmasıyla doğru orantılı olarak bitümün yorulma çatlağı parametresinin artarak 5000 kPa değerinin üzerine çıkmasıdır. Kısacası bitüm içersindeki fenolik reçine miktarı arttıkça bitümün yorulma çatlağı oluşumuna karşı direnci azalmaktadır. Çizelge 6.14 ve Şekil 6.18 dikkate alındığında 22° C' de saf B2 bitüm için yorulma çatlağı parametresi ($G^* \sin \delta$) 1120,38kPa değerindeyken, B2-2FR, B2-4FR, B2-6FR, B2-8FR ve B2-10FR bitümleri için sırasıyla; 1387,35kPa, 2167,53kPa, 3351,31kPa, 4578,54kPa ve 5727,82kPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerden de anlaşıldığı gibi 22° C' de B2-10FR bitümü için yorulma çatlağı parametresi sınır değeri olan 5000 kPa'nın üzerine çıkmakta yani yorulma çatlaklarına karşı dayanımı azalmaktadır.



Şekil 6.18 Saf ve fenolik reçine katkılı PAV ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcılarının sıcaklık - yorulma çatlağı parametresi ilişkisi

Çizelge 6.14 Saf ve fenolik reçine katkı PAV ile yaşlandırılmış B2 bitümlü bağlayıcılarının performans sınıfı değerleri

Bağlayıcı		Sıcaklık	G*	δ	G* sin δ	Limit değerler	Sınıf
		°C	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	
B2	Yaşlandırılmış	25	807,60	58,20	686,63	5000 $\geq$	PG 52-Y
		22	1370,50	54,80	1120,38		
		19	2281,20	51,40	1782,54		
		16	3756,90	47,90	2786,92		
		13	6001,30	44,40	4199,90		
		10	9076,60	41,20	5986,59		
B2-2FR	Yaşlandırılmış	25	946,60	61,50	831,63	5000 $\geq$	PG 58-Y
		22	1641,00	57,70	1387,35		
		19	2788,40	53,80	2251,41		
		16	4667,50	49,80	3566,24		
		13	7548,20	45,90	5422,59		
B2-4FR	Yaşlandırılmış	25	1541,30	59,30	1325,30	5000 $\geq$	PG 58-Y
		22	2636,30	55,30	2167,53		
		19	4420,50	51,20	3443,24		
		16	7242,10	47,10	5301,04		
B2-6FR	Yaşlandırılmış	25	2507,20	56,60	2094,02	5000 $\geq$	PG 58-Y
		22	4229,20	52,40	3351,31		
		19	6953,80	48,20	5181,62		
B2-8FR	Yaşlandırılmış	31	1421,15	61,70	1246,54	5000 $\geq$	PG 64-Y
		28	2184,30	57,60	1844,82		
		25	3692,60	53,30	2961,01		
		22	6062,00	49,10	4578,54		
		19	9683,20	44,90	6832,47		
B2-10FR	Yaşlandırılmış	31	1763,86	61,09	1456,02	5000 $\geq$	PG 64-Y
		28	2928,50	55,60	2417,17		
		25	4877,10	51,10	3794,53		
		22	7870,50	46,70	5727,82		

6.6 Fenolik Reçine Katkılı Bağlayıcıların Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme (MSCR) Deneyiyle Elastik Özelliklerinin Tespit Edilmesi

Saf ve fenolik reçine takviyeli bitümlü bağlayıcılara uygulanan çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme deneyine (MSCR) ait parametre değerleri tablolar halinde Çizelge 6.15-16'da gösterilmiştir. MSCR deneyinde kullanılan numuneler RTFO ile yaşlandırılmış bağlayıcı numuneleridir. MSCR deneyi kullanılarak bağlayıcıların reolojik parametrelerinden “geri dönmeyen sünme uygunluğu” (J_{nr}), elastik geri dönme (R), iki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uygunluğu farkı ($J_{nr,diff}$) ve iki yükleme arasındaki elastik geri dönme farkı

(R_{diff}) değerleri belirlenmektedir. Belirlenen parametreler sayesinde, standart Superpave şartnamesindeki yüksek sıcaklık PG sınıflarının belirlenmesine alternatif bir sınıflandırma yapılabilmekte ayrıca, bağlayıcı üzerinde gerçekleştirilen modifikasyon işleminin faydalı olup olmadığı tayin edilebilmektedir.

Tez kapsamında B1 saf bitümün daha önceden DSR cihazıyla belirlenen yüksek sıcaklık sınıfı 64°C' de ve diğer sıcaklıklardaki (52 °C, 58 °C, 70 °C, 76°C ve 82°C) sıcaklıklardaki MSCR deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.15 üzerinden incelendiğinde J_{nr} , değerlerinin aynı sıcaklıklardaki fenolik reçine katkılı bağlayıcıların J_{nr} , değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, 64°C sıcaklık altında saf B1 bitümün 3,2kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 3,5kPa, B1-6FR bitümün 3,2kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 1,14kPa, B1-10FR bitümün 3,2kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri ise 0,58kPa olarak belirlenmiştir.

Benzer şekilde, Çizelge 6.16 incelendiğinde B2 saf bitümün daha önceden DSR cihazı kullanılarak tespit edilen yüksek sıcaklık sınıfı 52°C'de ve diğer sıcaklıklardaki (46 °C, 58 °C, 70 °C ve 76°C) sıcaklıklardaki MSCR deneylerinden elde edilen veriler ışığında J_{nr} değerlerinin aynı sıcaklıklardaki fenolik reçine katkılı bağlayıcıların J_{nr} değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Örnek verecek olursak, 58°C sıcaklık altında saf B2 bitümün 3,2kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 6,91 kPa, B2-6FR bitümün 3,2 kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri: 2,50 kPa, B1-10FR bitümün 3,2 kPa yükleme durumundaki J_{nr} değeri ise 1,22 kPa olarak belirlenmiştir.

J_{nr} değeri, bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan 1 sn'lik yüklemenin ardından gelen 9 sn'lik gevşeme süresince kalan deformasyon miktarının, bitümlü bağlayıcı üzerine uygulanan kayma gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bundan dolayı, J_{nr} değerlerinin yüksek olması bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyonunun daha fazla olacağı anlamına gelmektedir. Ancak tez kapsamında yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi saf bitümlerin J_{nr} değeri, modifiye bitümlerin J_{nr} değerinden daha yüksektir. Bu durum fenolik reçine

katkılı bağlayıcı türleriyle yapılan esnek üstyapılarda tekrarlı trafik yükleri altında daha az kalıcı deformasyon meydana geleceğini ifade etmektedir.

Çizelge 6.15 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52		58		64		70		76		82	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B1	0,53	0,56	1,39	1,48	3,34	3,55	7,56	8,01	-	-	-	-
B1-2 FR	0,30	0,32	0,83	0,91	2,11	2,32	4,89	5,45	-	-	-	-
B1-4 FR	0,21	0,22	0,58	0,62	1,50	1,62	3,53	3,84	7,77	8,50	-	-
B1-6 FR	0,14	0,14	0,39	0,42	1,04	1,14	2,59	2,84	5,86	6,72	-	-
B1-8 FR	0,09	0,10	0,27	0,30	0,79	0,83	1,97	2,14	4,65	5,04	-	-
B1-10 FR	0,06	0,06	0,19	0,20	0,56	0,58	1,47	1,55	3,56	3,75	8,02	8,50

Çizelge 6.16 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi J_{nr} (kPa-1) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46°C		52°C		58°C		64°C		70°C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B2	0,97	1,08	2,46	2,80	6,10	6,91				
B2-2 FR	0,61	0,67	1,60	1,80	4,08	4,66				
B2-4 FR	0,43	0,47	1,15	1,34	2,94	3,52	7,26	8,48		
B2-6 FR	0,31	0,31	0,86	0,91	2,32	2,50	5,80	6,26		
B2-8 FR	0,19	0,20	0,56	0,59	1,56	1,70	4,06	4,34	9,41	10,06
B2-10 FR	0,13	0,13	0,39	0,41	1,15	1,22	3,04	3,26	7,43	7,95

Çizelge 6.16’da verilen ve elastik geri dönmeyi ifade eden R değerleri incelendiğinde, saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcıların bu değerleri arasında belirgin bir fark bulunmadığı görülmektedir. Bu sonuç, fenolik reçine katkısının bitümün elastik özelliklerini arttırmaktan ziyade bitümü fiziksel olarak sertleştirdiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 6.17 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi R(%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi R(%) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C		82°C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B1	5,4	2,48	2,21	-0,28	-0,13	-1,56	-2,15	-3	-	-	-	-
B1-2 FR	11,1	5,12	6,24	0,83	3,09	0,93	1,84	2,22	-	-	-	-
B1-4 FR	11,1	8	6,67	2,33	3,37	-0,27	1,13	-1,67	-0,67	-3,15	-	-
B1-6 FR	13,3	11,8	9,66	4,99	5,65	0,72	2,59	1,01	0,76	-2,62	-	-
B1-8 FR	12,5	11,2	12,2	4,81	3,7	0,77	1,97	2,14	0,83	-2,14	-	-
B1-10 FR	13,1	12,2	7,52	5,82	3,99	1,39	1,48	-0,62	-0,35	-1,75	-1,78	-3,2

Çizelge 6.18 Saf ve fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi R(%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi R(%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46°C		52°C		58°C		64°C		70°C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B2	6,44	1,26	3,09	-0,95	0,35	-2,60				
B2-2 FR	7,87	2,93	4,96	-0,16	1,74	-1,84				
B2-4 FR	10,06	4,78	7,89	0,61	5,61	-1,38	1,65	-3,10		
B2-6 FR	7,93	5,71	4,55	1,15	1,25	-0,94	-1,06	-2,46		
B2-8 FR	10,16	8,26	5,61	2,56	3,18	-0,24	-0,85	-1,98	-2,45	-5,00
B2-10 FR	11,20	9,78	5,89	3,56	2,70	0,11	0,30	-1,49	-1,82	-3,00

Çizelgelerde de görüldüğü gibi MSCR deneyi kapsamında 0,1 kPa ve 3,2 kPa olmak üzere iki farklı kayma gerilmesi kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı kayma gerilmesinin kullanılmasının nedeni, servis ömrü boyunca farklı trafik yüklerine maruz kalacak olan bitümlü bağlayıcıların davranışlarının farklı yükler altında nasıl davranış göstereceğinin belirlenmesidir. Bu nedenden dolayı iki farklı gerilmeye maruz kalan numunelerin J_{nr} ve R değerlerinin çok farklı olmaması istenmektedir. Böylelikle, MSCR parametreleri iki kayma gerilmesinde yakın olan bağlayıcıların arazi performansları daha doğru tahmin edilebilmektedir. Saf ve fenolik reçine ilave edilen bağlayıcıların $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerleri incelendiğinde, bağlayıcıların MSCR parametreleri arasındaki farklılaşmaların normal olarak adlandırılabilir limitler içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.18-19' da görüldüğü gibi, sıcaklık artışıyla birlikte $J_{nr,diff}$ ve R_{diff} değerleri artmaktadır. Bu durum, sıcaklık artışına bağlı olarak bitümlü bağlayıcıların dayanım değerlerinin hızla azalmasına bağlı olarak bağlayıcı üzerine uygulanan trafik yüklerine karşı hassasiyetinin arttığını ortaya koymaktadır. MSCR'a ait PG şartnamesinde $J_{nr,diff}$ değerinin %75 oranını aşmaması gerektiği belirtilmektedir. Buna göre, hem saf hem de fenolik reçine ilaveli bağlayıcılar tüm sıcaklık değerlerinde bu kriteri sağlamışlardır.

Çizelge 6.19 Saf ve fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52°C		58°C		64°C		70°C		76°C		82°C	
	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}
B1	6,15	54,1	6,58	113	6,38	-1057	5,9	-39,9	-	-	-	-
B1-2 FR	8,18	54	9,85	86,7	10,3	130	11,6	220	-	-	-	-
B1-4 FR	4,63	27,8	6,82	65	8,33	108	8,7	249	9,31	-372	-	-
B1-6 FR	2,82	11,1	7,36	48,3	9,72	87,3	9,74	139	14,8	447	-	-
B1-8 FR	1,5	10,4	10,4	60,7	5,72	79,2	8,36	136	8,51	360	-	-
B1-10 FR	0,83	6,59	3,32	22,5	4,75	65,2	5,23	142	5,28	-406	5,98	-79

Çizelge 6.20 Saf ve fenolik reçine katkı B2 bitümlü bağlayıcılarının MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri

Bağlayıcı	MSCR deneyi $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46°C		52°C		58°C		64°C		70°C	
	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}	$J_{nr,diff}$	R_{diff}
B2	11,5	80,4	13,8	131	13,2	845				
B2-2 FR	9,82	62,7	12,6	103	14,3	206				
B2-4 FR	9,48	52,5	15,9	92,2	19,9	125	16,8	288		
B2-6 FR	3,02	28,1	6,14	74,8	7,96	176	7,93	-132		
B2-8 FR	2,1	18,8	5,29	54,4	8,62	108	7,55	-57,2	11,4	-103
B2-10 FR	1,55	12,7	4,26	39,5	6,04	96	7,05	604	6,92	-64,7

6.7 RTFOT' la yaşlandırılmış fenolik reçine ilaveli bitümlü bağlayıcıların DSR cihazı ile MSCR metodu kullanılarak performans (PG plus) sınıflarının belirlenmesi

MSCR deneylerine göre PG sınıflarının belirlenmesinde, deney yöntemleri kısmında belirtildiği üzere, deneyin gerçekleştiği sıcaklık değerinde, 3.2 kPa yüklemedeki J_{nr} değerleri hesaba katılmaktadır. J_{nr} değerinin düşük olması, bu bağlayıcılarla inşa edilecek esnek üstyapının daha yüksek trafik hacmini karşılayabilmesi anlamına gelmektedir. Buna göre, 4 farklı trafik durumundan, standart trafik (S) için minimum 4,0 J_{nr} (1/kPa), ağır trafik (H) için, minimum 2,0 J_{nr} (1/kPa), çok ağır (V) trafik için minimum 1,0 J_{nr} (1/kPa) ve aşırı ağır trafik için (E) trafik için minimum 0,5 J_{nr} (1/kPa) değeri istenilmektedir.

Çizelge 6.21 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bağlayıcıların MSCR deneyine göre yüksek sıcaklık PG sınıfları

Bağlayıcı	DSR deneyine göre PG sınıfı	MSCR deneyine göre PG sınıfı
B1	PG 64-Y	PG 64S-Y
B1-2FR	PG 64-Y	PG 64S-Y
B1-4FR	PG 70-Y	PG 70S-Y
B1-6FR	PG 70-Y	PG 70S-Y
B1-8FR	PG 70-Y	PG 70S-Y
B1-10FR	PG 76-Y	PG 76V-Y

Fenolik reçine katkılı bağlayıcıların MSCR yüksek sıcaklık sınıfı değerleri incelendiğinde, B1 ve B1-2FR bağlayıcılarının DSR deneyi sonucunda tespit edilen PG 64-Y sıcaklık sınıfını, B1-4FR, B1-6FR ve B1-8FR bağlayıcılarının ise PG 70-Y sıcaklık sınıfını koruduğu ve bu sıcaklık değerinde standart trafik yüklerine maruz kalacak esnek üstyapılar için uygun olduğu belirlenmiştir. B1-10FR bağlayıcısıysa DSR deneyi sonucunda tespit edilen PG 76-Y sıcaklık sınıfını korumakla birlikte çok ağır trafik yüklerine maruz kalacak esnek üstyapılar için uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.22 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bağlayıcıların MSCR deneyine göre yüksek sıcaklık PG sınıfları

Bağlayıcı	DSR deneyine göre PG sınıfı	MSCR deneyine göre PG sınıfı
B2	PG 52-Y	PG 52S-Y
B2-2 FR	PG 58-Y	PG 52H-Y
B2-4 FR	PG 58-Y	PG 58S-Y
B2-6 FR	PG 58-Y	PG 58S-Y
B2-8 FR	PG 64-Y	PG 58H-Y
B2-10 FR	PG 64-Y	PG 64S-Y

Fenolik reçine katkılı bağlayıcıların MSCR yüksek sıcaklık sınıfı değerleri incelendiğinde, B2 bitümlü bağlayıcısı DSR deneyi sonucunda tespit edilen PG 52-Y sıcaklık sınıfını, B2-4 FR ve B2-6 FR bitümlü bağlayıcıları PG 58-Y sıcaklık sınıfını, B2-10 FR bitümlü bağlayıcısı PG 64-Y sıcaklık sınıfını koruduğu

ve bu sıcaklık değeri standart trafik yüklerine maruz kalacak esnek üstyapılar için uygun oldukları belirlenmiştir. B2-2FR bağlayıcısıysa DSR deneyi sonucunda tespit edilen PG 58-Y sıcaklık sınıfını MSCR deneyi sonrasında koruyamayarak yüksek sıcaklık sınıfı değerini PG 52-Y sıcaklık sınıfına düşürmüştür, benzer şekilde B2-8FR bağlayıcısıysa DSR deneyi sonucunda tespit edilen PG 64-Y sıcaklık sınıfını MSCR deneyi sonrasında koruyamayarak yüksek sıcaklık sınıfı değerini PG 58-Y sıcaklık sınıfına düşürmüştür. Ancak her iki bağlayıcıda bu sıcaklık sınıflarında ağır trafik yüklerine maruz kalacak esnek üstyapılar için uygun olduğu belirlenmiştir.

AASHTO M 332 (2014) standardı göz önüne alındığından, bitümlü bağlayıcıların yorulma ömrünün değerlendirilmesi açısından, PAV ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılar üzerine 25°C DSR deneyi uygulandığında $G^* \sin \delta$ değerinin 6000 kPa'yı aşmaması gerekmektedir. Çizelge 6.22' de görüldüğü üzere, B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR sınır değeri açıldığından dolayı bitümlü bağlayıcıların yorulma ömrü kısa olmaktadır.

Çizelge 6.23 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilen B1 ve B2 bitümlü bağlayıcıların 25 °C' de MSCR deneyine göre $G^* \sin \delta$ değerleri

Bağlayıcı		$G^* \sin \delta$ 25°C(kPa)	Standart
B1	Saf	3576,60	Maks 6000 kPa
	2FR	4784,58	
	4FR	5767,27	
	6FR	6645,62	
	8FR	7523,58	
	10FR	8421,84	
B2	Saf	686,63	
	2FR	831,63	
	4FR	1325,30	
	6FR	2094,02	
	8FR	2961,01	
	10FR	3794,53	

6.8 Fenolik Reçine ile Modifiye Edilen Bitümlü Bağlayıcıların DSR Cihazı İle Farklı Frekans Deney Sonuçlarının İncelenmesi

Tez kapsamında bitümün reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan ileri test yöntemlerinden farklı frekans deneyleri kapsamında, fenolik reçine katkılı bitümlü bağlayıcılar üzerinde B1 bitümlü bağlayıcıları için 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, ve 70°C sıcaklıklarda, B2 bitümlü bağlayıcıları için 20°C, 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarda farklı frekans deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deneyler, Çizelge 4.5'de gösterildiği şekilde 10km/sa hıza eşdeğer 1,25 rad/sn, 40km/sa hıza eşdeğer 5 rad/sn ve 100km/sa hıza eşdeğer 12,5 rad/sn frekanslarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kompleks kayma (G^*) modülü, faz açısı δ ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi Çizelge 6.24-25 her iki bitüm türü içinde verilmiştir.

Çizelge 6.24 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların farklı frekans verileri

Bağlayıcı	Frekans	1,25 rad/s			5 rad/s			12,5 rad/s		
	Sıcaklık	G*	δ	G*/sin δ	G*	δ	G*/sin δ	G*	δ	G*/sin δ
	°C	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(°)	(kPa)
B1	30	63,65	82,07	64,52	212,45	78,81	216,57	470,42	76,40	484,00
	40	11,83	85,02	11,89	37,68	83,27	37,94	84,11	81,68	85,00
	50	2,07	87,78	2,07	7,06	86,44	7,08	16,28	85,27	16,34
	60	0,39	89,50	0,39	1,47	88,39	1,47	3,53	87,58	3,53
	70	0,10	89,43	0,10	0,39	89,26	0,39	0,96	88,86	0,96
B1-2FR	30	112,88	80,50	114,88	367,11	76,84	377,02	792,04	74,04	823,79
	40	20,23	83,83	20,37	63,31	81,93	63,95	138,92	80,20	140,97
	50	3,32	86,95	3,32	11,19	85,51	11,22	25,50	84,25	25,63
	60	0,59	89,21	0,59	2,19	87,90	2,19	5,24	86,90	5,25
	70	0,15	89,53	0,15	0,56	89,16	0,56	1,36	88,57	1,36
B1-4FR	30	181,44	79,59	185,02	573,49	75,29	592,92	1202,50	71,90	1265,10
	40	30,63	83,14	30,88	94,72	81,12	95,86	205,33	79,27	208,99
	50	4,69	86,43	4,70	15,72	84,96	15,78	35,66	83,67	35,88
	60	0,80	88,70	0,80	2,96	87,43	2,96	7,03	86,47	7,05
	70	0,19	88,85	0,19	0,72	88,58	0,72	1,75	88,09	1,75
B1-6FR	30	265,71	78,77	260,91	820,43	73,96	853,65	1680,50	70,10	1787,20
	40	43,48	82,55	43,27	133,01	80,41	134,89	285,25	78,45	291,15
	50	6,28	85,31	6,27	21,01	84,08	21,12	47,50	83,02	47,86
	60	1,07	86,29	1,07	3,88	85,64	3,90	9,12	85,28	9,15
	70	0,25	83,80	0,25	0,93	84,92	0,93	2,22	85,84	2,23
B1-8FR	30	489,20	76,64	481,55	1236,00	72,55	1295,60	2071,60	69,33	2214,10
	40	63,99	82,38	63,62	194,43	80,01	197,42	414,14	77,83	423,66
	50	8,84	85,94	8,82	29,38	84,40	29,52	66,06	83,04	66,55
	60	1,38	88,44	1,37	5,02	87,11	5,03	11,87	86,09	11,90
	70	0,30	89,25	0,30	1,12	88,72	1,12	2,72	87,97	2,72
B1-10FR	30	757,72	74,49	786,37	2246,30	68,28	2417,90	4417,60	63,18	4949,90
	40	107,98	81,19	109,27	329,16	78,29	336,16	703,38	75,61	726,16
	50	14,10	85,05	14,16	47,09	83,39	47,41	106,38	81,91	107,45
	60	2,13	87,31	2,13	7,77	86,08	7,79	18,36	85,15	18,43
	70	0,44	87,76	0,44	1,65	87,43	1,65	3,99	86,88	3,99

Çizelge 6.24 detaylı şekilde incelendiği zaman, aynı bağlayıcı türü için sabit sıcaklıkta frekans değeri arttıkça, yükleme süresi azalmakta buna bağlı olarak kompleks kayma modülü (G^*) değerlerinin arttığı, faz açısı (δ) değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu iki değere bağlı olarak hesaplanan tekerlek izi parametresinin de ($G^*/\sin\delta$) arttığı tespit edilmiştir.

Örneğin saf B1 bitüm üzerinde 30°C sıcaklıkta farklı frekans deneyi gerçekleştirildiğinde 1.25 rad/sn frekansta $G^*/\sin\delta$ değeri 64,52 kPa, 5 rad/sn

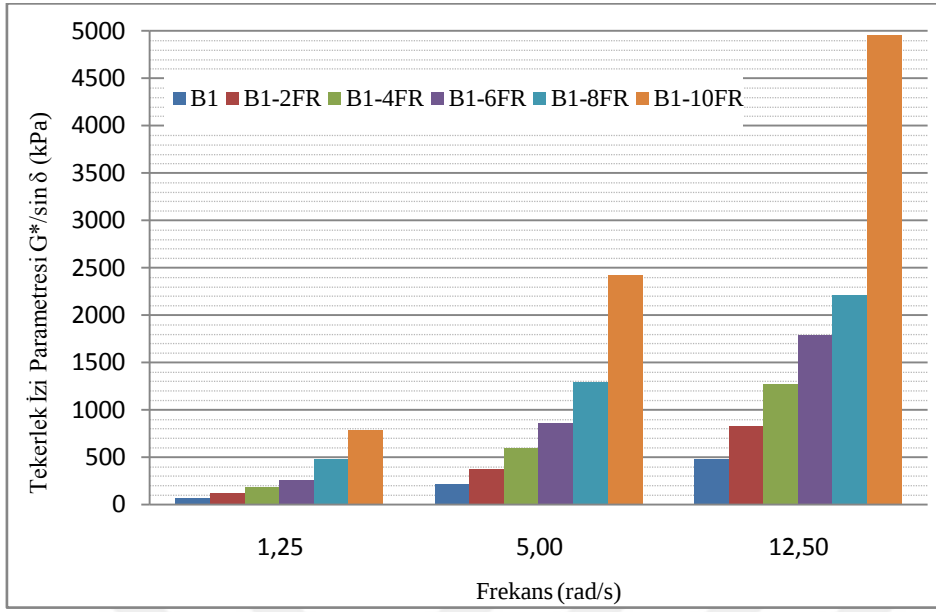
frekansta $G^*/\sin \delta$ değeri 216,57 kPa (% 337 artış), 12,5 rad/sn frekansta $G^*/\sin \delta$ değeri 484 kPa (% 750 artış) olmuştur. Bu durumu beklendiği üzere uygulanan frekans değeri arttıkça, bitümlü bağlayıcı üzerindeki yük uygulama süresi azalmakta tekerlek izi parametresi değerinin arttığının göstergesidir.

Benzer şekilde, farklı frekans verilerini içeren Çizelge 6.24 incelendiğinde, tüm frekans değerlerinde aynı sıcaklık değerleri için fenolik reçine katkılı B1 bitümlü bağlayıcıların saf B1 bitümlü bağlayıcıya göre, daha yüksek G^* değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Faz açısı (δ) değeri incelendiğinde de aynı sıcaklık değerleri için bitümlü bağlayıcı içerisindeki fenolik reçine oranı arttıkça δ değerinin saf bitüme göre giderek azaldığı belirlenmiştir. Burada, δ değerlerindeki azalma, fenolik reçine ilavesinin bitümlü bağlayıcıların toplam deformasyonun azaltması sonucunda sağlanmıştır.

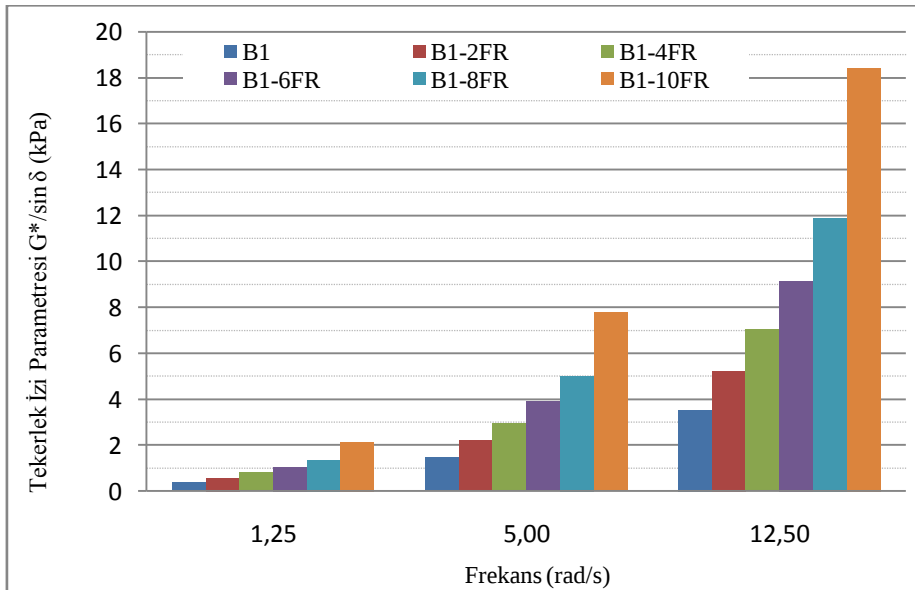
$G^*/\sin \delta$ değerindeki değişim incelendiği zaman aynı sıcaklık değerleri için bitüm içerisindeki fenolik reçine ilavesi arttığı zaman $G^*/\sin \delta$ değerinin de arttığı belirlenmiştir.

Fenolik reçine ilavesinin $G^*/\sin \delta$ üzerindeki etkisine örnek verecek olursak, 30°C sıcaklıkta 1.25 rad/sn frekansta saf B1 bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 64,52kPa, B1-6FR bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 260,91kPa (%405 artış), B1-10FR bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 786,37kPa (%1218 artış) olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.19 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 30° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi

Deney sıcaklığı 60°C' ye çıkarıldığında 1.25 rad/sn frekansta saf B1 bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 0,39kPa, B1-6FR bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 1,07kPa (%274 artış), B1-10FR bitümü için $G^*/\sin \delta$ değeri 2,13kPa (%546 artış) olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.20 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 60° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi

Sonuç olarak, 30°C ve 60°C sıcaklık değerlerinde yavaş trafik hızlarına eşdeğer 1.25 rad/sn frekansta uygulanan deneyler neticesinde B1 bitümlü bağlayıcı içersindeki fenolik reçine katkısının oranı arttıkça tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitümün sertliğini artırarak tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını artırdığının göstergesidir. Şekil 6.19 ve 6.20 incelendiğinde 30°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ değerlerinin 60°C sıcaklıkta ki $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, daha yüksek sıcaklık değerlerinde bitümün yumuşayarak akışkan hale gelerek, viskozite değerinin azalmasına bağlı olarak tekerlek izi oluşumuna karşı direnci azalmaktadır.

Çizelge 6.25 detaylı şekilde incelendiği zaman frekans değeri artıkça, yükleme süresi azalmakta buna bağlı olarak kompleks kayma modülü (G^*) değerlerinin arttığı, faz açısı (δ) değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu iki değere bağlı olarak hesaplanan tekerlek izi parametresinin de ($G^*/\sin\delta$) arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 6.25'te verilen farklı frekans verileri incelendiğinde, tüm frekans değerlerinde aynı sıcaklık değerleri için fenolik reçine katkılı B2 bitümlü bağlayıcıların saf B2 bitümlü bağlayıcıya göre, daha yüksek G^* değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ancak, faz açısı (δ) değeri incelendiğinde de aynı sıcaklık değerleri için bitümlü bağlayıcı içersindeki fenolik reçine oranı arttıkça δ değerinin saf bitüme göre giderek azaldığı belirlenmiştir.

$G^*/\sin\delta$ değerindeki değişim incelendiği zaman aynı sıcaklık değerleri için B2 bitümlü bağlayıcısı içersindeki fenolik reçine oranı arttığı zaman $G^*/\sin\delta$ değerinin de arttığı belirlenmiştir.

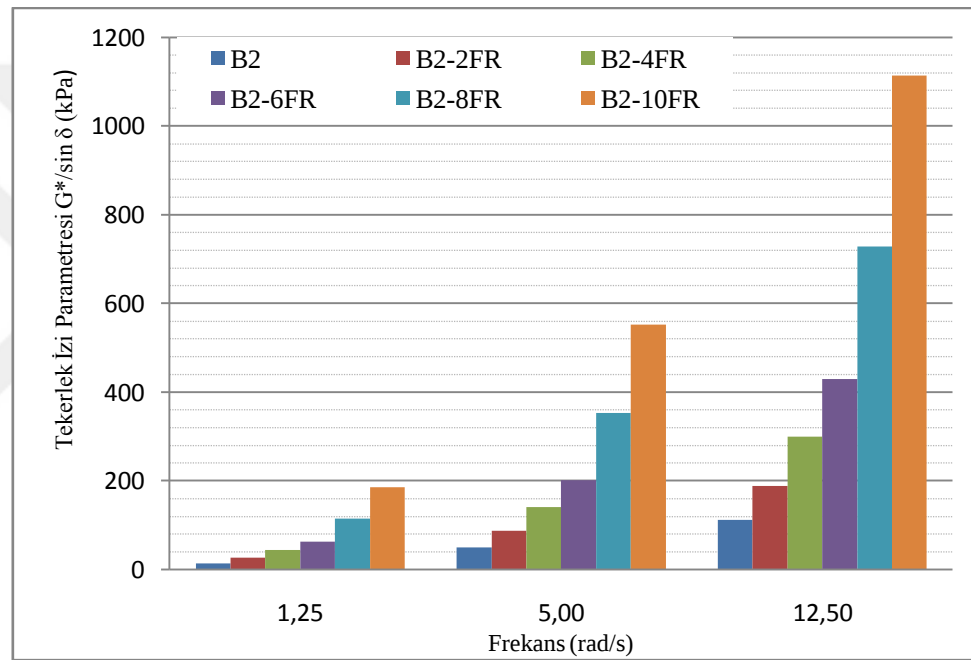
Çizelge 6.25 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B2 bitümlü bağlayıcıların farklı frekans verileri

Bağlayıcı	Frekans	1,25 rad/s			5 rad/s			12,5 rad/s		
	Sıcaklık	G*	δ	G*/sin δ	G*	δ	G*/sin δ	G*	δ	G*/sin δ
	°C	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)	(°)	(kPa)
B2	20	93,27	78,89	95,05	309,86	75,46	320,10	656,09	72,72	687,10
	30	14,91	83,08	15,02	49,88	81,03	50,50	109,88	79,33	111,81
	40	2,21	85,88	2,22	7,73	84,80	7,76	17,72	83,76	17,82
	50	0,40	87,30	0,40	1,45	86,87	1,45	3,41	86,32	3,42
	60	0,09	87,24	0,09	0,35	87,61	0,35	0,83	87,54	0,83
B2-2FR	20	169,46	77,25	173,95	521,31	73,07	544,92	1064,60	69,84	1134,00
	30	27,26	82,15	27,53	86,48	79,61	87,92	184,57	77,59	188,99
	40	3,68	86,00	3,69	12,55	84,39	12,61	28,13	83,07	28,33
	50	0,60	88,34	0,60	2,16	87,26	2,16	5,01	86,39	5,02
	60	0,12	89,15	0,12	0,46	88,78	0,46	1,12	88,30	1,12
B2-4FR	20	298,56	75,55	308,49	879,48	70,80	931,31	1719,80	67,04	1867,80
	30	44,52	81,49	45,04	139,02	78,66	141,79	292,00	76,36	300,48
	40	5,48	85,87	5,49	18,63	84,08	18,73	41,70	82,59	42,05
	50	0,85	88,31	0,86	3,06	87,17	3,06	7,08	86,24	7,10
	60	0,16	89,30	0,16	0,62	88,84	0,62	1,51	88,27	1,51
B2-6FR	20	448,62	73,93	466,87	1317,70	68,77	1413,60	2569,30	64,64	2843,40
	30	63,08	80,97	63,87	197,54	77,80	202,10	416,15	75,18	430,47
	40	7,43	85,69	7,45	25,47	83,76	25,62	57,45	82,13	58,00
	50	1,09	88,32	1,09	3,94	87,10	3,94	9,24	86,09	9,26
	60	0,20	89,54	0,20	0,78	88,96	0,78	1,90	88,27	1,90
B2-8FR	20	806,80	70,78	854,41	2211,80	64,63	2447,90	4212,10	59,62	4882,70
	30	113,80	79,02	115,92	341,41	75,45	352,72	695,51	72,55	729,07
	40	12,68	84,63	12,74	42,33	82,42	42,70	93,56	80,59	94,83
	50	1,73	87,68	1,73	6,18	86,36	6,19	14,37	85,23	14,42
	60	0,30	89,06	0,30	1,15	88,44	1,15	2,78	87,74	2,78
B2-10FR	20	1289,40	68,05	1390,10	3441,20	60,69	3946,50	6221,70	55,25	7571,80
	30	182,18	77,87	186,33	530,70	73,77	552,74	1049,10	70,40	1113,60
	40	19,45	84,27	19,55	64,07	81,78	64,74	140,38	79,69	142,68
	50	2,48	87,63	2,48	8,84	86,16	8,86	20,50	84,92	20,58
	60	0,41	89,27	0,41	1,56	88,47	1,56	3,78	87,67	3,78

B1 bitüm için yapılan kıyaslama B2 bitüm içinde yapıldığında, saf B2 üzerinde 30°C sıcaklıkta farklı frekans deneyi gerçekleştirildiğinde 1.25 rad/sn frekansta G*/sin δ değeri 15,02 kPa, 5rad/sn frekansta G*/sin δ değeri 50,50 kPa (% 337 artış), 12,5 rad/sn frekansta G*/sin δ değeri 111,81 kPa (% 744 artış) olmuştur. Bu durumu beklendiği üzere uygulanan frekans değeri arttıkça tekerlek izi parametresi değerinin arttığının göstergesidir. Buna göre saf B1 bitüm ile saf

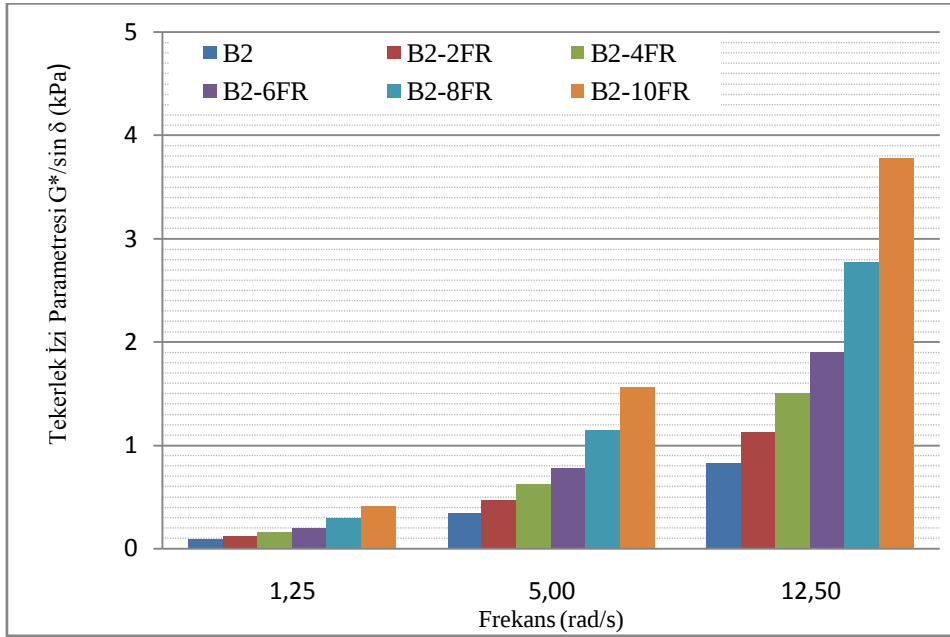
B2 bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerlerinin frekans değişimine göre davranışları birbirlerine oldukça benzerdir.

Saf B2 bitümü üzerinde fenolik reçine ilavesinin etkilerini göz önüne alındığındaysa, 30°C sıcaklıkta 1.25 rad/sn frekansta saf B2 bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 15,02kPa, B2-6FR bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 63,87kPa (%425 artış), B2-10FR bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 186,33kPa (%1240 artış) olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.21 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 30° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi

Deney sıcaklığı 60°C'ye çıkarıldığında 1.25 rad/sn frekansta saf B2 bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 0,09kPa, B2-6FR bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 0,20 kPa (%222 artış), B2-10FR bitümü için $G^*/\sin\delta$ değeri 0,41 kPa (%455 artış) olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.22 Saf ve fenolik reçine ile modifiye edilmiş B1 bitümlü bağlayıcıların 60° C sıcaklıkta tekerlek izi parametresi- frekans ilişkisi

Şekil 6.21-22' de gösterildiği gibi, farklı sıcaklık değerlerinde (30°C ve 60°C) saf B2 bitüme ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça tüm frekans değerleri için $G^*/\sin\delta$ değeri artmaktadır. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitümün sertliğini artırarak tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını artırdığının göstergesidir. Şekil 6.21 ve 6.22 incelendiğinde 30°C sıcaklıkta $G^*/\sin\delta$ değerlerinin 60°C sıcaklıkta ki $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, daha yüksek sıcaklık değerlerinde bitümün yumuşayarak akışkan hale gelerek, viskozite değerinin azalmasına bağlı olarak tekerlek izi oluşumuna karşı direnci azalmaktadır.

Bu sonuçlar, 30°C gibi orta sıcaklık değerlerinde fenolik reçine ilavesinin her iki bitüm türü içinde bir birine yakın oranlarda bitümlü bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerini etkilediği ancak, 60°C gibi yüksek sıcaklık değerlerinde B1 bitümü üzerindeki etkisi B2 bitümlü bağlayıcısı üzerindeki etkiye göre daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni B1 bitümlü bağlayıcısının sertlik değerinin B2 bitümlü bağlayıcısına göre daha yüksek olmasıdır.

7. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında saf B1 penetrasyonlu bitüm ile saf B2 penetrasyonlu bitümlerinin her birine %2, %4, %6, %8, %10 oranında fenolik reçine ilavesi yapıldı. Hazırlanan karışımlara geleneksel test yöntemlerinin yanı sıra Superpave bağlayıcı şartnamesi kapsamında testler uygulandı. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Karışımların hazırlanmasına müteakip saf ve fenolik reçine katkılı bitümlerin üzerinde geleneksel test yöntemlerinden olan yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri uygulandı. Deneyler sonucunda fenolik reçine ilavesinin her iki bitüm türünün de sertleşmesini sağladığı tespit edilmiştir. bitüm içerisine ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça bitümlerin sertliğinin daha da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumu bir örnekle açıklayacak olursak saf B1 bitümün penetrasyon değeri 64.5 dmm iken %10 fenolik reçine ilave edilen bitümün penetrasyon değeri 16 dmm olarak ölçülmüştür. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitümü sertleştirdiğinin kanıtı niteliğindedir. Söz konusu bağlayıcı türlerine ait ısı hassasiyetini açıklayan PI değerleri incelendiğinde saf B1 bitümün PI değeri -2,36 iken %10 fenolik reçine ilave edilen bitümün PI değeri -2,28 olarak tespit edilmiştir. Söz konusu iki bitümün PI değerinin çok yakın olması fenolik reçine ilavesinin ısıya karşı hassasiyeti çok etkilemediğini göstermektedir.

Saf ve modifiye edilmiş bitümlerin üzerinde gerçekleştirilen RTFO deneyi sonrasında hesaplanan kütle kaybı değerlerinin şartname sınırları (maks %1,0) içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak hesaplamalar sonucunda da açıkça görüldüğü gibi bitüm içerisine eklenen fenolik reçine miktarı arttıkça bitümlü bağlayıcılarda kütle kaybı değeri sürekli artmıştır. Örneği Saf B2 bitümünün kütle kaybı değeri 0,12 iken %10 fenolik reçine ilaveli B2-10 FR bitümün kütle kaybı değeri 0,18'e yükselmiştir. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitüm içerisindeki hafif ağırlıklı moleküllerin buharlaşma oranını azda olsa artırdığını göstermektedir.

RTFO deneyi sonun da bitümlü bağlayıcılara uygulanan yumuşama ve penetrasyon deneyi sonuçları incelendiğinde fenolik reçine ilavesinin bitümlü bağlayıcıların yaşlanma sonrası sertleşme miktarını azaltıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.

Saf ve fenolik reçine ilaveli bitümler üzerinde gerçekleştirilen RV deneyi sonuçları incelendiğinde fenolik reçine ilavesinin her iki bitümün de 135°C ve 165°C' deki viskozite değerlerini artırdığı görülmektedir. Bu durum bitümlerin fenolik reçine ilavesi ile daha kıvamlı bir hale dönüştüğünün bir göstergesidir. RV deneyi sonucunda elde edilen bu bulgular yumuşama ve penetrasyon deneyi sonucunda elde edilen bulguları doğrulamaktadır.

RV deneyi sonuçları incelendiğinde viskozite değerlerinin, bitüm içerisine ilave edilen fenolik reçine miktarının artmasıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu duruma bir örnek vermek gerekirse saf B1 bitümün 135°C ve 165°C' deki viskozite değerleri sırası ile 405,00 cP ile 80,00 cP iken B1-10 FR bitümünün 135°C ve 165°C' deki viskozite değerleri sırası ile 645,00 cP ile 145,00 cP dur.

Orijinal (yaşlandırılmamış) saf ve fenolik reçine ilaveli bitümler üzerinde gerçekleştirilen DSR deneyleri sonucunda fenolik reçine ilavesinin her iki bitümünde (B1 ve B2), $G^*/\sin\delta$ (tekerlek izi parametresini) ve G^* (kompleks kayma modülü) değerlerini artırdığı, fakat δ (faz açısı) değerini düşürdüğü belirlenmiştir. Dolayısıyla fenolik reçine ilavesi ile saf bitümlerin yüksek sıcaklık (PG) sınıflarında artış tespit edilmiştir. Buna göre saf B1 bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 64-Y) iken %4 fenolik reçine ilavesi ile B1-4FR bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 70-Y) değerine benzer şekilde %10 fenolik reçine ilavesi ile B1-10 FR bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 76-Y) değerine yükselmiştir. Aynı durum B2 bitümü içinde geçerlidir. göre saf B2 bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 52-Y) iken %2 fenolik reçine ilavesi ile B2-2FR bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 58-Y) değerine benzer şekilde %18 fenolik reçine ilavesi ile B2-8 FR bitümün yüksek sıcaklık sınıfı (PG 64-Y) değerine yükselmiştir.

RTFO deneyi ile kısa süreli yaşlanmaya maruz bırakılan bitümlü bağlayıcılar gerekli deneylerinin tamamlanmasının ardından servis ömürleri boyunca maruz kalacakları trafik yükleri ve iklim koşullarına karşı gösterecekleri direnci belirlemek amacıyla PAV ile yaşlandırılma işlemine başvurulmuştur. PAV ile yaşlandırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen DSR deneyleri sonucunda sıcaklık artışı ile birlikte $G^*\sin\delta$ (yorulma çatlağı parametresini) ve G^* (kompleks kayma modülü) değerlerini azaldığı, fakat δ (faz açısı) değerinin arttığı belirlenmiştir.

Superpave bağlayıcı şartnamesine göre PAV sonrası DSR deneyinde $G^*\sin\delta$ değerinin 5000 kPa' ı aşmaması istenir. Bu sınır değere dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda bitüm içersindeki fenolik reçine miktarı arttıktan sonra $G^*\sin\delta$ (yorulma çatlağı parametresini) değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitümün yorulma çatlağı oluşumuna karşı olumsuz sonuç verdiğinin bir göstergesidir.

Tez çalışması kapsamında modifiye edilen bağlayıcıların reolojik özelliklerinin daha net belirlenebilmesi için bağlayıcılar üzerinde ileri test yöntemlerinden biri olarak kabul edilen MSCR deneyi gerçekleştirilmiştir. MSCR deneyi yardımı ile saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların J_{nr} (yüksek sıcaklık altında bitümde meydana gelecek olan kalıcı deformasyon miktarı), R (bitümlü bağlayıcıların elastik özelliği), $J_{nr,diff}$ (%) ve R_{diff} (%) değerleri belirlenmiştir. J_{nr} (kPa-1) değerleri incelendiğinde, saf bitümlerin J_{nr} değerlerinin modifiye bitümlerin J_{nr} değerinden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum fenolik reçine katkılı bağlayıcı türleriyle yapılan esnek üstyapılarda tekrarlı trafik yükleri altında saf bitümlere göre daha az kalıcı deformasyon meydana geleceği belirlenmiştir. R değerleri incelendiğinde her iki bağlayıcı türü içinde saf ve fenolik reçine ilaveli bitümler için bu değerin birbirine çok yakın olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışma kapsamında hiçbir bitümlü bağlayıcının $J_{nr,diff}$ değeri MSCR'a ait PG şartnamesinde yer alan %75 oranını aşmadığı saptanmıştır.

Çalışma kapsamında RTFO ile yaşlandırılan saf ve fenolik reçine ilaveli bitümler üzerinde DSR cihazı kullanılarak MSCR metoduyla PG plus

sınıflandırılması yapılmıştır. Bu çalışma sonunda elde edilen veriler ışığında B1, B1-2FR, B1-4FR, B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR bağlayıcıların MSCR deney sınıflandırmasına göre sırasıyla PG 64S-Y, PG 64S-Y, PG 70S-Y, PG 70S-Y, PG 70S-Y ve PG 76V-Y sınıfında oldukları tespit edilmiştir. Buradan da anlaşılaçağı üzere B1-10FR bitümü dışındaki tüm bitümler DSR deneyinde belirlenen yüksek sıcaklık sınıflarında sadece standart trafik yüklerine hizmet ederken, B1-10FR bitümü yüksek sıcaklık sınıfında çok ağır trafik yüklerine hizmet edebilmektedir.

Saf B2 ve modifiye edilmiş B2 bitümleri incelendiğinde B2, B2-2FR, B2-4FR, B2-6FR, B2-8FR ve B2-10FR bağlayıcıların MSCR deney sınıflandırmasına göre sırasıyla PG 52S-Y, PG 52H-Y, PG 58S-Y, PG 58S-Y, PG 58H-Y ve PG 64S-Y sınıfında oldukları tespit edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken durum, DSR deneyine göre PG sınıfı PG 58-Y olan B2-2 FR bitümünün MSCR deneyine göre PG sınıfı PG 52H-Y olarak, DSR deneyine göre PG sınıfı PG 64-Y olan B2-8 FR bitümünün MSCR deneyine göre PG sınıfı PG 58H-Y olarak değiştiğidir. Tamda bu noktada MSCR deneyine göre PG sınıfının belirlenmesinin ne kadar önemli olduğı anlaşılmaktadır.

PAV ile yaşlandırılan bitümlü bağlayıcılara DSR deneyi uygulandığında 25°C 'de ki $G^* \sin \delta$ değerin kaç olduğı incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda $G^* \sin \delta$ değeri 6000 kPa'yı aşan numunelerin yorulma ömrünün kısa olacağı saptanmıştır. Yapılan inceleme sonucu Saf ve modifiye edilmiş tüm B2 numuneleri ile B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR dışında kalan saf ve modifiye edilmiş B1 bitümlerinin bu değerin altında kaldığı saptanmıştır.

Orijinal bitümlü bağlayıcılar üzerinde düşük trafik hızlarına eşdeğer 1,25 rad/sn, orta trafik hızlarına eşdeğer 5 rad/sn ve yüksek trafik hızlarına eşdeğer 12,5 rad/sn frekans değerlerinde B1 bitümlü bağlayıcıları için 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklıklarda B 160/200 bitümlü bağlayıcısı için de 20°C, 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarda DSR farklı frekans deneyleri gerçekleştirilmiştir. DSR farklı frekans deneylerinde fenolik reçine ile modifiye edilmiş bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek trafik hızlarında saf bitüme göre daha iyi performans sergilediğı belirlenmiştir. Buna göre B1-2FR, B1-4FR, B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR bitümlü bağlayıcıları saf B1' e göre daha yüksek G^* ve

$G^*/\sin\delta$, daha düşük δ değeri gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Buna göre B2-2FR, B2-4FR, B2-6FR, B2-8FR ve B2-10FR bitümlü bağlayıcıları saf B2' e göre daha yüksek G^* ve $G^*/\sin\delta$, daha düşük δ değeri gösterdiği saptanmıştır.



8. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında saf ve fenolik reçine katkılı bağlayıcılara uygulanan deneyler neticesinde ortaya çıkan sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Buna göre fenolik reçine ilavesiyle birlikte her iki bitüm (B1 ve B2) türünün de sertliğinin fenolik reçine miktarıyla doğru orantılı olarak gözle görülür şekilde arttığı saptanmıştır.

Yapılan araştırma kapsamında gerçekleştirilen RV deneyleri sonucunda da geleneksel test yöntemlerinde elde edilen sonuçları doğrular şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Bitüm içerisine ilave edilen fenolik reçine miktarı arttıkça bitümlü bağlayıcıların viskozitesi artış göstermiştir.

Bitümler üzerine uygulan DSR deneyi sonucunda saf bitüme göre fenolik reçine ilaveli bitümlerin yüksek sıcaklık PG sınıflarının arttığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde bitümler üzerine uygulanan MSCR deneylerine göre yüksek sıcaklık ve trafik yükleri de göz önüne alınarak yapılan PG sınıflandırmasında da hatırı sayılır bir artış meydana gelmiştir.

Tez kapsamında elde edilen en çarpıcı sonuç, PAV sonrası yapılan DSR deneyi neticesinde B1-6FR, B1-8FR ve B1-10FR bitümlerinin $G^* \sin \delta$ değerinin 6000 kPa değerini aşmasıdır. Bu durum açıkça göstermektedir ki söz konusu numunelerle hazırlanan bitümlü karışımların erken deformasyona uğrayacağıdır. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda fenolik reçinenin özellikle B2 gibi yüksek penetrasyon sahip bitümleri özelliklerini iyileştirmektedir. Ancak B1 gibi daha sert bitümler ile yüksek oranda karıştırıldıkları zaman yorulma ömürleri kısalmakta, bu durumda kaplamanın erken deforme olmasına neden olmaktadır.

Yine PAV sonrası deney sonuçları incelendiğinde $G^* \sin \delta$ değerinin 5000 kPa değerini belirli sıcaklık ve fenolik reçine oranlarında aştığı saptanmıştır. Bu durum fenolik reçine ilavesinin bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfını artırmasına rağmen yorulma çatlak oluşumunu artırmaktadır.

Yapılan çalışma sonucunda B1 bitümüne ağırlıkça %4 oranından daha fazla fenolik reçine ilave edilmesi durumunda bitümlü bağlayıcıların yorulma çatlak oluşumuna karşı dirençlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle B1 bitümü için optimum fenolik reçine oranı bitüm ağırlığının % 4'dür. Çalışma kapsamında bu değer B1-4FR ile sembolize edilmiştir.

Benzer şekilde B2 bitümüne ilave edilen fenolik reçine oranı arttıkça sertleştiği tespit edilmiştir. B2 bitümü içerisine ağırlıkça %8 ve %10 oranında fenolik reçine ilavesinin, DSR deney sonuçlarına göre yüksek sıcaklık performans sınıfını her iki oranda içinde PG 64-Y olarak tespit edilmiştir. Bu durum %8 fenolik reçine ilavesinin PG 64-Y sınıfı için yeterli gibi görülmektedir. Ancak MSCR deney sonuçları incelendiğinde %8 oranında fenolik reçine ilavesi sonucunda trafik yüklerine maruz kalan bitümlü bağlayıcıların PG sınıfını, PG 58H-Y olarak tespit edilmiştir. B2 bitümünün %10 oranında fenolik reçine ile modifiye edilmesi durumunda MSCR sonuçları incelendiğinde PG sınıfının PG 64S-Y olduğu görülmüştür. Bu durumda B2 bitümü için optimum fenolik reçine oranı %10 olarak tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında bu değer B2-10FR ile sembolize edilmiştir.

Fenolik reçineler pahalı katkıları olduklarından dolayı bağlayıcıların maliyetini artırmaktadırlar. Hızla gelişen teknoloji sayesinde ilerleyen zamanlar bu maliyetlerin düşmesi ile fenolik reçineler bitüm içerisinde daha yaygın olarak kullanılabileceklerdir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- AASHTO T 315**, 2012, Standard Method Of Test For Determining The Rheological Properties Of Asphalt Binder Using A Dynamic Shear Rheometer (DSR), USA, 33p.
- AASHTO TP 70**, 2013, Standard Method Of Test For Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test Of Asphalt Binder Using A Dynamic Shear Rheometer (DSR), USA, 7p.
- AASHTO MP 19-10**, 2010, Standard Specification for Performance-Grade Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. AASHTO Designation: Washington D.C.
- Airey, G. D.**, 2002, Rheological evaluation of Ethylene Vinyl Acetate polymermodified bitumens, Construction and Building Materials, 16(8): 473-487 pp.
- Airey, G. D.**, 2003, Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, 82(14): 1709-1719 pp.
- Airey, G. D.**, 2006, Performance of Polymer Modified Bitumens: Emphasis on the UK Market, Norwegian Asphalt Association Annual Conference, Oslo.
- Asphalt İnstitute**, 1996, Performance graded asphalt binder specification and testing, Superpave series no.1 (SP1), Lexington, Kentucky.
- Asmael, N. M. and Waheed, M. Q.**, 2018, Investigation of Using Polymers to Improve Asphalt Pavement Performance, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), Volume 39, No 1, 38-48 pp
- ASTM D2872**, 2012, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA, 6p.
- ASTM D4402**, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 4p.
- Altaş, Ö.Y.**, 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
- Alqudah, O.**, 2016, Antioksidan Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri ve Yaşlanma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M.**, 2007, Epoksi Reçine İle Modifiye Edilen Bitümlerin Fiziksel Özellikleri Üzerinde Yaşlanmanın Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi. 19 (2), 147-154.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M.,** 2008, Polyester Reçinenin Bitümlü Bağlayıcıların Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesi Üzerindeki Etkisi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24,(1-2), 227-240.
- Avcı, E.,** 2009, sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonlu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bağdatlı, M. E.C.,** 2010, Esnek Üstyapı Kaplamalarındaki Hasar Özelliklerinin Bakım Maliyetleri Üzerine Etkisi, T.C. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Balta, İ.,** 2004, Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 51-52.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. and Walters, K.,** 1998, An Introduction to Rheology Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, 199 p.
- Berkers, R.F.A.,** 2005, Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen, Master's Degree in Technology Engineering, Department of Civil Engineering, Tswana University of Technology, 172p.
- Birliker, R.Y.,** 1998, Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 208s.
- Bostancıoğlu, M.,** 2012, Bitkisel Atıklardan Elde Edilen Kimyasal Ürünler İle Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Ciesin'ska, W.,** 2016, Thermo-rheological properties of coal-tar pitch modified with phenol-formaldehyde resin, J Therm Anal Calorim 130:187–195 pp.
- Cominsky, R.J. et al.,** 1994, The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, *National Research Council*, Washington, D.C., 184p.
- Choquet, F.,** 1994, Polymers and modified binders. Brussel: Belgian Road Research Center Publishing.
- Çubuk, M.,** 2007, Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M.K.,** 2009, Improvement of Bitumen Performance with Epoxy Resin, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dessouky, S., Contreras. D., Sanchez, j., Papagiannakis, A. T. and Abbas, A.,** 2013, Influence of hindered phenol additives on the rheology of aged polymer-modified bitumen, *Construction and Building Materials* 38: 214–223.
- Dinç, E.,** 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas.
- Doğan, M.,** 2006, Polimer Katkı Maddelerinin Bitüm Bazlı Kompozitlerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Domingos, M. D. I. and Faxina, A. L.,** 2015, Rheological behaviour of bitumens modified with PE and PPA at different MSCR creep–recovery times, *International Journal of Pavement Engineering*, 16(9): 771-783 pp.
- Evcin, A.,** 2017, Polimer Malzemeler Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Erkens, S., Porot, L., Glaser, R., and Glover, C. J. ,**2016, Aging of Bitumen and Asphalt Concrete: Comparing State of the Practice and Ongoing Developments in the United States and Europe. In TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, pp. 1-12.
- Federal Highway Administration (FHWA),** 2011, The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure, FHWA-HIF-11-038, USA, 9p.
- Fitzgerald, R.L.,** 2000, Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Preforms, The Degree of Master of Science in Chemical Engineering, Michigan Technological University, 70p
- Geçkil, T.,** 2008, Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tez Çalışması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 247 s.
- Gevrek, L.,** 2008, Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programı İle Nonlinear Sonlu Eleman Analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Garcia, M. M., Partal, P., Navarro, F. J. and Gallegos, C.,** 2006, Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen”, *Fuel*, 85 (7-8): 936-943pp.
- Günay, T.,** 2016, Nano Malzemelerin Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Güngör, A. ve Sağlık, A.,** 2008, “Türkiye bitümlerinin performans sınıflarının belirlenmesi”, *1. Karayolu kongresi*, Ankara, 185-194 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Güngör, A., G., Sağlık, A., Orhan, F. ve Öztürk, E., A.,** 2009, Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara.
- Hofko, B., Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Grothe, H., Handle, F., Hospodka, M., and Scarpas, A.,** 2016,. Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen, Materials and Structures, 49(3): 829-841 pp.
- Hussein, I. A., Iqbal, M. H. and Al-Abdul-Wahhab, H. I.,** 2005, Influence of mw of LDPE and vinyl acetate Content of EVA on the rheology of polymer modified asphalt, Rheologica Acta, 45(1): 92-104 pp.
- Ilıcalı, M.,** 2001, Asfalt Kaplamalar, İstanbul Asfalt Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yayınları, Yayın No.1, İstanbul.
- Isacsson, U. and Lu, X.,** 1999, Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, Journal of Materials Science, 34(15): 3737-3745 pp.
- Isacsson, U. and Huayeng, Z.,** 1997, Relationships Between Bitumen Chemistry And Low Temperature Behaviour Of Asphalt, Construction And Building Materials, Vol. 11, No.2, 83-91 pp.
- Karayolları Genel Müdürlüğü,** “Yol ağı uzunluğu” istatistiki veriler. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/DevletIlyolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf> Erişim tarihi: (Haziran 2019)
- Karayolları Genel Müdürlüğü,** 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Khan, T. A. and Sharma, D.,** 2011, Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes, Construction and Building Materials, 25(10): 3841-3848 pp.
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V. and Moulthrop, J.S.,** 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- Król, J., Radziszewski, P. and Kowalski, K. J.,** 2015, Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen, Procedia Engineering, 111: 478-484 pp.
- Kuloğlu, N., ve ark.,** 2008, Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mağdala, M., Ö., 2009**, Isı Kalkanları İçin Kalıplanabilir Karbon Fenolik Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Malkoç, G., Güngör, N. ve Dumanlılar, N., 1996**, Çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilen asfalt çimentolarının özelliklerindeki değişiklikler, 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, İstanbul, 77-89s.
- McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. and Solaimanian, M., 1995**, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, USA, 172p.
- McGennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U., 1994**, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, *Asphalt Institute*, Lexington, KY, 104p.
- Mezger, T. G., 2011**, The Rheology Handbook: For Users of Rotational and Oscillatory Rheometers, Vincentz Network, Germany, 432 pp.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2010**, Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt, Report 648, Washington, 157 p.
- Nicholls, J. C., 1998**, Asphalt Surfacing, Taylor & Francis, London, 432 p.
- Orhan, F., 2005**, Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 10-24 s.
- Önal, M. A. ve Kahramangil M., 1993**, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 200s.
- Öner, J., 2016**, Farklı Vaks Türleri ile Üretilen Bitümlerin Reolojik Özelliklerinin Asfalt Betonu Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Petersen, J.C. et.al., 1994**, Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, *Strategic Highway Research Program National Research Council*, Washington, D.C., 197p.
- Sağlık, A., 2009**, Türkiye’de üretilen rafineri bitümlerinin karayolu üstyapılarında kullanımı için performans sınıflarının belirlenmesi, yüksek lisans tezi, gazi üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A., 2004**, Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 352s.
- Tunç, A., 2001**, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tunç, A.**, 2007, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Taşcı, A.**, 2010, Piroliz edilmiş atık lastiklerden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Whiteoak, D.**, 2004, Shell Bitüm El Kitabı, Abdullah Hilmi Lav, M.Ayşen Lav, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- TS EN 1426**, 2015, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 16 s.
- TS EN 1427**, 2015, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Yumuşama noktası tayini – Halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 20 s.
- Umar, F. ve Ağar, E.**, 1982, Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 236s.
- Uncu, D.**, 2017, Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Umar, F. ve Ağar, E.**, 1985, Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Read, J. and Whiteoak, D.**, 2003, The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford, London, 460 p.
- Shahabadi, A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S.**, 2010, Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles, Construction and Building Materials, 24(7): 1239-1244 pp.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E.**, 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgan Town, 109p.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında çok fazla emeği bulunan tez danışmanın Prof. Dr. Perviz Ahmedzade' ye, tezimin tamamlanmasında maddi ve manevi desteği benden hiçbir zaman esirgemeyen her zaman yanımda olan nişanlım, ailem ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.



ÖZGEÇMİŞ

Polen Çiftçioğlu, 1993 yılında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyet'inin Güzelyurt ilçesinde doğmuştur. Lisans eğitimini 2016 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. 2017 yılından itibaren Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Yüksek lisans çalışmalarını Ulaştırma Ana Bilim Dalında, bitümlü malzemeler, bitüm modifikasyonu, ve yol esnek üstyapıları üzerine yapmaktadır.

