



EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

**ANTİOKSİDAN KATKILARIN BİTÜMLÜ
BAĞLAYICILARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE
YAŞLANMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Omar ALQUDAH

Tez Danışmanı: Perviz AHMEDZADE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 28.06.2016

Bornova-İZMİR

2016

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**ANTİOKSİDAN KATKILARIN BİTÜMLÜ
BAĞLAYICILARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE
YAŞLANMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Omar ALQUDAH

Tez Danışmanı: Perviz AHMEDZADE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 28.06.2016

Bornova-İZMİR

2016

Omar ALQUDAH tarafından doktora tezi olarak sunulan “Antioksidan Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Ve Yaşlanma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” 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 ve 28/06/2016 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

Raportör Üye : Prof. Dr. Burak ŞENGÖZ

Üye : Doç. Dr. Yalçın ALVER

Üye : Prof. Dr. Atakan Aksoy

Üye : Doç. Dr. Ali Topal

.....
.....
.....
.....
.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Antioksidan Katkıların Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Ve Yaşlanma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” 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.

28 / 06 / 2016

Omar ALQUDAH

ÖZET**ANTIOKSİDAN KATKILARIN BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN
ÖZELLİKLERİ VE YAŞLANMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

ALQUDAH, Omar

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

Haziran 2016, 197 sayfa

Bu tezde, iki tip bitüm ile birçok antioksidan katkı maddesinin kullanımı gerçekleştirilmiş ve yeni performans deney teknikleri kullanılmıştır. Saf bitüme antioksidan katkı maddesinin eklenmesinin amacı, saf bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri ile birlikte asfalt karışımın mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmektir. Buna ek olarak, bu tez çalışmasında antioksidanların yaşlanma sertleşmesini azaltma kabiliyeti araştırılmıştır. Bitüm içerisinde thiourea (T), furfural (F) ve çinko oksit (ZnO) maddeleri farklı içeriklerde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Saf bitüm olarak penetrasyon sınıfı B 50/70 ve B 160/220 olan iki tip bitüm kullanılmıştır.

Modifiye edilmiş bağlayıcılar her bir bağlayıcının performans sınıfını değerlendirerek ve bunları saf bitüm ile karşılaştırarak, Superpave sistemi kapsamında incelenmiştir. Ayrıca, modifiye ve saf bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri, antioksidan katkı maddesinin bitümün yaşlanma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla laboratuvarında yaşlanma işlemi öncesi ve sonrası geleneksel deneyler gerçekleştirerek analiz edilmiştir.

Antioksidan modifikasyonunun tekerlek izi direnci üzerindeki etkisini incelemek için, dinamik kayma reometresi (DSR) kullanarak farklı frekans ve sıcaklık deneylerini gerçekleştirdikten sonra her bir bağlayıcının ana eğrisi kurulmuştur. Buna ek olarak, hem bitümlü bağlayıcı hem de asfalt karışımların aynı anda performansını değerlendirecek yeni teknikler sunarak bilimsel bir

yaklaşım takip edilmesi bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Bu amaçla, asfalt bağlayıcılar üzerinde çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (MSCR) testi ve Marshall numunelerinden hazırlanan asfalt kirişler üzerinde DSR Sünme deneyi Türkiye'de yeni bir performans deney yöntemi olarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, antioksidan kullanımı bitümün sertliğini arttırmış ve visko-elastik özelliklerini iyileştirmiştir. Ayrıca, antioksidan katkı maddeleri saf bitümün yaşlanma direncini de iyileştirmektedir. Bundan başka, modifiyeli karışımların mekanik performans deneyleri sünme deformasyon direncini artırarak olumlu bir etki oluşturduğunu kanıtlamıştır.

Anahtar sözcükler: Bitüm, Superpave, antioksidan katkılar, thiourea, furfural, çinko oksit, MSCR, DSR sünme deneyi.

ABSTRACT**INVESTIGATING CHARACTERISTICS OF ANTIOXIDANT
MODIFIED BITUMINOUS BINDERS AND EFFECT ON AGING
BEHAVIOUR**

ALQUDAH, Omar

Phd in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

June 2016, 197 pages

In this thesis, several antioxidant modifiers with two types of asphalt bitumen and new performance testing techniques were utilized. The aim of adding antioxidant materials in to the base bitumen is to improve the physical and rheological properties of base bitumen as well as the mechanical properties and durability of asphalt mixture. In addition, the ability of antioxidants to reduce age hardening was investigated in this study. Thiourea (T), furfural (F) and zinc oxide (ZnO) materials were used as additives in bitumen at different contents.

The modified binders were examined under the frame of Superpave system by evaluating the performance grade of each binder and comparing it with base bitumen's grade. Furthermore, physical properties of unmodified and modified binders were analyzed by conducting conventional tests before and after aging process in the laboratory to evaluate effect of antioxidant addition on aging. In order to examine effect of antioxidant modification on rutting resistance of binders, master curve of each binder has been established after conducting frequency sweep tests utilizing the dynamic shear rheometer (DSR). In addition, the importance of this study acquires more importance by following the scientific approach by introducing new techniques for evaluating the performance of both the bitumen and asphalt mix simultaneously. For this purpose, the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test on asphalt binders and the DSR Creep test on

asphalt mix samples prepared from Marshall specimens were carried out as new performance testing techniques in Turkey.

As a result, the antioxidant treatment increases the stiffness of the bitumen and improves the visco-elastic properties. Also, antioxidant materials have improved aging resistance of base bitumen. Furthermore, mechanical performance testing of modified mixtures proved the positive influence of increasing creep deformation resistance.

Keywords: Bitumen, Superpave, antioxidant additives, thiourea, furfural, zinc oxide, MSCR, DSR creep test.





TEŞEKKÜR

Bu tezin laboratuvar çalışmalarının tam olarak gerçekleştirilebilmesi için destek olan tez danışmanım ve Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Jüri üyesi Sayın Doç. Dr. Yalçın ALVER'e teşekkür ederim. Üstelik jüri üyesi Sayın Prof. Dr. Burak ŞENGÖZ'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışma sırasında görüş ve önerileri ile çalışmaya katkıda bulunan Ar. Gör. Taylan GÜNAY'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, uzun yıllar süren eğitim-öğretim hayatım boyunca ve bu tezin hazırlanması sürecinde maddi-manevi her türlü desteği bana sunan değerli aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxvii
1.GİRİŞ	1
2. BİTÜMÜN REOLOJİK KARAKTERİSTİKLERİ.....	4
2.1 Reoloji.....	4
2.2 Bitümün Bileşimi (Kompozisyonu).....	4
2.3 Bitüm Bileşimi ile Reoloji Arasındaki İlişki	6
2.4 Bitümün Davranışı.....	7
2.4.1 Yüksek sıcaklık davranışı	9
2.4.2 Düşük sıcaklık davranışı.....	10
2.4.3 Orta sıcaklık davranışı	10
2.4.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı	11
2.5 Kaplama Performansı İle Bitümün Kimyasal Özellikleri Arasındaki İlişki...13	

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.6 Asfaltın Yaşlanma Kimyası Ve Mekanizmaları.	14
3. LİTARATÜR TARAMASI	16
3.1 Genel	16
3.2 Modifikasyonun Amacı.....	17
3.3 Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	18
3.4 Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü	18
3.5 Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	21
3.6 Modifiye Edilmiş Bitümlerin Stabilesi	25
3.7 Antioksidanlar.....	26
4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER	30
4.1 Geleneksel Test Yöntemleri.....	30
4.1.1 Penetrasyon deneyi	30
4.1.2 Yumuşama noktası deneyi.....	31
4.1.3 Penetrasyon indeksi (PI)	32
4.1.4 Parlama noktası deneyi	32
4.1.5 Özgül ağırlık deneyi.....	33

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1.6 Depolama stabilitesi deneyi.....	34
4.2. Superpave Test Yöntemleri	35
4.2.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)..	37
4.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi	38
4.2.3 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi.....	39
4.2.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi	47
4.2.5 Dönel viskozimetre (RV) deneyi	49
4.3 İleri Test Yöntemleri.....	52
4.3.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi (Ana Eğri)	52
4.3.2 Çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (MSCR) testi	54
5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA UYGULANAN TEST YÖNTEMLERİ	57
5.1 Marshall Karışım Dizayn Metodu	57
5.2 DSR Sünme (Creep) Deneyi.....	60
5.2.1 Kiriş numunesinin hazırlanması	60
5.2.2 Kiriş numunenin DSR cihazıyla test edilmesi	60
5.2.3 DSR sünme (creep) deneyi ile ilgili yapılan çalışmalar	62

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6. ANTİOKSİDAN KATKILARLA BİTÜM MODİFİKASYONU	65
6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	65
6.2 Modifikasyon İşlemi	66
7. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI	68
7.1 Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları	68
7.1.1 Penetrasyon deney sonuçları	68
7.1.2 Yumuşama noktası deney sonuçları.....	74
7.1.3 Penetrasyon indeksi (PI) sonuçları.....	79
7.1.4 Parlama noktası deney sonuçları.....	81
7.1.5 Özgül ağırlık deney sonuçları	82
7.1.6 Depolama stabilitesi deney sonuçları.....	87
7.2 Superpave Test Yöntemlerinin Sonuçları	89
7.2.1 Dönel ince film etüvü deney (RTFOT) sonuçları	89
7.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney sonuçları	92
7.2.3 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deney sonuçları.....	92
7.2.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları	109
7.2.5 Dönel viskozite (RV) deney sonuçları	117

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.3. İleri Test Yöntemlerinin Sonuçları	123
7.3.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deney ana eğri sonuçları	123
7.3.2 Çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (MSCR) test sonuçları.....	141
7.4 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Uygulanan Test Yöntemlerinin Sonuçları	167
7.4.1 Marshall karışım dizayn metodu sonuçları.....	167
7.4.2 DSR sünme (Creep) deney sonuçları.....	171
8. BULGULAR VE ÖNERİLER	183
8.1 Bulgular	183
8.2 Öneriler	189
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	190
ÖZGEÇMİŞ	197
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bitümün a) yapısı ve b) bileşenleri	6
2.2 Asfaltın farklı sıcaklık ve zamanlara göre davranışı	7
2.3 Bitümün farklı sıcaklıklardaki kıvamı	8
2.4 Bitümün visko-elastik davranışı	9
2.5 Bitümün moleküler düzeyde akışı	9
2.6 Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli.....	11
2.7 Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi	12
2.8 Asfaltın karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresinde yaşlanması.....	13
3.1 Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı	19
3.2 Bitümün dinamik yükler altındaki visko-elastik davranışı	20
4.1 Penetrasyon deneyi aleti	31
4.2 Yumuşama noktası deneyi aleti	32
4.3 Parlama noktası deneyi aleti	33
4.4 Bitümün özgül ağırlığını tayini için 25 ml'lik piknometre.....	34
4.5 Laboratuvar şartlarına uygun olarak üretilen depolama stabilitesi tüpü.	35
4.6 Dönel ince film etüvü (RTFOT) aleti	38

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) (a) ve vakum aleti (b)	39
4.8 DSR aleti (Anton Paar Smart Pave Plus 301)	40
4.9 Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli	41
4.10 Viskoelastik davranış.....	42
4.11 DSR asfalt numunesi	43
4.12 Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi	45
4.13 Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi.....	45
4.14 Kayma modülünün bileşenleri.....	46
4.15 BBR a) aleti ve b) deneyde kullanılan kalıp.....	49
4.16 Dönel viskozimetre (RV) a) aleti ve b) kapları	51
4.17 Bitümlü bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi.....	51
5.1 Karıştırıcı.....	57
5.2 Marshall tokmağı.....	58
5.3 Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri	60
5.4 Kesme aleti ve elde edilen kırıntı numuneleri.....	60
5.5 DSR cihazına monte edilen, sıcaklık kontrollü fırın ve kırıntı burulma aparatı.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6	Tipik bir sünme deneyi grafiği..... 62
6.1	Kullanılan antioksidan katkıları a) thiourea b) furfural ve c) çinko oksit..... 65
7.1	Saf B160/220 bitümüne thiourea katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi 69
7.2	Saf B50/70 ile thiourea katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi..... 70
7.3	Saf B160/220 ile furfural katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi 71
7.4	Saf B50/70 ile furfural katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi 71
7.5	Saf B160/220 ile ZnO katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi 73
7.6	Saf B50/70 ile ZnO katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi 73
7.7	Saf Saf B160/220 ile thiourea katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi 75
7.8	Saf B50/70 ile thiourea katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi..... 75
7.9	Saf B160/220 ile furfural katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi..... 76
7.10	Saf B50/70 ile furfural katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi..... 77
7.11	Saf B160/220 ile çinko oksit katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi..... 78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.12 Saf B50/70 ile çinko oksit katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.....	79
7.13 Saf B160/220 ile thiourea katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	83
7.14 Saf B50/70 ile thiourea katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	83
7.15 Saf B160/220 ile furfural katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	84
7.16 Saf B50/70 ile furfural katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	85
7.17 Saf B160/220 ile çinko oksit katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	86
7.18 Saf B50/70 ile çinko oksit katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi	86
7.19 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	100
7.20 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	100
7.21 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	101
7.22 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	101
7.23 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	102

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.24 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış B 50/70 ve ZnO katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	102
7.25 PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	106
7.26 PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	106
7.27 PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	107
7.28 PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	107
7.29 PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	108
7.30 PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve ZnO katkılı bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi	108
7.31 Saf B 160/220 ile T katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	109
7.32 Saf B 160/220 ile F katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	110
7.33 Saf B 160/220 ile ZnO katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	110
7.34 Saf B 160/220 ile T katkılı bitümlerin m-değer'lerinin sıcaklıkla değişimi.....	111

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.35 Saf B 160/220 ile F katkılı bitümlerin <i>m-değer</i> 'lerinin sıcaklıkla değişimi	111
7.36 Saf B 160/220 ile ZnO katkılı bitümlerin <i>m-değer</i> 'lerinin sıcaklıkla değişimi	112
7.37 Saf B 50/70 ile T katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	112
7.38 Saf B 50/70 ile F katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	113
7.39 Saf B 50/70 ile ZnO katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi	113
7.40 Saf B 50/70 ile T katkılı bitümlerin <i>m-değer</i> 'lerinin sıcaklıkla değişimi	114
7.41 Saf B 50/70 ile F katkılı bitümlerin <i>m-değer</i> 'lerinin sıcaklıkla değişimi	114
7.42 Saf B 50/70 ile ZnO katkılı bitümlerin <i>m-değer</i> 'lerinin sıcaklıkla değişimi	115
7.43 Saf B 160/220 ve thiourea katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi	118
7.44 Saf B 50/70 ve thiourea katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi	119

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.45 Saf B 160/220 ve furfural katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.....	120
7.46 Saf B 50/70 ve furfural katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.....	121
7.47 Saf B 160/220 ve çinko oksit katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi	122
7.48 Saf B 50/70 ve çinko oksit katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi	123
7.49 40°C sıcaklıkta B 160/220 bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi.....	124
7.50 40°C sıcaklıkta B 160/220+4T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi.	124
7.51 40°C sıcaklıkta B 160/220+6T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	125
7.52 40°C sıcaklıkta B 160/220+8T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	125
7.53 40°C sıcaklıkta B 160/220+1F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	126
7.54 40°C sıcaklıkta B 160/220+1,5F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	126

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
7.55 40°C sıcaklıkta B 160/220+2F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	127
7.56 40°C sıcaklıkta B 160/220+1ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	127
7.57 40°C sıcaklıkta B 160/220+1,5ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	128
7.58 40°C sıcaklıkta B 160/220+2ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	128
7.59 40°C sıcaklıkta B 50/70 bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	129
7.60 40°C sıcaklıkta B 50/70+4T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	129
7.61 40°C sıcaklıkta B 50/70+6T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	130
7.62 40°C sıcaklıkta B 50/70+8T bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	130
7.63 40°C sıcaklıkta B 50/70+1F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	131
7.64 40°C sıcaklıkta B 50/70+1,5F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	131

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.65 40°C sıcaklıkta B 50/70+2F bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	132
7.66 40°C sıcaklıkta B 50/70+1ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	132
7.67 40°C sıcaklıkta B 50/70+1,5ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	133
7.68 40°C sıcaklıkta B 50/70+2ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G*) ana eğrisi	133
7.69 40°C sıcaklıkta T modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G* ana eğrileri	135
7.70 40°C sıcaklıkta F modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G* ana eğrileri	136
7.71 40°C sıcaklıkta ZnO modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G* ana eğrileri	137
7.72 40°C sıcaklıkta T modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G* ana eğrileri.....	138
7.73 40°C sıcaklıkta F modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G* ana eğrileri.....	139
7.74 40°C sıcaklıkta ZnO modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G* ana eğrileri	140

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.75 46 °C ve 100 Pa'da B 50/70+4T bağlayıcısının örneksel MSCR sünme deneyi sonucu.....	142
7.76 Yüzde geri kazanımın (R) hesaplanması.....	143
7.77 Geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) hesaplanması	143
7.78 46°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 160/220 bağlayıcısı için geri dönmeyen sünme uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği	150
7.79 52°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 50/70 bağlayıcısı için geri dönmeyen sünme uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği	151
7.80 58°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 1600/220 ve B 50/70 bağlayıcıları için geri dönmeyen sünme uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.....	153
7.81 64°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 1600/220 ve B 50/70 bağlayıcıları için geri dönmeyen sünme uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.....	154
7.82 T katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa	156
7.83 T katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa	157

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.84 F katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.....	157
7.85 F katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.....	158
7.86 ZnO katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.....	158
7.87 ZnO katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.....	159
7.88 T katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	161
7.89 Tkatkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	161
7.90 F katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	162
7.91 F katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	162
7.92 ZnO katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	163
7.93 ZnO katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.....	163
7.94 DSR sünme deney parçalarından test edilen tipik örnekler	172

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.95 DSR test verileri ile ilgili terimler	173
7.96 52°C saf B 160/220 karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.....	175
7.97 52°C saf B 50/70 karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi	175
7.98 52°C B 160/220+4T karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi	176
7.99 52°C B 50/70+4T karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi	176
7.100 52°C B 160/220+1F karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.....	177
7.101 52°C B 50/70+2F karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.....	177
7.102 52°C B 160/220+1ZnO karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.....	178
7.103 52°C B 50/70+2ZnO karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.....	178
7.104 52°C’de test edilen saf ve modifiyeli bağlayıcı karışımları için DSR sünme sonuçları	180

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Dört farklı bitümün kimyasal kompozisyonu	5
3.1 Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	22
3.2 Bitüm modifikasyon tipleri	23
3.3 Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiye edicilerin muhtemel olumlu etkileri.....	24
4.1 Superpave bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları	36
4.2 Bağlayıcı sınıfına göre uygulanacak PAV deney sıcaklıkları	39
4.3 AASHTO MSCR standartları	55
6.1 Thiourea fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	65
6.2 Furfural fiziksel ve kimyasal özellikleri	66
6.3 Çinko oksit fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	66
7.1 Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyonları	69
7.2 Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyonları	69
7.3 Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyonları	70
7.4 Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyonları	71
7.5 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.6 Saf B50/70 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyonları	72
7.7 Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	74
7.8 Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	74
7.9 Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	76
7.10 Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	76
7.11 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	78
7.12 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.....	78
7.13 Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri	80
7.14 Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri	80
7.15 Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri	80
7.16 Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri	81

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.17 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.....	81
7.18 Saf B50/70 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.....	81
7.19 B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.....	82
7.20 Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları	82
7.21 Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları	84
7.22 Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları	84
7.23 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.....	85
7.24 Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.....	86
7.25 B 160/220 ile thiourea katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.....	87
7.26 B 50/70 ile thiourea katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.....	88
7.27 B 160/220 ile furfural katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.....	88
7.28 B 50/70 ile furfural katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.....	88

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.29 B 160/220 ile çinko oksit katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları	89
7.30 B 50/70 ile çinko oksit katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları	89
7.31 B160/220 ile thiourea modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları	90
7.32 B50/70 ile thiourea modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları	90
7.33 B160/220 ile furfural modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları	91
7.34 B50/70 ile furfural modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları	91
7.35 B160/220 ile çinko oksit modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.....	91
7.36 B50/70 ile çinko oksit modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.....	92
7.37 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	94
7.38 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	95
7.39 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	96
7.40 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	97

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.41 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	98
7.42 Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve ZnO katkılı bağlayıcılarına ait DSR sonuçları	99
7.43 PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve antioksidan katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	104
7.44 PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve antioksidan katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları	105
7.45 Saf B 160/220 ve antioksidan modifiye bitümlerin farklı sıcaklıklardaki BBR deney sonuçları.....	116
7.46 Saf B 50/70 ve modifiye bitümlerin farklı sıcaklıklardaki BBR deney sonuçları	116
7.47 Saf B 160/220 ve thiourea katkılı bitüme ait viskozite değerleri	117
7.48 Saf B 50/70 ve thiourea katkılı bitüme ait viskozite değerleri	118
7.49 Saf B 160/220 ve furfural katkılı bitüme ait viskozite değerleri	119
7.50 Saf B 50/70 ve furfural katkılı bitüme ait viskozite değerleri	120
7.51 Saf B 160/220 ve çinko oksit katkılı bitüme ait viskozite değerleri	121
7.52 Saf B 50/70 ve çinko oksit katkılı bitüme ait viskozite değerleri	122

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.53 Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).....	144
7.54 Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).....	145
7.55 Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).....	146
7.56 Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa ⁻¹).....	148
7.57 Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa ⁻¹)	148
7.58 Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa ⁻¹).....	149
7.59 Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).....	155
7.60 Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).....	155
7.61 Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).....	156
7.62 Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%).....	160

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.63 Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%)	160
7.64 Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%)	160
7.65 MSCR için $G^* \sin \delta$ değerleri @ 25°C	164
7.66 Saf B160/220 için yüksek BSK sıcaklıklarında her bağlayıcı için önerilen trafik düzeyleri ve PG sınıfları	165
7.67 Saf B50/70 için yüksek BSK sıcaklıklarında her bağlayıcı için önerilen trafik düzeyleri ve PG sınıfları	165
7.68 Saf B160/220 için Superpave klasik PG ile MSCR metoduyla performans PG plus) tüm bağlayıcılar için PG sınıfları	166
7.69 Saf B50/70 için Superpave klasik PG ile MSCR metoduyla performans (PG plus) tüm bağlayıcılar için PG sınıfları	167
7.70 Agregaların özgül ağırlıkları.....	170
7.71 Karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları	170
7.72 Marshall karışımların maksimum hava boşluk yüzdeleri	171
7.73 DSR sünme deneyinden tüm bağlayıcılar için elde edilen sonuçlar	174

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
μ	Viskozite katsayısı
$a(T)$	Kaydırma faktörü
f, ω	Frekans
G^*	Kompleks kayma modülü
$G^*.\sin\delta$	Yorulma çatlağı parametresi
$G^*/\sin\delta$	Tekerlek izi parametresi
G'	Depolama modülü
G''	Kayıp modül
G_a	Agrega özgül ağırlığı (gr/cm ³)
G_{ai}	İnce agrega özgül ağırlığı (gr/cm ³)
G_{ak}	Kaba agrega özgül ağırlığı (gr/cm ³)
G_b	Bitümün özgül ağırlığı
G_f	Filler özgül ağırlığı (gr/cm ³)
G_{ka}	Kaba agrega özgül ağırlığı (gr/cm ³)
G_{mb}	Yoğunluk (gr/cm ³)
G_{mm}	Gevşek karışımın maksimum birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)
h	Numunenin yüksekliği (1mm veya 2 mm)
Hz	Hertz (1/s)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
J_{nr}	Geri dönmeyen sünme uyumluluğu
M	Bitümün ağırlığı (gr)
$m\text{-değeri}$	Sünme oranı
P_{ai}	Agrega karışımındaki ince agrega yüzdesi
P_{ak}	Agrega karışımındaki kaba agrega yüzdesi
Pen_{25}	Penetrasyon değeri (0.1mm)
P_f	Agrega karışımındaki filler malzemesi yüzdesi
r	Numunenin yarıçapı (12,5 mm veya 4 mm)
S	Sünme Sertliği (kPa)
t	İşlem süresi (dakika)
T	Tork (N.m)
T_{YN}	Yumuşama noktası (°C)
V	Bitümün hacmi (cm ³)
V_0	Piknometrenin hacmi (cm ³)
V_h	Hava boşluk oranı
γ	Kayma deformasyonu (%)
δ	Faz açısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Δt	Gecikme zamanı
θ	Dönme açısı (rad)
τ	kesme (kayma) dayanımı (Pa)
τ_o	Kesme gerilmesi oranı

Kısaltmalar

AASHTO	Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolları İdaresi
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBR	Eğilme kirişi reometresi
BSK	Bitümlü sıcak karışımlar
DMTA	Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSR	Dinamik kayma reometresi
DTT	Doğrudan çekme
F	Furfural
LVE	Doğrusal visko-elastik
MSCR	Çoklu gerilme sünmesi ve geri kazanımı
PAV	Basınçlı yaşlandırma kabı
PG	Performans derecesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
PI	Penetrasyon indeksi
PMB	Polimer modifiyeli bitüm
RTFOT	Dönel İnce Film Etüvü
RV	Dönel viskozimetre
SHRP	Strategic Highway Research Program
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavement
T	Thiourea
TTPS	Zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibi
ZnO	Çinko oksit

1. GİRİŞ

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ilk inşa edildiklerinde çok iyi dizayn edilmiş olsalar bile trafiğe açıldıktan sonra iklim, çevre ve trafik koşulları altında belirli bir süre sonra bozulmaya başlarlar. Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenlerinin tasarım, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçimi, iklim koşullarının ağırlığı ve denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca karayollarda oluşan bozulmaların büyük bir kısmını aşırı yüklenmiş dingil yükleri oluşturmaktadır (Çakıroğlu, 1996).

Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlamlar ve ayrışmalar olmak üzere, en fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklanan bozulmalardır (Brown et al., 2001; TRB, 2011).

Esnek yol kaplamalarında optimum servis ömrü ve durabilite özelliklerini sağlamak için bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak ürün performansının azaltmasına neden olduğundan ya da bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerine bağlı optimum performans özelliklerinde kırılma olması durumunda malzemenin akış özelliklerinin zaman içinde değişimi genellikle oldukça istenmeyen bir durumdur. Asfalt yol kaplamasının durabilitesi, yıl içinde değişen sıcaklıklardaki yüksek değişimler ve gece ile gündüz sıcaklık farklılığı gibi atmosferik etkilerden oldukça etkilenmektedir (Petersen, 1984, 2009).

Servis ömrü süresince, bağlayıcıda meydana gelen fizikokimyasal değişimler nedeniyle dolayı malzemenin kırılganlığında kademeli bir artış olması sonucu asfalt yol kaplaması yaşlanır. Bitümün yaşlanması dört temel mekanizmaya bağlıdır: (i) sızma, (ii) buharlaşma, (iii) oksidasyon ve (iv) fiziksel yaşlanma. Bu mekanizmalar arasında en önemlisi oksidasyondur. Bitümün oksidatif yaşlanmasında oksijen içeren işlevselliklerin oluşumu ve ayrıca farklı bağlayıcı bileşenler arasında dönüşüm gözlenebilmektedir. Genel olarak, bitümün aromatik içeriği azaldıkça asfaltın içeriği artmaktadır. Doygun maddeler oksijene karşı etkisizdir ve böylece uçuculuktan dolayı bu kısımda hafif değişiklikler oluşabilir (Zeng and Isacsson, 1997).

Asfalt, atmosferik oksijenle reaksiyonu sonucu kimyasal oksidasyona maruz kaldığında, fiziksel özelliklerin bozulmasına yol açan asfaltın sertleşmesi meydana gelmektedir.

Asfalt teknolojisinde antioksidan malzeme kullanımının bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştirmesi üzerine etkisini belirlemek için son yıllarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Asfalt üretiminde antioksidan madde kullanımının amacı, asfaltın oksidasyon ve sertleşmeye karşı direncini geliştirmek içindir ve bu madde yol kaplaması endüstrisinde gelecek vaat eden bir kimyasal modifiyer olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, pek çok çalışmada antioksidanın yaşlanma sertleşmesini azaltma ve bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini geliştirme yetenekleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, bitüme antioksidan malzeme eklenmesi ile bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştireceği ve asfalt karışımının mekanik ve durabilite özelliklerinin artabileceği hipotezi kurulmuştur.

Bu tez çalışmasının temel amaçlarından biri, bitümlü bağlayıcılara antioksidan katkıları ilave edilerek bağlayıcı malzemelerin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesidir. Antioksidanlar bitümlü bağlayıcılarının oksidatif sertleştirme özelliğine engel teşkil ederler. Oksidasyon işlemi, bağlayıcının en sonunda kırılma noktasına yani gevrek bir yapıya kadar sertleştirmeye devam eder. Bu olayın önlenmesinin en pratik yolu küçük oranlarda antioksidanların bitümlü bağlayıcıya ilave edilmesidir.

Bu çalışmada, çeşitli antioksidan katkıların bitüm reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelenmiş ve antioksidan katkıların modifiyer olarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur. Bu amaçla, çinko oksit (ZnO), furfural (F) ve thiourea (T) antioksidan katkıları saf bitümlere ilave edilerek modifiye bağlayıcılar hazırlanmış ve katkılı bitümlerle ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, temin edilen farklı penetrasyonlara sahip (B 50/70 ve B 160/220) iki farklı bitüm türü kullanılarak çeşitli antioksidan malzemelerin bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkileri hem sert hem de yumuşak bitüm üzerinde denenmiştir. Bitümlere değişik oranlarda antioksidan katkı malzemelerinin eklenmesiyle elde edilen bağlayıcılar üzerinde Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi çerçevesinde test programı uygulanmıştır.

Ayrıca, saf ve antioksidan katkılı bağlayıcıların PG plus sınıflarını belirlenmek için tüm bağlayıcılar, DSR deney aleti kullanılarak, çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (Multiple Stress Creep Recovery – MSCR) testine tabi tutulmuştur. Bunun dışında, antioksidan katkıların bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımına etkisini belirlemek amacıyla kiriş şeklinde olan karışım numuneleri yine DSR cihazı yardımıyla sünme (creep) testine tabi tutulmuştur.

Bu tez sekiz bölümden oluşmaktadır. Bu giriş bölümü sonrasında bitümün reolojik karakteristikleri tanımlanmıştır. Bölüm 3 ise literatür taramasını kapsamaktadır. Geleneksel test yöntemleri, Superpave test yöntemleri ve ileri test yöntemleri Bölüm 4'te sunulmuştur. Bölüm 5 bitümlü sıcak karışımlar üzerinde uygulanan test yöntemlerinin detaylı bir tanımlarını içermektedir. Bölüm 6'da ise antioksidan katkılarla bitüm modifikasyonu açıklanmıştır. Laboratuvar test sonuçlarının analizi ve deney protokolünün değerlendirmesi Bölüm 7'de verilmiştir. Çalışmanın sonuçları ve öneriler Bölüm 8'de verilmiştir.

2. BİTÜMÜN REOLOJİK KARAKTERİSTİKLERİ

2.1 Reoloji

Asfalt veya bitüm, yol yapımında kullanılan yarı katı visko-elastik ve siyah renkli bir malzemedir. Asfalt petrolün damıtılmış kalıntısından üretilmektedir. Bir asfaltın molekül yapısının en önemli unsurları karbon ve hidrojen elementleridir. Diğer elementler ise kükürt, azot ve oksijendir. Asfalt bağlayıcı molekülleri, oksidasyon yaşlanmasının ana nedeni olan polar bileşenlere sahiptir.

Asfalt bağlayıcıların bitümlü sıcak karışımların kalite ve performansında önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Zaniewski and Pumphrey, 2004).

Reoloji, çeşitli oran ve sıcaklıklarda bitümün akış ve deformasyon özelliklerini karakterize eden ve inceleyen temel bir bilim dalıdır. Bitümün reolojik özellikleri bitümün yapıtaşını oluşturan moleküllerin fiziksel düzenlemesine bağlıdır ve bu özellik sıcaklık sonucunda hızlı bir şekilde değişmektedir. Asfaltın kimyasal bileşimi onun fiziksel özelliklerini belirlemektedir. Ancak, asfaltın kimyasal bileşimi hem kısa dönem (taşıma, pompalama, karıştırma, yayma ve sıkıştırma) hem de uzun dönem (saha hizmeti) kullanım sırasında değişmektedir (Zargar et al., 2012).

2.2 Bitümün Bileşimi (Kompozisyonu)

Genellikle bitümün kimyasal bileşimi türetildiği ham petrolün türüne oldukça bağlıdır. Genel olarak, bitüm içindeki molekül bileşikler oksijen, azot, kükürt ve diğer farklı atomlar içermektedir. Bununla birlikte, bitüm, ağırlıkça yaklaşık %80 karbon, ağırlıkça %10'a kadar hidrojen, ağırlıkça yaklaşık %6 kükürt, az miktarda oksijen ve azot ile demir, nikel ve vanadyum gibi metallerden oluşmaktadır (Whiteoak and Read, 2003).

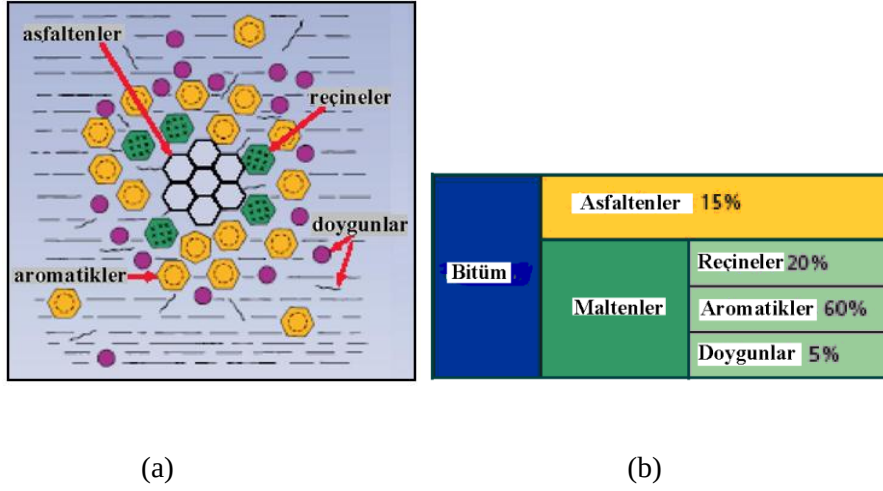
Çeşitli ham petrollerden imal edilen bitümlerin element analizi sonuçlarına göre kompozisyonları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

UV emisyon spektrofotometrisi ile sıvı yakıttan üretilen kül üzerinde yapılan incelemede ayrıca şu metalik elementleri içerdiği belirtilmiştir: çinko, alüminyum, demir, magnezyum, silikon, bakır, kalsiyum vb. (Whiteoak and Read, 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	1,10
Kükürt (%)	5,25	3,41	5,43	0,99
Oksijen (%)	0,77	0,36	0,29	0,20
Vanadyum (milyonda)	180	7	1380	4
Nikel (milyonda)	22	0,40	109	6

Kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olan asfaltın n-heptan'da çözünen kısmına, maltenler, çözünmeyen kısmına asfaltenler adı verilen iki geniş kimyasal gurubu mevcuttur. Maltenler de ayrıca, doygunlar, aromatikler ve reçineler olarak alt guruplara ayrılır. Asfaltenler, esasen karbon ve hidrojenden oluşan, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılar olup asfaltın %5 ile %25'ini oluştururlar. Asfalten miktarının artırılması ile daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Reçineler, koyu kahverengi renginde, katı veya yarı katı kıvamda ve doğal elektriksel yüklere sahip (polar) olması nedeniyle asfaltlara yüksek adezyon özelliği kazandırmaktadır. Aromatikler, asfaltın %40 ile %60'ını oluşturan, asfaltenlerin yayılımı için gereken ortamı teşkil eden, koyu kahve renkli viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Doygunlar veya doygun hidrokarbonlar ise asfaltın %5 ile %20'sini oluşturan, saman rengi veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır. Asfalt kimyaca, asfalten çekirdeği etrafında malten adı verilen reçine ve yağ üçlüsünden oluşan kolloidal süspansiyon halindedir. Bu yapının oluşum tarzındaki kimyasal değişiklik bitümün reolojik özelliği olan viskozitesini etkilemektedir. Bu oluşum özelliği bakımından asfaltlar, sol ve jel olmak üzere iki tipte değerlendirilmektedir. Sol tipi asfaltlarda asfaltenler, malten içinde çok iyi bir biçimde yayılıp dağılmışlardır (penetrasyon asfaltları). Jel tipi bitümlerde asfaltenler, malten içinde çok az yayılmış, bir bakıma kümelenmiş bir yapı göstermektedir (okside asfaltlar). Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri Şekil 2.1'de görülmektedir (Whiteoak and Read, 2003; Tunç, 2004).



Şekil 2.1. Bitümün a) yapısı ve b) bileşenleri (Whiteoak and Read, 2003).

2.3 Bitüm Bileşimi İle Reoloji Arasındaki İlişki

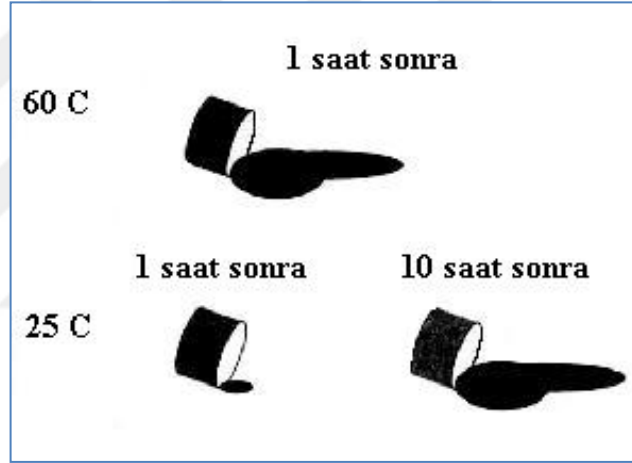
Bağlayıcı bileşiminin bağlayıcı özellikleri ve sonuç olarak bağlayıcının reolojik davranışı üzerine etkisi vardır. Saf bir bitüme katkı maddesi eklendiğinde bu etki açıkça görülebilmektedir. Yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direnci ve elastisite modülü arasında kuvvetli bir ilişki olduğundan, düzenleyici maddenin asfalt üzerinde en önemli etkisi viskoelastisitenin değişmesidir. Örneğin, dinamik kayma reometresi deneyi farklı sıcaklıklarda kompleks modül (G^*) ve faz açısını (δ) kullanarak asfaltın viskoz ve elastik davranışı karakterize etmek üzere kullanılabilir (Cong et al., 2012).

Asfalt bağlayıcının içeriği ile reoloji arasındaki ilişki hakkında yapılmış genel gözlemler şunlardır:

- 1) Sabit sıcaklıklarda esas maltende asfaltinin miktarı arttıkça viskozite artmaktadır.
- 2) Asfaltenerler dışındaki fraksiyon konsantrasyonundaki değişim, asfaltın reolojik özelliklerindeki değişimi aşağıdaki gibi göstermektedir:
 - (i) Reçine/aromatik oranının sabit olduğu doygun maddelerin artışı asfaltı yumuşatmaktadır.
 - (ii) Doygun madde / reçine oranının sabit olduğu aromatiklerin artışı reoloji üzerinde etkisi daha azdır ancak kayma hassasiyetini önemli ölçüde düşürmektedir.
 - (iii) Reçinedeki artış asfaltın sertleşmesine ve viskozitenin artışına neden olmaktadır (Whiteoak and Read, 2003; Altaş, 2002).

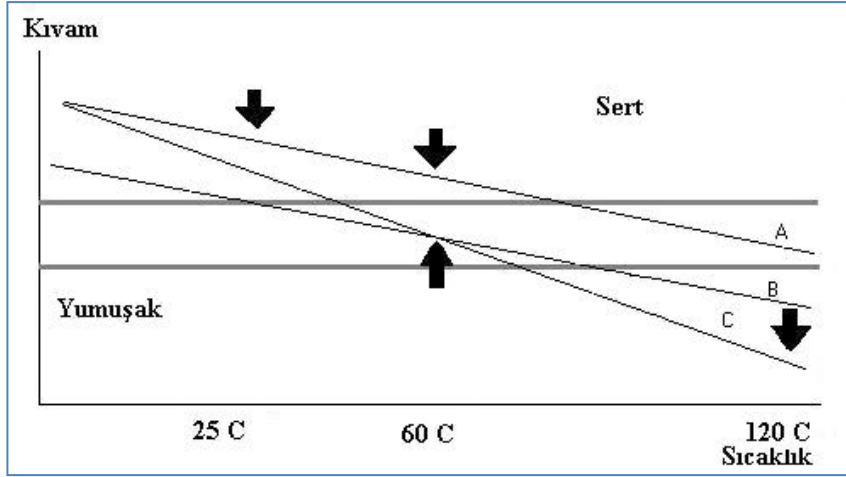
2.4 Bitümün Davranışı

Esnek yol kaplamasının bağlayıcı maddesi olan bitüm, mühendislik davranışı bakımından visko-elastik davranış gösteren termo-plastik bir malzeme olup, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. Bitümün davranışı sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olduğu için, aynı yük farklı sürelerde uygulandığında bitüm farklı özellikler sergileyecektir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bitümün 60°C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış miktarıyla 25°C’de 10 saatte gösterdiği akış miktarı aynı olmaktadır. Bu davranış, sıcaklık ve yükleme süresinin bitüm üzerindeki etkilerinin benzer olduğunu ifade eder. Yani, bitümün yüksek sıcaklıkta ve kısa sürede yaptığı davranış, düşük sıcaklıkta ve daha uzun sürede yaptığı davranış ile eşdeğerdir.



Şekil 2.2. Asfaltın farklı sıcaklık ve zamanlara göre davranışı (McGennis et al., 1995).

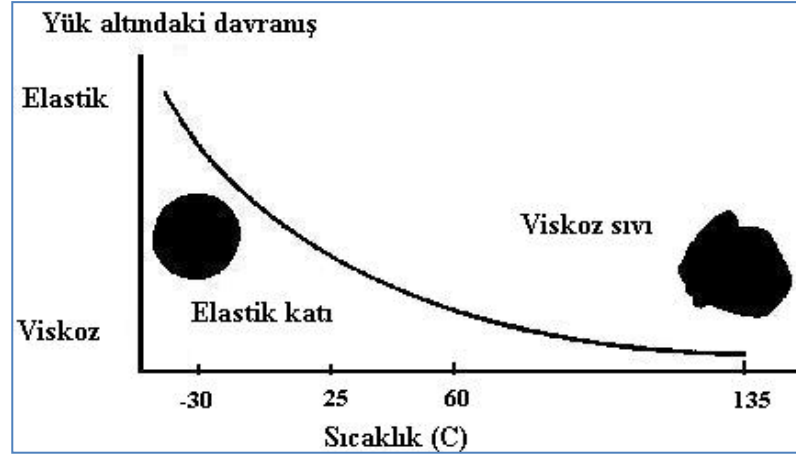
Türkiye’de olduğu gibi halen birçok ülkede penetrasyon esaslı bitüm sınıflandırma sistemi kullanılmaktadır. Penetrasyon deneyi tüm bitümler için 25°C’de yapılmaktadır. Şekil 2.3’te üç adet bitüm numunesinin farklı sıcaklıklardaki kıvamları gösterilmektedir (McGennis et al., 1995; Whiteoak and Read, 2003; Zeng and Isacsson, 1997).



Şekil 2.3. Bitümün farklı sıcaklıklardaki kıvamı (McGennis et al., 1995; Whiteoak and Read, 2003)

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, 25°C'de her üç numunede sert olarak tanımlanabilecek bir kıvamdadır. Sıcaklık değiştiğinde A ve B bitümleri birbirine benzer bir farklılık gösterirken, C bitümü sıcaklığın etkisiyle A ve B bitümlerine oranla daha hızlı yumuşama göstermektedir. 60°C'de penetrasyonları aynı olan B ve C bitümlerinden C bitümü, düşük sıcaklıklarda B'den daha sert iken, yüksek sıcaklıklarda B'den daha yumuşaktır. Bitüm sınıfları penetrasyon değerine göre aynı olsa da, farklı sıcaklıklardaki davranışları farklı olmaktadır. Kullanılan geleneksel yöntemde, bitümün sıcaklık koşullarına bağlı olarak farklı davranışlar gösterebileceği ihmal edilmektedir (McGennis et al., 1995; The Asphalt Institute, 1996).

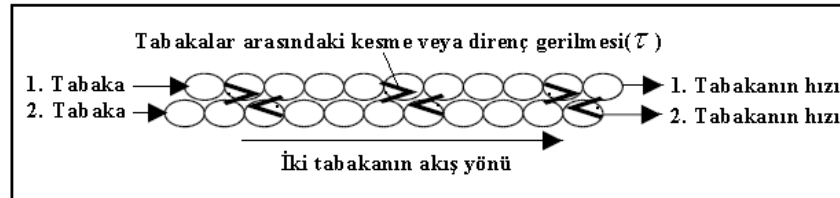
Bu tür malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Şekil 2.4). Bitümün bu reolojik özelliği bitümlü sıcak karışımların da visko-elastik özellik göstermesine neden olmaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, bitümlü bağlayıcının ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir (McGennis et al., 1995).



Şekil 2.4. Bitümün visko-elastik davranışı (McGennis et al., 1995; The Asphalt Institute, 1996; Zeng and Isacsson, 1997).

2.4.1 Yüksek sıcaklık davranışı

Çöl iklimi gibi sıcak koşullarda ya da yavaş hareketli olan veya park durumundaki ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yük altındaki yollarda, bitümlü bağlayıcı viskoz davranır. Bu koşullarda bitümlü sıcak karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Viskozite, sıvının akmaya karşı dayanımını ifade eden malzemenin fiziksel özelliğidir. Eğer sıcak asfalt çimentosunun yavaş akış hareketi güçlü bir mikroskop altında incelenirse, molekül tabakalarının birbirleri üzerindeki kaymaları görülebilir (Şekil 2.5). Tabakalar arasındaki kayma direnci kuvveti ya da sürtünme, birbirleri üzerinde kayan tabakaların bağıl hızı ile ilgilidir. Üstteki tabaka alttaki tabakayı ileri doğru çekmeye çalışırken alttaki tabaka üsttekini yerinde tutmaya çalışır. Direnç kuvveti ve bağıl hız arasındaki ilişki değişik sıvılar için oldukça farklılık göstermektedir (Dinç, 1999).



Şekil 2.5 Bitümün moleküler düzeyde akışı (Berkers, 2005; Fitzgerald, 2000).

Tabakalar arasındaki kesme (kayma) dayanımı (τ), aşağıdaki (2.1) ilişkisi ile tanımlanır (Berkers, 2005).

$$\tau = \mu \times \tau_0 \quad (2.1)$$

μ : Viskozite katsayısı,

τ_0 : Kesme gerilmesi oranı (1.tabakanın 2.tabaka üzerinde kaydığı bağıl hız).

Sıcak bitüm gibi viskoz sıvılar, aktıklarında, soğuma olsa bile hiçbir zaman eski (orijinal) hallerine gelmedikleri için plastik olarak nitelendirilirler. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda, bitümlü sıcak karışımların daha düşük stabiliteye sahip olduğunu açıklar ve tekrar eden tekerlek yükleri nedeniyle düşük stabiliteye sahip olan sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izleri oluşur. Bununla birlikte, üstyapı kaplamalarında oluşan tekerlek izi, bünyesindeki agrega özellikleri ile de ilgilidir.

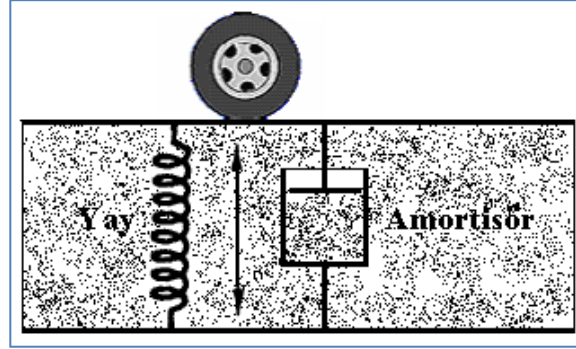
2.4.2 Düşük sıcaklık davranışı

Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareketli olan araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, bitüm elastik bir katı gibi davranış gösterir. Kauçuk ve benzeri elastik katılar yüklendiklerinde şekil değiştirirler, ancak üzerindeki yük kaldırıldığında önceki (orijinal) hallerine geri dönme yeteneğine sahiptirler. Bu malzemelere taşıma kapasitesinden daha fazla yükleme yapıldığında, malzeme bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Asfalt çimentosu düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı ise de aşırı yüklendiğinde kırılabilir ve çatlayabilir. Bu yüzden kaplamalarda soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Bu duruma, düşük sıcaklık sebebiyle kaplama yüzeyinin büzülme çabasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur (Altaş, 2000; Dinç, 1999).

2.4.3 Orta sıcaklık davranışı

İklim ve çevre koşulları genellikle aşırı sıcak ile aşırı soğuk arasındadır. Bu tip iklime sahip bölgelerde bitümlü bağlayıcı, hem kıvamlı sıvı ve hem de elastik katı özelliklerini sergiler. Bu davranış aralığı nedeniyle bitüm, üstyapı kaplamalarında kullanmak için mükemmel bir yapışkan malzeme, ancak bir o kadar da anlaşılması ve açıklanması zor bir malzemedir. Bitüm ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin bitümle kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkân tanıyan bir bağlayıcı veya kayganlaştırıcı gibi davranır. Soğuduğunda ise agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Bitümün bu davranışı, yani sıcaklık ve yüke bağlı olarak hem viskoz hem de elastik özellik göstermesi, onun viskoelastik bir malzeme olması

ile ilgilidir. Bitümün yük etkilerine karşı gösterdiği bu davranış kavramsal olarak Şekil 2.6’da gösterildiği gibi “yay-amortisör” modeliyle açıklanabilir.



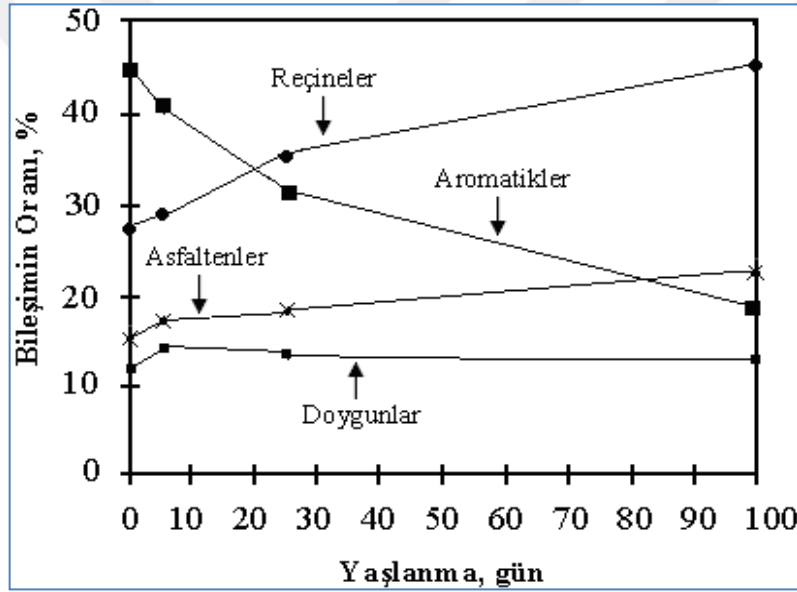
Şekil 2.6. Viskoelastik davranış ve yay-amortisör modeli (Dinç, 1999).

Bitüme uygulanan herhangi bir kuvvet yay ve amortisörde paralel bir tepkiye neden olur. Yük etkileyen bir bitümlü sıcak karışımda yay, bitümün ilk elastik tepkisini, amortisör ise bitümün özellikle daha sıcak havalardaki daha yavaş viskoz tepkisini sembolize eder. bitüm bazı durumlarda plastik davranış gösterse de çoğu durumda yüklemelere elastik veya viskoelastik olarak tepki verir. Yani deformasyonlar, etkileyen yüklerin şiddetine göre zamanla eski durumuna gelir veya kısmen kaybolur (Dinç, 1999).

2.4.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı

Bitümlü kaplama tabakalarının hizmet ömrünü bozulmadan tamamlamaları için depolama, üretim ve hizmet ömrü boyunca bitümün aşırı derecede sertleşmemesi gerekir. Organik bir malzeme olan bitüm, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışıklardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek sertleşme eğilimi göstermektedir. Birçok organik malzemede olduğu gibi bitüm de havaya maruz kaldığında yavaş yavaş oksidasyona uğrar. Bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha az esnek yapan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağlıdır. 100°C’nin üzerindeki her 10°C’lik artış oksitlenme veya oksidasyon oranını iki katına çıkarmaktadır. En önemli yaşlanma nedeni olan oksidasyon, bitümün daha gevrek olmasına neden olur ve yaşlanma sertleşmesi sürecini başlatır. Bu sertleşme nedeniyle eski bitümlü kaplamalar çatlamaya karşı daha hassas olurlar (Dinç, 1999; Whiteoak and Read, 2003).

Bitüm bağlayıcıdaki uçucu bileşenlerin, sıcaklık etkisi ve havayla temas ederek buharlaşması ile içindeki bileşenlerin oranları da değişmektedir. Asfalt çimentosunun 85°C sıcaklıkta 100 günlük süre içerisinde yaşlandırılması esnasında, farklı sürelerde alınan numunelerdeki bileşenlerinin % olarak miktarları Şekil 2.7’de verilmiştir. Yaşlanma süresince, asfaltın bünyesindeki asfaltten ve reçinelerin yüzdeleri artarken, aromatikler azalmakta ve doygunlar ise yaşlanma süresince fazla etkilenmemektedir. Ayrıca bitüm, ortam sıcaklığında kaldığında fiziksel sertleşme oluşur ve bu sertleşme genellikle bünyesindeki moleküllerin yeniden yerleşmelerine ve petrol mumlarının yavaş kristalleşmesine bağlanır. Ancak, bitüm yeniden ısıtıldığında orijinal viskozitesini tekrar kazanır. Fiziksel sertleşme daha çok 0°C’nin altındaki sıcaklıklarda telaffuz edilir ve asfalt çimentolarını düşük sıcaklıklarda teste tabi tutarken dikkate alınmalıdır.

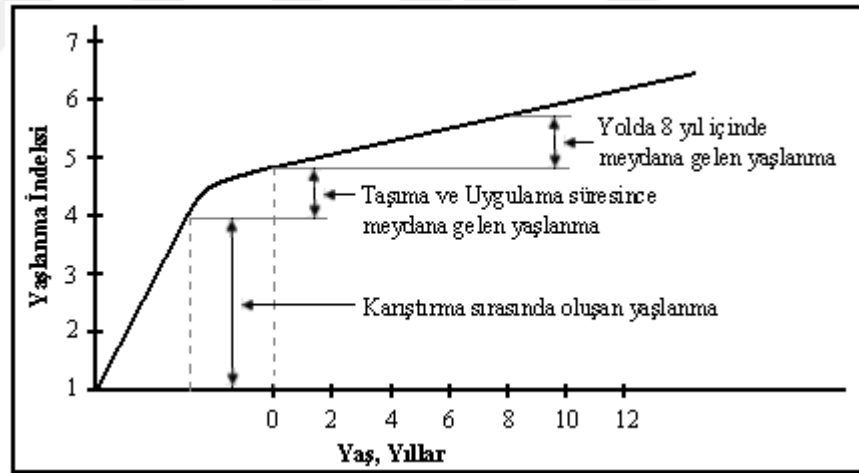


Şekil 2.7. Bitümdeki bileşenlerin yaşlanma sonucunda değişimi (Zeng and Isacsson, 1997).

Uygulamada, bitüm sertleşmesinin büyük bir kısmı karıştırma sırasında ve daha az bir kısmı da sıcak depolama depolama/taşıma sırasında yani sıcak karışım yola serilmeden önce meydana gelir. Sıcak karışım tesisinde, asfalt çimentosu agregaya katılarak belirli bir süre yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Karıştırma sırasında, asfalt çimentosu agregayı 5 mikron ile 15 mikron kalınlığında ince bir tabaka halinde sarar. Bu durumda yüksek sıcaklık ve bol hava ile karşılaşan ince asfalt tabakası, oksitlenme ve uçucu bileşen kaybı için oldukça elverişlidir. Karıştırma işlemi süresince asfalt yaklaşık bir penetrasyon sınıfı sertleşmektedir (Dinç, 1999).

Bitümün sertleşmesi, aynı zamanda olumsuz koşullar altında yol üzerinde de meydana gelebilir ve bunun ana nedeni karışımın boşluk oranıdır. Hatalı veya yetersiz sıkıştırma işlemi, uygulanan kaplamalar içerisinde birbiriyle bağlantılı hava boşlukları kalmasına sebep olur ve havanın karışım içine daha fazla nüfuz etmesine izin verir. Yapılan çalışmalarda, %5'in altındaki boşluk oranlarında, hizmet aşamasında çok küçük miktarlarda sertleşme meydana geldiği ancak %9'dan yüksek boşluk oranlarında ise, asfaltın penetrasyon değerinin 70 düzeyinden 25'in altına düştüğü tespit edilmiştir (Whiteoak and Read, 2003).

Kısa süreli yaşlanma olarak kabul edilen süreçte (karıştırma, depolama, taşıma ve uygulama süresinde yaşlanma) meydana gelen yaşlanma, toplam yaşlanmanın yaklaşık %70 düzeyindedir ve bu süreçte yaşlanmış asfaltın viskozitesi orijinal viskozitesine göre yaklaşık beş kat yüksektir. Ancak, uzun süreli yaşlanma olarak adlandırılan süreçte, 8 yıllık hizmet süresinden sonra oluşan yaşlanma, toplam yaşlanmanın %30'u kadardır (Whiteoak and Read, 2003). Asfaltın karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresindeki yaşlanması Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8. Asfaltın karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresinde yaşlanması (Whiteoak and Read, 2003).

2.5 Kaplama Performansı İle Bitümün Kimyasal Özellikleri Arasındaki İlişki

Asfalt kaplamalarda malzemelerle ilgili olabilen önemli kırılma modlarından genel olarak kabul edilenler şunlardır: i) Kalıcı deformasyon; ii)

tekerlek izi bozulması; iii) Yorulma çatlaması; iv) Düşük sıcaklık çatlaması; v) Nem hasarı ve vi) Adhezyondaki genel kayıp (Robertson, 1991).

Uygulamadaki performans gözlemleri ile birlikte laboratuvar deneylerinin sonuçları bitümün içeriği ile fiziksel özellikleri arasındaki temel bağlantıları belirlemektedir. Böylece, bitümün moleküler ağırlık dağılımı ve kimyasal içeriği dengeli olmazsa, bitümün hem kohezyon hem de yapışma özelliklerini olumsuz etkileyebilecek bir heterojenlik gösterebileceği işaret edilmiştir (Whiteoak and Read, 2003).

Çatlama olayı bağlayıcı bileşim ile ilgili olabilmektedir. Eğer moleküler ağ (taneciklenme, kolloid yapı veya her ne terim kullanılırsa) çok sert (rijit) olursa, asfaltın esnek şekilde deforme olma kabiliyeti kaybolacaktır. Buna karşılık, asfalt kırılmaktadır ve muhtemelen iyileşmenin meydana gelemeyeceği bir noktadan ayrılacaktır. Çok sert (rijit) bir matrisin sabit bir şekilde çalışması sonunda yorulma ve çatlamaya maruz kalacaktır (Robertson, 1991).

Bitüm kimyası, asfalt kaplamalarının düşük sıcaklıktaki davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir (Zeng and Isacson, 1997). Düşük sıcaklıkta çatlamanın bileşim özelliği olan alifalik/aromatik oranı ile çok benzer bir ilişkisi olması beklenmektedir (Robertson, 1991).

2.6 Asfaltın Yaşlanma Kimyası ve Mekanizmaları

Daha önce de belirtildiği gibi, asfalt bağlayıcının yaşlanması kaplamanın servis ömrünü azaltan en önemli faktörlerden biridir. Oksidasyon, asfalt bağlayıcının içerisindeki yapı alanlarına katkı sağlayarak asfaltın yaşlanma sertleşmesi ve kırılganlığını arttırmaktadır (Mastrofini and Scarsella, 2000).

Reçinelerin asfalttenleri oluşturmak için benzer şekilde oksitlenmesi ve polimerize edilmesi daha az bir miktarda iken, karıştırma/yerleştirme işlemleri esnasındaki kimyasal değişimler, kayda değer bir oksidasyon derecesini ve reçineleri oluşturmak için periyodik moleküllerin polimerizasyonunu ortaya çıkarmaktadır. Bazı bitümlerin doymuş maddelerinin içeriği büyük ölçüde değişmeden kalmaktadır, halbuki, diğer bitümlerin doymuş maddelerinin içeriği zaman içerisinde artmaktadır (Chipperfield et al., 1970).

Servis ömrü boyunca bağlayıcıdaki fizikokimyasal değişimlerden kaynaklı olarak malzemenin kırılabilirliği kademeli olarak artmaktadır ve asfalt kaplama yaşlanmaktadır. Dört temel mekanizma asfaltın yaşlanması ile ilişkilidir: (i) eksudasyon; (ii) buharlaşma; (iii) oksidasyon ve (iv) fiziksel yaşlanma. Bunlardan en önemlisi oksidasyondur. Servis ömrü içerisinde asfalt bağlayıcının yaşlanmasının temel nedeni havadaki oksijen tarafından belli moleküllerin oksidasyonudur. Asfaltın oksidatif yaşlanmasında, oksijen içeren oldukça polar ve güçlü bir karşılıklı etkileşen fonksiyonel grupların oluşumu sonucu, ayrıca farklı bağlayıcı bileşenlerin kendi arasında dönüşümleri sonucu oksidasyon gözlemlenmektedir (Mouillet et al., 2007; Zeng and Isacsson, 1997). Genellikle, aromatiklerin içeriğinin azalmasıyla, asfaltın içeriği artmaktadır. Doygun maddeler oksijenle reaksiyona girmez ve böylece bu fraksiyondaki küçük değişiklikler sadece uçuculuktan kaynaklanabilmektedir (Zeng and Isacsson, 1997).

Servis ömründe geleneksel asfaltın yaşlanması karbonil büyümeye sebep olmaktadır. Bu reaksiyon daha sonra sertleşen malzemedeki asfaltın sertleşmesini meydana getirmektedir. Oksidasyon hızı sonuç olarak sertleşme hızını belirlemektedir ancak her asfaltın bir özelliği olan sertleşme hassasiyetinin oksidasyonun sertleşmesinin ne ölçüde neden olduğunun tespit edilmesi önemlidir (Martinez et al., 2006).

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1 Genel

Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlamlar ve ayrışmalar olmak üzere, en fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklanan bozulmalardır (Brown et al., 2001; TRB, 2011).

Esnek kaplamalardan stabilite ve performans yönünden üstün nitelikli ve daha uzun ömürlü olmaları beklenir. Bakım-onarım maliyetinin ve gereksiniminin daha az olması istenir. Bu fonksiyonların elde edilebilmesi için;

- Kalıcı deformasyonlar
- Düşük ısı çatlakları
- Yorulma çatlakları
- Su etkisiyle meydana gelen bitüm soyulması ve düşük durabilite gibi kusurların azaltılması gerekir (Tunç, 2001).

Gerek trafik emniyeti açısından, gerekse artan yüksek onarım maliyeti nedenleri ile büyük sorunlar yaratan bu duruma çözüm olarak; Karışım dizaynlarının yeniden gözden geçirilmesi, hem agreganın hem de bitümün kalitesinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu sorunlara çözüm olabilmesi için yapılmış olan çalışmalarda özellikle bitüm modifikasyonu üzerinde durulmuştur. Bunda, bitümün viskoelastik bir malzeme oluşu ve yol üst yapı performansının belirlenmesinde çok önemli rol oynamasının payı büyüktür. Bu konuda, çeşitli ülkelerde davranış-performans özellikleri, kalite kontrolü ve standartları üzerine çalışmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir (King, 1999).

Bağlayıcı malzemenin ve dolayısıyla karışımın performansını arttırmak amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir. Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenerek değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ancak bitümün modifiye edilmesi, özelliklerinin tespiti, taşınması

ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi için ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi sorunlarla beraber karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır (Asfalt ve Uygulamaları, 2001).

3.2 Modifikasyonun Amacı

Bitüm ve bitümlü sıcak karışımların modifikasyonu ile genel anlamda, bitümlü kaplamaların yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak tekerlek izine karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Üstelik kaplamanın, yüksek trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlamalarla su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenen düzeyde kayma direncinin elde edilerek sürüş konforu ve emniyetinin artırılması da amaçlanmaktadır. Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen bitümün modifikasyonu nedenleri maddeler halinde aşağıdaki gibi verilebilir (Birliker, 1998):

- 1) Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek bitümlü karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak,
- 2) Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
- 3) Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
- 4) Karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini arttırmak,
- 5) Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek,
- 6) Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirebilmek,
- 7) Düşük kaliteli bağlayıcıların verimini arttırmak,
- 8) Agregası ve bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetini artırarak soyulmayı azaltmak,
- 9) Kusmayı ya da terlemeyi azaltmak,
- 10) Yaşlanmaya karşı bağlayıcının direncini arttırmak,
- 11) Daha ince kaplama tabakası yapılmasını mümkün kılmak,
- 12) Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
- 13) Kaplamanın her bakımdan performansını yükseltmek,

14) Kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak.

3.3 Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranacak Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve katkılı bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından sağlaması gereken koşullar aşağıda verilmiştir:

- 1) Kolay elde edilebilmelidirler,
- 2) Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
- 3) Asfaltla homojen olarak karışabilmelidir,
- 4) Asfaltın yüksek yapım ve uygulama sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır,
- 5) Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılgan ya da sert olmamasını sağlamalıdır,
- 6) Maliyetleri ekonomik olmalıdır.

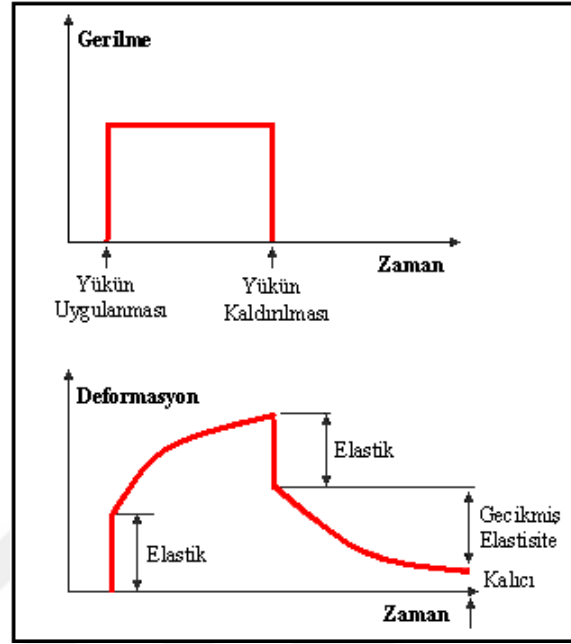
Katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenmektedir:

- 1) Depolama, uygulama ve servis esnasında sahip oldukları özellikleri korumalıdır,
- 2) Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdırlar,
- 3) Depolama, uygulama ve servis esnasında kimyasal ve fiziksel olarak stabil olmalıdırlar,
- 4) Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidirler (Birliker, 1998; Whiteoak and Read, 2003; Tunç, 2001; Zaniwski and Pumphrey, 2004).

3.4 Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü

Bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik gösterdiğinden dolayı, başta kalıcı deformasyon ve çatlamaya karşı gösterdiği direnç olmak üzere kaplama performansının birçok parametresinde önemli rol oynayarak bitümlü karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Genel olarak, bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Abbas, 2004; Whiteoak and Read, 2003).

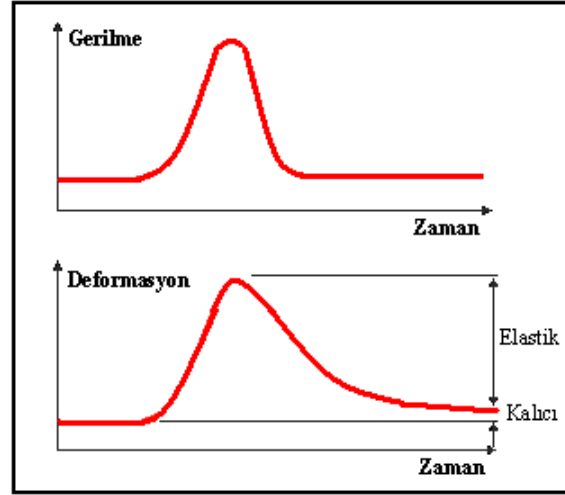
Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı (Abbas, 2004; Whiteoak and Read, 2003).

Şekil 3.1, bitümlü bir malzemenin statik yüklerle karşı tepkisini göstermektedir. Yük uygulanmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve ardından yük ortadan kaldırılana kadar kademeli bir artış göstermektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla birlikte elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma veya geri dönüşüm meydana gelmektedir. Bu durum “gecikmiş elastisite” olarak adlandırılmakta ve sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan malzemenin viskoz davranışının sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.

Bitümlü bir malzemenin hareketli araç tekerleklerinden oluşan bir dinamik yüklemeye karşı gösterdiği tepki Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler altındaki visko-elastik davranışı (Whiteoak and Read, 2003).

Şekil 3.2’de; deformasyon-zaman grafiğinde, yükün etkimesinden önceki ve sonraki değerlere bakıldığında büyük oranda elastik şekil değiştirme ile birlikte küçük miktarda kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için gösterilen şekil değiştirme, aslında çok küçük olmasına rağmen, buna benzer milyonlarca dingil yükü uygulanması sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin toplamı büyük bir miktara ulaşarak kaplama yüzeyinde kalıcı deformasyon oluşturmaktadır. Yukarıdaki her iki durumda da deformasyonlar; yüksek sıcaklık, ağır veya hareketsiz trafik etkisiyle artış göstermektedir.

Modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, başka sıcaklıklardaki bitüm veya karışım özelliklerini olumsuz etkilemeksizin arttırmaktır. Bu işlem, karışımın toplam visko-elastik tepkisini azaltmak ve bununla birlikte kalıcı şekil değiştirmede azaltma meydana getirmek amacıyla bitümün sertleştirilmesi ya da yine kalıcı şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün elastik bileşenini artırarak viskoz bileşeni azaltmak yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bitümün sertliğinin artırılması aynı zamanda karışımın da sertliğini arttıracak ve dolayısıyla malzemenin yük yayma yeteneği ile kaplamanın yapısal mukavemetini ve beklenen tasarım ömrünü iyileştirecektir. Aynı etki kaplama tabakaları kalınlıklarının artırılması ile de elde edilmektedir ancak bu durum ilk yapım masrafının yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitüm modifikasyonu ile daha ince bir tabaka oluşturarak kaplamanın yapısal mukavemetini arttırmak mümkündür.

Ayrıca bitümün elastik bileşeninin artırılması, yüksek çekme deformasyonlarının bulunduğu durumlarda büyük önem taşıyan asfalt esnekliğini de geliştirecektir (Whiteoak and Read, 2003).

3.5 Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Ancak, son yıllarda kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve modifiye karışımlar konusundaki çalışmalar ve yayınlar da, farklı tip katkı maddelerinin karşılaştırmasından katkı maddesi olarak polimerlere ilginin arttığı ve bitüm katkı maddeleri sınıflandırılırken polimerler temel alınarak, polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu biçimdeki bir sınıflandırmaya göre bitüm modifikasyon tipleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Günümüz asfalt endüstrisinde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş modifiyer çeşitleri ve bunların bitümlü karışımlarda kullanılması ile oluşması muhtemel ana kusurları azalttığı ispatlanan, ifade edilen veya iddia edilen sınıflandırması ve muhtemel faydaları Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Asfalt ve Uygulamaları, 2001; Bahia et al., 2001).

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

Çizelge 3.2. Bitüm modifikasyon tipleri (Asfalt ve Uygulamaları, 2001; Isacsson and Lu, 1995).

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer Olmayan Katkıyla Modifikasyon 1. Fillerler 2. Soyulma Önleyici Katkılar 3. Genleştiriciler (Ekstendenler) 4. Antioksidanlar 5. Organo-metal Bileşimleri 6. Diğerleri	Kil, Siyah Karbon, Uçucu Kül Organik Aminler ve Amidler Ligrin, Sülfür Çinko ve Kurşun Antioksidanları, Fenolikler, Aminler Organo Manganez ve Organo Kobalt Bileşimleri Organo Karbon Bileşimleri, Gilsonit, Silikon, İnorganik fiberler
II. Polimer Katkıyla Modifikasyon 1. Plastikler a. Termoplastikler b. Termosetler 2. Elastomerler a. Doğal Kauçuklar b. Yapay Elastomerler 3. İşlenmiş Kauçuklar 4. Fiberler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA) Epoksi 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)

Çizelge 3.3. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiye edicilerin muhtemel olumlu etkileri (Bahia et al., 2001).

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSÇ ³	NH ⁴	Y ⁵
Fillerler	Siyah karbon	x				X
	Mineral: Sönmüş kireç	x				X
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Genleştiriciler (Ekstendenler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler- Elastomerler	Stiren butadien diblok (SB)	x		x	x	
	Stiren bütadien üç bloklu / radyal blok (SBS)	x	x	x		
	Stiren izopren (SIS)	x				
	Stiren etilen butilen (SEBS)					
	Stiren bütadien kauçuk lateks (SBR)	x		x		
	polikloropren lateks	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
	Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	x				
Polimerler- Plastomerler	Etilen vinil asetat (EVA)	x	x			
	Etilen Propilen Dien Monomer (EDPM)	x				
	Etilen akrilat (EA)	x				
	Poliizobutilen	x				
	Polietilen (düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu)	x		x		
	Polipropilen	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltlenler: yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltlenler	x				
	Asfaltlenler: DEMEX Asfaltlenler	x				
	Şist yağı				x	X
	Don yağı (tallol)					
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	

	Gilsonit	x			x	
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Polyaminler				x	
	Polyamidler				x	
	Sönmüş kireç				x	
	Organo-metallikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x		x		
	Fiberglass					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		X
	Çinko			x		X
	Siyah karbon	x				X
	Kalsiyum tuzlar					X
	Sönmüş kireç				x	X
	Fenollar					X
	Aminler				x	X
1: Kalıcı Deformasyon		4: Nem Hasarı				
2: Yorulma Çatlağı		5: Yaşlanma				
3: Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

3.6 Modifiye Edilmiş Bitümlerin Stabilitesi

Modifiye edilmiş bitümler düzenleyicilerin bitüm fazının içerisine dağılan çok fazlı sistemlere sahiptir (TRB, 2011) Böylece, katkılar ve esas bitümün uyumlu olması gerekmektedir. Bununla birlikte, pek çok faktör uyumluluk derecesini etkilemektedir. Katkılarla bitümün ayrışmasına neden olabilecek üç mekanizma bulunmaktadır:

- Fiziksel ayrışma,
- Termal etkiler,ve
- Kimyasal etkiler.

Katkı malzemesi ile bitüm arasındaki yoğunluk farkı fiziksel ayrışmanın önemli bir faktörüdür. Düzenleyici taneciklerinin boyutundaki azalma bitümün viskozitesini arttırmaktadır ve tiksotropik veya kıvamlaştırıcı maddeler gibi katkıların kullanımı ve ince inorganik dolgu maddeleri fiziksel ayrışmayı engelleyebilir (Bahia et al., 1995). Soğutma hızının ve modifiye edilmiş bitümün

işlendiği sıcaklıkların bu tarz bitümlerin termal stabilitesi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, laboratuvar deney koşullarının polimer modifiyeli bitümün hazırlanmasındaki termal işlem ile aynı olması gerekmektedir. Modifiye edilmiş bitümlerin kimyasal stabilitesi katkıların tuz ve asit yağmuru gibi bazı maddelerle reaksiyonundan etkilenebilir. Katkıların oksidasyonu da modifiye edilmiş bitümün stabilitesinde önemli ölçüde bir azalmaya neden olabilir.

3.7 Antioksidanlar

İlk antioksidanlar 1924 yılında ortaya çıkmış ve zaman içinde yavaş yavaş kabul görmüştür. Birkaç yıl içinde, özellikle kauçuk sektöründe kendi gerçek değeri belirlenmiş ve araştırmalar sonucu yeni antioksidanlar yüzlerce malzemenin patent almasına neden olmuştur (Sulekha, 2002). Asfalt bağlayıcının yaşlanmasına ilişkin yayınlanmış birçok çalışma yaşlanma sürecini sınırlandırmıştır ve az miktarda çalışmada ise yaşlanma direncini arttırıcı inceleme yapılmıştır (Cong et al., 2012).

Günümüzde, asfaltın yaşlanmasını azaltan yaygın bir uygulama antioksidanlar gibi farklı kimyasal katkı maddeleri veya katkıları kullanmaktır (Pan, 2012).

Cong et al. (2012) antioksidanlar ve bitümlü bağlayıcı katkıları gibi UV emiciler içeren yaşlanma karşıtı ajan bileşiği kullanmanın etkisini araştırmıştır. Çalışmada iki antioksidan ve iki UV emici kullanılmıştır. Bunlar; 60/80 penetrasyon sınıfı bir bitüm ile çinko dialkilditiyo fosfat, siyah karbon, oktabenzen ve bumetrisoldür. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi, sahada kısa dönemli yaşlanmayı simule etmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçları, antioksidanlar ve UV emiciler içeren yaşlanma karşıtı ajan bileşiğinin bitümün fiziksel özelliğini önemli ölçüde değiştirmediğinden, bitümlü bağlayıcının yaşlanma karşıtı direnç gelişiminin dikkate değer olduğuna işaret etmiştir. Yaşlanma sonuçları bitüm-antioksidan karışımının uygun sıcak yaşlanma direncine ve bitüm-UV emici karışımının iyi bir fotostabiliteye sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, bitüm-yaşlanma karşıtı ajan karışımının depolama stabilitesi üzerine etkilerinin az olduğunu ve yüksek sıcaklıkta uzun süreli depolamadan sonra kaplamalarda kullanılabileceğini göstermiştir (Cong et al., 2012).

Pan (2012) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, koniferil alkol lignin gibi bir biyopolimer kullanarak genel kimyasal antioksidanların kimyasal ve fiziksel temelleri üzerine inceleme yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, bitüm bileşen türleri ile oksijen arasındaki çeşitli kimyasal reaksiyonların analizini yapabilen ayrıca fiziksel değişimlere maruz kalan kuantum kimyasına dayalı bir kemofiziksel ortam geliştirilmiştir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) teknikleri lignin modifiyeli ve lignin modifiyesiz bitüm modellerinin geçerliliğini kanıtlamak için kullanılmış ve XPS sonuçları model öngörülerinin oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir. Çalışma, koniferil alkol ligninin petrol asfaltı için bir antioksidan olarak kullanılabileceğini göstermiş, ancak ligninin oksidasyonunu önlemek için bitüme ilave edildiğinde karıştırma sıcaklığının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini belirtilmiştir (Pan, 2012).

Normal bitüm ve stiren-bütadien-stiren triblok kopolimer (SBS) modifiyeli bitümün yaşlanma özellikleri Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanarak Ouyang et al. (2006) tarafından değerlendirilmiştir. FTIR mikroskobuna takılan bir yaşlanma hücresi sürekli ve doğrudan polimer modifiyeli bitümü incelemek için kullanılmıştır. Özellikle ATR yöntemi çinko selenür bir prizma ile TFOT deneyinden önce ve sonra polimer modifiyeli bitüm spektrumlarındaki değişiklikleri ölçmek için kullanılmıştır. Çinko dialkilditiofosfat (ZDDP), çinko dibutilditiokarbamat veya naftenik yağı gibi bazı katkıların küçük bir miktarın (ağırlıkça %1) polimer modifiyeli bitümün kimyasal ve fiziksel özelliklerine etkisi çalışılmıştır. Polimer modifiyeli bitümün yaşlanması ile, karbonil gruplar oluşmuş ve 965 cm^{-1} tepe noktasında (SBS'in karakteristik tepe noktası) absorpsiyonun yoğunluğu azalmıştır. Antioksidanlar, ZDDP ve ZDBC modifiyeli polimer esaslı bitüm bir dereceye kadar karbonil oluşumuna dirençlidir ve antioksidanların eklenmesiyle polimer modifiyeli bitümün yaşlanma direncinin iyileşmesine işaret etmektedir. Antioksidan olarak ZDDP ve ZDBC, peroksitlerin inhibisyonu ve kökten temizleme yoluyla polimer modifiyeli asfaltın oksidasyonunu geciktirebilir. Ayrıca, ZDDP, polimer modifiyeli bitümün iyi bir yaşlanma direnci olmasına neden olarak, oda sıcaklığında sıvı halde plastikleştirici gibi işlev görmektedir (Ouyang, 2006).

Cuadri et al. (2012) polimerlerle klasik bitüm modifikasyonlarına alternatif olarak thiourea'nın kullanımını önermiştir. 40/50 penetrasyon sınıfına sahip bitüm sırasıyla ağırlıkça %3 ve %9 oranında thiourea ile karıştırılmıştır. Dinamik mekanik termal analiz (DMTA) deneyleri 50 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığında dikdörtgen numuneler üzerinde

gerçekleştirilmiştir. Doğrusal visko-elastik (LVE) bölgede ve -30°C ile 15°C arasında 15°C artışla seçilen dört sıcaklıkta 0,01 ile 100 Hz arasında tarama sıklığı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Thiourea modifikasyonu ile bitümlü bağlayıcının doğrusal visko-elastik özellikleri geliştirmesi değerlendirilmiştir. Deney sonuçları geniş bir sıcaklık aralığında ağırlıkça %9 thioureanın eklenmesinin bu malzemenin termo-reolojik davranışında önemli gelişmelere yol açtığını göstermiştir. 180°C işlem sıcaklığında thiourea termal olarak bitümün en polar bileşikleri ile etkileşimine neden olduğu görünen amonyum tiyosiyanatın içerisinde bozulduğu kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, yukarıda kimyasal olarak ortaya çıkan değişiklikler bitümün reolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir (Cuadri et al., 2012).

Apeagyei (2011) tarafından gerçekleştirilen başka bir laboratuvar çalışmada, bitümlü bağlayıcının yaşlanma sertleşmesini azaltmak için birçok antioksidanın kullanımı araştırılmıştır. E vitamini, Irganox 1010, Irgafos P-EPQ, siyah karbon, hidrate kireç ve DLTDP/furfural gibi birçok katkı maddesi kullanılmıştır. Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcılar laboratuvarında iki farklı hızlandırılmış oksidatif yaşlanma sürecine tabi tutulmuştur. Bağlayıcının kısa dönemli oksidatif yaşlanması RTFOT kullanarak simüle edilirken, uzun dönemli yaşlanma ise PAV ile gerçekleştirilmiştir. Yaşlanmanın bağlayıcılar üzerindeki etkileri, oksidatif yaşlanma geçiren bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerindeki değişime dayalı olarak değerlendirilmiştir. Reoloji deneyleri dinamik kayma reometresi (DSR) ve eğilme kırışi reometresi (BBR) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DSR, 10 rad/s bir frekansta sabit bir gerilme modunda çalıştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, furfural ve DLTDP bir kombinasyonu ile modifiye edilmiş bağlayıcıların en düşük yaşlanma endeksine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca, antioksidanla modifiye edilmiş bağlayıcılar hem yüksek hem de düşük kaplama sıcaklığında iyi bir performans göstermiştir (Apeagyei, 2011).

Bir başka çalışmada, yüksek performans özelliklerine sahip furfural modifiyeli bitüm elde etmek için, çevreye zarar vermeyen Lewis ve paratolüen sülfonik (PTSA) asitler bir katalizör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, modifiye edilmiş bitümlerin reolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Lewis asit (katalizör) varlığında bitüm modifikasyonu için furfuralın kullanılması, ekonomik olmasıyla yüksek ve düşük sıcaklıkta bitümün reolojik özelliklerini geliştirmesini belirtilmiştir (Memon and Chollar, 1996).

Diğer çeşit antioksidan malzeme, çinko oksit (ZnO) tozu, birçok alanda değerlendirilmektedir. ZnO, yüksek performanslı lastik üretiminde, stearik asitle birlikte lastiğin sertleştirmesinde kullanılmaktadır. Kullanım oranı %50 ile %60 arasında değişmektedir (Piggott and Woodhams, 1979). Mikronize edilmiş ve nano ölçekli çinko oksit ve titanyum dioksit, ultraviyole radyasyonuna karşı güçlü bir koruma sağlamakta ve güneş losyonlarında ve ayrıca kaynak yapılırken koruma için UV blokeli güneş gözlüklerinde kullanılmaktadır. Bunun dışında, çinko oksit tozu, metal yüzeylerin kaplanmasında kullanılan boyalara antikorozyon özellik kazandırmaktadır. Sonuç olarak çinko oksit, plastik, seramik, cam, çimento, lastik, yağ, boya, krem, yapıştırıcı, dolgu malzemesi, beton üretimi, pigment, gıda, pil, ferit, yangın geciktirici gibi ürün ve malzemelerin içine ilave edilmektedir (Wikipedia, 2015; US Research Nano materials, 2015).

Ksaibati et al.'e (1993) göre, lastik içinde bir antioksidan ve stabilizör olarak çinko oksit bulunması, bitümün oksidatif yaşlanma seviyesini azaltabildiğini göstermektedir.

4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILARIN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN YÖNTEMLER

4.1 Geleneksel Test Yöntemleri

Bitümlü bağlayıcıların farklı özelliklerini belirlemek amacıyla bitüm üzerinde çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bağlayıcıların kıvamını belirlemek için penetrasyon, yüksek sıcaklık davranışlarını belirlemek için yumuşama noktası deneyi yapılmaktadır. Aynı şekilde, depolama, taşıma ve serme sırasında bitüm ile modifiyer arasında faz ayrışmasının olup olmadığını tespit etmek için depolama stabilitesi deneyi yapılmaktadır. Ayrıca bitümün ısıtılması ve tatbikatı esnasında tutuşma ve yangın tehlikelerini önlemek, uygun önlemlerin hangi dereceden itibaren alınması gerektiğini gösteren kritik sıcaklığının tespiti için parlama noktası deneyi yapılmaktadır.

4.1.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyonu ölçmek için kullanılan alete penetrometre denir. Penetrasyon deneyi ile bitümün sertlik veya kıvamı tayin edilir. Penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar. Deneyde kullanılacak numuneler 30 dakika boyunca 25°C’de bekletilir. Deneye başlamadan önce penetrasyon aletinin göstergesi sıfırlanır.

Su banyosunda bekletilen numuneler, deney sırasında sıcaklığı sırasında sıcaklığın korunması için 25°C’deki su içinde cihaza yerleştirilir. 100 gr ağırlığındaki iğne numune yüzeyine degecek şekilde ayarlanır. Penetrasyon deney aleti Şekil 4.1’de görülmektedir.

İğne 5 saniye süresince serbest bırakılır. 5 saniyelik zaman biter bitmez okuma alınır. Bu şekilde, en az 3 okuma yapılır. 0,1 mm cinsinden okunan bu okumalar, en kısa zamanda yapılmalıdır. Deney sonunda penetrasyon, hesaplanacak penetrasyon toleransından daha büyük farklar bulunmayan en az 3 deney neticesinin ortalamasıdır. Penetrasyonun birimi 10^{-1} mm.dir (TS EN 1426, 2008).



Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi aleti.

4.1.2 Yumuşama noktası deneyi

Bağlayıcıların sıcaklık değişmelerine karşı olan duyarlılıklarını ölçmek için yumuşama noktası deneyi yapılır. Halka, daha önce gliserin-pudra karışımı ile yağlanmış bir seramik plaka üzerine yerleştirilir. Numune ısıtılarak, halkalar bitümle doldurulur. Yaklaşık bir saat boyunca soğumaya bırakılıp, fazla olan kısım ısıtılmış bir ıspatula ile kesilip alınır. Numunenin hazırlanmasında TS EN 1427'nin öngördüğü hususlardan hareket edilir.

Yaklaşık 5°C sıcaklığa sahip olan saf suyla bir beher tabandan yaklaşık 9 cm yüksekliğe kadar doldurulur. Numuneyi ihtiva eden halkaların alt yüzü behere yerleştirilir. Bu arada bilye suya konulur. Su sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C'de sabit tutulur. Bunun ardından bilye uygun bir maşa yardımı ile halkaya yerleştirilir. Beherdeki su dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin, beherin tabanına değir değmez termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kabul edilir. Yumuşama noktası deney aleti Şekil 4.2'de görülmektedir (TS EN 1427, 2008).



Şekil 4.2. Yumuşama noktası deneyi aleti.

4.1.3 Penetrasyon indeksi (PI)

Bitüm sıcaklık duyarlılığı, bu sıcaklığa bağlı olarak kıvamda meydana gelen değişimin bir ölçümüdür. Bu ölçüm, penetrasyon indeksi (PI) olarak tanımlanır (Harlin, 1992; Benedetto and Corte, 2004). Penetrasyon indeksi, yumuşama noktası ve penetrasyon deney sonuçları kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada penetrasyon indeksini bulmak için (PI) Pfeiffer ve Van Doormal tarafından geliştirilen formül kullanılmıştır (Formül 4.1). Formüldeki Pen₂₅, bitümün 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını ifade etmektedir. PI değeri -3°C'den +7 °C'ye kadar değişmektedir (Solomatnikova, 1998).

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

4.1.4 Parlama noktası deneyi

Isıtılarak akıcı hale getirile bitüm, standart boyutlara sahip olan deney kabına dökülür. Kap içerisindeki numune, sıcaklığın dakikada 14-17°C artacak şekilde ısıtılır. Parlama noktası sıcaklığını tespit etmek için bitümün üzerinde belirli aralıklarla alev gezdirilir. Bitümün alev ile teması sonucu ilk parladığı andaki sıcaklık parlama noktasıdır. Bu deneyde kullanılan cihaz, Şekil 4.3'te görülmektedir (TS EN ISO 2719, 2015).



Şekil 4.3. Parlama noktası deneyi aleti.

4.1.5 Özgül ağırlık deneyi

Hacmi bilinen ağız kısmı düzgün bir piknometre ve saf su yardımıyla bitümün özgül ağırlığı bulunabilmektedir (Şekil 4.4). Piknometrenin boş ağırlığı alınır (W_o). Kap, tamamen saf su ile doldurulur, yüzeyde düzgün bir cam gezdirilerek fazla su uzaklaştırılır ve tartılır (W_1). Bu iki ağırlığın farkı piknometrenin hacmini vermektedir. Yüzeyde boşluk kalacak şekilde piknometre bitüm ile doldurulur. Numune soğuduktan sonra tartılır (W_2). Kabin bağlayıcı üzerindeki boşluk hacmini belirlemek amacıyla saf su eklenir, fazla miktardaki su uzaklaştırılır ve tartılır (W_3). Aşağıdaki bağıntılardan faydalanarak bitümün özgül ağırlığı tespit edilir (TS EN 15326, 2010).

$$\text{Bitümün Ağırlığı (M)} = W_2 - W_o \quad (4.2)$$

$$\text{Piknometrenin Hacmi (V}_o\text{)} = W_1 - W_o \quad (4.3)$$

$$\text{Bitümün Hacmi (V)} = V_o - (W_3 - W_2) \quad (4.4)$$

$$\text{Bitümün Özgül Ağırlığı } G_b = \frac{M}{V} \quad (4.5)$$



Şekil 4.4. Bitümün özgül ağırlığını tayini için 25 ml'lik piknometre.

4.1.6 Depolama stabilitesi deneyi

Polimer katkılı bitümlerin depolama koşullarını ve sürelerini tayin etmek amacıyla bağlayıcılar TS EN 13399 standarda göre depolama stabilitesi deneyine tabi tutulmaktadır. 160 mm yüksekliğinde 30-40 mm çapında bir tüpe modifiye bitüm dökülerek 72 saat boyunca 180°C 'de ısıtılmasının ardından bağlayıcı soğumaya bırakılır. Bu işlemin ardından tüp 3 eşit parçaya bölünür. Deneyde orta kısım kullanılmadan, üst ve alt kısımlarda bulunan bağlayıcı, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine tabi tutularak depolama stabilite değerleri belirlenmektedir (TS EN 13399, 2005).

Çalışmada kullanılan depolama stabilitesi tüpleri, laboratuvar şartlarına ve standartlara uygun ebatlarda üç parçalı cam şeklinde özel olarak imal edilmiştir. Kullanılan tüplerin resimleri aşağıdaki Şekil 4.5'te verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. Laboratuvar şartlarına uygun olarak üretilen depolama stabilitesi tüpü.

4.2 Superpave Test Yöntemleri

1987 yılında Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) tarafından, bitümün fiziksel davranışlarının ölçülmesine dayanarak yeni deneylerin geliştirilmesine başlanmış ve gelişmiş bir deney protokolünü oluşturarak bir yüksek performanslı bitümlü kaplama (SUPERPAVE) bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir. Şartname ASTM ve AASHTO standartlarına göre hazırlanmıştır (Öztürk ve Çubuk, 2004).

Superpave sistemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada meydana gelen tekerlik izi, yorulma çatlağı ve termal çatlakları azaltarak bağlayıcının performansını en üst düzeye getirip aynı zamanda bağlayıcının performansını ölçmek için tasarlanmıştır (Cominsky et al., 1994). Superpave bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgede maruz kalacağı

sıcaklıklarda yapılarak bağlayıcının meydan performansı ile doğrudan ilgili reolojik ve fiziksel özelliklerinin analitik deneylerle değerlendirilmesidir. Çizelge 4.1’de Superpave sisteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları (Dinç, 1999; The Asphalt Institute, 1996; McGennis et al, 1994).

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı sırasında bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım sırasında yaşlanma direnci
Basıncılı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü sırasında bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü sırasında yaşlanma direnci
Dinamik Kayma (Kesme) 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
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük hizmet sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

Superpave bağlayıcı şartnamesinin ana teması, bağlayıcının ömrü boyunca maruz kalacağı üç kritik durumun deneylerle simüle edilmesidir. Orijinal bağlayıcılar ile yapılan deneyler; taşıma, depolama ve işlemeyi kapsayan ilk aşamayı ifade eder. İkinci aşama, sıcak karışım hazırlama ve serme esnasındaki bağlayıcıyı temsil etmektedir. Bağlayıcı, dönel ince film etüvünde sıcaklık ve havaya maruz bırakılarak oksidasyonu sağlanıp serme esnasındaki yaşlanması tahmin edilir. Üçüncü aşama ise, bağlayıcının servis ömrü boyunca uzun süreli yaşlanmasıdır. Bu durum da PAV deneyi ile temsil edilir.

Superpave sisteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında davrandıklarına göre sınıflandırılır ve bu tip bağlayıcılara “Performance Grade” performans dereceli veya performans sınıfı bağlayıcı adı verilir ve PG simgesiyle belirlenmektedir. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 70-16 gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilirler. Burada ilk sayı olan 70, “yüksek sıcaklık derecesi” olarak adlandırılır ve bu bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini hizmet etmesi beklenen iklim koşullarındaki en yüksek kaplama sıcaklığı olan 70 °C’lik yüksek sıcaklığa kadar getirdiği anlamına gelir. Aynı şekilde ikinci sayı (-16),

“düşük sıcaklık derecesi” olarak adlandırılır ve bağlayıcının gerekli fiziksel özellikleri -16°C’lik düşük sıcaklığa kadar koruduğu anlamına gelir (McGennis et al., 1995).

4.2.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)

Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), TS EN 12607-1 şartnamesine göre yapılmıştır. RTFOT deneyi, bitümün üretim ve uygulama esnasında kısa süreli yaşlanmasını simüle eden bir yöntemdir. Deneyde, ince bir film şeklinde dönen bitümlü bağlayıcıda, hava ve sıcaklığın etkisiyle buharlaşan madde kaybının belirlenmesi ve deney bittikten sonra elde edilen yaşlanmış bitümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Deneyde kullanılan 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılan $35 \pm 0,5$ gram bitümlü bağlayıcı numunesi doldurularak dönen tabla üzerine yerleştirilir ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülür. Test sıcaklığı 163°C’dir. Dönme esnasında etüvün en alt konumunda bulunan bir hava püskürtücü vasıtasıyla şişelerin içerisine 4000 ± 200 ml/dakika akış olarak hava üflenir. Bunun sonucunda, bitümün yaşlanmasını sağlayan ince bir film tabakası oluşmaktadır (TS EN 12607-1, 2015). RTFOT deney aleti Şekil 4.6’da gösterilmektedir.

Deney bittikten sonra, iki tanesi oda ortamında soğutularak, bağlayıcıda oluşan kütle kaybının tespit edilmesi amacıyla 0,001 gram hassasiyetle tartılır ve numuneler atılır. Geriye kalan altı adet şişe de bir kap içine dökülüp, PAV ve DSR deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Kütle kaybı, RTFOT deneyinden sonra iki numunenin kütlesinde yüzde olarak oluşan kayıp olarak açıklanır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = (\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}) / \text{İlk Kütle} \times 100 \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Dönel ince film etüvü (RTFOT) aleti.

4.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

Hizmet esnasında bitümlü bağlayıcıda meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuvara yansıtılabilmek amacıyla SHRP–A–002A araştırma ekibi tarafından basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi geliştirilmiştir (Christensen and Anderson, 1992). PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca asfalt bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir (Kennedy, 1994; Zaniewski and Pumphrey, 2004). Deneyde, uzun süreli yaşlanmayı karakterize etmek üzere, bağlayıcı numunesi bir basınçlı kaba konularak etüvde 20 saat süreyle standart basınç ve sıcaklık altında bırakılır. Deneyde kullanılacak bitümlü bağlayıcı, karıştırma ve yapım aşamasındaki yaşlanmayı temsil eden RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numunelerden alınmaktadır. Bu şekilde kaplamanın yapım, uygulama ve servis süresince karşılaşacağı çevresel koşullar laboratuvara yansıtılmış olmaktadır (Tunç, 2001). Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları, Çizelge 4.2’de verilmiştir. PAV deney aleti Şekil 4.7’de görülmektedir.



a)

b)

Şekil 4.7. Basınçlı yaşlandırma a) kabı (PAV) b) vakum aleti.

Çizelge 4.2. Bağlayıcı sınıfına göre uygulanacak PAV deney sıcaklıkları (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).

Bağlayıcı Sınıfları	PAV Deney 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

4.2.3 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deneyi

Geleneksel deney yöntemlerinde bağlayıcı özelliklerini belirlemek için farklı deney yöntemleri bulunmasına rağmen, bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik davranışının bir arada dikkate alındığı herhangi bir deney bulunmamaktadır. DSR aleti, bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla

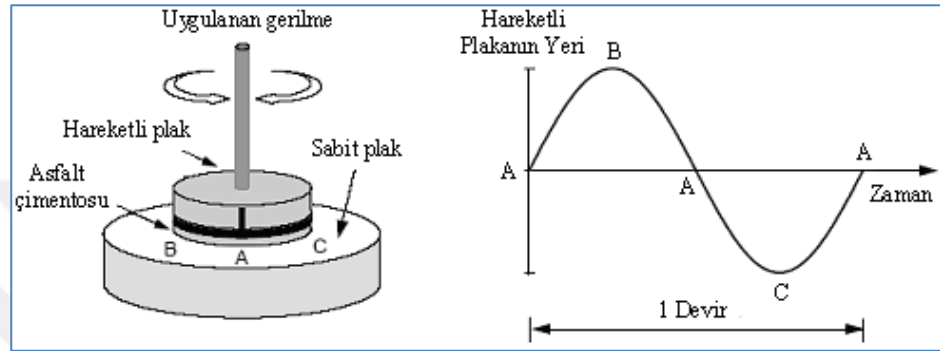
bu iki faktör göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bitümlü bağlayıcının davranışı sıcaklık ve yükleme süresine bağlı olduğundan, SHRP tarafından geliştirilen DSR deneyi sayesinde bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (G^* , δ vb.) nitelendirilmektedir (McGennis et al., 1994; Zaniewski and Pumphrey, 2004).

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının yapımdan hemen sonra tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesini sağlamakta ve servis ömrünün ilk dönemleri için yüksek hizmet sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izine karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, hizmet ömrü boyunca ve orta servis sıcaklıklarında kaplamada oluşabilen yorulma çatlaklarına karşı dayanımının belirlenmesini de ifade etmektedir (Zaniewski and Pumphrey, 2004). DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (sinüsoidal) yüklemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı test frekanslarında elde edilebilmektedir (Zaniewski and Pumphrey, 2004; Petersen et al., 1994). DSR deneyinde, bitüm numunesinin sinüsoidal deformasyonlara ve gerilmelere karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) ölçülmektedir. Viskoelastik kısımda bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergesi olan kompleks kayma modülü ve faz açısı, bitümlü kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma çatlağı olasılığını belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski and Pumphrey, 2004). Şekil 4.8’de DSR aleti görülmektedir.



Şekil 4.8. DSR aleti (Anton Paar Smart Pave Plus 301).

DSR deneyinde bitümlü bağlayıcı numunesi Şekil 4.9’da görüldüğü gibi belirli kalınlıkta ve belirli sıcaklık altında iki plaka arasına yerleştirilir. Bir plaka belirli bir hızda dönme kabiliyetine sahipken diğeri sabittir. Döner plakaya uygulanan gerilme ile plaka A noktasından B noktasına kadar döndürülür. Daha sonra plaka B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar hareket ettirilir. Ardından C noktasından yine A noktasına kadar salınır. Bu hareket ile, bir devir elde edilir ve test sırasında bu hareket aynı şekilde tekrar edilir (McGennis et al., 1994; Zaniewski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.9. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli (McGennis et al., 1994; Zaniewski and Pumphrey, 2004).

Bu deney, saniyede 10 radyanlık bir frekansta (ω) çalışır ve arka arkaya 10 devir uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Burada, 10 rad/sn frekans değerinin 100 km/sa trafik hızına eşit olduğu kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/sa trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır (Kennedy et al., 1994). (4.7) ve (4.8) bağıntıları kullanılarak 10 rad/sn’lik sabit frekans, yaklaşık 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekansa (f) ve 0,1 sn yükleme süresine (t) eşit olmaktadır. Yükleme süresi, kaplama üzerinden 50 mph hızla hareket eden bir kamyon tekerleğinin geçmesinden kaynaklanan yükleme zamanını ifade etmektedir (Zaniewski and Pumphrey, 2004).

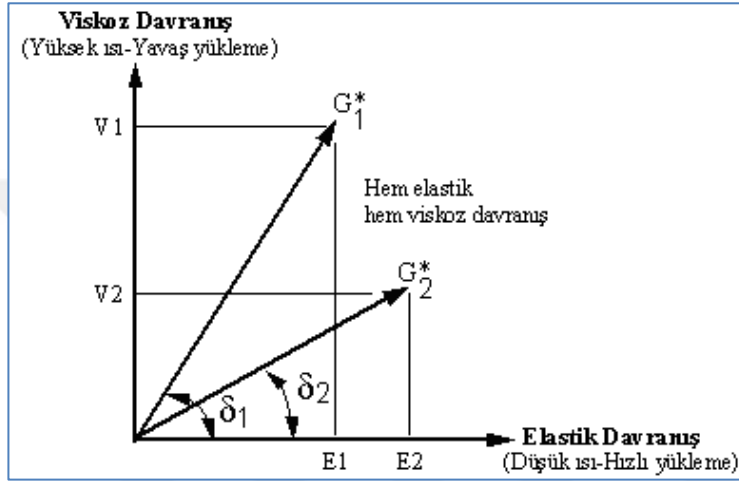
$$\omega = 2\pi f \quad (4.7)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (4.8)$$

Gerilme ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki tip dinamik kayma reometresi bulunmaktadır. Gerilme kontrollü reometreler, sinüsoidal gerilmeler uygulayarak oluşan deformasyonları belirlemektedir. Deformasyon kontrollü reometreler ise sinüsoidal deformasyonlar uygulayarak oluşan gerilmeleri

belirlemektedir. Superpave bağlayıcı deneyleri gerilme kontrolü ile teste tabi tutulur (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).

DSR, bitümlü bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçerek hem elastik hem de viskoz davranışını karakterize etmek için kullanılmaktadır. G^* , malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı ifade ettiği toplam direncin ölçüsüdür. Elastik ve viskoz olmak üzere Şekil 4.10'da görüldüğü gibi iki bileşeni bulunmaktadır.



Şekil 4.10. Viskoelastik davranış (Tunç, 2001).

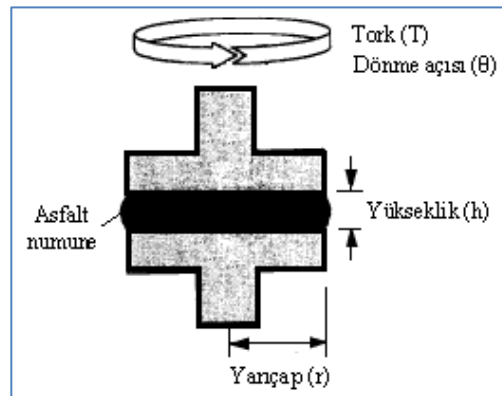
Faz açısı (δ) ise elastik ve viskoz deformasyonun bağıl miktarlarını ifade eden bir terimdir. G^* ve δ yükleme sıcaklığı ve frekansla doğrudan ilişkilidir. Bitümlü bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz sıvı davranışı gösterir ve bu durum Şekil 4.10'da dikey eksen üzerinde temsil edilmektedir. Yani faz açısı $\delta = 90^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülü (G^*) elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcı, oluşan deformasyonlar tamamen geri dönerse elastik katı olarak davranmaktadır. Bu durumu ise aynı grafikteki yatay eksen temsil eder ve bu da faz açısı $\delta = 0^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülünün (G^*) elastik bir özellik taşıdığı ve viskoz bir özelliğe sahip olmadığı anlamına gelir (Tunç, 2001; McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).

Normal kaplama sıcaklıkları ve trafik yükleri altında bitümlü bağlayıcı aynı zamanda elastik katı ve viskoz sıvı özelliklerine sahip olur. DSR deneyi ile G^* ve δ değerleri ölçülerek kaplamanın servis sıcaklığındaki karakteristiklerinin değerlendirilmesi kolay olmaktadır. Grafikte belirtilen G_1^* ve G_2^* vektörleri iki

farklı asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülünü temsil etmektedir. Bu bağlayıcıların yük altındaki deformasyonları hem elastik (E) hem de viskoz (V) davranış gösterdiğinden viskoelastik malzeme olarak değerlendirilir. Ancak her iki asfalt da viskoelastik olmasına rağmen, asfalt 2 daha küçük faz açısına sahip olmasından dolayı asfalt 1'e göre daha elastik bir malzemedir. Elastik davranış bileşeninin daha büyük olması nedeniyle asfalt 2'nin yük altındaki deformasyonları yük kaldırıldıktan sonra daha fazla miktarda geri dönecektir. Bu örnek, kayma modülü (G^*) değerinin tek başına asfaltın davranışını açıklayamayacağını, faz açısı (δ) değerinin de gerekli olduğunu açıkça göstermektedir (Tunç, 2001; McGennis et al., 1994). G^* , toplam kayma gerilmesinin ($\tau_{maks}-\tau_{min}$), toplam deformasyona ($\gamma_{maks}-\gamma_{min}$) oranı olarak (4.9) bağıntısıyla elde edilmektedir.

$$G^* = \frac{|\tau_{maks} - \tau_{min}|}{|\gamma_{maks} - \gamma_{min}|} \quad (4.9)$$

DSR yazılımı tarafından kayma deformasyonu (γ) ve kayma gerilmesi (τ) değerlerinin hesaplanması, bitüm numunesinin DSR aletinde yerleşimini temsil eden Şekil 4.11'de belirtilen parametreler kullanılarak (4.9) ve (4.10) bağıntıları ile yapılmaktadır.



Şekil 4.11. DSR asfalt numunesi (Altaş, 2004; Kennedy et al., 1994; Petersen et al., 1994).

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (4.11)$$

Burada;

τ : Kayma gerilmesi (Pa),

γ : Kayma deformasyonu (%),

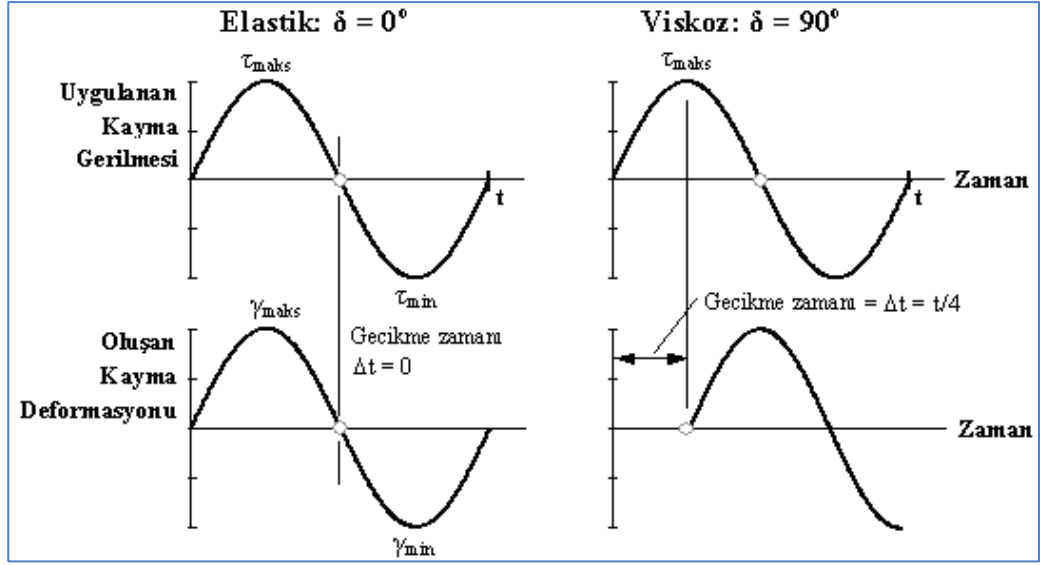
T: Uygulanan tork (N.m),

r: Numunenin yarıçapı (12,5 mm veya 4 mm),

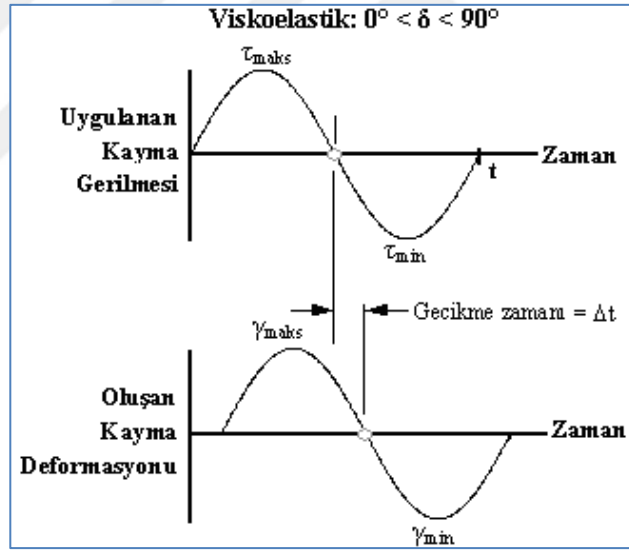
θ : Dönme açısı (rad),

h: Numunenin yüksekliği (1mm veya 2 mm)'dir.

Faz açısı (δ) uygulanan gerilme ve meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşittir. Bitümlü bağlayıcının viskoelastik davranışı nedeniyle gerilme uygulandığında numune direnç gösterir ama belirli bir süre sonra kayma deformasyonları oluşmaya başlamaktadır. Bu şekilde, faz açısı ile oluşan kayma deformasyonu kullanılarak bitümlü bağlayıcının viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının 90° olması numunenin tam viskoz davranış, 0° olması ise tam elastik davranış göstermektedir (Şekil 4.12). Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişecektir (Şekil 4.13). δ 'nın düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik göstermektedir (Tunç, 2001; Kennedy et al., 1994).



Şekil 4.12. Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (Tunç, 2001; Kennedy et al., 1994).



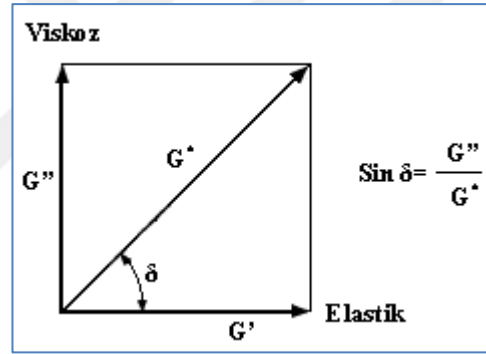
Şekil 4.13. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (McGennis et al., 1994; Kennedy et al., 1994).

Gerilme kontrollü testlerde faz açısı (δ), uygulanan kayma gerilmesi ve oluşan kayma deformasyonu arasındaki gecikme zamanından tespit edilmektedir. Faz açısı (δ), gecikme zamanı (Δt) ve devir süresine (t) bağlı olarak aşağıda belirtilen (4.12) veya (4.13) bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır (Kennedy et al., 1994).

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 360^\circ, (\text{derece}) \quad (4.12)$$

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 2\pi, (\text{radyan}) \quad (4.13)$$

Kompleks kayma modülü (G^*); depolama modülü (G') ve kayıp modül (G'') bileşenlerinden ibarettir. Elastik bileşeni temsil eden (G') her yük devri sırasında numunede depolanan enerji miktarını göstermektedir. Diğer taraftan, Viskoz bileşeni temsil eden (G'') ise her yük devri sırasında numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir. Faz açısı 0° olduğunda numune tamamen elastik davranış göstereceğinden kompleks kayma modülü depolanan modüle, faz açısı 90° olduğunda ise viskoz davranıştan dolayı kompleks kayma modülü kayıp modüle eşit olacaktır. Bu sebeple, şekilde görüldüğü gibi viskoelastik özellik G^* ve δ 'ya bağlı olduğundan, bitümün viskoelastik özelliği, G^* ve δ beraber göz önüne alınarak belirlenmelidir (Kennedy et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004).



Şekil 4.14. Kayma modülünün bileşenleri (Kennedy et al., 1994, Zaniwski and Pumphrey, 2004).

DSR aleti biri sabit diğeri hareketli olmak üzere başlıca iki plakadan oluşmaktadır. Deneye tabi tutulacak numunenin kalınlığı iki plaka arasındaki aralığın ayarlanmasıyla elde edilir. Bu aralık, plakalar reometre üzerinde iken deney sıcaklığında ve asfalt numunesi yerleştirilmeden önce, reometre üzerindeki mikrometre tekerleği kullanılarak ayarlanmalıdır. Deneylerde, plakalar arasındaki aralık yüksekliğine göre iki farklı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve aralık yükseklikleri deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilir. Buna göre işlem görmemiş (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılarda 1 mm'lik aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2 mm'lik aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Bitüm numunesi yerleştirilmeden önce plakalar arasındaki aralık

gerekli değerden 50 mikron (0,05 mm) büyük olacak şekilde ayarlanır. (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004; Petersen et al. 1994).

DSR deneyinde sıcaklık aralığı, bitümlü bağlayıcının performansına bağlı olarak 46 ile 82°C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV’da yaşılandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4 ile 40°C arasında değişmektedir.

4.2.3.1 Kalıcı deformasyon (tekerlek izi)

Yüksek sıcaklıklarda ve tekrarlı yükler altında kaplamada oluşan kalıcı deformasyonlar bitümün viskoz davranışının bir sonucudur. Superpave şartnamesi, kalıcı deformasyona karşı direnç ve yüksek sıcaklıklardaki bağlayıcı kıvamının ölçüsünü temsil eden “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi faktörünü gerekli bir değer olarak kabul etmiştir. Burada kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) olarak tanımlanan ifadeler DSR deneyi ile belirlenmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin \delta$ değeri orijinal asfaltlar için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşılandırılmış asfaltlar için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Yüksek kayma modülü ve düşük faz açısı değerleri tekerlek izi direncine karşı artışı ifade etmektedir (McGennis et al., 1994).

4.2.3.2 Yorulma çatlakları

Bağlayıcı şartnamesinde, asfalt kaplamalarda oluşan yorulma çatlaklarının değerlendirilmesinde kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) kullanılmaktadır. Yolun hizmete açılmasından sonra normal ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşması sebebiyle şartname, deneylerde RTFOT ve PAV ile yaşılandırılmış asfalt numunelerin kullanılmasını gerekli görür. Yorulma çatlaklarını temsil eden “ $G^*\sin \delta$ ” faktörü, gerekli bir değer olarak kabul edilmiştir. Bu değer en fazla 5000 kPa olmalıdır. Bu değer PAV bakiyesi asfalt bağlayıcının elastik olmasını yani yorulma direncinin yüksek olacağını ifade etmektedir. Yorulma çatlaklarına karşı büyük direnç bakımından düşük G^* ve δ değerleri tercih edilmektedir (McGennis et al., 1994).

4.2.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

İklimi soğuk bölgelerde yapılan esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmaksızın iklim ve çevre şartlarından etkilenen termal çatlak olarakta adlandırılan düşük

sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Bilindiği gibi, bitümlü bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda rijit davranış gösterdiğinden kaplamanın da rijit davranmasına neden olurlar ve bu davranış, kaplamanın termal çatlak riskini arttırmaktadır. Bu sebeple SHRP tarafından, bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışının gözlenmesi amacıyla kiriş eğme reometresi (BBR) (Şekil 4.15) deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yükleme altında bitümlü bağlayıcının ne kadar sünme ve deplasman göstereceğini ölçmektedir. Bu nedenle bitümlü kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklarda elastik davranışını ifade eder (McGennis et al., 1994; Tunç, 2004). Ayrıca RTFOT ve PAV testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de deney yapılabildiğinden, bitümlü bağlayıcının zamanla değişimi de saptanabilmektedir. Buna ek olarak, bitümün düşük ve yüksek sıcaklıklarda nasıl bir sertlik davranışı gösterdiği, DSR ve BBR deney sonuçları beraber ele alınarak geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilmiştir (Tunç, 2004). Bağlayıcının düşük sıcaklıktaki PG sınıfını belirlemek için BBR kullanılmaktadır. BBR deneyi sonucunda asfalt bağlayıcının sünme sertliği (S) ve sünme oranı (*m-değer*) değerleri elde edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmektedir (Tunç, 2004; McGennis et al., 1994; Zaniewski and Pumphrey, 2004)

Şartnamede, bu çatlakların oluşmaması için sünme sertliğinin (S) en fazla 300 MPa olası istenmektedir. Bu değer yüksek ise bağlayıcı gevrek davranış göstereceğinden daha çok çatlama oluşacaktır. Düşük sıcaklıklarda bitüm sertliğinin zamanla değişme oranı, *m-değer* yardımı ile kontrol edilir. Sıcaklık düşerken, kaplamada termal gerilmeler devam eder ve bağlayıcıdaki sertlik zamanla değişir, bu durumda yüksek *m-değer*leri tercih edilmektedir. Diğer değişle, Yüksek *m-değeri*, bağlayıcının daha az sert olduğunu ifade ettiğinden kaplamada oluşabilecek çekme gerilmeleri azalır ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu sebeple, bağlayıcı şartnamesi 60 sn yükleme sonunda *m-değerinin* minimum 0,300 olması şartını seçmiştir (Tunç, 2004; McGennis et al., 1994).



(a)



(b)

Şekil 4.15. BBR a) aleti ve b) deneyde kullanılan kalıp.

4.2.5 Dönel viskozite (RV) deneyi

Dönel viskozite deneyi, bitümlü bağlayıcının sıcak karışım yapımında ve uygulamasında ne derece pompalanma kabiliyeti ve işlenebilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Dönel viskozimetre, Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere başlıca iki ana üniteden oluşur. Viskozimetre; motor, mil, kontrol paneli ve dijital göstergeden oluşmaktadır. motor, milini döndüren burulma kuvvetini sağlamaktadır. Silindir şeklindeki mil 20 devir/dakika (20 rpm) hızla döndürülürken, viskozite değeri cihazdan otomatik olarak verilmektedir. Şakule topuzuna benzeyen mil, viskoz durumdaki bağlayıcı içerisinde dönerken dirençle karşılaşmaktadır. Bağlayıcıların viskozitesi tespitinde No. 21 ve No. 27 olarak isimlendirilen iki çeşit mil kullanılmaktadır. Yaygın olarak No. 27 mm'lik mil tercih edilmektedir (McGennis et al., 1994; Zaniwski and Pumphrey, 2004; Petersen, 1994). Şekil 4.16'da dönel viskozimetre (RV) aleti ve kapları görülmektedir.

RV deneyinde sistem tarafından hesaplanan viskozite değeri santipois (cP) biriminde iken, performans esaslı bağlayıcı sınıflamasında paskal.saniye (Pa.s) birimi kullanılmaktadır. Bu amaçla, dönüştürme için “1000 cP = 1 Pa.s” eşitliği esas alınmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre 135°C sıcaklıkta elde edilen viskozite değeri 3 Pa.s'yi aşmamalıdır (McGennis et al., 1994). Superpave sistemini oluşturan SHRP çalışmaları sırasında karıştırma ve sıkıştırma için yeni bir viskozite şartnamesi oluşturulmamıştır. Yirmi seneyi aşkın bir süredir kullanılan karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması şartnamede aynen yer almıştır. Sadece kullanılan birim sistemi değiştirilmiş, paskal.saniye birimine göre karıştırma için $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, sıkıştırma için ise $0,28 \pm 0,03$ Pa.s viskozite aralıkları tavsiye edilmiştir (Zaniwski and Pumphrey, 2004; ASTM D 4402, 2013).

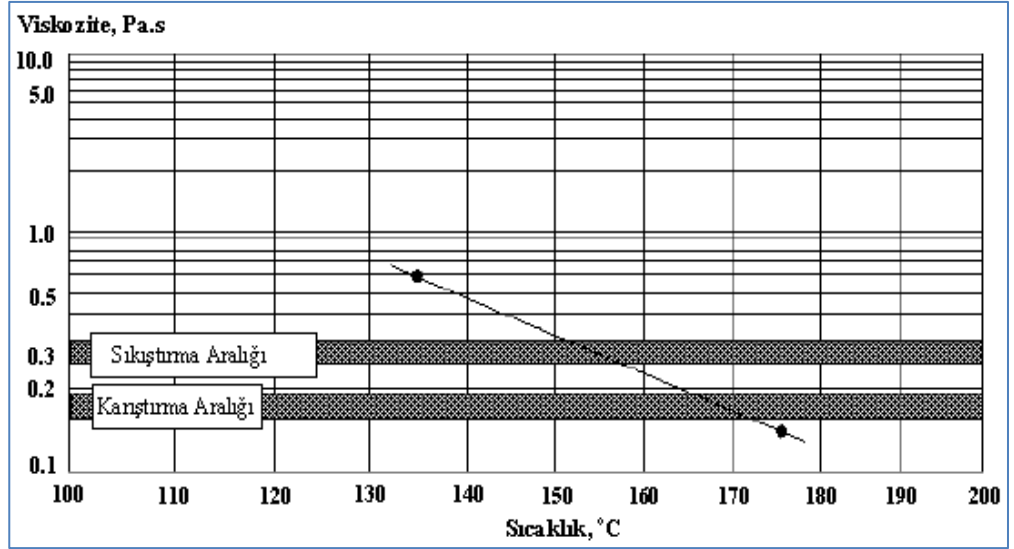
Viskozimetre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tayin edilmesinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin oluşturulmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları Şekil 4.17'de verilen grafik yardımıyla tespit edilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 4.16. Dönel viskozimetre (RV) a) aleti ve b) kapları.



Şekil 4.17. Bitümlü bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi (Zaniewski and Pumphrey, 2004).

4.3 İleri Test Yöntemleri

4.3.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deneyi (Ana Eğri)

Farklı zaman (frekans) ve sıcaklıklarda çakışan eğrilerden elde edilen yöntem, zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibi (TTPS) olarak bilinmekte ve elde edilen eğriler (ana eğri) deneysel olarak reometre tarafından ölçülen frekans aralığının dışındaki geniş frekans bölgesini kapsamaktadır (Polacco et al., 2003; Wu et al., 2012).

Ana eğri, DSR farklı frekans ve sıcaklık deneyi verilerinden geliştirilebilmektedir. Bu eğri, bitümün doğrusal visko-elastik dinamik reolojik özelliklerini tanımlayarak reolojik karakterini değerlendirmek için yapılmaktadır (Wu et al., 2012; Mills-Beale et al., 2014).

Bununla birlikte, ana eğri, bir grafikte geniş bir aralık içinde frekans ve sıcaklıkların sunulması üzerine reolojik verilere imkân vermektedir. Bu nedenle, çok sayıda grafiğin sunulmasını önlemek için, sonuçlar esas olarak ana eğri olarak sunulup analiz edilmektedir.

Ayrıca, ana eğri, yükleme zamanının geniş bir aralığı üzerindeki verileri genişletmek için kullanılmaktadır. Ana eğri, deney cihazı ile elde edilemeyen frekans veya sıcaklıklarda kompleks modül veya faz açısı gibi reolojik ölçümlerin ifade edilmesine imkan vermektedir. Bu nedenle ana eğri, belirli bir yükleme zamanı aralığının üzerinde olan bitümün zamana bağımlılığını yansıtmaktadır. Örneğin, kompleks modül değerleri veya saniyenin binde birindeki ya da birkaç yıldaki yükleme süresinin faz açısı gibidir.

Bir referans sıcaklığı seçilmekte ve sonra diğer tüm sıcaklıklardaki veriler tek bir düz eğri oluşturmak için zamana göre yatay olarak kaydırılmaktadır. Kaydırma, her bir deney sıcaklığı için değişen kaydırma faktörü (T) kullanılarak yapılmaktadır.

Farklı thiourea modifiyeli bağlayıcıların LVE davranışlarını karakterize etmek için Cuadri et al. (2012) orta/yüksek sıcaklıkta reolojik kayma sıcaklığı farklı frekans ve sıcaklık deneyleri gerçekleştirmiştir. Ana eğri prensibi yoluyla katkı maddesinin etkisini değerlendirmek için hem saf bitümün hem de %9 thiourea modifiye bağlayıcının ana eğri çizilmiştir.

Bulatovic et al. (2013) bitüme polimer eklenmesinin modifiye edici etkisini değerlendirmiştir. PMB'nin reolojik karakterizasyonu, doğrusal visko-elastik bölge içerisinde gerçekleştirilmiş ve reolojik parametrelerin frekansa bağımlılığı, zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibini kullanarak 30°C gibi referans bir sıcaklıkta reolojik ana eğri oluşturularak gösterilmiştir. Faz açısı ana eğrilerinde, modifikasyonla ve daha iyi esneklik anlamına gelen orta seviye yükleme frekansında elastik bir düzlüğün (plateau) varlığında faz açısında bir azalma göstermiştir. Elastik düzlük (plateau), reaktif olmayan polimerlerle modifiye edilen bağlayıcılarda fiziksel bir ağırlaşım oluşumunu, reaktif polimerlerle modifiye edilen bağlayıcılarda ise kimyasal bir ağırlaşım oluşumunu göstermektedir (Bulatovic et al., 2013).

Simone et al. (2012) kompleks kayma modülünün ana eğrisi, deformasyon kontrollü “farklı frekans ve sıcaklık” deneyindeki DSR ile elde etmiştir. DSR deneyi, yaşlandırılmamış (saf bağlayıcı, wax (a) ve wax (b) bağlayıcısı) ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir bağlayıcı için, her sıcaklıkta (10°C, 25°C, 40°C ve 50°C) ve yükleme frekansında (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.45, 0.70, 1.00, 1.50, 2.10, 3.10, 4.50, 6.50, 10.00 ve 15.00 Hz) sekiz deney gerçekleştirilmiştir. Bu deney için gerçekleştirilen genel prensip, numuneye frekansı düşükten yükseğe doğru uygulamaktır. Bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) ölçülmüştür (Simone et al., 2012)

Ahmedzade vd. (2014) tarafından elektron ışınlanmış geri dönüştürülmüş düşük yoğunluklu polietilenin (e-LDPER) bitümlü bağlayıcı katkısı olarak kullanımı üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Saf ve e-LDPER modifiyeli bitümler için kompleks kayma modülünün (G^*) frekans bağlantısı ana eğriler ile incelenmiştir. Ana eğriler, 50°C gibi referans bir sıcaklıkta zaman-sıcaklık süperpozisyon prensibini (TTSP) kullanarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, G^* ve (δ) gibi temel visko-elastik parametreleri hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılar için tespit edilmiştir. Deneyler, 0.01 Hz ile 100 Hz aralığındaki 16 frekans noktası ve 25°C ile 75 °C arasındaki 11 farklı sıcaklık için logaritmik farklı frekans ve sıcaklık deneyi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmaya göre, TTSP vasıtasıyla hazırlanan ana eğriler, polimer modifikasyon seviyesinin düşük frekanslarında e-LDPER'in olumlu etkilerini ifade etmiştir.

4.3.2 Çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (MSCR) testi

Çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)) testi Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolları İdaresi tarafından AASHTO M 320-05 yüksek sıcaklık şartname parametreleri ve çeşitli SHRP deney yöntemleri yerine önerilmiştir (D'Angelo, 2010; Wasage et al., 2011).

Bu deney yöntemi Çoklu Gerilme Sünmesi ve Geri Kazanımı (MSCR) deneyi vasıtasıyla bitümlü bağlayıcının yüzde geri kazanım (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. Bu deney yöntemi ayrıca bitümlü bağlayıcının elastisitesini ölçmek için kullanılan ASTM D5801 (Tokluk ve Çekme Mukavemeti) deney yöntemi, ASTM D6084 (Elastik Geri Kazanım) deney yöntemi ve ASTM D7175 (DSR faz açısı) deney yöntemi gibi diğer deney yöntemlerinin yerine kullanılmaktadır (ASTM D7405, 2010).

Federal Karayolları İdaresi tarafından yürütülen bu çalışmanın amacı, hem performansa dayalı hem de modifikasyon türlerini kapsayan bir PG bağlayıcı deneyinin geliştirilmesidir. Hem saf hem de polimer modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi özelliklerinin belirlenmesi için yeni bir bağlayıcı deneyi geliştirilmiştir. 10 sünme/geri kazanım deviri 9 saniyelik bir dinlenme süresi ile 1 saniye boyunca uygulanan 0,1 kPa'lık bir gerilme ile gerçekleştirilmektedir. Gerilme seviyesi daha sonra ilave bir 10 devir için 3,2 kPa'la arttırılmaktadır. 10 sünme ve geri kazanım deviri için ortalama geri dönmeyen deformasyon, geri dönmeyen sünme uyumluluğunun akmasıyla uygulanan gerilme tarafından bölünmektedir. J_{nr} , tekrarlı yükler altında bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır (AASHTO MP 19, 2010; ASTM D7405; 2010; D'Angelo, 2010).

MSCR'nin özellikleri geri dönmeyen sünme uyumluluğuna dayalı olarak geliştirilmiş ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir (AASHTO MP 19, 2010).

Çizelge 4.3. AASHTO MSCR standartları (AASHTO MP 19, 2010).

Sınıf	Standart (S)	Ağır(H)	Çok Ağır(V)	Aşırı (E)
Trafik seviyesi/hız	<10 milyon ESAL veya >72km/s	10-30 milyon ESAL veya 24-72 km/s	>30 milyon ESAL veya <24 km/s	>30 milyon ESAL ve <24 km/s
J_{nr} maks., kPa^{-1}	4,0	2,0	1,0	0,5
J_{nr} maks. fark, %	75	75	75	75

Wasage et al. 'e (2011) göre, bu yeni parametreleri değerlendirebilmek için J_{nr} ile bitümlü kaplamanın tekerlek izi potansiyeli arasındaki ilişkiyi kestirmek ve bitümlü kaplamalarda yüksek sıcaklıktaki bağlayıcının performansını tahmin etmek için bağlayıcının performansını kavramak önemlidir. MSCR deneyi, gerilme seviyesinin üst sınırını tanımlamak için kullanılabilir ve muhtemel doğrusal visko-elastik davranış şu şekildedir; doğrusal visko-elastisite, deneyin gerçekleştiği sıcaklığa bağlı olarak deneyin açıklaması için kullanılabilir. Böylece, farklı bitümlü bağlayıcıların performansını tahmin etmek için J_{nr} 'nin performansı büyük ölçüde deneyin sıcaklığına bağlı olmaktadır (Wasage et al., 2011).

John D'angelo (2010), hem saf hem de polimer modifiye bağlayıcıların özelliklerini yeni bir MSCR deneyinde değerlendirmek için çalışma yapmış ve MSCR J_{nr} değerinin hem saf hem de polimer modifiye bağlayıcıların tekerlek izi direncinin mevcut SHRP kriterinden ($G^*/\sin\delta$) daha iyi bir gösterge olduğu belirtilmiştir. Ancak birçok karayolu kuruluşu, tekerlek izi dışındaki diğer nedenlerle bağlayıcılarda polimerlere ihtiyaç duymaktadır. Birçok durumda, polimerlerin çatlakları azaltması veya sökülmeyle azaltarak dayanıklılığı geliştirmesi gerekmektedir. J_{nr} , tekerlek izi direncinin en iyi göstergesi olmasına rağmen, bağlayıcıda tek başına elastomerik bir polimerin varlığını belirleyememektedir ve en yaygın kullanılan Elastik Geri Kazanım (ER) deneyinin yerine bir SHRP olarak doğrudan kullanılamaz. MSCR deneyinde ölçülen yüzde geri kazanım, doğrudan bağlayıcının elastik davranışını ölçmektedir (D'Angelo, 2010).

Zoorob et al. (2012) farklı bitümler üzerinde daha mantıklı karşılaştırmalar sağlamak için önceden belirlenmiş bir sıcaklıkta MSCR deneyi uygulamıştır. Bu çalışmanın sonuçları, tüm deneyler $70^{\circ}C$ gibi bir yüksek sıcaklıkta

gerçekleştirildiği zaman, modifiye edilmemiş bitümün sınıf farklılığının, kırılma esnasında MSCR kayma gerilmesi seviyesi üzerinde belirgin bir etkiye neden olmadığını gösterirken, modifiye edilmiş bitümlerin daha mantıklı bir karşılaştırma ve performans aracı olduğu belirlenmiştir.

Hafeez et al. (2013) modifiye edilmiş ve saf bağlayıcının doğrusal visko-elastik aralığındaki performansını (yük ve sıcaklık) değerlendirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. 20°C ile 70°C arasındaki sıcaklıklar ve 0.025 kPa ile 25.6 kPa gerilme seviyesi için yedi farklı asfalt bağlayıcı test edilmiştir. Bu çalışma, asfalt bağlayıcının 3.2 kPa'a kadar doğrusal visko-elastik aralıkta davrandığını ortaya koymuştur. Buna göre, geri dönmeyen sünme uyumluluğu özel bir gerilme seviyesi ve sıcakta, uygun bir elastik davranışa sahip bağlayıcının seçiminde yol gösterici bir faktördür.

Adorjanyi ve Fuleki (2011) DSR'yi kullanarak 60°C sıcaklıkta sert ve modifiye edilmiş bağlayıcıyı değerlendirmek için MSCR deneyi gerçekleştirmiştir. Ölçümler 25 mm'lik numuneler için üç farklı gerilme seviyesinde (0.1 kPa, 3.2 kPa ve 6.4 kPa) RTFOT numuneleri üzerinde yapılmıştır. Gecikmiş visko-elastik davranış, geri kazanılabilir deformasyonla ve geri dönmeyen esnekliğe bağlı kalıcı deformasyona karşı direnç vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya göre, MSCR deneyinin, kaplama sınıfı ve polimer modifiyeli bağlayıcıların elastik ve geri dönmeyen davranışını değerlendirmek için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sert bitüm, test edilen bağlayıcılar arasında en iyi MSCR performansına sahiptir. Buna ek olarak, MSCR deneyi, diğer üreticilerden gelen aynı penetrasyon sınıfına sahip bağlayıcılar arasındaki ayrımın ortaya çıkabileceğini kanıtlamıştır.

5. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA UYGULANAN TEST YÖNTEMLERİ

5.1 Marshall Karışım Dizayn Metodu

Marshall karışım dizayn metodunda aşınma ve binder tabakaları için farklı gradasyon limitleri bulunmaktadır. Optimum bitüm muhtevasını tespit etmek için belirli bir yüzdeden başlayarak ardışık olarak agreganın % 0,5'i oranında artan en az 5 bitüm içeriğinde üçer numune hazırlanır. Bu yöntemde her bir numune için belirlenen gradasyona uygun olarak yaklaşık 1200 gr. agregası alınır. Hazırlanan agregası ve bitüm, 150–160°C sıcaklıkta bekletilir. Belirli bir süre bu sıcaklıkta bekletilen agregası ve bitüm, karıştırıcıya alınarak agregası taneleri tamamen bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır (Şekil 5.1). Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım kalıba doldurulur ve Marshall tokmağı yardımıyla sıkıştırılır (Şekil 5.2). Marshall tokmağında karışıma trafik seviyelerine bağlı olarak 50 veya 75 darbe uygulanır. Her iki tarafına darbe uygulanan numune soğumaya bırakılır.



Şekil 5.1. Karıştırıcı.



Şekil 5.2. Marshall tokmağı.

Kalıptan çıkarılan numuneler tartılır (A) ve oda sıcaklığında suyun içerisine bırakılarak 24 saat beklenir. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeyde su kalmayacak şekilde kurulanır ve tartılarak doymun kuru yüzey ağırlığı alınır (B). Daha sonra numunelerin sudaki ağırlıkları alınır (C). Bu ağırlıklar, numunelerin özgül ağırlığının, boşluk oranının ve bitümle dolu boşluk oranının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan formüller aşağıda verilmiştir:

$$V = B - C \quad (5.1)$$

$$D_p = A / V \quad (5.2)$$

$$D_{\text{Port}} = (D_{P1} + D_{P2} + D_{P3})/3 \quad (5.3)$$

$$W_a = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (5.4)$$

$$W_b = \frac{M_b}{M_a + M_b} \times 100 \quad (5.5)$$

$$G_{\text{ag}} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}} \quad (5.6)$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{\text{ag}}} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (5.7)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{Port}}{D_T} \times 100 \quad (5.8)$$

$$V_b = \frac{D_{Port} \times W_b}{G_b} \quad (5.9)$$

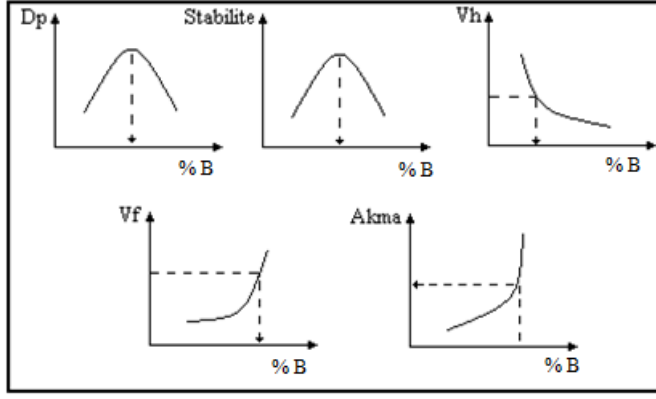
$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (5.10)$$

$$V.M.A = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (5.11)$$

$$V_f = \frac{V_b}{V.M.A} \times 100 \quad (5.12)$$

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune $60 \pm 1^\circ\text{C}$ suda 30–40 dakika bekletilir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilir, akma çubuğu sabitlenir ve yükleme yapılır. Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir. Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63,5 mm'dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin düzeltilmiş stabilite değerleri arasındaki farkın 120 kgf'den az olması durumunda üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarında 60 kgf'den daha az fark olan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak kabul alınır. Bu da sağlanmadığı takdirde deney yenilenir.

En az beş ayrı bitüm içeriğinde ve üçer tane hazırlanan numunelerin; pratik özgül ağırlık (D_p) - % B, stabilite - % B, boşluk oranı (V_h) - % B, asfaltla dolu boşluk oranı (V_f) - % B grafikleri çizilir (Şekil 5.3). D_p - % B ve stabilite - % B grafiklerinin maksimum olduğu bitüm içerikleri, V_h - % B grafiğinden boşluk oranının % 4'e tekabül ettiği bitüm içeriği ve V_f - % B grafiğinden asfaltla dolu boşluk oranının % 80'e tekabül ettiği bitüm içeriği toplanarak aritmetik ortalaması alınır. Bu değer optimum bitüm içeriğini vermektedir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan üç numune denenerek bütün grafiklere uygun olup olmadığı kontrol edilir. Ayrıca kontrol numunelerinin akma değerlerinin standarda uygun olup olmadığı akma - % B grafiğinde kontrol edilir (ASTM D1559-89).



Şekil 5.3. Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri.

5.2 DSR Sünme (Creep) Deneyi

5.2.1 Kiriş numunesinin hazırlanması

DSR sünme deneyinde 50 mm uzunluğa, 12 mm genişliğe ve 10 mm kalınlığa sahip kiriş numune kullanılmaktadır. Bu boyuta sahip kiriş numuneler, Marshall numunesinin kesilmesiyle elde edilmektedir. Kesme aleti ve numuneler Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Kesme aleti ve elde edilen kiriş numuneleri.

5.2.2 Kiriş numunenin DSR cihazıyla test edilmesi

DSR sünme deneyi, 300 mili-Nm uygulama kapasitesine sahip bir gerilme kontrollü reometre kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

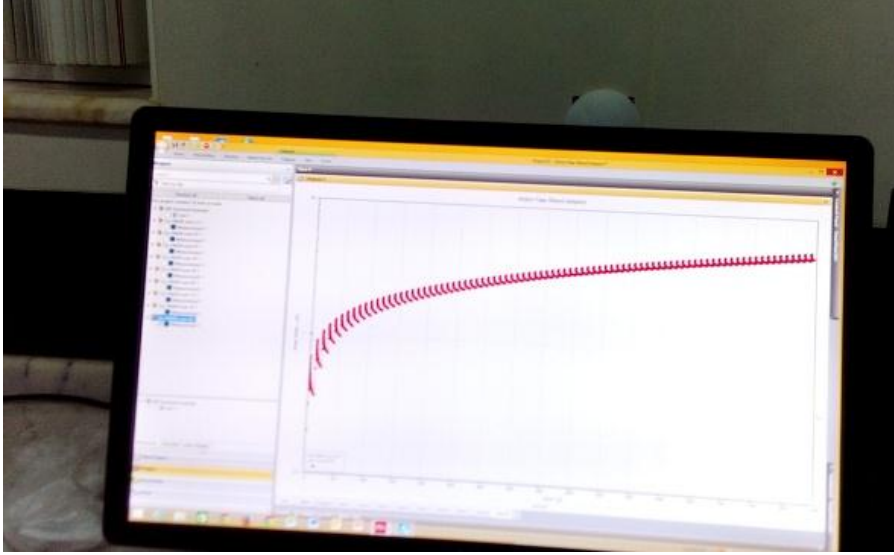
Deneyin gerçekleştirilmesinde DSR deney aletine monte edilen, sıcaklık kontrollü fırın ve kiriş burulma aparatı kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Fırın -20°C ile 180°C arasında çalışma kapasitesine sahiptir. Fırının soğutma hızı 10 K/dakika, ısıtma hızı ise 18 K/dakikadır.



Şekil 5.5. DSR cihazına monte edilen, sıcaklık kontrollü fırın ve kiriş burulma aparatı.

Kiriş numune dikey olarak burulma aparatının iki çenesi arasına yerleştirilerek sabitlendirildikten sonra, sıcaklık kontrollü fırın kapatılmakta ve numune 20 dak. süreyle ön koşullandırma sıcaklıkta tutulmaktadır. Deney sıcaklığı, yaz aylarında uygulamanın yapılacağı bölgede beklenen en yüksek kaplama sıcaklığına göre ayarlanmaktadır. Numuneye 1 saniye gerilme uygulandıktan sonra, numunenin bazı deformasyonlarının 1 saniyelik gerilme periyodunda geri dönen zamana denk gelen 9 saniyelik bir dinlenme periyodu uygulanmaktadır.

Tekrarlanan gerilme ve geri kazanım deviri, 2000 devire kadar veya oluşan deformasyon oranı %18'e kadar veya numune kırılıncaya kadar deney numunesi üzerine uygulanmaktadır. Her karışım türü için deneyler üç defa tekrar edilmektedir. Şekil 5.6'da, DSR sünme deneyinden elde edilen tipik bir sünme grafiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Tipik bir sünme deneyi grafiği.

5.2.3 DSR sünme (creep) deneyi ile ilgili yapılan çalışmalar

Reinke ve Glidden (2004) tarafından yapılan çalışmada, elmas uçlu bir testere ile yoldan alınan karot numunesi yada yoğurmalı pres ile sıkıştırılmış BSK numunesinin kesilmesiyle kiriş şekline getirilen numuneler kullanılmıştır. Kiriş 50 mm uzunluğa, 12 mm genişliğe ve 10 mm kalınlığa sahipti. Numuneler reometre üreticisi tarafından sağlanan deney aparatlarını kullanarak test edilmektedir. Örnek test sıcaklıkları numuneyi çevreleyen sıcaklık kontrollü bir fırın ile hava sirkülasyonu yapılarak kontrol altında tutulmuştur.

Statik sünme deneyi ve tekrarlı sünme geri kazanım deneyi olarak iki tip sünme deneyi geliştirilmiştir. Statik sünme deneyinde numunenin bir ucu rijit bir şekilde sabitlenirken, numunenin diğer ucuna dönel bir gerilme uygulaması yapılmaktadır. Gerilme sabit bir değerde muhafaza edildikçe, kiriş numunesi kırılmaya neden olan bir deformasyona maruz kalmaktadır. Tekrarlı sünme ve geri kazanım deneyinde de aynı ekipman ve numune boyutları kullanılmaktadır. Gerilme 1 saniye uygulandıktan sonra 1 saniye gerilme periyodu esnasında meydana gelen deformasyonun geri dönmesi sürecinde gerilme olmayan 9 saniyelik bir dinlenme periyodu uygulanır. Tekrarlı gerilme ve geri kazanım devri 2000 devire kadar veya numune kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Bu deney sonuçlarından, %5 deformasyona karşılık gelen zaman, kırılma zamanı, kırılma deformasyonu, 100 devirde deformasyon ve 100 devirde karışımın viskozitesi elde edilmiştir. Yoldan alınan karot numuneler üzerinde oluşturulan deney

verileri, deneme yol karışımlarının sahadaki tekerlek izi davranışı ile uygun bir ilişki ($R^2 > 0.9$) olduğunu gösterilmiştir (Reinke ve Glidden, 2004).

Başka bir çalışmada, (Reinke et al., 2005) BSK karışımlarının performans potansiyelini değerlendirmek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı ESAL seviyelerinde kırma granit, kırma silisli çakıl ve kırma kireçtaşı olmak üzere üç tip agrega kullanılmıştır. Ayrıca, 5 farklı PG sınıfına sahip olan bağlayıcı incelenmiştir. Bu bağlayıcılar PG 58-28, PG 64-28C (kimyasal olarak modifiye edilmiş), PG 64-28P, PG 64-34, ve PG 70-28'dir. Son üç bağlayıcı polimer modifiyelidir. Tüm karışımlar için, 50°C sıcaklıkta suyun altında “Hamburg Wheel Tracking” deneyi gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, 2000 yılında “Mathy Technology and Engineering” - (MTE)'de her karışımın kuru dayanım özelliklerini belirlemek için 58°C sıcaklık ve 34 kPa gerilmede DSR sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. DSR sünme deneyi 200 mili.Nm torka kadar uygulama yeteneğine sahip gerilme kontrollü bir reometre ile yapılmıştır. Bu deneyler için (TA Instruments) tarafından üretilen iki adet AR 2000 reometresi kullanılmıştır. Numuneler yoğurmalı kompaktör ile hazırlanmıştır ve DSR sünme deneyi için kiriş şeklinde küçük numuneler testere ile kesilmiştir. Kiriş numunesi, nominal olarak 50 mm uzunluğunda, 12 mm kalınlığında ve 10 mm genişliğinde olacak şekilde kesilmiştir (Reinke et al., 2005).

Çalışmaya göre, “Hamburg Wheel Tracking” deneyi ve DSR sünme deneyi sonuçları bitümlü karışımlar hakkında aynı bilgileri sağlamamıştır. Hamburg deneyi bulguları, karışımdaki ESAL seviyesinin artması ve sabit bir saf bitüm için yüksek sıcaklıkta bağlayıcının PG sınıfının artması sürekli olarak daha iyi sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Hamburg deneyinde, PG 64-34 ile üretilen karışımlar PG 70-28 veya PG 64-28P karışımları kadar iyi performans göstermemiştir. DSR sünme deneyinde ise, PG 64-34 ile üretilen karışımlar PG 64-28P karışımından çok daha iyi bir performans göstermiştir. Saf bitüm modülünün, nem hasarı direnç deneylerinde uygulanan gerilmede önemli bir rol oynamakta olduğu ve kuru yüksek sıcaklıkta kalıcı ise deformasyon deneylerinin modifiyeli bağlayıcıların performansından etkilendiği gibi farklı görüşlerin oluşmasına neden olmuştur (Reinke et al., 2005).

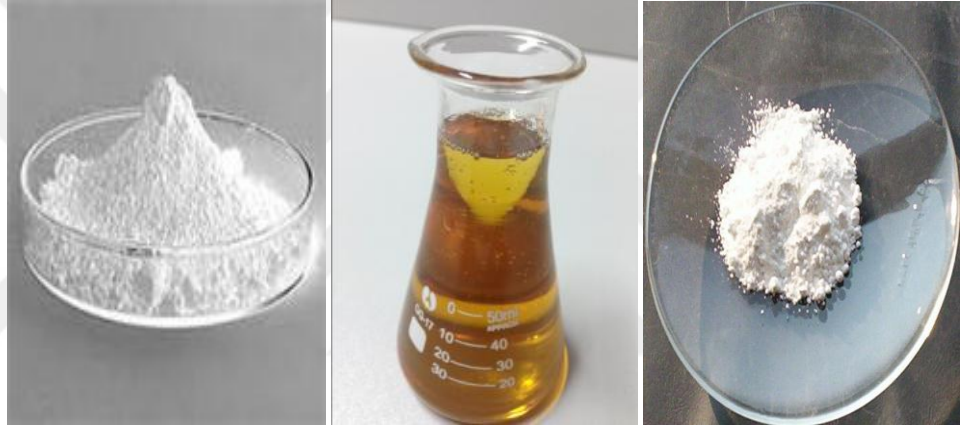
Tekrarlı sünme (RC) deneyi ile ilgili benzer bir çalışmada, yaşlandırılmış bir geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) bağlayıcısı ve saf bağlayıcı ile üretilen farklı karışımların özelliklerini incelemek için dinamik kayma reometresi ile (DSR) kırımler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Jesse D. Doyle vd. (69) %100 RAP ve saf bağlayıcıdan oluşan sıkıştırılmış numuneleri test etmiştir. Üç farklı saf bağlayıcı içeriği ile üç adet RAP kaynağı iki farklı %100 RAP karışım karıştırma sıcaklığında hazırlanarak test edilmiştir. Toplamda 144 burulma kırımleri hazırlanmış ve test edilmiştir. Araştırmanın bulguları, RC deneyinin, saf bağlayıcı ile karıştırılmış %100 RAP'nin etkileşimini değerlendirmek için optimal olmadığını göstermektedir. Karşılaşılan zorluklardan biri, RAP malzeme özelliklerinin ve saf bağlayıcı içeriğinin geniş bir yelpazede olacak şekilde burulma kırımlerinin hazırlamasıdır. RC deneyi, RAP kaynağı ve saf bağlayıcı içeriğini tespit edebilmektedir ancak, numunenin karıştırma sıcaklığındaki değişikliklerden kaynaklı olarak mekanik davranışındaki potansiyel farkları yakalamak mümkün değildir (Doyle et al., 2013).

Heitzman et al. (2003) tarafından test edilen karışımların $|G^*|$ ve akma numarasını (F_n) dinamik kayma reometresi ile (DSR) belirlemek için burulma deneyini kullanarak başka bir deney yöntemi gerçekleştirilmiştir. Burulma deneyleri için, kırımler numuneler yoğurma aleti (yoğurmalı kompaktör) ile hazırlanmış veya saha karotundan kesilmiştir. Numunelerin boyutları nominal olarak 12 mm genişliğinde, 10 mm kalınlığında ve 50 mm uzunluğundadır. Numunelerin sıcaklığını kontrol etmek için bir hava sirkülasyon fırını kullanılmaktadır. Kompleks modül sonuçlarını elde etmek için bir reoloji deneyi gerçekleştirilmiştir. İstenen sıcaklığın üzerinde saniyede 0.1 ila 100 radyan aralığında bir “farklı frekans ve sıcaklık” ile tipik bir deney yapılmıştır. Deformasyon genel olarak % 0.01 olarak kullanılmıştır. Bu çalışma için, kompleks modül deneyleri 40°C ile 58°C arasında 6°C artış ile ve 10°C ile 25°C arasında 5 derece artış ile gerçekleştirilmiştir.

6. ANTİOKSİDAN KATKILARLA BİTÜM MODİFİKASYONU

6.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada, saf bitüm olarak Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAŞ)'tan temin edilen biri sert, biri yumuşak olmak üzere iki farklı penetrasyon derecelerine sahip B 160/220 ve B 50/70 bitümleri kullanılmıştır. Bu çalışmada antioksidan katkı maddeleri olarak; thiourea, furfural ve çinko oksit seçilmiştir. Katkı maddeleri Sinerji A.Ş'den temin edilmiştir (Şekil 6.1). Çizelge 6.1–3'te kullanılan katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Bu çalışmada mineral agrega malzemesi olarak, İzmir çevresindeki Ege Asfalt şantiyesi'nden temin edilen kalker kullanılmıştır.



(a)

(b)

(c)

Şekil 6.1 Kullanılan antioksidan katkıları a) thiourea b) furfural ve c) çinko oksit.

Çizelge 6.1. Thiourea fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değerler
Renk	renksiz
Koku	kokusuz
Form	toz
Erime noktası, °C	169-170
Özgül ağırlık, gr/cm ³	1,405

Çizelge 6.2. Furfural fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değerler
Renk	beyaz
Koku	kokulu
Form	sıvı
Kaynama noktası, °C	162
Özgül ağırlık, gr/cm ³	1,160

Çizelge 6.3. Çinko oksit fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Fiziksel Özellikler	Değerler
Renk	beyaz
Koku	kokusuz
Form	toz
Erime noktası, °C	1975
Özgül ağırlık, gr/cm ³	2,910

6.2 Modifikasyon İşlemi

Yapılan literatür araştırmalarında, bitümlerde %9 oranına kadar kullanılan thiourea'nın ve düşük miktarda kullanılan furfural ve çinko oksidin bağlayıcı performansını iyileştirdiği ve bu bağlayıcılarla ve dolayısıyla karışımlarla olumlu sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Furfural ve çinko oksit oranları literatür bilgileri ışığında ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 olarak seçilirken, thiourea %4, %6, ve %8 olarak seçilmiştir.

Homojen bir bitüm-antioksidan katkı karışımı elde etmek amacıyla, saf bitüm 160–165°C sıcaklıkta ısıtılmış ve çapı 9,5 cm olan bir silindirik kaba aktarılmıştır. Kap önceden 170–175°C'ye ayarlanan ısıtıcıya yerleştirilmiştir. Daha sonra antioksidan katkılar bitüme ilave edilerek yüksek devirli mikser ile 15 dakika 400 devir/dakika hızda ve 45 dakika 1500 devir/dakika hızda toplam bir saat karıştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan saf ve antioksidan katkılı bitümler aşağıda verilen şekilde kodlandırılmıştır:

Saf B160/220	→	B160/220
Saf B160/220+%4 thiourea	→	B160/220+4T
Saf B160/220+%6 thiourea	→	B160/220+6T
Saf B160/220+%8 thiourea	→	B160/220+8T
Saf B160/220+%1 furfural	→	B160/220+1F
Saf B160/220+%1,5 furfural	→	B160/220+1,5F
Saf B160/220+%2 furfural	→	B160/220+2F
Saf B160/220+%1 çinko oksit	→	B160/220+1ZnO
Saf B160/220+%1,5 çinko oksit	→	B160/220+1,5ZnO
Saf B160/220+%2 çinko oksit	→	B160/220+2ZnO

Saf B50/70	→	B50/70
Saf B50/70+%4 thiourea	→	B50/70+4T
Saf B50/70+%6 thiourea	→	B50/70+6T
Saf B50/70+%8 thiourea	→	B50/70+8T
Saf B50/70+%1 furfural	→	B50/70+1F
Saf B50/70+%1,5 furfural	→	B50/70+1,5F
Saf B50/70+%2 furfural	→	B50/70+2F
Saf B50/70+%1 çinko oksit	→	B50/70+1ZnO
Saf B50/70+%1,5 çinko oksit	→	B50/70+1,5ZnO
Saf B50/70+%2 çinko oksit	→	B50/70+2ZnO

7. LABORATUVAR TEST SONUÇLARI

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneylerin sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada, hazırlanmış olan, thiourea (T), furfural (F) ve çinko oksit (ZnO) katkılı bitümlü bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve Superpave sistemi çerçevesinde kullanılan test yöntemleri uygulanmıştır. Deneyler hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece antioksidan katkıların iki farklı bitüm üzerinde (B 50/70 ve B 160/220) yaşlanma önleyici etkileri tespit edilmiştir.

Ayrıca, saf ve antioksidan katkılı bağlayıcıların PG plus sınıflarını belirlenmek için tüm bağlayıcılar, DSR deney aleti kullanılarak, çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (Multiple Stress Creep Recovery – MSCR) testine tabi tutulmuştur. Bunun dışında, antioksidan katkıların bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımına etkisini belirlemek amacıyla kırış şeklinde olan karışım numuneleri yine DSR cihazı yardımıyla sünme (creep) testine tabi tutulmuştur.

7.1 Geleneksel Test Yöntemlerinin Sonuçları

Yapılması planlanan tüm geleneksel ve performans deneylerinin tamamlanmasıyla birlikte seçilen katkı oranları, sonuçlar hakkında genel bir değerlendirme verilmiştir.

Farklı içeriklerdeki katkı oranlarında elde edilen antioksidan modifiye bitümler üzerinde geleneksel test yöntemleri olarak da isimlendirilen penetrasyon, yumuşama noktası ve özgül ağırlık gibi fiziksel deneyler uygulanmıştır. Ayrıca penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak bitümlerin ısı duyarlılıkları hakkında bilgi veren penetrasyon indeksi değerleri hesaplanmıştır.

7.1.1 Penetrasyon deney sonuçları

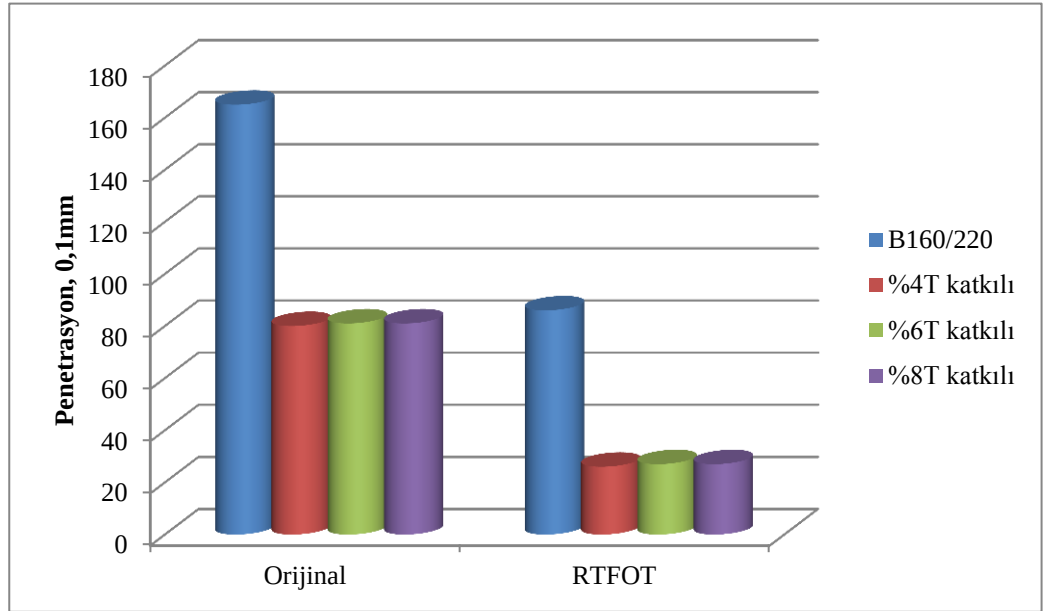
Çalışma kapsamında, farklı katkı oranlarında elde edilen antioksidan modifiye bitümler, geleneksel test yöntemi olarak nitelendirilen penetrasyon deneyine tabi tutulmuştur. Aynı deney RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de uygulanmıştır. Böylece yaşlanma öncesi ve sonrasında bağlayıcılarda meydana gelen değişiklikler tespit edilmiştir. Çizelge 7.1–2 ve Şekil 7.1–2’de thiourea ile ilgili penetrasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7.1. Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

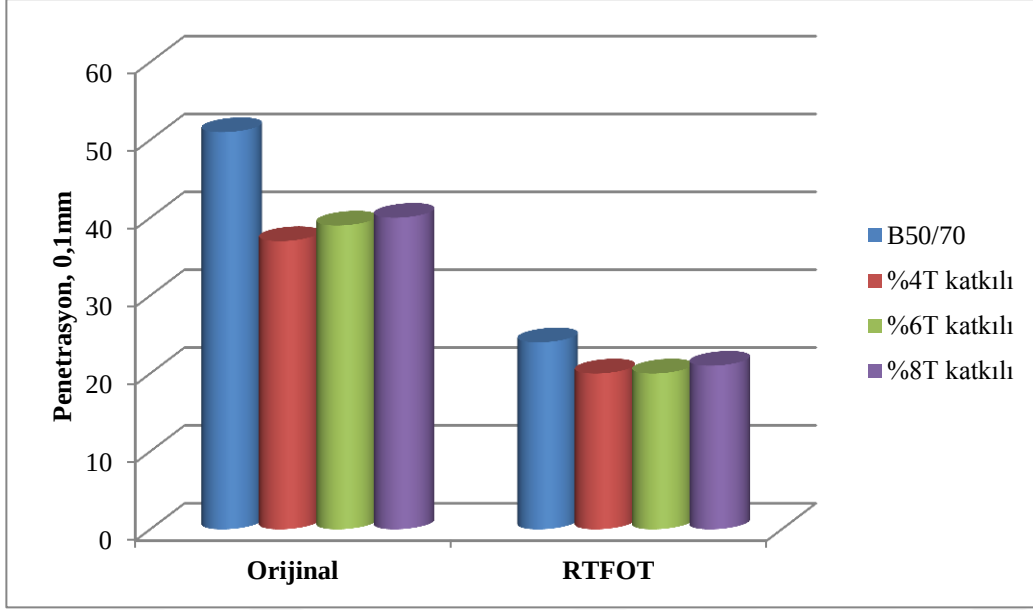
Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	165	86	79
B160/220+4T	80	26	54
B160/220+6T	81	27	54
B160/220+8T	81	27	54

Çizelge 7.2. Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	51	24	27
B50/70+4T	37	20	17
B50/70+6T	39	20	19
B50/70+8T	40	21	19



Şekil 7.1. Saf B160/220 bitümüne thiourea katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.



Şekil 7.2. Saf B50/70 ile thiourea katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.

Penetrasyon deney sonuçları incelendiğinde thiourea katkısının artmasıyla penetrasyon değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Yüzde miktarının artması ile penetrasyon değerinde çok az bir artış var olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen sertleşme tüm katkı oranlarında yüksek seviyelerde gerçekleşmektedir.

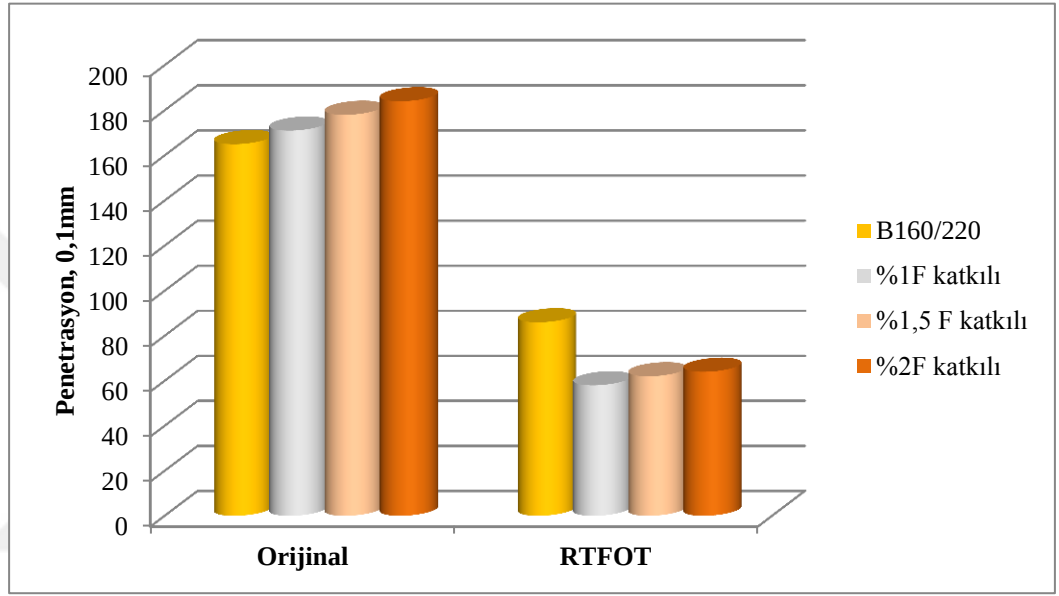
Furfural katkılı bitüme ait penetrasyon deney sonuçları Çizelge 7.3–4 ve Şekil 7.3–4'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

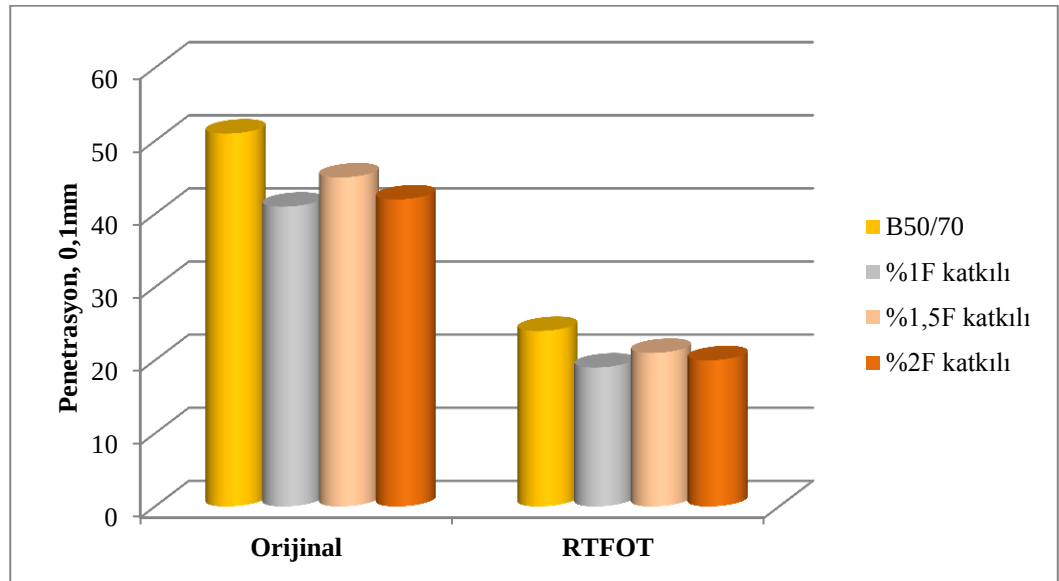
Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	165	86	79
B160/220+1F	171	58	113
B160/220+1,5F	178	62	116
B160/220+2F	184	64	120

Çizelge 7.4. Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	51	24	27
B50/70+1F	41	19	22
B50/70+1,5F	45	21	24
B50/70+2F	42	20	22



Şekil 7.3. Saf B160/220 ile furfural katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.



Şekil 7.4. Saf B50/70 ile furfural katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.

Çizelge 7.3 ve Şekil 7.3'te deney sonuçlarına göre, orijinal B160/220 için deney sonuçlarına bakıldığında; furfural katkı oranının artması ile penetrasyon değerleri artmaktadır. Ancak yaşlandırılan bitümler farklı bir davranış göstermektedir. Furfural katkı oranının artmasıyla penetrasyon değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu azalma %2 furfural katkılı bitümde çok fazla belirgin değil iken yüzde miktarının azalmasıyla (özellikle %1 ve %1,5 oranlarında) daha belirgin hale gelmektedir.

Çizelge 7.4 ve Şekil 7.4'te penetrasyon deney sonuçlarına bakıldığında, B50/70 için furfural katkı oranının ilavesi ile penetrasyon değerleri azalmaktadır. Bunun sonucunda bağlayıcının sertliği artmıştır. Furfural modifiye bitümler kendi aralarında değerlendirildiğinde; katkı oranı arttıkça penetrasyon değerlerinde düşüş gözlenmişken penetrasyon değerlerinde hafif dalgalanmayla artış görülmüştür.

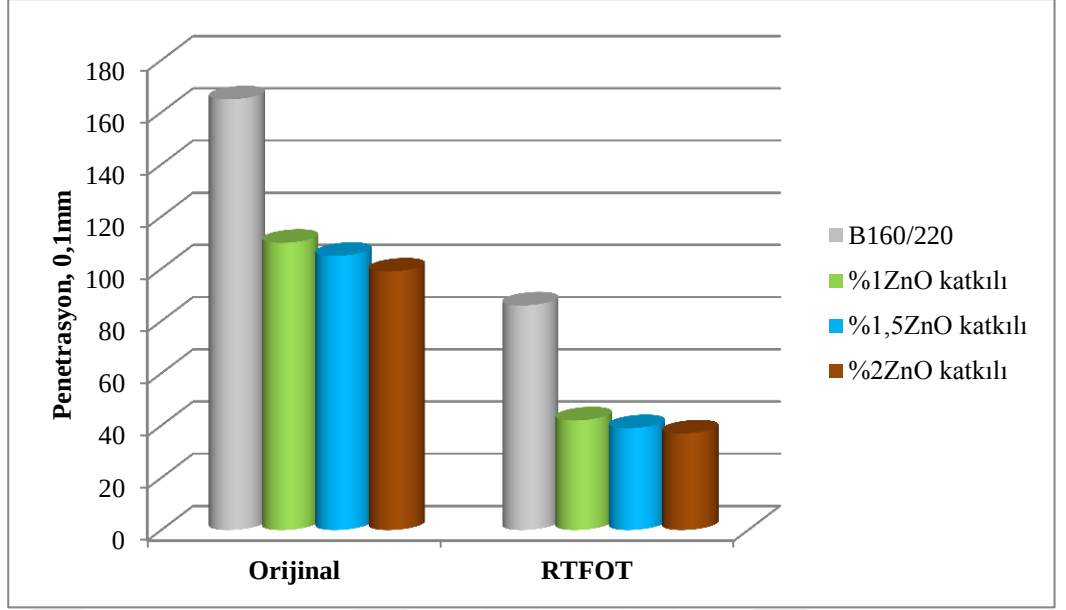
Çizelge 7.5–6 ve Şekil 7.5–6'da verilen çinko oksit katkısına ait penetrasyon deney sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.5. Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

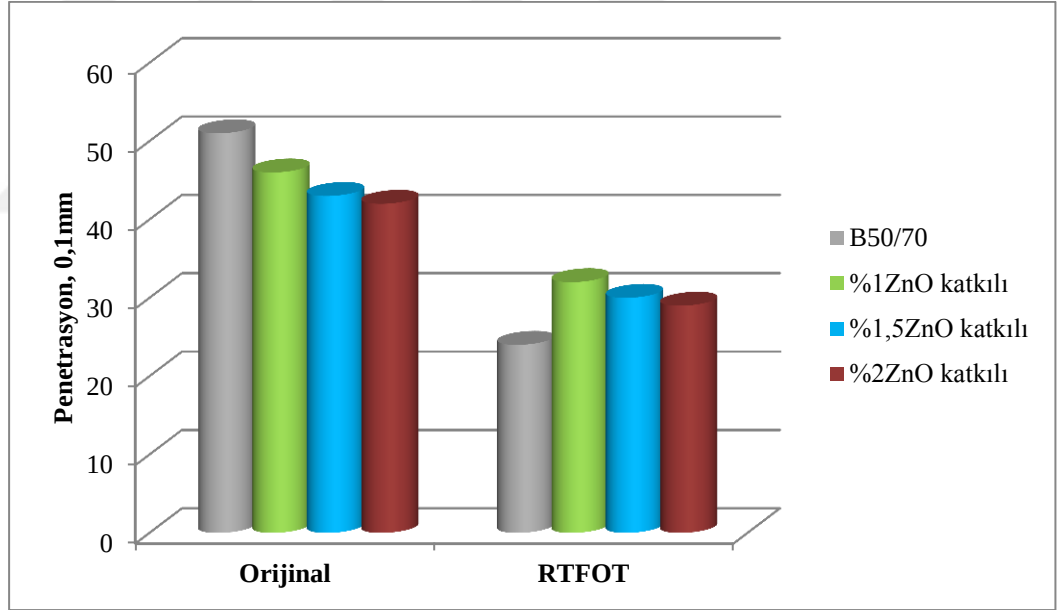
Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	165	86	79
B160/220+1ZnO	110	42	68
B160/220+1,5ZnO	105	39	66
B160/220+2ZnO	99	37	62

Çizelge 7.6. Saf B50/70 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyonları.

Bağlayıcı	Penetrasyon, 25 °C, (mm ⁻¹)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	51	24	27
B50/70+1ZnO	46	32	14
B50/70+1,5ZnO	43	30	13
B50/70+2ZnO	42	29	13



Şekil 7.5. Saf B160/220 ile ZnO katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.



Şekil 7.6. Saf B50/70 ile ZnO katkısının penetrasyon üzerindeki etkisi.

Çizelge 7.5 ve Şekil 7.5'te görüldüğü gibi, B160/220'ye çinko oksit katkı oranının artmasıyla birlikte, bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Çinko oksit katkısının bitüm içerisinde kullanım oranının artmasıyla birlikte meydana gelen penetrasyon değerindeki azalma, bağlayıcının çinko oksit katkısıyla birlikte fiziksel olarak sertleştiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.6 ve Şekil 7.6’da ise, orijinal B50/70 penetrasyonlu bitümlere çinko oksit katkı malzemesi olarak ilave edilmesiyle penetrasyon değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, RTFOT ile yaşlandırılan bağlayıcılar ise saf bitüme göre çinko oksit katkı ilavesiyle penetrasyon değerlerinin arttığı, ancak katkı oranının artmasıyla birlikte penetrasyon değerlerinin azaldığı görülmektedir.

7.1.2 Yumuşama noktası deney sonuçları

Çalışma kapsamında, saf ve antioksidan katkılı bitümlü bağlayıcılar yumuşama noktası deneyine tabi tutulmuştur. Aynı deney RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de uygulanmıştır. Böylece yaşlanma öncesi ve sonrasında bağlayıcılarda meydana gelen değişiklikler tespit edilmiştir.

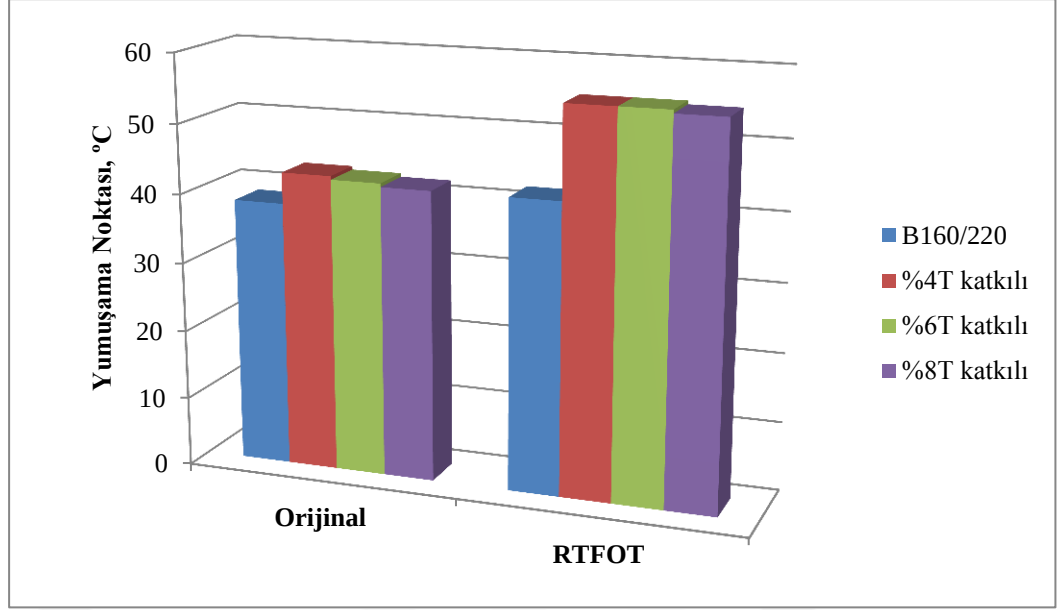
Thiourea katkılı bitümlerin için yumuşama noktası deney sonuçları Çizelge 7.7-8 ve Şekil 7.7-8’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

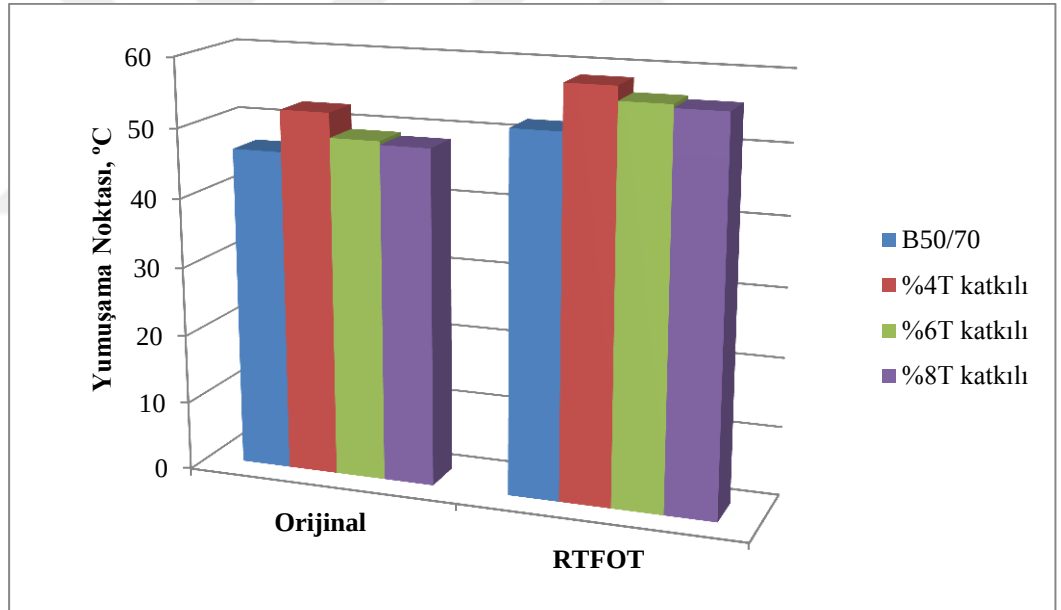
Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	38,5	42	3,5
B160/220+4T	43	55,25	12,25
B160/220+6T	42,5	55,25	12,75
B160/220+8T	42	54,75	12,75

Çizelge 7.8. Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	46,5	52	5,5
B50/70+4T	52,5	58,5	6
B50/70+6T	49	56,5	6,5
B50/70+8T	48,5	56	7,5



Şekil 7.7. Saf B160/220 ile thiourea katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.



Şekil 7.8. Saf B50/70 ile thiourea katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.

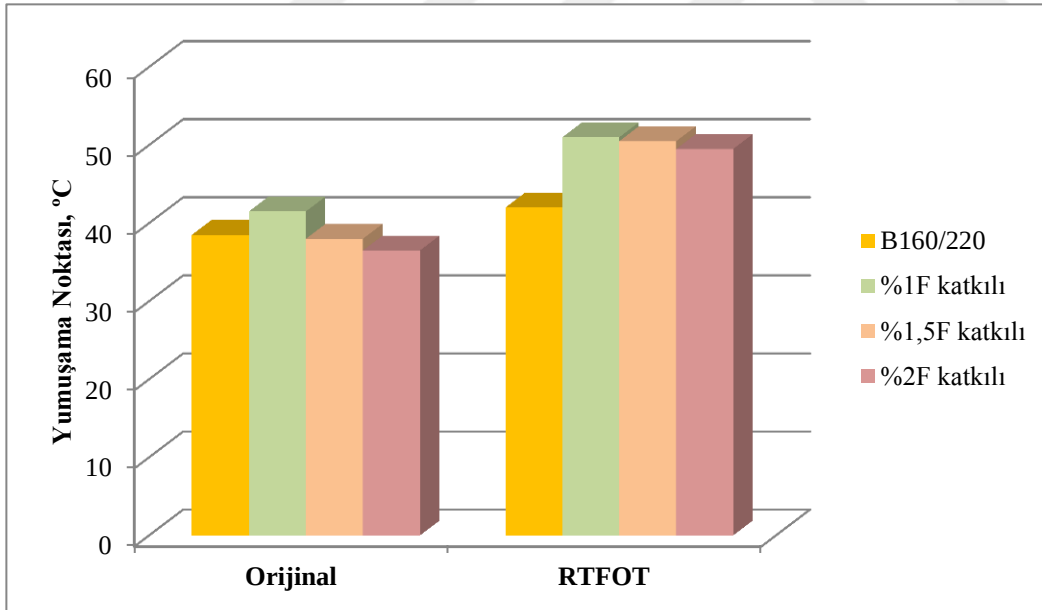
Çizelge 7.7 ve Şekil 7.7’de görüldüğü gibi, B 160/220’ye thiourea katkı ilavesiyle bağlayıcıların yumuşama noktası artmıştır. Aynı şekilde, Çizelge 7.8 ve Şekil 7.8’de bakıldığında, B 50/70’e thiourea katkı ilavesiyle yumuşama noktası artmıştır. Diğer yandan saf bitüme göre yumuşama noktası artarken thiourea oranının artmasıyla bağlayıcının yumuşama noktası hafifçe azalmaktadır.

Çizelge 7.9. Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

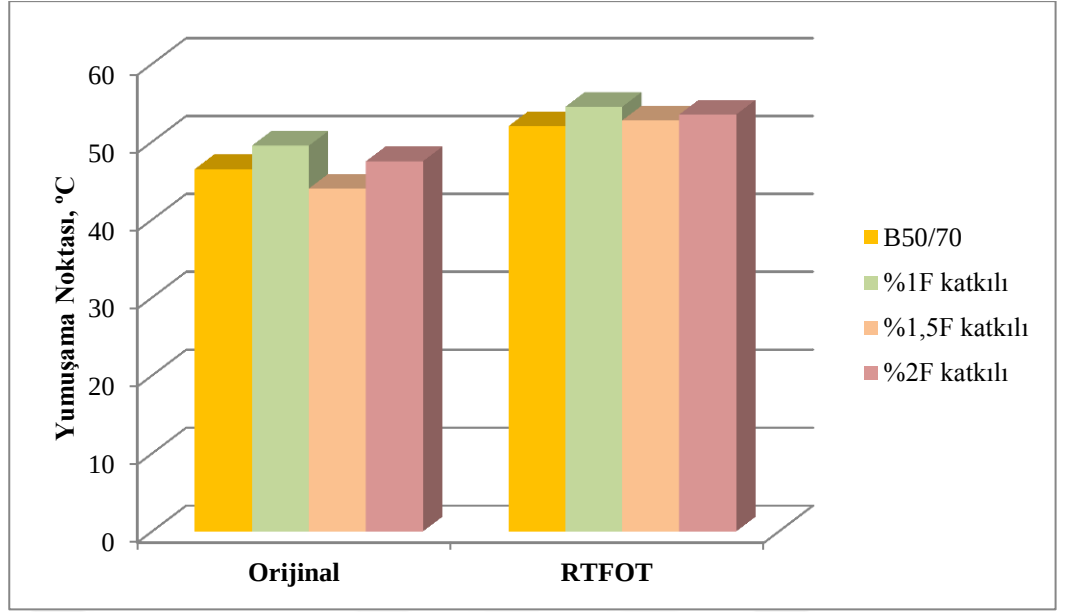
Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	38,5	42	3,5
B160/220+1F	41,5	51	9,5
B160/220+1,5F	38	50,5	12,5
B160/220+2F	36,5	49,5	13

Çizelge 7.10. Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	46,5	52	5,5
B50/70+1F	49,5	54,5	5
B50/70+1,5F	44	52,75	8,75
B50/70+2F	47,5	53,5	6



Şekil 7.9. Saf B160/220 ile furfural katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.



Şekil 7.10. Saf B50/70 ile furfural katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.

Çizelge 7.9 ve Şekil 7.9’da görüldüğü gibi, orijinal saf B 160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları incelendiğinde, furfural katkısının artmasıyla birlikte yumuşama noktası değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak %1 furfural kullanıldığında yumuşama noktasında belli bir artış gözlemlenmiştir. RTFOT ile yaşlandırılan bağlayıcıların ise saf bitüme göre furfural katkı ilavesiyle yumuşama noktası değeri artmıştır.

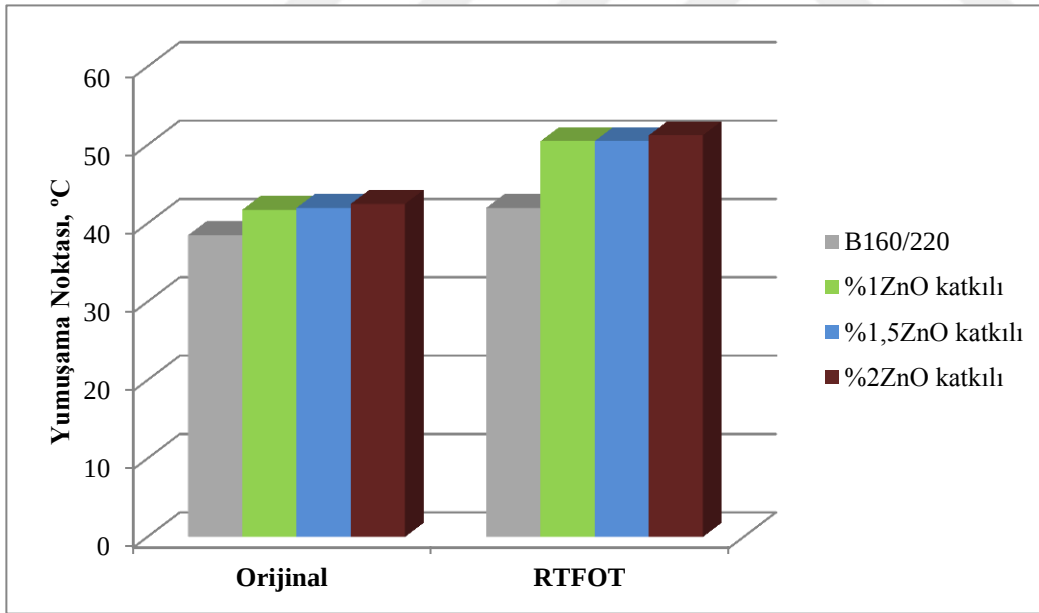
Çizelge 7.10 ve Şekil 7.10’da görüldüğü gibi, orijinal saf B 50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları incelendiğinde, furfural katkısının %1 ve % 2 oranlarında yumuşama noktası değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak furfural %1,5 oranında kullanıldığında bağlayıcının önemli derecede yumuşadığını göstermektedir. Ayrıca RTFOT ile yaşlandırılan bağlayıcılarda ise saf bitüme göre furfural katkı ilavesiyle yumuşama noktası sıcaklığı arttığı gözlemlenmiştir. Yine de yaşlandırılan bağlayıcılar için furfural %1,5 oranında kullanıldığında bağlayıcının %1 ve %2 oranlarının sonuçlarına göre az miktarda yumuşadığını göstermektedir.

Çizelge 7.11. Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

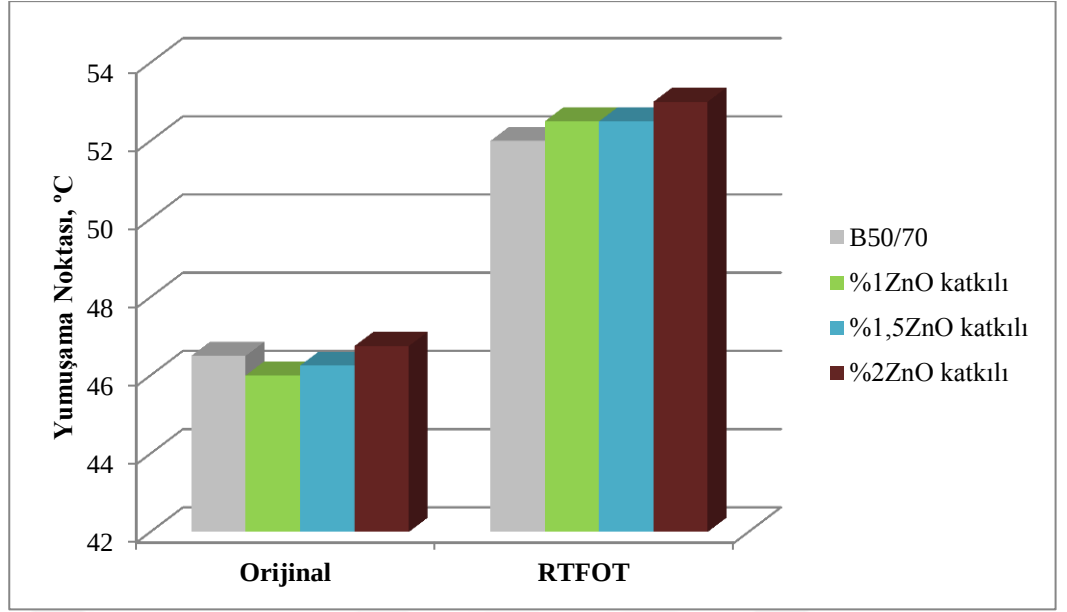
Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B160/220	38,5	42	3,5
B160/220+1ZnO	41,75	50,5	8,75
B160/220+1,5ZnO	42	50,5	8,5
B160/220+2ZnO	42,5	51,25	8,75

Çizelge 7.12. Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların yumuşama noktaları.

Bağlayıcı	Yumuşama noktası, (°C)		Fark
	Orijinal	RTFOT	
B50/70	46,5	52	5,5
B50/70+1ZnO	46	52,5	6,5
B50/70+1,5ZnO	46,25	52,5	6,25
B50/70+2ZnO	46,75	53	6,25



Şekil 7.11. Saf B160/220 ile çinko oksit katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.



Şekil 7.12. Saf B50/70 ile çinko oksit katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi.

Çizelge 7.11 ve Şekil 7.11'e bakıldığında, saf B 160/220 bitüme çinko oksit katkı ilavesiyle yumuşama noktası sıcaklığı artmıştır. Bunun sonucunda bağlayıcının sertliği artmıştır.

Çizelge 7.12 ve Şekil 7.12'de görüldüğü gibi, orijinal saf 50/70'in çinko oksit katkı ilavesiyle yumuşama noktasında hafif bir düşüş göstermiştir. Ancak %2 oranında çinko oksit ilavesi yumuşama noktası değerinde biraz artış göstermiştir. RTFOT ile yaşlandırılan bağlayıcılar ise saf bitüme göre çinko oksit katkı ilavesiyle yumuşama noktasının arttığı görülmüştür.

7.1.3 Penetrasyon indeksi (PI) sonuçları

Bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirleme amacı ile hesaplanan penetrasyon indeksi ise -1,538 değerinden %8 thiourea katkı seviyesinde -2,370 değerine ulaşmaktadır (Çizelge 7.13). Bu düşüş, thiourea katkılı bitümün ısıya karşı hassasiyetinin arttığı anlamına gelmekte, diğer bir deyişle thiourea'nın B160/220'ye katılmasının malzemeyi yüksek sıcaklıklara daha duyarlı hale getirdiğini göstermektedir.

Çizelge 7.14'te hesaplanan penetrasyon indeksi sonuçları incelendiğinde, -2,074 değerinden %4 thiourea katkı seviyesinde -1,253 değerine %8 thiourea katkı seviyesi ise -2,047 değerine ulaşmaktadır. Bu artış, thiourea katkılı bitümün

ısıya karşı hassasiyetinin azaldığı anlamına gelmekte diğer bir değiş ile thiourea'nın B50/70'e katılmasının malzemenin ısıya karşı hassasiyetinin azaldığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bitümün daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 7.13. Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B160/220	-1,538
B160/220+4T	-2,070
B160/220+6T	-2,352
B160/220+8T	-2,370

Çizelge 7.14. Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B50/70	-2,074
B50/70+4T	-1,253
B50/70+6T	-1,973
B50/70+8T	-2,047

Yine yumuşama noktası ve penetrasyon değerleriyle hesaplanan penetrasyon indekslerinin her iki bitüm türü içinde furfural katkısının artmasıyla birlikte genel olarak belirgin biçimde düştüğü belirlenmiştir. Bunun haricinde her iki bitüm türü için %1 furfural katkısı seviyesinde PI değeri önemli miktarda bitümün artmasıyla ısıya karşı olan duyarlılığı azaltmaktadır (Çizelge 7.15–16). Bu sonuç, furfural katkısının bitüm içerisindeki %1'de oranının kullanılmasıyla birlikte her iki bitümün de kullanım sıcaklığının artması anlamına gelmektedir.

Çizelge 7.15. Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B160/220	-1,538
B160/220 +1F	-0,110
B160/220 +1,5F	-1,469
B160/220 +2F	-2,071

Çizelge 7.16. Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B50/70	-2,074
B50/70 +1F	-1,751
B50/70 +1,5F	-3,017
B50/70 +2F	-2,205

Bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığını gösteren penetrasyon indeksi (PI) değeri her iki bitüm türü için çinko oksit oranı arttıkça azalmaktadır (Çizelge 7.17–18). Bunun sonucunda, çinko oksit kullanımı ile bitümün ısıya karşı olan duyarlılığı bir miktar artırmaktadır.

Çizelge 7.17. Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B160/220	-1,538
B160/220+1ZnO	-1,614
B160/220+1,5ZnO	-1,664
B160/220+2ZnO	-1,661

Çizelge 7.18. Saf B50/70 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.

Bağlayıcı	Penetrasyon indeksi, (PI)
B50/70	-2,074
B50/70+1ZnO	-2,421
B50/70+1,5ZnO	-2,486
B50/70+2ZnO	-2,400

7.1.4 Parlama noktası deney sonuçları

Çalışma kapsamında, saf bitümler ve farklı katkı oranlarında elde edilen antioksidan modifiye bağlayıcılar, geleneksel test yöntemi olarak nitelendirilen parlama noktası deneylerine tabi tutulmuştur. Tüm bağlayıcılar için elde edilen parlama noktası neticeleri 230°C'den sıcaklıktan daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

7.1.5 Özgöl ağırlık deney sonuçları

Çalışma kapsamında, %4, %6, ve %8 katkı oranlarında elde edilen thiourea ve %1, %1,5, ve %2 katkı oranlarında elde edilen furfural ve çinko oksit modifiye bitümler, geleneksel test yöntemi olarak nitelendirilen özgöl ağırlık deneyine tabi tutulmuştur.

Thiourea katkılı bitümün özgöl ağırlık deney sonuçlarına bakıldığında katkı oranının artmasıyla özgöl ağırlık değerinin arttığı gözlemlenmektedir (Çizelge 7.19–20, Şekil 7.13–14).

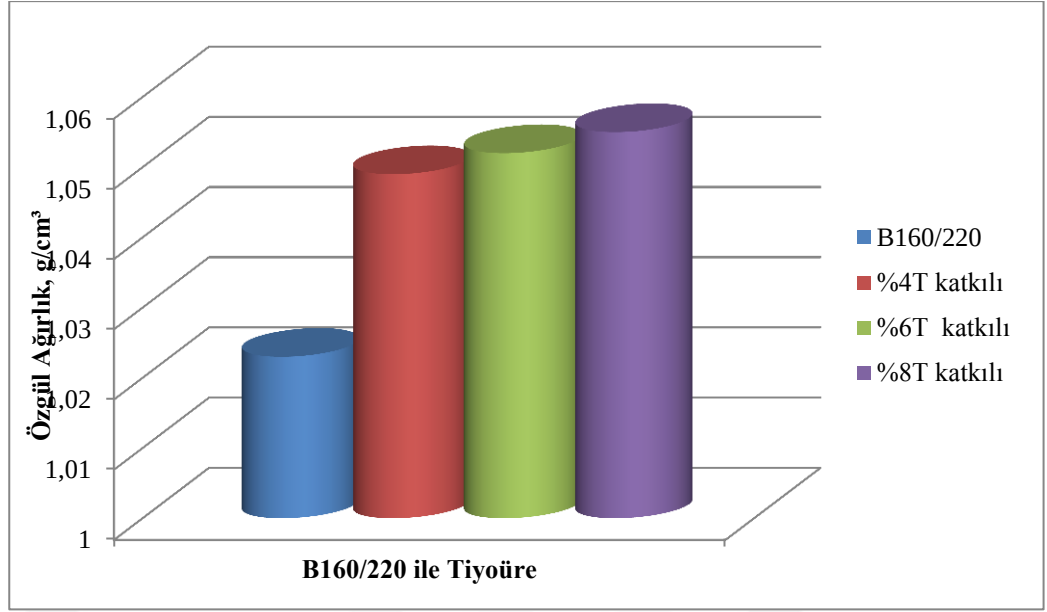
Çizelge 7.19. Saf B160/220 ve thiourea modifiye bağlayıcıların özgöl ağırlıkları.

Bağlayıcı	Özgöl ağırlık, 25 °C, (gr/cm ³)
B160/220	1,023
B160/220+4T	1,049
B160/220+6T	1,052
B160/220+8T	1,055

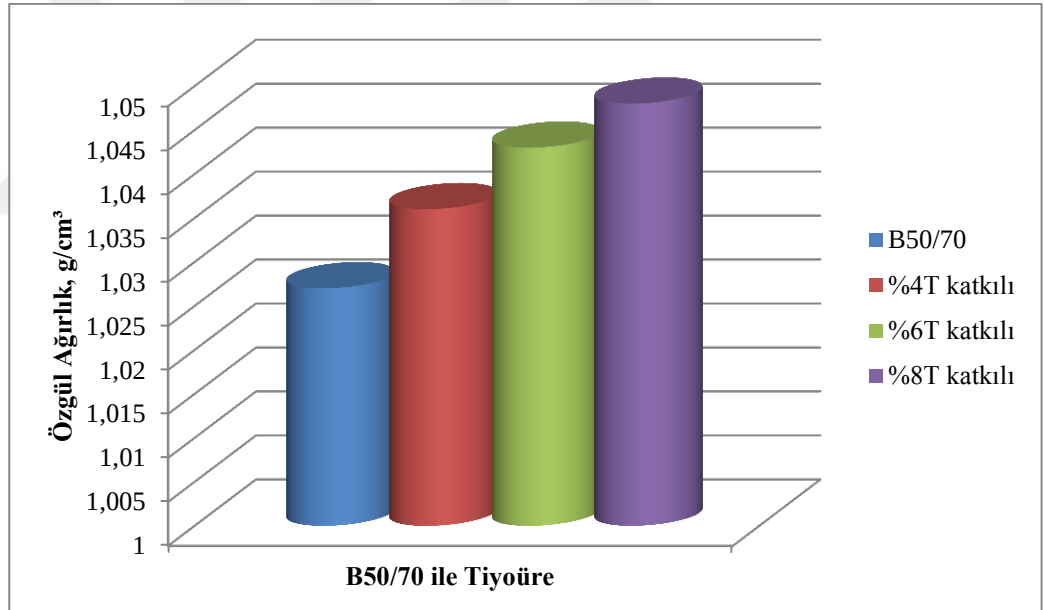
Çizelge 7.20. Saf B50/70 ve thiourea modifiye bağlayıcıların özgöl ağırlıkları.

Bağlayıcı	Özgöl ağırlık, 25 °C, (gr/cm ³)
B50/70	1,027
B50/70+4T	1,036
B50/70+6T	1,043
B50/70+8T	1,048

Aynı şekilde, furfural katkılı bitümün özgöl ağırlık deney sonuçlarını incelendiğinde, katkı oranının artmasıyla özgöl ağırlık değerinin arttığı gözlemlenmektedir (Çizelge 7.21–22, Şekil 7.15–16).



Şekil 7.13. Saf B160/220 ile thiourea katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.



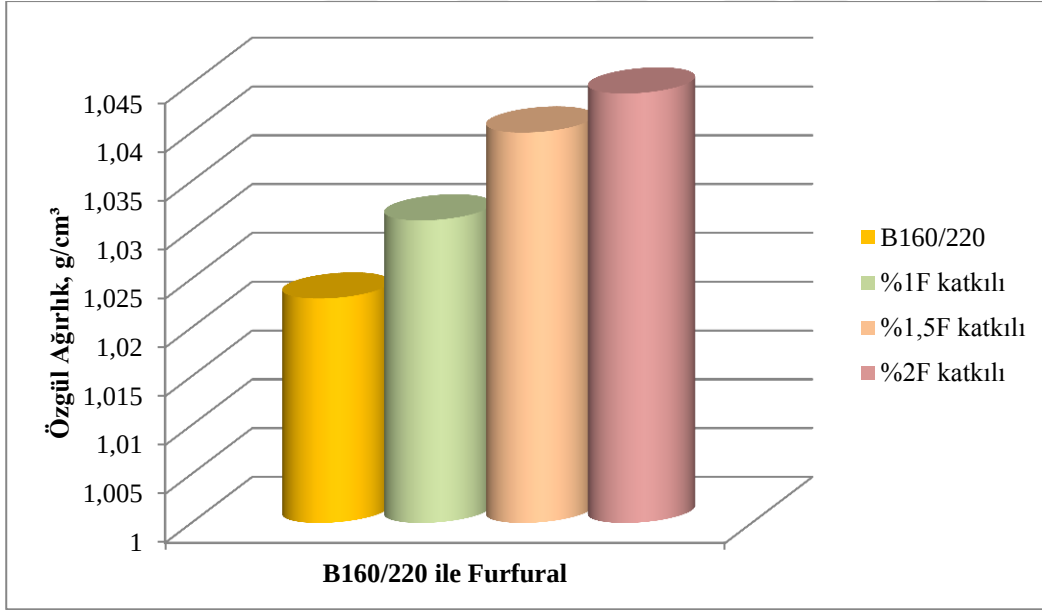
Şekil 7.14. Saf B50/70 ile thiourea katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.

Çizelge 7.21. Saf B160/220 ve furfural modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.

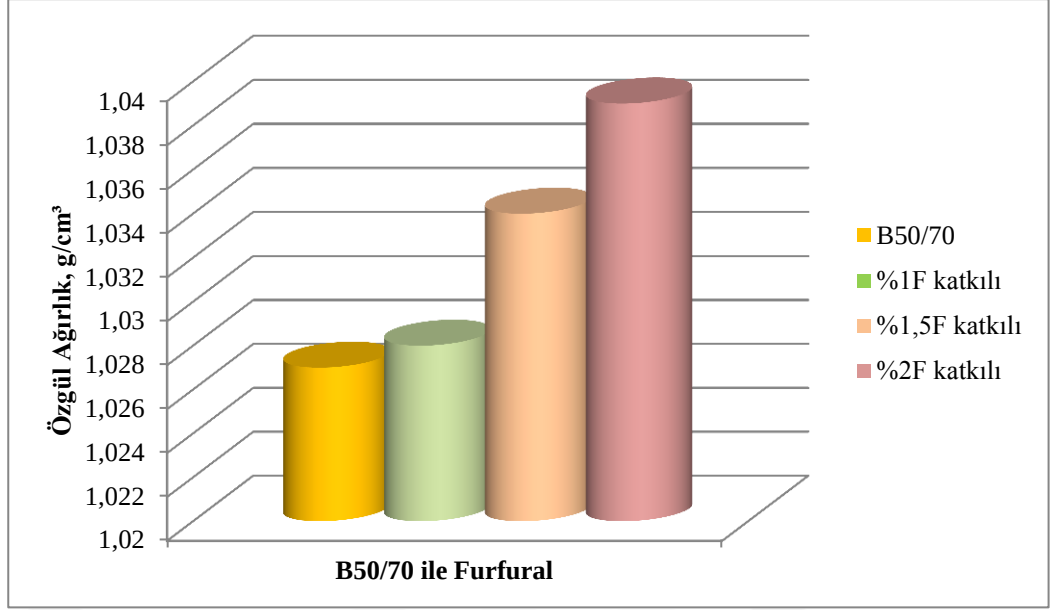
Bağlayıcı	Özgül ağırlık, 25 °C, (gr/cm ³)
B160/220	1,023
B160/220+1F	1,031
B160/220+1,5F	1,040
B160/220+2F	1,044

Çizelge 7.22. Saf B50/70 ve furfural modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.

Bağlayıcı	Özgül ağırlık, 25 °C, (gr/cm ³)
B50/70	1,027
B50/70+1F	1,028
B50/70+1,5F	1,034
B50/70+2F	1,039



Şekil 7.15. Saf B160/220 ile furfural katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.



Şekil 7.16. Saf B50/70 ile furfural katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.

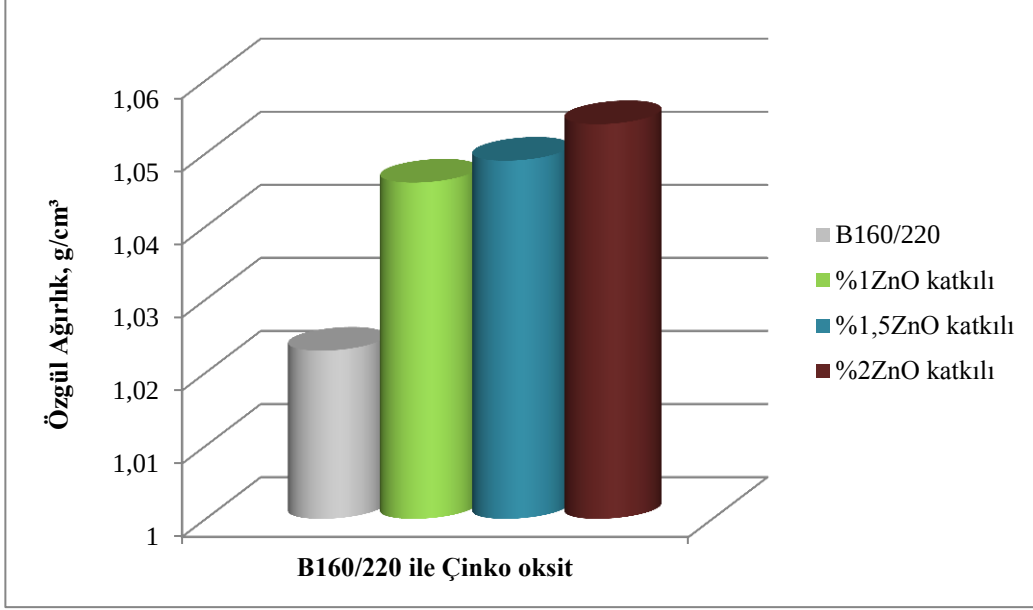
Çinko oksit katkıli bitümlerde de katkı oranının artmasıyla, bağlayıcıların özgül ağırlık değerlerinin arttığı tespit edilmektedir (Çizelge 7.23–24, Şekil 7.17–18).

Çizelge 7.23. Saf B160/220 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.

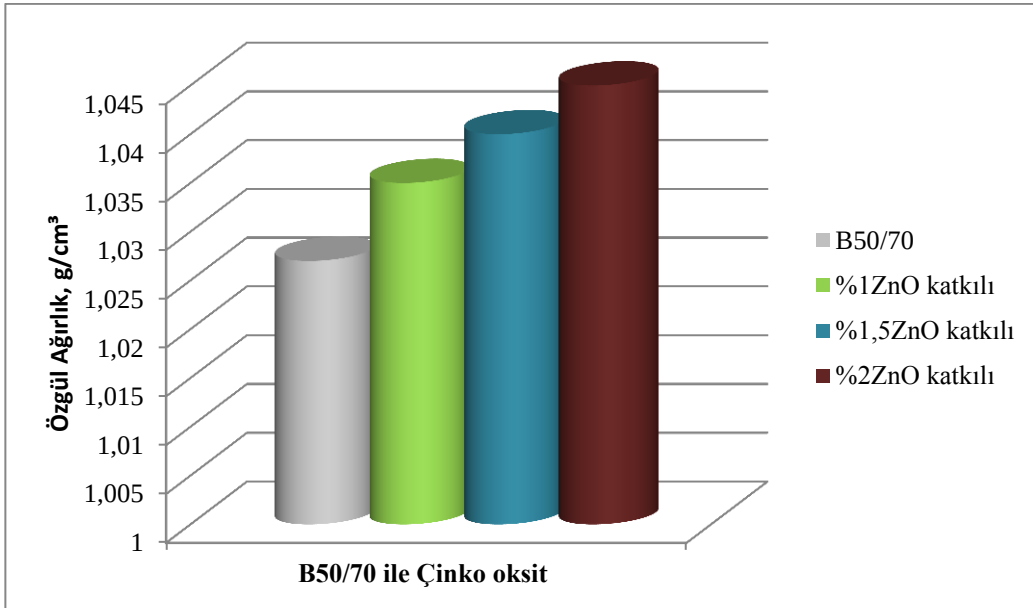
Bağlayıcı	Özgül ağırlık, 25 °C, (gr/cm³)
B160/220	1,023
B160/220+1ZnO	1,046
B160/220+1,5ZnO	1,049
B160/220+2ZnO	1,054

Çizelge 7.24. Saf B50/70 ve çinko oksit modifiye bağlayıcıların özgül ağırlıkları.

Bağlayıcı	Özgül ağırlık, 25 °C, (gr/cm ³)
B50/70	1,027
B50/70+1ZnO	1,035
B50/70+1,5ZnO	1,040
B50/70+2ZnO	1,045



Şekil 7.17. Saf B160/220 ile çinko oksit katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.



Şekil 7.18. Saf B50/70 ile çinko oksit katkısının özgül ağırlık üzerindeki etkisi.

Özgül ağırlık testin sonuçlarına bakıldığında, saf bitümlere göre tüm antioksidan modifiye bitümler daha yüksek özgül ağırlıklara sahip olduğu görülmektedir.

7.1.6 Depolama stabilitesi deney sonuçları

Depolama stabilitesi deneyi sonrasında, antioksidan katkılı bitümlerin yüksek sıcaklıktaki depolama stabilitesi ve fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler ölçülmüştür.

Saf ve antioksidan katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklıkta depolanmaları süresince içerdiği antioksidan katkının yüzmesi yada dibe çökmesiyle oluşacak fiziksel farklılıkların belirlenmesi için bu bağlayıcılar üzerinde depolama stabilitesi deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.25–30’da verilmiştir. Saf bağlayıcıların (B160/220 ve B50/70) içeriğinde herhangi bir polimer bulunmadığı için bu bağlayıcılar depolama stabilitesi deneylerine tabi tutulmamıştır.

Depolama stabilitesi deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tüm bağlayıcı türlerinin şartname limitleri olan yumuşama noktasındaki değişimin en fazla 5°C, penetrasyon değerlerinin ise en fazla 12 mm⁻¹ farklı olması şartlarını sağladığı görülmektedir. Katkı oranının artmasıyla depolama stabilitesinin azalması beklenen bir sonuçtur. Genel olarak, thiourea, furfural ve çinko oksit katkıların bitüm içerisinde kimyasal etkileşime girmesinin, bu katkılarla hazırlanan bağlayıcıların depolama stabilitesi değerlerinin çok yüksek olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 7.25. B 160/220 ile thiourea katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C’de, mm ⁻¹)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B160/220 + T						
B160/220+4T	68	67	1	43	43,25	0,25
B160/220+6T	67	68	1	42,5	42	0,5
B160/220+8T	67	69	2	42,5	42,25	0,25

Çizelge 7.26. B 50/70 ile thiourea katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C'de, mm ⁻¹)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B160/220 + T						
B50/70+4T	41	40	1	48,75	49	0,25
B50/70+6T	45	46	1	46,75	46,25	0,25
B50/70+8T	48	49	1	47,5	47,25	0,25

Çizelge 7.27. B 160/220 ile furfural katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C'de, mm ⁻¹)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B160/220 + F						
B160/220+1F	97	93	4	40,5	41	0,5
B160/220+1,5F	99	94	5	40	40,5	0,5
B160/220+2F	102	106	4	39,5	40	0,5

Çizelge 7.28. B 50/70 ile furfural katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C'de, mm ⁻¹)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B50/70 + F						
B50/70+1F	32	32	0	48,5	48,75	0,25
B50/70+1,5F	33	32	1	48,5	48,75	0,25
B50/70+2F	34	33	1	48,75	49	0,25

Çizelge 7.29. B 160/220 ile çinko oksit katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C'de, mm ⁻¹)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B160/220 + ZnO						
B160/220+1ZnO	90	93	3	41,5	41,75	0,25
B160/220+1,5ZnO	87	85	2	42,25	43	0,75
B160/220+2ZnO	77	72	5	42,75	44	1.25

Çizelge 7.30. B 50/70 ile çinko oksit katkısının depolama stabilitesi deney sonuçları.

Bağlayıcı	Penetrasyon (25 °C'de)		Penetr. Ara. Fark	Yum. Noktası, (°C)		Yum. Nokt. Ara. Fark, (°C)
	Üst	Alt	Maks. 12 mm ⁻¹	Üst	Alt	Maks. 5 °C
B50/70 + ZnO						
B50/70+1ZnO	38	39	1	48,5	47,75	0,75
B50/70+1,5ZnO	37	35	2	48,5	49	0.50
B50/70+2ZnO	36	34	2	48,5	48,75	0,25

Çizelge 7.25–30'da verilen modifiye bitüm; depolama stabilitesi deneyleri yumuşama noktası sonuçları incelendiğinde tüm modifiye bitümlerin beklenen şartname değerlerini sağladığı, buna göre depolama stabilitesi deneyi sonrasında ortaya çıkan yumuşama noktası farkının 5°C'nin altında olduğu saptanmıştır. Tüpün alt ve üst kısımlarındaki bitümlerin penetrasyon sonuçları değerlendirildiğinde de tüm bağlayıcılar şartname limiti olan 12 mm⁻¹'i sağladığı görülmüştür. Bu sonuç, katkı olarak kullanılan thiourea, furfural ve çinko oksit bitümlerle genel olarak iyi bir karışım oluşturdukları ve depolanmaya uygun olduklarını ortaya koymaktadır.

7.2 Superpave Test Yöntemlerinin Sonuçları

7.2.1 Dönel ince film etüvü deney (RTFOT) sonuçları

Saf ve antioksidan katkılı bitümler dönel ince film etüvü (RTFOT) kullanılarak kısa süreli yaşlandırılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen numuneler kısa süreli yaşlandırma sonrası meydana gelen kütle kaybının

ölçülmesi için kullanılmaktadır. SHRP'ye göre kütle kaybının genel olarak %1'den az olması beklenmektedir. RTOFT ile yaşlandırılmış antioksidan katkılı bitüm numuneleri basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi ile uzun süreli yaşlandırılma işlemi için de kullanılmıştır.

Çizelge 7.31–36'da sırasıyla T, F, ZnO katkılı bitüme ait RTFOT sonuçları verilmiştir. Çizelgeler, numunelerin deney öncesi “ilk kütle” değerlerini, deney sonrasında tartılan numunelerin son kütle değerlerini ve bu iki değerden hesaplanan yüzde kütle kaybı değerlerini içermektedir.

Her üç antioksidan katkılı bitümlerin RTFOT deneyi ile yaşlandırma sonuçları incelendiğinde tüm numunelerin şartname değerlerini sağladıkları görülmektedir.

Çizelge 7.31. B160/220 ile thiourea modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	160/220 + T		
			%4	%6	%8
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.05	35.26	34.91	35.47
Son Kütle, M2 (gr)		34.70	34.96	34.61	35.15
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2) / M_1$		0.98	0.84	0.86	0.89

Çizelge 7.32. B50/70 ile thiourea modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B50/70	50/70 + T		
			%4	%6	%8
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.45	35.28	34.95	34.78
Son Kütle, M2 (gr)		35.35	35.23	34.89	34.70
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2) / M_1$		0.295	0.14	0.18	0.23

Çizelge 7.33. B160/220 ile furfural modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	160/220 + F		
			%1	%1,5	%2
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.05	35.28	35.40	34.92
Son Kütle, M2 (gr)		34.70	34.95	35.06	34.58
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2)/M_1$		0.98	0.94	0.95	0.97

Çizelge 7.34. B50/70 ile furfural modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B50/70	50/70 + F		
			%1	%1,5	%2
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.45	35.41	34.90	35.29
Son Kütle, M2 (gr)		35.35	35.38	34.86	35.25
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2)/M_1$		0.295	0.08	0.10	0.10

Çizelge 7.35. B160/220 ile çinko oksit modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B160/220	160/220 + ZnO		
			%1	%1,5	%2
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.05	35.31	34.90	35.49
Son Kütle, M2 (gr)		34.70	35.27	34.85	35.42
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2)/M_1$		0.98	0.115	0.132	0.185

Çizelge 7.36. B50/70 ile çinko oksit modifiye bitüme ait RTFOT sonuçları.

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	B50/70	50/70 + ZnO		
			%4	%6	%8
İlk Kütle, M1 (gr)	maks. 1.0	35.45	34.83	35.02	34.55
Son Kütle, M2 (gr)		35.35	34.82	35.01	34.53
Kütle Kaybı (%) $=100(M_1 - M_2)/M_1$		0.295	0.029	0.029	0.043

7.2.2 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deney sonuçları

Saf ve antioksidan katkılı bitümlerin uzun vadeli yaşlanma özelliklerinin incelenmesi için bağlayıcılar basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyine tabi tutulmuştur. Yaşlandırılmış numuneler üzerinde daha sonra kiriş eğme reometresi (BBR) ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri yapılarak bağlayıcıların düşük sıcaklık PG sınıfları ve yorulma çatlaklara karşı dirençleri tespit edilmiştir.

7.2.3 Dinamik kayma (kesme) reometresi (DSR) deney sonuçları

7.2.3.1. Kalıcı deformasyon (tekerlek izi) sonuçları

Saf ve thiourea, furfural ve çinko oksit katkılı bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıflarının (PG) tespiti için yaşlandırılmamış (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler farklı deney sıcaklıklarında (Anton Paar Smart Pave Plus) dinamik kayma reometresi (DSR) cihazıyla deneye tabi tutulmuştur. Bitümlü bağlayıcılar ısıtılarak 1000 mikron (1 mm) derinlikte ve 25 mm çapında DSR cihazına ait silikon kalıplara doldurulmuş ve soğumaya bırakılmıştır. Deneye hazır hale getirilen numuneler üzerinde 52, 58, 64, 70, 76 ve 82°C sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. Cihaz istenilen deney sıcaklığına ulaştıktan sonra 10 dakikalık bir süre boyunca numunenin aynı sıcaklığa gelmesi için beklenilmiştir. Bu süre sonunda bağlayıcı şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/sn frekansta, orijinal numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait yazılım sayesinde uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki

kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerleri hesaplanmış, aynı zamanda bu değerler şartname sınırları ile kontrol edilmiştir. Deneyler, başlangıç sıcaklığı olan 52°C'den başlayarak 6°C'lik artışlar ile en yüksek test sıcaklığı olan 82°C'ye kadar çıkılmıştır. Ancak, yazılım aynı zamanda şartname limitlerini de kontrol ettiği için limitlerinin sağlanmadığı sıcaklıkta deney sonlandırılmaktadır.

DSR deneyleri daha önce de belirtildiği üzere hem orijinal hem de yaşlandırılmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Superpave şartnamesine göre orijinal numuneler üzerinde yapılan DSR deneylerinde tekerlek izi değerinin en az 1.0 kPa, yaşlandırılmış numunelerde ise 2.20 kPa olması gerekmektedir. Bu limit değerler ve her bir sıcaklık için saptanan kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) değerleri thiourea, furfural ve çinko oksit katkılı bitümler için ayrı ayrı çizelgeler halinde verilmiştir. Bu çizelgelerin en sağ kısımda ise deney sonuçları ile hesaplanan Superpave şartnamesine ait yüksek sıcaklık performans sınıfları (PG) yer almaktadır. PG sınıflarının belirlenmesinde hem orijinal hem de yaşlandırılmış bitümlerin şartname kriterlerine bakılmakta, kriterin sağlandığı son sıcaklık değerleri arasında karşılaştırmalar yapılarak küçük olan değer seçilmektedir.

Örneğin, Çizelge 7.37'de B160/220 için orijinal %4 thiourea katkılı bitümün $G^*/\sin \delta$ değerinin 1.0 kPa üzerinde olduğu son sıcaklık değeri 64°C iken, aynı bitümün yaşlandırılmış numunelerine ait limit değerinin (2.2kPa) sağlandığı son sıcaklık 70°C olarak bulunmuştur. Bu durumda bu bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64-Y şeklinde kabul edilmiştir.

Bu geçiş noktalarının daha rahat gözlemlenebilmesi açısından çizelgelerde limitlerin sağlandığı son sıcaklık değerine denk gelen tekerlek izi parametreleri $G^*/\sin \delta$ olarak gösterilmiştir. Ayrıca görselliğin artması açısından her bağlayıcı türüne ait grafikler Şekil 7.19–30'da verilmiş, bu grafiklerde orijinal ve yaşlandırılmış bitüme ait sınırlar gösterilerek katkıların tekerlek izi üzerinde yapmış olduğu pozitif etkinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Bu şekilde, saf ve antioksidan katkılı bitümlerin her katkı türü ve yüzdesi için yüksek ve daha sonra orta sıcaklık PG sınıfları belirlenmiştir. Bağlayıcıların

(PG X-Y) olarak ifade edilen PG sınıflara ait X değerleri tespit edilmiştir (Çizelgeler 7.37–44).

Çizelge 7.37. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 160/220	Orijinal	52	2,70	86	2,71	≥1.0	PG 58-Y
		58	1,18	87,2	1,18		
		64	0,537	88,1	0,538		
	Yaşlandırılmış	52	12,10	79,6	12,30	≥2.2	
		58	5,19	82,3	5,24		
		64	2,280	84,5	2,29		
		70	1,03	86	1,04		
B 160/220+4T	Orijinal	52	5,44	81,9	5,49	≥1.0	PG 64-Y
		58	2,38	84,2	2,39		
		64	1,11	85,9	1,11		
		70	0,53	87,2	0,530		
	Yaşlandırılmış	52	30,10	68,6	32,30	≥2.2	
		58	13,90	71,7	14,60		
		64	6,31	75	6,53		
		70	2,93	78,2	3,00		
B 160/220+6T	Orijinal	52	4,63	82,7	4,67	≥1.0	PG 64-Y
		58	2,07	84,8	2,07		
		64	1,018	86,3	1,022		
		70	0,508	87,4	0,508		
	Yaşlandırılmış	52	31,90	68	34,40	≥2.2	
		58	14,90	71,1	15,70		
		64	6,83	74,4	7,09		
		70	3,19	77,7	3,27		
B 160/220+8T	Orijinal	52	5,92	82,2	5,98	≥1.0	PG 64-Y
		58	2,58	84,4	2,59		
		64	1,18	86,1	1,18		
		70	0,563	87,4	0,564		
	Yaşlandırılmış	52	32,70	67,6	35,40	≥2.2	
		58	15,20	70,7	16,10		
		64	7,00	74,2	7,27		
		70	3,27	77,6	3,35		
		76	1,57	80,7	1,60		

Çizelge 7.38. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkıli bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 50/70	Orijinal	52	8,26	84,5	8,3	≥1.0	PG 64-Y
		58	3,63	86,1	3,63		
		64	1,64	87,2	1,65		
		70	0,768	88,1	0,769		
	Yaşlandırılmış	52	14,46	82,2	14,59	≥2.2	
		58	6,31	83,9	6,35		
		64	2,78	85,7	2,78		
		70	1,27	87	1,27		
B 50/70+4T	Orijinal	52	23,20	75,7	23,90	≥1.0	PG 76-Y
		58	10,30	78,6	10,50		
		64	4,60	81,3	4,65		
		70	2,13	83,6	2,14		
		76	1,02	85,5	1,02		
		82	0,514	86,9	0,514		
	Yaşlandırılmış	52	52,70	68,2	56,70	≥2.2	
		58	24,70	70,9	26,10		
		64	11,30	73,9	11,80		
		70	5,17	77,1	5,31		
		76	2,46	80	2,49		
		82	1,20	82,6	1,21		
B 50/70+6T	Orijinal	52	13,50	81,2	13,70	≥1.0	PG 70-Y
		58	5,97	83,4	6,01		
		64	2,680	85,3	2,69		
		70	1,240	86,8	1,24		
		76	0,614	87,9	0,615		
	Yaşlandırılmış	52	36,50	72,3	38,31	≥2.2	
		58	15,30	75,3	15,80		
		64	7,41	77,9	7,58		
		70	3,52	80,6	3,57		
		76	1,70	83	1,72		
B 50/70+8T	Orijinal	52	15,10	80,4	15,300	≥1.0	PG 70-Y
		58	6,58	82,7	6,630		
		64	2,94	84,7	2,950		
		70	1,36	86,4	1,370		
		76	0,68	87,5	0,680		
	Yaşlandırılmış	52	40,10	71	42,40	≥2.2	
		58	18,20	73,9	18,90		
		64	8,21	77	8,43		
		70	3,77	79,9	3,83		
		76	1,81	82,5	1,83		

Çizelge 7.37–38’de verilen thiourea katkıli bitümlere ait deney sonuçları incelendiğinde, her üç katkı oranında da katkı miktarının artmasıyla bitümlerin kompleks kayma (G*) modüllerinde büyük artışların meydana geldiği, bu artışların tekerlek izi parametrelerini (G*/sin δ) de etkileyerek bitümlerin yüksek sıcaklık sınıflarını sürekli olarak arttırdığı görülmektedir. Örneğin, Çizelge 7.38 incelendiğinde thiourea katkısının %4 oranında kullanılmasıyla bitüm sınıfını PG

64-Y'den PG 76-Y'ye yükselttiği görülmektedir. Benzer biçimde %8 oranında kullanılan thiourea katkısı bitüm sınıfını PG 70-Y'ye yükseltmiştir.

Thiourea katkılı bitümlere ait faz açısı (δ) değerleri incelendiğinde genel anlamda katkı miktarının artmasıyla faz açısı değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Faz açısı, bitümün kayıp modülünün, depolama modülüne olan oranıdır. Diğer bir ifade ile bitümün elastikliği hakkında bilgi vermektedir. Faz açısı azaldıkça bitüm daha esnek hale gelmektedir. Buna göre katkı miktarı arttıkça bitümün elastikliği artmaktadır. Ancak, Çizelge 7.38'de gösterildiği gibi B50/70'e %4'te thiourea katkısı eklenmesiyle en yüksek (G^*) ve en düşük (δ) sonuçları elde edildiği gözlenmektedir.

Çizelge 7.39. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı	Sıcaklık (°C)	G^* (kPa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 160/220	Orijinal	52	2.70	86	2.71	PG 58-Y
		58	1.18	87.2	1.18	
		64	0.537	88.1	0.538	
	Yaşlandırılmış	52	12.10	79.6	12.30	
		58	5.19	82.3	5.24	
		64	2.280	84.5	2.29	
		70	1.03	86	1.04	
B 160/220+1F	Orijinal	52	3.44	83.1	3.47	PG 58-Y
		58	1.57	84.1	1.58	
		64	0.724	84.2	0.728	
	Yaşlandırılmış	52	19.4	77.1	19.9	
		58	7.97	80.4	8.08	
		64	3.42	83.1	3.44	
		70	1.53	85.2	1.53	
B 160/220+1.5F	Orijinal	52	2.56	84.8	2.57	PG 58-Y
		58	1.17	86	1.17	
		64	0.566	86.7	0.566	
	Yaşlandırılmış	52	22.9	75.8	23.7	
		58	9.23	79.4	9.39	
		64	3.84	82.5	3.87	
		70	1.67	84.9	1.68	
B 160/220+2F	Orijinal	52	2.21	85.7	2.22	PG 58-Y
		58	1.03	87.1	1.03	
		64	0.497	88	0.497	
	Yaşlandırılmış	52	26.1	74.9	27	
		58	10.6	78.5	10.8	
		64	4.45	81.7	4.5	
		70	1.96	84.3	1.97	

Çizelge 7.40. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 50/70	Orijinal	52	8.26	84.5	8.3	≥1.0	PG 64-Y
		58	3.63	86.1	3.63		
		64	1.64	87.2	1.65		
		70	0.768	88.1	0.769		
	Yaşlandırılmış	52	14,46	82.2	14,59	≥2.2	
		58	6,31	83.9	6,35		
		64	2,78	85.7	2,78		
		70	1,27	87	1,27		
B 50/70+1F	Orijinal	52	13.5	81.8	13.6	≥1.0	PG 70-Y
		58	5.67	84	5.7		
		64	2.47	85.7	2.48		
		70	1.13	86.9	1.13		
		76	0.561	87.8	0.561		
	Yaşlandırılmış	52	33.8	75.4	34.9	≥2.2	
		58	14.1	78.6	14.4		
		64	5.88	81.5	5.95		
		70	2.6	83.9	2.61		
		76	1.21	85.9	1.21		
B 50/70+1,5F	Orijinal	52	6.25	84.1	6.29	≥1.0	PG 64-Y
		58	2.82	85.2	2.83		
		64	1.34	85.8	1.34		
		70	0.66	86.2	0.66		
	Yaşlandırılmış	52	25.4	77.5	26.0	≥2.2	
		58	9.97	81	10.1		
		64	4.34	83.3	4.37		
		70	1.99	85.2	2		
B 50/70+2F	Orijinal	52	11.9	82.3	12	≥1.0	PG 70-Y
		58	5.05	84.4	5.08		
		64	2.19	86	2.19		
		70	1.01	87.1	1		
		76	0.493	88	0.493		
	Yaşlandırılmış	52	32.7	75.6	33.8	≥2.2	
		58	13.7	78.8	14		
		64	5.74	81.7	5.8		
		70	2.53	84.2	2.54		
		76	1.18	86.1	1.18		

Çizelge 7.39–40'ta saf ve furfural katkılı bitümlere ait DSR sonuçları yer almaktadır. Çizelge 7.39'da görüldüğü üzere, %1 furfural katkısı saf B160/220 penetrasyonlu bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfı PG58-Y'de kalmıştır. Aynı şekilde %1,5 ve %2 furfural katkılı bitümün de performans sınıfı PG58-Y'de kalmıştır. Katkı yüzde oranının artmasıyla kompleks kayma modülü ve faz açısı ve dolayısıyla tekerlek izinde önemli bir değişiklik olmamaktadır.

Çizelge 7.40'ta ise furfural katkılı bitümlere ait DSR sonuçları yer almaktadır. Burada saf B50/70 için %1,5 haricinde katkı oranının artmasıyla hem kompleks kayma modülü hem de tekerlek izi parametreleri sürekli artış göstermektedir. %1 ve %2'lik katkı oranlarına ait modifiye bitümler PG70-Y sınıfına dahil olurken, %1,5'luk furfural katkılı bitüm PG64-Y sınıfında kalmıştır.

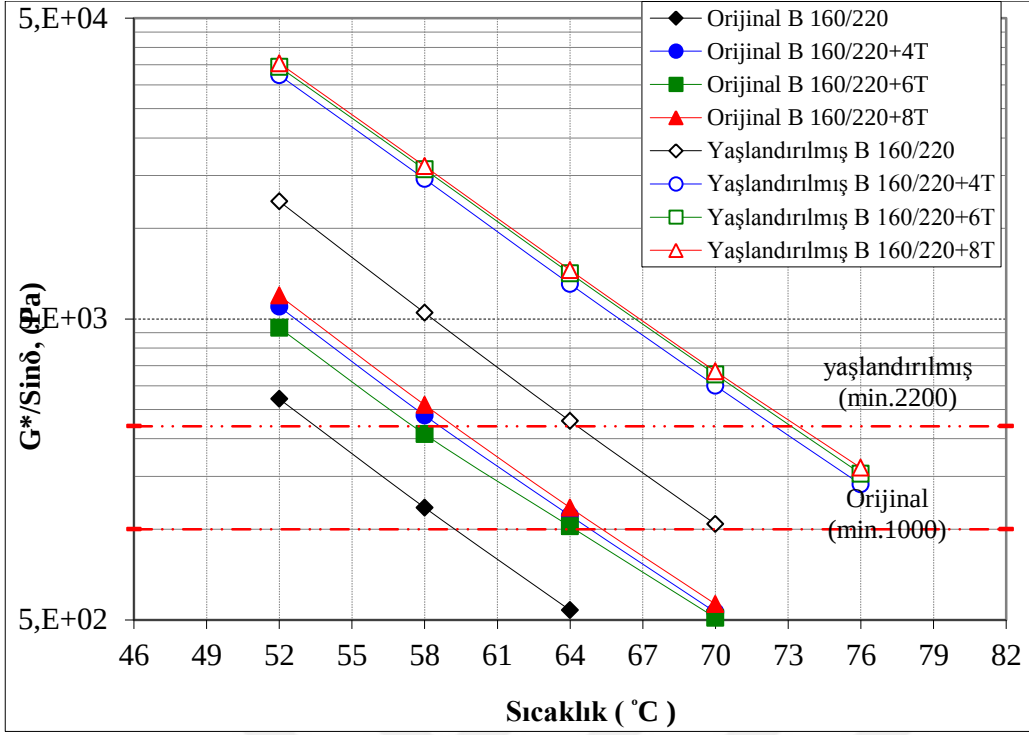
Çizelge 7.41. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 160/220	Orijinal	52	2,70	86	2,71	≥1.0	PG 58-Y
		58	1,18	87,2	1,18		
		64	0,537	88,1	0,538		
	Yaşlandırılmış	52	12,10	79,6	12,30	≥2.2	
		58	5,19	82,3	5,24		
		64	2,280	84,5	2,29		
		70	1,03	86	1,04		
B 160/220+1ZnO	Orijinal	52	5,34	83,8	5,37	≥1.0	PG 64-Y
		58	2,2	85,7	2,2		
		64	0,996	87	1,0		
	Yaşlandırılmış	52	28,5	72,3	29,9	≥2.2	
		58	12,1	75,8	12,4		
		64	5,18	79,2	5,28		
		70	2,3	82,2	2,32		
B 160/220+1,5ZnO	Orijinal	52	3,17	85,6	3,18	≥1.0	PG 58-Y
		58	1,39	86,8	1,39		
		64	0,623	87,9	0,623		
	Yaşlandırılmış	52	18,2	77,4	18,6	≥2.2	
		58	7,37	80,7	7,47		
		64	3,09	83,5	3,11		
		70	1,37	85,6	1,37		
B 160/220+2ZnO	Orijinal	52	3,98	84,6	3,98	≥1.0	PG 58-Y
		58	1,77	86,1	1,77		
		64	0,802	87,1	0,802		
	Yaşlandırılmış	52	21,9	76,2	22,6	≥2.2	
		58	8,96	79,7	9,11		
		64	3,73	82,7	3,76		
		70	1,63	85,1	1,64		

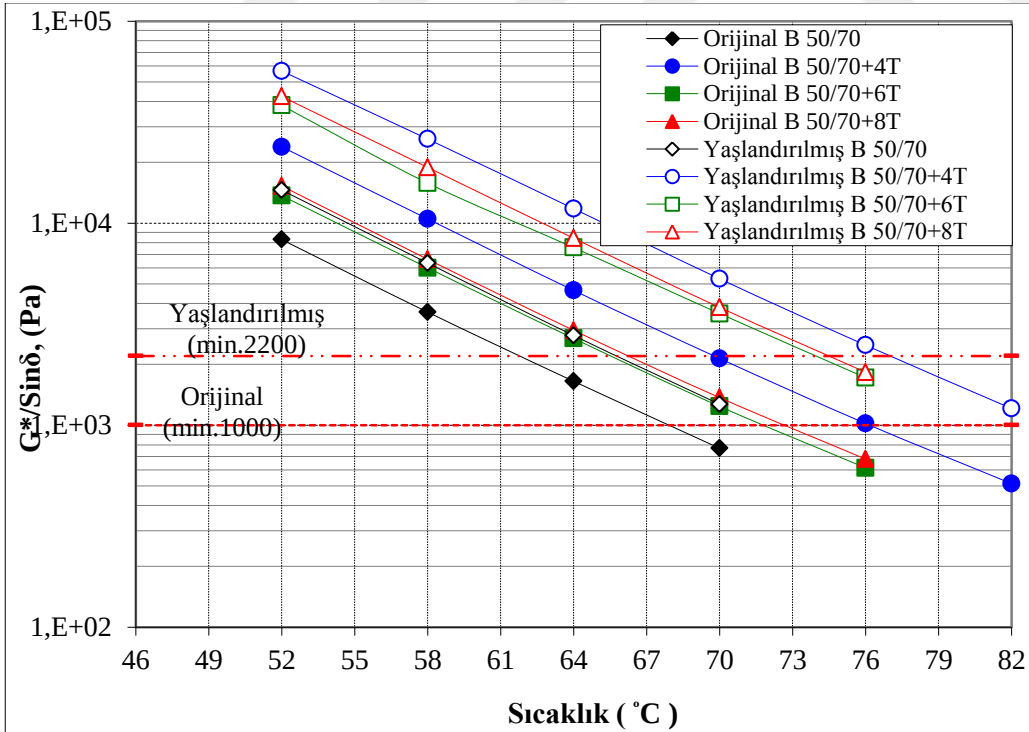
Çizelge 7.42. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sinδ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 50/70	Orijinal	52	8,26	84.5	8.3	≥1.0	PG 64-Y
		58	3.63	86.1	3.63		
		64	1.64	87.2	1.65		
		70	0.768	88.1	0.769		
	Yaşlandırılmış	52	14,46	82.2	14,59	≥2.2	
		58	6,31	83.9	6,35		
		64	2,78	85.7	2,78		
		70	1,27	87	1,27		
B 50/70+1ZnO	Orijinal	52	9.02	84.5	9.5	≥1.0	PG 64-Y
		58	33.77	86	3.78		
		64	1.65	87.2	1.65		
		70	0.746	88.3	0.746		
	Yaşlandırılmış	52	19.6	80.4	19.8	≥2.2	
		58	8.07	82.9	8.13		
		64	3.33	85.1	3.34		
		70	1.46	86.7	1.46		
B 50/70+1,5ZnO	Orijinal	52	9.14	84.3	9.18	≥1.0	PG 64-Y
		58	3.9	85.9	3.91		
		64	1.74	87.2	1.75		
		70	0.8	88.2	0.8		
	Yaşlandırılmış	52	22.1	79.3	22.5	≥2.2	
		58	9.25	82	9.34		
		64	3.96	84.3	3.98		
		70	1.75	86	1.76		
B 50/70+2ZnO	Orijinal	52	10.8	83.3	10.9	≥1.0	PG 70-Y
		58	3.9	85.1	4.73		
		64	1.74	86.6	2.1		
		70	0.998	87.7	1.0		
	Yaşlandırılmış	52	23.2	78.8	23.6	≥2.2	
		58	12.1	79	12.4		
		64	5.82	81.3	5.89		
		70	2.74	83.5	2.76		
		76	1.3	85.4	1.3		

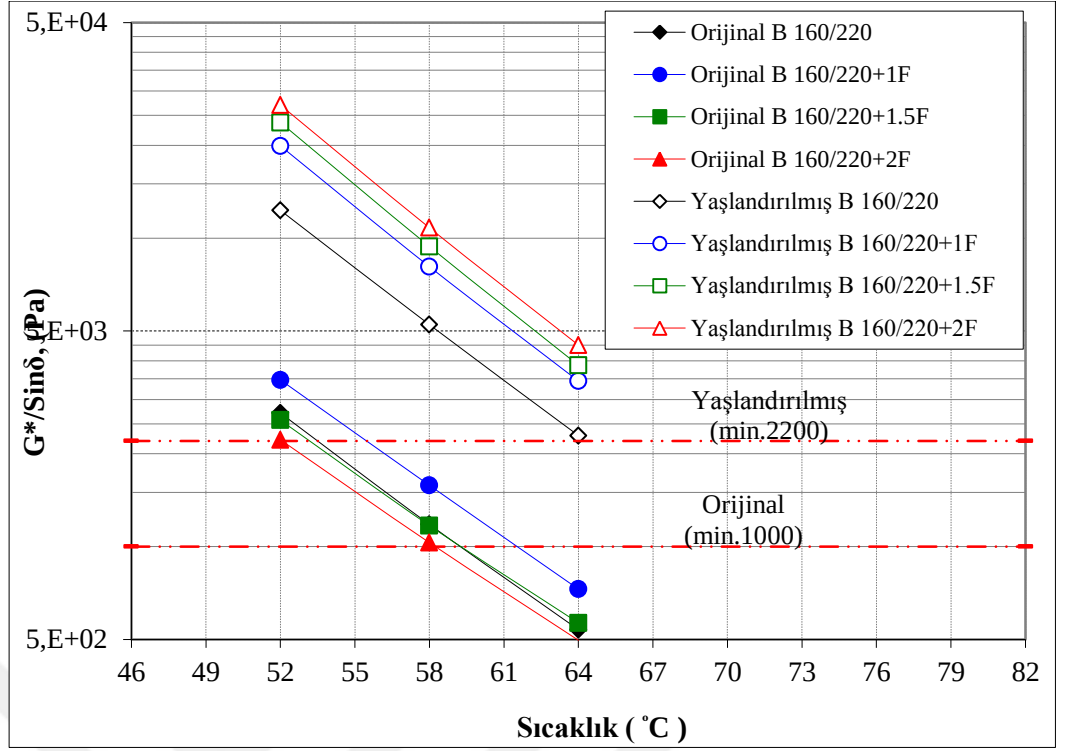
Çinko oksit katkısı ile modifiye edilen bitüme ait kompleks kayma modülü, faz açısı ve tekerlek izi gibi reolojik parametreler Çizelge 7.41–42’de verilmiştir. Çinko oksit katkı oranının artmasıyla kayma kuvvetine karşı direnci gösteren kompleks kayma dayanımı sürekli artmıştır. Örnek olarak B 160/220 için %1 çinko oksit katkılı bitümün performans sınıfı PG64-Y olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde B 50/70 için %2 çinko oksit katkılı bitümün performans sınıfı PG70-Y olarak belirlenmiştir.



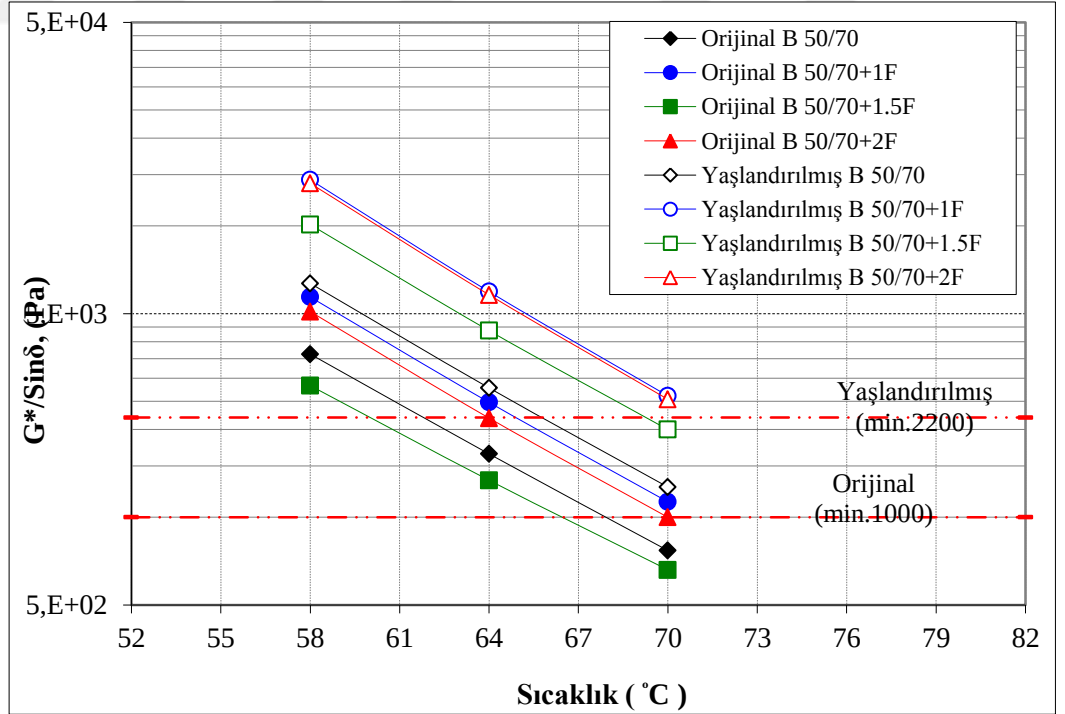
Şekil 7.19. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



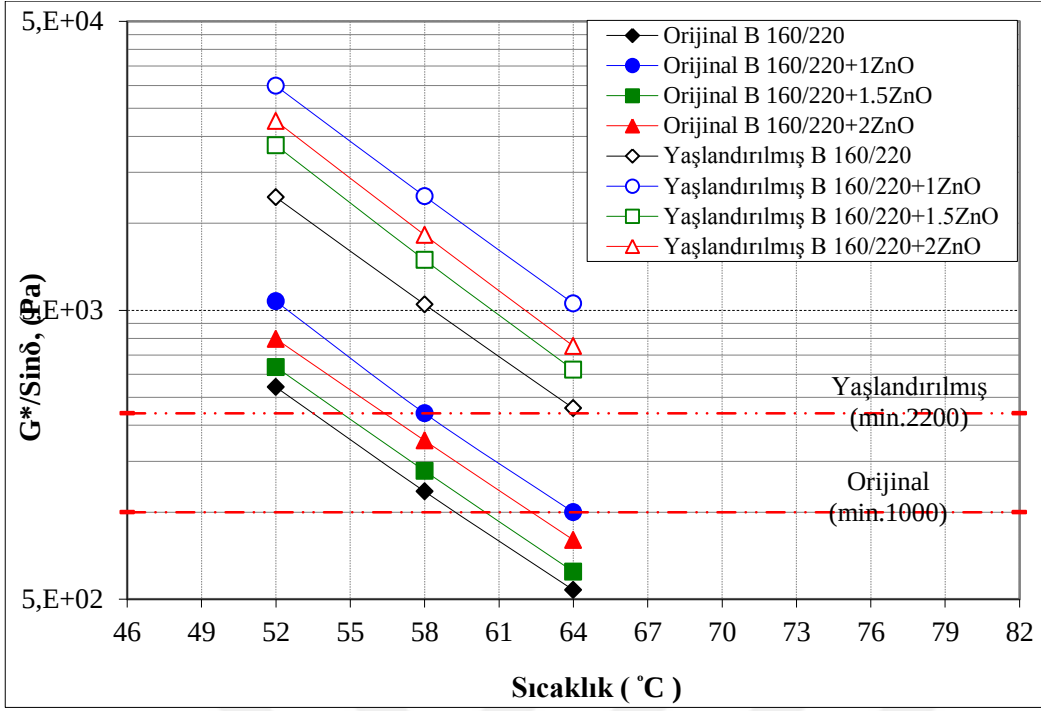
Şekil 7.20. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



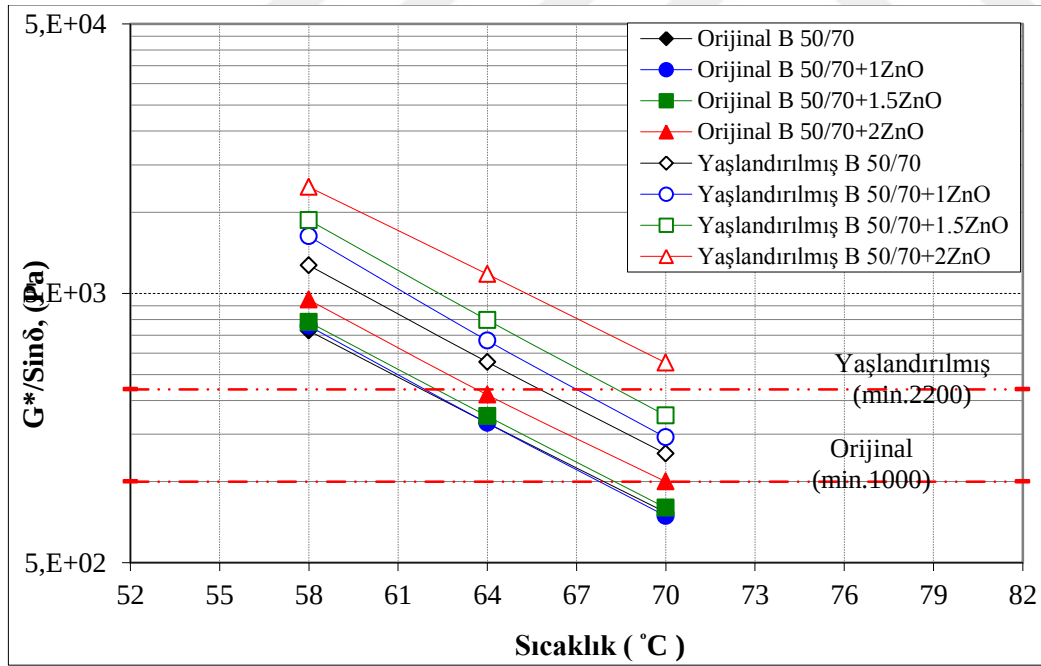
Şekil 7.21. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 7.22. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.23. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.24. Orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış B 50/70 ve ZnO katkılı bitümlerin tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.

7.2.3.2. Yorulma çatlakları sonuçları

Bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki performansı yorulmaya karşı direncine bağlıdır. Superpave bağlayıcı şartnamesinde bunun için RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR deneyi ile bulunan $G^*\sin\delta$ değerinin maksimum 5000 kPa olması şartı bulunmaktadır. DSR deneylerinden elde edilen yorulma çatlakları $G^*\sin\delta$ parametreleri ile ilgili sonuçlar Çizelge 7.43–44 ve Şekil 7.25–30’da verilmiştir.

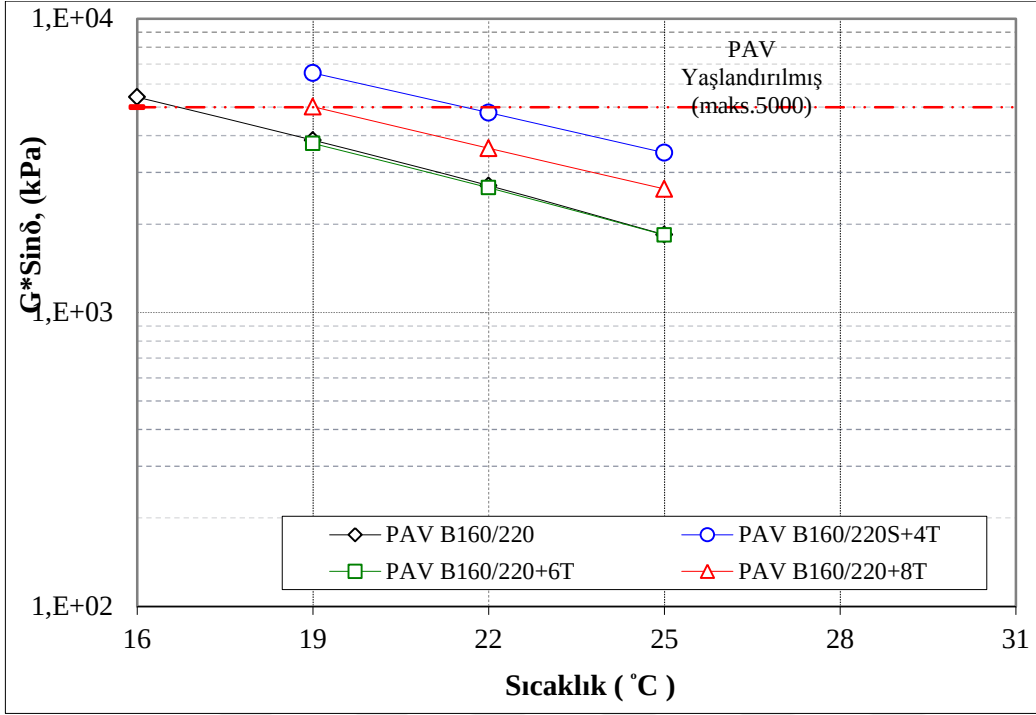


Çizelge 7.43. PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve antioksidan katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

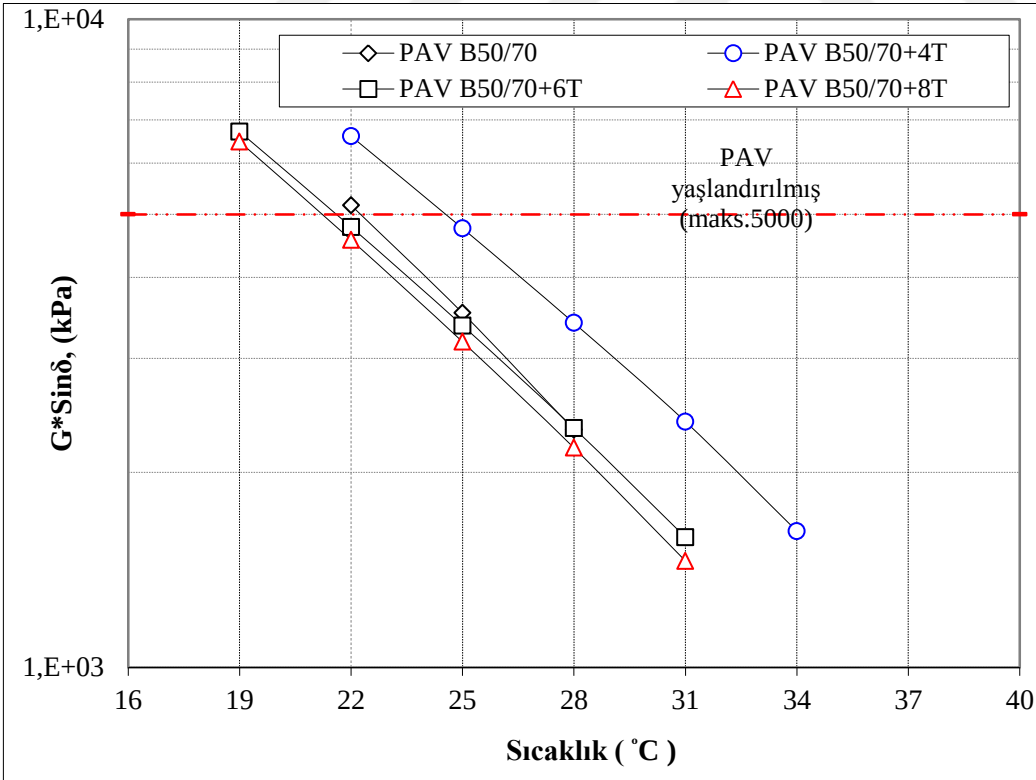
Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G* $\sin\delta$ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 160/220	Yaşlandırılmış	25	2580	45.6	1841	≤5000	PG 58-Y
		22	4000	42.6	2706		
		19	6040	39.7	3863		
		16	8990	37	5410		
B 160/220 +4T	Yaşlandırılmış	25	5690	38	3500	≤5000	PG 64-Y
		22	8130	36.1	4793		
		19	11600	34.2	6539		
B 160/220 +6T	Yaşlandırılmış	28	2670	43.5	1837	≤5000	PG 64-Y
		25	4030	41.3	2661		
		22	5960	39.2	3764		
		19	8700	37.1	5254		
B 160/220 +8T	Yaşlandırılmış	25	4120	39.8	2636	≤5000	PG 64-Y
		22	5890	38	3625		
		19	8530	36.1	5020		
B 160/220 +1F	Yaşlandırılmış	28	2,410	47.7	1,787	≤5000	PG 58-Y
		25	3,760	44.7	2,650		
		22	5,720	41.9	3,823		
		19	8,560	39.2	5,408		
B 160/220 +1,5F	Yaşlandırılmış	25	4,130	43.1	2,825	≤5000	PG 58-Y
		22	6,320	40.2	4,079		
		19	9,380	37.5	5,706		
B 160/220 +2F	Yaşlandırılmış	25	2,570	43.2	1,762	≤5000	PG 58-Y
		22	3,840	40.6	2,498		
		19	5,450	38.4	3,379		
		16	7,530	36.1	4,443		
		13	9,820	34.3	5,531		
B 160/220 +1ZnO	Yaşlandırılmış	28	2,490	45.9	1,789	≤5000	PG 64-Y
		25	3,860	43	2,634		
		22	5,770	40.5	3,752		
		19	8,470	38.3	5,251		
B 160/220 +1,5ZnO	Yaşlandırılmış	28	2,460	47.6	1,816	≤5000	PG 58-Y
		25	3,860	44.5	2,705		
		22	5,890	41.6	3,915		
		19	8,860	38.8	5,552		
B160/220 +2ZnO	Yaşlandırılmış	25	4,100	44.1	2,854	≤5000	PG 58-Y
		22	6,340	41	4,162		
		19	9,480	38.2	5,861		

Çizelge 7.44. PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve antioksidan katkılı bağlayıcılara ait DSR sonuçları.

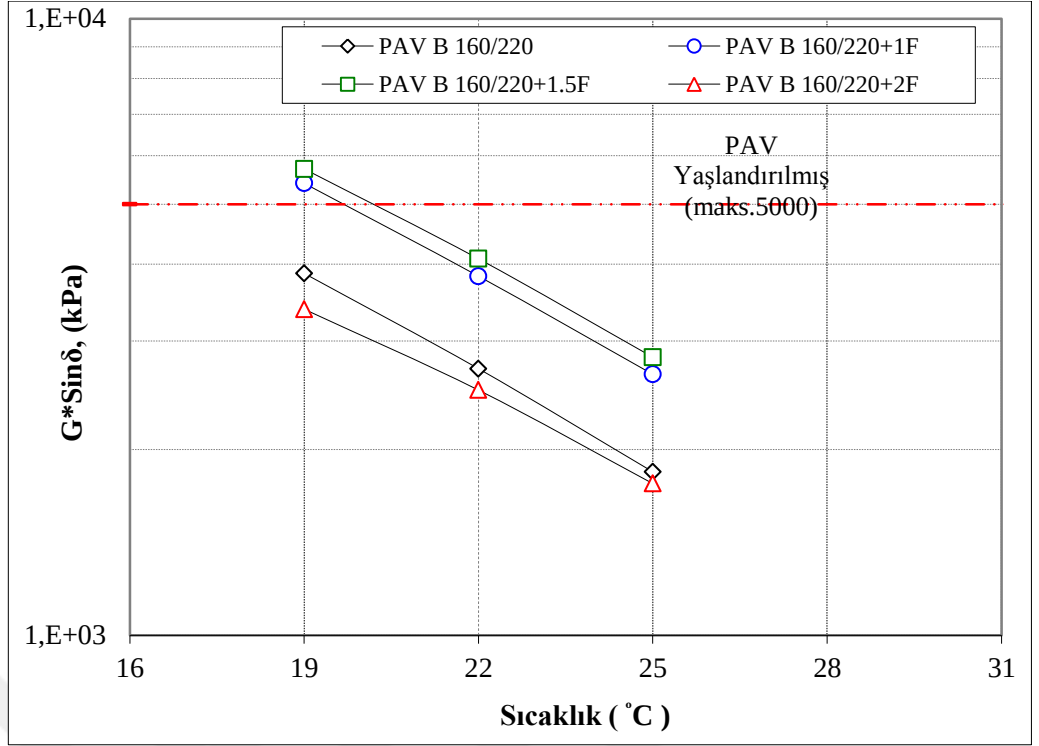
Bağlayıcı		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G* $\sin\delta$ (kPa)	Limit Değerler (kPa)	Sınıf
B 50/70	Yaşlandırılmış	28	3070	49.2	2325	≤ 5000	PG 64-Y
		25	4920	45.8	3523		
		22	7650	42.5	5166		
B 50/70 +4T	Yaşlandırılmış	34	2230	46.5	1623	≤ 5000	PG 76-Y
		31	3440	44.1	2395		
		28	5080	42.1	3400		
		25	7420	39.9	4760		
		22	10800	37.8	6602		
B 50/70 +6T	Yaşlandırılmış					≤ 5000	PG 70-Y
		31	2190	46.4	1588		
		28	3370	44	2340		
		25	5060	41.7	3369		
		22	7520	39.5	4782		
		19	11100	37.2	6707		
B 50/70 +8T	Yaşlandırılmış	31	1960	48.2	1460	≤ 5000	PG 70-Y
		28	3050	45.7	2182		
		25	4640	43.3	3180		
		22	6980	40.9	4567		
		19	10400	38.6	6473		
B 50/70 +1F	Yaşlandırılmış	31	2700	49	2036	≤ 5000	PG 70-Y
		28	4240	45.8	3039		
		25	6500	42.7	4411		
		22	9960	39.6	6342		
B 0/70 +1,5 F	Yaşlandırılmış	31	2,460	50.3	1,896	≤ 5000	PG 64-Y
		28	3,910	47.2	2865		
		25	6,090	44	4232		
		22	9,360	40.9	6134		
B 50/70 +2 F	Yaşlandırılmış	31	2,360	49.4	1793	≤ 5000	PG 70-Y
		28	3,740	46.2	2704		
		25	5,770	43.2	3950		
		22	8,760	40.2	5657		
B 50/70 +1ZnO	Yaşlandırılmış	34				≤ 5000	PG 64-Y
		28	2,600	52	2,053		
		25	4,310	48.2	3,209		
		22	6,810	44.6	4,777		
B 50/70 +1,5ZnO	Yaşlandırılmış	19	10,500	41.1	6,905	≤ 5000	PG 64-Y
		34					
		31	1,820	53.5	1,460		
		28	2,970	50	2,279		
		25	4,720	46.6	3,431		
B 50/70 +2ZnO	Yaşlandırılmış	22	7,300	43.4	5,018	≤ 5000	PG 70-Y
		34					
		31	1,530	53.9	1,235		
		28	2,500	50.4	1,930		
		25	3,990	47.1	2,920		
		22	6,220	43.7	4,298	≤ 5000	
		19	9,510	40.4	6,169		



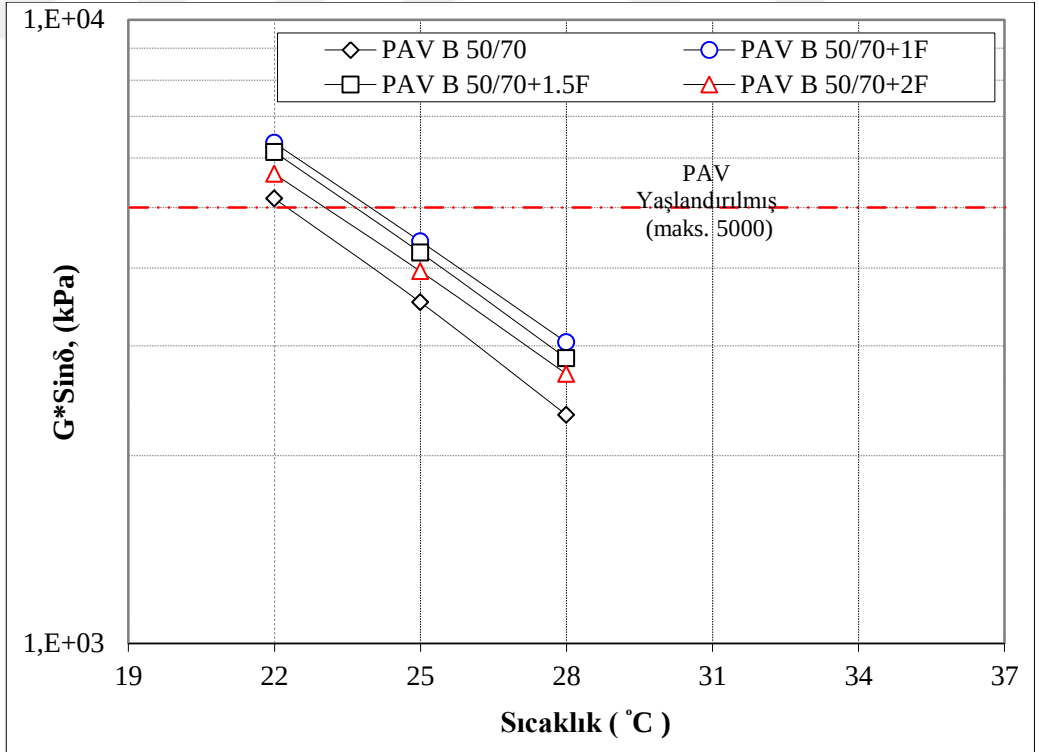
Şekil 7.25. PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve T katkıli bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



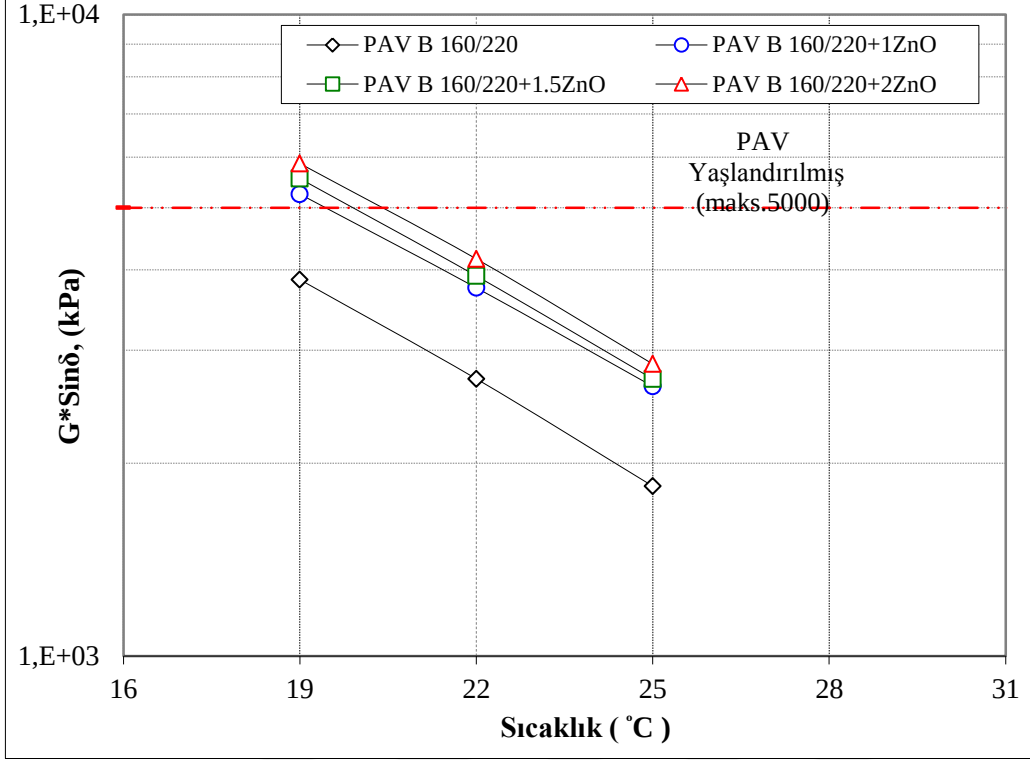
Şekil 7.26. PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve T katkıli bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



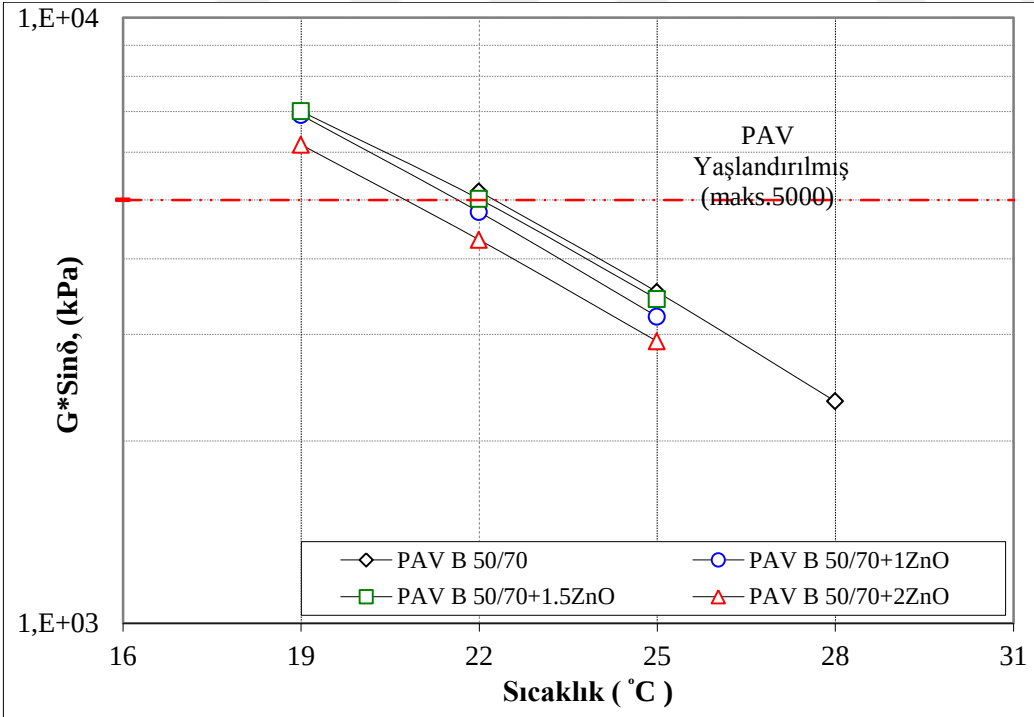
Şekil 7.27. PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve F katkıli bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.28. PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve F katkıli bitümlerin yorulma çatlağı parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.29. PAV ile yaşlandırılmış saf B 160/220 ve ZnO katkılı bitümlerin yorulma çatlak parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.

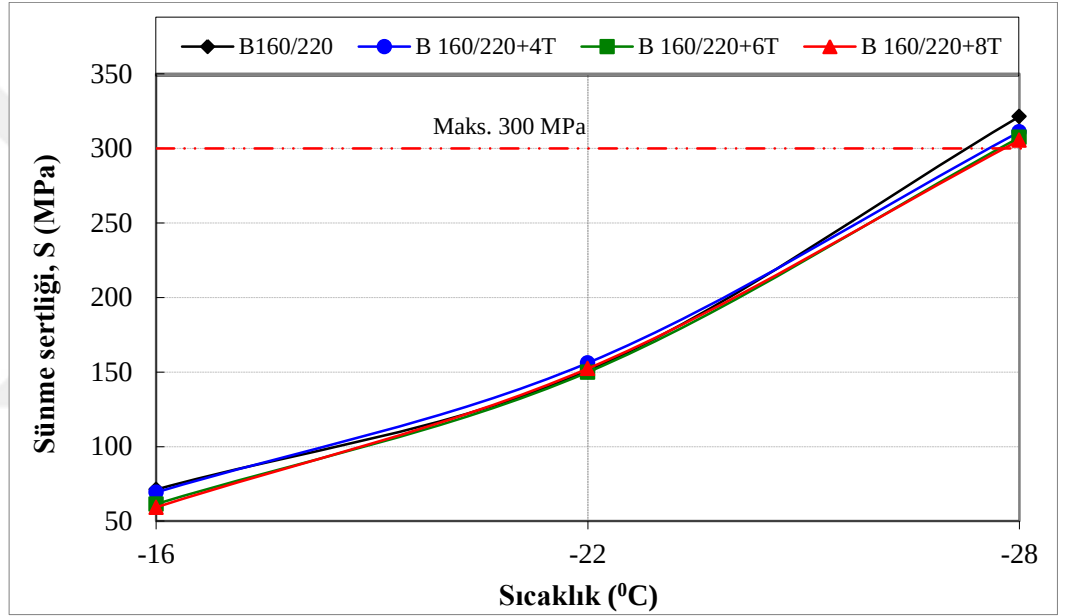


Şekil 7.30. PAV ile yaşlandırılmış saf B 50/70 ve ZnO katkılı bitümlerin yorulma çatlak parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.

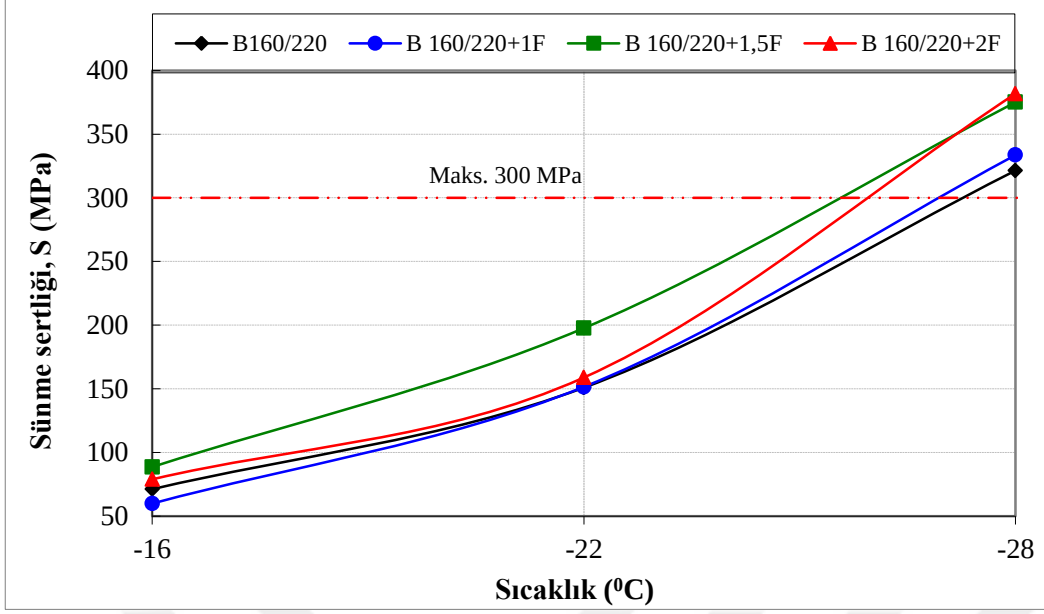
Saf ve modifiye bağlayıcıların G^* 'sinin değeri Şekil 7.25–30'da verilmiştir. Sonuçlara göre, genel olarak antioksidan katkıli bağlayıcılara ait sonuçlar saf bitüme göre orta sıcaklıkta yorulma çatlaklarının oluşumu bakımından daha iyi performans göstermiştir.

7.2.4 Kiriş eğme reometresi (BBR) deney sonuçları

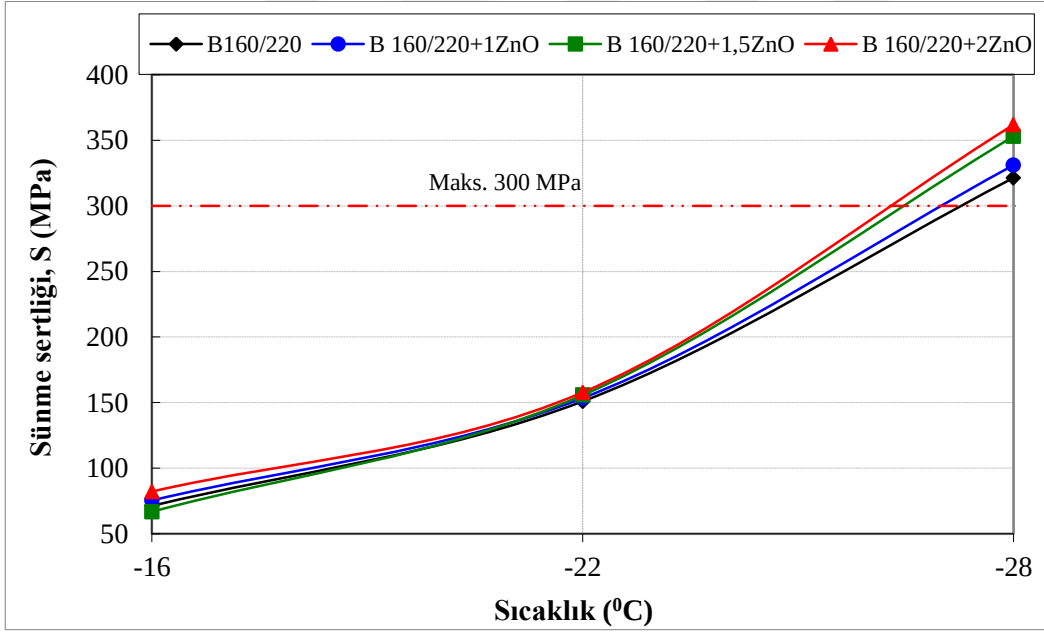
BBR cihazı kullanılarak uzun süreli yaşlandırılmış saf ve antioksidan katkıli bitümlerin her katkı türü ve yüzdesi için düşük sıcaklık PG sınıfları belirlenmiştir. Bağlayıcıların (PG X-Y) olarak ifade edilen PG sınıflara ait Y değerleri tespit edilmiştir (Şekil 7.31–42 ve Çizelgeler 7.45–46).



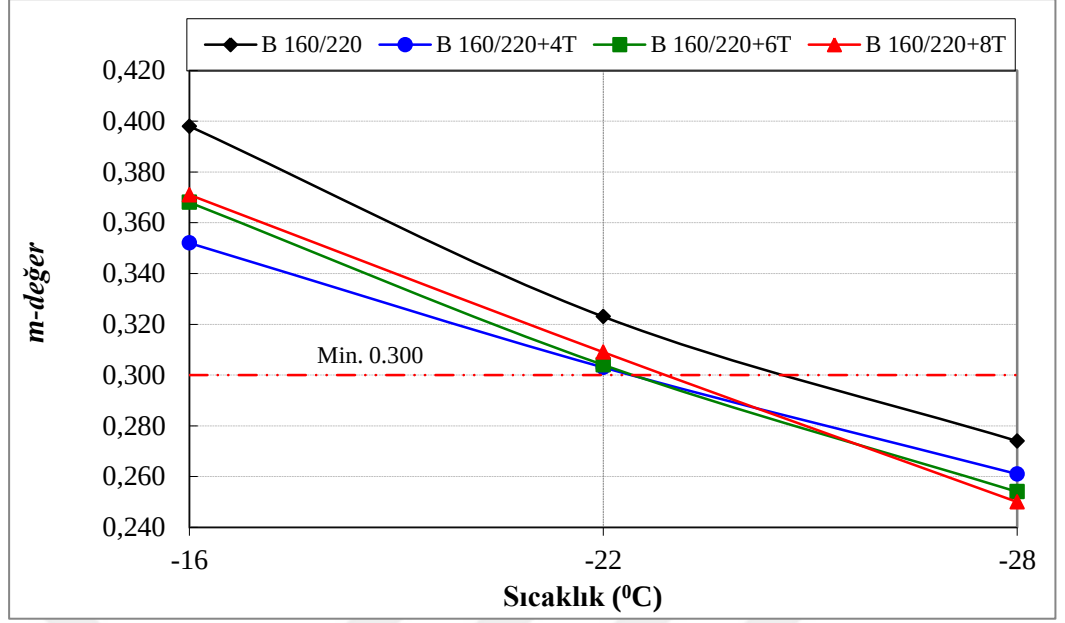
Şekil 7.31. Saf B 160/220 ile T katkıli bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



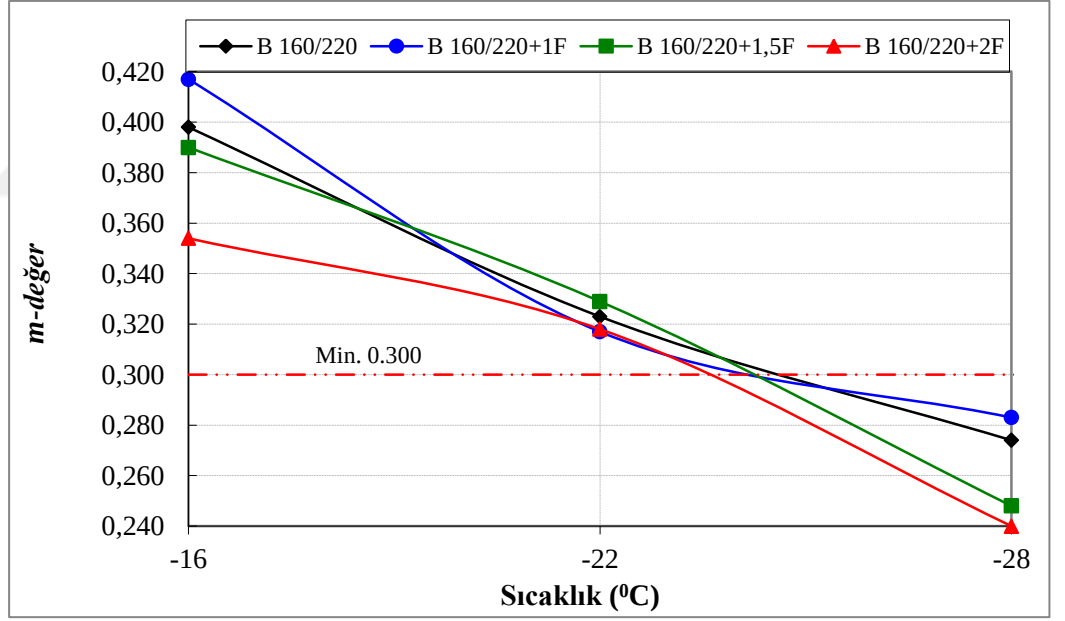
Şekil 7.32. Saf B 160/220 ile F katkıli bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



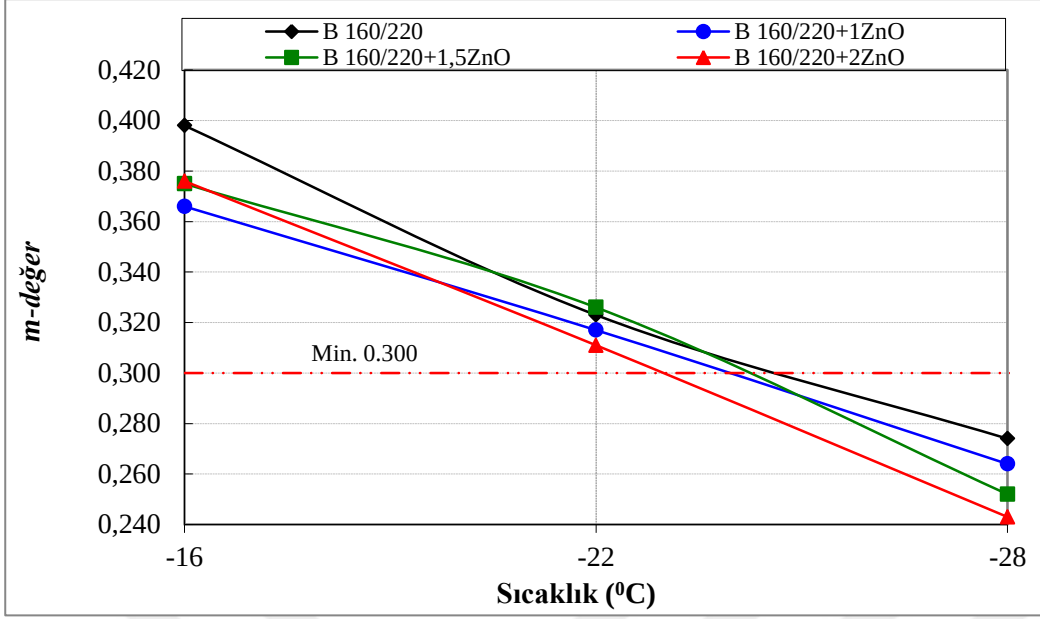
Şekil 7.33. Saf B 160/220 ile ZnO katkıli bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



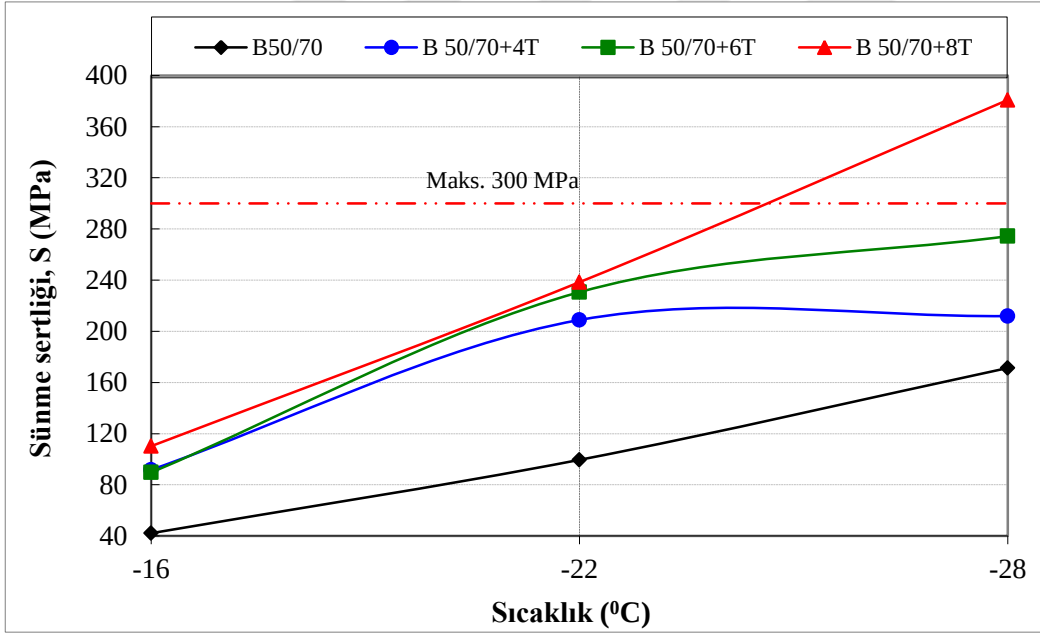
Şekil 7.34. Saf B 160/220 ile T katkılı bitümelerin m -değer'lerinin sıcaklıkla değişimi.



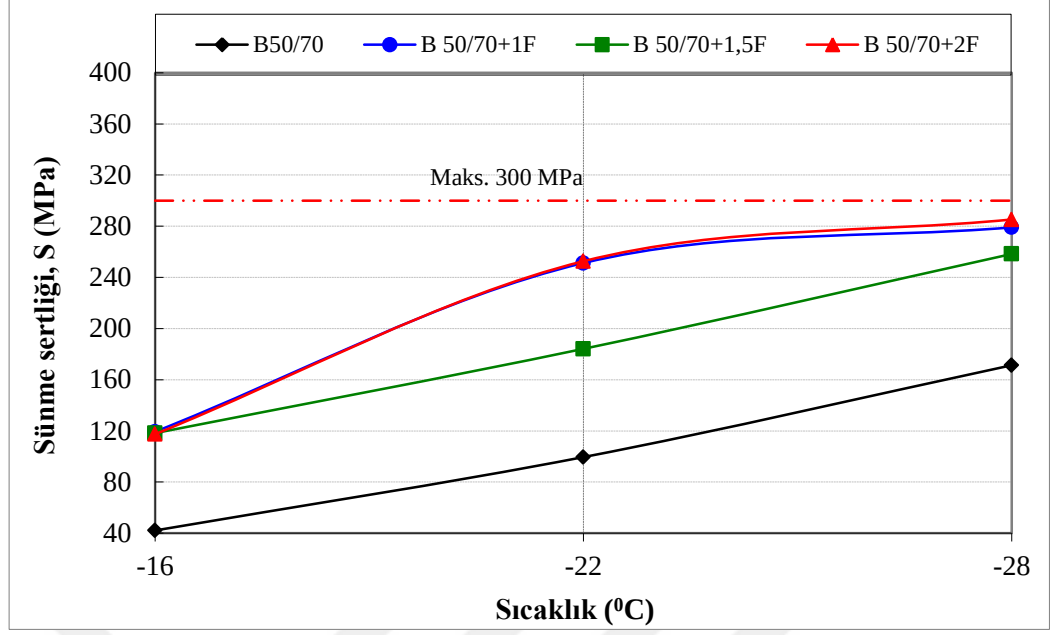
Şekil 7.35. Saf B 160/220 ile F katkılı bitümelerin m -değer'lerinin sıcaklıkla değişimi.



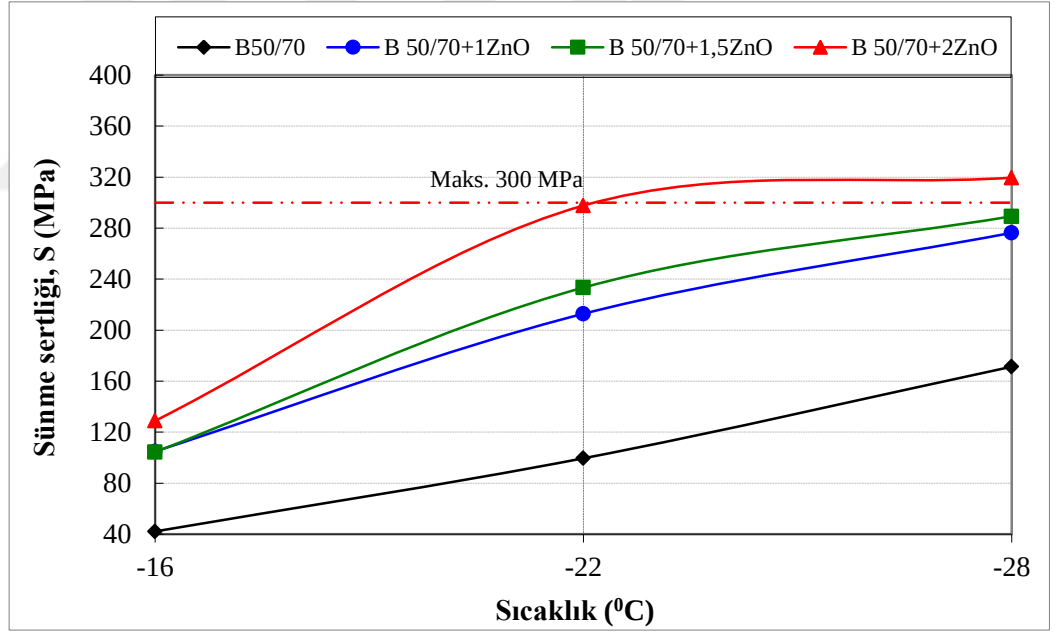
Şekil 7.36. Saf B 160/220 ile ZnO katkılı bitümlerin m -değer'lerinin sıcaklıkla değişimi.



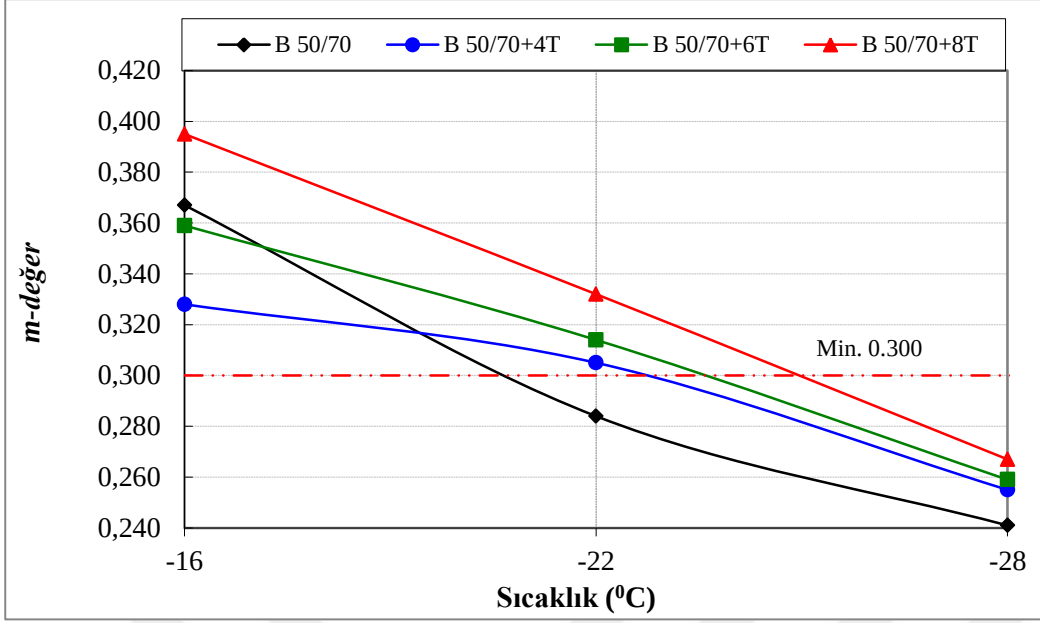
Şekil 7.37. Saf B 50/70 ile T katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



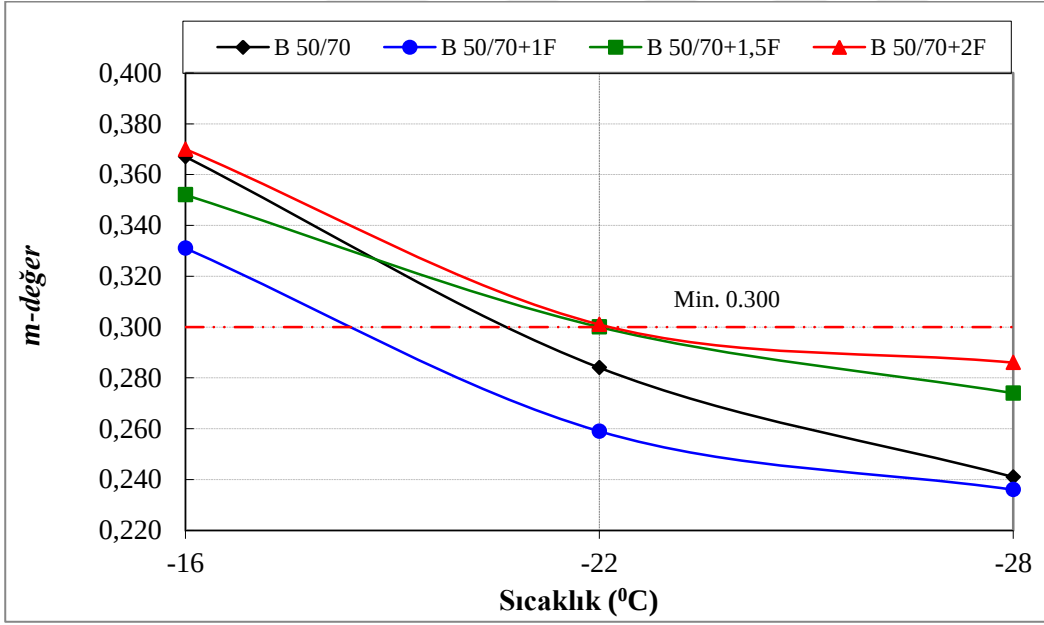
Şekil 7.38. Saf B 50/70 ile F katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



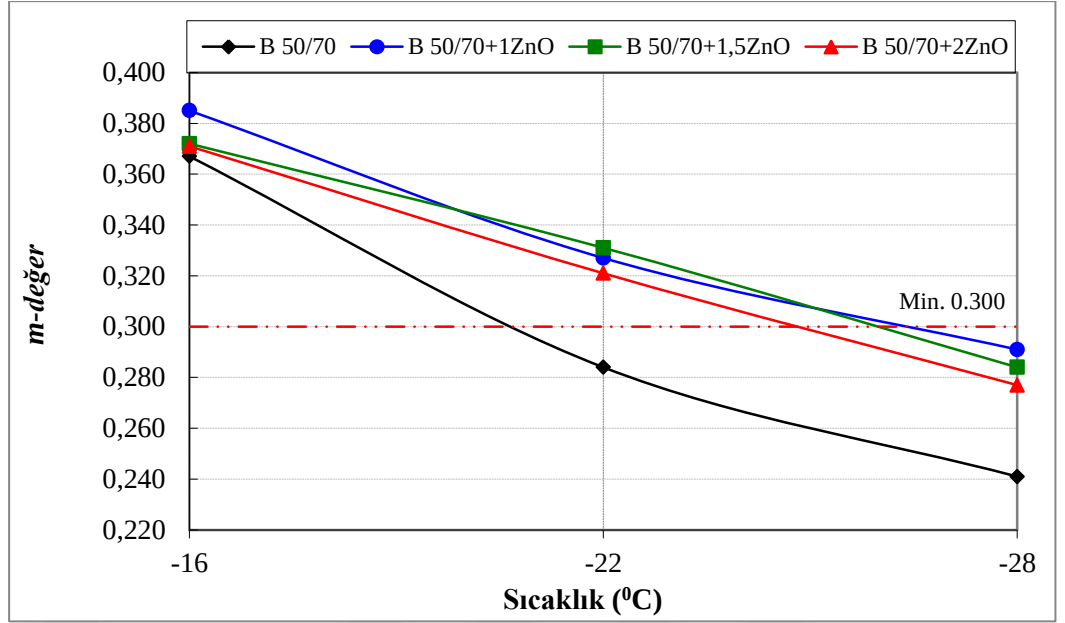
Şekil 7.39. Saf B 50/70 ile ZnO katkılı bitümlerin sünme sertliklerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.40. Saf B 50/70 ile T katkılı bitümlerin *m-değer*'lerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.41. Saf B 50/70 ile F katkılı bitümlerin *m-değer*'lerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7.42. Saf B 50/70 ile ZnO katkılı bitümlerin *m-değer*'lerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 7.31–42’de görüldüğü gibi, B 50/70 için katkılı bitümlerde düşük sıcaklık performansının saf bitümün performansına göre genel olarak daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, B 160/220 için katkılı bitümlerde düşük sıcaklık derecesinde belirgin gelişme görülmemiştir. T ve ZnO katkılı bitümlerin düşük sıcaklık performansının genellikle bir sınıf azaldığı, F katkılı bitümlerde ise %1 oranında çok az bir azalma olduğu ve saf bitüm sınıfı ile aynı performans sınıfı içerisinde kaldığı görülmüştür. Ancak %1,5 ile %2 oranında F katkılı bitümlerin düşük sıcaklık performansının genellikle bir sınıf azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, B 160/220 için antioksidan katkılı bitümlerde T, F ve ZnO katkısının saf bitümün düşük sıcaklık performansını değiştirmedeği görülmüştür.

Çizelge 7.45. Saf B 160/220 ve antioksidan modifiye bitümlerin farklı sıcaklıklardaki BBR deney sonuçları.

Bağlayıcı	Test Sıcaklığı						Sınıf
	-16 °C		-22 °C		-28 °C		
	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	
B 160/220	71.24	0.398	150.96	0.323	321.38	0.274	PG 58-22
B 160/220+4T	69.32	0.352	156.15	0.303	311.12	0.261	PG 64-22
B 160/220+6T	61.48	0.368	149.92	0.304	307.36	0.254	PG 64-22
B 160/220+8T	59.31	0.371	152.37	0.309	305.45	0.250	PG 64-22
B 160/220+1F	59,98	0,417	151,58	0,317	333.56	0.283	PG 58-22
B 160/220+1,5F	88,69	0,390	197,69	0,329	375,04	0,248	PG 58-22
B 160/220+2F	78,98	0,354	158,92	0,318	381.75	0.240	PG 58-22
B 160/220+1ZnO	75,41	0,366	153,45	0,317	331.08	0.264	PG 64-22
B160/220+1,5ZnO	66,77	0,375	155,68	0,326	353,02	0,252	PG 58-22
B 160/220+2ZnO	82,18	0,376	157,80	0,311	361.89	0.243	PG 58-22

Çizelge 7.46. Saf B 50/70 ve modifiye bitümlerin farklı sıcaklıklardaki BBR deney sonuçları.

Bağlayıcı	Test Sıcaklığı						Sınıf
	-16 °C		-22 °C		-28 °C		
	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	sertlik (MPa)	<i>m- değeri</i>	
B 50/70	42.13	0.367	99.50	0.284	171.32	0.2410	PG 64-16
B 50/70+4T	91.70	0.328	208.87	0.305	211.9	0.255	PG 76-22
B 50/70+6T	89.62	0.359	230.62	0.314	274.35	0.259	PG 70-22
B 50/70+8T	110.20	0.395	238.43	0.332	380.88	0.267	PG 70-22
B 50/70+1F	119,37	0,331	251,24	0,259	279.11	0.236	PG 70-16
B 50/70+1,5F	118,25	0,352	184,15	0,300	258.32	0.274	PG 64-22
B 50/70+2F	117,47	0,370	252,67	0,301	285.29	0.286	PG 70-22
B 50/70+1ZnO	104,92	0,385	212,85	0,327	276.33	0.291	PG 64-22
B 50/70+1,5ZnO	104,41	0,372	233,39	0,331	289.30	0.284	PG 64-22
B 50/70+2ZnO	128,88	0,371	297,74	0,321	319.61	0.277	PG 70-22

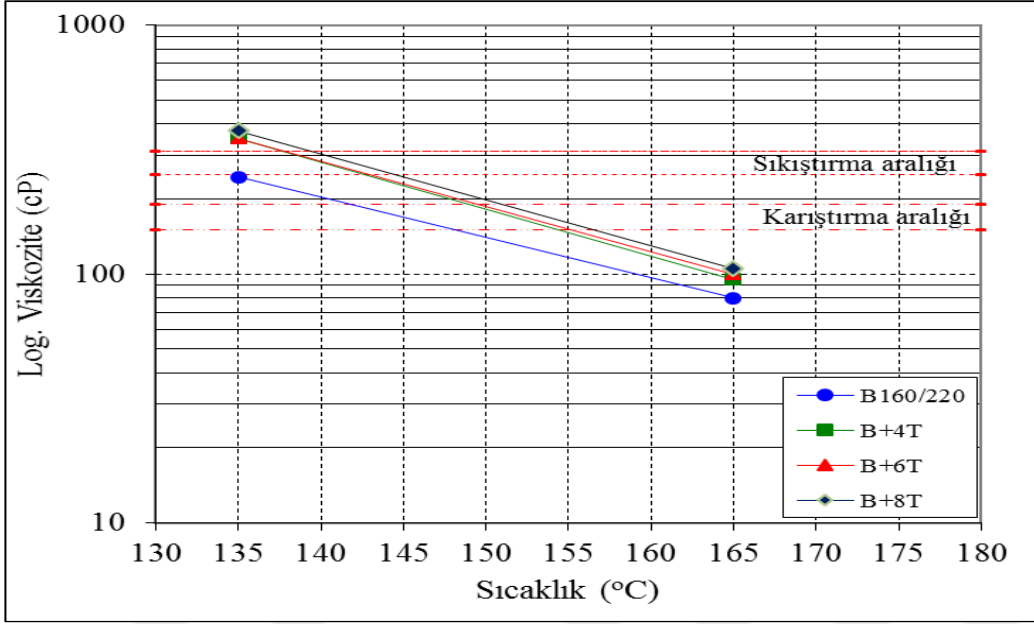
Çizelge 7.45 ve Çizelge 7.46’da görüldüğü gibi ve antioksidan katkıların sağladıkları PG sınıflarına göre, T katkısının B 160/220 ve B 50/70 bitümlere optimum ilave etme oranı, % 4 olarak tespit edilmiştir. F katkısının B 160/220 bitüm üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığı, B 50/70 bitüme ise optimum ilave etme oranının % 2 olarak tavsiye edilebileceği görülmektedir. ZnO katkısının 160/220 bitüme optimum ilave etme oranının % 1 ve B 50/70 bitüme ise % 2 olarak tespit edilmiştir.

7.2.5 Dönel viskozite (RV) deney sonuçları

Brookfield DV-II+Pro Extra rotational viscometer (RV) cihazı kullanılarak saf ve antioksidan modifiye bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki (135°C ve 165°C) akıcılıkları tespit edilmiştir. Saf ve thiourea, furfural, ve çinko oksit katkılı bağlayıcıların sıcaklık değişimiyle ölçülen viskozite değerleri sırasıyla Çizelge 7.47–52’de ve Şekil 7.43–48’de verilmiştir. Ayrıca, yardımcı program kullanılarak (Excel) logaritmik viskozite denklemleri bulunan bağlayıcıların bu denklemlerden karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da hesaplanmış, bu değerler çizelgelerin sağ kısmında gösterilmiştir.

Çizelge 7.47. Saf B 160/220 ve thiourea katkılı bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 160/220	245	80	1	1	143-149	130-136
B 160/220+4T	350	95	1,43	1,19	151-156	139-144
B 160/220+6T	350	100	1,43	1,25	149-154	137-142
B 160/220+8T	375	105	1,53	1,31	153-158	141-146

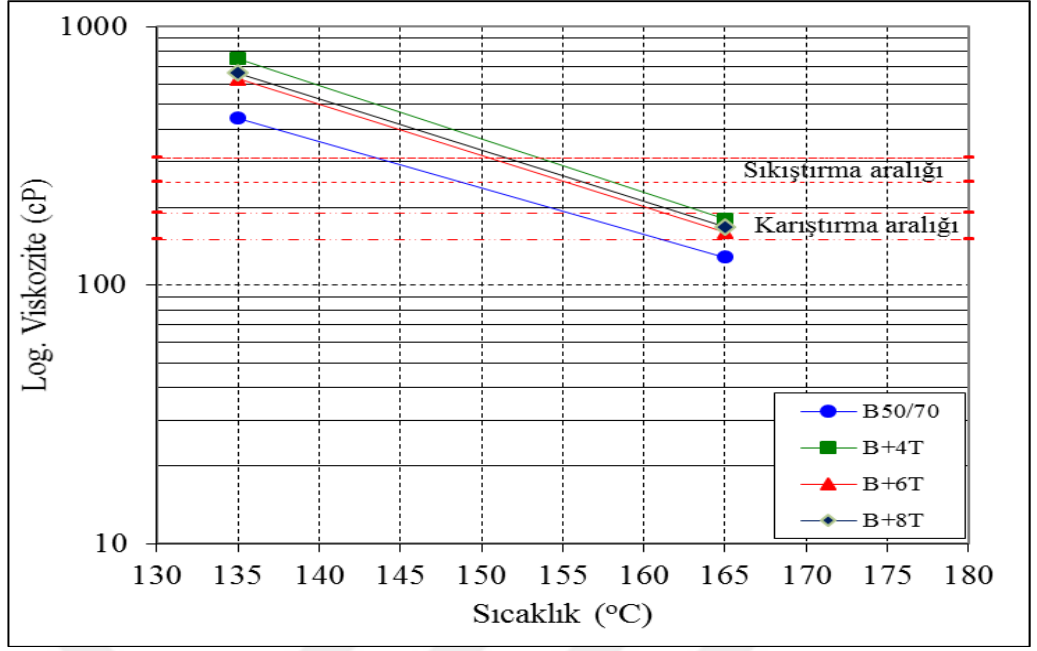


Şekil 7.43. Saf B 160/220 ve thiourea katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

Çizelge 7.47 ve Şekil 7.43'e göre; B 160/220'de thiourea katkı maddesi oranının artmasıyla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda bağlayıcının viskozitesi artmıştır. Ayrıca T katkısı ilavesiyle bağlayıcının sertleştiği için karıştırma sıcaklıkları ve sıkıştırma sıcaklıklarında artış görülmüştür. Örneğin %8 thiourea katkı ilavesiyle, saf bitümün 135°C'deki viskozite değeri 245 cP'den 375 cP'ye yükselirken, 165°C'de ise 80 cP'den 105 cP'ye yükselmiştir.

Çizelge 7.48. Saf B 50/70 ve thiourea katkılı bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 50/70	443	128	1	1	157-163	145-150
B 50/70+4T	750	180	1,69	1,41	162-167	152-157
B 50/70+6T	625	160	1,41	1,25	163-168	152-157
B 50/70+8T	660	168	1,49	1,31	161-166	150-155

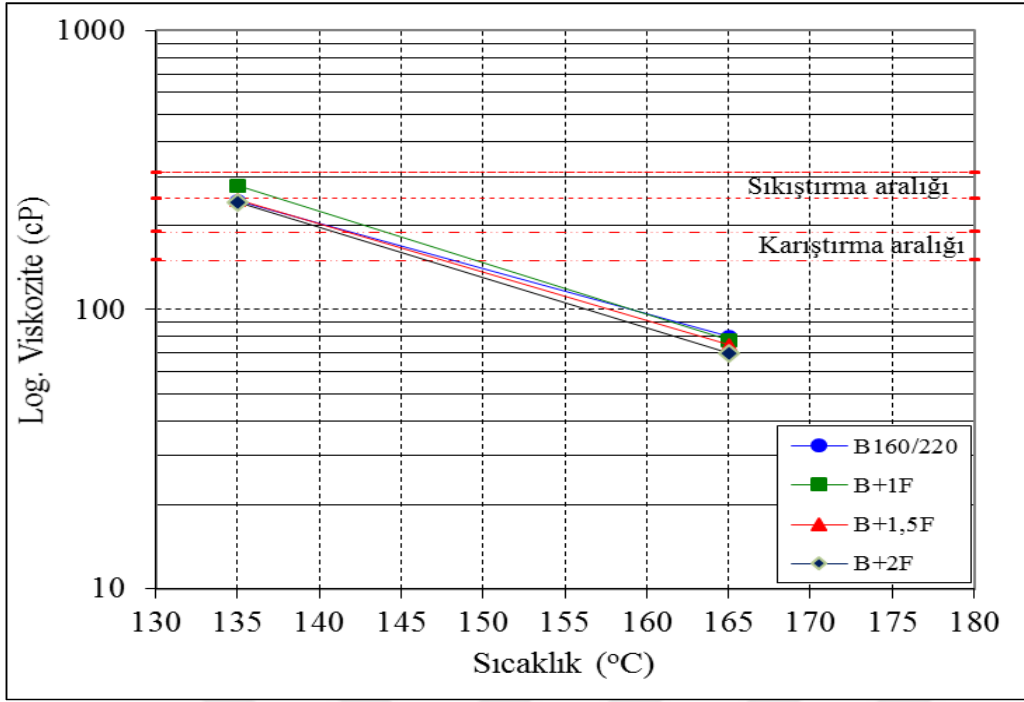


Şekil 7.44. Saf B 50/70 ve thiourea katkıli bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

Çizelge 7.48 ve Şekil 7.44'e göre; B 50/70'te thiourea katkı maddesi oranının artmasıyla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda bağlayıcının viskozite değerleri artmıştır. Örneğin %8 thiourea katkısı ilavesiyle, saf bitümün 135°C'deki viskozite değeri 443 cP'den 660 cP'ye yükselirken, 165°C'de ise 128 cP'den 168 cP'ye yükselmiştir. Aynı şekilde thiourea modifiye bitüm bağlayıcının saf bitüme oranla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da artışlar gözlenmiştir. Bu artış, modifiye bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düştüğü ve bağlayıcıları daha kıvamlı bir hale getirdiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 7.49. Saf B 160/220 ve furfural katkıli bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 160/220	245	80	1	1	143-149	130-136
B 160/220+1F	278	78	1,13	0,98	145-151	134-139
B 160/220+1,5F	248	75	1,02	0,94	141-147	129-134
B 160/220+2F	243	70	0,99	0,88	143-148	131-136

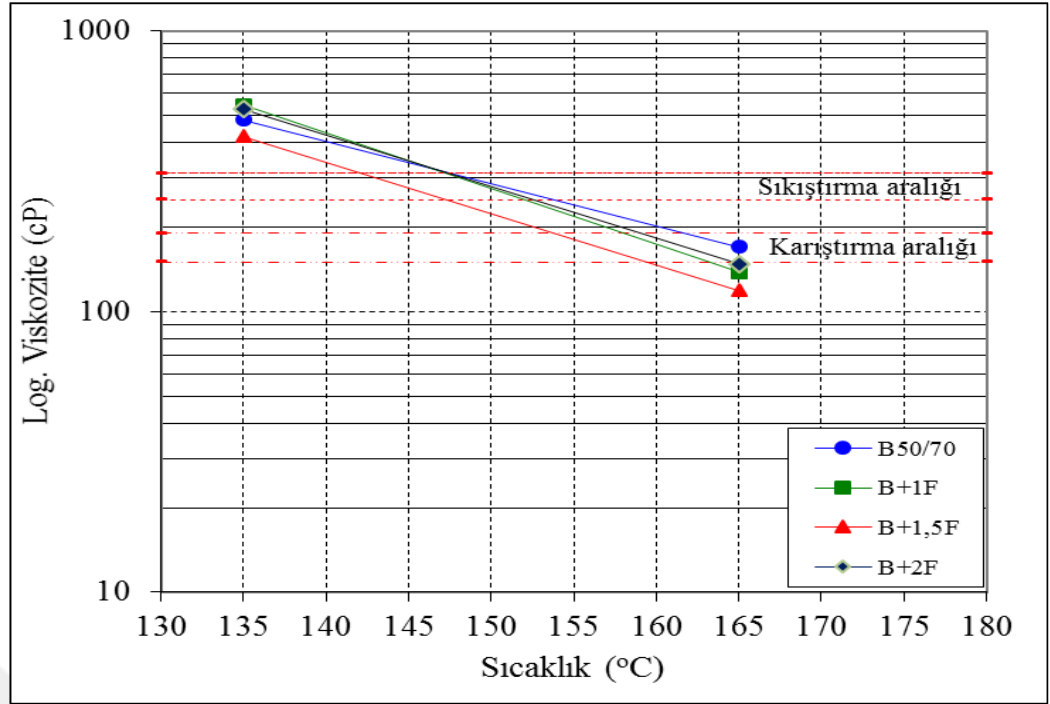


Şekil 7.45. Saf B 160/220 ve furfural katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

Saf B 160/220 ve furfural katkılı modifiye bağlayıcıların üzerinde 135°C ve 165°C'de yapılmış olan dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları incelendiğinde, Çizelge 7.49 ve Şekil 7.45'e göre; saf bitüme %1, %1,5 ve %2 furfural katkı ilavesi ile bitümün viskozite, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında değerlerinde önemli değişiklik meydana gelmemiştir. Örneğin %1 furfural katkısı ilavesiyle, saf bitümün 135°C'deki viskozite değeri 245 cP'den 278 cP'ye yükselirken, 165°C'de ise 80 cP'den 78 cP'ye gelmiştir. %2 furfural katkı ilavesiyle, bağlayıcının 135°C'deki viskozite değeri 243 cP, 165°C'de 70 cP olmuştur.

Çizelge 7.50. Saf B 50/70 ve furfural katkılı bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 50/70	483	170	1	1	157-163	145-150
B 50/70+1F	543	138	1,12	0,81	157-162	146-151
B 50/70+1,5F	420	119	0,87	0,70	154-160	142-147
B 50/70+2F	525	148	1,09	0,87	160-165	148-153

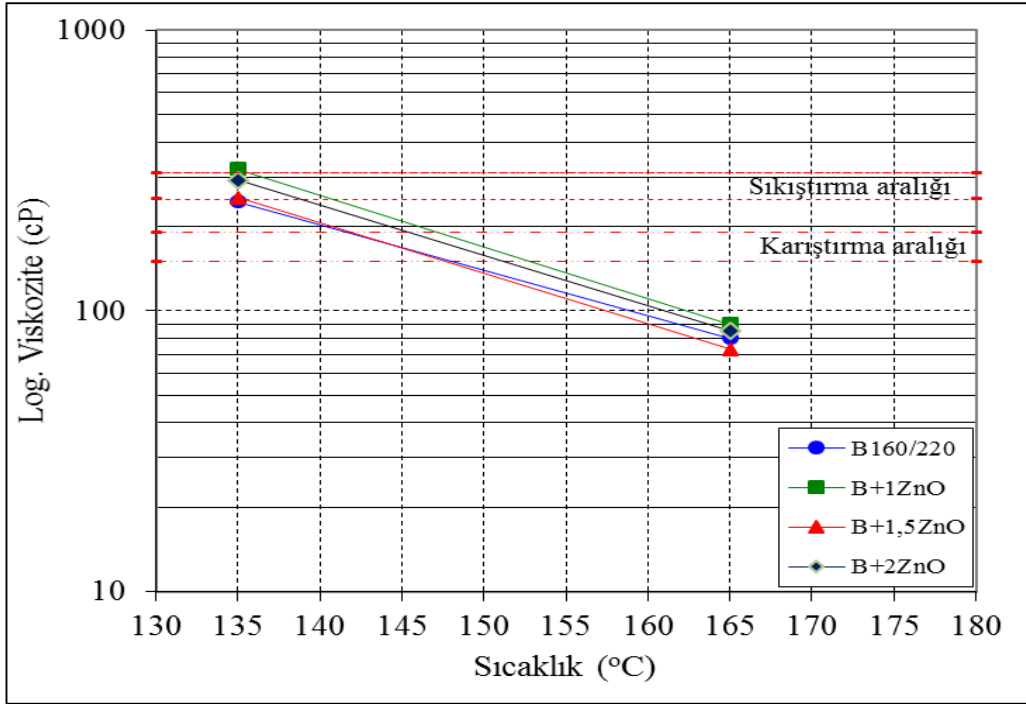


Şekil 7.46. Saf B 50/70 ve furfural katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

Saf B 50/70 ve furfural katkılı modifiye bağlayıcıların üzerinde 135°C de yapılmış olan dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları incelendiğinde, Çizelge 7.50 ve Şekil 7.46'ya göre; saf bitüme %1 ve %2 oranlarında furfural katkısı ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinde artış meydana gelirken, 165°C'de %1 ve %2 oranlarında furfural katkısı ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinde azalma meydana gelmiş ve karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında saf bitüme göre önemli değişiklik meydana gelmemiştir. Ancak 135°C ve 165°C'de %1,5 furfural katkısı ilavesi ile bitümün viskozite değerinde azalma meydana gelirken, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında önemli değişiklik meydana gelmemiştir.

Çizelge 7.51. Saf B 160/220 ve çinko oksit katkılı bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 160/220	245	80	1	1	143-149	130-136
B 160/220+1ZnO	321	90	1,31	1,13	149-154	137-142
B 160/220+1,5ZnO	253	73	1,03	0,91	143-149	131-137
B 160/220+2ZnO	293	85	1,20	1,06	146-152	134-140

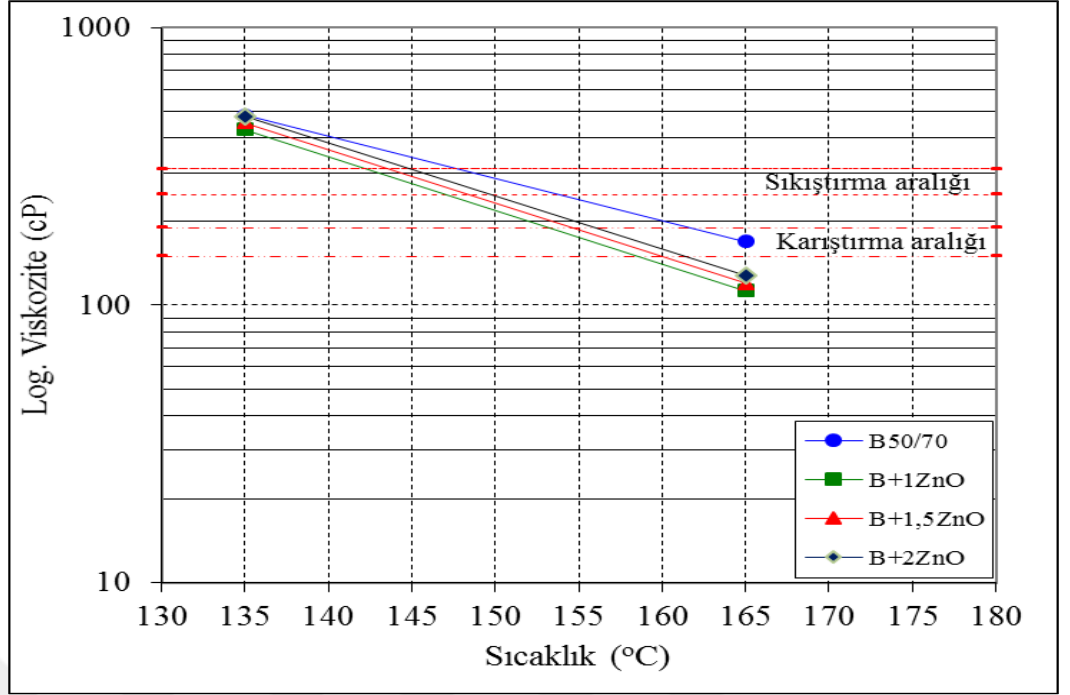


Şekil 7.47. Saf B 160/220 ve çinko oksit katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

Saf B 160/220 ve çinko oksit katkılı modifiye bağlayıcıların üzerinde 135°C ve 165°C'de yapılmış olan dönel viskozimetre (RV) deney sonuçları incelendiğinde, Çizelge 7.51 ve Şekil 7.47'ye göre; saf bitüme %1 ve %2 oranlarında çinko oksit katkısı ilavesi ile bitümün viskozite, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. %1,5 katkı oranında ise bağlacının viskozite, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında önemli değişiklik meydana gelmemiştir. Örneğin %1 çinko oksit katkısı ilavesiyle, saf bitümün 135°C'deki viskozite değeri 245 cP'den 321 cP'ye yükselirken, 165°C'de ise 80 cP'den 90 cP'ye gelmiştir. %1,5 oranında çinko katkısı ilavesiyle, bağlayıcının 135°C'deki viskozite değeri 253 cP, 165°C'de 73 cP olmuştur.

Çizelge 7.52. Saf B 50/70 ve çinko oksit katkılı bitüme ait viskozite değerleri.

Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Sıcaklıkları (°C)	Sıkıştırma Sıcaklıkları (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B 50/70	483	170	1	1	157-163	145-150
B 50/70+%1ZnO	430	113	0,89	0,66	152-157	141-146
B 50/70+%1,5ZnO	455	120	0,94	0,71	156-162	145-150
B 50/70+%2ZnO	479	128	0,99	0,75	156-161	145-150



Şekil 7.48. Saf B 50/70 ve çinko oksit katkılı bağlayıcıların viskozite – sıcaklık ilişkisi.

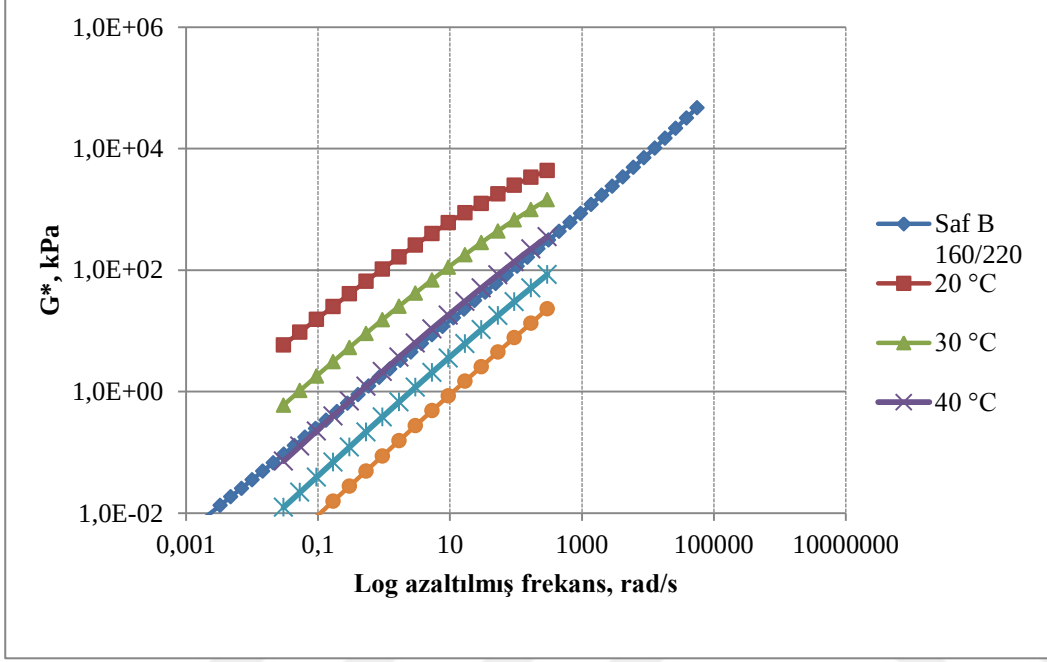
Saf B 50/70 ve çinko oksit katkılı bitüm üzerinde 135°C ve 165°C’de yapılan RV deney sonuçları Çizelge 7.52 ve Şekil 7.48’de gösterilmektedir. Saf bitüme artan miktarlarda (%1, %1,5, ve %2) çinko oksit katkı ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Örneğin %1 çinko oksit katkısı ilavesiyle saf bitümün 135°C’deki viskozite değeri 483 cP’den 430 cP’ye azalırken, 165°C’de ise 170 cP’den 113 cP’ye azalmıştır. Aynı şekilde %1 oranındaki çinko oksit modifiye bitüm bağlayıcının saf bitüme göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da azalmalar gözlenmiştir. Ancak, çinko oksit katkı %1,5 ve %2 oranlarında ilavesiyle bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında hiç bir değişiklik meydana gelmemiştir.

7.3 İleri Test Yöntemlerinin Sonuçları

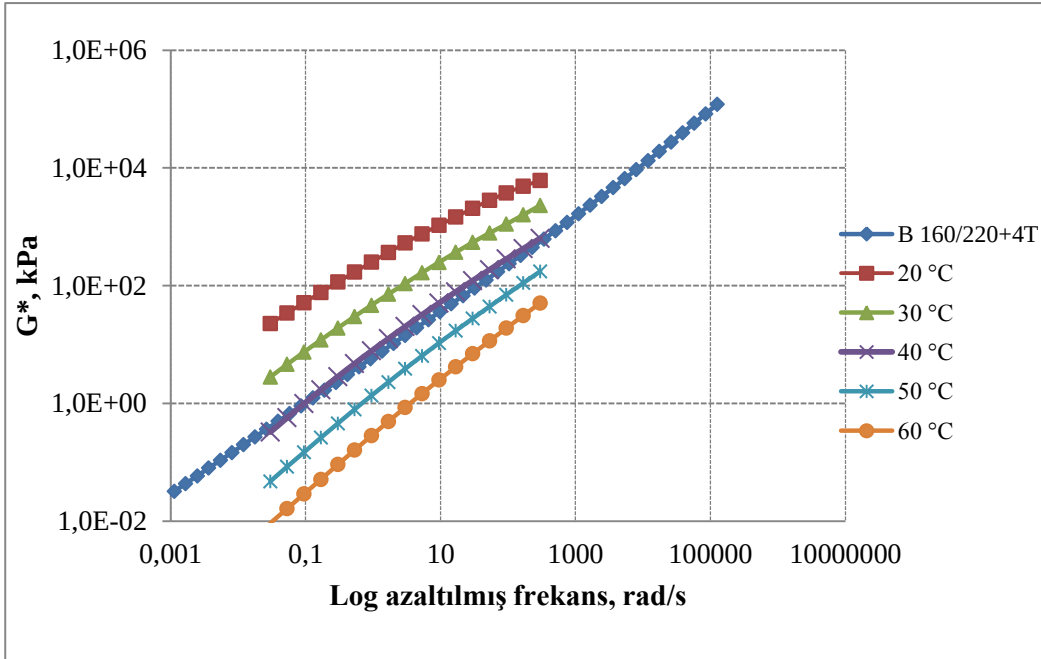
7.3.1 Farklı frekans ve sıcaklıklarda DSR deney (Ana Eğri) sonuçları

Tez kapsamında yapılan farklı frekans DSR deneylerinde, frekans değerleri olarak farklı trafik hızlarına eşdeğer kabul edilen frekanslar kullanılmıştır. Orijinal bitüm örnekleri üzerinde DSR farklı frekans ve sıcaklık deneyi

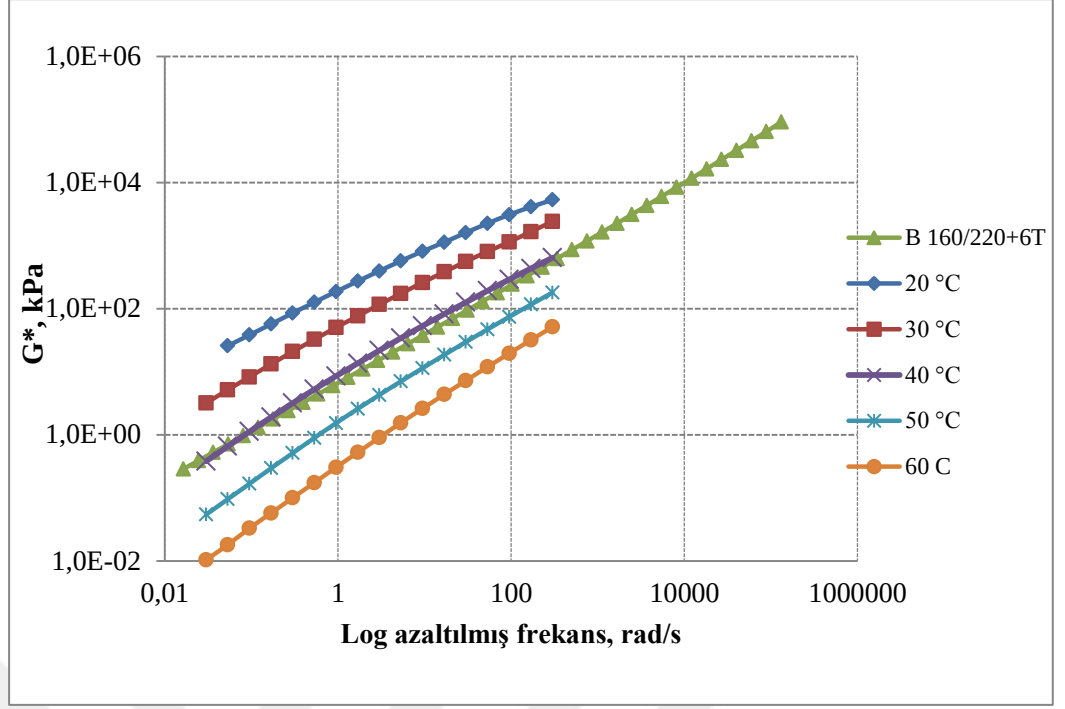
gerçekleştirilmiştir. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların visko-elastik davranışını tanımlamak için beş farklı sıcaklık (20, 30, 40, 50 ve 60°C), 17 frekans (0.03 ile 300 rad/s arasında) ve %1 deformasyon seviyesi kullanılmıştır. 40°C referans sıcaklıkta saf ve T, F ve ZnO katkıli bitümlü bağlayıcıların sonuçları, kompleks modül G^* “Ana Eğri” açısından Şekil 7.49–59’da sunulmuştur.



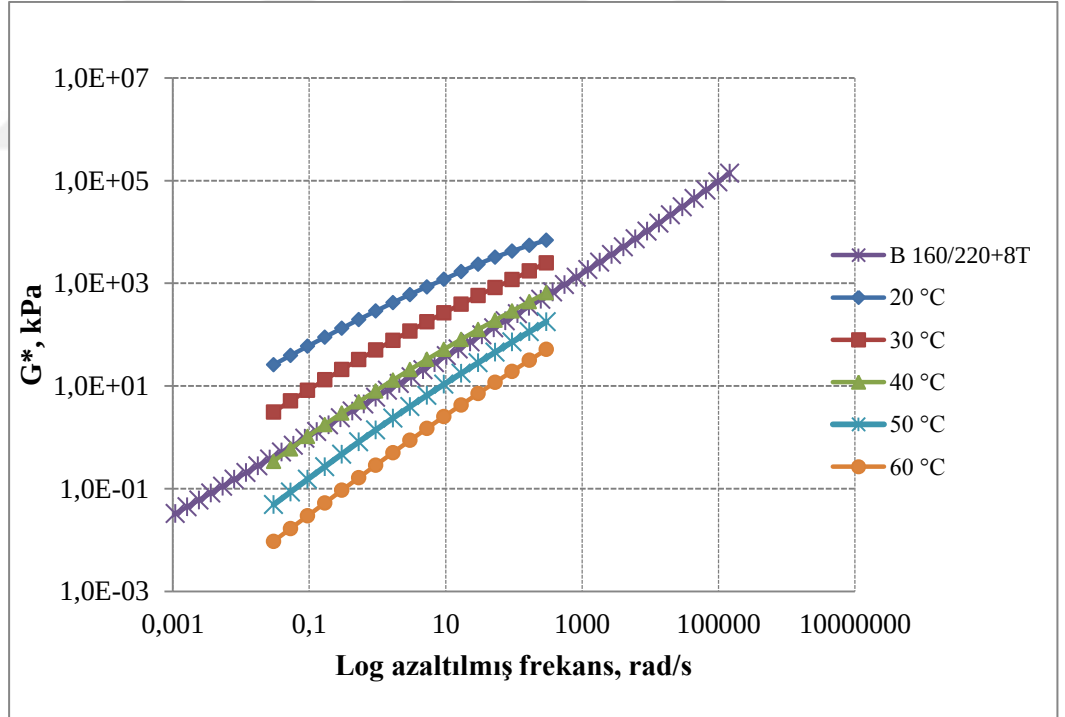
Şekil 7.49. 40°C sıcaklıkta B 160/220 bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



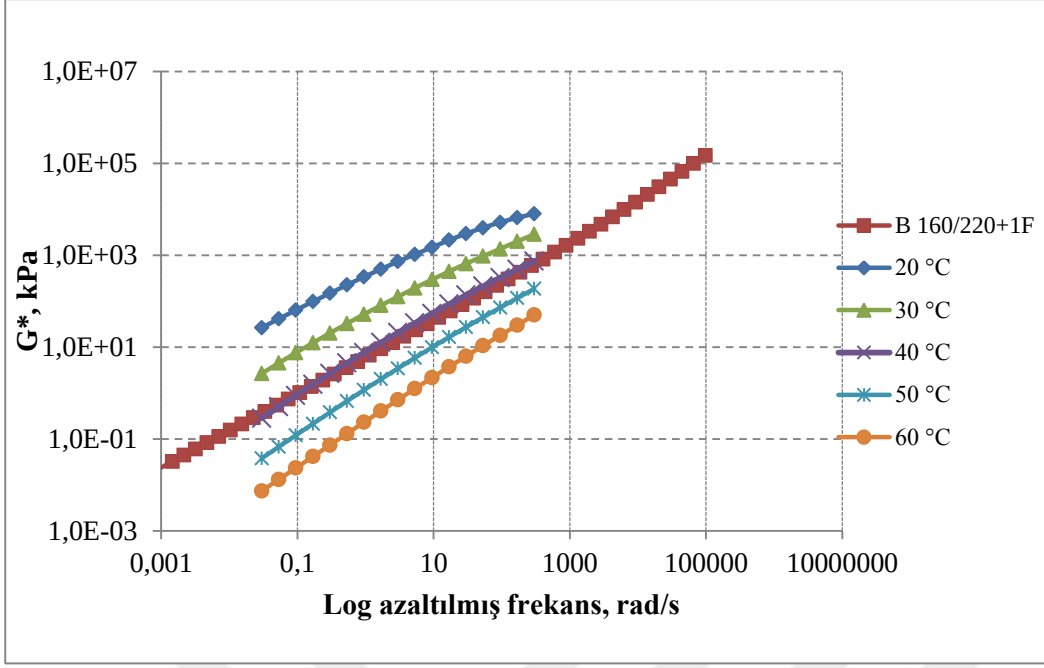
Şekil 7.50. 40°C sıcaklıkta B 160/220+4T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



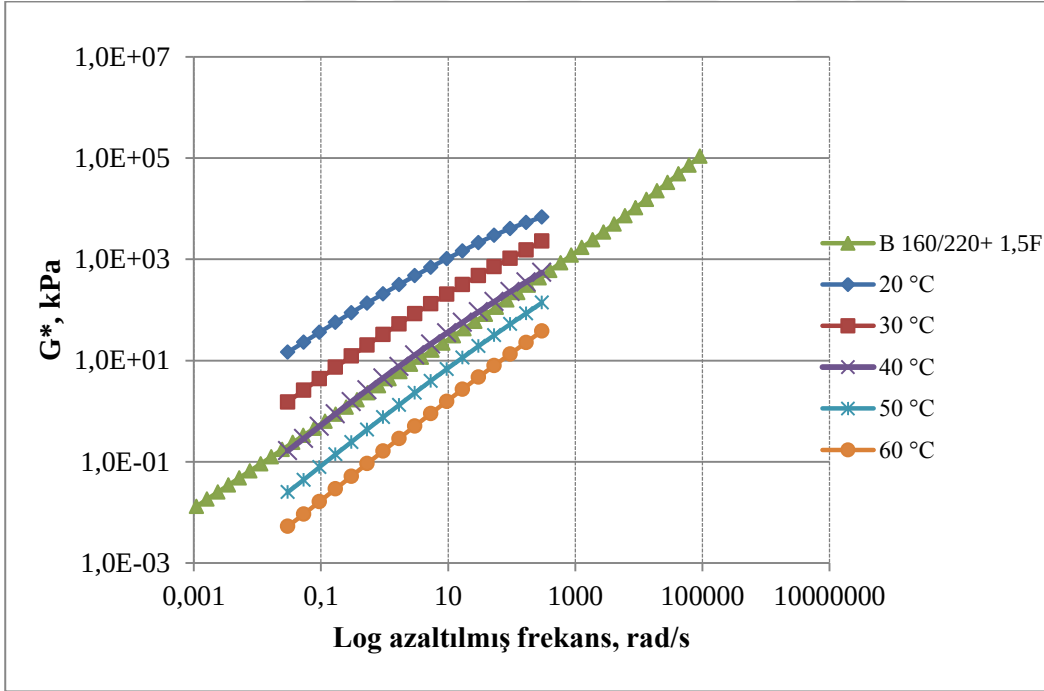
Şekil 7.51. 40°C sıcaklıkta B 160/220+6T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



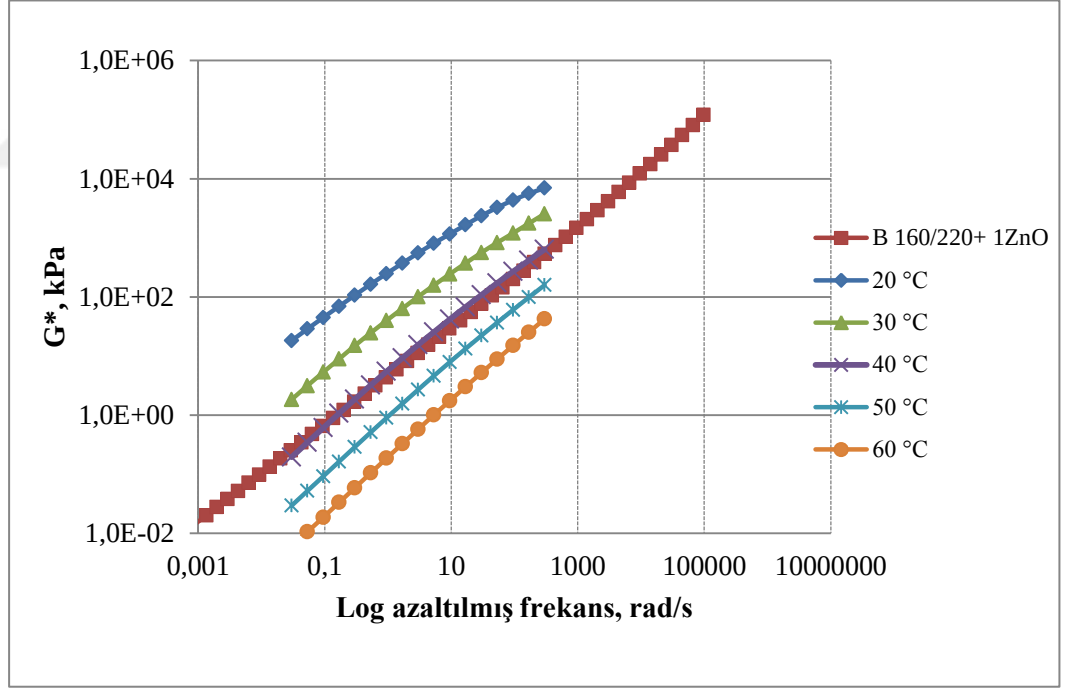
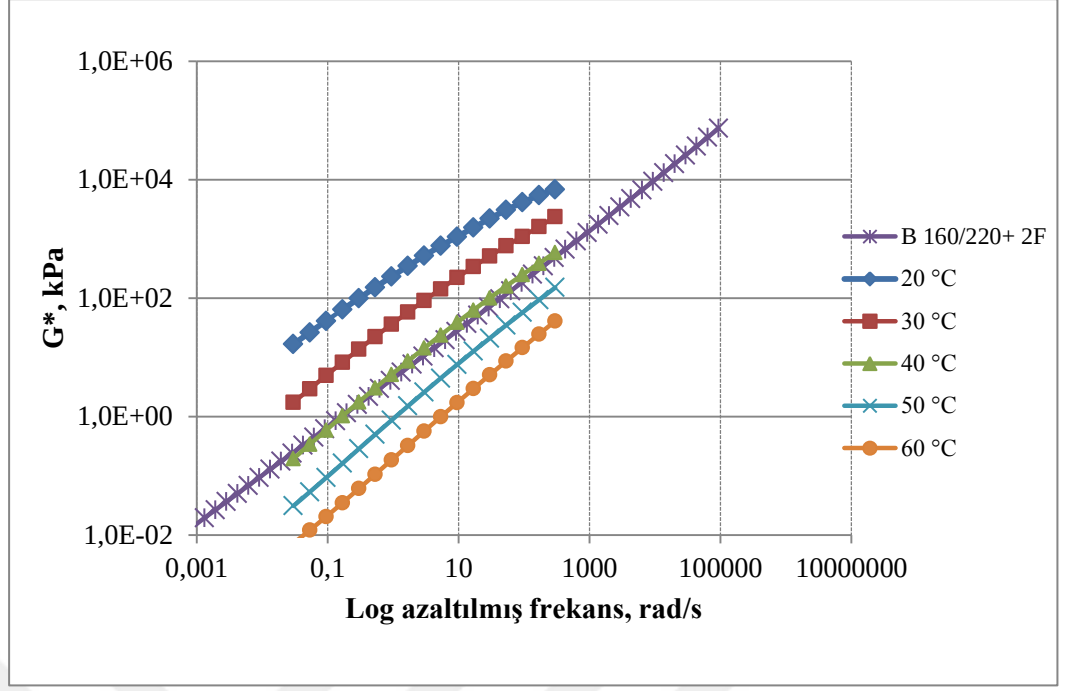
Şekil 7.52. 40°C sıcaklıkta B 160/220+8T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

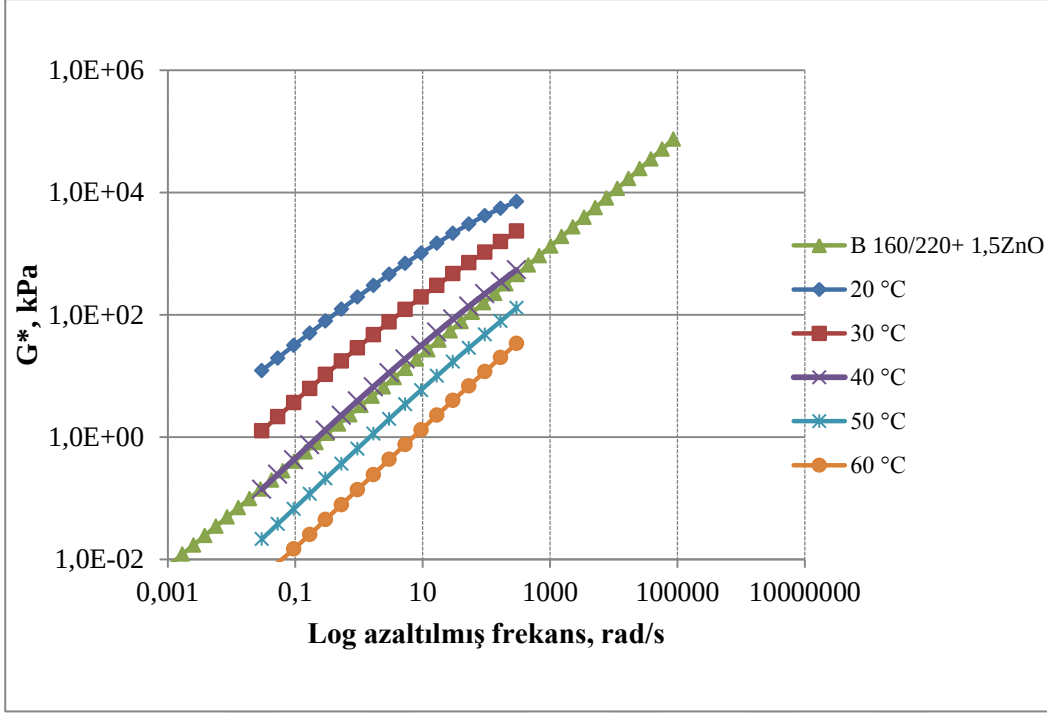


Şekil 7.53. 40°C sıcaklıkta B 160/220+1F bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

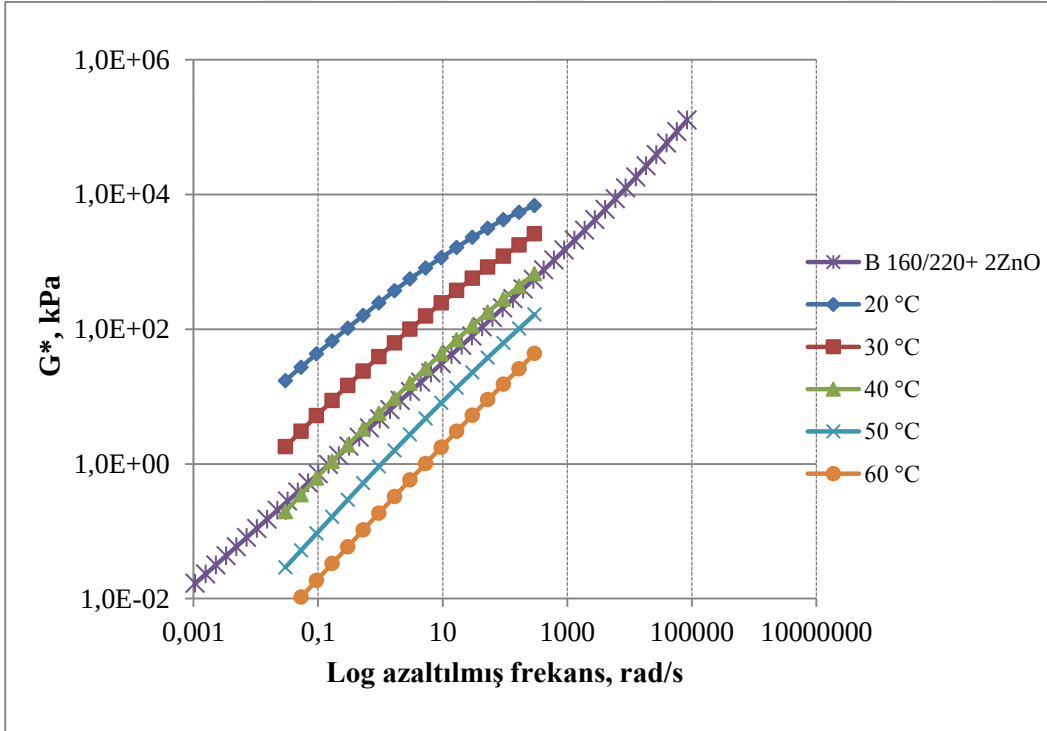


Şekil 7.54. 40°C sıcaklıkta B 160/220+1,5F bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

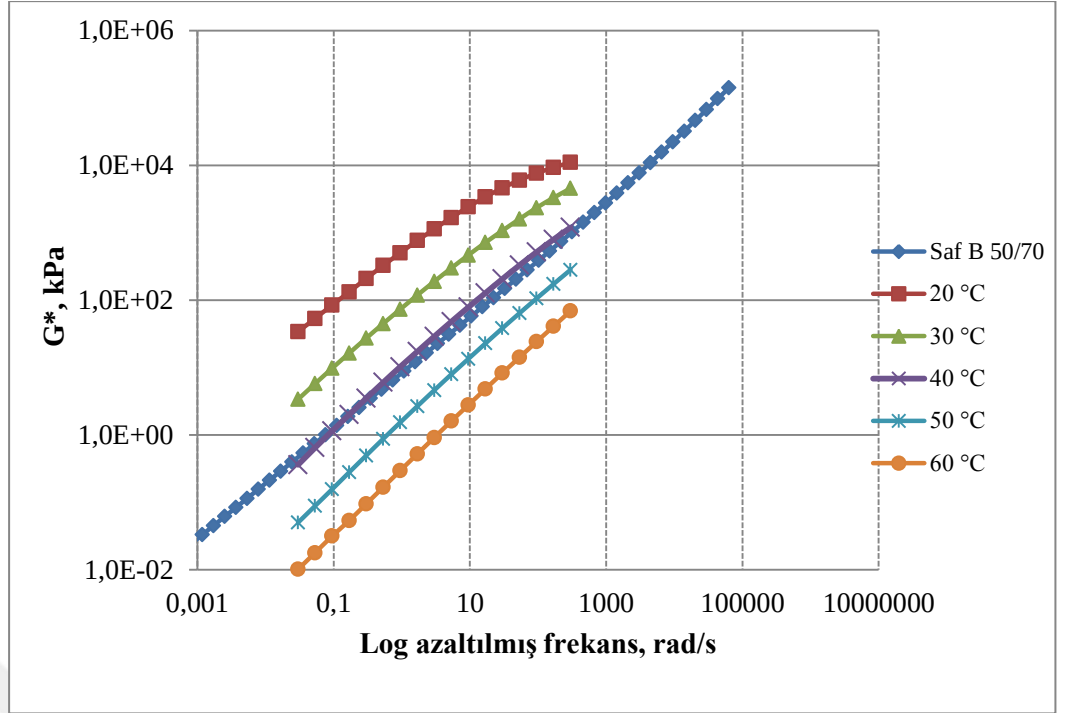




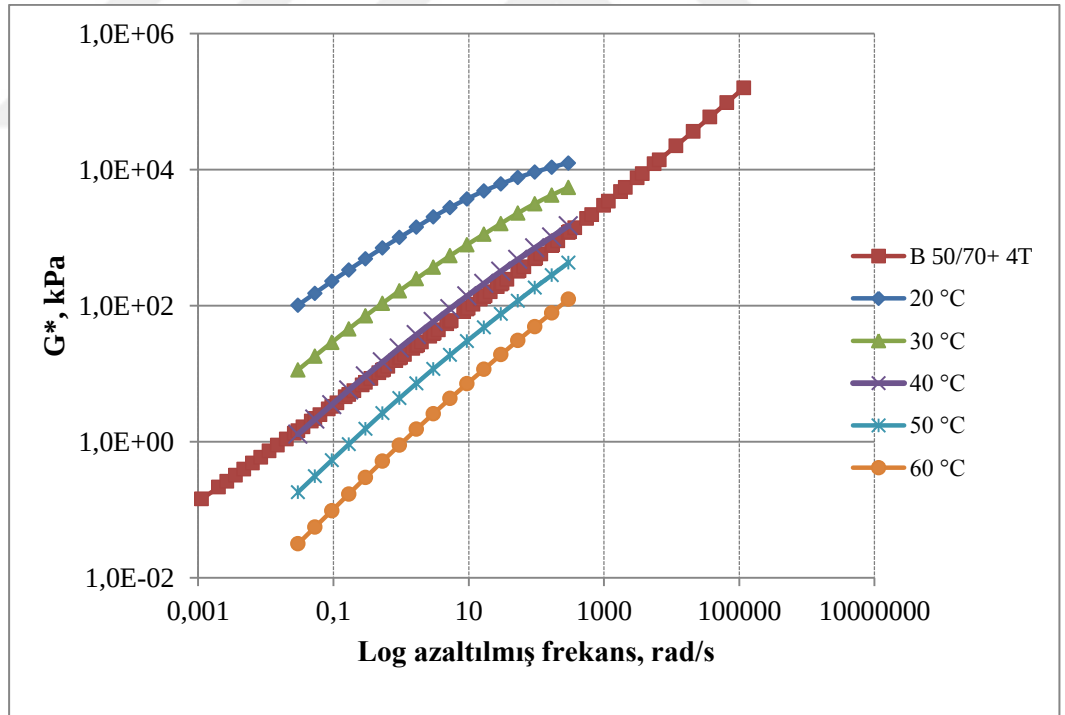
Şekil 7.57. 40°C sıcaklıkta B 160/220+1,5ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



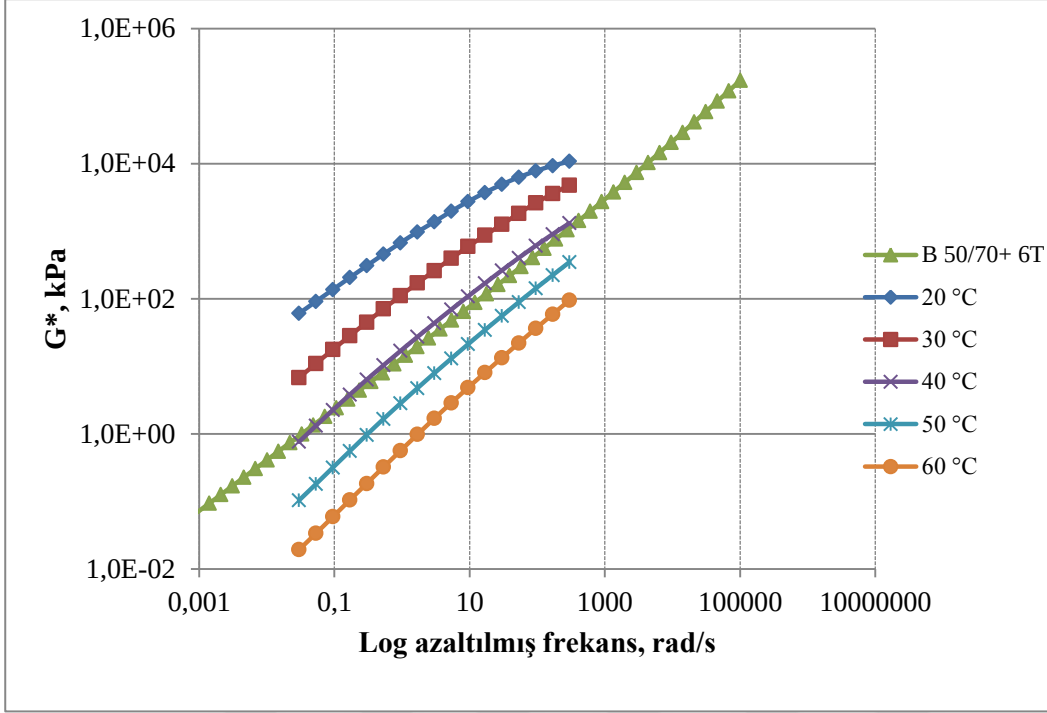
Şekil 7.58. 40°C sıcaklıkta B 160/220+2ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



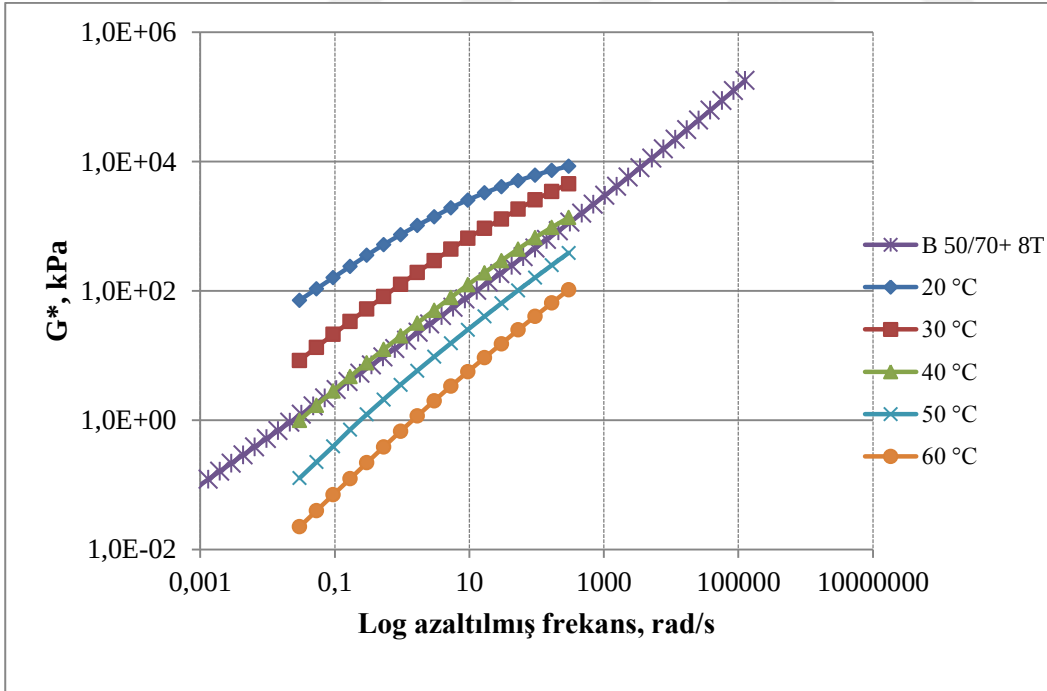
Şekil 7.59. 40°C sıcaklıkta B 50/70 bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



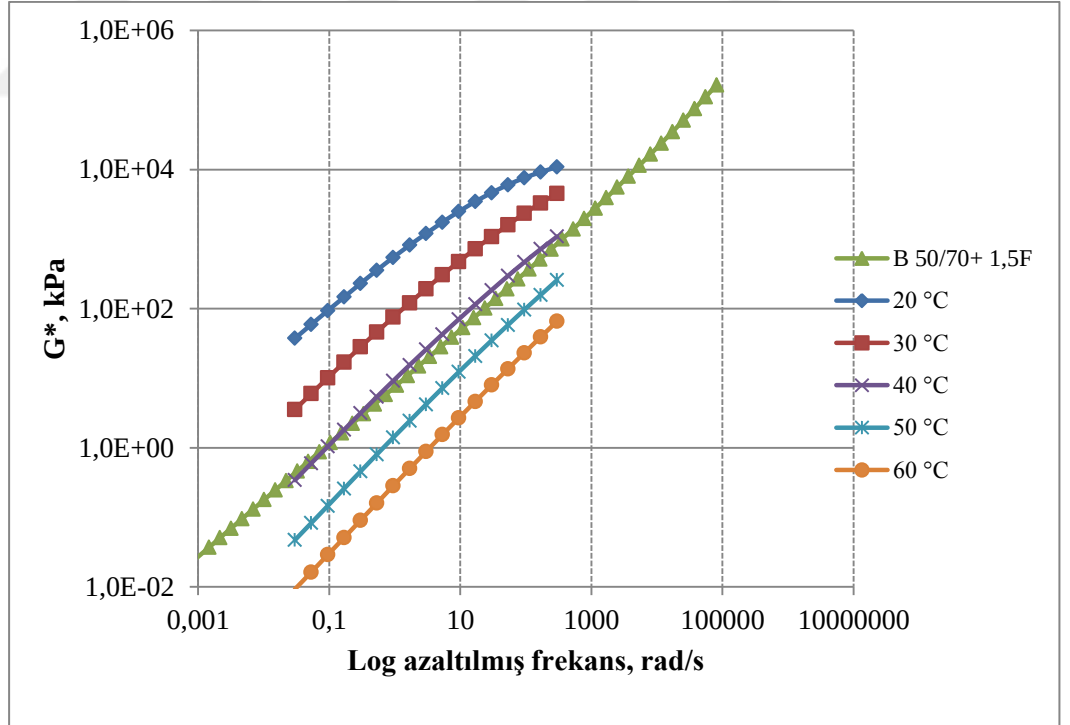
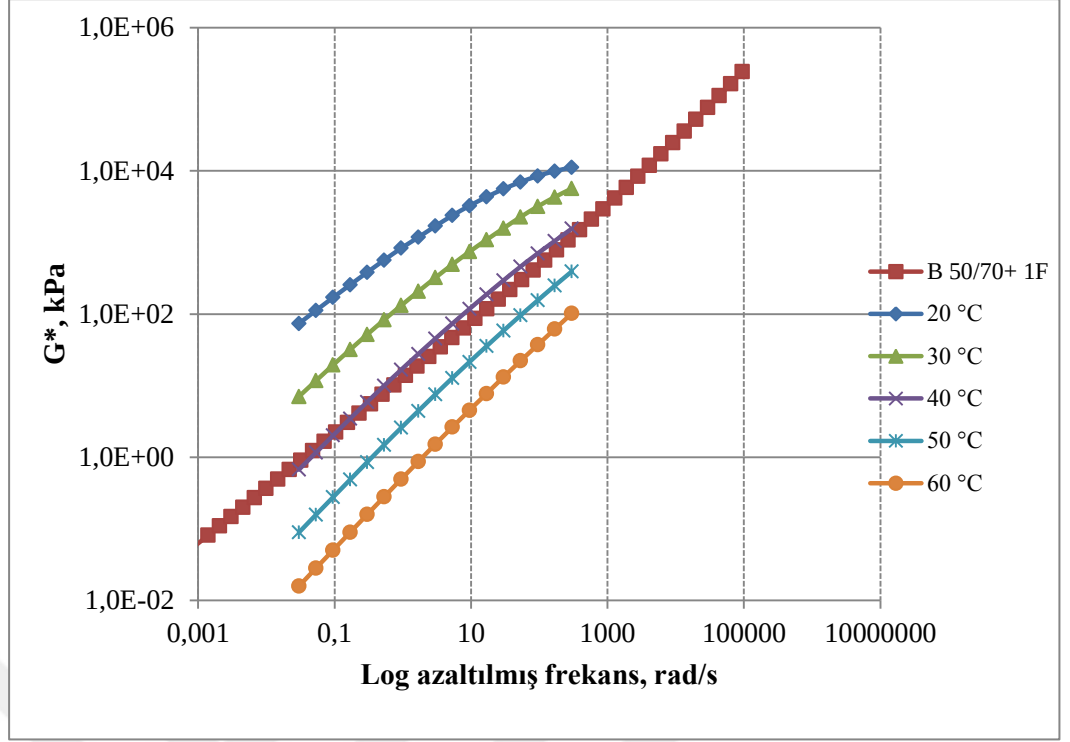
Şekil 7.60. 40°C sıcaklıkta B 50/70+4T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

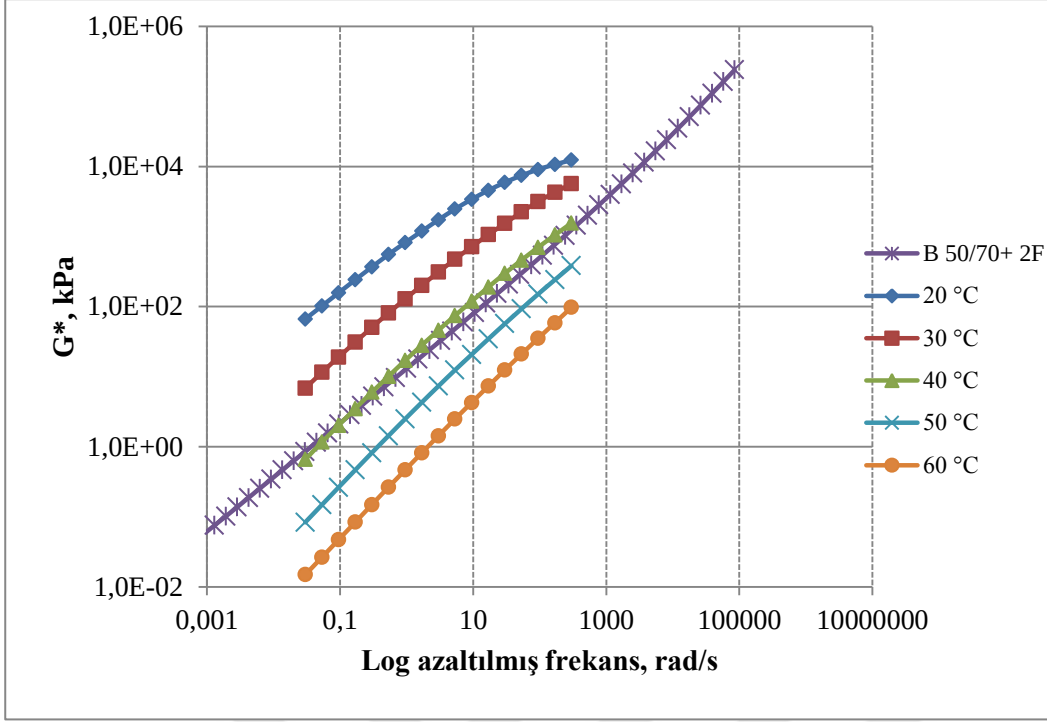


Şekil 7.61. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta B 50/70+6T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

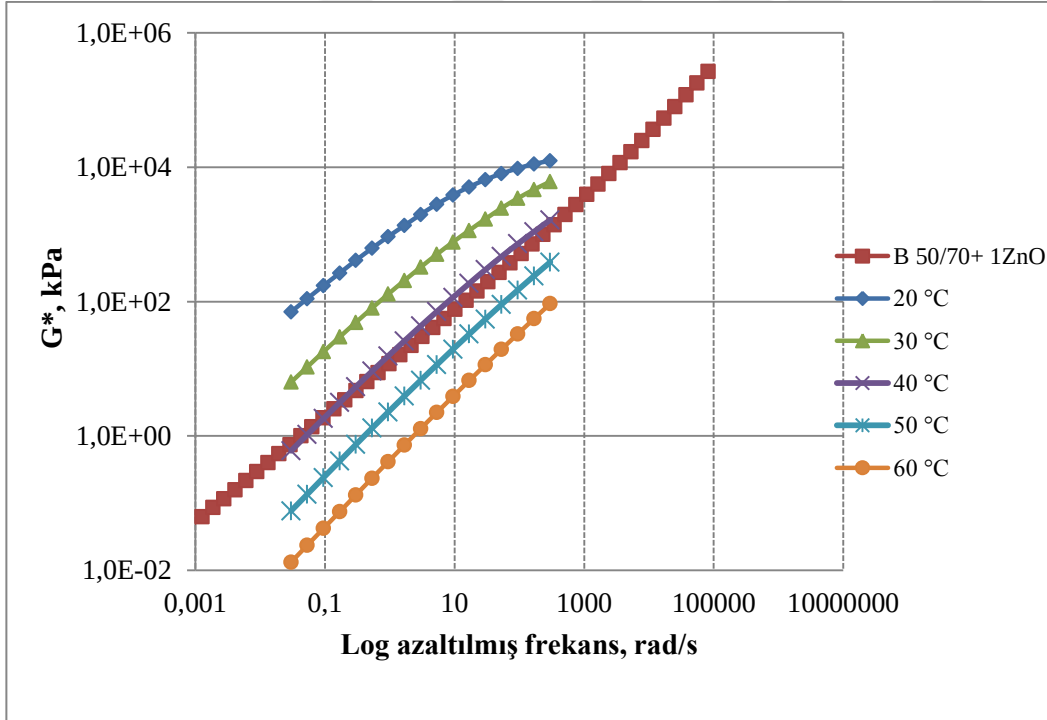


Şekil 7.62. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta B 50/70+8T bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

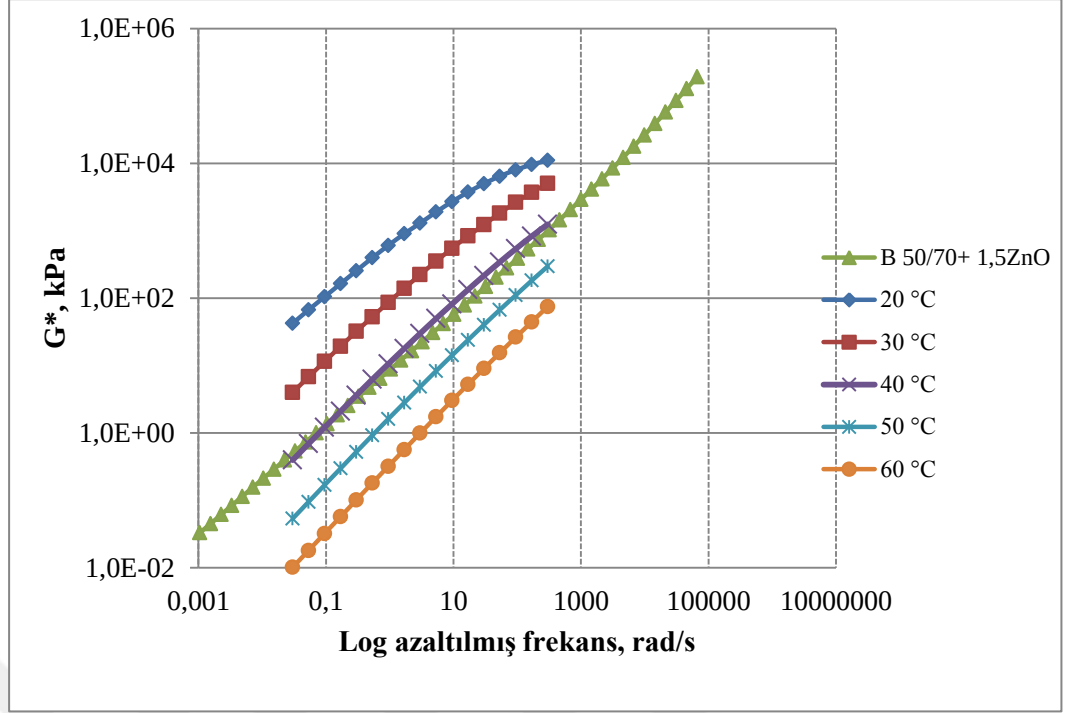




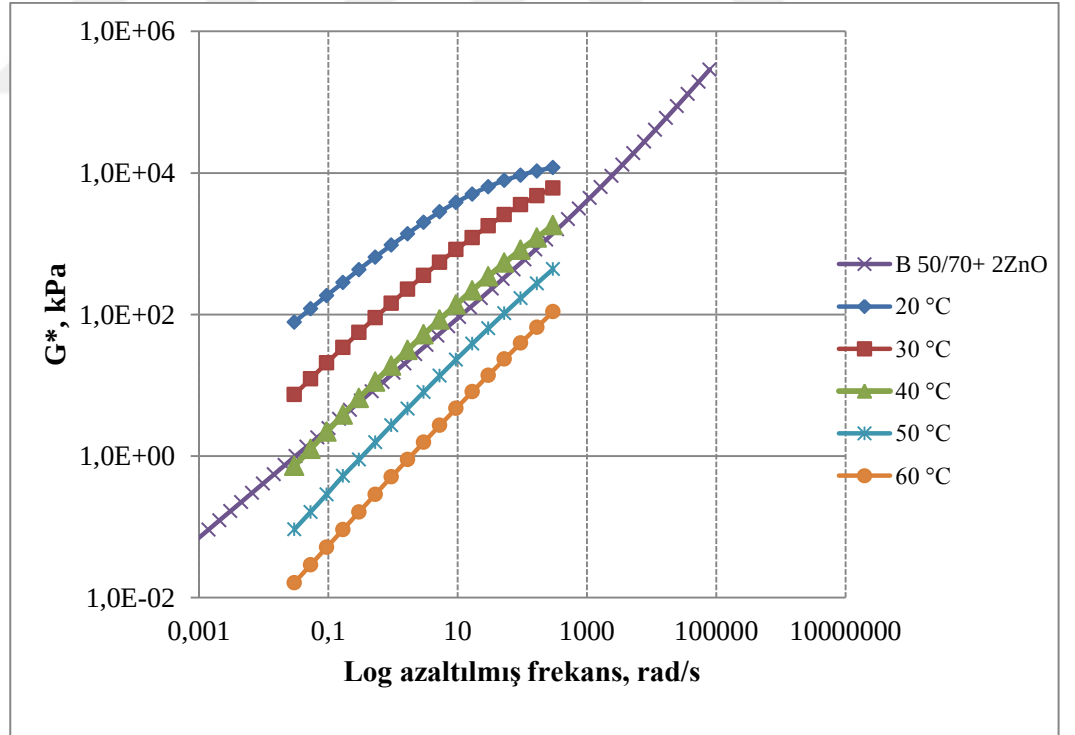
Şekil 7.65. 40°C sıcaklıkta B 50/70+2F bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



Şekil 7.66. 40°C sıcaklıkta B 50/70+1ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.



Şekil 7.67. 40°C sıcaklıkta B 50/70+1,5ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

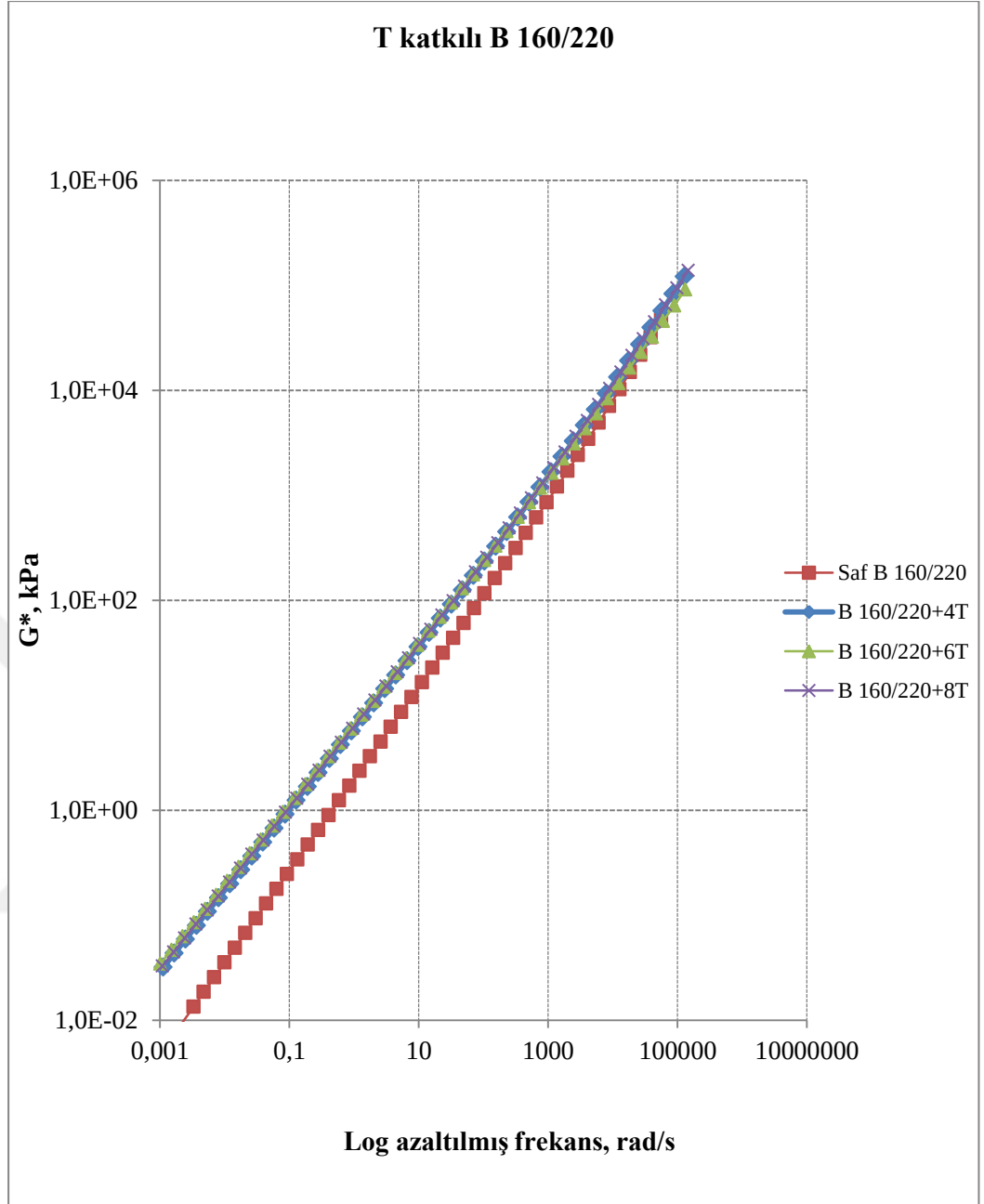


Şekil 7.68. 40°C sıcaklıkta B 50/70+2ZnO bağlayıcısının kompleks modül (G^*) ana eğrisi.

Geniş bir frekansta kompleks modül ana eğrilerinin her bir bağlayıcı için DSR cihazı yardımıyla ve zaman-sıcaklık süperpozisyon (TTSP) özelliğini

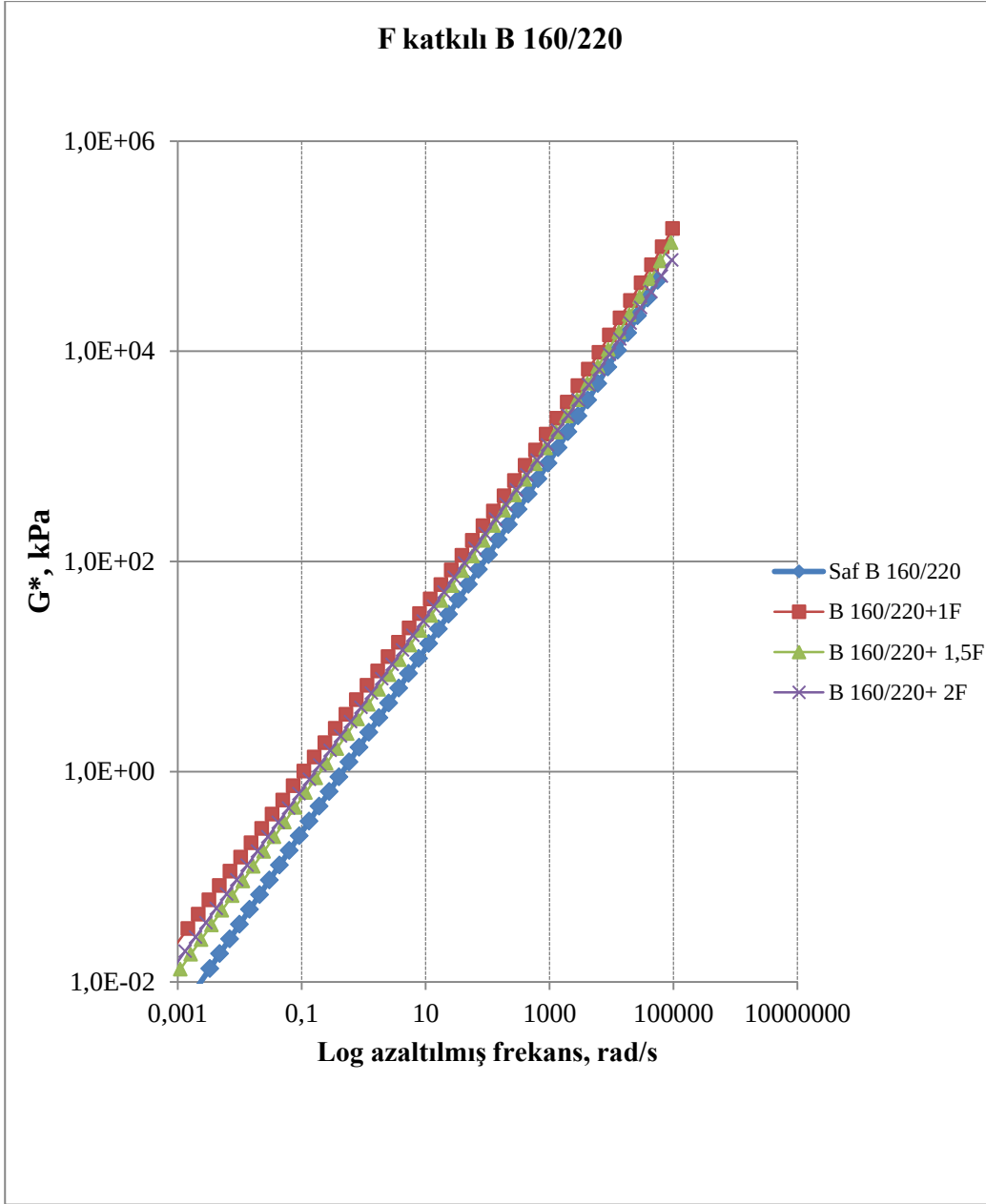
kullanarak başarılı bir şekilde elde edildiği gözlenmiştir. Genel olarak, saf ve modifiyeli bağlayıcıların sertliğinin daha açık bir şekilde frekansa bağlı olduğunu gözlemlenmektedir. Tüm bağlayıcı ve deney sıcaklıkları için yukarıda gösterilen şekillerde frekans azaldıkça G^* trendinin hemen hemen azaldığı görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça G^* değerinin azaldığı ve bu durum tüm eğriler için geçerli olduğu tespit edilmiştir.

Kalıcı deformasyona karşı antioksidan katkı maddelerin saf bitüm üzerindeki etkisini kavramak için, Şekil 7.69–74, her tip bağlayıcı ile farklı modifikasyon seviyelerinde ve aynı referans sıcaklığında (40°C) saf ve antioksidan modifiyeli bağlayıcıların G^* ana eğrileri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.



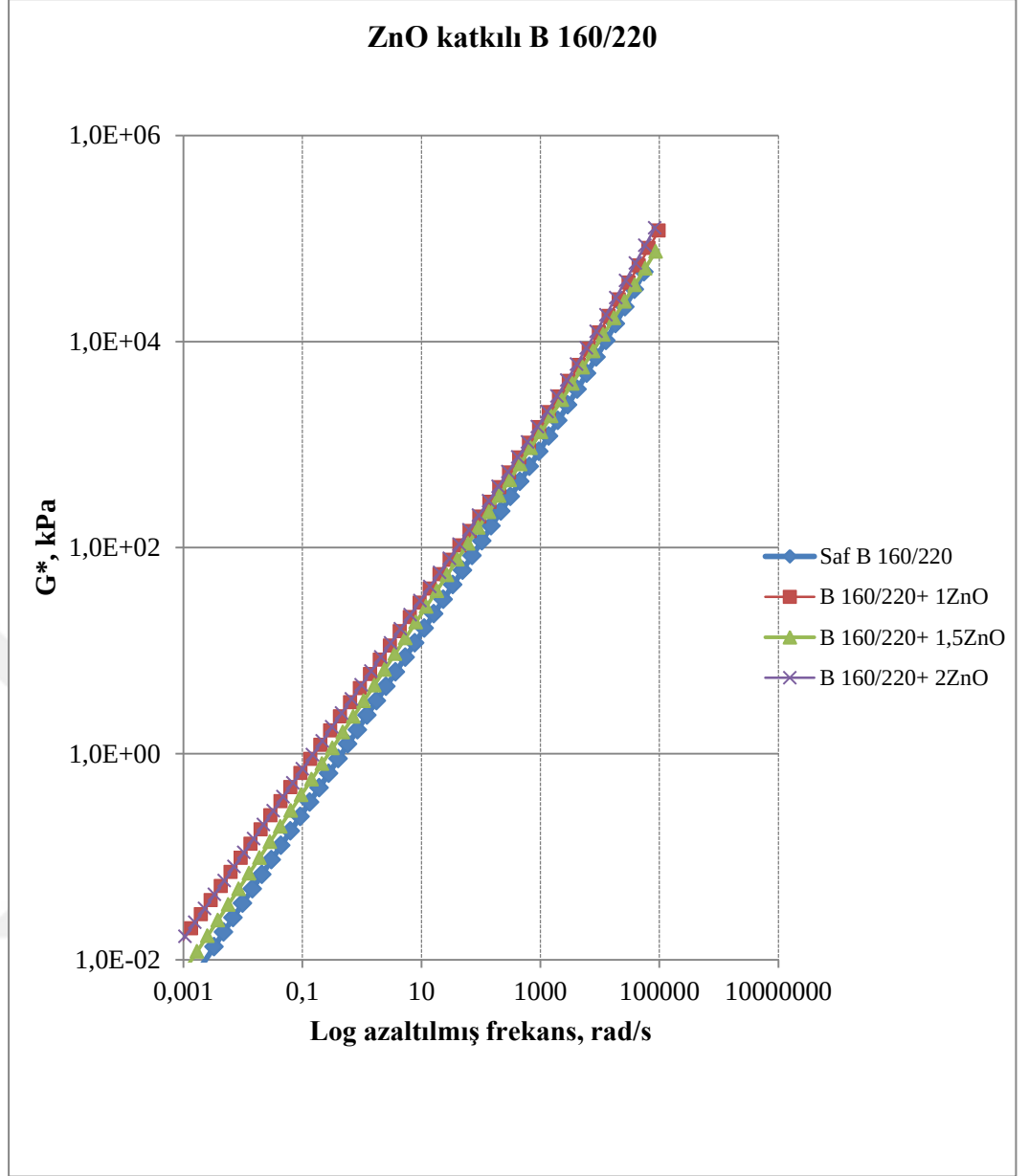
Şekil 7.69. 40°C sıcaklıkta T modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G* ana eğrileri.

T modifikasyonu ile B 160/220 bağlayıcısının G* ana eğrisi (Şekil 7.88), belirlenen deney sıcaklığı ve özellikle düşük frekans seviyelerinde T'nin ilavesi ile bağlayıcının sertliğinde artışa yol açtığını göstermiştir. Bu durum, düşük ve/veya devamlı duran trafik hızlarında kalıcı deformasyona karşı T modifikasyonunun saf B 160/220 bağlayıcısının sertliğini geliştirdiği anlamına gelmektedir. Şekil 7.69'da, B 160/220+4T bağlayıcısının ana eğrisinin en yüksek eğri olmasından dolayı, T modifikasyonunun %4 kullanımı G* için en iyi sonucu elde ettiği gözlenmiştir.



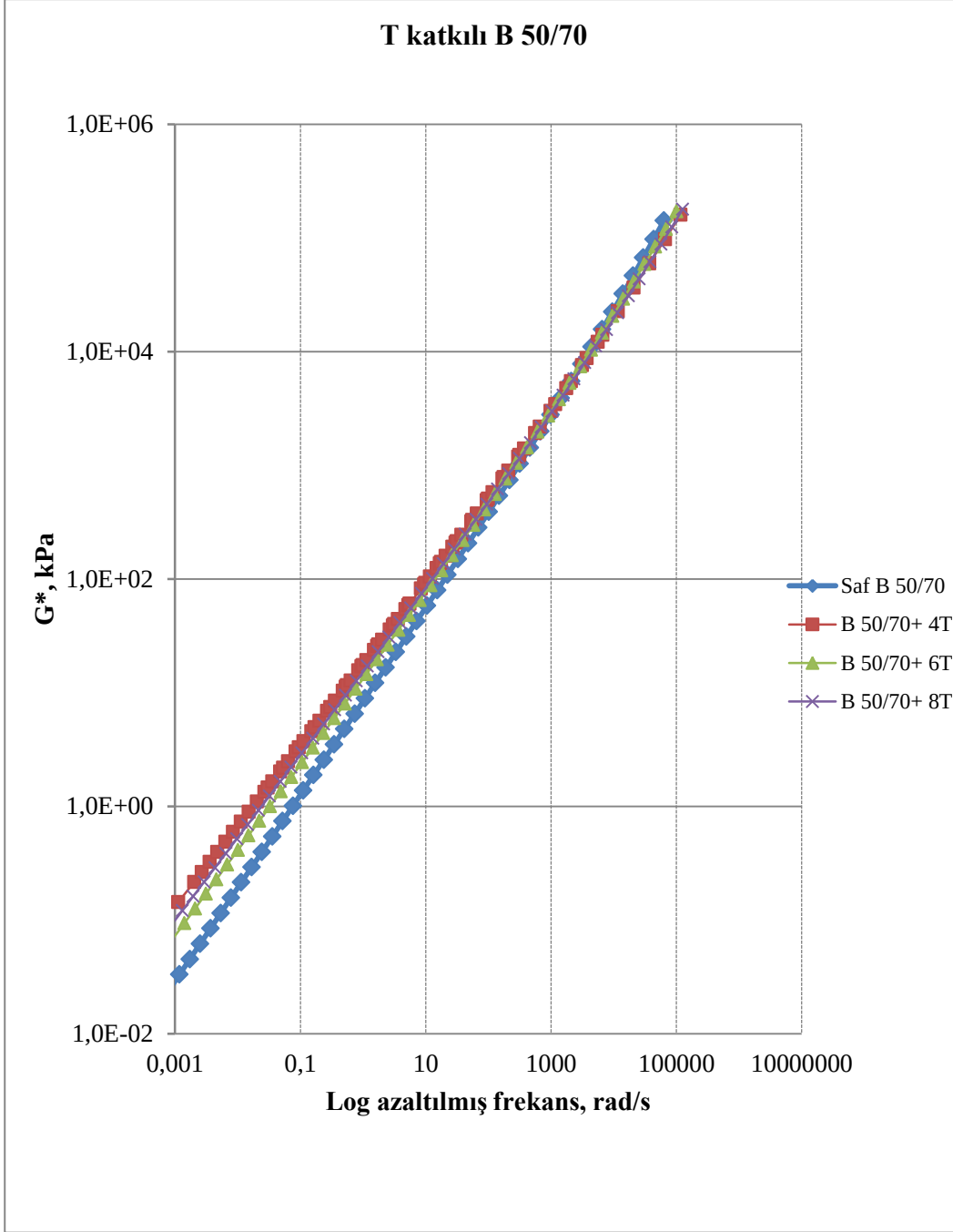
Şekil 7.70. 40°C sıcaklıkta F modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G* ana eğrileri.

Benzer şekilde, Şekil 7.70'ten 40°C'de F modifiyeli B 160/220 bağlayıcısının ana eğrileri elde edilmiştir. F katkı maddesinin farklı yüzdeleri için saf B 160/220 ve F modifiyeli bağlayıcılar arasındaki karşılaştırma, F katkı maddesinin saf bitümün sertliğini arttırması ile ilgili olarak olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Modifiyeli bağlayıcıların tüm ana eğrileri saf bitümlerin ana eğrilerinin üstündedir. Yani, F katkı maddesinin saf bitümün G* değerini arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, %1 seviyedeki F modifikasyonu kalıcı deformasyona karşı en yüksek direnci göstermiştir.



Şekil 7.71. 40°C sıcaklıkta ZnO modifiyeli B 160/220'nin farklı oranlarında G^* ana eğrileri.

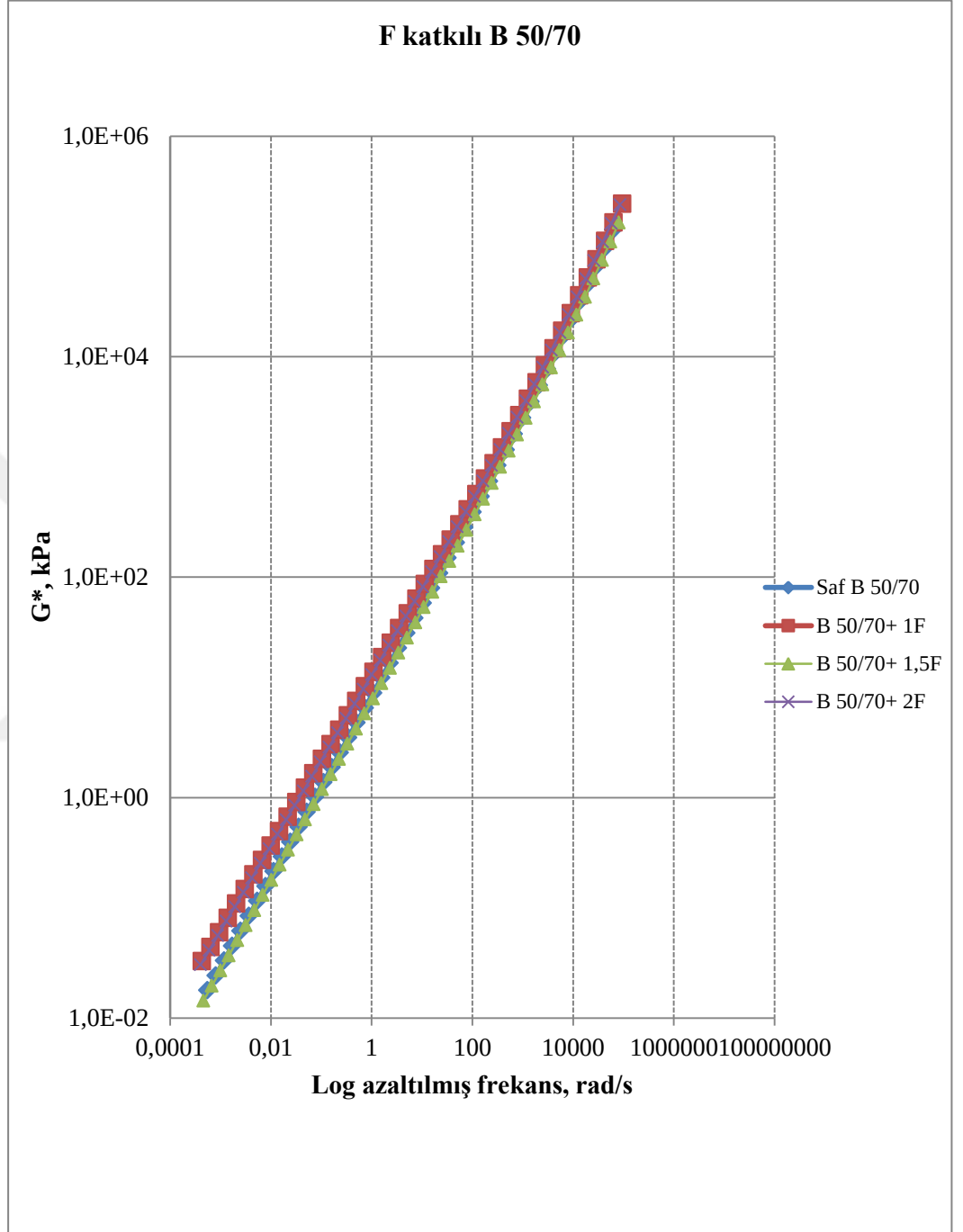
Şekil 7.71, B 160/220 bağlayıcısına ZnO eklenmesinin saf bitümün sertliğini arttırdığını göstermiştir. %1 ve %2 ZnO kullanımı tüm bağlayıcılar arasında en yüksek sertliği göstermiştir.



Şekil 7.72. 40°C sıcaklıkta T modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G^* ana eğrileri.

Aynı şekilde, Şekil 7.72'den 40°C sıcaklıkta T modifiyeli B 50/70 bağlayıcısının ana eğrisi geliştirilmiştir. T katkı maddesinin farklı yüzdelere için saf B 50/70 ve T modifiyeli bağlayıcılar arasındaki karşılaştırma, T katkı maddesinin saf bitümün sertliğini arttırması ile ilgili olarak belirgin bir olumlu etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Modifiyeli bağlayıcıların tüm ana eğrileri saf bitümlerin ana eğrilerinin üstündedir. Yani, T katkı maddesinin saf bitümün

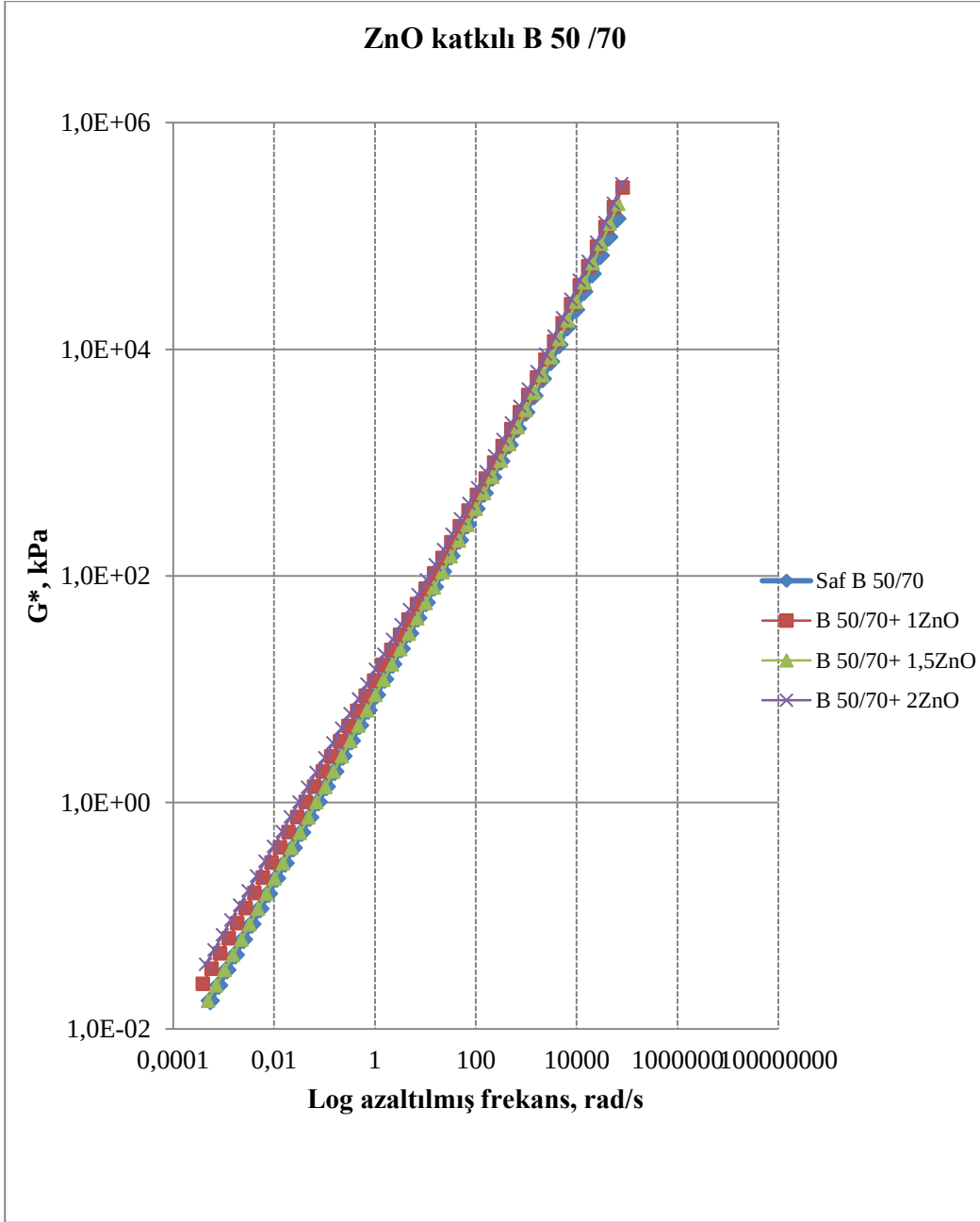
G^* değerini arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, %4 seviyedeki T modifikasyonu kalıcı deformasyona karşı en yüksek direnci göstermiştir.



Şekil 7.73. 40°C sıcaklıkta F modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G^* ana eğrileri.

F modifikasyonu ile B 50/70 bağlayıcısının G^* ana eğrisi (Şekil 7.73) F eklenmesinin sertlikte bir artışa neden olduğunu göstermiştir. Bu durum, tüm frekans seviyelerinde kalıcı deformasyona karşı F modifikasyonun saf B 50/70

bağlayıcısının sertliğini geliştirdiği anlamına gelmektedir. Şekil 7.73'te, B 50/70+ 1F ve B 50/70+ 2F bağlayıcısının ana eğrisinin en yüksek eğri olmasından dolayı, F modifikasyonunun %1 ve %2 kullanımı G^* için en iyi sonucu elde ettiği gözlenmiştir.



Şekil 7.74. 40°C sıcaklıkta ZnO modifiyeli B 50/70'in farklı oranlarında G^* ana eğrileri.

Aynı şekilde, Şekil 7.93'te görüldüğü gibi B 50/70'e ZnO eklenmesinin saf bitümün sertliğini arttırdığını göstermiştir. %1 ve %2 ZnO kullanımı tüm bağlayıcıların arasında en yüksek sertliğe sahip olduğunu gösterdi.

Ana eğri deney sonuçlarından, tüm antioksidan malzemelerinin bütün saf bitüm türlerine eklenmesinin bağlayıcının sertlik artışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu söylemek önemlidir. Ancak, Şekil 7.69-74'te tüm modifiyeli bağlayıcılar için düşük frekanslarda ortaya çıkan plateau'lar bitümün gelişmiş performansının açık bir göstergesidir.

7.3.2 Çoklu gerilmeli geri dönüşümlü sünme (MSCR) test sonuçları

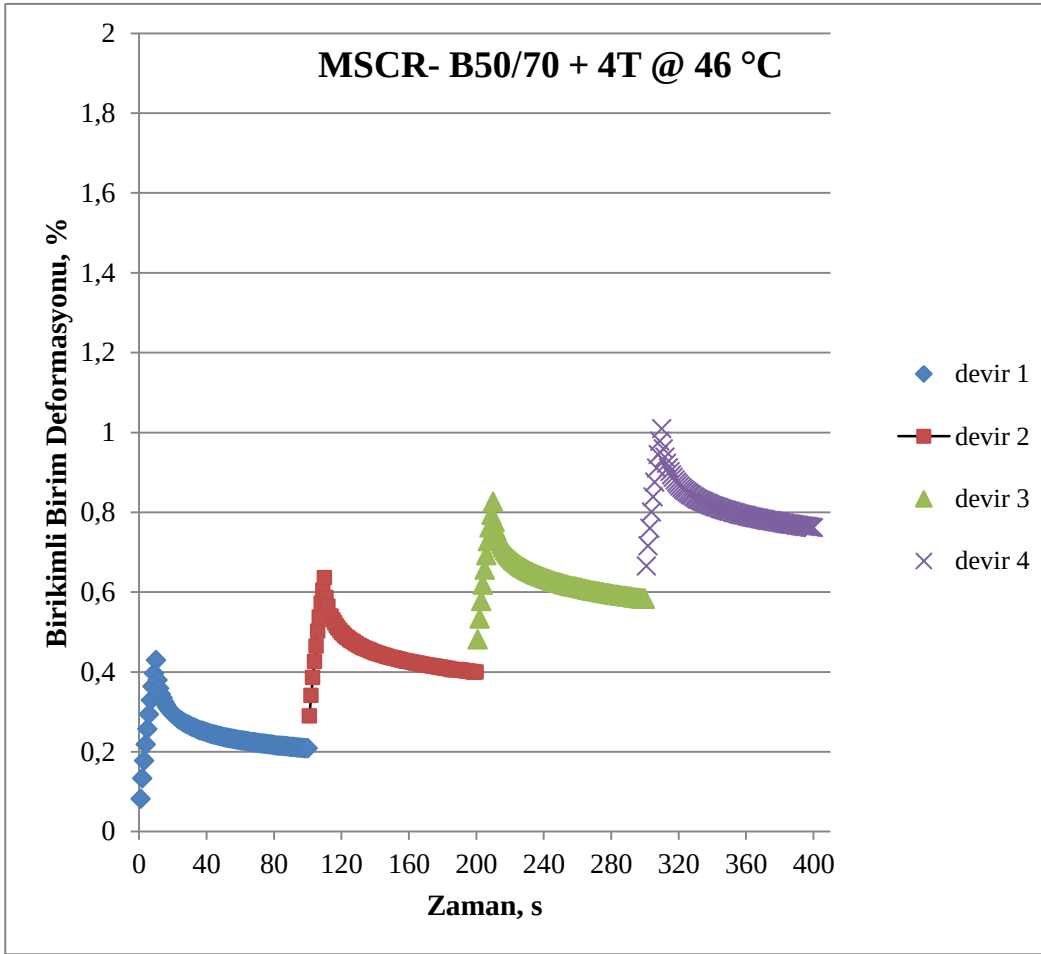
Deneyin temel amacı, yaşlanma sürecinden sonra antioksidan katkı maddesi içeren bitümlerin reolojik özelliklerindeki değişimi Çoklu Gerilmeli Geri Dönüşümlü Sünme (MSCR) deneyi tarafından desteklenerek değerlendirmektir.

Modifiyeli ve modifiyesiz bağlayıcı numuneleri laboratuvarında hazırlanmış ve dönel ince film etüvünde (RTFOT)'ta koşullandırılmıştır. DSR cihazını kullanarak, MSCR deneyleri, her bir bağlayıcı tipinin PG Plus değerlendirmesini elde etmek için her zaman farklı sıcaklıklarda RTFOT kalıntısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Antioksidan malzemelerin bitümlerin elastik geri kazanımı üzerindeki etkisini belirlemek için üç farklı yüzdede saf bitüm içeren üç farklı antioksidan malzemesi (toplam 20 örnekte) test edilmiştir. Örneğin, saf bitüm (B 50/70) ile farklı katkı malzemeleri eklenerek hazırlanan bu sert bağlayıcılar 52°C, 58°C ve 64°C sıcaklıkta test edilirken, saf bitüm (B 160/220) ile kullanılan farklı katkı malzemesi içeren bu modifiyeli bağlayıcılar üç farklı sıcaklıkta (46°C, 52°C ve 58°C) test edilip değerlendirilmiştir.

MSCR deneyleri 100 Pa ve 3200 Pa olacak şekilde iki farklı gerilme seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Birinci seviye, G^* (depolama modülü) ile deformasyonun sabit olduğu durumdaki ilişki arasındaki doğrusal visko-elastik gerilmenin bitümdeki davranışını temsil etmektedir. Kayma gerilmesi 3200 Pa olan seviye ise ağır trafik yükü koşullarını yansıtmaktadır (D'Angelo, 2010). Bu bölümde MSCR deney sonuçlarının analizi ve değerlendirilmesi yoluyla, bu deneyin standardına göre tüm bağlayıcılar için yeni bir performans sınıfı (PG Plus) kabul edilecektir.

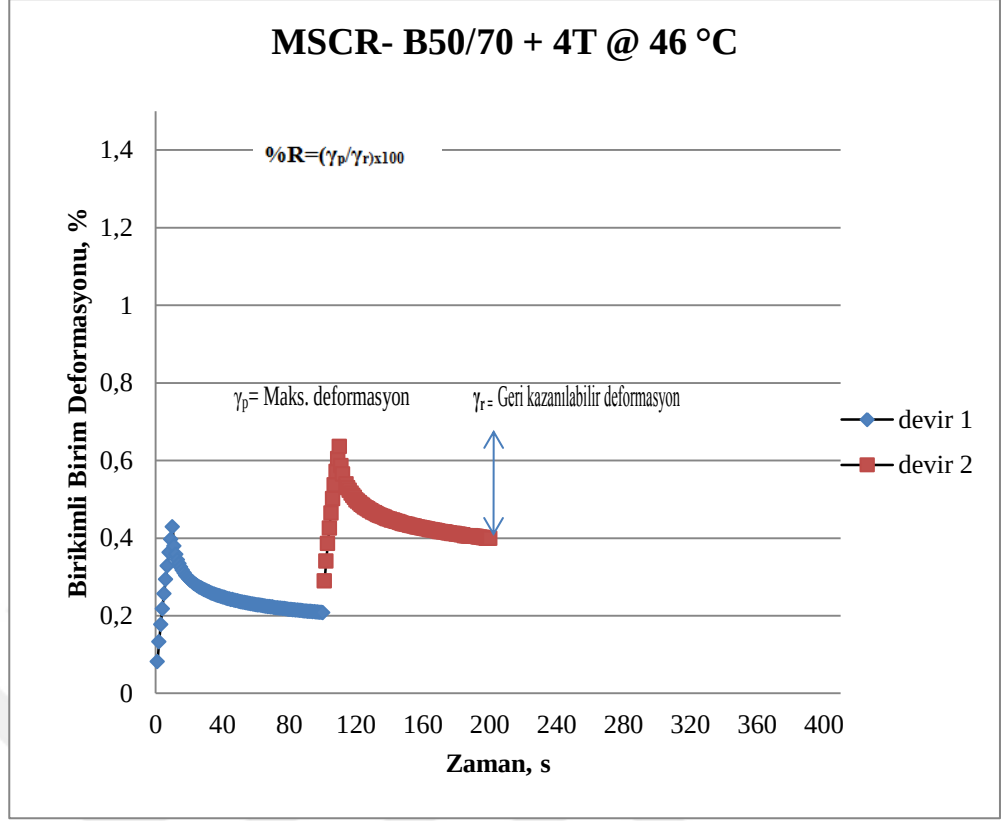
MSCR deneyinden elde edilen ana parametreler geri kazanılabilir deformasyonun (R) ortalama yüzdesi ve ortalama geri dönmeyen sünme

uyumluluğudur (J_{nr}). Bu deney (R) elastik davranış ve gerilme bağımlılığının varlığının bir göstergesini karşılamaktadır. (J_{nr}), sünme deneyi süresince ortalama geri dönmeyen deformasyonun gerilmeye oranını olarak tanımlanmaktadır. MSCR deney sonuçları, her devir için sıcaklık, uygulanan gerilme ve deformasyon yüzdesi, DSR yazılımında Excel sayfası olarak toplanmıştır. Ayrıca, bu yazılım, ortalama yüzde geri kazanımlar arasındaki yüzde farkı ve (J_{nr}) arasındaki yüzde farkı hakkında bilgi sağlamaktadır. Şekil 7.75, MSCR deneyinin örneksel bir sonucunu göstermektedir.

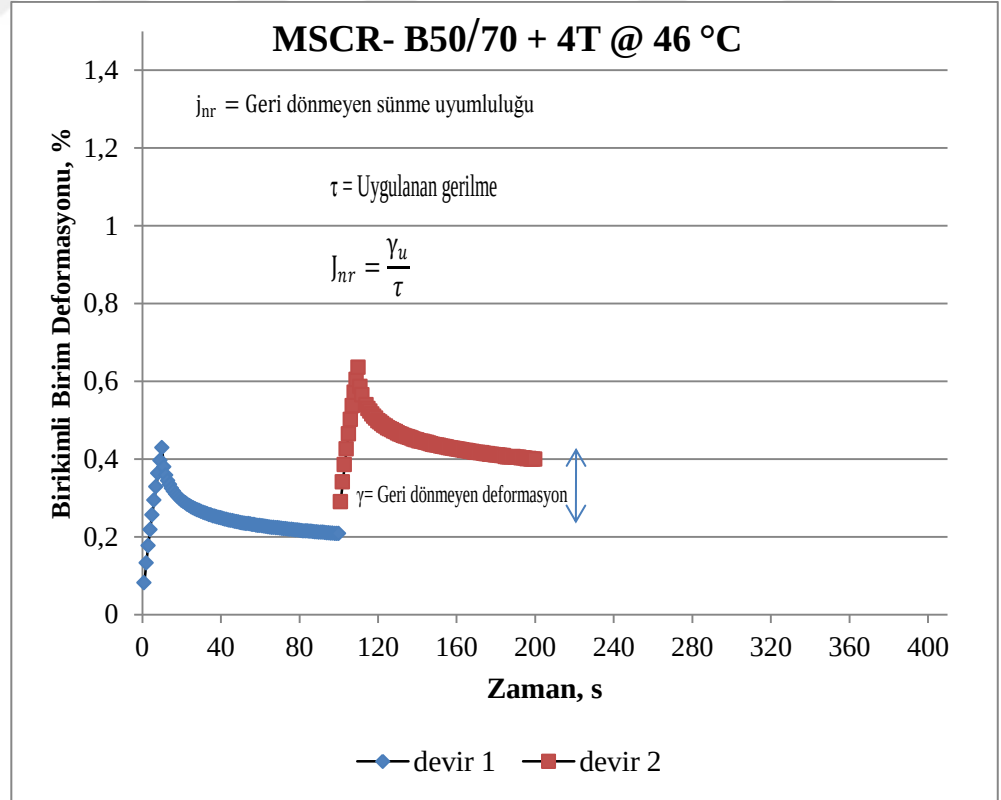


Şekil 7.75. 46 °C ve 100 Pa'da B 50/70+4T bağlayıcısının örneksel MSCR sünme deneyi sonucu.

Şekil 7.76 ve 7.77 her devir için yüzde geri kazanımın (R) ve geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) hesaplanmasını göstermektedir.



Şekil 7.76. Yüzde geri kazanımın (R) hesaplanması

Şekil 7.77. Geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) hesaplanması.

7.3.2.1 Elastik davranış

Antioksidan katkı maddesi içeren saf bitümlerin (B50/70 ve B160/220) ve bağlayıcıların elastik geri kazanım (R) ile ilgili olarak farklı eğilimleri oldukları gözlemlenmiştir. Çizelge 7.53 B50/70 veya B160/220'ye T'nin eklenmesinin tüm deney sıcaklıklarında saf bitümün elastik geri kazanımını (R) önemli derecede arttırdığını göstermektedir. Örneğin, 52°C'de B50/70'nin elastik geri kazanımı (R), saf bitüme T'den %4 eklenmesi ile %11.761'den %43.802'ye (yaklaşık 3.72 kat) artmış ve B160/220 için aynı deney sıcaklığında elastik geri kazanım (R) B 160/220'ye T'den %4 eklenmesi ile %8.631'den %38.330'e (yaklaşık 4.44 kat) artmıştır. Bu sonuçlar T modifikasyonunun bitümün sert ve yüksek elastik geri kazanım özelliğine yol açtığına işaret etmektedir. Ancak, T modifiyeli bağlayıcılarda en yüksek R değerine B50/70 veya B160/220 'e yaklaşık %4 oranında T eklenmesiyle elde edilmektedir.

Çizelge 7.53. Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+4T	+6T	+8T	Saf	+4T	+6T	+8T
		R (%)							
46	0.1	-	-	-	-	20.605	53.991	53.456	54.935
46	3.2	-	-	-	-	18.641	53.035	52.868	54.625
52	0.1	13.907	45.688	35.890	43.376	13.434	41.135	40.805	43.376
52	3.2	11.761	43.802	33.662	40.667	8.631	38.330	37.364	40.677
58	0.1	8.304	33.071	26.732	26.303	10.988	36.565	30.986	30.659
58	3.2	4.136	28.117	20.568	20.455	2.511	26.177	21.558	23.807
64	0.1	3.710	23.048	17.504	17.759	-	-	-	-
64	3.2	0.655	12.398	7.997	8.561	-	-	-	-

B50/70 ve B160/220 saf bitüm içeren F modifiyeli bağlayıcıların sonuçları Çizelge 7.54'te gösterilmiştir. F modifikasyonu, her iki saf bitümün de elastik geri kazanım davranışını arttırdığını göstermektedir, ancak bu artış T'nin etkisi kadar değildir. F antioksidan katkı maddesini B50/70 veya B160/220 bitümüne eklenme eğilimi her deney sıcaklığında R değerini arttırmıştır. Örneğin, Çizelge 7.54'te

B50/70'in R değeri, 52°C deney sıcaklığında %2 F eklenmesiyle %11.761'den %19.935'e (yaklaşık 1.70 kat) arttığı ve B160/220 için aynı deney sıcaklığında %2F eklenmesiyle B160/220'nin R değeri %8.631'den %18.879'e (yaklaşık 2.19 kat) arttığı görülmektedir.

Çizelge 7.54. Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+1F	+1,5F	+2F	Saf	+1F	+1,5F	+2F
		R (%)							
46	0.1	-	-	-	-	20.605	27.522	31.123	32.304
46	3.2	-	-	-	-	18.641	24.200	30.151	31.444
52	0.1	13.907	21.976	22.914	21.884	13.434	16.505	21.070	21.522
52	3.2	11.761	20.009	20.935	19.536	8.631	12.751	18.178	18.879
58	0.1	8.304	14.195	13.746	12.820	10.988	10.603	12.219	12.932
58	3.2	4.136	10.343	10.481	9.389	2.511	4.312	6.941	42.769
64	0.1	3.710	7.285	8.728	7.118	-	-	-	-
64	3.2	0.655	2.751	2.638	2.535	-	-	-	-

B50/70 veya B160/220 bitümüne ZnO'nun eklenmesi durumunda elastik geri kazanım eğilimi hemen hemen farklılık göstermektedir. Çizelge 7.55, farklı deney sıcaklıklarında B50/70 ve B160/220 saf bitümü içeren ZnO modifiyeli bağlayıcı için elde edilen R değerlerinin sonuçlarını göstermektedir. B50/70 bitümüne yaklaşık %1 ile %1.5 ZnO eklenmesi ile herhangi bir gerilme seviyesi ve deney sıcaklığında R değerinin genel olarak azaldığı fark edilmektedir. Ancak, daha fazla içerikte (%2) ZnO kullanımı ile saf bitümün aşırı elastik geri kazanım davranışı göstermektedir. Örneğin, 52°C deney sıcaklığında %11.761 elastik geri kazanım gösteren B50/70 bitümüne %1, %1.5 ve %2 ZnO eklenmesi ile R değeri sırasıyla %9.865, %11.299 ve %12.327 olmuştur. Ancak, %2 ZnO eklenmesi ile R değerindeki artış yaklaşık 1.05 kattır (R değerinde yaklaşık %5'lik bir artış).

Herhangi bir gerilme seviyesi ve deney sıcaklığında B160/220 bitümü ile ZnO kullanma eğilimi R değerinde dikkate değer bir artış göstermektedir. Örneğin, 52°C deney sıcaklığında B160/220 için R değeri ZnO'nun %1 kullanımı

ile %8.631'den %25.708'e (yaklaşık 2.98 kat) artmıştır. Ayrıca, ZnO'nun en fazla içerikte, R değerinin %1 ZnO kullanımı sonucuna göre kademeli bir şekilde azaldığını göstermektedir.

Çizelge 7.55. Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait geri dönme yüzdeleri (R değeri) (%).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO
		R (%)							
46	0.1	-	-	-	-	20.605	39.754	25.285	28.365
46	3.2	-	-	-	-	18.641	38.080	23.765	27.122
52	0.1	13.907	11.720	14.025	14.626	13.434	29.630	16.522	25.895
52	3.2	11.761	9.865	11.299	12.327	8.631	25.708	13.050	15.338
58	0.1	8.304	6.358	7.623	8.898	10.988	19.987	9.809	11.446
58	3.2	4.136	2.524	4.245	4.550	2.511	11.644	4.304	5.403
64	0.1	3.710	2.828	4.291	4.463	-	-	-	-
64	3.2	0.655	0.298	0.799	0.882	-	-	-	-

7.3.2.2 Geri dönmeyen uyumluluk (J_{nr})

MSCR deneyinden elde edilen sonuçlar, T ve F modifiyerlerin B50/70 veya B160/220 bitümle eklendiğinde RTFOT sonrası bağlayıcının geri dönmeyen uyumluluk (J_{nr}) değerinde azalmaya yol açtığını göstermiştir. Çizelge 7.56 ve Çizelge 7.57'de gösterildiği gibi, tüm gerilme seviyesi ve deney sıcaklıklarında trend geçerli olmaktadır. Örnek olarak, Çizelge 7.56, B50/50 bitümüne %4 T eklenmesi ile (J_{nr}) değerlerinin 0.321'den 0.0595'e önemli derecede azaldığını ve T modifikasyonunun etkisinin önemini göstermektedir. Aslında, bu azalma teorik olarak B50/70 bitümünün sertliğinin orijinal değerinden yaklaşık %81.5'i kadar arttığı anlamına gelmektedir. 52°C deney sıcaklığında saf bitümün sertliğindeki artış yaklaşık olarak %83.2 olduğu için B160/220 bitümüne %4 oranında T eklenmesi durumunda ise elde edilen bağlayıcı sert olmaktadır.

F eklenmesi ayrıca (J_{nr}) değerlerinde azalmaya yol açmıştır, ancak, T içeren bağlayıcılardaki azalma kadar olmamıştır. F modifikasyonu ayrıca saf

bitümdeki sertliğin artması üzerinde aynı etkiye sahiptir. Örneğin, Çizelge 7.57'te saf bitüm ile F modifiyeli bağlayıcının (J_{nr}) sonuçları karşılaştırıldığında, 52°C sıcaklıkta MSCR deney sonuçları, B50/70 bitümüne %2 F eklenmesi ile (J_{nr}) değeri 0.3210'dan 0.1681'e azaldığını (sertlikte yaklaşık olarak %47.6 artış) göstermektedir. Benzer şekilde, B160/220 bitümüne %1 F eklediği zaman, (J_{nr}) değeri 0.5485'den 0.3813'e azaldığı için elde edilen bağlayıcı %30.5 daha sert olmaktadır.

Çizelge 7.58'de gösterildiği gibi, B50/70 bitümüne %1 ZnO eklenmesi ile tüm gerilme seviyesi ve deney sıcaklığında B50/70 bitümü ile ilgili olarak (J_{nr}) değerinde artışa yol açmıştır. Örnek olarak, 52°C deney sıcaklığında B50/70 için (J_{nr}) değeri %1 ZnO eklenmesi ile 0.321'den 0.3693'e artmıştır ve bu teorik olarak bağlayıcının sertliğinde yaklaşık olarak %15 oranında bir azalma anlamına gelmektedir. B50/70 bitümüne %1.5 ZnO eklenmesi ile (J_{nr}) değerleri saf bitümün (J_{nr}) değerine yakın olmaktadır ve bu da davranışı değiştirmiştir. Tüm gerilme seviyeleri ve deney sıcaklıklarında B50/70 bitümüne %2 oranında ZnO eklenmesi (J_{nr}) değerlerini azaltmıştır. Örneğin, 52°C deney sıcaklığında (J_{nr}) 0.321'den 0.2973'e azalmıştır. Bu durum, teorik olarak B50/70 bitümüne %2 ZnO eklenmesinin bağlayıcının sertliğini yaklaşık olarak %7.4 arttıracak anlamına gelmektedir.

Çizelge 7.58'de tüm gerilme seviyeleri ve deney sıcaklıklarında, B160/220 bitümüne ZnO eklenmesi ile saf bitümün (J_{nr}) değerinin azaldığı sonucu gösterilmiştir. Örneğin, B160/220'nin (J_{nr}) değeri %1 ZnO eklenmesi ile 0.5485'den 0.1724'e azalmıştır (sertlikte yaklaşık %68.6 artma).

Çizelge 7.56. Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa^{-1}).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+4T	+6T	+8T	Saf	+4T	+6T	+8T
		J_{nr}							
46	0.1	-	-	-	-	0.1710	0.0272	0.0284	0.0256
46	3.2	-	-	-	-	0.1740	0.0274	0.0283	0.0255
52	0.1	0.3129	0.0583	0.1023	0.0829	0.5133	0.0895	0.1012	0.0829
52	3.2	0.3210	0.0595	0.1046	0.0862	0.5485	0.0924	0.1058	0.0862
58	0.1	0.8989	0.1820	0.2870	0.2810	1.3431	0.2333	0.2957	0.2581
58	3.2	0.9693	0.1940	0.3120	0.3050	1.5762	0.2695	0.3323	0.2903
64	0.1	2.2576	0.5702	0.8030	0.7431	-	-	-	-
64	3.2	2.4632	0.6617	0.9263	0.8557	-	-	-	-

Çizelge 7.57. Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa^{-1}).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+1F	+1,5F	+2F	Saf	+1F	+1,5F	+2F
		J_{nr}							
46	0.1	-	-	-	-	0.1710	0.1205	0.0720	0.0642
46	3.2	-	-	-	-	0.1740	0.1255	0.0724	0.0648
52	0.1	0.3129	0.1690	0.1433	0.1634	0.5133	0.3647	0.2175	0.2046
52	3.2	0.3210	0.1718	0.1467	0.1681	0.5485	0.3813	0.2247	0.2102
58	0.1	0.8989	0.4711	0.4226	0.4770	1.3431	0.9851	0.7076	0.6733
58	3.2	0.9693	0.4962	0.4431	0.4996	1.5762	1.0979	0.7641	0.7266
64	0.1	2.2576	1.3030	1.2806	1.3782	-	-	-	-
64	3.2	2.4632	1.4227	1.4495	1.5118	-	-	-	-

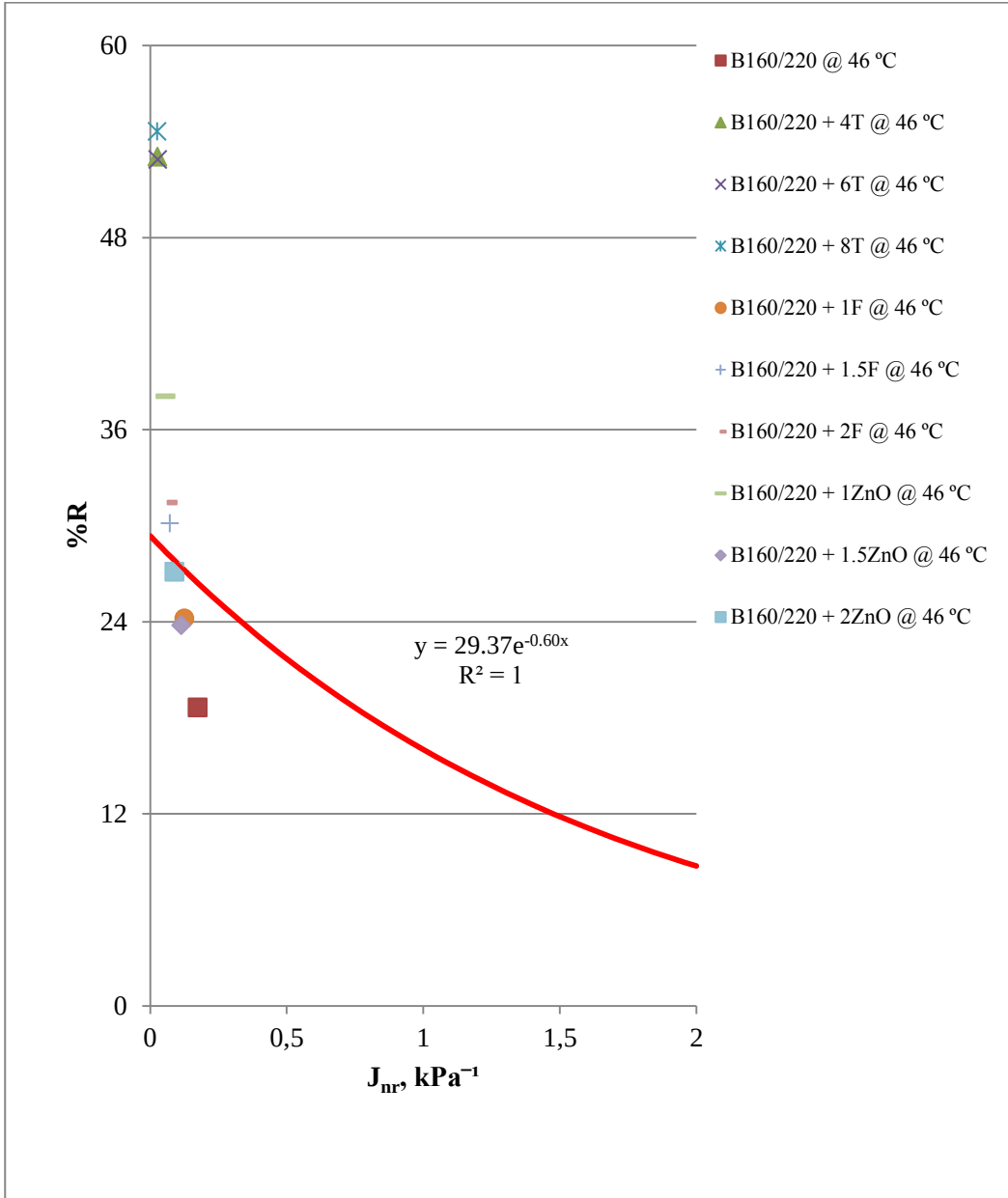
Çizelge 7.58. Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait geri dönmeyen uyumluluk, J_{nr} (kPa⁻¹).

Sıcaklık (°C)	Gerilme düzeyi (kPa)	B 50/70				B 160/220			
		Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO
		J_{nr}							
46	0.1	-	-	-	-	0.1710	0.0564	0.1134	0.0880
46	3.2	-	-	-	-	0.1740	0.0566	0.1147	0.0888
52	0.1	0.3129	0.3615	0.3277	0.2881	0.5133	0.1646	0.3299	0.2454
52	3.2	0.3210	0.3693	0.3402	0.2973	0.5485	0.1724	0.3434	0.2899
58	0.1	0.8989	1.1356	0.8832	0.8221	1.3431	0.5163	0.5776	0.8203
58	3.2	0.9693	1.2329	0.8802	0.8866	1.5762	0.9612	1.0474	0.9096
64	0.1	2.2576	2.6153	2.2115	2.0610	-	-	-	-
64	3.2	2.4632	2.8644	2.4597	2.2671	-	-	-	-

Yedinci bölümde yüksek sıcaklık PG sonuçları B160/220 bitümüne F eklenmesinin olumlu bir etkisinin olmadığını göstermesine rağmen, MSCR deneyinden elde edilen sonuçlar, F ve B 160/220 modifiyeli bağlayıcıların F eklenmesi ile bitümün özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Aslında, MSCR deneyinin doğrusal ve doğrusal olmayan visko-elastik gerilmesinin geniş bir aralığı kapsamaması sonucu deney sonuçların daha doğru olduğuna inanılırken, DSR deneyinde düşük bir gerilme seviyesinde doğrusal visko-elastik gerilme uygulanmakta olduğu için bu önemli bir sonuçtur. Ayrıca, sertlik değerlendirmesi ek olarak MSCR deneyi bu geniş aralıkta bağlayıcının elastik davranışını tarif etmektedir. Yedinci bölümde F içeren modifiyeli B160/220'nin BBR deney sonuçlarında saf bitüm sonuçlarına göre sünme oranında (*m-değeri*) bir artış görülmemiştir. Bunun nedeni, BBR deneyinin MSCR deneyi yerine sabit sıcaklık ve sabit yükte gösterilmiş olmasındandır.

MSCR deneyi standart (AASHTO TP 70-09) yöntemine göre, her bir deney sıcaklığında modifiyeli bağlayıcılarda elastik davranışın varlığının bir göstergesi olarak kullanmak için Şekil 7.78 – Şekil 7.81 çizilmiştir. Yatay eksen 3.2kPa'da geri dönmeyen sünme uyumluluğunu (J_{nr}) temsil ederken, dikey eksen aynı sıcaklıkta ölçülen geri kazanım yüzdesini temsil etmektedir. AASHTO M 320'e

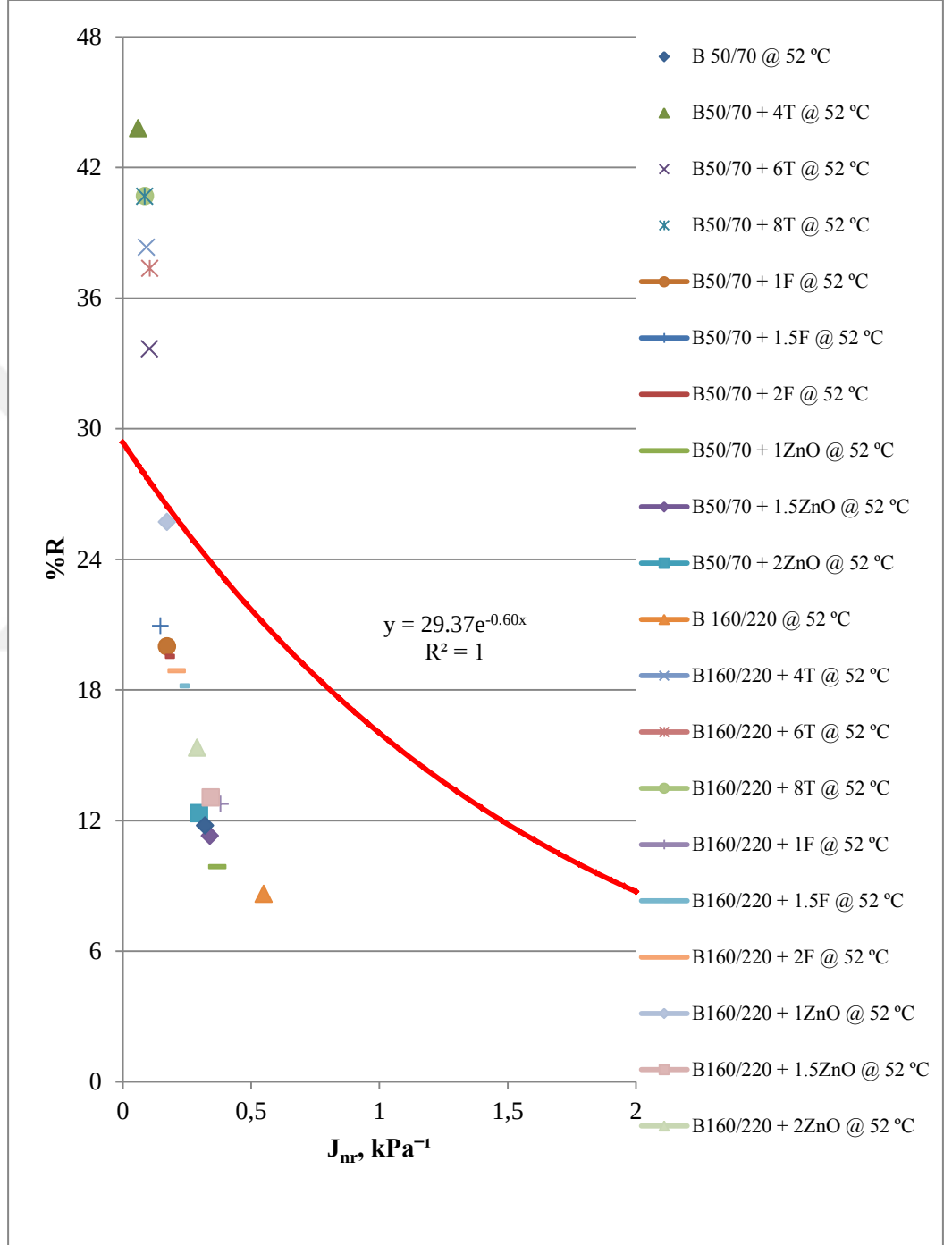
göre, eğri (J_{nr}) 2 kPa^{-1} olduğunda durmaktadır. (J_{nr}) değerlerinin 2 kPa^{-1} üzerinde olanları % geri kazanımın minimum değerine sahip olduğundan gerekli değildir.



Şekil 7.78. 46°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 160/220 bağlayıcısı için geri dönmeyen süne uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.

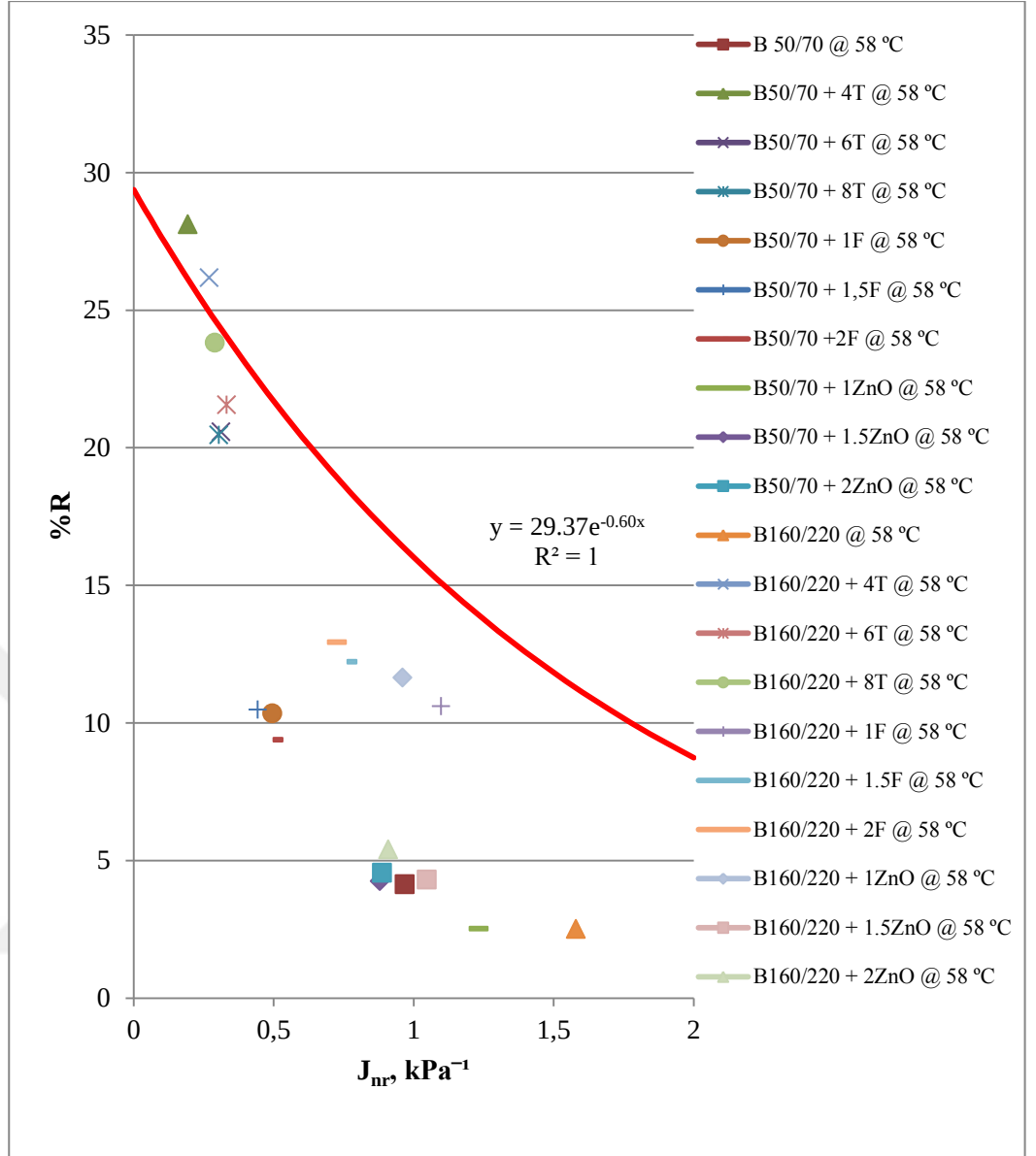
Şekil 7.78'den tüm modifiyeli bağlayıcıların saf bitüme göre daha elastik davranış gösterdiği ve daha sert olduğu fark edilmektedir. 46°C ve 3.2 kPa'da gerekli minimum geri kazanımı elde eden modifiyeli bağlayıcılar B160/220+4T, B160/220+6T, B160/220+8T, B160/220+1.5F, B160/220+2F ve B160/220+1ZnO'dur. Ancak, B160/220+1F, B160/220+1.5ZnO, ve

B160/220+2ZnO gibi diğer modifiyeli bağlayıcılar gerekli minimum sınıra yakın bir yüzde geri kazanım elde etmiştir. B160/220 saf bitümünün eğrisi aşağıya doğru düşmektedir. Bu da saf bitümün zayıf bir elastik davranışa sahip olduğu anlamına gelmektedir.



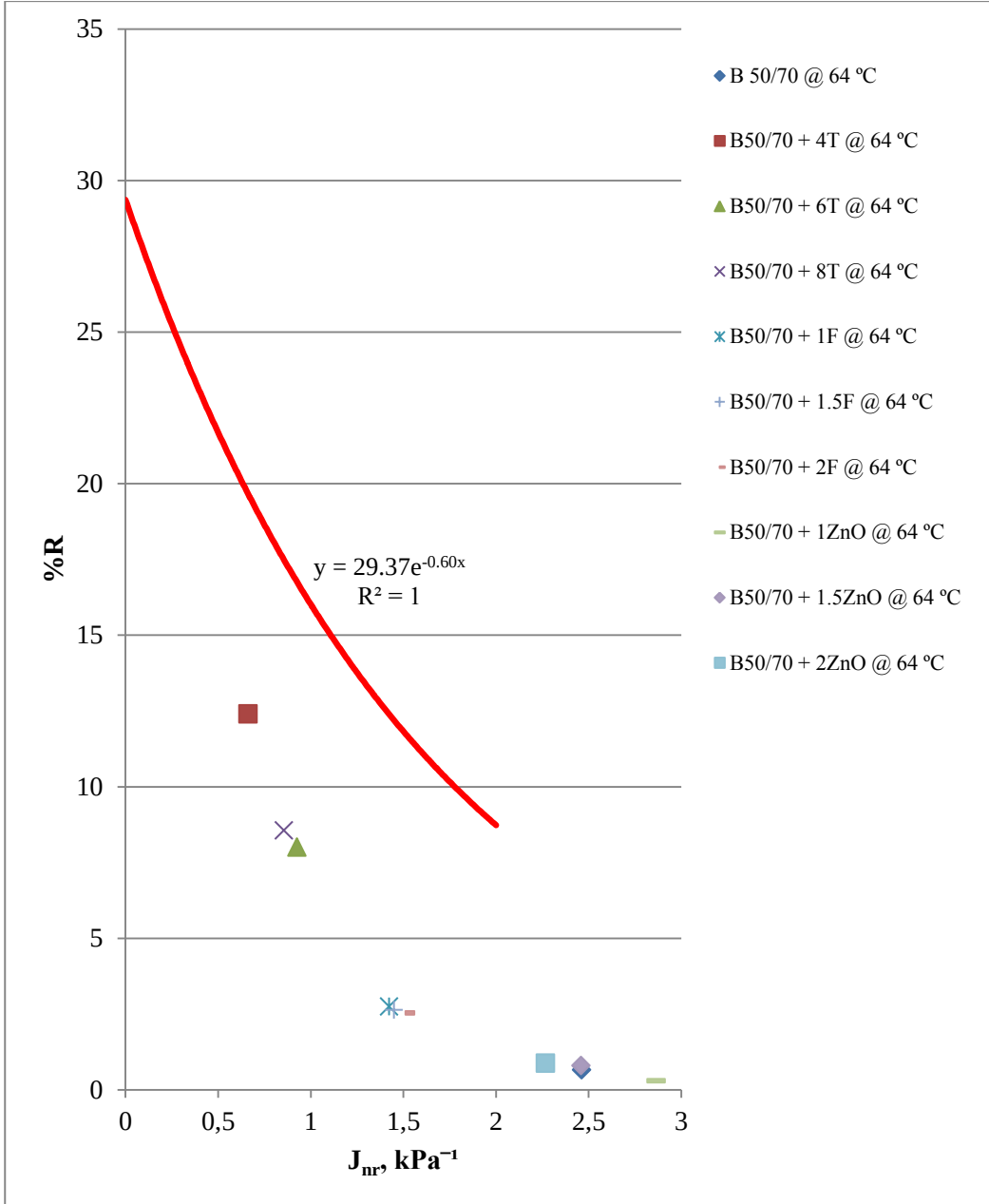
Şekil 7.79. 52°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 50/70 bağlayıcısı için geri dönmeyen sünmeye uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.

Aynı şekilde, 52°C ve 3.2 kPa'da test edilen antioksidan modifiyeli B50/70 ve B160/220 bitümü için sünme direncini göstermek için Şekil 7.79 çizilmiştir. Şekil 7.53'te görüldüğü gibi, bazı bağlayıcılar gerekli minimum geri kazanım limitinin altına düşmektedir ve diğer bağlayıcılar ise bunun üstünde kalmaktadır. Ancak, tüm bağlayıcılar arasında en yüksek sünme direnci B160/220+4T bağlayıcısına, en düşük sünme direnci ise B160/220 bağlayıcısına aittir. Yukarıdaki sınır çizgisi bulunan bağlayıcılar tüm T modifiyeli bağlayıcılardır ve diğer bağlayıcılar bunun altında yer almaktadır. B160/220+1ZnO bağlayıcısı minimum geri kazanım sınırına yakın uygun bir sonuç elde etmiştir. F ve ZnO modifiyeli bağlayıcılar gibi bazı bağlayıcıların deney sıcaklığına duyarlı olduğunu belirtmek önemlidir. Bu bağlayıcıların 46°C'de test edildiği ve gerekli minimum elastik geri kazanım sınırını elde ettiğinden dolayı 52°C deney sıcaklığında limitin altına düştüğü açıkça fark edilmektedir.



Şekil 7.80. 58°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 1600/220 ve B 50/70 bağlayıcıları için geri dönmeyen süne uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.

Benzer şekilde, Şekil 7.80, 58°C ve 3.2 kPa'da tüm modifiyeli ve modifiyesiz bağlayıcıların elastik davranışını açıklamaktadır. Bu yüksek deney sıcaklığında, en iyi elastik davranış sırasıyla B50/70+4T ve B160/220+4T bağlayıcılarında elde edilmiştir. En zayıf bağlayıcı en düşük yüzde geri kazanıma ve maksimum J_{nr} değerine sahip B160/220 saf bitümüdür.



Şekil 7.81. 64°C ve 3.2 kPa'da antioksidan modifiyeli B 1600/220 ve B 50/70 bağlayıcıları için geri dönmeyen süne uyumluluğu - yüzde geri kazanım grafiği.

Şekil 7.81, sıcaklığın test edilen bağlayıcıların elastik davranışı üzerine etkisini açıkça göstermektedir. Ayrıca, Şekil 7.81, B50/70 bitümlü tüm antioksidan modifiyeli bağlayıcılar 64°C ve 3.2 kPa deney koşullarında kabul edilemez bir elastik geri kazanım özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, antioksidan modifikasyonu bu yüksek deney sıcaklıklarında RTFOT numuneleri için saf bitüme göre uygun geri kazanım özelliği göstermektedir. Şekil 7.81'den de görülebileceği gibi, en zayıf numuneler B50/70 saf bitüm ve ZnO

modifiyeli bağlayıcılar iken, T modifiyeli bağlayıcılar daha iyi elastik davranış seviyesi elde etmiştir.

MSCR deneyinin yazılımından toplanan verileri kullanarak, farklı gerilme seviyesi ve sıcaklıklarda modifiyesiz ve modifiyeli test edilmiş tüm bağlayıcılar için Çizelge 7.59–61’de sırayla ortalama yüzde geri kazanımlar arasındaki yüzde farkları gösterilmektedir.

Çizelge 7.59. Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).

Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220			
	Saf	+4T	+6T	+8T	Saf	+4T	+6T	+8T
	Ortalama R’lerin arasındaki fark yüzdesi							
46	-	-	-	-	9.53	1.77	1.10	0.56
52	15.43	4.13	6.21	6.25	35.75	6.82	8.43	6.22
58	50.19	14.98	23.06	22.23	77.15	28.41	30.43	22.35
64	82.33	46.21	54.31	51.7t9	-	-	-	-

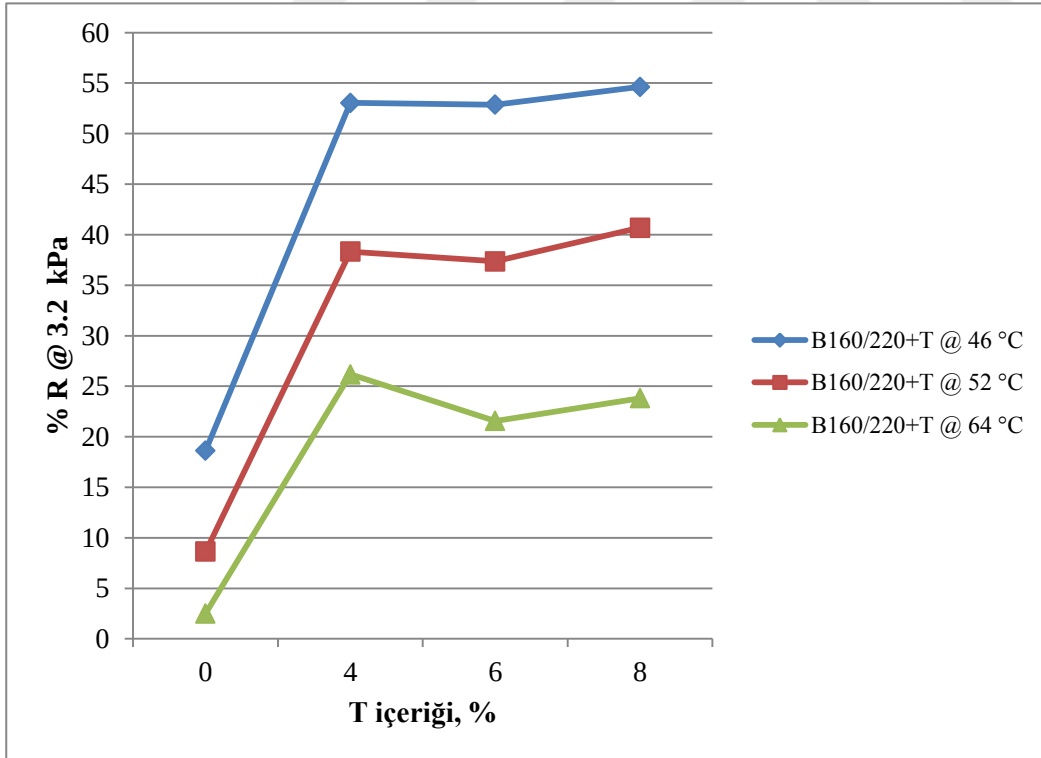
Çizelge 7.60. Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).

Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220			
	Saf	+1F	+1,5F	+2F	Saf	+1F	+1,5F	+2F
	Ortalama R’lerin arasındaki fark yüzdesi							
46	-	-	-	-	9.53	12.07	3.12	2.66
52	15.43	8.95	8.64	10.73	35.75	22.75	13.73	12.28
58	50.19	27.14	27.76	26.76	77.15	59.33	43.20	42.77
64	82.33	62.24	69.78	64.38	-	-	-	-

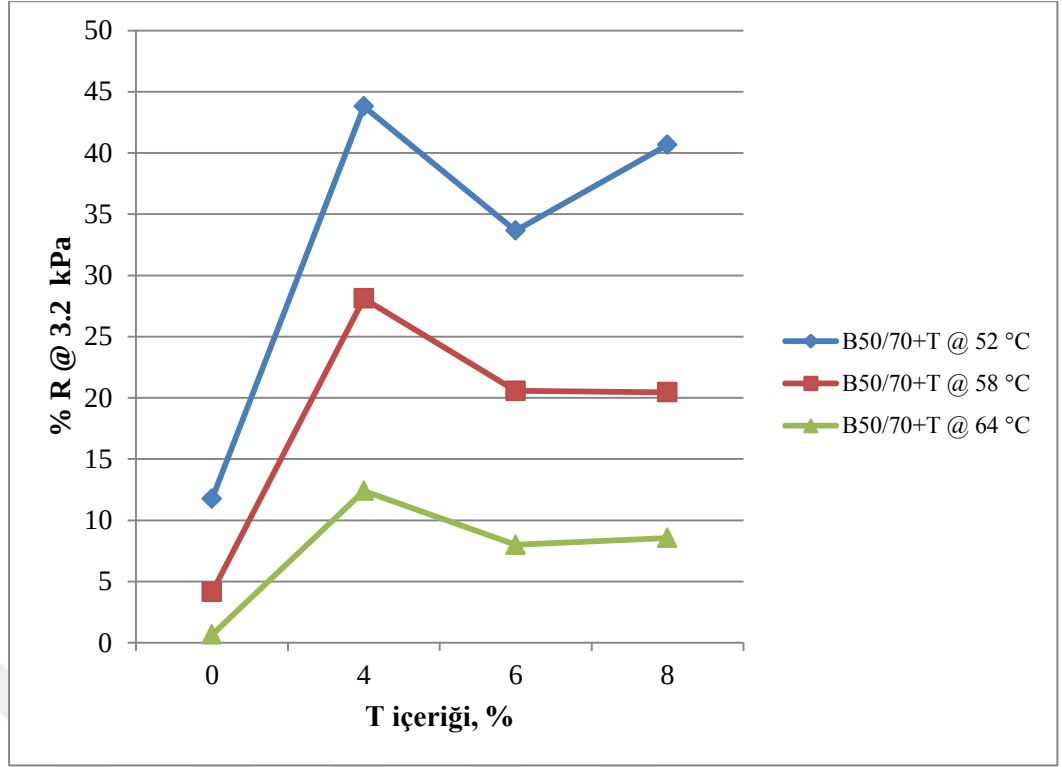
Çizelge 7.61. Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait ortalama yüzde geri dönmelerin arasındaki fark yüzdesi (%).

Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220			
	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO
	Ortalama R'lerin arasındaki fark yüzdesi							
46	-	-	-	-	9.53	2.70	6.01	4.38
52	15.43	15.83	19.44	15.72	35.75	13.24	21.01	40.77
58	50.19	60.29	44.39	48.86	77.15	41.74	56.13	52.79
64	82.33	89.46	81.37	81.66	-	-	-	-

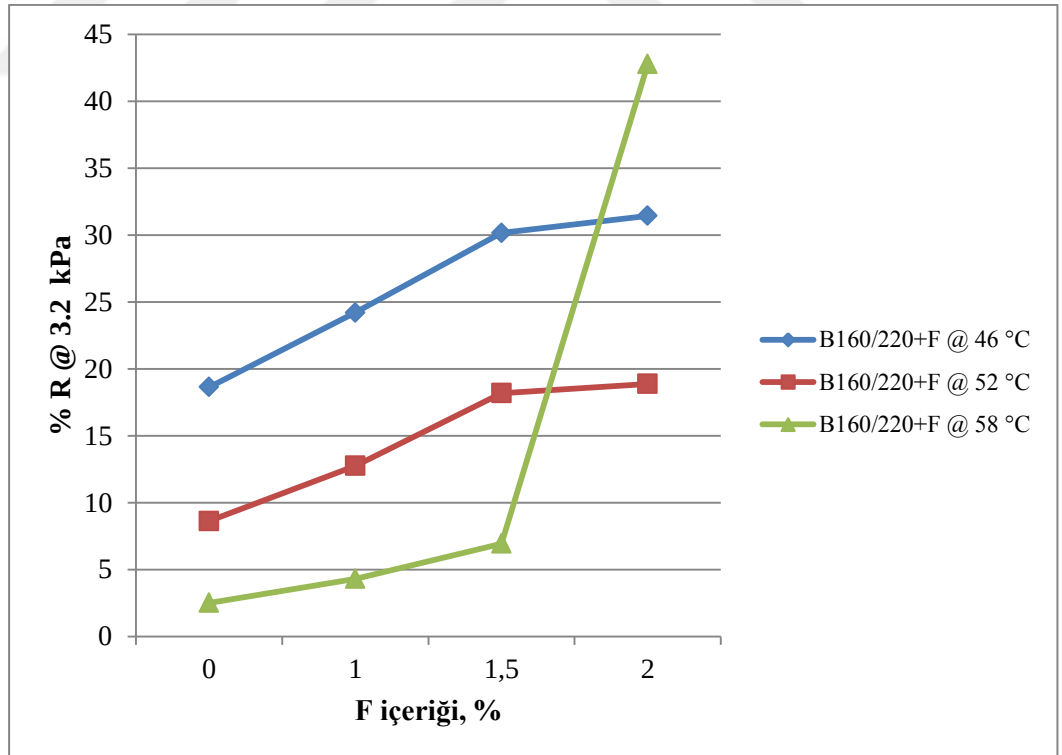
Farklı sıcaklıklar altında bağlayıcıların reolojik davranışlarını anlamak için, asfalt bağlayıcının davranışının sıcaklığa bağlı olduğu ve bir sıcaklıktan diğerine değiştiği Şekil 7.82–5.87'de dağılım tipi grafiklerle çizilerek gösterilmiştir. Şekil 7.82–5.87 tüm modifiyesiz ve modifiyeli bağlayıcı türleri için sıcaklığın artmasıyla yüzde geri kazanımın azaldığını göstermektedir.



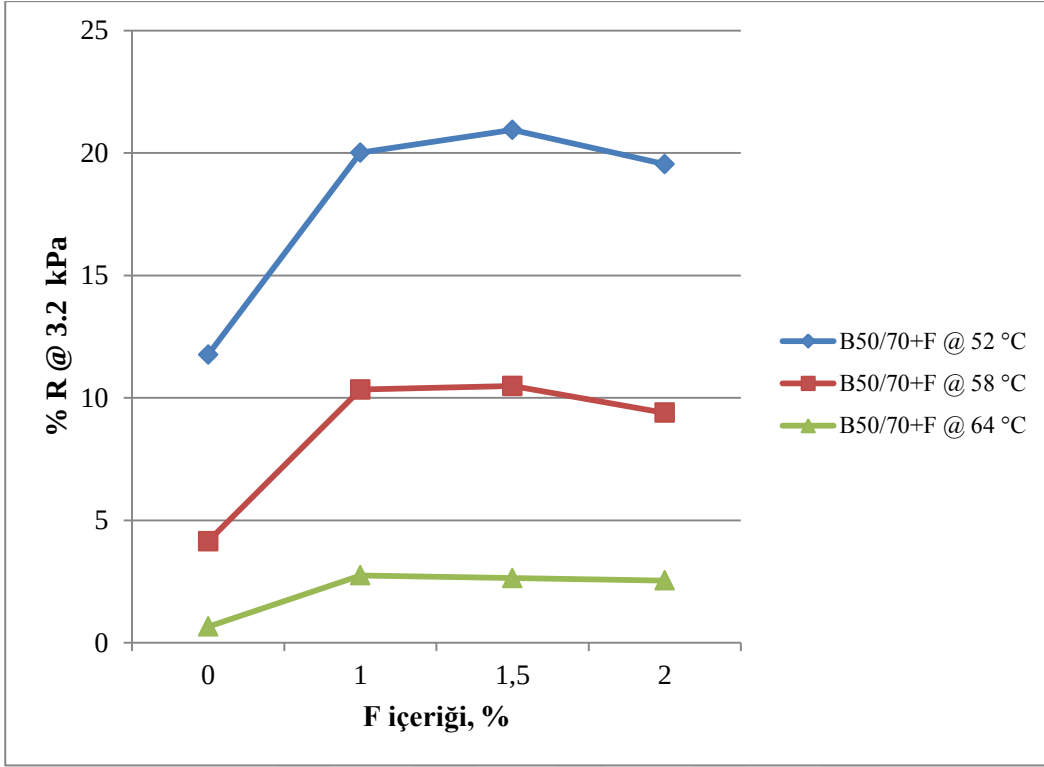
Şekil 7.82. T katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.



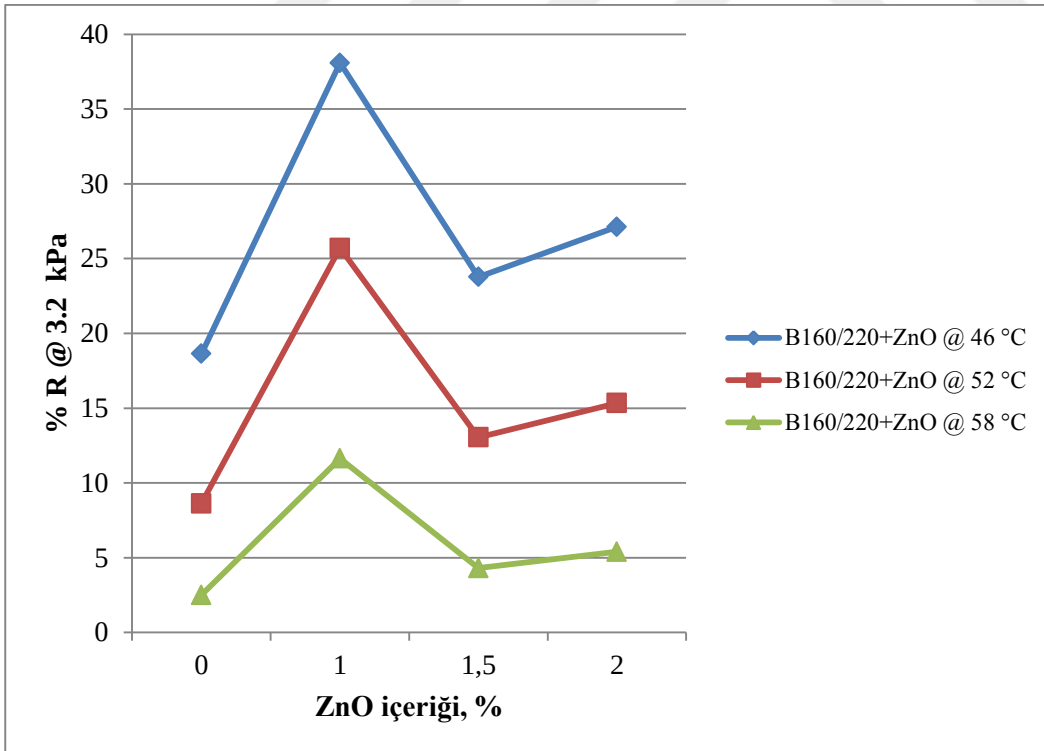
Şekil 7.83. T katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.



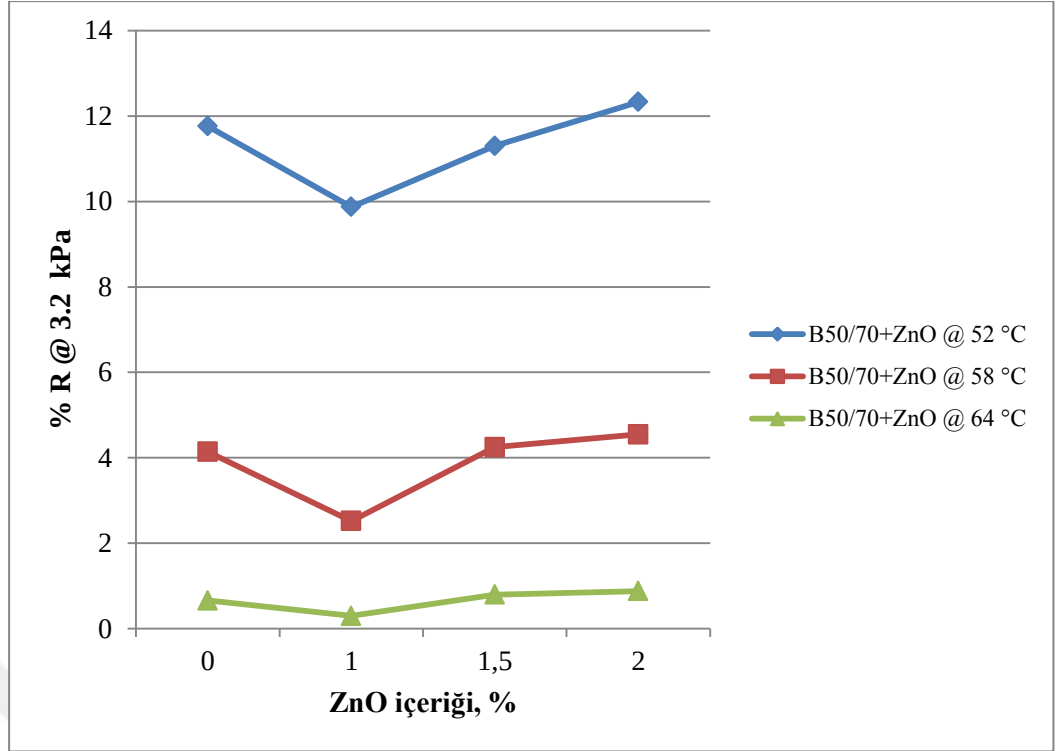
Şekil 7.84. F katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.



Şekil 7.85. F katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.



Şekil 7.86. ZnO katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.



Şekil 7.87. ZnO katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda %R @3200 Pa.

7.3.2.3 Gerilme ve sıcaklık hassasiyeti

Tüm bağlayıcı türleri için iki gerilme seviyesi ve üç farklı deney sıcaklığı uygulanması ile, bağlayıcıların hem gerilme hem de sıcaklık hassasiyetleri değerlendirilebilmektedir. MSCR deneyinin yazılımından toplanan verileri kullanarak, farklı gerilme seviyesi ve sıcaklıklarda modifiyesiz ve modifiyeli test edilmiş tüm bağlayıcılar için Çizelge 7.62–7.64’de ortalama yüzde geri kazanımlar arasındaki yüzde farkları ve J_{nr} arasındaki yüzde farkı gösterilmektedir.

Modifiyeli bağlayıcıların antioksidan içeriği arttıkça gerilme hassasiyeti azalmıştır. Bu çalışmada test edilen J_{nr} ve R, 3200 Pa’lık yüksek bir gerilme seviyesinde düşük değerler almıştır.

MSCR yöntemine göre bağlayıcıları değerlendirmek için PG Plus sınıflandırma sistemi AASHTO M 332 yönetmeliğine bağlı olarak kurulmuştur. Çizelge 7.62–7.64 tüm deney sıcaklıklarında her birbağlayıcı için gerilme hassasiyetini göstermektedir. AASHTO M 332’ye (2014) göre, gerilme hassasiyeti %75’i aşmamalıdır.

Çizelge 7.62. Saf ve thiourea katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%).

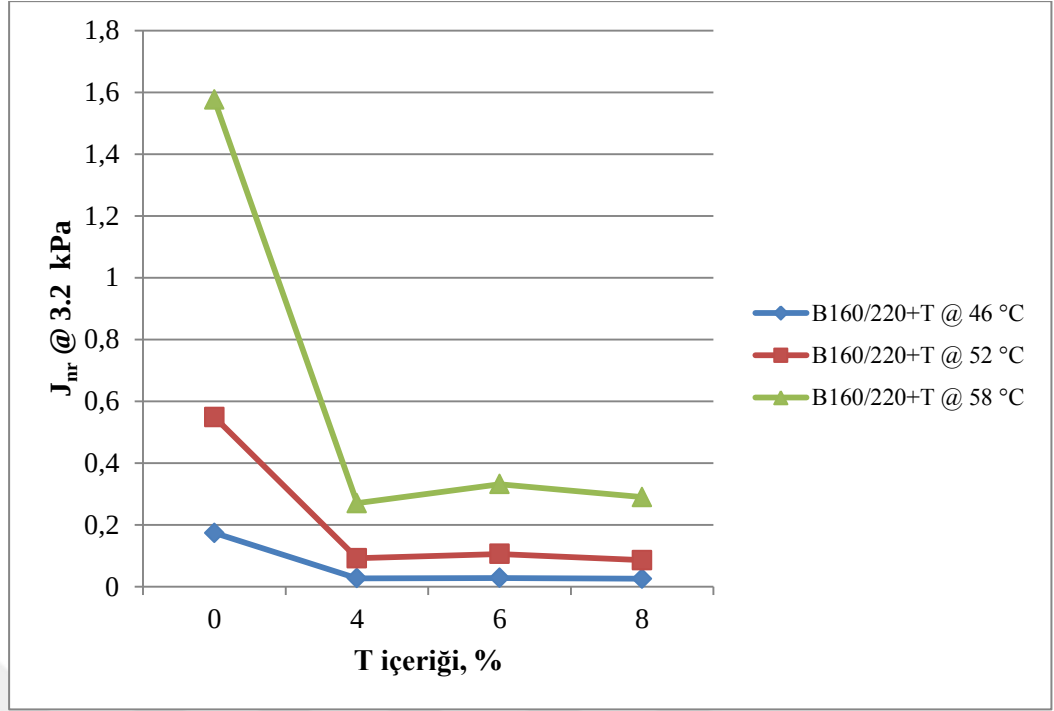
Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220				Standart
	Saf	+4T	+6T	+8T	Saf	+4T	+6T	+8T	
	J _{nr} 'lerin arasındaki fark yüzdesi								
46	-	-	-	-	1.75	1.04	0.16	0.35	≤ %75
52	2.59	2.06	2.25	3.98	6.86	3.24	4.55	3.98	
58	7.83	6.59	8.71	8.54	17.36	15.52	12.38	12.48	
64	9.11	16.05	15.35	15.15	-	-	-	-	

Çizelge 7.63. Saf ve furfural katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%).

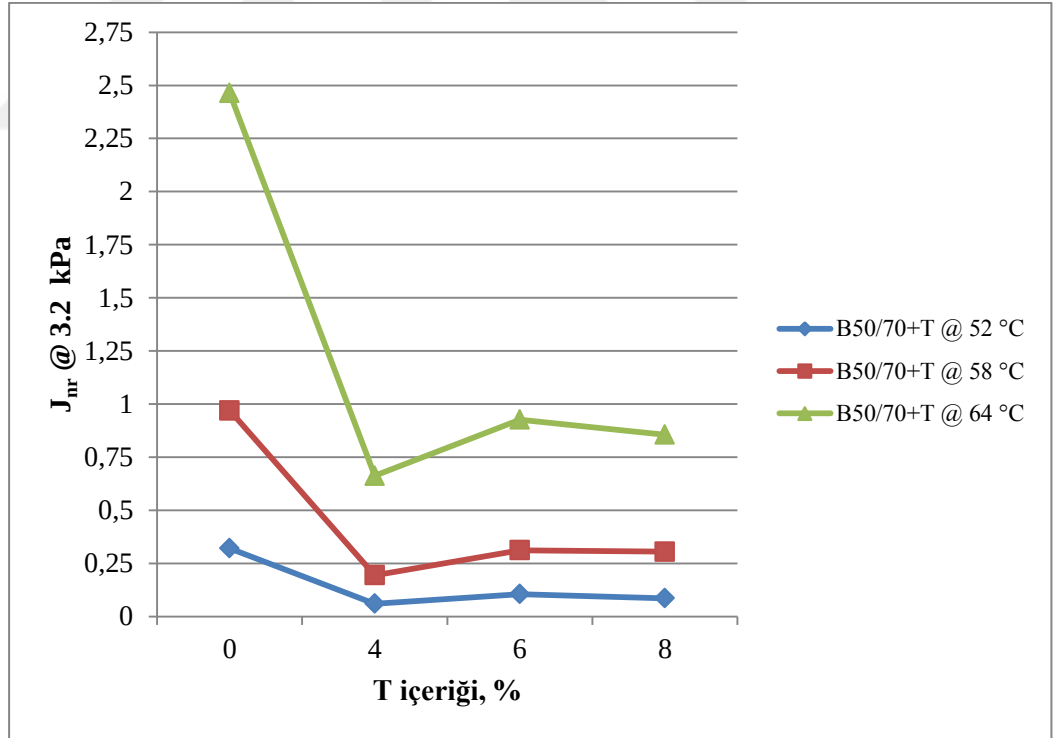
Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220				Standart
	Saf	+1F	+1,5F	+2F	Saf	+1F	+1,5F	+2F	
	J _{nr} ’lerin arasındaki fark yüzdesi								
46	-	-	-	-	1.75	4.21	0.60	0.95	≤ %75
52	2.59	1.67	2.39	2.86	6.86	4.55	3.28	2.73	
58	7.83	5.31	4.84	4.75	17.36	11.45	7.99	7.90	
64	9.11	9.19	13.18	9.69	-	-	-	-	

Çizelge 7.64. Saf ve ZnO katkılı bağlayıcılara ait dönmeyen uyumlulukların arasındaki fark yüzdesi (%).

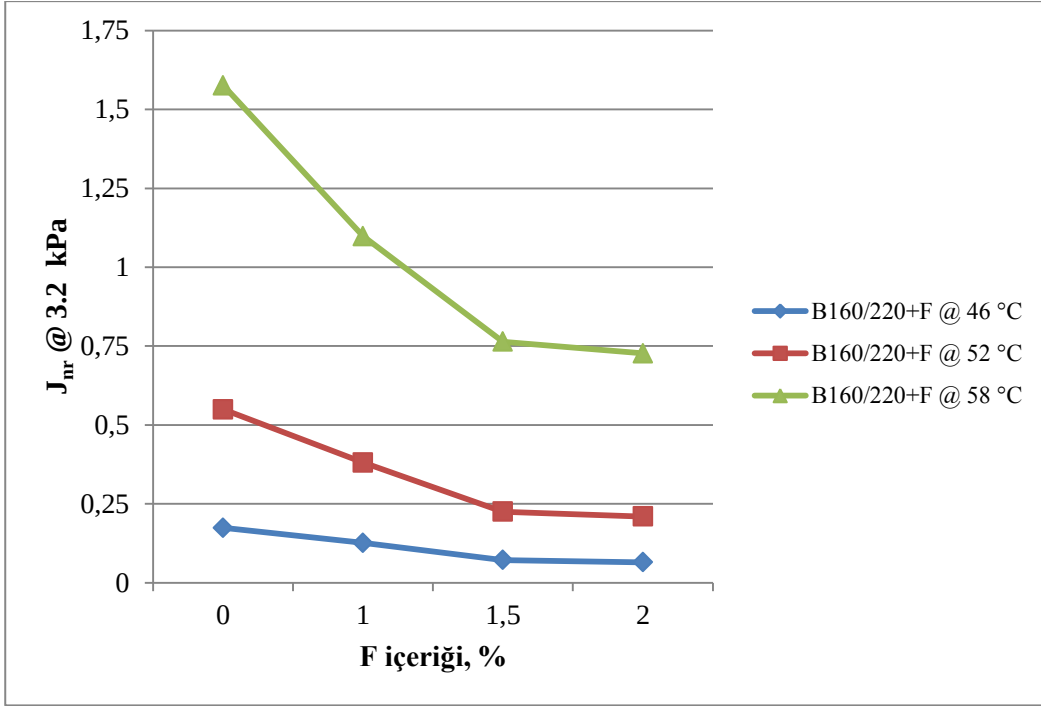
Sıcaklık (°C)	B 50/70				B 160/220				Standart
	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO	Saf	+1ZnO	+1,5 ZnO	+2ZnO	
	J _{nr} 'lerin arasındaki fark yüzdesi								
46	-	-	-	-	1.75	0.26	1.09	0.98	≤ %75
52	2.59	2.15	3.81	3.20	6.86	4.75	4.11	18.14	
58	7.83	8.57	5.64	7.84	17.36	11.88	8.97	10.88	
64	9.11	9.52	11.22	10.00	-	-	-	-	



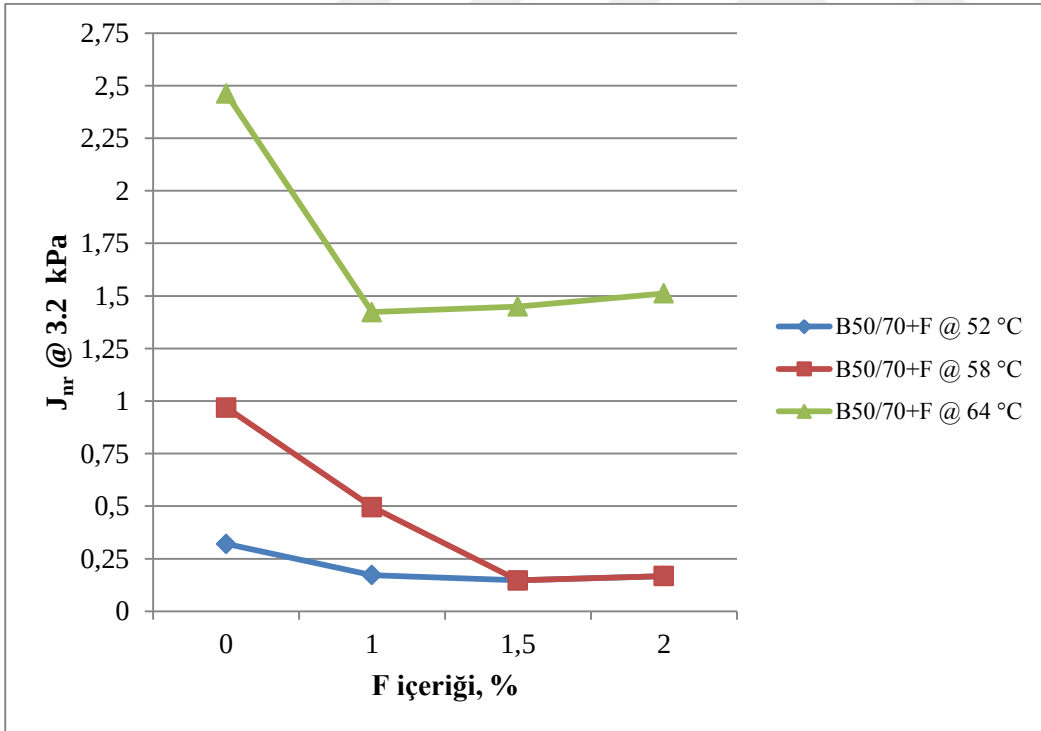
Şekil 7.88. T katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.



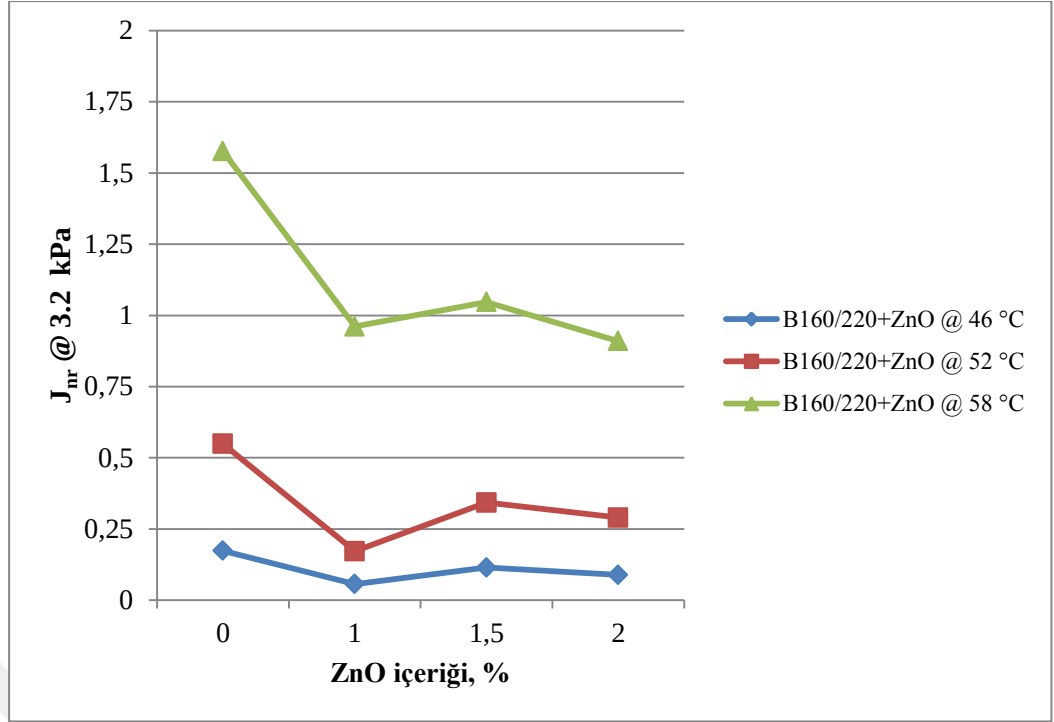
Şekil 7.89. T katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.



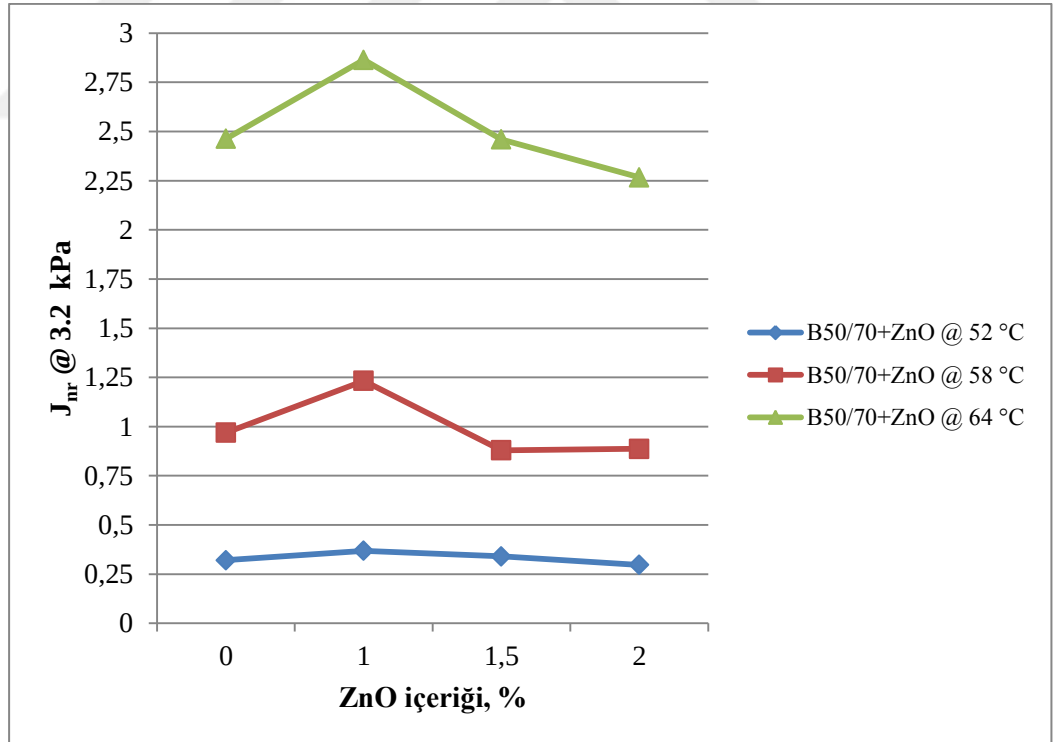
Şekil 7.90. F katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.



Şekil 7.91. F katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.



Şekil 7.92. ZnO katkılı B 160/220 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.



Şekil 7.93. ZnO katkılı B 50/70 için MSCR testinde çeşitli sıcaklıklarda J_{nr} @3200 Pa.

MSCR deneyinden elde edilen sonuçlar, antioksidan katkı maddesinin RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların J_{nr} değerlerinde azalmaya yol açtığını

göstermiştir. Ayrıca, J_{nr} her modifiye içeriğinde artarken, genel olarak tüm antioksidan içeren bağlayıcılar için %R artan sıcaklık ile azalmıştır.

7.3.2.4 RTFOT'la yaşlandırılmış antioksidan katkılı bitümlerin DSR cihazı kullanılarak MSCR metoduyla performans (PG plus) sınıflarının belirlenmesi

AASHTO M 332'ye (2014) göre, PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcı için $G^* \sin \delta$ değeri 6000'i aşmamalıdır. Buna göre, tüm bağlayıcılar için bu şart Çizelge 7.65'e göre saptanmıştır.

Çizelge 7.65. MSCR için $G^* \sin \delta$ değerleri @ 25°C.

Bağlayıcı		$G^* \sin \delta$ @25°C, kPa	Standart
B 160/220	Saf	1841	6000 maks.
	+4T	3500	
	+6T	2661	
	+8T	2636	
	+1F	2650	
	+1,5F	2825	
	+2F	1762	
	+1ZnO	2634	
	+1,5ZnO	2705	
	+2ZnO	2854	
B 50/70	Saf	3523	
	+4T	4760	
	+6T	3369	
	+8T	3180	
	+1F	4411	
	+1,5F	4232	
	+2F	3950	
	+1ZnO	3209	
	+1,5ZnO	3431	
	+2ZnO	2920	

Çizelge 7.65'te görüldüğü gibi, tüm bağlayıcılar $G \cdot \sin \delta$ 'nin şartını sağlamıştır. B160/220 ve B50/70 modifiyeli bağlayıcıların PG Plus değerlendirmesi aşağıdaki Çizelge 7.66 ve 7.67'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.66. Saf B160/220 için arazi yüksek sıcaklıklarında her bağlayıcı için önerilen trafik düzeyleri ve PG sınıfları.

Bağlayıcı		Trafik düzeyi (S, H, V yada E) BSK'nin bir fonksiyonu olarak (°C)		
		46	52	58
B 160/220	Saf	E	V	H
	+4T	E	E	E
	+6T	E	E	E
	+8T	E	E	E
	+1F	E	E	H
	+1,5F	E	E	V
	+2F	E	E	V
	+1ZnO	E	E	V
	+1,5ZnO	E	E	H
	+2ZnO	E	E	V

Çizelge 7.67. Saf B50/70 için arazi yüksek sıcaklıklarında her bağlayıcı için önerilen trafik düzeyleri ve PG sınıfları.

Bağlayıcı		Trafik düzeyi (S, H, V yada E) BSK'nin bir fonksiyonu olarak (°C)		
		52	58	64
B 50/70	Saf	E	V	S
	+4T	E	E	V
	+6T	E	E	V
	+8T	E	E	V
	+1F	E	E	H
	+1,5F	E	E	H
	+2F	E	E	H
	+1ZnO	E	H	S
	+1,5ZnO	E	V	S
	+2ZnO	E	V	S

Çeşitli bağlayıcıların MSCR ve DSR deney sonuçlarının karşılaştırması, bu deney yönteminin hem modifiyeli hem de modifiyesiz bağlayıcıların viskoz, elastik ve gerilme hassasiyetine dair ilgili teknik bilgileri sağladığını doğrulamıştır. Çizelge 7.68 ve Çizelge 7.69’da MSCR yöntemiyle farklı test sıcaklarında tüm bağlayıcılar için elde edilen PG plus sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 7.68. Saf B160/220 için Superpave klasik PG ile MSCR metoduyla performans PG plus) tüm bağlayıcılar için PG sınıfları.

Bağlayıcı		Klasik PG Sınıfı	PG Plus Sınıfı
B 160/220	Saf	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52V-22 yada PG 58H-22
	+4T	PG 64-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58E-22
	+6T	PG 64-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58E-22
	+8T	PG 64-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58E-22
	+1F	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58H-22
	+1,5F	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58V-22
	+2F	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58V-22
	+1ZnO	PG 64-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58V-22
	+1,5ZnO	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58H-22
	+2ZnO	PG 58-22	PG 46E-22, PG 52E-22 yada PG 58V-22

Çizelge 7.69. Saf B50/70 için Superpave klasik PG ile MSCR metoduyla performans (PG plus) tüm bağlayıcılar için PG sınıfları.

Bağlayıcı		Klasik PG Sınıfı	PG Plus Sınıfı
B 50/70	Saf	PG 64-16	PG 52E-16, PG 58V-16 yada PG 64S-16
	+4T	PG 76-22	PG 52E-22, PG 58E-22 yada PG 64V-22
	+6T	PG 70-22	PG 52E-22, PG 58E-22 yada PG 64V-22
	+8T	PG 70-22	PG 52E-22, PG 58E-22 yada PG 64V-22
	+1F	PG 70-16	PG 52E-16, PG 58E-16 yada PG 64H-16
	+1,5F	PG 64-22	PG 52E-22, PG 58E-22 yada PG 64H-22
	+2F	PG 70-22	PG 52E-22, PG 58E-22 yada PG 64H-22
	+1ZnO	PG 64-22	PG 52E-22, PG 58H-22 yada PG 64S-22
	+1,5ZnO	PG 64-22	PG 52E-22, PG 58V-22 yada PG 64S-22
	+2ZnO	PG 70-22	PG 52E-22, PG 58V-22 yada PG 64S-22

7.4 Sıcak Karışımlarda Uygulanan Test Yöntemlerinin Sonuçları

7.4.1 Marshall karışım dizayn metodu sonuçları

7.4.1.1 Antioksidan katkı maddesinin optimum içeriğinin seçimi

Klasik fiziksel özellikleri ve PG sınıflandırması deneyi sonuçları ile MSCR ve ana eğri deney sonuçları üzerine modifiyeli bağlayıcıların kapsamlı bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Farklı T yüzdelerindeki T modifiyeli bağlayıcılara gelince, daha önce Bölüm 7.1'de tartışılan bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin (özellikle penetrasyon ve yumuşama noktası dâhil) %4 T'nin %6 ve %8 sonuçlarına kıyasla daha sert bağlayıcı (en yüksek yumuşama noktası ve en düşük penetrasyon değerine sahip) üretmek için yeterli ve uygun olduğu işaret edilmiştir. Bu sonuçlar bu çalışmada kullanılan her iki saf bitüm (B 160/220 ve B 50/70) için de geçerlidir.

Saf B 160/220 ve B 50/70 bağlayıcısının F modifikasyonu ile ilgili olarak, fiziksel özellik sonuçları, saf B 160/220 bitümü ile %1 F kullanımının en yüksek yumuşama noktası ve en düşük penetrasyon değeri elde ettiğini ortaya koymuştur. Saf B 50/70 bitüme %1 F eklenmesi en sert F modifiyeli B 50/70 bağlayıcısının oluşmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, %2 F kullanımı ile bir şekilde iyi sonuç edilmiş ve %1 F kullanımına nispeten yakın çıkmıştır.

ZnO fiziksel özellik sonuçlarına gelince, penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları, saf B 160/220 bitüme %2 ZnO ilavesinin en sert bağlayıcıyı oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, saf B 50/70 bitüme %2 ZnO ilave edilmesi de iyi sonuçlar göstermiştir.

Daha önce Bölüm 7.2'de gösterilen ve bu çalışmada kullanılan farklı katkı maddelerinin PG sınıflandırma sonuçları üzerine etkisinin incelenmesi, saf bitüm ile kullanılmak üzere uygun antioksidan içeriği için iyi bir gösterge vermektedir.

Daha önce Bölüm 7.2.4'de ele alınmasından dolayı ve Çizelge 7.45-46 sonuçlarına bağlı olarak, T'nin %4 kullanımı B 50/70 bitümü için tavsiye edilmektedir. B 50/70 ile %4 T kullanımı, PG 64-16'dan PG 76-22'ye kadar saf bitümün PG sınıfını arttırmıştır. Bununla birlikte, tüm yüzdelerde B 160/220 bitüme T eklenmesi, PG 58-22'den PG 64-22'e kadar PG sınıflandırmasındaki artışa katkıda bulunmuştur.

Benzer şekilde, B 160/220 bitüme F eklenmesi ile PG sınıflandırması sonuçları, saf bitümün PG sınıflandırmasında hiçbir iyileşme olmadığını göstermiştir. Bu durum, hem saf B160/220 hem de tüm F modifiyeli B 160/220 bağlayıcılarının PG 58-22 PG sınıflandırmasında olduğu için açıktır. Saf B 50/70 bitüme %2 F eklenmesi ile saf bitümün PG sınıflandırmasında PG 64-16'dan PG 70-22'e kadar iyileşme olmasından dolayı saf bitümün tipi ayrıca F modifikasyonu kullanmanın etkisi için önemli bir rol oynamaktadır.

Aynı durumda Çizelge 7.45-46'da gösterilen sonuçlar, saf B160/220 bitümü ile %1 ZnO kullanımı ve B50/70 bitümü ile %2 kullanımının saf bitümün PG sınıflandırmasında sırasıyla PG 58-22 ve PG 64-16'dan PG 64-22 ve PG 70-22'ye etkili bir şekilde iyileştirdiğini göstermiştir.

Bölüm 7.3.2'de bahsedilen MSCR deney sonuçlarına bağlı olarak, farklı seviyelerde antioksidan modifikasyonlarının kullanımı, uygun katkı maddesi içeriğini belirlemek için ayrıca uygulanabilir olmaktadır. Hem saf 160/220 hem de saf B 50/70 bağlayıcısı için T'nin tüm kullanım yüzdeleri Çizelge 7.68-69'da gösterilen benzer iyileşme seviyesine yol açmıştır.

Yüksek sıcaklık ve/veya ağır ve yüksek trafik yükleri altında kalıcı deformasyona karşı bağlayıcının direncini değerlendiren MSCR yönteminin esasına göre, katkı maddesi içeriğini seçme kriterinin bu esasa uygun olduğuna inanılmaktadır. Bilindiği gibi, yumuşak bitüm ılıman ile soğuk iklimlerdeki projelerde, sert bitüm ise genellikle sıcak bölgelerde kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu yumuşak bağlayıcılar (B 160/220 modifiyeli bağlayıcılar) için, karşılaştırma 46°C'de, sert bağlayıcılar (B 50/70 modifiyeli bağlayıcılar) için ise 64°C'de olması daha mantıklı görünmektedir.

46°C'de, farklı modifikasyon seviyelerindeki tüm T, F ve ZnO modifiyeli B 160/220 bağlayıcıları için aynı PG sınıflandırması (PG 46E-22) elde edilmiştir. Ayrıca, 64°C'de B 50/70+2F bağlayıcısı için en yüksek sınıf olan PG 64-22 elde edilmiştir. Buna ek olarak, 64°C'de farklı modifikasyon seviyelerinde tüm ZnO modifiyeli B 50/70 bağlayıcıları aynı sınıflandırmayı (PG 64-22) göstermiştir.

Ana eğri deney sonuçlarından, B 160/220 bitümü için en iyi sonucun %4T, %1F ve %1ZnO bağlayıcılarında elde edildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, B 50/70 bitümü için, en iyi sonuçlar %4T, %1 ve 2F ve %1 ve 2ZnO içeren bağlayıcılarda elde edilmiştir.

Yukarıdaki tartışmaların sonucunda, Marshall karışım numunelerin hazırlanmasında ikisi saf altısı antioksidan katkılı bitümler olmak üzere, toplamda sekiz bağlayıcı kullanılmasına (B 160/220, B 160/220+4T, B 160/220+1F, B 160/220+1ZnO, B 50/70, B 50/70+4T, B 50/70+2F, B 50/70+2ZnO) karar verilmiştir. Marshall numunelerindeki optimum bağlayıcı yüzdesi ise %5 olarak seçilmiştir.

7.4.1.2 Agregaların özgül ağırlıklarının belirlenmesi

İri, ince ve filler agreganın özgül ağırlıkları bulunarak Çizelge 7.70'te verilmiştir. Agregalar karışımının özgül ağırlığı da karışık agreganın oranına göre hesaplanmıştır.

Çizelge 7.70. Agregaların özgül ağırlıkları.

Agrega boyutu	Agrega özgül ağırlığı, gr/cm ³
Kaba	2.637
İnce	2.472
Filler	2.739
Karışım	2.552

7.4.1.3 Bitümlü sıcak karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının bulunması

Hazırlanan gevşek Marshall karışımları için maksimum teorik özgül ağırlık bulunmuştur. Marshall numuneleri için hava boşluk yüzdesini tahmin etmek için toplamda sekiz karışım test edilmiştir. Aşağıda bulunan Çizelge 7.71 tüm karışımlar için G_{mm} 'yi özetlemektedir.

Çizelge 7.71. Bitümlü sıcak karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları.

Özellik	Karışım ¹							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Maks. teorik özgül ağırlık (G_{mm}), gr/cm ³	2.506	2.509	2.508	2.510	2.507	2.510	2.509	2.511

¹Not: Karışımların gösterimi bağlayıcı türüne göredir: 1= Saf B 160/220, 2= Saf B 50/70, 3=B 160/220+4T, 4=B 50/70+4T, 5=B 160/220+1F, 6=B 50/70+2F, 7=B 160/220+1ZnO, 8=B 50/70+2ZnO.

7.4.1.4 Hava boşluğu hesabı

Saf ve antioksidan katkılı bitümlü sıcak karışımlar Marshall tokmağı ile sıkıştırıldıktan sonra, her numunenin G_{mb} özgül ağırlık değerleri bulunmuştur.

Marshall numuneleri DSR sünme deneyi gereği ± 1 boşluk seveyisinde olmak üzere sıkıştırılmıştır.

Çizelge 7.72'de her numune için hesaplanan hava boşluk yüzdesi (V_h) ve G_{mb} değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.72. Marshall karışımların maksimum hava boşluk yüzdeleri.

Karışım	Ağırlık, gr			G_{mb} , gr/cm ³	V_h , %
	A	C	B		
1	1252.2	718.0	1260.1	2.310	7.8
2	1248.8	714.6	1253.8	2.316	7.7
3	1256.1	721.4	1263.2	2.318	7.6
4	1252.8	717.7	1259.9	2.311	7.9
5	1242.2	707.9	1245.7	2.310	7.8
6	1251.4	724.0	1256.7	2.349	6.4
7	1245.0	714.7	1247.7	2.336	6.9
8	1255.9	715.8	1259.3	2.311	7.9

Çizelge 7.72'e görüldüğü gibi numunelerin hava boşluk yüzdelerinin %6-8 arasında olmasına dikkat edilmiştir. Marshall yöntemiyle hazırlanan numuneler, daha sonra DSR sünme deneyine tabi tutulmuştur.

7.4.2 DSR sünme (Creep) deney sonuçları

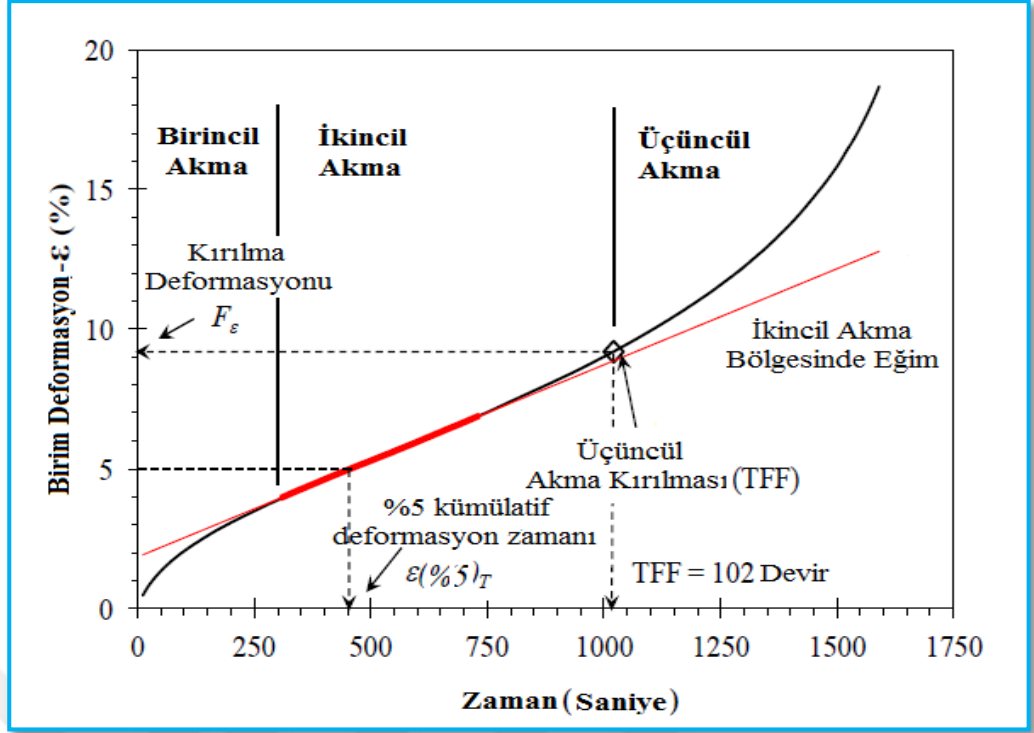
Karışım kırımları üzerinde tekrarlı sünme deneyi, dinamik kayma reometresi kullanılarak "DSR sünme deneyi" olarak adlandırılan deney ile gerçekleştirilmiştir. 34 kPa'lık bir gerilmede 1 saniye yükleme ve 9 saniye boyunca sıfır yükleme ile deneyler hedef sıcaklıkta (52°C) gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.94'te DSR cihazı ile deney öncesi ve sonrası bazı karışım örnekleri aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 7.94. DSR sünme deney parçalarından test edilen tipik örnekler.

Sünme, performansa dayalı ve zamana bağlı bir davranıştır. Bir sünme deneyinin temel sonuçları, şematik olarak Şekil 7.95'te gösterilen deformasyon - zaman eğrisidir.

Çeşitli sünme ve geri kazanım deney döngülerinin incelemesi (Şekil 7.95) deney numunelerindeki kalıcı deformasyonun nasıl geliştiğini açıklamaktadır. Her 1 saniye için uygulanan gerilme sırasında ortaya çıkan bir deformasyon bulunmaktadır ve 9 saniye için gerilme uygulanmayan sürede nispeten önemli miktarda bir deformasyonun geri dönüşü mevcuttur. Bununla birlikte, Şekil 7.95, numunenin hiçbir zaman toplam deformasyon kadar geri dönmediğini ve genellikle birikmiş bir şekilde kalıcı deformasyonun olduğunu göstermektedir. Tekrarlı deney döngüsü ile, numune kademeli olarak hızlı bir deformasyon gelişimi gösterir (birincil akma); bunu doğrusal hızda bir plastik deformasyon periyodu takip eder (ikincil akma); ve son olarak deformasyon hızlı bir şekilde biriktiği zaman kırılma noktası oluşmaktadır (üçüncül akma) (Şekil 7.95).



Şekil 7.95 DSR test verileri ile ilgili terimler (Gerald Reinke 2005, Jesse D. Doyle 2013)

Deney numunelerinin davranışını tanımlamak için dört bağımlı değişken kullanılmıştır. Bunlar: a) %5 kümülatif deformasyon zamanı ($\epsilon(\%5)_T$ olarak ifade edilen); b) ikincil akma bölgesinde eğimin tersi (kolaylık için ters olarak ifade edilen ve $(\Delta\epsilon/\Delta T)^{-1}$ şeklinde gösterilen); c) üçüncül akma kırılması (TFF olarak ifade edilen üçüncül kırılmanın döngü sayısı); ve d) kırılma esnasında kümülatif deformasyon (F_ϵ olarak ifade edilen).

B 160/220, B 50/70, B 160/220+4T, B 50/70+4T, B 160/220+1F, B 50/70+2F, B 160/220+1ZnO ve B 50/70+2ZnO bağlayıcıları ile hazırlanan kırıntı numunelerinin DSR sünme deneyi sonuçları Çizelge 7.73 ve Şekil 7.96-103) verilmiştir.

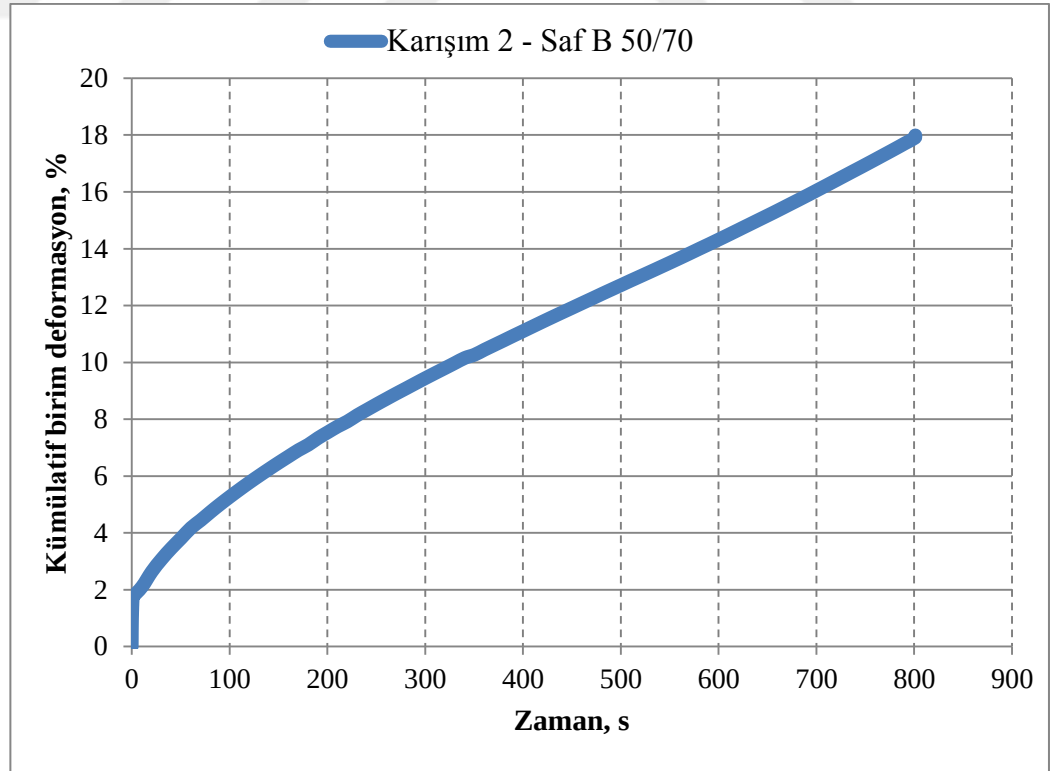
Çizelge 7.73. DSR sünme deneyinden tüm bağlayıcılar için elde edilen sonuçlar.

Karışım No.	Bağlayıcı	Agrega	%5 Küm. def. zamanı, ε (%5) _T , (saniye)	İkincil akma bölgesinde eğimin tersi, $(\Delta\varepsilon/\Delta T)^{-1}$	Üçüncül akma kırılması TFF, (devir)	Kırılma esnasında küm. def., F_e , (%)
1	B 160/220	Kalker	120.6	72.7	80	15.4
2	B 50/70	Kalker	90.5	60.4	71	16.2
3	B 160/220+4T	Kalker	110.2	58.8	57	13.4
4	B 50/70+4T	Kalker	1661.5	563.3	479	10.3
5	B 160/220+1F	Kalker	40.9	33.5	34	14.8
6	B 50/70+2F	Kalker	210.6	125.7	153	13.8
7	B 160/220+1ZnO	Kalker	440.8	123.6	77	8.0
8	B 50/70+2ZnO	Kalker	180.2	71.2	93	15.9

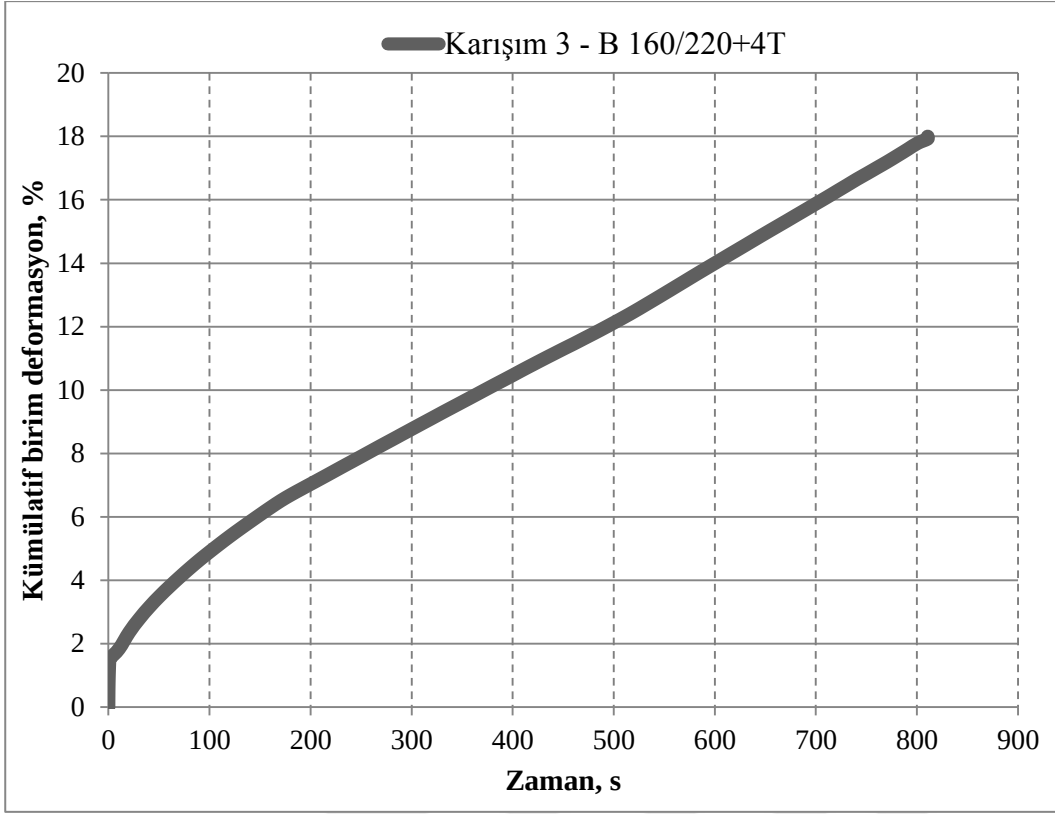
Çizelge 7.73'te gösterilen veriler, tüm deney karışımlarının DSR dinamik sünme deney sonuçlarının bir özetidir.



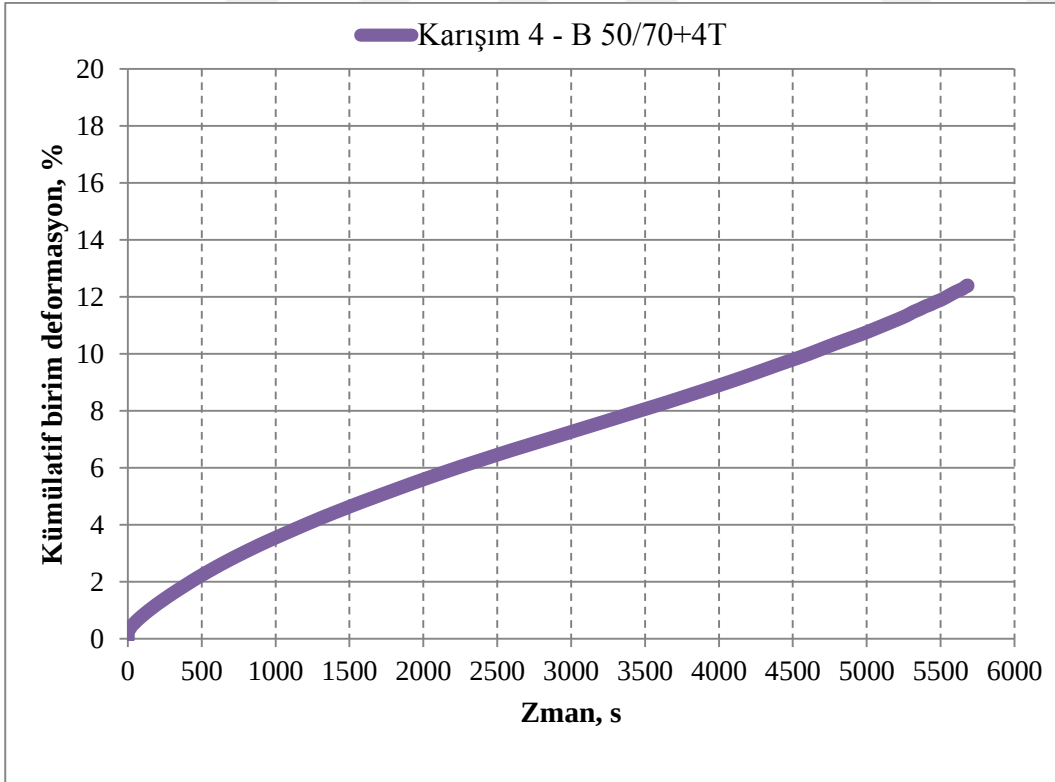
Şekil 7.96. 52°C saf B 160/220 karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



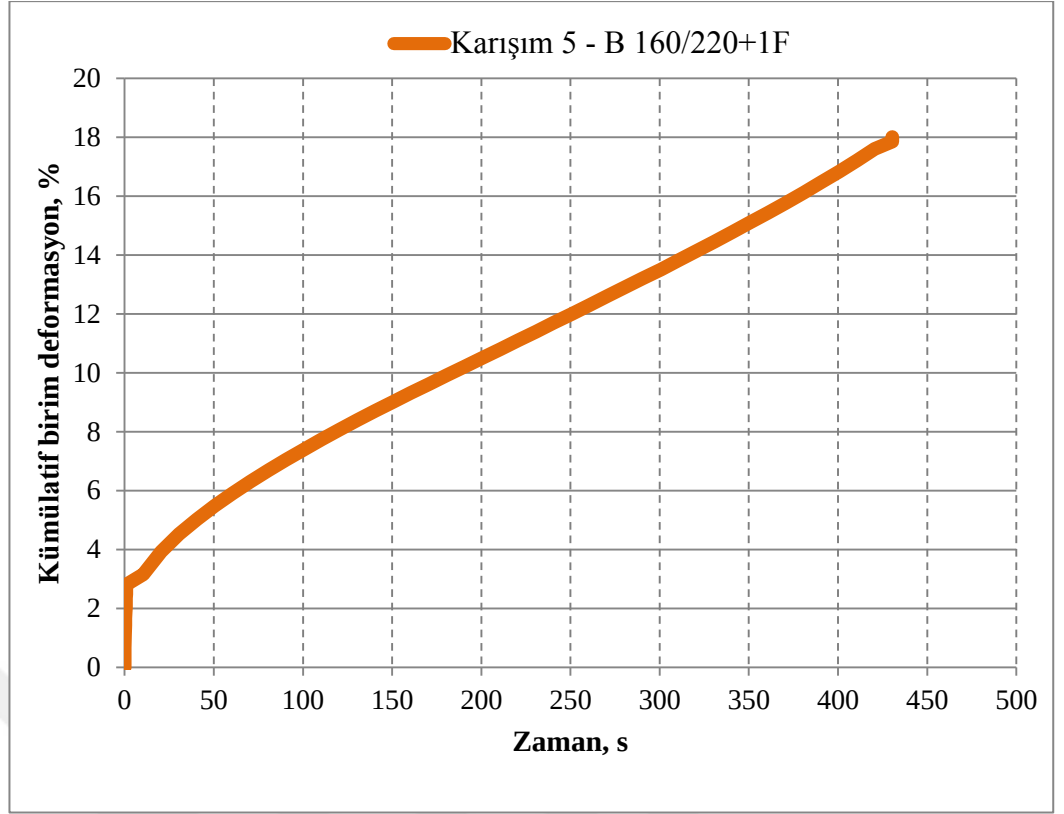
Şekil 7.97. 52°C saf B 50/70 karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



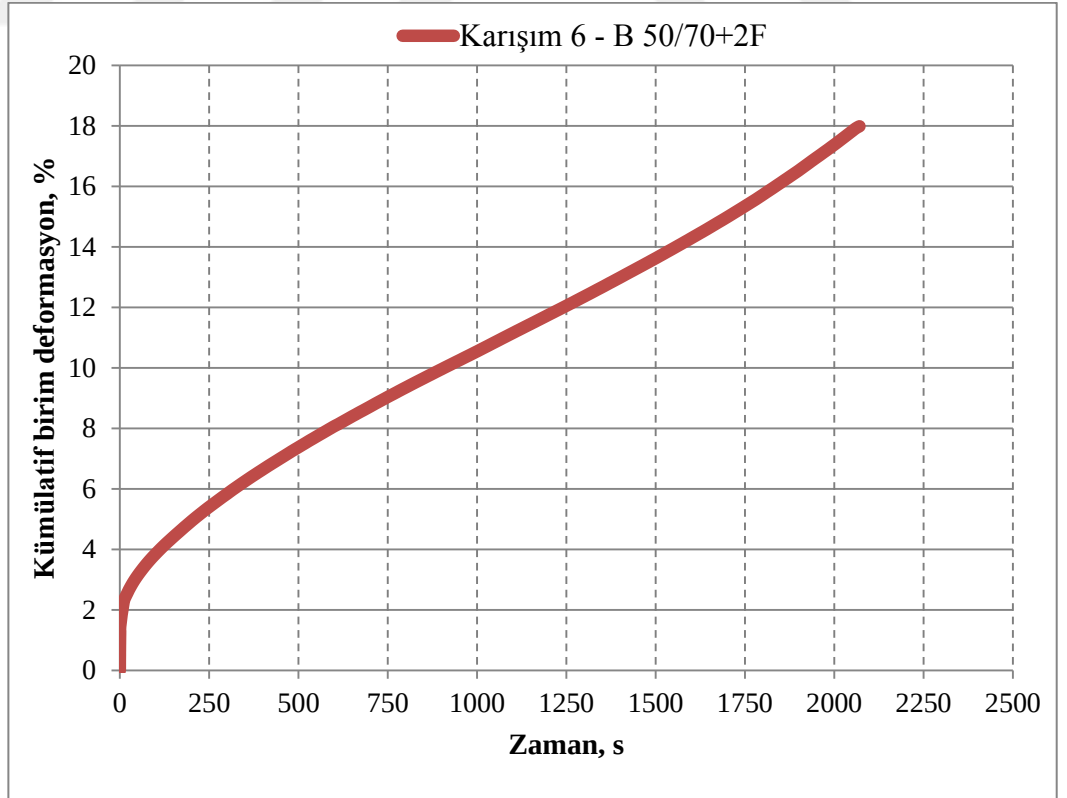
Şekil 7.98. 52°C B 160/220+4T karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



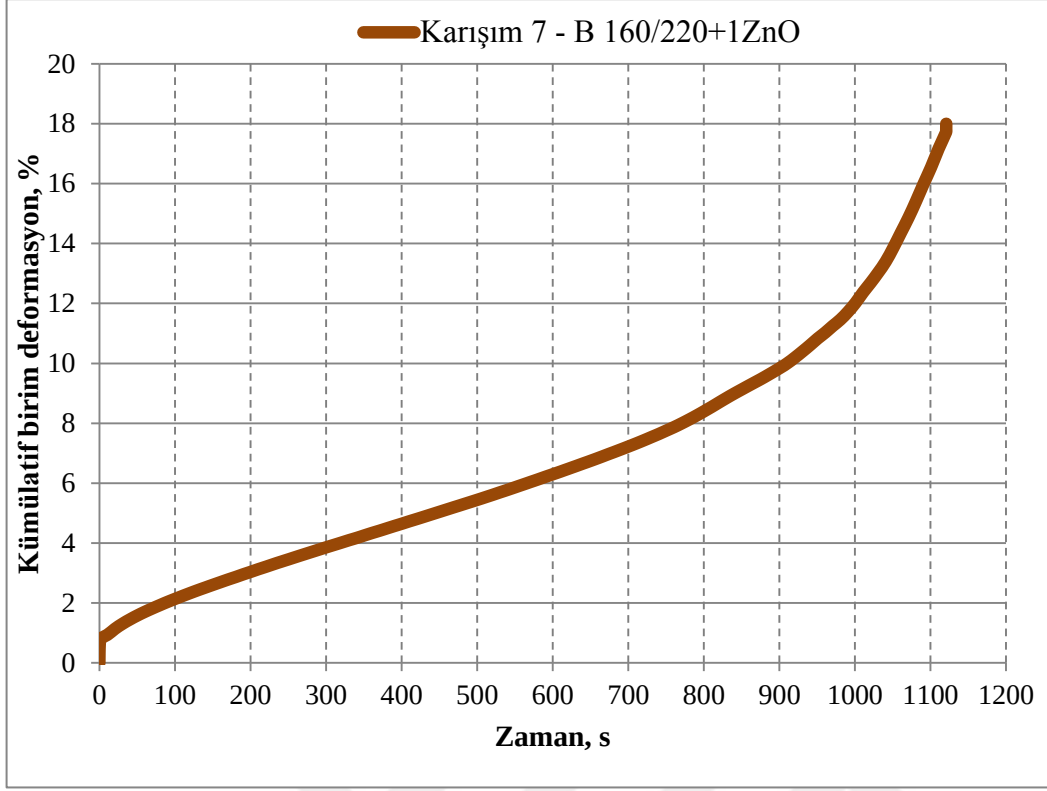
Şekil 7.99. 52°C B 50/70+4T karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



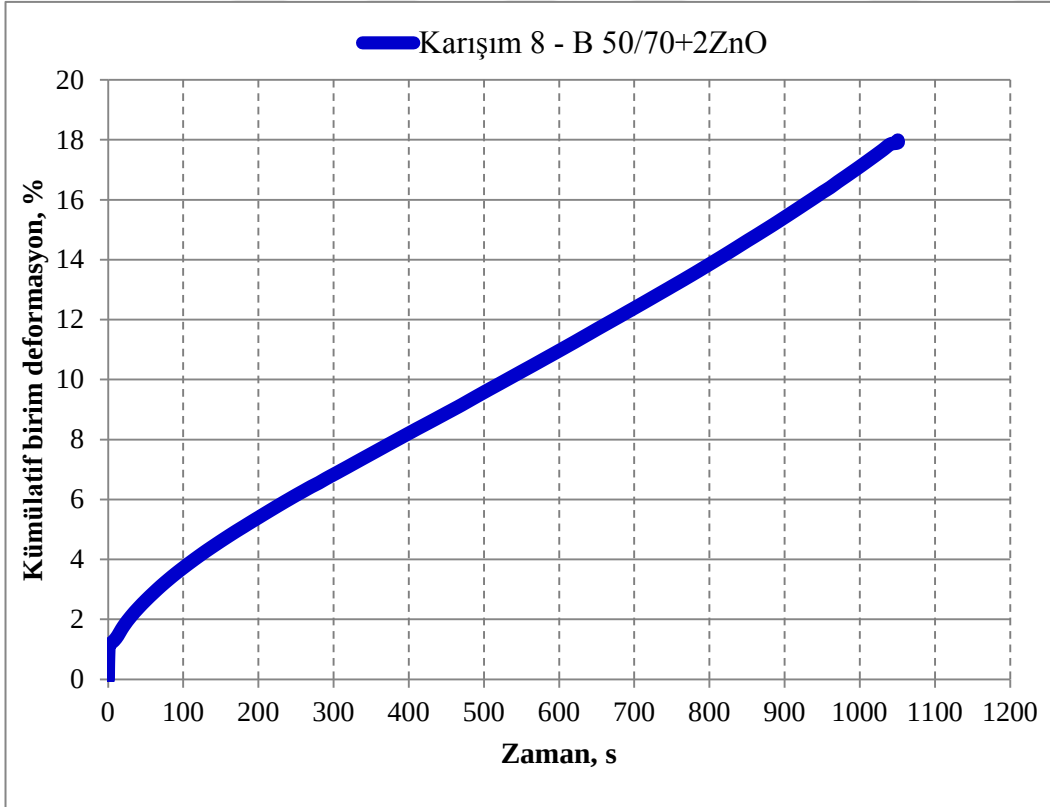
Şekil 7.100. 52°C B 160/220+1F karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



Şekil 7.101. 52°C B 50/70+2F karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



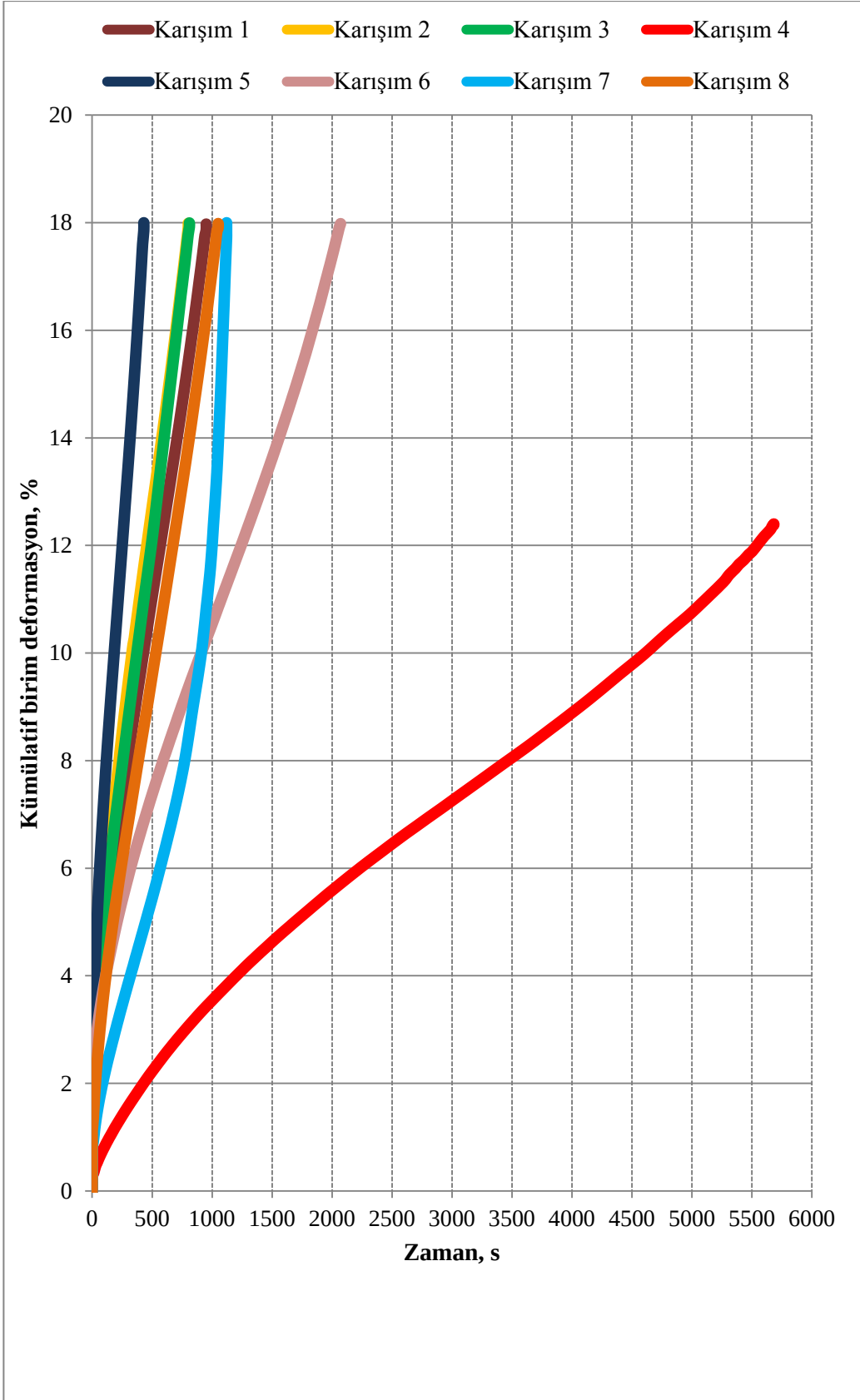
Şekil 7.102. 52°C B 160/220+1ZnO karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.



Şekil 7.103. 52°C B 50/70+2ZnO karışımı için DSR sünme deneyi eğrisi.

Deney esnasında (Şekil 7.96–103'te gösterildiği gibi) bir kiriş numune sabit bir burulma gerilmesi kullanarak test edilmekte ve sonuçta oluşan deformasyon gözlenmektedir. Şekildeki grafiklerde gösterildiği gibi, hızlı bir deformasyon gelişimi olarak bir başlangıç periyodu (birincil akma), bunu takiben doğrusal bir oranda deformasyonda artış periyodu (ikincil akma) ve son olarak oldukça hızlı bir şekilde deformasyon artışıdaki değişimin oranı ile numunede kırılmalar başlamaktadır (üçüncül akma). DSR sünme deneyinde 2000 devir sırasında tüm deney numunelerinin üçüncül akma noktasına ulaştığı söylemeye değer bir durumdur. Örneğin, Çizelge 7.73 ve Şekil 7.96-103'te gösterildiği gibi, karışım 1 için (B 160/220 içeren) %5'lik deformasyon 120.6 saniyede gerçekleşmiş ve sünme oranının tersi ise yaklaşık 72.7 çıkmıştır. Ayrıca, kümülatif deformasyon %15.4 olduğunda, üçüncül akma kırılmasının büyümesi 80 tekrarlı sünme devirinden sonra gelişmiştir. Karışım 2'ye (B 50/70 içeren) gelince, %5'lik deformasyon 90.5 saniyede gerçekleşmiş ve ikincil akma bölgesindeki eğimin tersi ise 72.7 çıkmıştır. Bununla birlikte, yaklaşık 71 devir geçtikten sonra üçüncül akma kırılmasından önce yaklaşık %16.2'lik bir kümülatif deformasyona ulaşıldığında yayılma başlamıştır.

Daha önceden belirtildiği gibi, karışımın sünme davranışını inceleyerek farklı antioksidan katkı maddelerinin saf bitüm üzerindeki etkisini araştırmak için bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, Şekil 7.104'te gösterildiği gibi, hem saf hem de modifiyeli bağlayıcı içeren tüm karışımlar arasında grafik olarak bir karşılaştırma kurulmaktadır.



Şekil 7.104. 52°C’de test edilen saf ve modifiyeli bağlayıcı karışımları için DSR sünme sonuçları.

Bu deney için, sünmeye karşı daha dirençli karışımlarda kırılma için daha uzun bir süre gerekmektedir. Ayrıca, bağlayıcıların kümülatif deformasyonlarındaki düşüş DSR sünme deneyi sırasındaki karışımlardaki kırılmayı uzatmaktadır.

Şekil 7.104, deney karışımlarının sünme davranışındaki farkı açıkça tanımlamaktadır. Şekil 7.104'den öncelikle bitüme T eklenmesi ile karışımın performansında benzer miktarda iyileşmeye dönüştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, karışım No 4'ün (B 50/70+4T içeren) sünme kırılması için uzun zamana ihtiyaç duyması ve sonuç olarak deformasyona karşı büyük bir direnç göstermesindendir. Ayrıca, T modifiyeli B 50/70 bağlayıcı karışımın tüm karışımlar arasında en düşük sünme oranına sahip olduğundan ve ikincil akma bölgesindeki en yüksek (563.3) eğimin tersi değerine sahip olduğundan söz etmek önemlidir.

Öte yandan, karışım No 5. (B 160/220+1F içeren) tekerlek izi potansiyeli diğer karışımlara göre daha yüksektir ve sünme kırılması için daha kısa bir zamana ihtiyaç vardır ve tüm karışımlar arasında en yüksek sünme oranına sahip olduğu ve ikincil akma bölgesindeki en yüksek (563.3) eğimin tersi değerine sahip olduğu Çizelge 7.73'te görülmektedir.

Saf bitüm kategorisi arasında bir karşılaştırma yapılırsa, antioksidan katkı maddesinin saf bitümün performansını ne kadar iyileştirdiği görülecektir ve Şekil 7.104 bu bağlamda faydalı olabilir. B 160/220 bağlayıcı karışımları için, sadece ZnO modifiyeli B 160/220 (B 160/220+1ZnO içeren – karışım 7) bağlayıcı karışımın sünme performansını iyileştirdiği görülmüştür. Diğer yandan, saf B 160/220 bağlayıcı karışım T ve/veya F modifiyeli B 160/220 bağlayıcı karışımlarına göre daha iyi sünme performansı göstermiştir.

Aynı şekilde, saf B 50/70 bağlayıcı karışımları için, daha önceden tartışıldığı gibi, T modifiyeli B 50/70 bağlayıcı karışım, kontrol karışımı içeren (B 50/70 içeren) tüm karışımlar arasında en iyi sünme davranışını göstermiştir. Ayrıca, diğer iki antioksidan modifiyeli karışımlar (F ve ZnO içeren) kontrol karışımın (karışım 2) sünme performansında önemli iyileşmeler sergilemiştir.

Dolayısıyla, Şekil 7.104'ten de görüldüğü gibi, F antioksidanı ZnO antioksidanına göre daha iyi bir performans göstermiştir.



8. BULGULAR VE ÖNERİLER

8.1 Bulgular

Bu çalışmada, saf ve farklı antioksidan modifiyeli bitümlü bağlayıcıların yaşlanma özellikleri fiziksel, reolojik ve performansa dayalı analiz ve teknikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca antioksidan katkıların bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla MSCR deney yöntemi ve DSR sünme deneyi gibi yeni teknik yöntemler kullanılmıştır.

Bitümlü bağlayıcıların oksidatif yaşlanması iki farklı laboratuvar simülasyonu seviyesinde çalışılmıştır. Bunlar; kısa süreli yaşlanma (RTFOT) ve uzun dönemli yaşlanmadır (PAV). Her yaşlanma seviyesi sonrası, saf ve antioksidan katkılı bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri geleneksel deney yöntemleri ile Superpave deney protokolü vasıtasıyla belirlenmiştir.

Bu çalışmada, antioksidanların bitümün oksidasyon ve yaşlandırma sertleşmesi üzerindeki etkileri, seçilen yaşlandırma seviyesinden önce ve sonra bağlayıcıların reolojik özelliklerini ölçerek değerlendirilmiştir. Kısa ve uzun dönemli yaşlandırma bağlayıcılar için sırasıyla 163°C'de RTFOT ve 100°C'de PAV deneylerini kullanarak simüle edilmiştir.

Bu değerlendirme aşamasında, antioksidan katkı maddesi kullanımının etkinliği, bitümün özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve PI gibi fiziksel özelliklerini kullanarak değerlendirilmiştir.

T, F ve ZnO malzemelerinin bitümün reolojik özelliklerini nasıl etkilediği ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, antioksidan katkı maddeleri ile modifiyeli edilmiş B160/220 ve B 50/70 bağlayıcılarının reolojik özellikleri hakkında dikkatli bir çalışma sonrası, ayrıca deformasyon direnci ile ilgili performans davranış şekli incelenmiştir.

Bu çalışma, MSCR deney prosedürü kullanılarak farklı modifiyeli ve modifiyesiz bağlayıcıların değerlendirilmesini içermektedir. Buna ek olarak, bağlayıcının reolojik deney sonuçlarını asfalt karışımların performans deney sonuçları ile ilişkilendirmek için DSR sünme deneyi uygulamaya konmuştur.

Geleneksel ve reolojik deney sonuçları aşağıdaki deneysel bulguları ortaya koymaktadır:

- Thiourea antioksidan katkı maddesi için:
 - Bitüme T maddesinin eklenmesi bağlayıcının viskozitesi ve sertliğini oldukça arttırmaktadır.
 - RV deney sonuçları tüm bitüm tipleri için T maddesinin sertlik etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, modifiyeli bağlayıcılar için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı aralığındaki artış makul ve kabul edilebilir durumdadır.
 - PI sonuçları B 50/70 bağlayıcısının yüksek sıcaklıkta sıcaklık hassasiyeti daha az olduğunu göstermiştir. Bu da, T'nin sert bitümün yaşlanma direnci sıcaklık hassasiyetini azaldığı ve daha az düşük sıcaklık çatlaması sağladığı ve özellikle düşük T içeriğinde yüksek sıcaklıkta kaplama deformasyonunu azalttığı anlamına gelmektedir. B160/220 bağlayıcısına thiourea eklenmesi durumunda ise yumuşak bitüm yüksek sıcaklıkta daha fazla sıcaklık hassasiyeti göstermiştir.
 - T modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi deney sonuçlarına dayanarak, T modifiyeli bağlayıcıların oldukça stabil olduğu ve depolama ve taşıma esnasında faz ayrılmasının olmadığı sonucuna varılmıştır.
 - Bağlayıcılarda RTFOT ve PAV yaşlandırması için δ değeri saf bitümün δ değerine kıyasla belirgin bir şekilde azaldığı için, thiourea modifikasyonu kısa ve uzun dönemli yaşlanmadan sonra bitümün elastisitesi üzerinde pozitif ve önemli bir etkiye sahiptir.
 - T modifiyeri bitümün oksidasyonunu geciktirerek yaşlanma üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. Bitümün yaşlanması bitümün fiziksel parametreleri (PI, kütle kaybı) tarafından değerlendirilmiş ve T'nin özellikle sert bitüm ile birlikte kullanımının bitümün yaşlanma direncinde artış gösterdiği kanıtlanmıştır.
 - Buna ek olarak, T modifiyeli bağlayıcıların reolojik davranışı dinamik kayma reometresi (DSR) ve kırılgan eğilme reometresi (BBR) kullanılarak değerlendirilmiştir. DSR test sonuçlarına bakıldığında, T modifikasyonunun modifiyeli bağlayıcıların G^* ve δ değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. T modifiyeli bağlayıcılar yaşlandırma sürecinden önce ve sonraki saf bitümden daha yüksek tekerlek izi parametresine ($G^*/\sin\delta$) sahiptir. Ayrıca, T modifikasyonu bitümün yorulma direnci üzerinde de olumlu bir etkiye sahiptir.

- BBR deney sonuçları, T modifikasyonunda sert bitüm kullanımı ile asfalt kaplamanın düşük sıcaklıktaki çatlak direnci üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu ve yumuşak bitüm kullanımında ise düşük sıcaklık çatlak direnci üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.
- Furfural antioksidan katkı maddesi için:
 - Bitüme az miktarda (yaklaşık %1) F eklenmesi bağlayıcının viskozitesi ve sertliğini nispeten arttırmaktadır.
 - RV deney sonuçları F modifiyeli bağlayıcıların dönel viskozitesinde önemli bir değişim göstermemiştir.
 - PI sonuçları, F modifiyeli B 50/70 ve B 160/220 bağlayıcılarının yüksek sıcaklıkta sıcaklık hassasiyetinin daha az olduğunu göstermiştir. Bu da, F'in sert bitümün yaşlanma direnci sıcaklık hassasiyetini arttırdığı ve daha az düşük sıcaklık çatlaması sağladığı ve özellikle düşük F içeriğinde (%1) yüksek sıcaklıkta kaplama deformasyonunu azalttığı anlamına gelmektedir.
 - F modifikasyonu bitümün oksidasyonunu geciktirerek yaşlanma üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. Bitümün yaşlanması bitümün fiziksel parametreleri (PI, kütle kaybı) tarafından değerlendirilmiş ve F'in özellikle sert bitüm ile birlikte kullanımının bitümün yaşlanma direncini arttırdığı kanıtlanmıştır.
 - Ayrıca, dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğilme reometresi (BBR) ile elde edilen sonuçlar F modifikasyonunun sert bitüme (B50/70) eklenmesi ile PG sınıfı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, B 160/220 bitümüne F eklenmesi bitümün PG sınıfında bir gelişme sağlamamaktadır.
- ZnO antioksidan katkı maddesi için:
 - Saf B 160/220 bitümüne ZnO eklenmesi, ZnO'nun sertlik etkisine işaret eden penetrasyon değerini azaltarak viskozite ve yumuşama noktasında kayda değer bir artışa neden olmuştur. B 50/70 ile ZnO kullanımı, modifiyeli bağlayıcıların sertliğinde saf bitüme göre önemli bir değişim göstermemiştir.
 - Depolama stabilitesi deney sonuçlarına göre, ZnO modifikasyonu asfalt modifikasyonunda homojen ve stabil bir modifiyeli bağlayıcı davranışını ifade etmektedir.

- Superpave reolojik deney sonuçları, düşük ZnO içeriğinde (%1) bitümün daha sert ve kalıcı deformasyona karşı direnç anlamına gelen PG sınıfında 1 derece artış elde edildiğini göstermektedir. Öte yandan, B 50/70'e ZnO uygulaması, ZnO modifiyeli bağlayıcıların düşük termal çatlak direncini arttırdığından dolayı bitümün elastisitesindeki artışı yansıtmaktadır.

Bu çalışmada, MSCR deney sonuçları aşağıdaki deneysel bulguları ortaya koymaktadır:

Geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) aynı yüksek sıcaklık sınıfındaki ancak farklı katkı yüzdesine sahip bitümlü bağlayıcıları ayırmaktadır. Bitümlü bağlayıcılar 3.2 kPa'lık bir gerilme seviyesine kadar doğrusal bir visko-elastik gibi davranmaktadır. Genel olarak, bitümlü bağlayıcılara antioksidan katkıların (T, F ve ZnO) eklenmesi, bağlayıcıların sertliğini arttırmakta ve visko-elastik özelliklerini geliştirmektedir.

PG 58-22 sınıfına sahip B 160/220 bitümü ise 46°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri altında yeterince elastik ve sert iken 52°C'ye kadar çok ağır trafik yükleri altında ve/veya 58°C'ye kadar ağır trafik yükleri altında kullanılabilir. Ancak, saf B 160/220, antioksidan modifiyeli B 160/220 bağlayıcı kategorisindeki tüm test edilen bağlayıcılar içerisinde en az umut veren ve gerilmeye oldukça hassas bir bitümdür.

Tüm T modifiyeli B 160/220 bağlayıcılar, 58°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri altında yeterince elastik ve sert bir bağlayıcı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, T modifiyeli B 160/220 bağlayıcılar saf 160/220 bitümüne göre en çok umut veren ve daha az gerilme hassasiyeti sahip bir bağlayıcıdır.

F modifiyeli B 160/220'nin deney sonuçlarından, F modifiyeli bağlayıcıların saf B 160/220 bitümüne göre daha sert ve elastik oldukları görülmektedir. Buna ek olarak, F modifiyeli B 160/220 bağlayıcıların saf bitüme göre daha az gerilme hassasiyetinin sahip, daha elastik ve sert olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak, B 160/220+1F bağlayıcısı 52°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri altında ve/veya 58°C'ye kadar ağır trafik yükleri altında kullanılabilir. Aynı zamanda, B 160/220+1,5F ve B 160/220+2F bağlayıcıları 52°C'ye kadar aşırı ağır trafik

yükleri altında ve/veya 58°C'ye kadar çok ağır trafik yükleri altında kullanılabilir.

ZnO modifikasyonu için MSCR deney sonuçlarından, B 160/220+1 ZnO ve B 160/220+2 ZnO 52°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri altında ve/veya 58°C'ye kadar çok ağır trafik yükleri altında kullanılabilir olduğu sonucuna varılmış ve saf B 160/220 bitümüne göre daha elastik, sert ve daha az gerilme hassasiyetine sahip olduğunu göstermiştir.

B 50/70'in MSCR deney sonuçları, PG 64-16 sınıfına sahip (B 50/70) 52°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri için ve/veya 58°C'ye kadar çok ağır trafik yükleri için ve/veya 64°C'ye kadar standart trafik yükleri için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Benzer durumda, B 50/70+4T, B 50/70+6T, B 50/70+8T, B 50/70+1F, B 50/70+1,5F ve B 50/70+2F bağlayıcıları 58°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri için kullanılabilir. Dolayısıyla, T modifiyeli B 50/70 bağlayıcıları da 64°C'ye kadar çok ağır trafik yükleri için kullanılabilir iken, F modifiyeli B 50/70 bağlayıcıları aynı sıcaklıkta ağır trafik yükleri için kullanılabilir.

Benzer şekilde, ZnO modifiyeli B 50/70 bağlayıcıları için saf B 50/70'e %1 oranında ZnO ilavesi ile bitümün visko-elastik özelliklerinin gelişimine katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu bağlayıcı 52°C'ye kadar aşırı ağır trafik yükleri için ve/veya 58°C'ye kadar ağır trafik yükleri için ve/veya 64°C'ye kadar standart trafik yükleri için kullanılabilir.

Ana eğri deneylerinin analizlerine dayanarak bulguların özeti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Üç visko-elastik bölge yirmi bağlayıcının ana eğrilerinden gözlemlenmiştir. Bu üç bölge yüksek, orta ve düşük frekans alanı (düşük, orta ve yüksek sıcaklığa karşılık gelen) ile ilişkilendirilmiştir. Birinci bölgede, tüm bağlayıcılar, bağlayıcıların visko-elastik özellikleri arasındaki küçük farklar ile baskın bir elastik davranış sergilemiştir. Frekans azaldıkça veya sıcaklık arttıkça, antioksidan modifiyeli bağlayıcılar diğer bitümlere göre visko-elastik davranışta farklılıklar göstermeye başlamıştır. T, F, ve ZnO modifiyeli B 160/220 bağlayıcıların, T ve

ZnO modifiyeli B 50/70 bağlayıcıların, ayrıca B 50/70+1F bağlayıcısının orta frekansta modifiyeli bağlayıcıların elastisite ve sertliğini önemli ölçüde geliştirmeye başladığı yerdeki G^* ana eğrilerde bu durum aşırı derecede fark edilebilir olmuştur. Sonuçlar ayrıca, kayıp tanjantı ana eğrisinde yukarıda bahsedilen antioksidan katkı maddeleri için orta frekans aralığında (0.01 ve 1 rad/sn arasında) bir düzlük bulunduğunu göstermiştir. Çok düşük frekanslarda (yüksek sıcaklığa karşılık gelen), tüm T modifiyeli B 160/220 ve B 50/70 bağlayıcıları, yaklaşık 0.0005 rad/sn gibi çok düşük frekanslarda modifiyeli yumuşak bitüm için ve yaklaşık 0.0003 rad/sn'de modifiyeli sert bitüm için açıkça görülmüştür. Benzer şekilde, F modifiyeli B 160/220 ve B 50/70 bağlayıcılar için visko-elastik özelliklerdeki gelişme, yaklaşık 0.0005 rad/sn gibi düşük frekansta modifiyeli yumuşak bitüm için ve yaklaşık 0.0004 rad/s'de modifiyeli sert bitüm için açıkça belirtilmiştir. ZnO modifiyeli B 160/220 ve B 50/70 bağlayıcılarında ise düşük frekanslarda yaklaşık 0.0006 rad/sn'de modifiyeli yumuşak bitüm için ve yaklaşık 0.0004 rad/sn'de modifiyeli sert bitüm için bitümün visko-elastik özelliklerindeki gelişme açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada, DSR sünme deneyi sonuçlarından, %4 T modifiyeli B 50/70 karışımının kalıcı deformasyona karşı en iyi bir performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, %1 F modifiyeli B 50/70 karışımı ve %2 ZnO modifiyeli B 50/70 karışımı sünmeye karşı iyi bir direnç göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm antioksidan katkı maddeleri saf B 50/70 bitümüne eklendiği zaman modifiyeli asfalt karışımının sünme deformasyon direncini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Bu araştırmada, DSR sünme deneyine göre, sadece ZnO katkı maddesi B 160/220 bitüm karışımının özelliklerini iyileştirmiştir. F ve T modifiyeli B 160/220 bağlayıcı karışımları kontrol karışımına (karışım 1) göre daha az direnç gösterirken, ağırlıkça %1 ZnO katkısı içeren B 160/220 bitüm karışımı kalıcı deformasyona karşı iyi bir dirence sahip olmuştur.

Laboratuvar araştırması sonucu elde edilen gözlemlerden çeşitli sonuçlar çıkarılmış ve bu bölümde tartışılmıştır. Bağlayıcı karışımı ve karışım örneklerinden elde edilen tüm veriler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada laboratuvar deneylerinin hem bağlayıcı hem de karışımın reolojik ve mekanik

özellikleri arasındaki farkı belirleme yeteneğine sahip olduğunu göstermek açısından önemlidir. Bu çalışmada tartışıldığı gibi, modifikasyon sürecinde uygun katkı maddesinin seçiminde bitüm tipinin önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır. Antioksidan katkı maddesinin miktarının etkisini belirlemede de saf bitüm tipi önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışma sonuçlarından, yaşlanma direncinin T, F ve ZnO gibi antioksidan katkı maddeleri tarafından geliştirildiği görülmektedir.

8.2 Öneriler

Bu çalışmada, bazı öneriler aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

- Antioksidan malzemelerinin B 160/220 gibi yumuşak bir bitüm yerine B50/70 gibi sert bitüm ile kullanımı tavsiye edilmektedir.
- T katkı maddesinin %4 içerikte sert bitüm ile kullanımı tavsiye edilmektedir. Bu içerikte, bitümün performans sınıfını yüksek sıcaklıkta iki sınıf, düşük sıcaklıkta ise bir sınıf arttırması beklenmektedir. Ancak, çok soğuk ve çok sıcak iklimlere sahip ve/veya çok ağır trafik olan bölgelerde sırasıyla kalıcı deformasyona ve düşük termal çatlamalara karşı bitümün direncini arttırmak için sert bitüm ile T katkı maddesinin kullanımı ayrıca tavsiye edilmektedir.
- Sert bitüme %2 içerikte F veya ZnO katkı maddesinin kullanımı tavsiye edilmektedir. Bu içerikte, bitümün performans sınıfının yüksek ve düşük sıcaklıkta bir sınıf artacağı öngörülmektedir.
- Yumuşak bitüme sırasıyla %4 ve %1 içerikte T ve ZnO katkı maddesinin kullanımı tavsiye edilmektedir. Bu içerikte, bitümün performans sınıfının yüksek sıcaklıklarda bir sınıf artacağı öngörülmektedir.
- Performans deneyi için asfalt karışımların hazırlanmasında farklı agrega tiplerinin kullanımı üzerine gelecekte çalışmalar gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir.
- Karot numuneler üzerinde tam ölçekli performans deneyleri gerçekleştirmek ve saha sonuçlarını laboratuvar örnekleri ile kıyaslamak için antioksidan modifiyeli asfalt kaplamaların deneme uygulamalarının tesis edilmesi de gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AASHTO R 28**, Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO), Standard Test Methods.
- AASHTO T 313**, Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR), American association of state highways and transportation officials (AASHTO) standard test methods.
- AASHTO**, 2010, Standard Specification for Performance-Grade Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. AASHTO Designation: MP 19-10, Washington D.C.
- Abbas, A.R.**, 2004, Simulation of the Micromechanical Behavior of Asphalt Mixtures Using the Discrete Element Method, Doctor of Philosophy in Civil Engineering Washington State University, 180p.
- Adorjanyi, K. and Fuleki, P.**, Performance Evaluation Of Bitumens At High Temperature With Multiple Stress Creep Recovery Test, Hungarian journal of industrial chemistry, 39(2): 195-199 pp.
- Ahmedzade, P. et al.**, 2014, Modification of Bitumen by Electron Beam Irradiated Recycled Low Density, *Construction and Building Materials*, 69: 1–9 pp.
- Altaş, Ö.Y.**, 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
- Apeagyei A.K.**, 2011, Laboratory Evaluation of Antioxidants for Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 25: 47–53 pp.
- Asfalt ve Uygulamaları**, 2001, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 280s.
- ASTM D1559**, 1989, Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- ASTM D4402**, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, *American Society for Testing and Materials*, United States.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM D7405**, 2010, Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- Bahia, H. U., Perdomo, D. and Turner, P.**, 1995, Applicability of Superpave Binder Testing Protocols to Modified Binders, *Transportation Research Record*, No.1586, 16-23pp.
- Bahia, H.U. et al.**, 2001, Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459, National Academy Press, Washington, D.C., 53p.
- Benedetto, H. Di. and Corte J. F.**, 2004, Bituminous Road Materials 1: Description and Properties of Components, Lavoisier.
- Berkers, R.F.A.**, 2005, Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen, Master's Degree in Technology Engineering, Department of Civil Engineering, Tswane 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.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S. and Zhang, J.**, 2001, Performance Testing for Hot Mix Asphalt, *NCAT Report 01-05*, Auburn, 79p.
- Bulatovic, V.O. et al.**, 2013, Effect of Polymer Modifiers on the Properties of Bitumen, *Journal of Elastomers and Plastics*, 1-22 pp.
- Chipperfield, E., Duthie, J. and Girdler, R.**, 1970, Asphalt Characteristics in Relation to Road Performance, *Association of Asphalt Paving Technologists*, 39: 575-613 pp.
- Christensen, D.W. and Anderson, D.A.**, 1992, Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, *Proc. Assn., Asphalt Paving Technology*, 61: 67–116 pp.
- Cominsky, R.J. et al.**, 1994, The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, *National Research Council*, Washington, D.C., 184p.
- Cong, P. et al.**, 2012, Physical and Rheological Properties of Asphalt Binders Containing Various Antiaging Agents, *Fuel*, 97: 678–684 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cuadri, A.A. et al.**, 2012, Enhancing the Viscoelastic Properties of Bituminous Binders via Thiourea-Modification, *Fuel*, 97: 862–868 pp.
- Çakıroğlu, M.**, 1996, Yol Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar, 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, *İSFALT*, İstanbul, s.154-163.
- D’Angelo, J.**, 2010, New High-Temperature Binder Specifications Using Multistress Creep and Recovery, *Transportation Research Circular*, Development in Asphalt Binder Specifications, No E-C147, 1-13 pp.
- Dinç, E.**, 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
- Doyle, J.D. et al.**, 2013, Virgin and Aged Binder Interaction Measured on Mixture Bars via Repeated Creep in the Dynamic Shear Rheometer, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(6):721-729 pp.
- 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
- Hafeez, I. et al.**, 2013, To Study the Viscoelastic Behavior of Asphalt Binders Using Under Multi Stress Creep Recovery Test, *Life Science Journal*, 10(12): 921-925 pp.
- Harlin, M.**, 1992, Bitumen: Properties, Characteristics, Specifications and Testing Laboratory, *National School of Bridges and Roads*, Paris.
- Heitzman, M. et al.**, “A Multiple Laboratory Study of Hot Mix Asphalt Performance Testing”, http://www.academia.edu/3182999/A_Multiple-Laboratory_Study_of_Hot_Mix_Asphalt_Performance_Testing.
- <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/349> (Erişim tarihi: 10 Ekim 2015).
- https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide (Erişim tarihi: 10 Nisan 2015).
- Isacson, U. and Lu, X.**, 1995, Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens-State of the Art, *Materials and Structures*, 28: 139-159 pp.
- Kennedy, T.W. et al.**, 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, *National Research Council*, Washington, D.C., 170p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- King, G.**, 1999, Additives in asphalt, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, 68: 32-69 pp.
- Ksaibati, K., Cha, C.Y. and Plancher, H.**, “Applications of Carbonous Residue Recovered From Co-Retorting Tires With Waste Oils in Highway Construction”,
http://www.asphaltrubber.org/ARTIC/Reports/RPA_A1071.pdf (Erişim tarihi: 14 Mart 2015).
- Martinez, G. et al.**, 2006, Rheological Behaviour of Asphalt with Crumbed Rubber and other Modifiers, Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA, 863-884 pp.
- Mastrofini, D. and Scarsella, M.**, 2000, The Application of Rheology to the Evaluation of Bitumen Ageing, *Fuel*, 79(9): 1005-1015 pp.
- 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.
- McGennis, R.B. et al.**, 1995, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172p.
- Memon, G.M.**, “Furfural Modified Asphalt Obtained by Using A Lewis Acid as A Catalyst”, <http://www.osti.gov/scitech/biblio/430335> (Erişim tarihi: 12 Mart 2015).
- Mills-Beale, J. et al.**, 2014, Aging Influence on Rheology Properties of Petroleum-Based Asphalt Modified with Biobinder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26:358-366 pp.
- Mouillet, V. et al.**, 2007, The Influence of UV Aging of a Styrene/Butadiene/Styrene Modified Asphalt: Comparison Between Laboratory and On Site Aging, *Fuel*, 86(10-11) 1446-1451 pp.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)**, 2011, A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary, *TRB*, Washington, D.C., 273p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ouyang, C. et al.**, 2006, Improving the Aging Resistance of Styrene Butadiene Styrene Tri-Block Copolymer Modified Asphalt by Addition of Antioxidants, *Polymer Degradation and Stability*, 91: 795-804 pp.
- Öztürk, E. A. ve Çubuk, M. K.**, 2004, Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 19(2): s. 175-184
- Pan, T.**, 2012, A First-Principles Based Chemophysical Environment for Studying Lignins as an Asphalt Antioxidant, *Construction and Building Materials*, 36: 654–664 pp.
- 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.
- Petersen, J.C.**, 1984, Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art, Transportation Research Record 999, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 13–30.
- Petersen, J.C.**, 2009, A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemicals, Physiochemical, Physical Property, and Durability Relationships, *TRB*, Transportation Research Circular Number E-C140 , Washington, D.C., 68p.
- Piggott, M.R. and Woodhams, R.T.** , “Recycling of Rubber Tires in Asphalt Paving Materials”, http://www.asphaltrubber.org/ARTIC/International/RPA_A1112.pdf (Erişim tarihi: 12 Mart 2015).
- Polacco G. et al.**, 2003, Dynamic Master Curves of Polymer Modified Asphalt From Three Different Geometries, *Applied Rheology*, 13(3): 118-124 pp.
- Reinke, G. and Glidden, S.**, 2004, Development of Mixture Creep Performance Tests Using a Dynamic Shear Rheometer, Transportation Research Circular No. E-C068, 1-43 pp.
- Reinke, G. et al.**, 2005, Laboratory Investigation of HMA Performance Using Hamburg Wheel Tracking and DSR Torsional Creep Tests, *Journal of ASTM International*, 2(10): 1-32 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Robertson, R.**, 1991, Chemical Properties of Asphalts and Their Relationship to Pavement Performance, Western Research Institute, Strategic Highway Research Program (National Research Council), Washington, D.C., USA, 30p.
- Simone, A. et al.**, 2012, The Influence of the Binder Viscosity on the Laboratory Short Term Aging, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53: 421-431 pp.
- Solomatnikova, O.**, 1998, Rheological Behavior and Cohesive and Adhesive Properties of Bituminous Binders, Memory of Master of Applied Science, University of Laval, Quebec.
- Sulekha, F.B.** 2002, Synthesis, Characterisation and Uses of Polymer-Bound Antioxidants, PhD thesis, Cochin University of Science and Technology, Kochi.
- The Asphalt Institute**, 1996, Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
- TS 118 EN 1426**, 2002, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 12 s.
- TS 120 EN 1427**, 2008, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilya Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 12 s.
- TS EN 12607-1**, 2015, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini-Bölüm 1:RTFORT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yönetimi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 17 s.
- TS EN 13339**, 2005, Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - İşlem Görmüş Bitümlerin Elâstikliğinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara. 10 s.
- TS EN 15326**, 2010, Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yoğunluk ve Özgül Kütle Tayini-Kapiler Kapaklı Piknometre Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 14 s.
- TS EN ISO 2719**, 2015, Petrol Ürünleri ve Yağlayıcılar-Parlama Noktası Tayini-Pensky Martens Kapalı Kap Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 33 s.
- Tunç, A.**, 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tunç, A.**, 2004, Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 352s.
- Wasage, T. L.J. et al.**, 2011, Rheological Analysis of Multi-Stress Creep Recovery (MSCR) Test, *International Journal of Pavement Engineering*, 12: 561-568 pp.
- Whiteoak, D. and Read, J.**, 2003, The Shell Bitumen Handbook, *Thomas Telford Publishing*, London, 464p
- Wu, S. et al.**, 2012, Rheological Properties for Aged Bitumen Containing Ultraviolet Light Resistant Materials, *Construction and Building Materials*, 33: 133-138 pp.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E.**, 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109p.
- Zargar, M. et al.**, 2012, Investigation of the Possibility of Using Waste Cooking Oil as a Rejuvenating Agent for Aged Bitumen, *Journal of Hazardous Materials*, 233-234: 254-258 pp.
- Zeng, H. and Isacsson, U.**, 1997, Relationships Between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behavior of Asphalt, Royal Institute of Technology, *Elsevier PII: S0950-0618 (97) 00008-1*, Stockholm, Sweden, 4-9 pp.
- Zoorob, S.E. et al.**, 2012, Investigating the Multiple Stress Creep Recovery Bitumen Characterisation Test, *Construction and Building Materials*, 30: 434-445 pp.

ÖZGEÇMİŞ

Omar ALQUDAH, 1977 yılında Ürdün Krallığı'nın Amman şehrinde doğmuştur. Liseyi Ain Janna isimindeki okulda tamamlamıştır. 1995 yılında kazandığı İnşaat Mühendisliği Fakültesi Yapı Bölümünden 2000 yılında lisans mezunu olmuştur. Daha sonra, 2006 yılında Ürdün'deki Ürdünlü Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Ulaştırma Bölümünde yüksek lisansını yapmaya başlayıp 2009 yılında mezun olmuştur. 2010 yılından itibaren de Ürdün Karayolları Bakanlığı'nda Yollar Kalite Kontrol ve Araştırma Bölümü şefi olmuştur. 2011 – 2012 öğretim yılında Ankara Üniversitesi TÖMER (Türkçe Öğretim Merkezi) Bölümünü başarıyla tamamladıktan sonra aynı yıl Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Doktora Programını kazanarak Doktora programında eğitim almıştır.

EKLER

Ek 1 Orijinal Saf B 50/70'in PG Sınıfı örneği

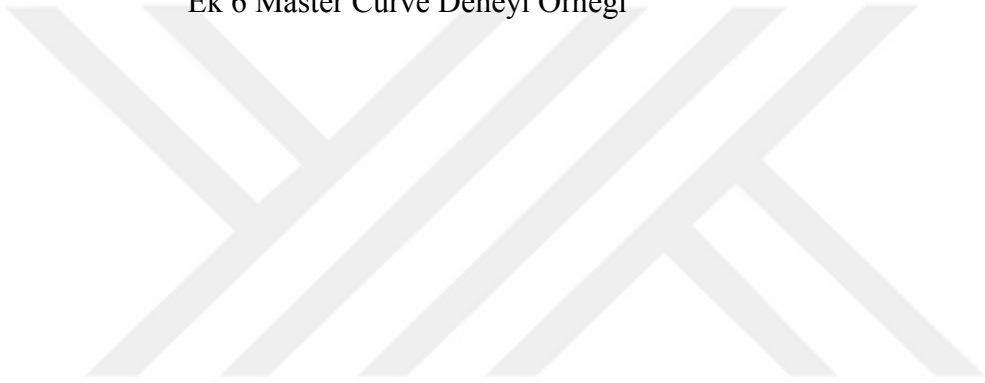
Ek 2 Orijinal Thiourea Katkılı Bitümün PG Sınıfı Örneđi

Ek 3 RTFOT İle Yaşlandırılmış ZnO Katkılı Bitümün PG Sınıfı Örneđi

Ek 4 PAV İle Yaşlandırılmış Furfural Katkılı Bitümün PG Sınıfı Örneđi

Ek 5 MSCR Deneyi Örneđi

Ek 6 Master Curve Deneyi Örneđi



EK 1

AASHTO T315 Original Binder RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025

TEST PARAMETERS:

File name : C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\
Desktop\omar_on deneyler\saf50-70\50-70 ORIJ.orx
Data series : 50-70 ORIJINAL 4
Used measuring points : I 2, P 11 ... I 2, P 20
Date of test : 18.12.2013
Time of test : 17:09:28
Operator : OMAR
Sample : 50-70 ORIJINAL
Remark :
Measuring device : SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj35d
Temperature control unit : TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=
Physica VT 2
Measuring system : PP25/PE-SN25083
Diameter : 25,02 mm
Gap : 1,000 mm

MEASURING DATA:

No.	Time	Temp.	Freq.	Deform.	G*	delta
[1]	[s]	[°C]	[rad/s]	[%]	[kPa]	[°]
1	145,4	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
2	147,4	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
3	149,3	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
4	151,3	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
5	153,2	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
6	155,2	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
7	157,1	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
8	159,1	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
9	161,0	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1
10	163,0	70,0	10,0	12,00	0,768	88,1

TEST RESULTS:

Mean frequency : 10,0 rad/s = 1,59 Hz
Mean strain amplitude : 12,00 %
Mean stress amplitude : 0,092 kPa
Mean phase angle : 88,1 °
Mean complex modulus |G*| : 0,768 kPa
Mean temperature lower plate : 70,0 °C
Mean temperature sample : 70,0 °C

EVALUATION RESULTS:

Number of data points : 10
|G*|/sin(delta) : 0,768 kPa
Standard deviation : 0,000206 kPa

Median : 0,769 kPa
Confidence Interval (95%) : 0,768 ... 0,769 kPa
AASHTO T315 ORIG. BINDER PERF. CRIT.: $|G^*|/\sin(\delta) \geq 1,00$ kPa

=====

This sample is found to F A I L at 70,0 °C

=====

=====

Pass/Fail Temperature 67,9 °C

=====

Workbook Information

Name: C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\
Desktop\omar_on deneyler\saf50-70\50-70 ORIJ.orx
Number of Data Series: 4 of 20
List of Data Series: 50-70 ORIJINAL 1
50-70 ORIJINAL 2
50-70 ORIJINAL 3
50-70 ORIJINAL 4

Data Series Information

Name: 50-70 ORIJINAL 1
Sample: 50-70 ORIJINAL
Operator: OMAR
Number of Intervals: 1-Feb
Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj35d
Measuring Date/Time: 18.12.2013; 16:16
Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752;
Accessories: DevCOM1

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]
11	52.002	10	991.491	12	8.26	84.5
12	52.001	10	991.427	11.999	8.26	84.5
13	52	10	991.499	12.001	8.26	84.5
14	51.999	10	991.389	12.003	8.26	84.5
15	52.001	10	991.035	11.998	8.26	84.5

16	52.002	10	991.274	12	8.26	84.5
17	52.001	10	991.219	12.001	8.26	84.5
18	51.998	10	991.153	11.998	8.26	84.5
19	51.998	10	991.383	11.999	8.26	84.5
20	51.999	10	991.496	11.999	8.26	84.5

Data Series Information

Name: 50-70 ORIJINAL 2
 Sample: 50-70 ORIJINAL
 Operator: OMAR
 Number of Intervals: 1-Feb
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj35d
 Measuring Date/Time: 18.12.2013; 16:31
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	57.998	10	435.275	11.995	3.63	86	3.64
12	58	10	435.595	12.002	3.63	86	3.64
13	57.999	10	435.463	11.996	3.63	86	3.64
14	57.998	10	435.673	12.006	3.63	86	3.64
15	57.999	10	435.239	12.004	3.63	86.1	3.63
16	58.001	10	434.963	11.999	3.63	86.1	3.63
17	58	10	435.086	12	3.63	86.1	3.63
18	57.998	10	435.147	11.994	3.63	86.1	3.64
19	57.997	10	435.467	12.007	3.63	86.1	3.64
20	57.999	10	434.984	12.001	3.62	86.1	3.63

Data Series Information

Name: 50-70 ORIJINAL 3
 Sample: 50-70 ORIJINAL
 Operator: OMAR
 Number of Intervals: 1-Feb
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj35d
 Measuring Date/Time: 18.12.2013; 16:50
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	64	10	197.453	12.001	1.65	87.2	1.65
12	63.999	10	197.466	11.996	1.65	87.2	1.65

13	64	10	197.544	12.004	1.65	87.2	1.65
14	64	10	197.438	12	1.65	87.2	1.65
15	63.999	10	197.441	12	1.65	87.2	1.65
16	63.998	10	197.47	11.999	1.65	87.2	1.65
17	63.998	10	197.523	11.997	1.65	87.2	1.65
18	63.999	10	197.61	12.001	1.65	87.2	1.65
19	64	10	197.533	12.002	1.65	87.2	1.65
20	64	10	197.421	12.003	1.64	87.2	1.65

Data Series Information

Name: 50-70 ORIJINAL 4
 Sample: 50-70 ORIJINAL
 Operator: OMAR
 Number of Intervals: 1-Feb
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj35d
 Measuring Date/Time: 18.12.2013; 17:09
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	70	10	92.206	12.002	0.768	88.1	0.769
12	69.999	10	92.184	11.999	0.768	88.1	0.769
13	70.001	10	92.192	12.001	0.768	88.1	0.769
14	70.001	10	92.15	12.001	0.768	88.1	0.768
15	69.999	10	92.141	11.998	0.768	88.1	0.768
16	70.002	10	92.167	12.001	0.768	88.1	0.768
17	70.001	10	92.157	12.001	0.768	88.1	0.768
18	69.998	10	92.129	12	0.768	88.1	0.768
19	69.999	10	92.162	11.996	0.768	88.1	0.769
20	70.001	10	92.218	12.002	0.768	88.1	0.769

EK 2

AASHTO T315 Original Binder RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025

TEST PARAMETERS:

File name : C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\
Desktop\omar tezi\B50-70 MODIFIYE\THIOUREA\%4 T+B50-70 PG\THEOUREA%4+B50-70 PG.orr
Data series : THEOUREA%4+B50-70 PG 6
Used measuring points : I 2, P 11 ... I 2, P 20
Date of test : 15.03.2014
Time of test : 17:22:52
Operator : OMAR QUDAH
Sample : THEOUREA%4+B50-70 PG
Remark :
Measuring device : SmartPave301 SN80940081; FW3.41D110330; Slot2; Adj27d
Temperature control unit : TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2
Measuring system : PP25/PE-SN25083
Diameter : 25,02 mm
Gap : 1,000 mm

MEASURING DATA:

No.	Time	Temp.	Freq.	Deform.	G*	delta
[1]	[s]	[°C]	[rad/s]	[%]	[kPa]	[°]
1	145,4	82,0	10,0	12,00	0,514	86,8
2	147,4	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
3	149,3	82,0	10,0	12,00	0,514	86,8
4	151,3	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
5	153,2	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
6	155,2	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
7	157,1	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
8	159,1	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9
9	161,0	82,0	10,0	12,00	0,514	86,8
10	163,0	82,0	10,0	12,00	0,514	86,9

TEST RESULTS:

Mean frequency : 10,0 rad/s = 1,59 Hz
Mean strain amplitude : 12,00 %
Mean stress amplitude : 0,062 kPa
Mean phase angle : 86,9 °
Mean complex modulus |G*| : 0,514 kPa
Mean temperature lower plate : 82,0 °C
Mean temperature sample : 82,0 °C

EVALUATION RESULTS:

Number of data points : 10
|G*|/sin(delta) : 0,514 kPa
Standard deviation : 0,0000422 kPa

Median : 0,514 kPa
Confidence Interval (95%) : 0,514 ... 0,515 kPa
AASHTO T315 ORIG. BINDER PERF. CRIT.: $|G^*|/\sin(\delta) \geq 1,00$ kPa

=====

This sample is found to F A I L at 82,0 °C

=====

=====

Pass/Fail Temperature 76,2 °C

=====

Workbook Information

Name:

Number of Data Series:

List of Data Series:

C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\
Desktop\omar tezi\B50-70 MODIFIYE\TH\
%4 T+B50-70 PG\
THEOUREA%4+B50-70 PG.orx
6 of 30
THEOUREA%4+B50-70 PG 1
THEOUREA%4+B50-70 PG 2
THEOUREA%4+B50-70 PG 3
THEOUREA%4+B50-70 PG 4
THEOUREA%4+B50-70 PG 5
THEOUREA%4+B50-70 PG 6

Data Series Information

Name:

Sample:

Operator:

Number of Intervals:

Application:

Device:

Measuring Date/Time:

Measuring System:

Accessories:

THEOUREA%4+B50-70 PG 1

THEOUREA%4+B50-70 PG

OMAR QUDAH

RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
SmartPave301 SN80940081

15.03.2014; 15:52

PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362
DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	$ G^* $ [kPa]
11	51.998	10	2,781.18	12.003	23.2
12	52.002	10	2,780.02	12.004	23.2
13	52.002	10	2,778.64	12.002	23.2
14	51.999	10	2,777.82	12.001	23.1

15	51.999	10	2,777.58	12.002	23.1
16	52.001	10	2,776.64	12.003	
17	52	10	2,775.65	12.002	
18	52.002	10	2,774.82	12.003	
19	52.002	10	2,773.73	12.001	
20	52	10	2,773.16	12.001	

Data Series Information

Name: THEOUREA%4+B50-70 PG 2
 Sample: THEOUREA%4+B50-70 PG
 Operator: OMAR QUDAH
 Number of Intervals:
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 SmartPave301 SN80940081
 Device:
 Measuring Date/Time: 15.03.2014; 16:08
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362;
 Accessories: DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]
11	57.999	10	1,233.32	12.001	10.3
12	58.001	10	1,233.12	12.001	10.3
13	58.001	10	1,232.87	12.001	10.3
14	58.001	10	1,232.67	12.001	10.3
15	58	10	1,232.43	12	10.3
16	58.001	10	1,232.44	12.002	10.3
17	58	10	1,232.12	12	10.3
18	58	10	1,232.17	12.002	10.3
19	58	10	1,231.83	12	10.3
20	57.999	10	1,231.89	12.001	10.3

Data Series Information

Name: THEOUREA%4+B50-70 PG 3
 Sample: THEOUREA%4+B50-70 PG
 Operator: OMAR QUDAH
 Number of Intervals:
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 SmartPave301 SN80940081
 Device:
 Measuring Date/Time: 15.03.2014; 16:25
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362;
 Accessories: DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]
11	63.998	10	551.641	12	

12	64	10	551.58	12.002	4.6
13	64	10	551.412	12.001	4.59
14	64	10	551.295	12.001	4.59
15	64	10	551.209	12.002	4.59
16	64.003	10	551.018	12	4.59
17	64	10	551.028	12.001	4.59
18	64	10	550.926	12	4.59
19	64.001	10	550.929	12	4.59
20	64	10	550.903	12.002	4.59

Data Series Information

Name: THEOUREA%4+B50-70 PG 4
 Sample: THEOUREA%4+B50-70 PG
 Operator: OMAR QUDAH
 Number of Intervals:
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device:
 Measuring Date/Time:
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362;
 Accessories: DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]
11	69.999	10	255.803	12	2.13
12	70	10	255.807	12.002	2.13
13	69.999	10	255.755	11.998	2.13
14	69.999	10	255.809	12.001	2.13
15	69.999	10	255.765	11.999	2.13
16	69.999	10	255.794	12	2.13
17	70	10	255.809	12.001	2.13
18	70	10	255.777	12	2.13
19	70.001	10	255.763	12.001	2.13
20	70	10	255.724	11.999	2.13

Data Series Information

Name: THEOUREA%4+B50-70 PG 5
 Sample: THEOUREA%4+B50-70 PG
 Operator: OMAR QUDAH
 Number of Intervals:
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 SmartPave301 SN80940081
 Device:
 Measuring Date/Time: 15.03.2014; 17:01
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362;
 Accessories: DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]
11	76	10	122.493	12	1.02
12	75.998	10	122.499	12.001	1.02
13	75.997	10	122.493	11.999	1.02
14	75.999	10	122.501	12.001	1.02
15	76	10	122.469	12.001	1.02
16	76	10	122.432	12	1.02
17	75.999	10	122.421	12.001	1.02
18	76	10	122.409	12	1.02
19	76	10	122.42	11.999	1.02
20	75.999	10	122.434	12	1.02

Data Series Information

Name:	THEOUREA%4+B50-70 PG 6
Sample:	THEOUREA%4+B50-70 PG
Operator:	OMAR QUDAH
Number of Intervals:	
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025 SmartPave301 SN80940081;
Device:	
Measuring Date/Time:	15.03.2014; 17:22
Measuring System:	PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
Accessories:	DevCOM1=Physica VT 2

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [Pa]	Strain [%]	G* [kPa]
11	82.002	10	61.658	12	0.514
12	82.001	10	61.648	12.001	0.514
13	82	10	61.64	12	0.514
14	82	10	61.643	12	0.514
15	81.999	10	61.641	12	0.514
16	81.999	10	61.644	12	0.514
17	81.998	10	61.644	12	0.514
18	81.999	10	61.646	12	0.514
19	81.999	10	61.649	12.001	0.514
20	81.999	10	61.641	12	0.514

EK 3

AASHTO T315 RTFO RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025

=====

TEST PARAMETERS:

File name : C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\Desktop\New Folder\B160\RTFOT\

ZNO\1,5ZNO

B160RTFO.orx

Data series : Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 5

Used measuring points : I 2, P 11 ... I 2, P 20

Date of test : 04.04.2015

Time of test : 18:09:22

Operator : OMAR

Sample : 1,5ZNO+B160-220RTFO

Remark :

Measuring device : SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d

Temperature control unit : TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2

Measuring system : PP25/PE-SN25083

Diameter : 25,02 mm

Gap : 1,000 mm

MEASURING DATA:

No.	Time	Temp.	Freq.	Deform.	G*	delta
[1]	[s]	[°C]	[rad/s]	[%]	[kPa]	[°]
1	188,3	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
2	194,1	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
3	200,0	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
4	205,8	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
5	211,6	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
6	217,5	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
7	223,3	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
8	229,2	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
9	235,0	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6
10	240,9	70,0	10,0	10,00	1,37	85,6

TEST RESULTS:

Mean frequency : 10,0 rad/s = 1,59 Hz

Mean strain amplitude : 10,00 %

Mean stress amplitude : 0,137 kPa

Mean phase angle : 85,6 °

Mean complex modulus |G*| : 1,37 kPa

Mean temperature lower plate : 70,0 °C

Mean temperature sample : 70,0 °C

EVALUATION RESULTS:

Number of data points : 10
|G*|/sin(delta) : 1,37 kPa
Standard deviation : 0,00115 kPa
Median : 1,37 kPa
Confidence Interval (95%) : 1,37 ... 1,37 kPa
AASHTO T315 RTFO PERFORMANCE CRIT. : |G*|/sin(delta) >= 2,20 kPa

=====

This sample is found to F A I L at 70,0 °C

=====

=====

Pass/Fail Temperature 66,5 °C

=====

Workbook Information

Name: C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\Desktop\
New Folder\B160\RTFOT\ZNO\1,5ZNOB160RTFO.orx
Number of Data Series: 5 of 25
List of Data Series: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 1
Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 2
Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 3
Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 4
Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 5

Data Series Information

Name: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 1
Sample: 1,5ZNO+B160-220RTFO
Operator: OMAR
Number of Intervals: 1-Feb
Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d
Measuring Date/Time: 04.04.2015; 17:22
Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=
Accessories: Physica VT 2

Setting Values:

tau, M
d(gamma)/dt, n, phi, gamma
FN
d, v, dd/(d·dt)
T[-1]
T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1.310233
- Norm. Css [Pa/mNm]:	325.028
- Start Delay Time [s]:	451.969
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07

Interval:	2
Number of Data Points:	Oct-20

Time Setting:	20 Meas. Pts.
	Max. Adjusting Time 30 s

Measuring Profile:

#NAME?	Amplitude gamma = 10 %
	Angular Frequency omega = 10 rad/s

Saved Values:

Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v
Lift Speed/Gap dd/(d·dt)
Total Harmonic Distortion d_t
Average Time t_avr
Meas. Point Start Time t_MP_start
Status Stat

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [kPa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	46	10	4.41	10	44.1	73.9	45.9
12	46	10	4.41	10	44.1	73.9	45.9
13	46	10	4.41	10	44.1	73.9	45.9
14	46	10	4.41	10	44	73.9	45.8
15	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8
16	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8
17	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8
18	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8
19	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8
20	46	10	4.4	10	44	73.9	45.8

Data Series Information

Name: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 2
Sample: 1,5ZNO+B160-220RTFO
Operator: OMAR
Number of Intervals: 1-Feb
Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d
Measuring Date/Time: 04.04.2015; 17:33
Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752;
DevCOM1=
Accessories: Physica VT 2

Setting Values: tau, M
d(gamma)/dt, n, phi, gamma
FN
d, v, dd/(d·dt)
T[-1]
T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]: 1.310233
- Norm. Csr [Pa/mNm]: 325.028
- Start Delay Time [s]: 407.843
- Substance Density [rho]: 1,000
- Measurement Type: 1
- Motor Correction Factor: 1
- Axial Compliance [m/N]: 5.90E-07

Interval: 2
Number of Data Points: Oct-20

Time Setting: 20 Meas. Pts.
Max. Adjusting Time 30 s

Measuring Profile:
#NAME? Amplitude gamma = 10 %
Angular Frequency omega = 10 rad/s

Saved Values: Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v

Lift Speed/Gap $dd/(d \cdot dt)$
 Total Harmonic Distortion d_t
 Average Time t_{avr}
 Meas. Point Start Time t_{MP_start}
 Status Stat

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [kPa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
12	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
13	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
14	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
15	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
16	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
17	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
18	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
19	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6
20	52	10	1.82	10	18.2	77.4	18.6

Data Series Information

Name: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 3
 Sample: 1,5ZNO+B160-220RTFO
 Operator: OMAR
 Number of Intervals: 1-Feb
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d
 Measuring Date/Time: 04.04.2015; 17:45
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752;
 DevCOM1=
 Accessories: Physica VT 2

Setting Values:

tau, M
 $d(\gamma)/dt$, n, phi, gamma
 FN
 $d, v, dd/(d \cdot dt)$
 T[-1]
 T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]: 1.310233
 - Norm. Csr [Pa/mNm]: 325.028
 - Start Delay Time [s]: 422.668
 - Substance Density [rho]: 1,000
 - Measurement Type: 1
 - Motor Correction Factor: 1
 - Axial Compliance [m/N]: 5.90E-07

Interval: 2

Number of Data Points: Oct-20

Time Setting: 20 Meas. Pts.
Max. Adjusting Time 30 s

Measuring Profile:
#NAME? Amplitude gamma = 10 %
Angular Frequency omega = 10 rad/s

Saved Values:

- Time t
- Frequency f
- Shear Stress tau
- Strain gamma
- Phase Angle delta
- Temperature T[-1]
- Normal Force FN
- Gap d
- Velocity v
- Lift Speed/Gap dd/(d·dt)
- Total Harmonic Distortion d_t
- Average Time t_avr
- Meas. Point Start Time t_MP_start
- Status Stat

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [kPa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	58	10	0.738	10	7.38	80.7	7.48
12	58	10	0.738	10	7.38	80.7	7.48
13	58	10	0.738	10	7.38	80.7	7.48
14	58	10	0.738	10	7.38	80.7	7.47
15	58	10	0.738	10	7.37	80.7	7.47
16	58	10	0.737	10	7.37	80.7	7.47
17	58	10	0.737	10	7.37	80.7	7.47
18	58	10	0.737	10	7.37	80.7	7.47
19	58	10	0.737	10	7.37	80.7	7.47
20	58	10	0.737	10	7.37	80.7	7.47

Data Series Information

Name: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 4

Sample: 1,5ZNO+B160-220RTFO

Operator: OMAR

Number of Intervals: 1-Feb

Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025

Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d

Measuring Date/Time: 04.04.2015; 17:57

Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=
Accessories: Physica VT 2

Setting Values: tau, M
d(gamma)/dt, n, phi, gamma
FN
d, v, dd/(d·dt)
T[-1]
T[-2]

Calculating Constants:
- Norm. Csr [min/s]: 1.310233
- Norm. Csr [Pa/mNm]: 325.028
- Start Delay Time [s]: 431.589
- Substance Density [rho]: 1,000
- Measurement Type: 1
- Motor Correction Factor: 1
- Axial Compliance [m/N]: 5.90E-07

Interval: 2
Number of Data Points: Oct-20

Time Setting: 20 Meas. Pts.
Max. Adjusting Time 30 s

Measuring Profile:
#NAME? Amplitude gamma = 10 %
Angular Frequency omega = 10 rad/s

Saved Values: Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v
Lift Speed/Gap dd/(d·dt)
Total Harmonic Distortion d_t
Average Time t_avr
Meas. Point Start Time t_MP_start
Status Stat

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [kPa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
------------	---------------	------------------	-----------------	---------------	--------------	--------------	-----------------------

11	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
12	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
13	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
14	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
15	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
16	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
17	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
18	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
19	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11
20	64	10	0.309	10	3.09	83.5	3.11

Data Series Information

Name: Grading: RTFO RESIDUE 1,5ZNO+B160 5
 Sample: 1,5ZNO+B160-220RTFO
 Operator: OMAR
 Number of Intervals: 1-Feb
 Application: RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
 Device: SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj166d
 Measuring Date/Time: 04.04.2015; 18:09
 Measuring System: PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752;
 DevCOM1=Physica VT 2

Setting Values: tau, M
 d(gamma)/dt, n, phi, gamma
 FN
 d, v, dd/(d·dt)
 T[-1]
 T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]: 1.310233
 - Norm. C_{ss} [Pa/mNm]: 325.028
 - Start Delay Time [s]: 440.332
 - Substance Density [rho]: 1,000
 - Measurement Type: 1
 - Motor Correction Factor: 1
 - Axial Compliance [m/N]: 5.90E-07

Interval: 2
 Number of Data Points: Oct-20

Time Setting: 20 Meas. Pts.
 Max. Adjusting Time 30 s

Measuring Profile:

#NAME? Amplitude gamma = 10 %
 Angular Frequency omega = 10 rad/s

Saved Values:

- Time t
- Frequency f
- Shear Stress tau
- Strain gamma
- Phase Angle delta
- Temperature T[-1]
- Normal Force FN
- Gap d
- Velocity v
- Lift Speed/Gap dd/(d·dt)
- Total Harmonic Distortion d_t
- Average Time t_avr
- Meas. Point Start Time t_MP_start
- Status Stat

Meas. Pts.	Temp. [°C]	freq. [rad/s]	Stress [kPa]	Strain [%]	G* [kPa]	delta [°]	G* / sinδ [kPa]
11	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.38
12	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
13	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
14	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
15	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
16	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
17	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
18	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
19	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37
20	70	10	0.137	10	1.37	85.6	1.37

EK 4

AASHTO T315 PAV RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025

TEST PARAMETERS:

File name : C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\Desktop\New Folder\B50\PAV\F\1F+B50 PAV.orx
Data series : Grading: PAV RESIDUE 1FURF+B50 1
Used measuring points : I 2, P 11 ... I 2, P 20
Date of test : 10.04.2015
Time of test : 19:26:03
Operator : OMAR
Sample : 1FURF+B50 PAV
Remark :
Measuring device : SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot3; Adj105d
Temperature control unit : TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2
Measuring system : PP08/PE-SN22145
Diameter : 8,01 mm
Gap : 2,000 mm

MEASURING DATA:

No.	Time	Temp.	Freq.	Deform.	G*	delta
[1]	[s]	[°C]	[rad/s]	[%]	[kPa]	[°]
1	249,3	31,0	10,0	1,00	2690	49,0
2	255,2	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
3	261,0	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
4	266,8	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
5	272,7	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
6	278,5	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
7	284,4	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
8	290,2	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
9	296,0	31,0	10,0	1,00	2700	49,0
10	301,9	31,0	10,0	1,00	2700	49,0

TEST RESULTS:

Mean frequency : 10,0 rad/s = 1,59 Hz
Mean strain amplitude : 1,00 %
Mean stress amplitude : 26,987 kPa
Mean phase angle : 49,0 °
Mean complex modulus |G*| : 2700 kPa
Mean temperature lower plate : 31,0 °C
Mean temperature sample : 31,0 °C

EVALUATION RESULTS:

Number of data points : 10

$|G^*| \cdot \sin(\delta)$: 2040 kPa
Standard deviation : 2,42 kPa
Median : 2040 kPa
Confidence Interval (95%) : 2030 ... 2040 kPa
AASHTO T315 PAV PERFORMANCE CRIT. : $|G^*| \cdot \sin(\delta) \leq 5000$ kPa

=====

This sample is found to P A S S at 31,0 °C

=====

Workbook Information

Name:

Number of Data Series:

List of Data Series:

Data Series Information

Name:

Sample:

Operator:

Number of Intervals:

Application:

Device:

Measuring Date/Time:

Measuring System:

Accessories:

Setting Values:

Calculating Constants:

Grading: PAV
RESIDUE
1FURF+B50 1
1FURF+B50 PAV
OMAR

RHEOPLUS/32
V3.62 21005500
-33025
SmartPave301
SN80940081;
FW3.55; Slot3;
Adj105d
10.04.2015;
19:26
PP08/PE-SN221
45; [d=2 mm]
TU1=P-PTD200
+H-PTD120-
SN80928362-
80934752;
DevCOM1=
Physica VT 2

tau, M
 $d(\gamma)/dt$, n,
phi, gamma
FN
 $d, v, dd/(d \cdot dt)$
T[-1]
T[-2]

- Norm. Csr [min/s]:

- Norm. Csr [Pa/mNm]:

- Start Delay Time [s]:

- Substance Density [rho]:

- Measurement Type:

- Motor Correction Factor:

- Axial Compliance [m/N]:

0.419287

9,918.15

486.515

5.90E-07

Interval:

Number of Data Points:

Oct-20

Time Setting:

20 Meas. Pts.
Max. Adjusting
Time 30 s

Measuring Profile:

#NAME?

Amplitude
gamma = 1 %
Angular Frequency
omega = 10 rad/s

Saved Values:

Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v
Lift Speed/Gap
dd/(d·dt)
Total Harmonic
Distortion d_t
Average Time
t_avr
Meas. Point Start
Time t_MP_start
Status Stat

Meas. Pts.	Time	Temp.	Stress
	[s]	[°C]	[kPa]
11	249.3	31	26.9
12	255.2	31	26.9
13	261	31	27
14	266.8	31	27
15	272.7	31	27
16	278.5	31	27
17	284.4	31	27
18	290.2	31	27
19	296	31	27
20	301.9	31	27

Data Series Information

Name:	Grading: PAV F+B50 2
Sample:	1FURF+B50 PAV
Operator:	OMAR
Number of Intervals:	
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500- 33025 SmartPave301 SN80940081; FW3 SN80940081; FW3 .55; Slot3; Adj105d 10.04.2015; 19:39
Device:	
Measuring Date/Time:	PP08/PE-SN22145;
Measuring System:	[d=2 mm] TU1=P-PTD200+ H-PTD120- SN80928362- 80934752;
Accessories:	DevCOM1= Physica VT 2
Setting Values:	tau, M d(gamma)/dt, n, phi, gamma FN d, v, dd/(d·dt) T[-1] T[-2]
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	0.419287
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	9,918.15
- Start Delay Time [s]:	498.969
- Substance Density [rho]:	
- Measurement Type:	
- Motor Correction Factor:	
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07
Interval:	
Number of Data Points:	Oct-20
Time Setting:	20 Meas. Pts. Max. Adjusting Time 30 s
Measuring Profile:	Amplitude gamma = 1 % Angular Frequency omega = 10 rad/s

#NAME?

Saved Values:

Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v
Lift Speed/Gap
dd/(d·dt)
Total Harmonic
Distortion d_t
Average Time
t_avr
Meas. Point Start
Time t_MP_start

Status Stat

Meas. Pts.	Time [s]	Temp. [°C]	Stress [kPa]
11	249.6	28	42.4
12	255.4	28	42.4
13	261.3	28	42.4
14	267.1	28	42.4
15	272.9	28	42.4
16	278.8	28	42.4
17	284.6	28	42.4
18	290.5	28	42.4
19	296.3	28	42.4
20	302.1	28	42.4

Data Series Information

Name:	Grading: PAV RESIDUE
Sample:	1FURF+B50 3
Operator:	1FURF+B50 PAV OMAR
Number of Intervals:	1-Feb RHEOPLUS/32 V3.62 21005500- 33025
Application:	SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot3; Adj105d 10.04.2015; 19:51
Device:	PP08/PE- SN22145; [d=2 mm] SN80928362- 80934752; DevCOM1=
Measuring Date/Time:	
Measuring System:	
Accessories:	

Setting Values:

tau, M
d(gamma)/dt, n,

phi, gamma
FN
d, v, dd/(d·dt)
T[-1]
T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:
- Norm. Csr [Pa/mNm]:
- Start Delay Time [s]:
- Substance Density [rho]:
- Measurement Type:
- Motor Correction Factor:
- Axial Compliance [m/N]:

0.419287
9,918.15
383.734
1,000
1
1
5.90E-07

Interval:

2

Number of Data Points:

Oct-20

Time Setting:

20 Meas. Pts.
Max. Adjusting
Time 30 s

Measuring Profile:

#NAME?

Amplitude
gamma = 1 %
Angular Frequency
omega = 10 rad/s

Saved Values:

Time t
Frequency f
Shear Stress tau
Strain gamma
Phase Angle delta
Temperature T[-1]
Normal Force FN
Gap d
Velocity v
Lift Speed/Gap
dd/(d·dt)
Total Harmonic
Distortion d_t
Average Time
t_avr
Meas. Point Start
Time t_MP_start
Status Stat

Meas. Pts.

Time

Temp.

Stress

Strain

	[s]	[°C]	[kPa]	[%]
11	249.5	25	65	1
12	255.4	25	65	1
13	261.2	25	65	1
14	267.1	25	65	1
15	272.9	25	65	1
16	278.7	25	65.1	1
17	284.6	25	65.1	1
18	290.4	25	65.1	1
19	296.3	25	65.1	1
20	302.1	25	65.1	1

Data Series Information

Name:	Grading: PAV RESIDUE
Sample:	1FURF+B50 4
Operator:	1FURF+B50 PAV
Number of Intervals:	OMAR
Application:	1-Feb RHEOPLUS/32 V3.62 21005500 -33025 SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot3; Adj105d 10.04.2015; 20:03 PP08/PE- SN22145
Device:	; [d=2 mm] SN80928362- 80934752; Dev COM1=
Measuring Date/Time:	Physica VT 2
Measuring System:	
Accessories:	
Setting Values:	tau, M d(gamma)/dt, n, phi, gamma FN d, v, dd/(d·dt) T[-1] T[-2]

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	0.419287
- Norm. Css [Pa/mNm]:	9,918.15
- Start Delay Time [s]:	373.856
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07

Interval:		2
Number of Data Points:		Oct-20
Time Setting:		20 Meas. Pts. Max. Adjusting Time 30 s
Measuring Profile:	#NAME?	Amplitude gamma = 1 % Angular Frequency omega = 10 rad/s
Saved Values:		Time t Frequency f Shear Stress tau Strain gamma Phase Angle delta Temperature T[-1] Normal Force FN Gap d Velocity v Lift Speed/Gap dd/(d·dt) Total Harmonic Distortion d_t Average Time t_avr Meas. Point Start Time t_MP_start Status Stat

Meas. Pts.	Time	Temp.	Stress	Strain
	[s]	[°C]	[kPa]	[%]
11	249.5	22	99.5	1
12	255.4	22	99.5	1
13	261.2	22	99.5	1
14	267.1	22	99.5	1
15	272.9	22	99.6	1
16	278.7	22	99.6	1
17	284.6	22	99.6	1
18	290.4	22	99.6	1
19	296.3	22	99.6	1
20	302.1	22	99.6	1

TEST PARAMETERS:

File name : C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\Desktop\New Folder\B50\PAV\F\1F+B50 PAV.orx

Data series : Grading: PAV RESIDUE 1FURF+B50 4

Used measuring points : I 2, P 11 ... I 2, P 20

Date of test : 10.04.2015

Time of test : 20:03:38

Operator : OMAR

Sample : 1FURF+B50 PAV

Remark :

Measuring device : SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot3; Adj105d

Temperature control unit : TU1=P-PTD200+H-PTD120-SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2

Measuring system : PP08/PE-SN22145

Diameter : 8,01 mm

Gap : 2,000 mm

MEASURING DATA:

No.	Time	Temp.	Freq.	Deform.	G*	delta
[1]	[s]	[°C]	[rad/s]	[%]	[kPa]	[°]
1	249,5	22,0	10,0	1,00	9950	39,5
2	255,4	22,0	10,0	1,00	9950	39,6
3	261,2	22,0	10,0	1,00	9950	39,6
4	267,1	22,0	10,0	1,00	9950	39,6
5	272,9	22,0	10,0	1,00	9960	39,6
6	278,7	22,0	10,0	1,00	9960	39,6
7	284,6	22,0	10,0	1,00	9960	39,6
8	290,4	22,0	10,0	1,00	9960	39,6
9	296,3	22,0	10,0	1,00	9960	39,6
10	302,1	22,0	10,0	1,00	9960	39,6

TEST RESULTS:

Mean frequency : 10,0 rad/s = 1,59 Hz

Mean strain amplitude : 1,00 %

Mean stress amplitude : 99,564 kPa

Mean phase angle : 39,6 °

Mean complex modulus |G*| : 9960 kPa

Mean temperature lower plate : 22,0 °C

Mean temperature sample : 22,0 °C

EVALUATION RESULTS:

Number of data points : 10

$|G^*| \cdot \sin(\delta)$: 6340 kPa
Standard deviation : 3,44 kPa
Median : 6340 kPa
Confidence Interval (95%) : 6340 ... 6350 kPa
AASHTO T315 PAV PERFORMANCE CRIT. : $|G^*| \cdot \sin(\delta) \leq 5000$ kPa



Pass/Fail Temperature 24,0 °C

EK 5



MSCR (AASHTO TP70-13), v11

Date: 18.04.2015
 Time: 19:39:44
 Name: MSCR_4TH B50 AT 64 1
 Sample: MSCR_4TH B50 AT 64
 Remark:
 Operator: OMAR
 File: C:\Documents and Settings\ulastirma_lab\Desktop\New Folder\
 Temperature: 63,9998°C

AVERAGE PERCENT RECOVERY
 0.1 kPa: 23,0478%
 3.2 kPa: 12,3975%

PERCENT DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE PERCENT RECOVERIES
 46,2098%

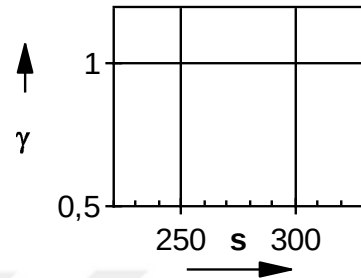
NON-RECOVERABLE CREEP COMPLIANCE (J_{nr})
 0.1 kPa: 0,5702 1/kPa
 3.2 kPa: 0,6617 1/kPa

PERCENT DIFFERENCE BETWEEN J_{nr}
 [J_{nr_diff} = ((J_{nr}3.2 - J_{nr}0.1) · 100) / (J_{nr}0.1)]
 16,0419 %

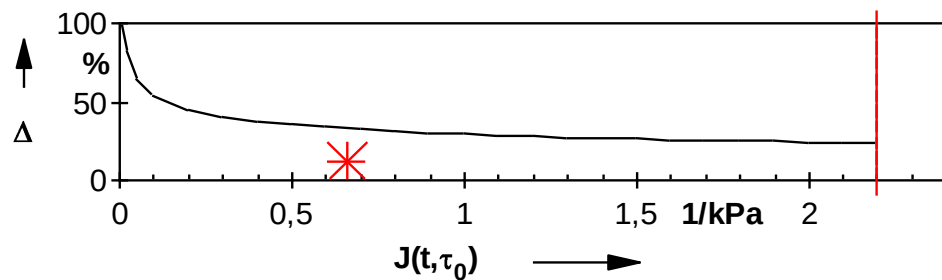
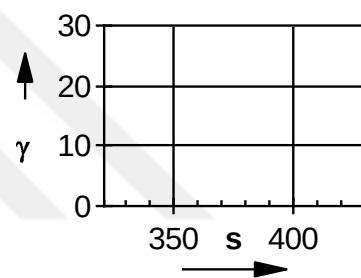
Meas. Pts.	Shear Stress	X	Y	Z
	[kPa]	[%]	[%]	[%]
Meas. Pts.	Shear Stress	X	Y	Z
1	0,1	57,8272	65,2517	6
2	0,1	63,5508	70,9674	6
3	0,1	69,2708	76,6796	7
4	0,1	74,9784	82,3941	8
5	0,1	80,6866	88,1093	8
6	0,1	86,3913	93,8042	9
7	0,1	92,0968	99,4983	9
8	0,1	97,7916	105,185	1
9	0,1	103,482	110,883	1
10	0,1	109,165	116,567	1
11	3,2	114,848	354,264	3

X=epsilon_0, Y=epsilon_c, Z=epsilon_r

MSCR 100 Pa



MSCR 3200 Pa



EK 6

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 1
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 2100 5500-33025 SmartPave301 SN80940081;
Device:	FW3.55; Slot2; Adj13d
Measuring Date/Time:	24.06.2015; 19:58 PP25/PE-SN25083;
Measuring System:	[d=1 mm] SN80928362-80934752;
Accessories:	DevCOM1=Physica VT 2
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	1.3102326
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	325.02798
- Start Delay Time [s]:	305.359
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07
Interval:	1
Number of Data Points:	17
Time Setting:	17 Meas. Pts.
Measuring Profile:	
#NAME?	Amplitude gamma = 5 % Angular Frequency omega = 300 ... 0,03 rad/s log; Slope = 4 Pt. / dec

Meas. Pts.	Angular Frequency [rad/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]
1	300	9.67E+06	5.43E+06
2	169	7.81E+06	5.08E+06
3	94.9	6.08E+06	4.62E+06
4	53.3	4.51E+06	4.03E+06
5	30	3.19E+06	3.35E+06
6	16.9	2.14E+06	2.65E+06
7	9.49	1.38E+06	2.00E+06

8	5.33	8.55E+05	1.44E+06
9	3	5.19E+05	1.02E+06
10	1.69	3.14E+05	6.99E+05
11	0.949	1.87E+05	4.69E+05
12	0.533	1.10E+05	3.08E+05
13	0.3	6.44E+04	1.99E+05
14	0.169	3.75E+04	1.28E+05
15	0.0949	2.18E+04	8.18E+04
16	0.0533	1.26E+04	5.22E+04
17	0.03	7.30E+03	3.33E+04

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 2
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	
Device:	
Measuring Date/Time:	24.06.2015; 20:28
Measuring System:	
Accessories:	

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1.3102326
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	325.02798
- Start Delay Time [s]:	324.969
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07

Interval:	1
Number of Data Points:	17

Time Setting:	17 Meas. Pts.
Measuring Profile:	
#NAME?	

Meas. Pts.	Angular Frequency [rad/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]
1	300	3.06E+06	3.37E+06
2	169	2.03E+06	2.63E+06
3	94.9	1.28E+06	1.96E+06
4	53.3	7.80E+05	1.40E+06
5	30	4.66E+05	9.74E+05

6	16.9	2.78E+05	6.62E+05
7	9.49	1.64E+05	4.38E+05
8	5.33	9.52E+04	2.84E+05
9	3	5.48E+04	1.81E+05
10	1.69	3.13E+04	1.14E+05
11	0.949	1.76E+04	7.13E+04
12	0.533	9.74E+03	4.39E+04
13	0.3	5.28E+03	2.68E+04
14	0.169	2.79E+03	1.62E+04
15	0.0949	1.44E+03	9.68E+03
16	0.0533	7.18E+02	5.73E+03
17	0.03	3.50E+02	3.37E+03

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 3
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500 -33025 SmartPave301 SN80940081; FW3.55; Slot2; Adj13d
Device:	
Measuring Date/Time:	24.06.2015; 21:04
Measuring System:	PP25/PE-SN25083; [d=1 mm] SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2
Accessories:	

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1.3102326
- Norm. Css [Pa/mNm]:	325.02798
- Start Delay Time [s]:	319.797
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07

Interval:	1
Number of Data Points:	17

Time Setting: 17 Meas. Pts.

Measuring Profile:

(- strain)
Amplitude gamma = 5 %
Angular Frequency
omega =
300 ... 0,03 rad/s log;
Slope| = 4 Pt. / dec

Meas. Pts.	Angular Frequency	Storage Modulus	Loss Modulus
------------	-------------------	-----------------	--------------

	[rad/s]	[Pa]	[Pa]
1	300	4.99E+05	1.09E+06
2	169	2.95E+05	7.41E+05
3	94.9	1.72E+05	4.88E+05
4	53.3	9.86E+04	3.14E+05
5	30	5.60E+04	1.99E+05
6	16.9	3.15E+04	1.24E+05
7	9.49	1.75E+04	7.69E+04
8	5.33	9.61E+03	4.70E+04
9	3	5.18E+03	2.85E+04
10	1.69	2.73E+03	1.71E+04
11	0.949	1.40E+03	1.02E+04
12	0.533	6.97E+02	5.99E+03
13	0.3	3.36E+02	3.49E+03
14	0.169	1.56E+02	2.01E+03
15	0.0949	6.99E+01	1.15E+03
16	0.0533	3.01E+01	6.48E+02
17	0.03	1.24E+01	3.62E+02

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 4
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025 SmartPave301 SN80940081;
Device:	FW3.55; Slot2; Adj13d
Measuring Date/Time:	24.06.2015; 21:52
Measuring System:	PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
Accessories:	SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1.3102326
- Norm. Css [Pa/mNm]:	325.02798
- Start Delay Time [s]:	318.719
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1
- Axial Compliance [m/N]:	5.90E-07

Interval:	1
Number of Data Points:	17

Time Setting:	17 Meas. Pts.
---------------	---------------

Measuring Profile:

#NAME?

Amplitude gamma = 5 %
 Angular Frequency
 omega = 300 ...
 0,03 rad/s log;
 |Slope| = 4 Pt. / dec

Meas. Pts.	Angular Frequency [rad/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]
1	300	7.41E+04	2.73E+05
2	169	4.08E+04	1.69E+05
3	94.9	2.23E+04	1.04E+05
4	53.3	1.21E+04	6.30E+04
5	30	6.50E+03	3.79E+04
6	16.9	3.42E+03	2.27E+04
7	9.49	1.77E+03	1.34E+04
8	5.33	8.96E+02	7.90E+03
9	3	4.43E+02	4.61E+03
10	1.69	2.12E+02	2.67E+03
11	0.949	9.87E+01	1.54E+03
12	0.533	4.40E+01	8.77E+02
13	0.3	1.90E+01	4.97E+02
14	0.169	8.07E+00	2.80E+02
15	0.0949	3.56E+00	1.57E+02
16	0.0533	2.03E+00	8.88E+01
17	0.03	1.47E+00	5.03E+01

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 5
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025 SmartPave301 SN80940081;
Device:	FW3.55; Slot2; Adj13d
Measuring Date/Time:	24.06.2015; 22:47
Measuring System:	PP25/PE-SN25083; [d=1 mm]
Accessories:	SN80928362-80934752; DevCOM1=Physica VT 2

Calculating Constants:

- Norm. Csr [min/s]:	1.3102326
- Norm. Csr [Pa/mNm]:	325.02798
- Start Delay Time [s]:	367.172
- Substance Density [rho]:	1,000
- Measurement Type:	1
- Motor Correction Factor:	1

- Axial Compliance [m/N]: 5.90E-07

Interval: 1

Number of Data Points: 17

Time Setting: 17 Meas. Pts.

Measuring Profile:

#NAME? Amplitude gamma = 5 %
Angular Frequency
omega = 300 ...
0,03 rad/s log;
|Slope| = 4 Pt. / dec

Meas. Pts.	Angular Frequency [rad/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]
1	300	1.15E+04	6.83E+04
2	169	6.11E+03	4.06E+04
3	94.9	3.18E+03	2.40E+04
4	53.3	1.64E+03	1.41E+04
5	30	8.28E+02	8.27E+03
6	16.9	4.11E+02	4.81E+03
7	9.49	2.01E+02	2.78E+03
8	5.33	9.54E+01	1.60E+03
9	3	4.43E+01	9.18E+02
10	1.69	2.03E+01	5.23E+02
11	0.949	9.34E+00	2.97E+02
12	0.533	4.58E+00	1.68E+02
13	0.3	2.50E+00	9.50E+01
14	0.169	1.55E+00	5.38E+01
15	0.0949	1.12E+00	3.16E+01
16	0.0533	8.14E-01	1.79E+01
17	0.03	6.92E-01	1.01E+01

Data Series Information

Name: [MASTER]

Sample: SAF B50-70

Operator: omar

Number of Intervals: 1

Application: RHEOPLUS/32 V3.62
21005500-33025

Analysis Method: Smoothing
Smoothing = log-log rel.

Analysis Result: 100 %

Calculating Constants: -

Interval: 1

Number of Data Points: 50

Time Setting:

-

Meas. Pts.	Angular Frequency [rad/s]	Storage Modulus [Pa]	Loss Modulus [Pa]
1	0.000553	3.46E-01	1.78E+01
2	0.000808	5.18E-01	2.42E+01
3	0.00118	7.72E-01	3.32E+01
4	0.00172	1.16E+00	4.52E+01
5	0.00252	1.73E+00	6.17E+01
6	0.00368	2.58E+00	8.41E+01
7	0.00537	3.86E+00	1.15E+02
8	0.00784	5.76E+00	1.56E+02
9	0.0114	8.61E+00	2.13E+02
10	0.0167	1.29E+01	2.91E+02
11	0.0244	1.92E+01	3.97E+02
12	0.0357	2.87E+01	5.41E+02
13	0.0521	4.30E+01	7.38E+02
14	0.0761	6.42E+01	1.01E+03
15	0.111	9.60E+01	1.37E+03
16	0.162	1.43E+02	1.87E+03
17	0.237	2.14E+02	2.56E+03
18	0.346	3.20E+02	3.49E+03
19	0.505	4.79E+02	4.75E+03
20	0.738	7.15E+02	6.48E+03
21	1.08	1.07E+03	8.84E+03
22	1.57	1.60E+03	1.21E+04
23	2.3	2.39E+03	1.65E+04
24	3.36	3.57E+03	2.24E+04
25	4.91	5.33E+03	3.06E+04
26	7.16	7.97E+03	4.17E+04
27	10.5	1.19E+04	5.69E+04
28	15.3	1.78E+04	7.76E+04
29	22.3	2.66E+04	1.06E+05
30	32.6	3.98E+04	1.44E+05
31	47.6	5.94E+04	1.97E+05
32	69.5	8.88E+04	2.69E+05
33	102	1.33E+05	3.66E+05
34	148	1.98E+05	5.00E+05
35	217	2.97E+05	6.82E+05
36	316	4.43E+05	9.30E+05
37	462	6.62E+05	1.27E+06
38	675	9.90E+05	1.73E+06
39	985	1.48E+06	2.36E+06
40	1,440	2.21E+06	3.22E+06
41	2,100	3.30E+06	4.39E+06

42	3,070	4.94E+06	5.99E+06
43	4,480	7.38E+06	8.17E+06
44	6,550	1.10E+07	1.11E+07
45	9,560	1.65E+07	1.52E+07
46	14,000	2.46E+07	2.07E+07
47	20,400	3.68E+07	2.83E+07
48	29,800	5.50E+07	3.86E+07
49	43,500	8.24E+07	5.23E+07
50	63,500	1.23E+08	7.17E+07

Data Series Information

Name:	SAF B50-70 1 [WLF]
Sample:	SAF B50-70
Operator:	omar
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.62 21005500-33025
Analysis Method:	WLF I
Analysis Result:	a = -29,606; b = 127,98; x0 = 40 °C