



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİMER VE ATIK
LASTİK TOZU ESASLI TERMOPLASTİK DİNAMİK
VULKANİZAT (TDV) KATKISININ BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR ÜZERİNDE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2020

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİMER VE ATIK
LASTİK TOZU ESASLI TERMOPLASTİK DİNAMİK
VULKANİZAT (TDV) KATKISININ BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR ÜZERİNDE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Doktora Programı

İzmir

2020

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH tarafından doktora tezi olarak sunulan “Geri Dönüştürülmüş Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 02/07/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday **oybirliği**/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

Üye : Prof. Dr. Burak ŞENGÖZ

Üye : Doç. Dr. Yalçın ALVER

Üye : Doç. Dr. Taccettin GEÇKİL

Üye : Dr. Öğr. Üyesi. Taylan GÜNAY

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E  Lisansüstü Eğitim ve  ğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Ger  D n şt r lm   Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar  zerinde Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu  niversite 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.

02 / 07 / 2020

İmzası

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH

ÖZET**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ POLİMER VE ATIK LASTİK TOZU
ESASLI TERMOPLASTİK DİNAMİK VULKANİZAT (TDV)
KATKISININ BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR
ÜZERİNDE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

HASSANPOUR KASANAGH, Sajjad

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

Temmuz 2020, 159 sayfa

Asfalt karışımlarının termo-mekanik özellikleri bitümlerin özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bitümlerin asfalt kaplamalardaki düşük performansı tekerlek izi ve yorulma çatlaması gibi çeşitli bozulmalara yol açabilir. Asfalt kaplama bozulmalarını hafifletmek için yaygın yaklaşımlardan biri, çeşitli modifiyerler veya katkı maddeleri kullanarak bitümleri modifiye etmektir. Bu çalışma, farklı miktarlarda geri dönüştürülmüş malzemelerden sentezlenen termoplastik dinamik vulkanizat (TDV) katkısının iki farklı penetrasyon sınıflarına sahip (B 50/70 ve B 160/220) bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri laboratuvar ortamında incelenmiştir. Üstelik, aynı performans sınıflı bitümleri kullanarak, bu modifiyerlerin performansı, birçok bölgede yaygın olarak kullanılan stiren-bütadien-stiren (SBS) ve etilen-vinil-asetat (EVA) modifiyerleri ile karşılaştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilen TDV kullanımı hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayabilmektedir. Bu kompozit modifiyerin bitümlere eklenmesi üzerine teknik gelişmelerin elde edilmesi beklenmektedir. TDV katkısı, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), etilen propilen dien monomer (EPDM), atık lastik tozu (GTR) ve bitüm içermektedir. Polimer katkıların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların üzerinde etkisi, penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, yüksek sıcaklık ve orta sıcaklık klasik performans sınıfı, farklı frekans (ana eğri), lineer farklı genlik (LAS), çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) ve Marshall dahil olmak üzere çok çeşitli deneyler yapılarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, tüm modifiyerlerin bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, TDV katkısı asfalt endüstrisinde yaygın olarak kullanılan katkıları ile kıyaslanabilir bir performans sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Bitüm, Reoloji, Performans Sınıfı, MSCR, LAS.



ABSTRACT**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF RECYCLED
POLYMER AND GROUND TYRE RUBBER BASED
THERMOPLASTIC DYNAMIC VULCANIZATE (TDV) ADDITIVE
ON BITUMEN AND HOT MIX ASPHALT**

HASSANPOUR KASANAGH, Sajjad

PH.D. in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Perviz AHMEDZADE

July 2020, 159 pages

The thermo-mechanical properties of asphalt mixtures are highly influenced by the properties of the asphalt binders. The poor performance of the asphalt binders can lead to several distresses in asphalt pavements such as rutting and fatigue cracking. One of the common approaches to mitigate the asphalt pavement distresses is modifying the asphalt binders, which can happen by using a wide variety of modifiers or additives. In this research, the effects of various amounts of a thermoplastic dynamic vulcanizate (TDV) made from recycled materials on the performance of two different penetration grade bitumens (B 50/70 and B 160/220)) were investigated. In addition, using the same base bitumens, the performance of this modifier was compared with that of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) and Ethylene-Vinyl-Acetate (EVA) which are the most common modifier used in many regions. The use of TDV obtained from recycled materials can provide both environmental and economic benefits. It could also be expected to obtain technical improvements upon the addition of this modifier. The TDV contained High-Density Polyethylene (HDPE), Ethylene Propylene Diene Monomers (EPDM), Ground Tire Rubber (GTR), and bitumen. The performance of the binders was evaluated by conducting a wide range of tests including penetration, softening point, viscosity, conventional performance grading, frequency sweep (master curve), linear amplitude sweep (LAS), multiple stress creep recovery (MSCR), and Marshall. The findings from this research indicated that all modifiers improved the rheological properties of the binders. Moreover, TDV showed a comparable performance with that of common modifiers.

Keywords: Bitumen, Rheology, Performance grade, MSCR, LAS



ÖNSÖZ

Doktora eğitimimin tez aşamasına geldiğim zaman tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Perviz Ahmedzade ile gerçekleştirdiğimiz fikir jimnastikleri sonucunda yaptığımız literatür araştırması neticesinde “Geri Dönüştürülmüş Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Etkisinin İncelenmesi” başlıklı tez konusunu belirleyerek tez önerisini bölüm aracılığı ile enstitüye ulaştırdık. Tez konusunun kabul edilmesine müteakip kullanılacak bitüm ve polimer katkılarının teminini gerçekleştirdik.

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

İZMİR

02/07/2020

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH





İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	iii
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Bitüm.....	5
2.1.1 Bitüm kompozisyonu ve yapısı	5
2.2 Bitümün reolojisi.....	8

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2.1 Reoloji, deformasyon ve akış	9
2.2.2 Elastisite, plastisite ve katı malzemelerin davranışı	9
2.2.3 Newtonian ve Newtonian olmayan davranış	10
2.2.4 Viskoelastisite.....	11
2.3 Bitüm modifikasyonunda kullanılan yaygın polimerler	12
2.3.1 Plastomerler	13
2.3.2 Termoplastik elastomerler	16
2.4 Termoplastik dinamik vulkanizat (TDV)	20
3. DENEYLER	24
3.1 Fiziksel deneyler.....	25
3.1.1 Penetrasyon deneyi	25
3.1.2 Yumuşama noktası	26
3.2 Superpave bitüm şartnamesi.....	27
3.2.1 Dönel viskozite (RV) deneyi	29

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.2 Dinamik kayma reometresi (DSR)	31
3.2.3 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)	34
3.2.4 Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi	36
3.3 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi	38
3.4 Lineer farklı genlik (LAS) deneyi	41
3.4 Zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibi	44
4. MODİFİKASYONDA KULLANILAN MALZEMELER	52
4.1 TDV	52
4.2 SBS	53
4.3 EVA	54
4.3 Modifiye işlemleri ve numunelerin kodlandırılması	55
5. DENEY SONUÇLARI	58
5.1 Fiziksel deney sonuçları	58
5.2 RTFO deney sonuçları	61
5.3 Dönel viskozite (RV) deney sonuçları	66

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.4 Dinamik kayma reometresi (DSR) deney sonuçları	74
5.4.1 Tekerlek izi parametresiyle yüksek sıcaklık PG sınıfının belirlenmesi	78
5.5 Dinamik kayma reometresiyle (DSR) yorulma deney sonuçları.....	84
5.6 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deney sonuçları	89
5.7 Lineer farklı genlik (LAS) deney sonuçları.....	101
5.8 Zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibi performansı	118
6. BULGULAR	135
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	143
7.1 Sonuçlar.....	143
7.2 Öneriler.....	146
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	148
TEŞEKKÜR	157
ÖZGEÇMİŞ.....	158
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Tipik bitüm yapısının şematik görünümü	6
2.2 Zamandan bağımsız Newton olmayan akışkan türleri	11
2.3 Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) yapıları.....	13
2.4 Etilen-vinil asetatın (EVA) yapısı	14
2.5 EVA modifiyeli bitümün flüoresan görünümü	15
2.6 SBS kopolimerinin yapısı ve SBS'deki ters çevrilebilir çapraz bağlantıları	17
2.7 SBS modifiyeli bitümün flüoresan görüntüleri	18
2.8 Alternatif sert kesit ve yumuşak kesit yapılarından oluşan TPE'nin şematiği	20
2.9 Atık EPDM içeren TPE üretiminde yapılan işlemin görüntüsü	23
3.1 Fiziksel deneylere göre sınıflandırılmış bitümün hizmetteki davranışı .	24
3.2 Penetrasyon deneyinin işleyişi	26
3.4 Brookfield dönel viskozimetre cihazı ve sıcaklık kontrol sistemi	29
3.5 RV cihazının çalışma prensibi.....	30
3.6 Bitümün örnek bir logaritmik viskozite- sıcaklık eğrisi.....	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.7 DSR cihazının yükleme düzeneği.....	32
3.8 Dinamik kayma reometre cihazının görünümü	32
3.9 G^* ve δ hesaplanması	34
3.10 RTFO cihazının iç görünümü	35
3.11 RTFO deneyinde kullanılan standart cam şişeler	35
3.12 PAV cihazının görünümü	37
3.13 Gaz alma cihazının görünümü	38
3.14 MSCR deneyi deformasyon-geri dönme davranışı	39
3.3 Kullanılan agreganın gradasyonu	46
3.15 Kullanılan agreganın gradasyon limiti grafiği.....	47
3.16 Marshall sıkıştırma tokmağı	48
3.17 Marshall stabilite ve akma aleti	50
3.18 Örnek bir karışım içeriğini temsil eden Marshall numunesi	50
3.19 Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri	51
4.1 Çalışmada kullanılan TDV katkısı	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2 Çalışmada kullanılan SBS katkısı	54
4.3 Çalışmada kullanılan EVA katkısı	54
4.4 Modifiye işlemi sırasında kullanılan mikser aleti	55
5.1 TDV modifiyeli B ₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	67
5.2 SBS modifiyeli B ₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	68
5.3 EVA modifiyeli B ₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	69
5.4 TDV modifiyeli B ₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	71
5.5 SBS modifiyeli B ₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	72
5.6 EVA modifiyeli B ₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi	73
5.7 TDV katkılı B ₁ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....	79
5.8 SBS katkılı B ₁ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....	80
5.9 EVA katkılı B ₁ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....	81
5.10 TDV katkılı B ₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....	82

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

5.11 SBS katkılı B₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....83

5.12 EVA katkılı B₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı.....84

5.13 TDV katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....85

5.14 SBS katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....86

5.15 EVA katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....86

5.16 TDV katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....87

5.17 SBS katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....88

5.18 EVA katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı.....88

5.19 TDV katkılı B₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)91

5.20 SBS katkılı B₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)91

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.21 EVA katkılı B ₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)	92
5.22 TDV katkılı B ₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)	92
5.23 SBS katkılı B ₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)	93
5.24 EVA katkılı B ₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kP)	93
5.25 TDV katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması.....	95
5.26 SBS katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması	96
5.27 EVA katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması.....	97
5.28 TDV katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması.....	98
5.29 SBS katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması	99
5.30 EVA katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması.....	100
5.31 TDV katkılı B ₁ numunelerine ait “A parametresi”	103
5.32 TDV katkılı B ₁ numunelerine ait “B parametresi”	103
5.33 TDV katkılı B ₁ numunelerine ait yorulma ömrü.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.34 SBS katkılı B ₁ numunelerine ait “A parametresi”	106
5.35 SBS katkılı B ₁ numunelerine ait “B parametresi”	106
5.36 SBS katkılı B ₁ numunelerine ait yorulma ömrü	107
5.37 EVA katkılı B ₁ numunelerine ait “A parametresi”	109
5.38 EVA katkılı B ₁ numunelerine ait “B parametresi”	109
5.39 EVA katkılı B ₁ numunelerine ait yorulma ömrü	110
5.40 TDV katkılı B ₂ numunelerine ait “A parametresi”	111
5.41 TDV katkılı B ₂ numunelerine ait “B parametresi”	112
5.42 TDV katkılı B ₂ numunelerine ait yorulma ömrü	112
5.43 SBS katkılı B ₂ numunelerine ait “A parametresi”	114
5.44 SBS katkılı B ₂ numunelerine ait “B parametresi”	114
5.45 SBS katkılı B ₂ numunelerine ait yorulma ömrü	115
5.46 EVA katkılı B ₂ numunelerine ait “A parametresi”	117
5.47 EVA katkılı B ₂ numunelerine ait “B parametresi”	117
5.48 EVA katkılı B ₂ numunelerine ait yorulma ömrü	118

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.49 TDV katkılı B ₁ numunelerine ait ana eğri.....	120
5.50 SBS katkılı B ₁ numunelerine ait ana eğri.....	120
5.51 EVA katkılı B ₁ numunelerine ait ana eğri.....	121
5.52 TDV katkılı B ₂ numunelerine ait ana eğri.....	121
5.53 SBS katkılı B ₂ numunelerine ait ana eğri.....	122
5.54 EVA katkılı B ₂ numunelerine ait ana eğri.....	122
5.55 B ₁ bitüm için hava boşluğu (V _h) – bitüm içeriği grafiği	124
5.56 B ₂ bitüm için hava boşluğu (V _h) – bitüm içeriği grafiği	124
5.57 B ₁ bitüm için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği .	125
5.58 B ₂ bitüm için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği .	125
5.59 B ₁ bitüm için asfalt dolu boşluk (V _f) – bitüm içeriği grafiği	126
5.60 B ₂ bitüm için asfalt dolu boşluk (V _f) – bitüm içeriği grafiği	126
5.61 B ₁ bitüm için hacim özgül ağırlığı (D _p) – bitüm içeriği grafiği	127
5.62 B ₂ bitüm için hacim özgül ağırlığı (D _p) – bitüm içeriği grafiği	127
5.63 B ₁ bitüm için akma değeri – bitüm içeriği grafiği.....	128

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.64 B ₂ bitüm için akma değeri – bitüm içeriği grafiği	129
5.65 B ₁ bitüm için stabilite – bitüm içeriği grafiği	129
5.66 B ₂ bitüm için stabilite – bitüm içeriği grafiği	130
5.67 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde hava boşluğu (V _h).....	131
5.68 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde agregalar arasındaki boşluğu (VMA).....	131
5.69 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde asfalt dolu boşluğu (V _f).....	132
5.70 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde özgül ağırlığı (D _p).....	132
5.71 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde akma değeri	133
5.72 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde stabilitesi.....	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bitüm modifikasyonu için yaygın polimerler	12
3.1 Superpave Bitüm deneyleri ve kullanım amaçları	28
3.2 MSCR deneyinde trafik hızı ve seviyesine göre bitüm seçimi	40
4.1 Bitümlerin fiziksel özellikleri.....	52
5.1 TDV katkılı B ₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları	59
5.2 SBS katkılı B ₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları	59
5.3 EVA katkılı B ₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları	59
5.4 TDV katkılı B ₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları.....	60
5.5 SBS katkılı B ₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları.....	61
5.6 EVA katkılı B ₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları.....	61
5.7 Modifiye edilmiş B ₁ bitümlerin kütle kaybı deney sonuçları	61
5.8 Modifiye edilmiş B ₂ bitümlerin kütle kaybı deney sonuçları	62
5.9 TDV katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri	63
5.10 TDV katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

Çizelge

Sayfa

5.11 SBS katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	63
5.12 SBS katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	63
5.13 EVA katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	64
5.14 EVA katkılı B ₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	64
5.15 TDV katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	64
5.16 TDV katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	64
5.17 SBS katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	65
5.18 SBS katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	65
5.19 EVA katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri.....	65
5.20 EVA katkılı B ₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri	65

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.21 TDV modifiyeli B ₁ bitümlerin viskozite değerleri	67
5.22 SBS modifiyeli B ₁ bitümlerin viskozite değerleri	68
5.23 EVA modifiyeli B ₁ bitümlerin viskozite değerleri	68
5.24 TDV modifiyeli B ₂ bitümlerin viskozite değerleri	71
5.25 SBS modifiyeli B ₂ bitümlerin viskozite değerleri	71
5.26 EVA modifiyeli B ₂ bitümlerin viskozite değerleri	72
5.27 TDV katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	95
Çizelge 5.28 SBS katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	96
5.29 EVA katkılı B ₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	97
5.30 TDV katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	98
5.31 SBS katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	99
5.32 EVA katkılı B ₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları.....	100
5.33 B ₁ bitümlerin optimum içeriğini belirlenmesi için kullanılan değerler.....	123
5.34 B ₂ bitümlerin optimum içeriğini belirlenmesi için kullanılan değerler.....	123



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
τ	Kayma gerilmesi
F	Uygulanan kuvvet
A	Plaka alanı
γ	Kayma deformasyonu
η	Viskozite
ε_r	Elastik deformasyon
ε_η	Kalıcı deformasyon
G^*	Kompleks kayma modülü
G''	Depolama modülü
G'	Kayıp modülü
δ	Faz açısı
$G^*/\sin \delta$	Tekerlek izi parametresi
$G^*.\sin \delta$	Yorulma parametresi
a_T	Kaydırma faktörü
C_1, C_2	Ana eğri denklem sabitleri
ω	Açısal frekans
R	Ortalama elastik geri dönme
J_{nr}	Geri dönmeyen sünme uygunluğu
$J_{nr,diff}$	İki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uygunluğu farkı
R_{diff}	İki yükleme arasındaki geri kazanılan deformasyon farkı
“A”	Malzeme bütünlüğünü koruma özelliği
“B”	Deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılık
N_f	Yorulma ömrü veya bozulmaya uğrayan döngü (trafik) sayısı

Kısaltmalar

PMB	Polimer modifiyeli bitüm
BSK	Bitümlü sıcak karışım
SBS	Stiren-butadien-stiren
EVA	Etilen Vinil Astetat
SBR	Styrene butadiene rubber
SEBS	Styrene ethylene butadiene styrene
EBA	Etilen-butil akrilat
SİS	Stiren-isoprene-stiren
PP	Polipropilen
HDPE	Yüksek yoğunluklu politetilen
LDPE	Düşük yoğunluklu politetilen
GTR	Atık lastik tozu
EPDM	Ethylene propylene diene monomer
TDV	Termoplastik dinamik vulkanizat
ASTM	Amerikan Test ve malzeme kurumu
PI	Penetrasyon indeksi
RTFOT	Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
AASHTO	Amerikan Devlet karayolu ve taşımacılık birliği
RV	Dönel viskozimetre
DSR	Dinamik kayma reometresi
LVE	Lineer viskoelastik limiti
PAV	Basıncılı yaşlandırma kabı
BBR	Kiriş eğme reometresi
MSCR	Çoklu gerilmeli sünme geri dönme
PG	Performans sınıfı
LAS	Lineer farklı genlik (linear amplitude sweep)
VECD	Viskoelastik sürekli hasar (viscoelastic continuum damage)



1. GİRİŞ

Bitüm, günümüzde kullanılan en eski termoplastik malzemedir ve binlerce yıldır çeşitli şekillerde kullanılmıştır (Morgan P and Mulder A, 1995). Amerikan Asfalt Enstitüsü ve Eurobitume ortak yayınına göre, dünyada yıllık bitüm tüketimi yaklaşık 102 milyon tondur ve bunun %85'i çeşitli üstyapı türlerinde kullanılmaktadır (Eurobitume and A I, 2011). Ancak, iyi kalitede bitüm üretmek için sınırlı petrol kaynağı ve rafineride etkin kontrol eylemlerinin bulunmaması, ayrıca maksimum ekonomik fayda kazanmanın itici gücü, bitüm modifikasyon konusu üzerine çok odaklanılmıştır (Becker, Mendez and Rodríguez, 2001). Buna ek olarak, karayolu üstyapı endüstrisinin son bir kaç on yıl içinde gelişmesine rağmen, artan trafik yükü, yüksek trafik hacmi ve birçok ciddi bozulmalara neden olan yetersiz bakım ve onarım, bitüm modifikasyona odaklı araştırmalara yönelik teşvik etmiştir.

Asfalt kaplamalar hizmet ömrü boyunca çeşitli yükleme ve çevre koşullarını yaşamakta ve bu da kaplamalarda çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Sıcaklıktaki değişiklikler nedeniyle, bitümün davranışı yüksek sıcaklıklarda elastik bir malzemeden, orta ve düşük sıcaklıklarda kırılgan bir malzemeye dönüşmektedir. Sıcak mevsimde artan sıcaklığın neticesinde, bitümün viskozitesi ve sertliği azalır, bu da tekerlek izi gibi bozulmalara neden olabilir. Soğuk mevsimlerde, sıcaklık düştükçe bitümün sertliği artmakta ve dolayısıyla termal çatlaklar oluşmaktadır. Bitümün davranışıyla ilgili sorunları azaltmak ve performansını arttırmak için, en yaygın yöntemlerden biri çeşitli katkıların kullanılmasıyla bitümün modifiye edilmesidir (de Almeida Júnior *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019). Katkıların modifikasyonda kullanımında ana rolleri bitümün reolojik özelliğini geliştirmek ve genel olarak yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı, orta sıcaklıkta yorulmaya karşı çatlamayı ve düşük sıcaklıkta ise termal çatlaklara karşı direncini arttırmaktır. Asfalt kaplamasında kullanılan katkıları arasında, polimer katkıları asfalt betonuna mühendislik ve mekanik faydaları sağladığından dolayı büyük ilgi görmektedir (Ahmedzade, 2013).

Bitümün polimer maddeler ile modifikasyonu geçmiş yıllardan beri bazı eksiklikleri olmasına rağmen, asfalt kaplamasının fiziksel ve reolojik özelliklerini bir dereceye kadar arttırmasından dolayı etkili bir yöntem olarak kabul edilmiştir. İlk başta bitüm modifikasyonu için tasarlanmamış olsalar bile, stiren-bütadien-stiren (SBS) termoplastik elastomer katkısı ve etilen vinil asetat (EVA) plastomer katkıları en yaygın modifiye katkıları olarak bitümün reolojik özelliklerini arttırdığı bildirilmiştir. Bu kapsamda yapılmış araştırmalara göre, polimer modifiyeli bitüm (PMB) orijinal bitümle kıyaslandığında bitümlü sıcak karışımın (BSK) kohesyon ve adhezyon kuvvetlerini arttırmış ve aynı zamanda sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmıştır. Buna ek olarak, polimer modifiyeli asfalt kaplamalarda tekerlek izi ve yorulma çatlağı direncinin arttığı kanıtlanmıştır (Kanitpong and Bahia, 2005; Król, Radziszewski and Kowalski, 2015; Behnood and Olek, 2017; Sarnowski *et al.*, 2019). Polimerlerin ilave edilmesi, bitümün reolojik ve viskoelastik özelliklerini geliştirmesine rağmen, farklı teknik ve ekonomik dezavantajlara sahip olabilmektedir. Örneğin, SBS ve EVA katkılarına sağladıkları avantajlar nedeniyle, asfalt endüstrisindeki birçok kuruluş tarafından çok fazla özen gösterilmiştir. Ancak, çeşitli dezavantajlar arasında nispeten yüksek maliyet, düşük ultraviyole direnci, oksidasyon, diğer bazı katkılara göre yüksek sıcaklıktaki karıştırma masrafları ve bazı bitümler ile uyumluluk sorunları bulunmaktadır (Sengoz, Topal and Isikyakar, 2009; Behnood and Gharehveran, 2018). Bu nedenle, asfalt mühendisleri ve malzeme bilim adamları tarafından SBS ve EVA gibi yaygın katkılara alternatifler bulmak için birçok araştırmalar yapılmıştır. Dolayısıyla, atık ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, çevre dostu ve uygun maliyetli katkılara doğru ilerlemeler faydalı olduğunu göstermiştir (Qurashi and Swamy, 2018; Chen *et al.*, 2019). Lastik tozu (GTR), atık lastiklerden elde edilen geri dönüşümlü katkılardan biri olarak bitümün farklı sıcaklıklardaki özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. GTR'nin ilave edilmesi, bitümün termal çatlama ve tekerlek izine karşı dirençlerini arttırmıştır (Shu and Huang, 2014). Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), asfalt endüstrisinde kullanılan başka bir geri dönüştürülmüş malzeme türüdür. HDPE, asfalt karışımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmesinde SBS'den daha iyi performans gösterdiği bildirilmiş, ancak fazlara

ayrılma sorunu olduğu ortaya çıkmıştır (Pérez-Lepe, Martínez-Boza and Gallegos, 2007; Ahmedzade *et al.*, 2017).

Kompozit katkı bitümlerin kullanımı, tek bileşenli katkılı bitümlerle bağlantılı teknik problemlerin üstesinden gelmesi veya azaltması için etkili bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Cao, Liu and Li, 2017). Cao ve arkadaşları (2017), atık lastik tozu, plastik ve SBS içeren bir kompozit katkı geliştirmişlerdir. Geliştirilen kompozit katkı, asfalt karışımların yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerinde iyileşme göstermiştir. Üstelik kompozit katkıların optimum miktarı, BSK'larda düşük sıcaklık özelliklerinin artış sağlamıştır. Başka bir çalışmada, SBS katkısına entegre edilmiş grafen nanopaletler vasıtasıyla modifiye asfalt hazırlanmıştır. Sonuç olarak, BSK'nın yüksek sıcaklık performansı artmış ve mekanik özellikleri iyileşmiştir. Buna rağmen, bileşenlerin zayıf uyumluluğu ana sorun olarak ortaya çıkmıştır (Han *et al.*, 2018). Bitüm ve polimerler arasındaki uyumluluğu arttırmak amacıyla atık lastik tozu ve SBS ile kombinasyon halinde bio-atık malzeme esaslı bio-asfalt başka araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Elde edilen kompozit katkılar, bitümün yüksek ve düşük sıcaklık performansını arttırdığı gözlemlenmiştir (Dong *et al.*, 2019; Duan *et al.*, 2019).

SBS, EVA, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polipropilen (PP) vb. polimerlerin katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla, olumlu sonuçların alınmasına rağmen bu malzemelerin yüksek maliyetli olması araştırmacıları atık geri dönüştürülmüş plastikler, GTR gibi daha ekonomik malzemelerin kullanılabilirliğini incelemeye yöneltmiştir. Diğer yandan, plastiklerin dünya çapında büyük bir atık sorunu meydana getirmesi ve dolayısıyla çevre kirliliğinin başlıca nedenlerinden olması plastiklerin geri dönüştürülmesiyle yeniden kullanılmasını gündeme getirmektedir. Bunun yanı sıra, geri dönüştürülmüş plastik ürünlere yeni kullanım alanlarının bulunması, geri dönüştürülmüş malzemelerinin kullanılabilirliğinin artırılması ve yeni polimer üretim ihtiyacının azaltılması hedeflenmektedir (Sridhar *et al.*, 2009; Magioli, Sirqueira and Soares, 2010; Satapathy, Nag and Nando, 2010).

Yukarıda bahsedilen durum ve ihtiyaçlar doğrultusunda, atık geri dönüştürülmüş plastikler ile atık lastik tozu, esnek üstyapı gibi oldukça geniş bir alanda kullanılabilirliğinin sağlanması, pahalı ithal ürünlere alternatif yeni bir bitüm katkı malzemesinin geliştirilmesi ve bu katkı malzemesinin bitüm ve BSK'lar içerisinde kullanılabilirliğinin laboratuvar ortamında ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, bu çalışmanın konu ve kapsamını oluşturmaktadır.

Son yıllarda termoplastik dinamik vulkanizat (TDV)'lar ekonomik olması amacıyla geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak elde edilmektedir. Geri dönüştürülmüş yüksek ve düşük yoğunluklu polietilen filmler, atık lastikler, bazı devulkanizatlar, bu maksatla dinamik yöntemlerle lastik malzemenin içine ilave edilmektedir. Termoplastik elastomerlerin ilavesiyle, atık lastik malzemelere elastiklik gibi mühendislik açısından önemli olan bazı özellikler kazandırılmaktadır. Çalışmada kullanılan yeni kompozit katkı, HDPE, GTR, etilen propilen dien monomeri (EPDM) ve bitüm malzemesini hammadde olarak kullanılarak vulkanizasyon işlemleri sonucunda bitümün fiziksel ve kimyasal yapısına uygun TDV malzemesi elde edilmiştir. Komozit TDV malzemesinin bileşenlerinden olan HDPE katkısı termoplastik yapısına sahip olmakta ve polimer fazına kauçuk (atık lastik tozu) esaslı matrisin dinamik yöntemlerle sentezlenerek elde edilmektedir (Grigoryeva *et al.*, 2005).

Bu çalışmada, TDV, SBS ve EVA katkılarının etkisi bitümün reolojik özellikleri üzerinde incelenmiş ve bu amaçla temel deneyler (penetrasyon ve yumuşama noktası) ve DSR cihazı ile yüksek sıcaklık ve orta sıcaklık performans sınıflandırma (PG), farklı frekans, çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR), lineer farklı genlik (LAS) ve Marshall deneyleri yapılmıştır. TDV katkılı bitümler üzerinde yapılan deney sonuçları ve özellikleri çalışmada referans olarak seçilen SBS ve EVA katkılı bitümler üzerinde yapılan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Bitüm

Bitüm, deniz organizmalarının kalıntılarından ve okyanus yatağında depolanan bitkisel maddelerden elde edilen ham petrolden meydana gelmiştir. Milyonlarca yıl boyunca, madde birikmiş ve üst tabakaların yoğun ağırlığı sayesinde alt tabakadaki madde izole kalmıştır. Zamanla yerkabuğundaki ısı ile birleşen madde, yeraltındaki büyük rezervuarları oluşturan geçirimsiz kayalar tarafından tutulan ham petrolü oluşturmaktadır. Ham petrol bazen yukarıdaki katmanlardaki faylar ile yükselerek zemin yüzeyine gelebilmektedir. Ham petrolün çoğu zaman yeraltından sondaj yapılarak da çıkarılmaktadır (Morgan P and Mulder A, 1995).

Bitüm, esasen hidrokarbonlardan ve bunların türevlerinden oluşan, trikloretilende çözünebilen ve esas olarak uçucu olmayan ve ısıtıldığında yavaş yavaş yumuşayan viskoz bir sıvı veya katı olarak tanımlanmaktadır. Ham petrol yağından rafine işlemleriyle elde edilen bitüm doğal bir tortu veya mineral madde ile birlikte doğal olarak oluşan, asfaltın bir bileşeni olarak bulunmaktadır (BS 3690, 1989).

2.1.1 Bitüm kompozisyonu ve yapısı

Bitüm, organik moleküllerin karmaşık bir karışımıdır. Bitümün hem kimyasal (bileşen) hem de fiziksel (yapısal) kısmı, temel olarak hidrokarbonlar ve az miktarda oksijen, azot ve kükürt gibi maddelerden oluşmaktadır. Bitüm, kökenine göre değişken bileşimi olan ham petrolden çıkarıldığı için, hidrokarbon gruplarının bitümdeki dikkatli ayrıntılarını belirlemek oldukça zor olmaktadır. Dolayısıyla, çeşitli ham kaynaklardan üretilen bitümün temel içeriği aşağıdaki gibi olmaktadır:

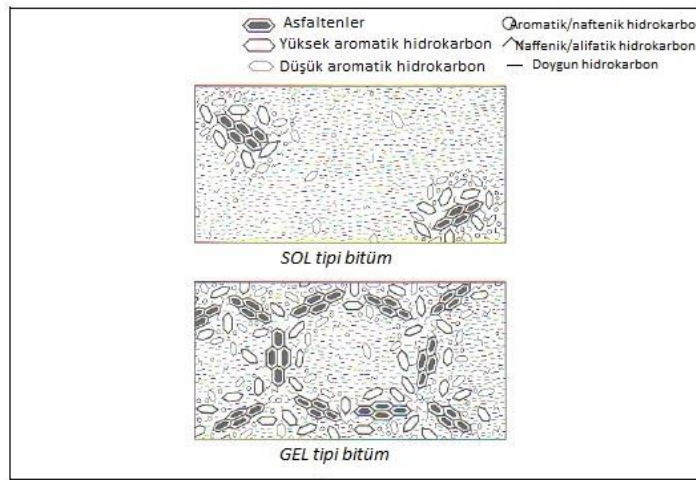
- Karbon: %82-88
- Hidrojen: %8-11

- Kükürt: %0-6
- Oksijen: %0-1.5
- Azot: %0-1

Bitümün kesin bileşimi ham kaynağa göre değişmektedir. Her ne kadar kimyasal bileşim çok karmaşık olsa da bitümün dört ana kimyasal bileşime ayrılması mümkündür (Airey, 1997):

- Asfaltenler
- Reçineler
- Aromatikler
- Doygunlar

Açıklanan dört grubun ayrıntılı tanımlanması zor olduğu için kaçınılmaz olarak gruplar arasında bir miktar örtüşme vardır. Bitüm yapısının şematik görünümü Şekil 2.1'de sunulmaktadır.



Şekil 2.1 Tipik bitüm yapısının şematik görünümü (Hunter, Andy Self and John Read, 2015)

Asfaltlenler siyah veya kahverengi amorf (şekilsiz) katılardır ve yüksek molekül ağırlıklı (1000 ila 100000 arası) polar kompleks maddelerden oluşmaktadır. Bir ortamda, 20000 ila 1000000 arasında bir molekül ağırlığına sahip kümeler oluşturmak için birleşme eğilimine sahip olmaktadır. Asfaltlenler genel olarak bitümün %5 ila %25'ini oluşturmaktadır. Molekül ağırlığı her bir molekülün büyüklüğü ile ilgilidir, bu nedenle molekül ağırlığı ne kadar yüksek olursa moleküller o kadar büyük bulunabilmektedir.

Asfaltlen içeriği bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Asfaltlen içeriğinin arttırılması, daha düşük penetrasyon, daha yüksek yumuşama noktası ve daha yüksek viskoziteye sahip daha sert bitüm üretmektedir. Ayrıca, asfaltlenlerin birleşimi sabit değildir; ısıtma sırasında kümelerin jel yapısı (Şekil 2.1) parçalanır ve soğutulurken yeniden düzenlenir. Uzun süreli ısıtma sırasında asfaltlen kümeleri parçalanabilir, dolayısıyla ısıtma işleminden sonra bitümün molekül ağırlığının azalması kaçınılmaz değildir. Kısacası, asfaltlenler bitüm bileşeninin sertliğini ve katılığını tanımlamaktadır.

Reçineler siyah veya kahverengi katı veya yarı katı yüksek polar moleküllerdir. Yüksek polarite, reçineleri çok yapışkan hale getirmektedir. Molekül ağırlığı 500 ila 50,000 arasındadır. Bitümün reçineleri, asfaltlenler için bir peptitleştirici madde olarak işlev görür, bu nedenle reçinelerdeki artış, çözelti (sol) yapısına yol açarken, bir düşüş ise bitümde jelatinimsi bir (jel) yapı oluşturur (Şekil 2.1). Reçineler bitümün içindeki her şeyi bir arada tutan stabilizatörler olarak rol almaktadır (Kerbs and Walker, 1971).

Aromatikler en düşük molekül ağırlığına sahiptir ve bitümün ana oranını oluşturur (%40-65). Bitümdeki asfaltlenler için bir dağılım ortamı görevi yapar ve koyu kahverengi viskoz bir sıvı oluşturmaktadır. Aromatikler 300 ila 20,000 arasında molekül ağırlığına sahiptir ve bitümün yapışkanlık özelliklerini sağlamaktadır.

Doygunlar yağa benzer ve bitümün akışkan (sıvı) özelliklerini sağlar. En düşük moleküler ağırlığa (aromatiklere benzer) sahiptir ve saman veya beyaz renklidir ve bitümün %5-20'si arasındadır.

2.2 Bitümün reolojisi

Bitümün reolojisi, bitümün akış ve deformasyon özellikleriyle ilgili temel ölçümler olarak tanımlanabilmektedir. BSK'daki bitümün akışını ve deformasyonunu (reolojik özellikleri) anlamak kaldırım performansı için çok önemlidir. Kolayca akışkan hale gelen BSK'ları, kalıcı deformasyona duyarlı olabilmekte ve çok sert olanlar ise yorulmaya ve çatlamaya maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, bitümün reolojik özelliklerini incelemek için son 50 yılda bitüm ve BSK'nın uzmanları tarafından önemli araştırmalar yapılmıştır (Goodrich, 1988).

Uzun zamandan beri bitümün reolojik özellikleri, yumuşama noktası, viskozite, duktilite, depolama stabilitesi, parlama noktası ve dönel ince film etüv (RTFO) yaşlanma sonrası (yumuşama noktası, viskozite, duktilite) deneyleri gibi sadece fiziksel deneyleri kullanılarak ölçülmüştür. Ancak, bu ölçümler bitüm özelliklerini BSK performansı ile ilişkilendirmek ve gereken reolojiyi ve özelliklerini doğru şekilde tanımlamak için yetersiz kalmıştır. Deneylerin güvenilirliği de çoğu zaman sorgulanmıştır. Dolayısıyla bu deneyler, bitümün zamana bağlı deformasyonunu ve polimer modifiye bitümlerin reolojik özelliklerini ölçmek için uygun olmamaktadır.

Günümüzde, bitümün reolojik özellikleri genellikle dinamik kayma reometresi (DSR) olarak bilinen salınım tipi deney cihazı kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntem ilk olarak 1993 yılında Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) sırasında tanıtılmıştır. DSR kapsamı yüksek bir cihaz olarak, bitümün geniş bir sıcaklık ve frekans aralığında elastik, viskoelastik ve viskoz özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır.

2.2.1 Reoloji, deformasyon ve akış

Reoloji, malzemelerin gerilmelere verdiği içgüdüsel davranışı, hem katı ve hem sıvı özellikler sergileyen malzemelerin davranışının incelenmesi olarak tanımlanabilir (Durrieu, Farcas and Mouillet, 2007).

Malzeme yük altında deforme olduktan sonra yükleme bittiğinde telafi edilemez bir deformasyon meydana geldiğinde viskoz, ve geri kazanıldığında ise elastik davranış sergiler. Başka bir ifadeyle, ideal katı malzemeler elastik davranış gösterir ve yük kaldırıldığında deformasyon geri kazanılır, oysa sıvılar viskoz davranış gösterir ve yük kaldırıldığında deformasyon geri kazanılmaz ve malzemede kalıcı deformasyonu oluşur. Bu iki ideal durum arasında, malzemeler kısmen viskoz ve kısmen elastik olan visko-elastik davranış sergileyebilmektedir (Morgan P and Mulder A, 1995).

2.2.2 Elastisite, plastisite ve katı malzemelerin davranışı

Deformasyona neden olan yükler kaldırıldığında, deforme olmuş malzemenin orijinal şekline ve boyutuna dönmesine “elastisite” ve bu davranışı sergileyen malzemeler “elastik” olarak adlandırılmaktadır. Katı malzemelerin çoğu elastik davranış gösterir ve nispeten küçük gerilmelere verilen davranışa doğru orantılı bir deformasyonla sonuçlanır. Aşağıdaki kanun 1660 yılında Robert Hooke tarafından gözlemlenmiş ve Hooke kanunu olarak adlandırılmıştır (Hunter, Andy Self and John Read, 2015).

$$F = kx$$

F : uygulanan kuvvet, x: deplasman veya uzunluktaki değişiklik, “k” sabiti.

K’nin değeri sadece elastik malzemenin türüne değil, aynı zamanda boyutlarına ve şekline de bağlı olmaktadır. Bitüm düşük sıcaklıklarda elastik davranış sergilemektedir.

Malzeme deforme olurken artık Hooke kanunundaki orantılılık sınırının doğru olmadığı nokta olarak tanımlanır ve elastik sınır yük altındaki malzemede kalıcı deformasyon olduğu noktadır. Böylece, kuvvet kaldırıldığında malzeme orijinal uzunluğuna geri dönmez ve plastik davranışın başlangıcını oluşturur. Kırılgan malzemelerin çoğu elastik sınırın ötesinde gerilmeler uygulandığında plastik deformasyon olmadan kırılma ile sonuçlanabilmektedir.

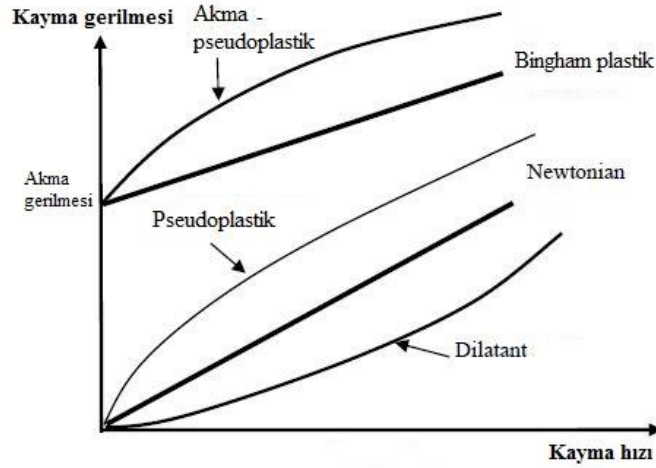
2.2.3 Newtonian ve Newtonian olmayan davranış

Viskozite (η), sıvının akışına direncinin ölçüsüdür ve uygulanan kayma gerilmesi (τ) ile kayma deformasyon (γ) hızı arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Bitüm dahil tüm sıvıların viskozitesi artan sıcaklıkla düşüş göstermektedir.

Newtonian davranış, ortaya çıkan gerilmelerin yerel deformasyon hızı ile doğrusal orantılı olduğu ve viskozitenin deformasyon hızından bağımsız olduğu durumlarda belirtilmektedir.

η sabittirse, akışkan sıvı Newtonian viskozitesi olarak bilinmekte ve sadece sıcaklık değiştikçe değişmektedir.

Newtonian olmayan davranış çeşitli davranışları kapsamaktadır. “pseudo-plastik” olarak adlandırılan kayma incelmesinde kayma hızı arttıkça viskozite değeri düşmekte ve “dilatant” olarak adlandırılan kayma kalınlaşmasında viskozite kayma oranının bir fonksiyonu olarak artmaktadır. PMB’ler çoğunlukla kayma incelme özelliğine sahip “pseudo-plastik” davranış sergilemektedir. Bir diğer etken, “Bingham plastik” adlandırılan akma gerilmesidir. Sıvın akma gerilmesi, yalnızca uygulanan gerilme eşik gerilmeden yüksek olduğunda akmakta olur ve bu da asfalt kaplamanın ana özelliklerden biri sayılmaktadır. Şekil 2.2, Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanlar davranışının kayma hızına bağlı kayma gerilmesini göstermektedir (Gan, 2012).



Şekil 2.2 Zamandan bağımsız Newton olmayan akışkan türleri (Gan, 2012)

2.2.4 Viskoelastisite

Viskoelastisite terimi, malzemenin sıcaklığa ve yükleme zamanına bağlı olarak hem elastik (katı) ve hem viskoz (sıvı) olarak davranmasına neden olabilecek mekanik özelliklerini ifade etmektedir. Viskoelastisite plastisiteden farklı davranış göstermektedir. Yükleme kaldırıldığında viskoelastik malzemeler zamana bağlı geri dönüşüm sergilemekte ve genellikle gecikmiş elastik olarak adlandırılmaktadır. Ancak, plastik malzeme yük kaldırıldıktan sonra orijinal haline dönmemektedir. Yük altında, malzemede belirli deformasyon oranı oluştuğunda hem viskoelastik ve hem plastik davranış göstermektedir. Böylelikle, birikmiş geri dönmeyen deformasyonun esnek kaplamalardaki kalıcı deformasyon gelişmesinde ortaya çıkmakta ve bitümün en önemli özelliğinden biri olmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılması ve kalıcı deformasyonun azaltılması için polimer modifiye bitümler kullanılmaktadır.

Bitüm düşük sıcaklıklarda elastik davranış sergilediği ve yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış gösterdiğinden dolayı viskoelastik malzeme olarak kabul edilmiştir (Hunter, Andy Self and John Read, 2015).

2.3 Bitüm modifikasyonunda kullanılan yaygın polimerler

Bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan polimer katkıları incelenmeden önce, belirli bir polimer katkısı için bile olsa, her bitümün kendine özgü kimyasal bileşimi ve yapısı olduğundan dolayı orijinal bitüm seçiminin ortaya çıkan PMB üzerinde çok önemli etkileri vardır. Buna ek olarak, orijinal bitüm genellikle PMB'ün %90'ından fazlasını oluşturur ve nihai özellikleri üzerinde önemli etkilere neden olabilmektedir.

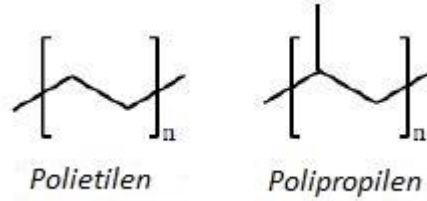
Bitümün polimer malzemeler ile modifikasyonunun uzun geçmişi vardır. Rafine bitüm üretilmeden önce bile, insanlar doğal bitümleri modifiye etmeye başlamışlar ve doğal kauçuk modifikasyonu için çeşitli patentler sunulmuştur (Lewandowski, 1994; Isacson and Lu, 1995; Morgan P and Mulder A, 1995). II. Dünya Savaşı sona erdikten sonra, sentetik polimerler bitümü modifiye etmek için kullanılmaya başlanmıştır. Yıllar geçtikçe, araştırmacılar modifiye amaçlı çeşitli polimer malzemeler geliştirmişlerdir. Günümüzde, bitüm modifikasyonu için yaygın olarak kullanılan polimerler iki kategoride sınıflandırılabilir; plastomerler ve termoplastik elastomerler. Farklı yaygın polimerler avantajları ve dezavantajları ile Çizelge 2.1'de listelenmiştir (Zhu, Birgisson and Kringos, 2014).

Çizelge 2.1 Bitüm modifikasyonu için yaygın polimerler (Zhu, Birgisson and Kringos, 2014)

Kategoriler	Polimer türleri	Avantajlar	Dezavantajlar
Plastomerler	Polietilen (PE) Polipropilen (PP)	-İyi yüksek sıcaklık özellikleri -Nispeten düşük maliyetli	-Elastisitede sınırlı artış - Faz ayırma problemleri
	Etilen-vinil asetat (EVA) Etilen-butil akrilat (EBA)	-Nispeten iyi depolama stabilitesi -Kalıcı deformasyona karşı direnci yüksek	- Elastik geri kazanımda sınırlı artış - Düşük sıcaklık özelliklerinde sınırlı gelişme
Termoplastik Elastomerler	Stiren-butadien-stiren (SBS) Stiren-isoprene-stiren (SIS)	-Sertlikte artış -Düşük sıcaklık duyarlılığı -Yüksek elastik davranış	- Bazı bitümlerde uyumluluk problemleri - Isıya, oksidasyona ve ultraviyole ışınlarına karşı düşük direnç - Nispeten yüksek maliyet
	Stiren-etilen/butilen-stiren (SEB)	-Isıya, oksidasyona ve ultraviyole ışınlarına karşı yüksek direnç	-Nispeten düşük elastisite - Yüksek maliyet

2.3.1 Plastomerler

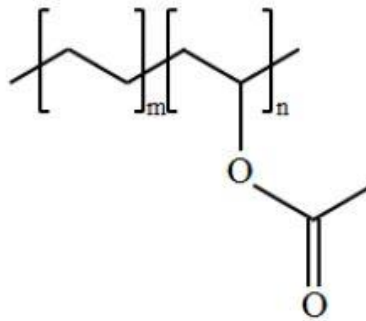
Plastomer kategorisinde önemli derecede yer alan poliolefin, bitüm için kullanılan en eski modifiye katkılarından biri olarak tanımlanmaktadır. Poliolefin bazındaki polimerler bitüme eklendikten sonra genellikle bitümün bazı bileşenleri tarafından absorbe edilir. Polimer oranı düşükse, kesintisiz bitüm ağırlıklı matriste poliolefin ağırlık dağılımlı fazı ile bifazik bir yapı oluşur. Bunun yanı sıra, poliolefin konsantrasyonu arttıkça bazı durumlarda faz inversiyonu oluşabilir. Poliolefin ile modifiye edilmiş bitüm için birbirine kenetlenmiş iki kesintisiz faz tercih edilir ve bu da bitümün özelliklerini bir dereceye kadar artırabilir. Kullanılan malzemeler, özellikle PE ve PP, genellikle modifiye bitümün sertliğini ve tekerlek izi direncini arttırmıştır (Polacco *et al.*, 2005). Ancak, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi kimyasal yapıları farklı olabilmektedir.



Şekil 2.3 Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) yapıları (Polacco *et al.*, 2005)

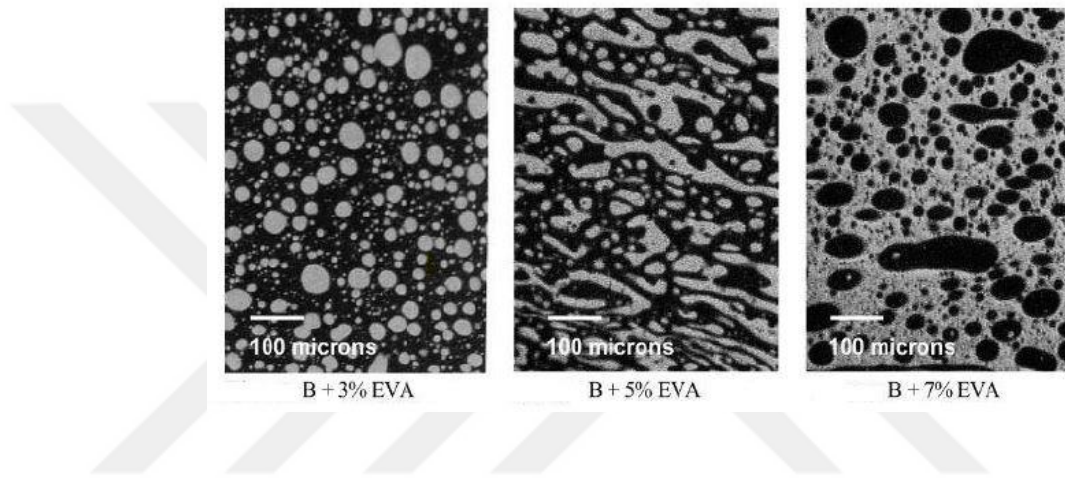
Bununla birlikte, kullanılan poliolefin bazlı malzemeler bitümün elastisitesini önemli ölçüde iyileştirememiştir (Isacsson and Lu, 1995). Ayrıca, düzenli uzun zincirleri, onlara sıkı şekilde toplanma ve kristalleşme eğilimi göstermiştir ve bu sayede bitüm ve poliolefin arasında etkileşim eksikliğine ve modifiye bitümün dengesizliğine neden olabilir. Bunun yanı sıra, bazı araştırmacılar poliolefinin bitüm ile uyumluluğunun polar olmadığı için çok zayıf olduğunu iddia etmişlerdir (Polacco, Stastna, *et al.*, 2006). Sonuç olarak, poliolefin modifiyeli bitümün

elastisitesi ve potansiyel depolama stabilitesi problemlerindeki sınırlı gelişme, poliolefinin bitümde modifiye malzemesi olarak uygulanmasını kısıtlamıştır. Benzer kimyasal yapıları nedeniyle, EVA burada etilen kopolimerlerin bir örneği olarak kıyaslanmaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, EVA kopolimerleri etilen-vinil asetat rastgele zincirlerden oluşmaktadır. PE ile karşılaştırıldığında, EVA'da kısa dallar olarak polar asetat gruplarının varlığı, etilen yoğunluklu parçaların sıkı kümelenmiş kristalli mikro yapısını bozar, kristalleşme derecesini azaltır ve polimerin polaritesini artırır. Modifiye bitümün bu özelliği depolama stabilitesini arttırması açısından faydalı olmuştur (Polacco, Stastna, *et al.*, 2006). Buna ek olarak, EVA kopolimerlerinin özellikleri, vinil asetat içeriğine bağlıdır. Vinil asetat içeriği düşük olduğunda, kristalleşme derecesi yüksektir ve EVA'nın özellikleri, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) özelliklerine oldukça benzemektedir. Vinil asetat içeriği arttıkça, EVA sert PE benzeri kristal fazı ve kauçuk vinil asetat yoğunluklu amorf fazı ile çift fazlı mikro yapı eğilimini göstermektedir (Morgan P and Mulder A, 1995). Vinil asetat içeriği ne kadar yüksek olursa, amorf faz oranı da o kadar yüksek olmaktadır. Ancak EVA'nın bitüm modifikasyonunda kullanıldığında kristalleşme derecesi dikkatle kontrol edilmeli, çünkü çok düşük ise bozulması kolay veya çok yüksek ise bitüm ile etkileşim eksikliğine neden olabilmektedir.



Şekil 2.4 Etilen-vinil asetatın (EVA) yapısı (Polacco, *et al.*, 2006)

EVA kopolimerleri bitüme ilave edildikten sonra, bitümün hafif bileşenleri genellikle kopolimerleri şişirmesine neden olmaktadır. EVA içeriği düşük olduğunda, kesintisiz bitüm yoğunluklu faz içinde dağınık EVA yoğunluklu faz görülebilmekte ve EVA içeriği arttığında ise, modifiye bitümde faz ayrımı meydana gelmekte ve EVA yoğunluklu kesintisiz faz oluşmaktadır. EVA modifiyeli bitümün faz ayırım işlemi, Şekil 2.5'teki flüoresan görünümü sunulmaktadır (Zhu, Birgisson and Kringos, 2014).



Şekil 2.5 EVA modifiyeli bitümün flüoresan görünümü (Zhu, Birgisson and Kringos, 2014)

İki birbirine bağlı kesintisiz fazlı yapı, EVA modifiyeli bitüm için de tercih edilmektedir. Böyle bir yapı ile bitümün özellikleri büyük ölçüde artırılabilir. EVA'nın modifiye bitüm içinde sağlam ve sert bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir ve bu da kalıcı deformasyona karşı direnç gösterebileceği anlamına gelmektedir (Sengoz, Topal and Isikyakar, 2009). Bitümün bazı özellikleri EVA modifikasyonu ile geliştirilmiş olsa da, uygulamasını sınırlayan bazı sorunlar hala mevcuttur. Büyük sorunlardan biri, EVA'nın plastomer doğası nedeniyle bitümün elastik toparlanmasını önemli derecede artırmayı mümkün kılmamasıdır (Isacsson and Lu, 1995; Becker, Mendez and Rodríguez, 2001).

Ayrıca, vinil asetat içeriğine büyük ölçüde bağlı olan EVA kopolimerlerinin camsı geçiş sıcaklığının (T_g), bitümün düşük sıcaklık özelliklerini önemli derecede artırmak için yeterince düşük olmamasıdır (Stastna, Zanzotto and Vacin, 2003).

EVA kopolimerlerinin ağırlık olarak %28,4 vinil asetat içeren T_g değerinin -19.9 °C olması, bazı orijinal bitümlerin T_g 'sine oldukça yakın olduğu bildirilmiştir (Champion *et al.*, 2001). Sonuç olarak, EVA'nın bitümde düşük sıcaklık özelliklerini artırma kabiliyeti, özellikle yüksek EVA konsantrasyonlarında oldukça sınırlıdır. Dolayısıyla, EVA %2 veya %4 oranında bitüme eklendiğinde bağlayıcının düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci artırırken, %6 ilave edildiğinde ise azaltmaktadır (Ameri, Mansourian and Sheikhmotevali, 2012).

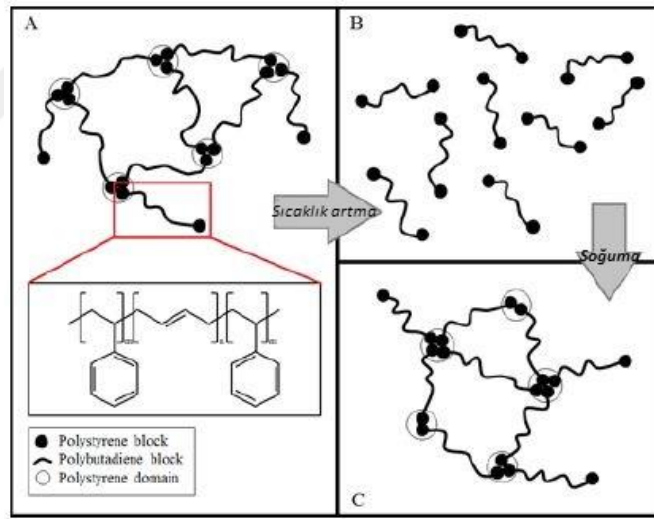
Ek olarak, EVA kopolimerlerinde etilen yoğunluklu parçacıkların erime sıcaklığı, modifiye bitümün normal hazırlama sıcaklığından çok daha düşüktür. Katı kristalin bazı hazırlama sırasında uygulanan kayma kuvvetleri tarafından kısmen kırılabilir (Polacco, Stastna, *et al.*, 2006). Dolayısıyla, EVA kopolimerleri modifiyeli bitümün ideal hazırlanması için sıcaklık sınırları dikkate alınmalıdır (Airey, 2002). Buna rağmen, etilen yoğunluklu parçacıklar, EVA modifiyeli bitümün BSK'da sıkıştırma işleminden önce agrega ile karıştırıldığında eriyebilir ve kısmen kırılabilir. Çünkü normal karıştırma sıcaklığı, etilen yoğunluklu parçacıkların erime sıcaklığından daha yüksek olmaktadır.

2.3.2 Termoplastik elastomerler

Termoplastik elastomerler, bitüm modifikasyonu için genellikle plastomerlerden daha etkili olmaktadır. Bitümün modifiye katkısı olarak yaygın olarak kullanılan termoplastik elastomerler stiren-butadien-stiren (SBS) ve stiren-izopren-stiren (SIS) kopolimerleridir.

Bu bölümde, benzer kimyasal yapıları nedeniyle, SBS termoplastik elastomerlerin bir örneği olarak ele alınmıştır. Şekil 2.6A'da gösterildiği gibi, SBS kopolimerleri, sürekli esnek polibütadien (PB) matrisinin dağınık sert polistiren (PS) bifazik morfolojisine sahip stiren-bütadien-stiren triblok zincirlerinden oluşmaktadır. PS ve PB blokları arasındaki kimyasal bağlantılar matristeki etki alanlarını hareketsiz hale getirebilir. PS bloklarının T_g 'si 95 °C ve PB bloklarının T_g 'si 80 °C civarındadır (Zanzotto, Stastna and Vacin, 2000). Esnek üst yapı karışımının normal hizmet sıcaklığı altında, PS blokları camsıdır ve SBS'nin

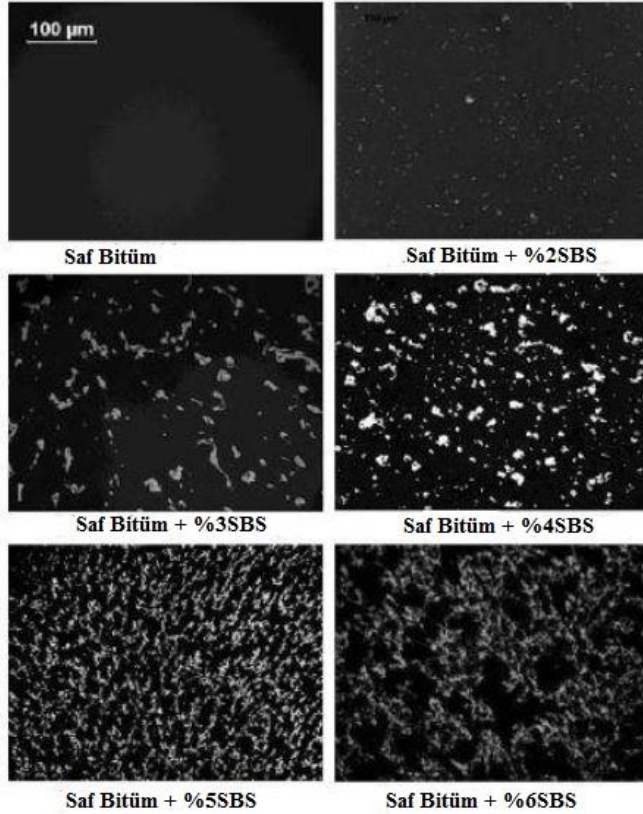
dayanıklılığına katkıda bulunurken, PB bloklarının kauçuk özelliği var ve elastisite kazandırmaktadır (Lucena, Soares and Soares, 2004). Bunun yanı sıra PS ve PB blokları arasındaki uyumsuzluk, PS bloklarını ortam sıcaklıklarında moleküler kuvvetler tarafından eşit dağıtılmış etki alanları fiziksel olarak birbirine bağlamayı mümkün kılmaktadır. PS bloklarının bu kümelenmesi, molekülerin termodinamik hareketlerinin kinetik enerjisi moleküller arası kuvvetlerin enerjisinden daha büyük olduğunda yüksek sıcaklıklarda ortadan kaldırılır (Zhang *et al.*, 2008). Bununla birlikte, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, PS blokları arasındaki fiziksel çapraz bağlanma soğuduktan sonra yeniden düzenlenebilir. SBS'nin dayanıklılığı ve elastisitesi geri kazanılabilir ve bu sayede SBS'nin en yaygın modifiye katkısı olması için çok önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.6 SBS kopolimerinin yapısı ve SBS'deki ters çevrilebilir çapraz bağlantıları (Zhang *et al.*, 2008)

SBS kopolimerleri bitüme eklendikten sonra, bitüm ve SBS arasında bazı etkileşimler meydana gelmektedir. Bitüm ve PB blokları arasındaki moleküller arası etkileşimler, PS blokları ile olanlardan daha güçlüdür. Böylelikle, PB blokları bitümdeki pozitif yüklü gruplarla π -elektronları aracılığıyla etkileşime girerken, PS blokları ise bitümdeki elektron yoğunluklu gruplarla aromatik protonları arasında

etkileşime girmektedir. SBS kopolimerleri bitüm ile karıştırıldığında, PS blokları bitümün hafif bileşenlerinin bazı doymuş dallarını emebilir (Chen, Liao and Shiah, 2002; Airey, 2003) ve bu PS bloklarının şişmesine ve bitümün sertleşmesine neden olabilmektedir. Polimer miktarı az olduğunda, SBS katkısı bitümde ayırık faz olarak dağılır. Ancak, SBS miktarı arttıkça modifiye bitümde faz ayrımı başlayabilmektedir. SBS modifiyeli bitümdeki faz ayrımı işlemi, Şekil 2.7'deki floresan görüntülerle sunulmaktadır. Hem bitüm yoğunluklu faz hem SBS yoğunluklu faz ikisi birbirine bağlı kesintisiz faz oluşturmak için idealdir. SBS yoğunluklu fazın iki alt fazı vardır; şişmiş PB matrisi ve esasen saf PS bazları. SBS yoğunluklu faz oluştuğunda, modifiye bitümde kauçuklu bir destek ağı oluşturmakta ve bu sayede SBS modifiyeli bitümün kompleks modülünü ve viskozitesini arttırmakta, elastik toparlanma kabiliyeti ve düşük sıcaklıkta termal çatlamasına karşı direnci arttırmaktadır.



Şekil 2.7 SBS modifiyeli bitümün flüoresan görüntüleri (Zhu, Birgisson and Kringos, 2014)

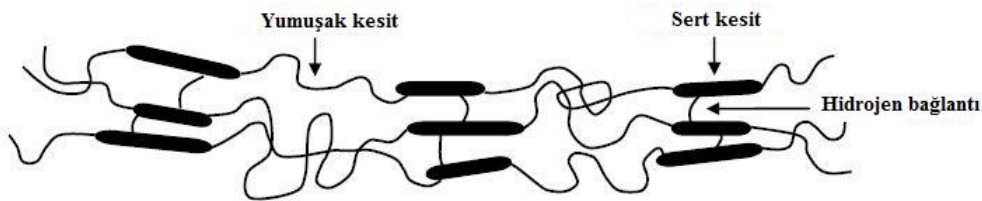
Bahsi geçen mükemmel özellikler, bitümde nispeten iyi dağıtılabirlik (veya uygun çözünürlük) ve kabul edilebilir maliyet, SBS'yi asfalt bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan malzeme haline getirmiştir. Ancak, SBS kopolimerleri ideal bit katkı malzemesi olmamaktadır. Örneğin, bitüm ve SBS arasındaki çok fazla uyumluluk yoktur (Wen *et al.*, 2002; Galooyak *et al.*, 2010; Wang, Yi and Yuzhen, 2010). SBS-bitüm karışımlarında termoplastik elastomerler ve asfaltenler bitümün hafif bileşenlerini emmek için yarışmaktadır. Dolayısıyla, eğer hafif bileşenler yetersizse, modifiye bitümde faz ayrılması meydana gelebilmektedir (Airey, 2003). Bunun yanı sıra yüksek aromatik içerikli bitüm, uyumlu ve dayanıklı SBS modifiyeli bitümün üretilmesinde yardımcı olabilmektedir (Kraus, 1982). Aromatik yağların eklenmesi, düşük aromatik içerikli bitüm ile SBS arasındaki uyumluluğu artırabilir (Masson *et al.*, 2003). Modifiye bitümdeki çok yüksek aromatik içeriği PS bloklarının şişmesine ve anti-plastikleşmesine neden olabilir ve bu modifiye bitümün nihai özellikleri için iyi etki bırakmamaktadır (Wloczynski, Vidal and Papirer, 1997). SBS modifiyeli bitümün başka sorunu, PB bloklarında çift bağ ve α -H olması nedeniyle ısıya, oksidasyona ve ultraviyole (UV) direncinin az olmasıdır (Collins and Bouldin, 1992; Li *et al.*, 2010). Aslında, SBS kopolimerlerinin dayanıksızlığı esas olarak α -H'nin yüksek aktivitesinden ve çift bağlardaki π -bağının düşük bağ enerjisinden kaynaklanmaktadır. İstenmeyen kimyasal reaksiyonlar (örneğin, peroksi radikalleri ve hidroperoksitlerin oluşumu) onları ısıya, oksidasyona ve UV'ye duyarlı hale getirir. Bu dezavantajı aşmak için, araştırmacılar tarafından termoplastik elastomerler doymuluk haline getirilmiştir.

SBS'nin hidrojenlenmesiyle elde edilebilen stiren-etilen/butilen-stiren (SEBS) kopolimerleri, triblok stiren-etilen/butilen-stiren zincirlerinden oluşur. Kimyasal doymuluk onları ısıya, oksidasyona ve UV'ye karşı çok dirençli kılar. Bununla birlikte, ikili bağlar ortadan kalktıkça, bazı araştırmacılar kopolimerlerin polaritesinin önemli ölçüde azaldığını iddia etmişlerdir (Polacco, Stastna, *et al.*, 2006). Bu arada, SEBS'deki etilen/butilen bloklarında kristalleşme eğilimi vardır (Vargas *et al.*, 2005). Böylece SEBS ve bitüm arasındaki uyumluluğun daha da kötüleşmesi kanıtlanmıştır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaya göre,

dayanıklı SEBS modifiyeli bitüm sadece düşük polimer içeriğinde (ağırlıkça yaklaşık %4'ün altında) hazırlanabilir ve yüksek oranda dolgu maddesi gibi davrandığında bitümün viskoelastik özelliklerini önemli ölçüde arttıramaz ve faz ayırımına eğilim gösterebilmektedir. Ek olarak, hidrojenasyon işleminden kaynaklanan ilave maliyetler ve daha zayıf elastik özellikler SEBS modifiyeli bitümde gözlenmiştir; bu, bitümde modifiye katkısı olarak uygulanmasını daha da sınırlandırmaktadır (Polacco, Muscente, *et al.*, 2006).

2.4 Termoplastik dinamik vulkanizat (TDV)

Termoplastik elastomer (TPE), yüksek sıcaklıklarda eritilebilmesine rağmen, esnek üst yapı hizmet sıcaklıklarında elastomerik davranış sergilemektedir. Dolayısıyla, TPE ısıtersinir ağ yapısına sahiptir, yani sıcaklığa bağlı fiziksel değişim sergilemekte ve her durumda faz ayrılmasıyla oluşmaktadır. Kesitli (yoğunluklu) blok kopolimerlerde, fiziksel ağın “düğümeleri” ya camsı ya da kristalin alanlar tarafından “yumuşak” kauçuksu fazı içinde dağılmış “sert faz” olarak tanımlanmaktadır. Alternatif sert kesit ve yumuşak kesit yapılarından oluşan TPE'nin şematik görünümü Şekil 2.8'de sunulmuştur (Shanks and Kong, 2012).



Şekil 2.8 Alternatif sert kesit ve yumuşak kesit yapılarından oluşan TPE'nin şematiği (Shanks and Kong, 2012)

Poliolefinlerin kauçuklarla (GTR, EPDM, vb.) sentezlenmesi termoplastik elastomerleri üretmek için uzun geçmişe sahip olmakta (De and Bhowmick, 1990) ve paralel olarak dinamik vulkanizasyonun icadıyla ilgili Ar-Ge faaliyetleri hızlandırılmıştır (Karger-Kocsis, 1999).

TDV, TPE ailesinin yeni üyesi olarak tanımlanmaktadır. TDV'ler, termoplastik ve çapraz bağlanabilir lastiklerden oluşan karışımların dinamik olarak sertleşmesi ile üretilmektedir. “Dinamik sertleşme” terimi, kauçuk ve erimiş termoplastik içinde ince şekilde dağılarak yoğun karıştırma/yoğurma yoluyla seçici sertleşme anlamına gelmektedir (Mülhaupt, 1999). TDV teknolojisini içeren eriyik karışımındaki başarı, araştırmacıları GTR içerikli TPE'lerin geliştirmesine yönelik teşvik etmiştir.

GTR ve PP veya PP/LDPE karışımlarından oluşan TPE'lerle ilgili ilk çalışmalardan biri 1989'da yapılmıştır. Bu çalışmaya göre, PP esaslı karışımların mekanik özelliklerini arttırmak için geri dönüştürülmüş lastik ve taze kauçuğun birlikte kullanılması önerilmiştir (Al-Malaika and Amir, 1989). Ayrıca, dicumil peroksit ile dinamik vulkanizasyonu daha fazla özelliğin iyileştirmesi ile sonuçlanmıştır.

Menning grubu PP ve atık lastikten “elastomerik alaşımlar” üretmek için bir yöntem geliştirmiştir (Scholz *et al.*, 2002). Bu araştırma grubunun varsayımına göre, atık lastik ve PP matrisi arasında kovulkanizasyon ile güçlü ara faz sınır tabakası oluşturulmuştur. Dinamik vulkanizasyon koşulları altında elde edilen sonuçlar hala aynı sertlik aralığındaki ticari TDV'den çok uzak ancak basit eriyik olan karışımlardan çok daha iyi sayılmaktadır.

Başka bir çalışmada, PP/atık EPDM tozu için “peroksit uyumlaştırması” kullanarak benzer bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada, EPDM'nin parçacık yüzeyine PP'ni aşılama için peroksit (butil hidroperoksit) seçilmiştir. Bu yöntem, EPDM'deki mevcut çift bağların reaktivitesini vulkanizasyondan sonra bile kullanmaya devam etmiştir. Bahsi geçen yöntem daha sonra başka araştırmacılar tarafından da takip edilmiştir (Naskar, Bhowmick and De, 2001; Naskar, De and Bhowmick, 2002). Bu işlemlerin hepsi dinamik vulkanizasyonun özel seçenekleri olarak tanımlanmıştır.

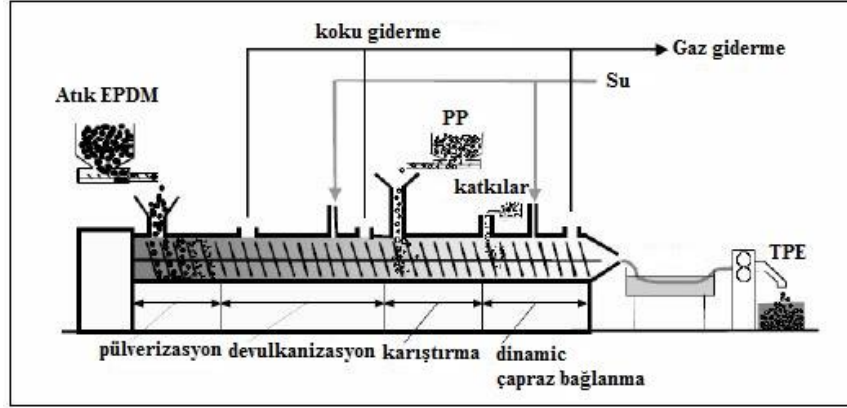
GTR esaslı termoplastik elastomer üzerinde yapılan diğer bir çalışmada, polimer/lastik oranını 60/40'ta tutarak, HDPE/taze EPDM karışımına atık lastik

tozu (GTR) ilave edilmiş ve dinamik sertleşmenin gerçekleşmesi için dikumil peroksit eklenmiştir. GTR içermeyen karışımlarla karşılaştırıldığında, mekanik özelliklerde (dayanım, kırılma/kopma gibi) güçlü artış bulunurken, diğer özellikler (yırılma dayanımı, gerilme, sertlik gibi) pratik olarak değişmemiştir (Naskar, Bhowmick and De, 2001).

GTR ve LDPE atıklarından elde edilen termoplastik elastomerler üzerinde peroksit ve sülfür ile dinamik sertleştirme yapıldıktan ve uyumlaştırıcı maddeler (SEBS, etilen-kolilasetat, EVA) kullandıktan sonra en iyi işleme performansı 50/50 lastik/polimer oranlarında sergilemiştir. Ayrıca, sülfür hızlandırıcı sisteminin dinamik sertleştirme koşullarında peroksit sisteminden daha iyi çalıştığı kanıtlanmıştır (Nevatia *et al.*, 2002).

Karger-Kocsis grubu (Kumar, Fuhrmann and Karger-Kocsis, 2002; Radheshkumar and Karger-Kocsis, 2002), TPE üretimi için kaba GTR (0.4-0.7 mm) kullanmıştır. TPE'nin bileşen oranları LDPE/taze kauçuk/GTR = 50/25/25 olarak sabit tutulmuştur. Bu çalışma, taze kauçuk türünün etkileri, çeşitli sertleşme sistemleriyle dinamik sertleşmenin etkileri üzerinde odaklanmıştır. Sonuç olarak, taze kauçuklar arasında EPDM en iyi uyumlaştırıcı katkısı seçilmiştir. Ayrıca, çift vidalı ekstruderlerin atık EPDM/PP karışımının morfoloji gelişimi ve mekanik özellikleri üzerinde yapılan bir çalışmada, vida konfigürasyonu ve işleme parametrelerinin, atık EPDM tozu (5-20 -20m) ve PP'den oluşan karışımların mekanik performansı üzerinde güçlü etkisi gösterilmiştir.

Polimer malzeme üzerinde çalışan bilim adamları tarafından devamlı TPE üretimi sistemi geliştirilmiştir (Fukumori and Matsushita, 2003). Çift vidalı ekstruderde atık EPDM içeren TPE üretmek için yapılan işlemin görünümü Şekil 2.9'da sunulmaktadır. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, bu teknolojiye EPDM atığının devulkanizasyonu, devulkanize edilmiş EPDM'nin PP ile karıştırılması ve kauçuk bileşeninin dinamik vulkanizasyonu yer almaktadır (Fukumori and Matsushita, 2003).



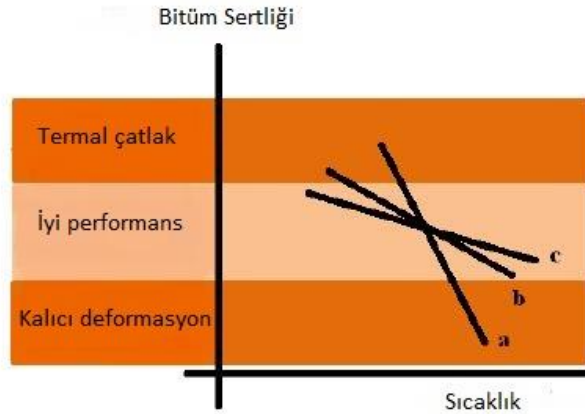
Şekil 2.9 Atık EPDM içeren TPE üretiminde yapılan işlemin görüntüsü (Fukumori and Matsushita, 2003)

Devulkanizasyon aşaması, sülfür ile kürlenmiş EPDM'nin -S-S- bağlantılarının seçici olarak kırılabilmesi gerçeğine dayanmıştır. Ekstruderin karıştırma kısmında devulkanize edilmiş kauçuk (atık EPDM) PP ile karıştırılmıştır. Ardından, vinamik vulkanizasyon, iyileştirici katkıları ilave edilerek sağlanır ve işlem sırasında, su enjeksiyonuyla “koku giderici arıtma” sistemi uygulanmıştır. Elde edilen TPE'nin mekanik özellikleri, aynı sertliğe sahip ticari ürünlerin özellikleri ile karşılaştırılmıştır (Fukumori and Matsushita, 2003).

3. DENEYLER

Uzun yıllar boyunca esnek üstyapı kaplamada kullanılan bitümün performansı penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası ve viskozite gibi fiziksel yöntemleri kullanarak belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Fiziksel deneyler, yalnızca bitümün performansı ile ilgili pratik deneyim ve gözlemlere dayanılmaktadır. Bu nedenle, deney sonuçları sadece belirli şartlar için geçerli olmaktadır. Koşullar değiştiğinde, sonuçlar artık aynı olmamaktadır.

Bu fiziksel deneylerle ilgili büyük sorunlardan biri deneylerin gerçekleştirildiği sıcaklıktır. Deneylerin tümü, bir bitümün dayanabileceği sıcaklık aralığını içermeyen bir veya iki sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.1, fiziksel deneyleri kullanarak sınıflandırıldığında hepsi aynı kaliteye uyan üç farklı bitümü göstermektedir (Behnood, 2016). Dolayısıyla, bitüm viskoelastik davranışı nedeniyle fiziksel deneyler aralıkları dışındaki sıcaklıklarda farklı davranışlar sergileyebilmektedir.



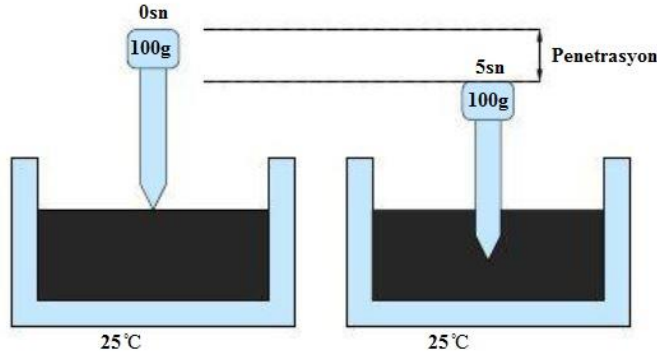
Şekil 3.1 Fiziksel deneylere göre sınıflandırılmış bitümün hizmetteki davranışı (Behnood, 2016)

Bitümlerin yaşlanma koşullarını göz önünde bulundurmadan sınıflandırma, önceki sistemlerin başka bir sakıncasıdır. Bu sistemler, hizmet ömrü boyunca kaplamanın atmosferdeki oksijenle reaksiyona girmesinden kaynaklanan uzun süreli yaşlanan bitümden sorumlu olmamaktadır.

3.1 Fiziksel deneyler

3.1.1 Penetrasyon deneyi

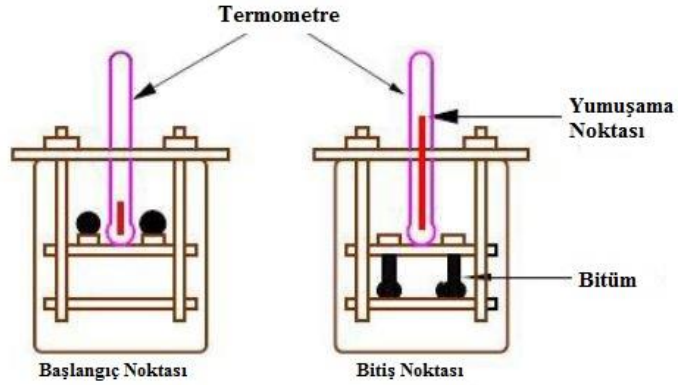
Penetrasyon deneyi bitümün sertliğini ve kıvamını belirlemektedir. ASTM D5/D5M Standardında ayrıntılı şekilde anlatılan ekipman ve prosedürüne tabi tutularak numunelerin üzerinde penetrasyon deneyi yapılmaktadır (ASTM D5/D5M, 2013). Penetrasyon, standart bir iğnenin belirtilen sıcaklık, yük ve yükleme süresi koşulları altında bir bitüm numunesinin içine dikey olarak nüfuz edeceği onda bir milimetre ($1 \text{ dmm} = 0,1 \text{ mm}$) olarak ifade edilmektedir. Genellikle, uygulanan yük 100 g, yükleme süresi 5 sn ve deney sıcaklığı 25°C 'de olmaktadır. Her deney için, deney sıcaklığında belirtilen şartlandırmadan sonra, üç ayrı penetrasyon ölçümü alınır. Üç değer ortalaması en yakın tam sayı olarak kaydedilmektedir. Üç ölçüm arasındaki fark standartta belirlenmiş sınırı aşmadığında penetrasyon kaydedilir. Deney sırasında, numunenin döküm sıcaklığı, iğnenin boyutu, iğnenin üzerine yerleştirilen ağırlık ve deney sıcaklığı ile ilgili herhangi bir yanlışlık penetrasyon değeri üzerinde büyük ölçüde etki bırakabilmektedir. 50/70 bitüm sınıfı, standart test koşullarında penetrasyon değerinin 50 ila 70 aralığında olduğu anlamına gelmektedir. Sıcak iklimlerde, daha düşük penetrasyon sınıfı ve soğuk iklimlerde ise daha yüksek penetrasyon sınıfı tercih edilmektedir. Penetrasyon deneyinin işleyişi Şekil 3.2'de şematik olarak verilmiştir (Ali, 2018).



Şekil 3.2 Penetrasyon deneyinin işleyişi (Ali, 2018)

3.1.2 Yumuşama noktası

Bitümün deney şartnamesi çerçevesinde belirli yumuşama derecesine ulaştığı sıcaklık bitümün yumuşama noktası olarak ifade edilmektedir. Deneyde, halka ve bilye aparatı kullanılarak ASTM D36 şartnamesinin prosedürüne uygun şekilde gerçekleştirilir (ASTM D36/D36M, 2014). Deney yapılış prosedürüne göre, halkada bulunan bitüm numunesinin üzerine küçük bir çelik bilye yerleştirilir ve ardından bir cam kabı içerisinde 5 °C'lık su banyosuna deney kurulumu yerleştirilir. Banyo sıcaklığı dakikada 5 °C yükseltilir ve bitümü yumuşatır ve sonunda bilye halkanın içerisinden yavaşça geçerek bitüm deforme olur. Her iki numune üzerinde yumuşatılmış bitüm, aşağıda 25 mm mesafedeki metal plakaya temas ettiğinde sıcaklık not edilir ve iki sıcaklığın ortalaması yumuşama noktası olarak kaydedilir. Genel olarak, daha yüksek yumuşama noktası düşük sıcaklık duyarlılığının göstergesidir ve sıcak iklimlerde tercih edilmektedir. Şekil 3.3, yumuşama noktası deney kurulumunu göstermektedir (Ali, 2018).



Şekil 3.3 Yumuşama noktası deneyinin işleyişi (Ali, 2018)

Penetrasyon indeksi (PI) değeri, bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirlenmesi amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerini aşağıda verilen formülde kullanarak hesaplamaktadır. PI değeri azaldıkça bitümün sıcaklığa karşı duyarlılığı artmaktadır. Sıcaklığa hassasiyeti normal olan bir bitümün PI değeri -2 ile +2 arasında olması önerilmektedir. PI değerinin -2'den küçük olması bitümün sıcaklığa duyarlılığının artması ve +2'den büyük olması bitümün okside olması anlamına gelmektedir (Hunter, Andy Self and John Read, 2015).

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

3.2 Superpave bitüm şartnamesi

1993 yılında, üstün performanslı asfalt kaplama anlamına gelen Superpave, SHRP asfalt araştırma programının ana ürünü olarak tanıtılmıştır. Superpave, malzemelerin özelliklerini, karışım tasarım yöntemi ve analizini, ve üstyapı performansının belirlenmesinde kullanışlı ve geliştirilmiş bir yöntem sağlamayı hedeflemiştir.

Superpave üstyapısının performansı ile ilgili bir şartnamedir. Superpave bitüm şartnamesi kapsamında bitümün özellikleri sıcaklık ve yaşlanma gibi tipik hizmet içi kaplama koşullarında ölçülmektedir.

Bitümün Performans Sınıfı (PG), X ve Y'nin iki sayı gösterdiği PG X-Y olarak adlandırılmıştır. İlk sayı olan X, kaplama yüzeyinin 20 mm altında ölçülen ve genellikle “yüksek sıcaklık performans sınıfı” olarak adlandırılan yedi günlük maksimum kaplama sıcaklığıdır. Yüksek sıcaklık performans sınıfı, kaplamanın güvenilirlikle dayanabilmesi gereken maksimum sıcaklığı göstermektedir. İkinci sayı olan -Y ise, kaplamanın herhangi bir bozukluğa uğramadan minimum kaplama yüzey sıcaklığıdır ve genellikle “düşük sıcaklık performans sınıfı” olarak adlandırılmaktadır. Örnek olarak, PG 64-22 bitümün, ortalama yedi günlük azami kaplama sıcaklığının 64 °C olduğu ve muhtemel asgari kaplama sıcaklığının -22 °C olduğu bir bölgede yeterli fiziksel özelliklere sahip olması beklenmektedir. Superpave bitüm deneyleriyle ölçülen fiziksel özellikler, üstyapının mühendislik prensiplerine dayalı hizmet performansını kıyaslanabilir şekilde anlatmaktadır (Roberts *et al.*, 1996).

Daha önce de belirtildiği gibi, Superpave deneyleri, bitümü çeşitli sıcaklık ve yaşlarda nitelendirmektedir. Çizelge 3.1, Superpave deneylerin özetini göstermektedir (Behnood, 2016).

Çizelge 3.1 Superpave Bitüm deneyleri ve kullanım amaçları

Deney Adı	Deneyin Amacı
Dönel viskozite (RV)	Yaşlanmamış bitümün yüksek sıcaklıklarda pompalanabilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi
Dinamik kayma reometresi (DSR)	Orijinal, RTFO ve PAV ile yaşlanmış bitümlerin yüksek ve orta sıcaklıklarda özellikleri belirlenmesi

Dönel ince film etüvü (RTFO)	Bitüm üzerinde gerçekleştirilen kısa süre (hizmet öncesi) yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi
Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)	Bitüm üzerinde gerçekleştirilen uzun süre (hizmet sonrası) yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi

3.2.1 Dönel viskozite (RV) deneyi

Bitümün plent tesisinde karıştırma, yerleştirme ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) sıkıştırılması sırasında gereken yüksek sıcaklıklarda yeterince akışkan veya uygulanabilir olması gerekmektedir (Roberts *et al.*, 1996). Dolayısıyla dönel viskozite (RV), bitümün hazırlama işlemleri sırasında işlenebilirliğini ve pompalanabilirliğini değerlendirerek reolojik özelliklerini belirlemektedir.

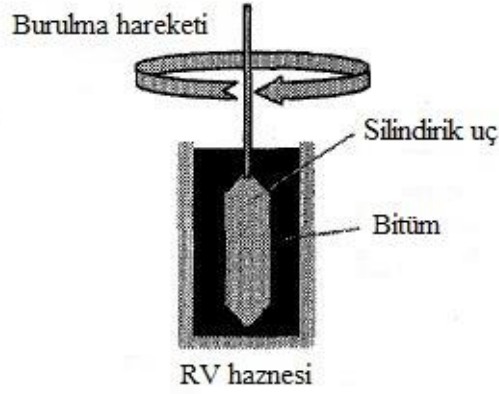
Çalışmada kullanılan Brookfield dönel viskozimetre cihazı ve RV aletine bağlı olan sıcaklık kontrol sistemi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Brookfield dönel viskozimetre cihazı ve sıcaklık kontrol sistemi

RV deneyi yaşlandırılmamış bitümler üzerinde yapılmaktadır. Viskozite değeri, RV cihazına ait silindirik ucun belirlenen sıcaklıkta (135°C ve 165°C), dönüş hızını (20 devir/dk) sabit tutması için cihaz tarafından uygulanan tork kuvvetinden hesaplanarak belirlenmektedir (Şekil 3.5). Cihazın ucu döndürmek

için uyguladığı burulma kuvveti, bitümün viskozite değerine bağlıdır. Bitümün viskozite değerinin belirlenmesinde cihazda meydana gelen tork miktarına göre birbirinden farklı geometrilere sahip olan No. 21 ve No. 27 numaralı uçlardan biri kullanılmalıdır (Zaniewski and Pumphrey, 2004).

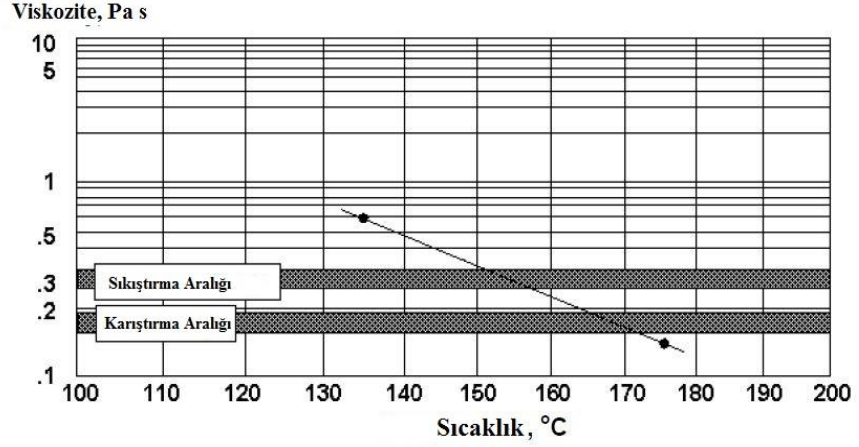


Şekil 3.5 RV cihazının çalışma prensibi (McGennis *et al.*, 1995)

ASTM D 4402 standardında ayrıntılı şekilde açıklandığı gibi, 135°C’de viskozite deneyi yapıldığında, viskozite değerinin maksimum sınırı 3 Pa.s (3000 cP) olması gerekmektedir (ASTM D4402, 2015). Bu Maksimum sınır, bitümün ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları aralığında yeterince pombalanabilir ve işlenilebilir olmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, dönel viskozimetre BSK’ların karıştırma ve sıkıştırma sırasında sıcaklık aralıklarını belirlemek için kullanılmaktadır. 165 °C ve 135 °C’de viskozite deneyi yapıldıktan sonra, BSK’ların tasarımında kullanılacak ideal sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıkları logaritmik viskozite-sıcaklık grafiklerinden belirlenir. Viskozite deneyinin iki farklı sıcaklıktaki değerlerinden elde edilen logaritmik viskozite-sıcaklık eğrisinin tipik bir örneği Şekil 3.6’da verilmiştir (Zaniewski and Pumphrey, 2004). Superpave şartnamesine göre, karıştırma sıcaklıkları için 0.17 ± 0.02 Pa.s ve sıkıştırma sıcaklıkları için 0.28 ± 0.02 Pa.s arasındaki viskozite aralığı

hesaplanarak ideal karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı elde edilmektedir (Kennedy *et al.*, 1994; ASTM D4402, 2015).

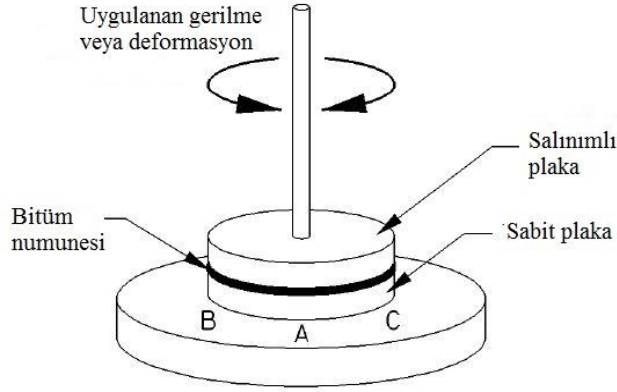


Şekil 3.6 Bitümün örnek bir logaritmik viskozite- sıcaklık eğrisi

3.2.2 Dinamik kayma reometresi (DSR)

Dinamik kayma reometresi (DSR) kullanılarak bitümün orta ile yüksek sıcaklık viskoelastik özellikleri incelenmektedir. Bitümün kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağına karşı direnci viskoz ve elastik özelliklerine göre belirlenmektedir. Bitümün kalıcı deformasyona direnç göstermesi için sert ve elastik olması ve yorulma çatlaklarına karşı dayanıklı olması için esnek ve elastik olması gerekmektedir.

DSR cihazı sıcaklık kontrol sistemi, veri toplama ünitesi ve kişisel bir bilgisayardan oluşmaktadır. Ayrıca, reometre bir yükleme düzeneği, motor, yük ve gerilme ileticisi, paralel plakalar (bir üst salınlımlı uçlu plaka ve bir alt sabit plaka, Şekil 3.7) ve içine monte edilmiş bir dirençli termal detektöre sahip olan bir çevresel kontrol haznesinden oluşturulmaktadır. Çalışmada kullanılan Anton Paar Smart Pave Plus 301 DSR cihazı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.7 DSR cihazının yükleme düzeneği (Zaniewski and Pumphrey, 2004)



Şekil 3.8 Dinamik kayma reometre cihazının görünümü

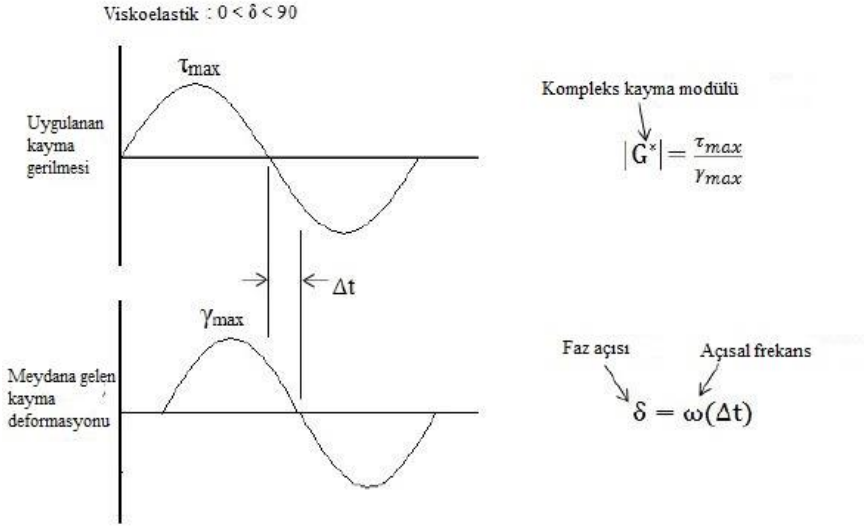
Deneyin yapılış sırasında, DSR'deki iki dairesel plaka arasında bitüm numunesi yerleştirilir. Genellikle üst plaka 10 rad/sn (1,59 Hz) olarak salınım sağlar ve alt plaka sabittir ve bu kesme kuvveti uygulanmasına neden olmaktadır. DSR deneyleri orijinal, RTFO ile yaşlanmış ve PAV ile yaşlanmış bitüm numuneleri üzerinde gerçekleştirilmektedir. DSR deneyinin ayrıntılı yapılış şekli AASHTO T 315 “Asfalt Bağlayıcının Dinamik Kesme Reometresini Kullanarak Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi” standardında bulunmaktadır (AASHTO T315, 2012).

Bitümün sıcaklık performansını incelenmesi sırasında, 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığında veya 8 mm çapında ve 2 mm kalınlığındaki bitüm numuneleri üzerinde deney yapılabilir. Yüksek sıcaklık performansının (tekerlek izi

parametresi) belirlenmesinde 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığında ve orta sıcaklık performansının (yorulma parametresi) belirlenmesinde 8 mm çapında ve 2 mm kalınlığındaki bitüm numuneleri standart reometresi olarak kullanılmaktadır (AASHTO T315, 2012).

Deney sıcaklığı bitümün sınıfına ve performans parametresine bağlı olarak seçilmektedir. Tekerlek izi parametresini değerlendirmek için orijinal ve RTFOT ile yaşılandırılmış bitümler (46°C ile 82°C) yüksek hizmet sıcaklıklarında deney yapılmaktadır. Bunun yanı sıra, yorulma parametresini değerlendirmek için PAV ile yaşılandırılmış bitümler (7°C ile 34°C) orta hizmet sıcaklıklarında deney gerçekleştirilmektedir.

Üst plaka ile alt plaka arasında tutulan bitüme kuvvet (veya salınımlı kayma gerilimi, τ) uygulandığında, bitümün kuvvete tepkisini (veya kayma deformasyonu, γ) DSR tarafından ölçölür ve buna gerilme kontrollü bir deney olarak tanımlanmaktadır. Böylelikle, bitümün viskoelastik davranışını belirlemek için iki önemli parametre DSR deney sonucu ile elde edilir. Bunlardan birisi, maksimum kayma gerilmesinin maksimum kayma deformasyonuna oranı olan kompleks kayma modölüdür (G^*). Diğeri ise, uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki gecikme süresi olan faz açısıdır (δ). G^* , bitümün kayma gerilmesi sonucunda deformasyona direnç gösterme kabiliyeti ve δ ise viskoz ve elastik tepkilerinin sonucunda meydana gelen toplam direncin oranlarının ölçüsü olmaktadır. DSR’de G^* ve δ hesaplanarak, bitümün viskoelastik davranışı Şekil 3.9’da verilmiştir (McGennis *et al.*, 1995). Superpave şartnamesinde, $G^*/\sin\delta$ parametresi bitümün yüksek sıcaklık performansını değerlendirmek için tekerlek izi (kalıcı deformasyon) parametresi olarak tanımlanmıştır. $G^* \times \sin\delta$ parametresi bitümün orta sıcaklık performansını belirlemek için yorulma parametresi olarak tanımlanmıştır (Behnood, 2016).

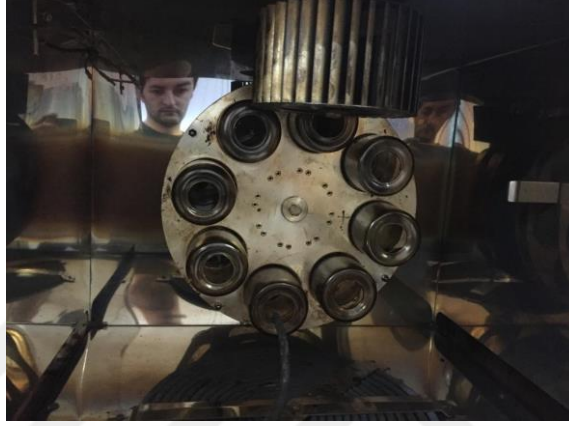
Şekil 3.9 G^* ve δ hesaplanması

Yüksek sıcaklık performansı değerlendirildiğinde, $G^*/\sin\delta$ parametresinin değeri deneyin uygulandığı sıcaklıkta orijinal numuneler için minimum 1 kPa ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için minimum 2.2 kPa olması gerekmekte, ayrıca orta sıcaklık performansı değerlendirildiğinde, $G^* \times \sin\delta$ parametresinin değeri PAV ile yaşlandırılmış numuneler için maksimum 5000 kPa olması gerekmektedir (Kennedy *et al.*, 1994).

3.2.3 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT)

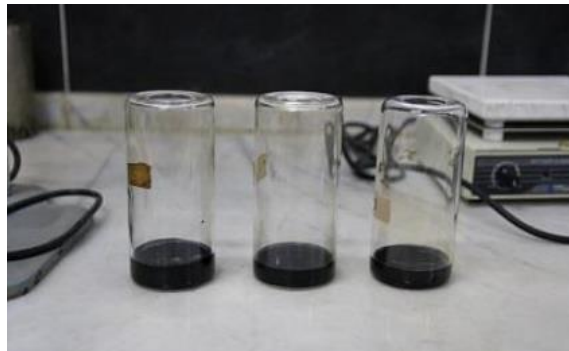
SHRP çalışması sırasında, özellikle asfalt karışımında karıştırırken bitümde oluşan kısa süreli yaşlanmasını simüle etmek amacıyla dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) geliştirilmiştir (Behera, Singh and Amaranatha Reddy, 2013). RTFO deneyinin yapılış şekli ve procedürü ASTM D2872 şartnamesinde belirtilmiştir (ASTM D2872, 2012). Buna göre deneyde, sıcaklık ve hava püskürtülmesi etkisiyle bitümde meydana gelen kütle kaybının belirlenmesi ve RTFO deneyi ile yaşlandırılmış bitümün üzerinde yeniden penetrasyon, yumuşama noktası gibi

geleneksel deneylerin uygulanarak yaşlanma sonrası fiziksel değişimlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Kennedy *et al.*, 1994). İçinde 8 adet silindir şeklindeki cam numune şişelerinin yatay şekilde yerleştirildiği dönen bir alüminyum tabla ve bir hava üfleyicisi bulunan RTFO cihazının iç görünümü Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 RTFO cihazının iç görünümü

Deney başlamadan 16 saat önce RTFO cihazı 163 °C’ye ayarlanarak ön ısıtma yapılır. Deney, RTFO cihazına ait 8 adet cam şişelere 35’er gram (0,5 g hassasiyetle) numune konularak gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 RTFO deneyinde kullanılan standart cam şişeler

Bitüm numuneleri 163 °C’yı aşmayacak şekilde ısıtıldıktan sonra cam şişelere dökülür ve ardından cam şişeler yatay şekilde RTFO cihazına yerleştirilir. Dönel tablanın dönüş hızı 15 dev/dk ve deney süresi 85 dakika olarak ayarlanır.

Aynı zamanda, 4000±200 ml/dk hava basıncı 163°C’de üflenerek bitümler yaşlandırılır. 8 adet numunenin 2 tanesi kütle kaybını belirlemek için ve diğer 6 numune geleneksel deneyler, DSR, MSCR, PAV ve LAS gibi diğer deneyler için kullanılabilir.

Kütle kaybı, bitümün RTFO (ASTM D2872, 2012) deney standardına uygun olarak yaşlandığında meydana gelen uçucu kayıp miktarını gösterir. Numunenin kütlesi RTFOT’dan önce ve sonra ölçülür. Buna göre, bitümün kütle kaybı aşağıdaki formül ile her iki şişe için ayrı ayrı hesaplanarak ve iki değer in ortalamasını elde ederek belirlenir;

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

Standarda göre maksimum kütle kaybı yüzde 1 olarak belirlenmiştir (Kennedy *et al.*, 1994). Bitümlerin kütle kaybında bazı durumlarda artış da sağlanabilmekte ve bu da yaşlanma sırasındaki oksidasyon olayından dolayı gerçekleştirilmektedir.

3.2.4 Basıncılı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi

Bitümlü sıcak karışımların kaplamada ilk 5-10 yıllık hizmet ömrü boyunca yaşlanmasını tahmin edilmesi amacıyla bitüm numuneleri üzerinde basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi SHRP tarafından geliştirilmiştir (Roberts *et al.*, 1996).

Bitümün sertleşmesini hızlandırmak için RTFOT ile kısa süreli yaşlandırılmış bitüm numunelerinin 20 saat boyunca 2.1±0.1 MPa hava ile basınçlandırılmış ve ısıtılmış bir kaba yerleştirilmesiyle PAV deneyi gerçekleştirilmektedir. Aynı kapta olması suretiyle her tepsi için 50g bitüm olmak üzere toplam 10 adet numuneden PAV cihazının etüvünü oluşturmaktadır. Böylece bitüm, yüksek sıcaklık ve hava basıncına tabi tutularak oksidatif yaşlanma süresi hızlandırılır (ASTM D6521, 2013). Bu çalışmada kullanılan PAV cihazını görünümü şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 PAV cihazının görünümü

ASTM D6521 standardında ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfına göre deney sıcaklığı 90°C ile 110°C arasında değişmektedir. Performans sınıfları PG 46 ve PG 52 olan bitümlerin deney sıcaklığı 90°C, performans sınıfları PG 58, PG 64 olan bitümlerin deney sıcaklığı 100°C ve performans sınıfları PG 70, PG 76, PG 80 olan bitümlerin ise deney sıcaklığı 100-110°C’da yaşlanmaları gerekmektedir (ASTM D6521, 2013).

PAV deneyinde RTFOT ile yaşlandırılmış bitümler kullanılmaktadır. Böylelikle, bitümlü sıcak karışımlardaki meydana gelen kısa süre yaşlandırmaya dahil olan karıştırma ve sıkıştırma yaşlanma aynı zamanda hizmeti ömrü boyunca yaşlanma deney içeriğine yansıtılmaktadır. 20 saat boyunca sabit hava basıncı ve yüksek sıcaklığa tabi tutulan bitüm numuneleri deney bittikten sonra PAV cihazından çıkarılır. Bitüm numuneleri yüksek hava basıncı ve sıcaklığa maruz kaldığı için bitümde hava kabarcıkları oluşmaktadır. Hava kabarcıklarının aradan kaldırılması için 30 dakika boyunca 170°C sıcaklıkta olan gaz alma (degas) cihazına yerleştirilir. Çalışmada kullanılan gaz alma (degas) cihazının görünümü Şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.13 Gaz alma cihazının görünümü

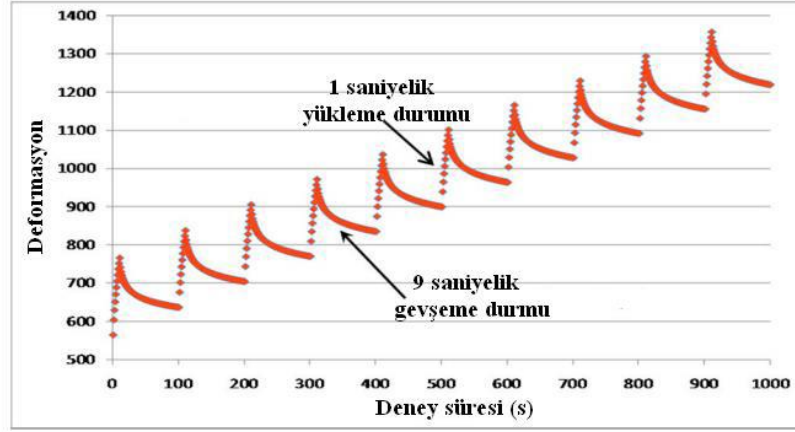
PAV deneyi ve gaz alma işlemleri bittikten sonra bitüm numuneleri DSR yorulma deneyi ve lineer farklı genlik (LAS) deneylerinde kullanılması için kapalı şekilde bekletilmiştir.

3.3 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi

SHRP çalışmasında Superpave yöntemi kapsamında gerçekleştirilen DSR deneyinin tekerlek izi parametresinde meydana gelen deformasyon ve elastik özelliklerini belirlenmesinde yeterli bulunmamıştır. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyinde, bitümün davranışı, mevcut DSR PG deneylerindeki davranışa göre önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. PG sisteminde, bitüme çok düşük deformasyonda salınımlı bir yük uygulanarak yüksek sıcaklık parametresi ($G^*/\sin\delta$) ölçülmektedir. Bu nedenle, PMB'lerin kalıcı deformasyona (tekerlek izi) karşı kabiliyetini tam olarak temsil etmemektedir. Bu sorunların giderilmesi amacıyla MSCR deneyi AASHTO tarafından geliştirilmiştir (AASHTO T350, 2014).

Bu çalışmada MSCR deneyi, AASHTO T350 şartnamesine göre RTFOT ile yaşlandırılmış bitüm numunelerine farklı sıcaklıklarda ilk olarak 0,1 kPa ve ardından 3,2 kPa olarak iki farklı kayma gerilmesi uygulanmaktadır. İlk başta 0,1 kPa kayma gerilmesi için 10 döngü yapılarak her döngü 1 saniye yükleme ve 9

saniye yüksüz bir toparlanma süresi olarak gerçekleşmektedir. Aynı bitüm numuneleri üzerinde 0,1 kPa kayma gerilmesi 10 döngü olarak tekrarlandıktan sonra, aynı döngü süresi ve aşaması kapsamında 3,2 kPa kayma gerilmesi uygulanmaktadır. Bitümün MSCR deneyinin 10 döngülük yüklemesinde gösterdiği tipik deformasyon ve geri dönme davranışı Şekil 3.14’te verilmiştir (FHWA, 2011).



Şekil 3.14 MSCR deneyi deformasyon-geri dönme davranışı (FHWA, 2011)

AASHTO M 332 şartnamesine göre, MSCR deneyinde geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) ve elastik geri dönme (R) olmak üzere iki ana parametre bitümün sınıflandırılmasında kullanılmaktadır (AASHTO M332, 2014). Döngü sırasındaki deformasyon analizi, elastik deformasyon (geri kazanılabilir) ve kalıcı deformasyon (geri kazanılamaz) özellikleri olarak ayrılmaktadır. Aşağıda verilen formüller, R ve J_{nr} değerlerini hesaplamaktadır (Król, Radziszewski and Kowalski, 2015).

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

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{10}}{\epsilon_1} \times 100$$

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

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

Bu formüllerde aşağıdaki semboller kullanılmaktadır:

τ : gerilme, N: döngü sayısı, $\varepsilon_1 = 1$. saniyenin sonunda meydana gelen deformasyon miktarı (yükleme süresinin sonunda), $\varepsilon_{10} = 10$. saniyenin sonunda meydana gelen deformasyon miktarı (geri kazanma süresinin sonunda).

Bunun yanı sıra, 0,1 kPa ve 3,2 kPa arasındaki geri dönmeyen sünme uyumluluğu farkı ($J_{nr,diff}$) ve geri kazanılan deformasyon farkı (R_{diff}) aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$J_{nr,diff} = \frac{J_{nr\ 3,2} - J_{nr\ 0,1}}{J_{nr\ 0,1}} \times 100$$

$$R_{diff} = \frac{R_{0,1} - R_{3,2}}{R_{0,1}} \times 100$$

AASHTO M 332, çevresel (iklim) faktörlere ve tasarım trafik hacimlerine dayanarak bitüm sınıfları ve şartname sınırlarını belirlemiştir. Buna göre, çevresel faktörler PG 64, PG 70 vs. gibi yüksek sıcaklık performans sınıfı ve tasarım trafik hacimleri ise Standart, Ağır, Çok ağır ve Aşırı ağır olarak oluşmaktadır. Çeşitli sınıflar için hız ve Eşdeğer Dingil Yüğü (ESAL) değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir (AASHTO M332, 2014). Şartnamenin ana amacı, yetersiz kalmış klasik DSR PG sisteminin yerine trafiği de dahil ederek daha titiz ve teknik olarak daha sağlam bir yaklaşım ifade etmektedir.

Çizelge 3.2 MSCR deneyinde trafik hızı ve seviyesine göre bitüm seçimi

ESALs ^a (Milyon)	Trafik Akımı (traffic load rate)		
	Durgun ^b	Ağır ^c	Standart ^d
< 0,3	V	H	S
0,3 - <3	V	H	S
3 - <10	V	H	S
10 - <30	V	H	H
≥ 30	E	V	V

^a20 yıl boyunca trafik dizayn şeridinde beklenen ESALs.
Ortalama trafik hızı ^b(< 20 km/s), ^c(20 ile 70 km/s arası), ^d(> 70 km/s).
S:Standart ($J_{nr}=2-4,5$), H: Ağır ($J_{nr}=1-2$), V: Çok Ağır ($J_{nr}=0,5-1$), E:Aşırı Ağır ($J_{nr}=0-0,5$)

Ayrıca, iki yükleme (0,1 kPa ve 3,2 kPa) arasındaki geri dönmeyen sünme uyumluluğu farkı ($J_{nr,diff}$) %75'ten az olması gerekmektedir. Bu kritere göre, bitümün $J_{nr,diff}$ değeri %75'ten daha fazla olması halinde kalıcı deformasyona daha fazla duyarlı olduğu kabul edilmektedir.

3.4 Lineer farklı genlik (LAS) deneyi

Bitümün orta sıcaklıklardaki yorulma ömrünü belirlemek için hızlandırılmış bir yöntem kapsamında lineer farklı genlik (LAS) deneyi gerçekleştirilmektedir (Hassanpour-Kasanagh *et al.*, 2020). LAS deneyi, 8 mm çapında ve 2 mm kalınlığındaki bitüm numuneleri üzerinde 25°C'de uygulanmaktadır. Asfalt kaplaması hizmet ömrü boyunca trafik yüklemesine maruz kaldığından dolayı yorulma ömrünün belirlenmesi PAV ile (uzun süreli) yaşlandırılmış bitüm numuneleri üzerinde incelenmektedir.

AASHTO TP101 şartnamesine göre, aşağıda ifade edilen yorulma kanunu denklemi bitümün yorulma ömrünü belirlemek için VECD teorisini kullanarak hesaplanmaktadır (AASHTO TP101, 2014). VECD teorisi, tekrarlı yüklemelere maruz kalan bitümün yorulma hasarını ölçmek için kullanılmaktadır. Bu teorisinin sayesinde, farklı deformasyon seviyesine maruz kalan bitümlerin davranışının tahmin edilmesi mümkün olmaktadır.

$$N_f = A \times (\gamma_p)^{-B}$$

Burada N_f , yorulma ömrü veya yorulma bozulmasına uğrayan döngü (trafik) sayısı; γ_p , uygulanan deformasyon genliği; A ve B parametreleri ise VECD teorisinin katsayılarıdır.

A parametresi yükleme döngüsü sırasında depolama modülü ile doğrudan bir ilişkide olmakta ve bitümün bütünlüğünü koruma özelliğini açıklamaktadır. Depolama modülündeki bir azalma, bitümün bütünlüğünü korumada direncini düşürerek A parametresinin miktarını azaltmaktadır. Yorulma kanunu denklemi, γ_p parametresinin değeri 1 olduğunda bitümün yorulma ömrüne eşit olması anlamına

gelmektedir. B parametresi ise bitümün deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığını temsil etmektedir. B parametresinin mutlak değeri, deformasyon genliği arttığında daha yüksek yorulma ömrünü azaltma oranının bir göstergesidir. A parametresinin değeri daha yüksek olduğunda ve mutlak B değeri daha düşük olduğunda bitümün daha yüksek yorulma direncine sahip olması ve dolayısıyla yorulma ömrünün daha yüksek olması anlamına gelmektedir (Hassanpour-Kasanagh *et al.*, 2020).

AASHTO TP101 şartnamesine göre, LAS deneyi iki farklı frekans ve farklı genlik deneyleri olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birincisi, bitümün reolojik özelliklerini incelemek için kullanılabilirken, ikincisi bitümün hasar özelliklerini incelemek için kullanılabilir. Farklı frekans deneyinde, %0,1'lik sabit deformasyonda geniş bir frekans aralığında (yani 0,1 Hz ile 30 Hz arası) uygulanmaktadır. Farklı genlik deneyi ise, salınımlı deformasyon (yaklaşık 5 dakika içinde ve 310 döngü) sıfırdan %30'a kadar doğrusal olarak artırılarak, 10 Hz sabit frekansta gerçekleştirilmektedir.

Bitümün yorulma ömrünü belirlemek için, ilk önce hasarsız malzeme özelliği (α) parametresi farklı frekans deneyi verilerinden hesaplanır. Bu amaçla, açısal frekansa bağlı faz açısı $\delta(\omega)$ ve kompleks kayma modülü $|G^*|(\omega)$ aşağıdaki formül gibi depolama modülüne $G'(\omega)$ dönüştürülebilir.

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \times \cos \delta(\omega)$$

Log-log ölçeğinde, depolama modülünün $G'(\omega)$ açısal frekansa (ω) karşı eğimi aşağıdaki formül gibi verilebilir.

$$\log G'(\omega) = m(\log \omega) + b$$

Ayrıca, α parametresinin değeri aşağıdaki dönüşüm gerçekleştirilerek hesaplanabilir.

$$\alpha = \frac{1}{m}$$

Zamana bağılı hasar birikimi aşağıdaki formülü kullanarak elde edilebilir.

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_{p,i}^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

Burada $C(t) = \frac{|G^*|(t)}{|G^*|_{initial}}$; $|G^*|$, kompleks kayma modülü; $\gamma_{p,i}$, belirli bir veri noktası için uygulanan kayma deformasyonu genliği, ve t deney zamanı olarak tanımlanmaktadır.

Malzeme bütünlüğü ($C(t)$) ve hasar yoğunluğu ($D(t)$) arasındaki ilişki, aşağıdaki gibi kuvvet kanunu modeli kullanılarak ifade edilebilir.

$$C(t) = C_0 - C_a D(t)^{C_2}$$

Burada C_0 , C 'nin başlangıç değeridir ve bire eşittir; C_1 ve C_2 , eğri uydurma katsayılarıdır.

Yorulma noktasındaki hasar yoğunluğu (D_f), maksimum kayma deformasyonundaki malzeme bütünlüğünü (C_f) kullanarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_f}{C_1} \right)^{1/C_2}$$

Son olarak, bitümün yorulma performansının değerlendirilmesinde önemli rol oynayan A ve B parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$A = \frac{f \cdot D_f^{1+\alpha(1-C_2)}}{[1 + \alpha(1 - C_2)](\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha}$$

$$B = 2\alpha$$

A, B ve N_f değerleri VECD teorisinin yardımıyla her bitüm numuneleri için ayrı ayrı elde edildikten sonra bitüm numuneleri üzerinde oluşan yorulma hasarı ve yorulma ömrü belirlenmektedir.

3.4 Zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibi

Zaman-sıcaklık süperpozisyonu (time-temperature superposition) veya başka anlamla ifade edilirse frekans-sıcaklık süperpozisyonu, polimerik bir sıvının reolojik davranışının sıcaklığa bağlılığını belirlemek ya da zaman veya frekans rejimini genişletmek için sıkça uygulanan iyi bilinen bir prosedürdür. Deney sırasında ilk önce farklı frekans deneyi yapılarak farklı sıcaklıklarda geniş frekanslarda sabit bir deformasyon uygulanır ve sonuçlar DSR cihazından elde edildikten sonra referans sıcaklığı seçilir. Bunun ardından, farklı sıcaklıklardan elde edilen sonuçlar Williams–Landel–Ferry (WLF) modelinde geliştirilen kaydırma (shifting) yöntemiyle referans sıcaklıktaki eğrilere kaydırılarak ana eğrileri (master curve) çizilmektedir (Mezger, 2006).

Deneyde dikkate alınması gereken en önemli mesele, numuneler DSR cihazında deneye tabi tutulduğunda uygun deformasyon miktarının seçilmesidir. Bunun hem malzemenin sertliği ve hem cihazın maksimum ve minimum tork kuvvetinin zorlanmadan ideal şartlarda deneyi gerçekleştirebilmesidir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için lineer viskoelastik (LVE) limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. LVE alt ve üst limitlerini belirlemek için farklı genlik (amplitude sweep) deneyinin yapılması gerekmektedir (Günay, 2016).

Diğer yandan, üstyapı tasarımında bitümün deformasyonu kalın karışım tabakaları (tabaka kalınlığı >4 inch) için %2,5 deformasyon ve ince tabakalar (tabaka kalınlığı <4 inch) için deformasyon miktarı %5 olarak öngörülmektedir (Masad *et al.*, 2001).

Dolayısıyla, her üç katkı ile modifiye edilen numuneler üzerinde yapılan farklı genlik deneyi neticesinde LVE limiti %1 ile %6 arası deformasyon sağlanmıştır. Bunun ardından, farklı frekans deneyi için gereken sabit deformasyon miktarını belirlemek amacıyla LVE alt ve üst limiti aralığında olma gerekliliğini ve kalın karışım tabakası tasarım miktarını dikkate alarak deformasyon değeri %2,5 olarak seçilmiştir. Deformasyon miktarı, malzemelerin sertliği ve cihazın maksimum ve minimum tork kuvveti faktörlerinin etkileşimi farklı frekans deneyinde maksimum frekans 30 Hz olarak seçilmesine müsaade etmiştir. Başka taraftan minimum sıcaklık ise aynı faktörlerden etkilenecek en az 40°C olarak seçilebilmiştir.

Çalışma kapsamında, DSR cihazında 25 mm çapında başlık ile sabit deformasyon (%2,5) ve geniş logaritmik frekans (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 30 Hz) 4 farklı yüksek sıcaklıklarda (40, 50, 60 ve 70 °C) uygulanmıştır. Referans sıcaklık 50 °C olarak seçilmiştir ve başka sıcaklıklardaki kompleks kayma modülü verileri referans sıcaklıktaki eğriye kaydırılarak ana eğri oluşturulmuştur ve modifiye edilmiş bitümlerin kompleks kayma modülü üzerinden zaman-sıcaklık davranışı incelenmiştir.

3.5 Marshall stabilite deneyi

Birleşik Devletler'deki Mississippi otoyol departmanı için 1930'lu yılların sonlarında Bruce Marshall tarafından geliştirilen Marshall karışım yöntemi, BSK'ların tasarımı ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Marshall karışım tasarımı, bitümlü sıcak karışımların mukavemet ve akış özelliklerini belirlemek için dünya çapında kabul edilen standart bir deneydir (Mohammad *et al.*, 2006). Bu deney, karışımların optimum bitüm yüzdesini belirlemek ve ayrıca Marshall stabilitesi, akış değeri ve hava boşlukları gibi çeşitli Marshall özelliklerini incelemek için kullanılır. Esneklik, yükleme başlangıcında ve azami yük uygulandığında numunenin çapındaki değişimle ölçülen “akış değeri” cinsinden

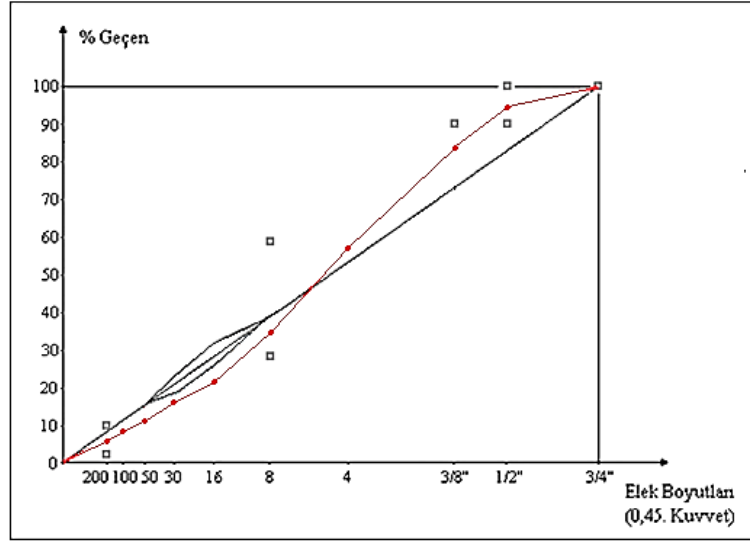
ölçülmektedir. Yükleme sırasında, takılı bir kadranlı gösterge, yükleme nedeniyle numunenin deformasyonunu (plastik akış) ölçer.

Bu çalışmada, optimum bitüm yüzdesini belirlemek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Çizelge 3.3'te verilen agrega gradasyonu için, B50/70 ve B160/220 penetrasyon sınıfına sahip bitümlerin her biri için üçer Marshall numunesi hazırlanmıştır. Her karışım numunesi için agrega miktarı 1200 gr olarak hazırlanmış, ve bitüm ağırlıkça 5 farklı yüzde de agregraya eklenmiştir.

Dere Beton A.Ş.'den temin edilen kalker türü agrega Marshall numunelerinin hazırlanması için kullanılmıştır. Agreganın gradasyon limiti grafiği Şekil 3.15'te verilmiştir (Mohammad *et al.*, 2006).

Çizelge 3.3 Kullanılan agreganın gradasyonu

Elek No	Elekten Geçen, (%)	Elekte Kalan, (%)	Elekte Kalan, (gr)	Toplam Elekte Kalan, (gr)
19 mm (3/4")	100	0	0	0
12,5 mm (1/2")	94	6	72	72
9,5 mm (3/8")	84	16	120	192
No: 4	58	42	312	504
No: 8	35	65	276	780
No: 16	22	78	156	936
No: 30	16	84	72	1008
No: 50	12	88	48	1056
No: 100	8	92	48	1104
No: 200	5	95	36	1140
Filler	-	-	60	1200



Şekil 3.15 Kullanılan agreganın gradasyon limiti grafiği

Elek analizi yapıldıktan sonra farklı boyutlara sahip agregalar gradasyona göre tartılarak metal bir plakaya yerleştirilmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 160 °C'ye ulaşacak şekilde etüv de bekletilmiştir. Bunun ardından akacak şekilde ısıtılan bitüm agregaya ağırlıkça %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5 olarak ilave edilmiştir. Bunun ardından, numunelerin sıcaklığı fazla düşmeyecek şekilde mikserde birer dakika karıştırılmıştır.

Karışım daha sonra yaklaşık 145-150 °C'de önceden ısıtılmış kalıplara yerleştirilmiş. Yağlı filtre kağıtları kalıbın altına ve üstüne konulmuş ve Marshall sıkıştırma tokmağı (Şekil 3.16) 457.2 mm yükseklikten ve 4.5 kg'lık bir çekiç kullanılarak numunenin üst ve alt yüzeylerine standarda göre (trafik seviyesine göre) 75 darbe uygulanmıştır. Kalıplardaki karışım numuneleri yaklaşık 24 saat bekletilmiş ve daha sonra kalıptan çıkarma aletine yerleştirerek çıkarılmıştır. Daha sonra numunelerin yükseklikleri bir kumpas kullanılarak 3'er taraftan ölçülmüş ve ortalaması numunenin yüksekliği olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.16 Marshall sıkıştırma tokmağı

Kalıptan çıkarılan numuneler (A) tartılmış ve oda sıcaklığında suyun içerisine bırakılarak 5 dakika beklenmiştir. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra yüzeyde su kalmayacak şekilde kurulanmış ve tartılarak doygun kuru yüzey ağırlığı (B) alınmıştır. Daha sonra numunelerin sudaki ağırlıkları (C) alınmıştır. Bu ağırlıklar, numunelerin özgül ağırlığının, boşluk oranının ve bitümle dolu boşluk oranının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$V = B - C$$

$$D_p = A / V$$

$$D_{Port} = (D_{P1} + D_{P2} + D_{P3})/3$$

$$W_a = \frac{M_b}{M_a} \times 100$$

$$W_b = \frac{M_b}{M_a + M_b} \times 100$$

$$G_{ag} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}}$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{ag}} + \frac{W_b}{G_b}}$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{Port}}{D_T} \times 100$$

$$V_b = \frac{D_{Port} - W_b}{G_b}$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b)$$

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

$$V_f = \frac{V_b}{V.M.A} \times 100$$

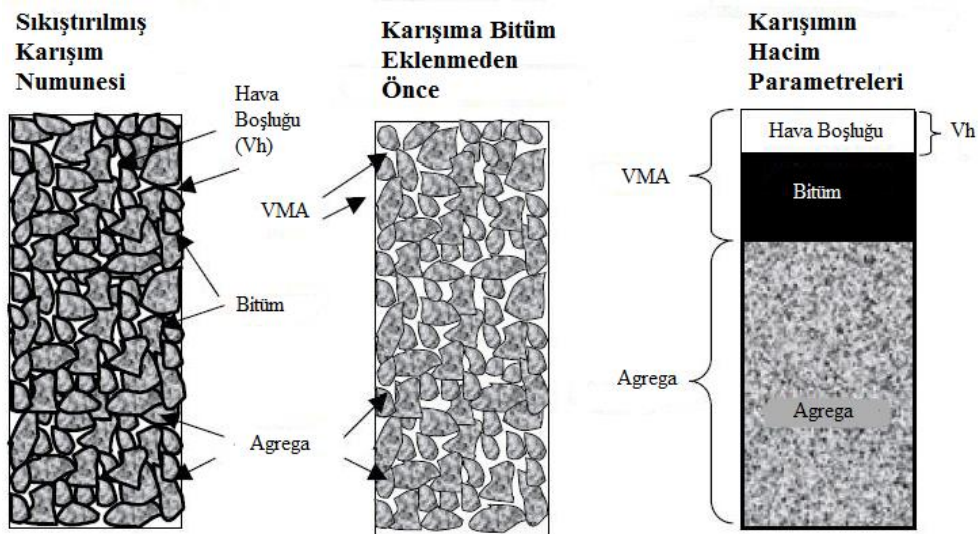
Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune 60 ± 1 °C suda 30-40 dakika bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilmiş, akma çubuğu sabitlenmiş ve yükleme uygulanmıştır (Şekil 3.17). Marshall stabilitesi ve akışı, ASTM D1559-89’da anlatılan prosedüre uygun olarak her numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 30-40 dakikalık bir süre boyunca 60 ± 1 °C’lik bir su banyosunda bekletildikten sonra dakikada 50,8 mm’lik bir yükleme hızı ile kırıldığında sıkıştırılmış numune üzerindeki maksimum yük (Marshall stabilitesi) ve akış hızı belirlenmiştir. Örnek bir karışımın içeriğini temsil eden Marshall numunesi Şekil 3.18’de verilmiştir.

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 belirlenir. Bu da sağlanmadığı takdirde deneyin yeniden uygulanması gerekmektedir.

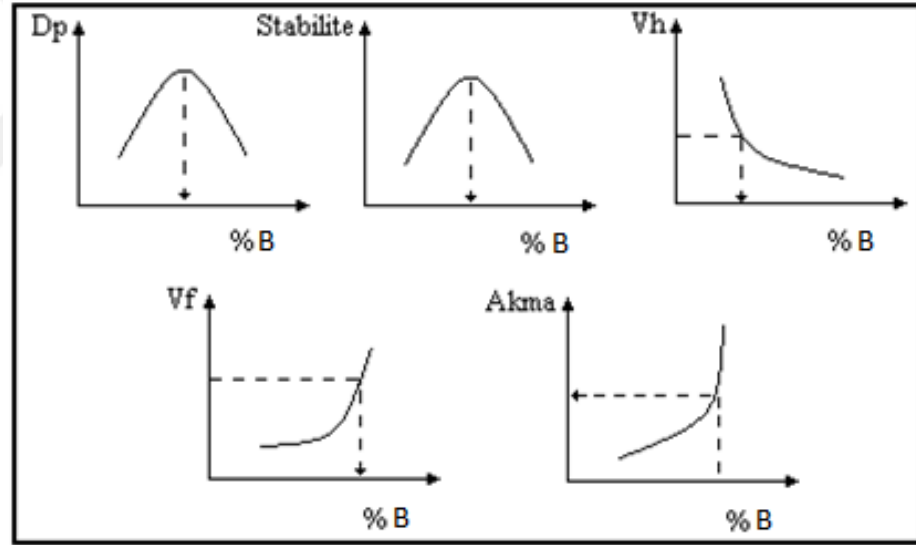


Şekil 3.17 Marshall stabilite ve akma aleti



Şekil 3.18 Örnek bir karışım içeriğini temsil eden Marshall numunesi

En az beş ayrı bitüm içeriğinde ve üçer tane hazırlanan numunelerin; pratik özgül ağırlık (D_p) - % B, stabilite - % B, boşluk oranı (V_h) - % B, bitümle dolu boşluk oranı (V_f) - % B grafikleri çizilir (Şekil 3.19). 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 bitümle 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, 1989).



Şekil 3.19 Temsili Marshall karışım dizayn grafikleri

4. MODİFİKASYONDA KULLANILAN MALZEMELER

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan B 50/70 ve B 160/220 penetrasyon sınıflarına ait bitümler Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TÜPRAŞ)'den temin edilmiştir. Bitümlerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Bitümlerin fiziksel özellikleri

Bitüm Sınıfı	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama noktası (°C)	PI	Özgül ağırlık	Parlama noktası (°C)
B50/70	52	43	-3.03	1,030	Min.250
B160/220	162	36	1.7	1,027	Min.250

Her iki penetrasyon sınıfına ait bitümlerin modifiyesinde termoplastik dinamik vulkanizat yöntemiyle elde edilmiş kompozit TDV, SBS termoplastik elastomer ve EVA plastomer katkısı olmak üzere üç farklı modifiye katkısı kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda polimer katkıların arasında en yaygın olarak SBS ve EVA polimerleri kullanıldığı için her iki polimer bu çalışmada referans olarak seçilmiş ve çevre dostu geri dönüştürülmüş TDV katkısı ile kıyaslanmıştır.

4.1 TDV

Sürekli ekstrüzyon metoduyla termoplastik geri dönüştürülmüş HDPE matrisine atık lastik tozu (GTR) ilave edilme suretiyle termoplastik dinamik vulkanizat sentezlenmiştir. Buna göre ağırlıkça %40 atık HDPE, %25-35 aralığında EPDM, %35-25 aralığında atık lastik tozu (%30'u doğal kauçuk, %30 SBR, %20 BR, 20% IIR ve IIIR'den oluşan) ve stabilizasyon için %17,5 bitüm, TDV'nin bileşenleri olarak seçilmiştir. Bileşenler çift vidalı ekstruderde 60-100 dönüş hızıyla 10-15 dakika süresince karıştırılarak sentezleme işlemi gerçekleştirilmiş ve bunun

sonucunda TDV katkısı elde edilmiştir. Çalışmada ana malzeme olarak kullanılan TDV katkısının görünümü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çalışmada kullanılan TDV katkısı

4.2 SBS

LCY grubu tarafından üretilen Globalprene 3501, doğrusal ve blok yapıya sahip co-polimerdir. Aynı zamanda çok yüksek dayanıklılık ve düşük viskoziteye sahiptir. Yüksek dayanıklılık gerektiren asfalt karışımlarında modifiyer olarak kullanılmaktadır. Düşük ve yüksek hızlı karışımlarda çapraz bağ uygulaması için çok uygun olmaktadır. Beyaz renkli ve granül şeklinde olan katkının kimyasal bileşimi stiren-butadien-stiren, birim hacim ağırlığı $0,20 - 0,45 \text{ g/cm}^3$ ’tür. ASTM D792 standardına göre özgül ağırlığı $0,94$ ’tür. Çalışmada referans olarak seçilen SBS katkısının görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan SBS katkısı

4.3 EVA

DuPont firması tarafından üretilen Elvax® 420, ağırlıkça %18 vinil asetat komonomer içeriği ile doldurulmuş bir etilen vinil asetat (EVA) kopolimer sınıfıdır. Termal stabilizatör olarak bütillenmiş hidroksitoluen (BHT) antioksidan içerir. Bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan katkılardan biridir. Şeffaf renkli ve granül şeklinde olan katkının kimyasal bileşimi etilen-vinil-asetat, yumuşama noktası 53 °C'tir. ISO 1183 standardına göre özgül ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen EVA katkısının görünümü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Çalışmada kullanılan EVA katkısı

4.3 Modifiye işlemleri ve numunelerin kodlandırılması

TDV, SBS ve EVA katkıları her iki tür bitüme (B50/70 ve B160/220) %3, %4, %5, %6 ve %7 oranlarında ilave edilerek TDV, SBS ve EVA katkıli bitümler elde edilmiştir. Modifiye bitümlerin hazırlanmasında yüksek devirli ve bitüm modifikasyonu için tasarlanan başlığa sahip Silverson L5M markalı mikser kullanılmıştır. Karıştırma sırasında kesme kuvveti sağlayan yüksek devirli karıştırıcı sayesinde katkıların bitüm içerisinde iyi bir dağılım göstermeleri amacıyla 60 dakika boyunca 3000 devir/dk hız ile 180°C'da karıştırılmış ve modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir. Modifiye sırasında kullanılan Silverson L5M markalı mikser cihazı 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 Modifiye işlemi sırasında kullanılan mikser aleti

Deney kapsamında 50/70 ve 160/220 penetrasyon sınıfları ile hazırlanan karışımlar ve numunelerin kodlandırılması aşağıdaki şekilde olmaktadır.

B 50/70 saf bitüm- “B₁”

B 50/70 saf bitüm + %3 TDV- “B₁-3TDV”

B 50/70 saf bitüm + %4 TDV- “B₁-4TDV”

B 50/70 saf bitüm + %5 TDV- “B₁- 5TDV”

B 50/70 saf bitüm + %6 TDV- “B₁-6TDV”

B 50/70 saf bitüm + %7 TDV- “B₁-7TDV”

B 50/70 saf bitüm + %3 SBS- “B₁-3SBS”

B 50/70 saf bitüm + %4 SBS- “B₁-4SBS”

B 50/70 saf bitüm + %5 SBS- “B₁-5SBS”

B 50/70 saf bitüm + %6 SBS- “B₁-6SBS”

B 50/70 saf bitüm + %7 SBS- “B₁-7SBS”

B 50/70 saf bitüm + %3 EVA- “B₁-3EVA”

B 50/70 saf bitüm + %4 EVA- “B₁-4EVA”

B 50/70 saf bitüm + %5 EVA- “B₁-5EVA”

B 50/70 saf bitüm + %6 EVA- “B₁-6EVA”

B 50/70 saf bitüm + %7 EVA- “B₁-7EVA”

B 160/220 saf bitüm- “B₂”

B 160/220 saf bitüm + %3 TDV- “B₂-3TDV”

B 160/220 saf bitüm + %4 TDV- “B₂-4TDV”

B 160/220 saf bitüm + %5 TDV- “B₂- 5TDV”

B 160/220 saf bitüm + %6 TDV- “B₂-6TDV”

B 160/220 saf bitüm + %7 TDV- “B₂-7TDV”

B 160/220 saf bitüm + %3 SBS- “B₂-3SBS”

B 160/220 saf bitüm + %4 SBS- “B₂-4SBS”

B 160/220 saf bitüm + %5 SBS- “B₂-5SBS”

B 160/220 saf bitüm + %6 SBS- “B₂-6SBS”

B 160/220 saf bitüm + %7 SBS- “B₂-7SBS”

B 160/220 saf bitüm + %3 EVA- “B₂-3EVA”

B 160/220 saf bitüm + %4 EVA- “B₂-4EVA”

B 160/220 saf bitüm + %5 EVA- “B₂-5EVA”

B 160/220 saf bitüm + %6 EVA- “B₂-6EVA”

B 160/220 saf bitüm + %7 EVA- “B₂-7EVA”

5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, B50/70 (B_1) ve B160/220 (B_2) olmak üzere iki farklı penetrasyon sınıfına sahip olan bitümlere farklı yüzdelerde TDV, SBS ve EVA katkısı ilave edilmek suretiyle hazırlanan modifiye bağlayıcılar üzerinde geleneksel ve Superpave deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan deney programı sonucunda, TDV katkının bitüm içerisindeki kullanılabilirliği reolojik ve fiziksel olarak incelenmiş ve TDV katkılı bitümler ile SBS ve EVA katkılı bitümlere ait deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.1 Fiziksel deney sonuçları

Çalışmada, üç farklı polimer katkının TDV, SBS ve EVA olmak üzere iki farklı bitüm üzerindeki etkisi fiziksel deneyler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Fiziksel deneyler penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi olmak üzere ve bu iki deneyin sonuçlarını kullanarak elde edilen PI değerini kapsamaktadır. Penetrasyon deneyi bitümün sertliğini ve kıvamını ölçmektedir. Bunun yanı sıra, bitümün yumuşama derecesine ulaştığı sıcaklık yumuşama noktası olarak ifade edilmektedir. PI değeri ise bitümün sıcaklığa duyarlılığının göstergesi olarak tanımlanmaktadır.

B_1 ve TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlere uygulanan fiziksel deney sonuçları Çizelge 5.1-5.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, her üç katkı B_1 bitümün penetrasyonunu düşürmüş ve aynı zamanda yumuşama noktası ve PI değerinin artmasını sağlamıştır. Tüm katkılar bitümün penetrasyonunu yaklaşık aynı miktarda düşürerek benzer sertliğe sahip olmuştur. Ancak, yumuşama noktası ve PI değerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlerde katkı yüzdesi arttıkça yumuşama noktası artmış ve her katkının maksimum yumuşama noktası değeri sıra ile B_1 -7SBS, B_1 -7EVA ve B_1 -7TDV numuneleri olmak üzere 70, 63 ve 56 °C olmuştur. Böylece en yüksek yumuşama noktası SBS katkısına ve en düşük ise TDV katkısına ait olmuştur.

PI değerlerine bakıldığında, B₁ bitümün PI değeri -3,03 olarak ısıya duyarlı olduğu meydana çıkmış ancak polimer katkılarının ilavesiyle sıcaklığa hassasiyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm katkıların en düşük modifikasyon seviyelerinde (%3) sadece B₁-3SBS numunesi PI değerinin standart sınırını ($-2 < PI < +2$) sağlamıştır. Ancak, katkı yüzdeleri arttıkça numunelerin hepsi PI değerinin sınırını sağlamıştır. Sonuç olarak, her katkı ayrı ayrı kıyaslandığında maksimum PI değeri sıra ile B₁-7SBS, B₁-7EVA ve B₁-7TDV numuneleri olmak üzere 1,53, 0,42 ve -0,91 olmuştur. PI değerinin -2'den az olduğu bitümün ısıya daha çok duyarlı olduğu ve +2'den fazla olduğu bitümün okside olduğu anlamına gelmektedir (Hunter, Andy Self and John Read, 2015).

Çizelge 5.1 TDV katkılı B₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₁	52	43	-3.03
B ₁ -3TDV	40	46	-2.68
B ₁ -4TDV	35	49	-2.18
B ₁ -5TDV	33	52	-1.59
B ₁ -6TDV	30	53	-1.54
B ₁ -7TDV	30	56	-0.91

Çizelge 5.2 SBS katkılı B₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₁	52	43	-3.03
B ₁ -3SBS	37	50	-1.83
B ₁ -4SBS	37	51	-1.6
B ₁ -5SBS	36	55	-0.76
B ₁ -6SBS	32	61	0.19
B ₁ -7SBS	29	70	1.53

Çizelge 5.3 EVA katkılı B₁ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₁	52	43	-3.03
B ₁ -3EVA	38	49	-2.02
B ₁ -4EVA	35	53	-1.25
B ₁ -5EVA	32	56	-0.78
B ₁ -6EVA	31	61	0.12
B ₁ -7EVA	30	63	0.42

B₂ ve TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlere uygulanan fiziksel deney sonuçları Çizelge 5.4-5.6'da verilmiştir. Her üç polimer katkısının eklenmesiyle B₂ bitümün penetrasyonu önemli derecede azalmış ve yumuşama noktası artmıştır. Bu, polimer katkıların bitümü sertleştirdiğini ifade etmektedir. Bitüme az miktarda katkı eklendiğinde, B₂ bitümün penetrasyonu önemli derecede azalmakta, ancak katkı yüzdelerinin artmasıyla penetrasyonun düşüş eğilimi azalmaktadır. Aynı zamanda penetrasyon sonucunun tersine, yumuşama noktası değeri penetrasyonun düşüş miktarına göre daha az etkilenmiş ve daha az artış eğilimi göstermiştir. Katkılar birbirleriyle kıyaslandığında, en düşük penetrasyona B₂-7TDV numunesi ve en yüksek yumuşama noktasına B₂-7EVA numunesi sahip olmuştur.

PI değerlerine bakıldığında, SBS ve EVA modifiyeli bitüm numunelerinin hepsi PI değeri standart sınırını sağlamıştır. Ancak, TDV modifiyeli numuneler B₂ bitümünü ısıya daha duyarlı kılmıştır. B₂ bitümün ısıya duyarlılığı 1,7 olarak belirlenmiştir. SBS ve EVA katkıları az miktar ilave edildiğinde bitümün sıcaklığa hassasiyetini arttırmış, ancak artan katkı yüzdelerde bitümün duyarlılığını pozitif yönde etkilemiştir ve standart sınıra dönmesine yardımcı olmuştur. TDV katkısı ise az miktarda bitüme eklendiğinde sıcaklığa hassasiyetini daha fazla arttırmış dolayısıyla katkı yüzdesi arttırıldığında bile standart sınıra ulaşmasına yetersiz kalmıştır ve ısıya daha duyarlı katkı olarak görülmüştür.

Çizelge 5.4 TDV katkılı B₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₂	162	36	1.7
B ₂ -3TDV	89	37	-3.98
B ₂ -4TDV	75	41	-2.89
B ₂ -5TDV	62	43	-2.67
B ₂ -6TDV	60	45	-2.14
B ₂ -7TDV	54	46	-2.09

Çizelge 5.5 SBS katkılı B₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₂	162	36	1.7
B ₂ -3SBS	118	42	-0.63
B ₂ -4SBS	103	44	-1.03
B ₂ -5SBS	74	45	-1.64
B ₂ -6SBS	72	55	0.93
B ₂ -7SBS	63	59	1.43

Çizelge 5.6 EVA katkılı B₂ bitümlerin fiziksel deney sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon, dmm	Yumuşama Noktası, °C	PI
B ₂	162	36	1.7
B ₂ -3EVA	90	46	-0.80
B ₂ -4EVA	80	57	1.70
B ₂ -5EVA	73	59	1.86
B ₂ -6EVA	63	61	1.84
B ₂ -7EVA	58	62	1.80

5.2 RTFO deney sonuçları

Orijinal (yaşlanmamış) saf ve katkılı bitümler üzerinde uygulanmış fiziksel (penetrasyon ve yumuşama noktası) deneylerin ardından dönel ince film etüvü (RTFO) deneyi yapılarak numuneler kısa süreli yaşlanmaya maruz kalmıştır. Yaşlanmaya maruz kalan numunelerin aromatikler gibi, hafif molekül ağırlıklı yapıların buharlaşmasını hızlandırması ve dolayısıyla daha fazla okside olması sonucunda kütle kaybı değeri Superpave şartnamesinde göre en fazla %1 olması gerekmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

5.7 Modifiye edilmiş B₁ bitümlerin kütle kaybı deney sonuçları

Katkı Türü	Şartname sınırı (%)	Kütle kaybı değerleri, %					
		B ₁ -%0	B ₁ -%3	B ₁ -%4	B ₁ -%5	B ₁ -%6	B ₁ -%7
TDV	Kütle	0.25	0.23	0.20	0.18	0.18	0.17
SBS	Kayıbı	0.25	0.19	0.16	0.14	0.11	0.08
EVA	maks. 1.0	0.25	0.22	0.20	0.19	0.17	0.16

5.8 Modifiye edilmiş B₂ bitümlerin kütle kaybı deney sonuçları

Katkı Türü	Şartname sınırı (%)	Kütle kaybı değerleri, %					
		B ₂ -%0	B ₂ -%3	B ₂ -%4	B ₂ -%5	B ₂ -%6	B ₂ -%7
TDV	Kütle Kaybı maks. 1.0	0.46	0.43	0.36	0.34	0.31	0.30
SBS		0.46	0.40	0.34	0.31	0.28	0.25
EVA		0.46	0.45	0.43	0.40	0.40	0.37

TDV, SBS ve EVA katkıları ile modifiye edilmiş B₁ ve B₂ bitümlerin kütle kaybı değerleri sıra ile Çizelge 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. Kısa süreli yaşlandırılmış B₁ ve B₂ bitümlerin kütle kaybı değerleri sıra ile %0,25 ve %0,46 olarak belirlenmiştir. Her iki bitüme farklı katkıların ağırlıkça arttırıldığında kütle kaybı değerleri tüm modifiyeli bitümlerde azalmıştır ve dolayısıyla şartnamedeki maksimum %1 limiti sağlanmıştır. Bu, TDV, SBS ve EVA katkılarının ilavesiyle bitümlerin yaşlanmasına olumsuz etki teşkil etmemesi anlamına gelmektedir.

Bunun ardından, RTFO deneyiyle kısa süreli yaşlanmış saf ve modifiye bitümlerin üzerinde tekrar penetrasyon ve yumuşama deneyi gerçekleştirilerek numuneler üzerinde yaşlanma etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları daha önceden orijinal bitümler üzerinde elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede bitümlerde kısa süreli yaşlanma sonrasında aşırı sertleşmelerin veya bozulmaların meydana gelip gelmediği tespit edilebilmektedir. Gerekli kıyaslamaların yapılması için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından verilen şartname limitleri kullanılmıştır. Buna göre, yaşlandırma sonrasındaki yumuşama noktasının kabul edilebilir değerleri orijinal numuneler üzerinde bulunan yumuşama noktası değerlerinin en fazla 5°C altında veya 12°C üzerinde olabilmektedir. Kısa süreli yaşlanma sonrasındaki penetrasyon değerlerinin orijinal (yaşlanmamış) penetrasyon değerlerine bölünüp yüze çarpılması ile de “kalan penetrasyon” (retained penetration) değeri hesaplanmaktadır. Şartnameye göre genel olarak kalan penetrasyon değeri ise en az %50 olması gerekmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

Çizelge 5.9 TDV katkılı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3TDV	B ₁ -4TDV	B ₁ -5TDV	B ₁ -6TDV	B ₁ -7TDV
Orijinal	52	40	35	33	30	30
Yaşlanmış	45	32	26	22	19	20
Kalan pen. %	86	80	74	66	63	66

Çizelge 5.10 TDV katkılı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3TDV	B ₁ -4TDV	B ₁ -5TDV	B ₁ -6TDV	B ₁ -7TDV
Orijinal	43	46	49	52	53	56
Yaşlanmış	46	47	50	54	55	60
Fark	3	1	1	2	2	4

Çizelge 5.11 SBS katkılı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3SBS	B ₁ -4SBS	B ₁ -5SBS	B ₁ -6SBS	B ₁ -7SBS
Orijinal	52	37	37	36	32	29
Yaşlanmış	45	29	28	25	19	15
Kalan pen. %	86	78	76	69	59	52

Çizelge 5.12 SBS katkılı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3SBS	B ₁ -4SBS	B ₁ -5SBS	B ₁ -6SBS	B ₁ -7SBS
Orijinal	43	50	51	55	61	70
Yaşlanmış	46	52	52	58	65	76
Fark	3	2	1	3	4	6

Çizelge 5.13 EVA katkı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3EVA	B ₁ -4EVA	B ₁ -5EVA	B ₁ -6EAV	B ₁ -7EVA
Orijinal	52	38	35	32	31	30
Yaşlanmış	45	31	26	21	16	12
Kalan pen. %	86	81	74	66	52	40

Çizelge 5.14 EVA katkı B₁ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₁	B ₁ -3EVA	B ₁ -4EVA	B ₁ -5EVA	B ₁ -6EAV	B ₁ -7EVA
Orijinal	43	49	53	56	61	63
Yaşlanmış	46	49	53	57	63	65
Fark	3	0	0	1	2	2

Çizelge 5.15 TDV katkı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3TDV	B ₂ -4TDV	B ₂ -5TDV	B ₂ -6TDV	B ₂ -7TDV
Orijinal	162	89	75	62	60	54
Yaşlanmış	147	76	59	44	40	33
Kalan pen. %	91	85	79	70	66	61

Çizelge 5.16 TDV katkı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3TDV	B ₂ -4TDV	B ₂ -5TDV	B ₂ -6TDV	B ₂ -7TDV
Orijinal	36	37	41	43	45	46
Yaşlanmış	40	37	42	45	47	50
Fark	4	0	1	2	2	4

Çizelge 5.17 SBS katkılı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3SBS	B ₂ -4SBS	B ₂ -5SBS	B ₂ -6SBS	B ₂ -7SBS
Orijinal	162	118	103	74	72	63
Yaşlanmış	147	98	78	48	45	34
Kalan pen. %	91	83	75	65	62	54

Çizelge 5.18 SBS katkılı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3SBS	B ₂ -4SBS	B ₂ -5SBS	B ₂ -6SBS	B ₂ -7SBS
Orijinal	36	42	44	45	55	59
Yaşlanmış	40	44	46	48	60	66
Fark	4	2	2	3	5	6

Çizelge 5.19 EVA katkılı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait penetrasyon değerleri

Penetrasyon (dmm)	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3EVA	B ₂ -4EVA	B ₂ -5EVA	B ₂ -6EAV	B ₂ -7EVA
Orijinal	162	90	80	73	63	58
Yaşlanmış	147	71	55	40	32	26
Kalan pen. %	91	79	69	55	51	44

Çizelge 5.20 EVA katkılı B₂ bitümlerin orijinal ve yaşlandırılmış numunelerine ait yumuşama noktası değerleri

Yumuşama noktası, °C	Bitüm Türü					
	B ₂	B ₂ -3EVA	B ₂ -4EVA	B ₂ -5EVA	B ₂ -6EAV	B ₂ -7EVA
Orijinal	36	46	57	59	61	62
Yaşlanmış	40	46	58	59	63	65
Fark	4	0	1	0	2	3

Çizelge 5.9-5.20’de TDV, SBS ve EVA katkılı her iki bitümlerin yaşlandırılmadan önce (orijinal) ve yaşlandırıldıktan sonraki penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri ve ayrıca bu iki değerin arasındaki farklar verilmiştir. Yaşlandırma işlemi sonrasında yumuşama noktasında meydana gelen değişiklikler incelendiğinde, genel olarak bitüm numunelerinin standartları sağladığı görülmektedir. Hem B₁ ve hem B₂ bitümlerinde sadece %7 EVA katkılı bitümünün kalan penetrasyon değerleri sıra ile 40 ve 44 olarak %50 kriterinin altında kalarak standardı sağlamadığı tespit edilmiştir. Katkı türlerinin bazı yüzdelerinde standartlar sağlanmasa da genel olarak diğer yüzdelerin şartname kriterlerine uygun olduğu görülmüştür. Bu sonuç, TDV, SBS ve EVA katkı türleri ile elde edilen B₁ ve B₂ bitümlerde kısa süreli yaşlanma sonucunda aşırı sertleşmelerin meydana gelmeyeceğini ifade etmektedir. Benzer şekilde yumuşama noktası değerleri de incelendiğinde hemen hemen tüm katkı türlerinde yaşlandırma sonrasında en az -5 °C/ +12 °C standart kriterinin korunduğu tespit edilmiştir. Bu bitümün servis öncesi yaşlanmayı temsil eden kısa süreli yaşlanma nedeniyle çok katı kıvamlara ulaşmayacağını ortaya koymaktadır.

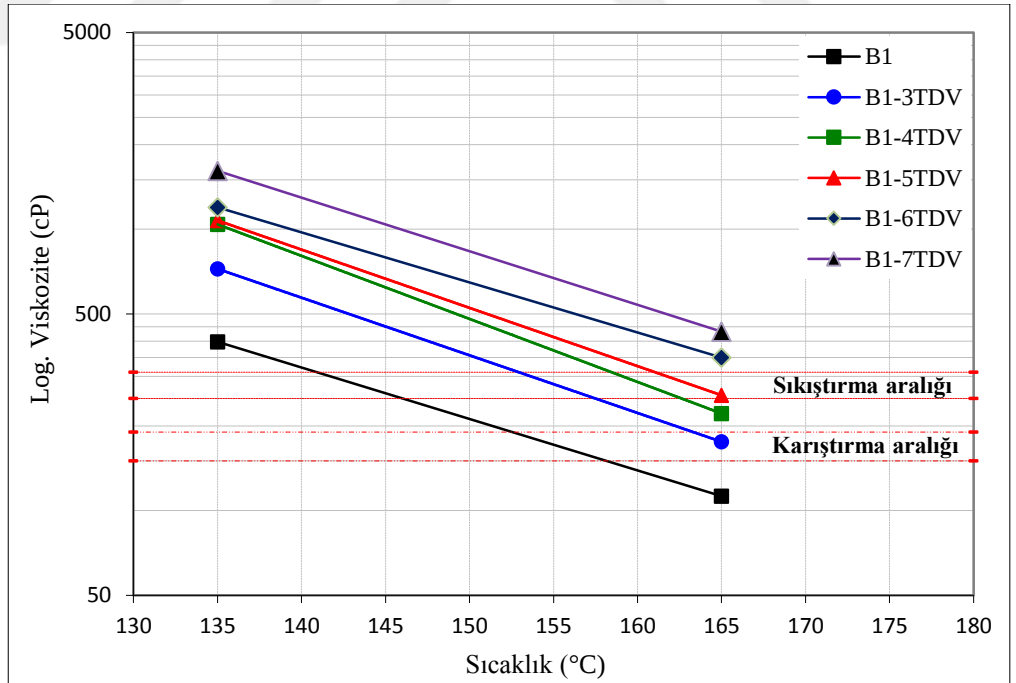
5.3 Dönel viskozite (RV) deney sonuçları

Bitümün yüksek sıcaklıktaki viskozitesi, işlenebilirlik sıcaklığına varılması için önemli bir özellik olarak kabul edilmektedir. Çünkü bitüm asfalt karışım şantiyesinde pompalanma kabiliyetini sağlamaktadır (Günay, 2016). Böylece, bitüm BSK içinde agregayı iyice kaplar ve daha ideal şartlarda yerleştirilmesine ve sıkıştırılmasına yardımcı olarak kaliteli bir kaplama yüzeyi oluşturabilir. Çalışma kapsamında TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ ve B₂ bitümünün yüksek sıcaklıktaki (135°C ve 165°C)’deki viskozite değerleri tespit edilmiş, TDV modifiyeli B₁ bitüme ait viskozite değerleri Çizelge 5.21 ve Şekil 5.1’de, SBS modifiyeli B₁ bitümünün viskozite değerleri Çizelge 5.22 ve Şekil 5.2’de, ve EVA modifiyeli B₁ bitümünün viskozite değerleri Çizelge 5.23 ve Şekil 5.3’de verilmiştir. Çizelgelerde ayrıca, bitümünün 135°C ve 165°C’deki viskozite değerleri aracılığıyla viskozite

indeksleri ve excel programı yardımıyla hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da verilmiştir.

Çizelge 5.21 TDV modifiyeli B₁ bitümlerin viskozite değerleri

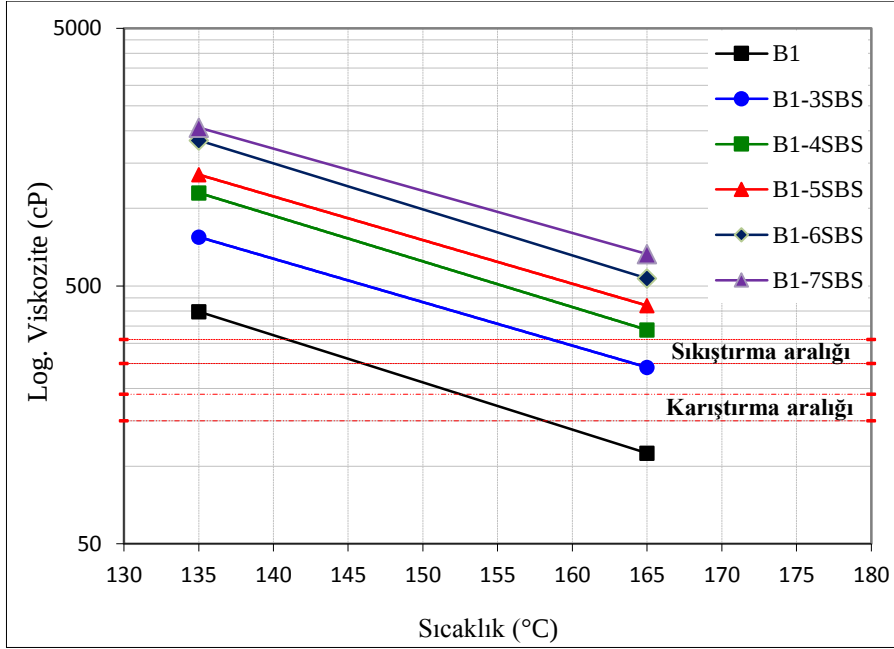
Bitüm Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B ₁	398	112,5	1,00	1,00	153-158	141-146
B ₁ -3TDV	723	175,5	1,81	1,56	164-169	153-158
B ₁ -4TDV	1040	221,5	2,61	1,96	165-169	155-160
B ₁ -5TDV	1074	257	2,70	2,28	170-175	160-164
B ₁ -6TDV	1196	350	3,00	3,11	180-185	168-173
B ₁ -7TDV	1613	433	4,05	3,84	183-188	172-177



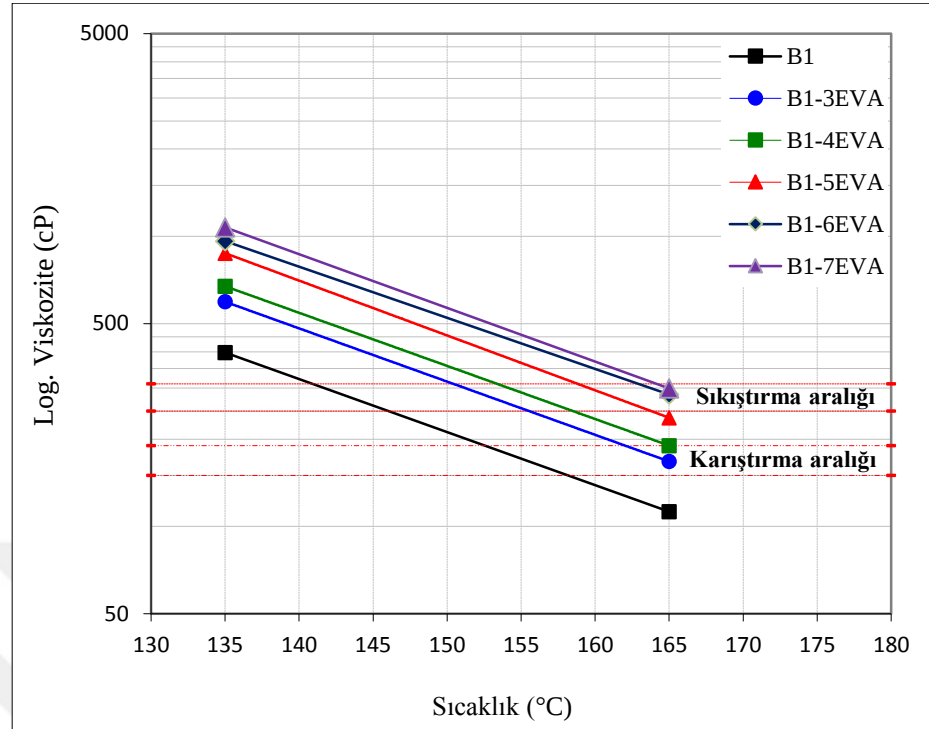
Şekil 5.1 TDV modifiyeli B₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi

Çizelge 5.22 SBS modifiyeli B₁ bitümlerin viskozite değerleri

Bitüm Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B ₁	398	112,5	1,00	1,00	153-158	141-146
B ₁ -3SBS	775	242	1,95	2,15	170-176	158-163
B ₁ -4SBS	1149	338	2,89	3,00	178-184	166-171
B ₁ -5SBS	1352	420	3,40	3,73	185-191	173-178
B ₁ -6SBS	1836	535	4,62	4,76	191-196	179-184
B ₁ -7SBS	2061	665	5,18	5,91	197-203	184-189

Şekil 5.2 SBS modifiyeli B₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisiÇizelge 5.23 EVA modifiyeli B₁ bitümlerin viskozite değerleri

Bitüm Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135°C	165°C	135°C	165°C		
B ₁	398	112,5	1,00	1,00	153-158	141-146
B ₁ -3EVA	595	167,5	1,50	1,49	163-169	151-156
B ₁ -4EVA	673	190	1,69	1,69	166-171	154-159
B ₁ -5EVA	875	237	2,20	2,11	168-174	157-162
B ₁ -6EVA	964	285	2,42	2,53	173-179	161-167
B ₁ -7EVA	1075	299	2,70	2,66	174-180	163-168



Şekil 5.3 EVA modifiyeli B₁ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi

Farklı oranlarda TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlerin 135°C ve 165°C'deki dönel viskozite (RV) deney sonuçlarına göre; B₁ bitüme artan miktarlarda (%3, %4, %5, %6 ve %7) TDV, SBS ve EVA modifiyeri ilavesinin bitümün viskozite değerini sürekli olarak arttırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.21-5.23'te verilen TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ bitümlere ait viskozite değerleri kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Ancak artış miktarı ve eğilimi açısından bazı farklılıklar sergilenmektedir.

B₁ bitümün 135°C'deki viskozite değeri 398 cP iken, her üç modifiyerin en düşük oranda kullanımında (%3), viskozite değerlerinde ani bir artışın meydana gelmesiyle B₁-3TDV'nin viskozite değeri 723 cP olarak B₁ bitüme göre oranla 1,81 katı artış, B₁-3SBS bitümün viskozite değeri 775 cP olarak B₁ bitüme göre oranla 1,95 katı artış ve B₁-3EVA bitümü için ise bu değer 595 cP olarak B₁ bitüme göre

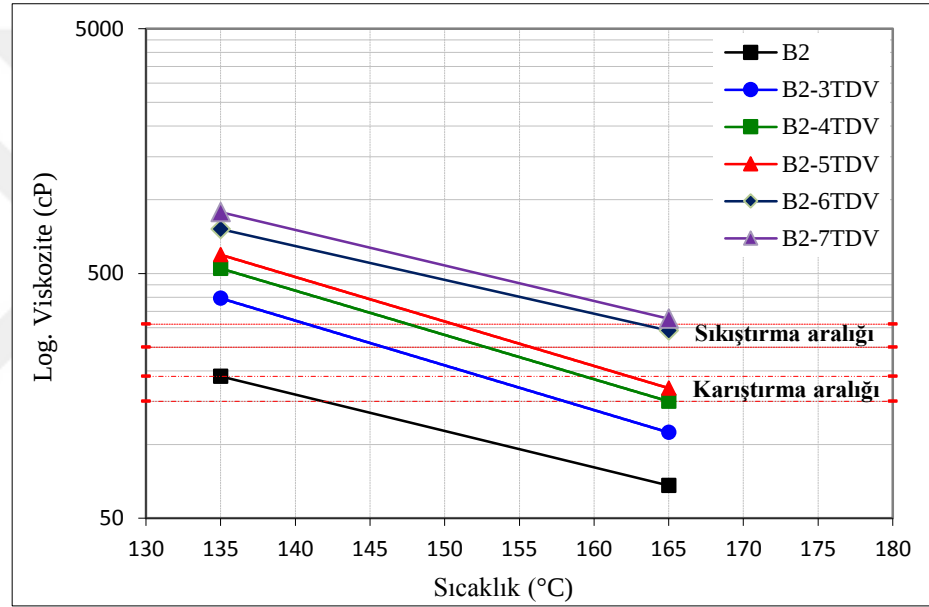
oranla 1,50 katı artış göstermiştir. Dolayısıyla 135°C’de en düşük miktarda modifiyer katkı ilave edildiğinde, viskozite değerinde en düşük artış B₁-3EVA ve en yüksek artış B₁-3SBS numunelerine ait olmuştur. Bitümlerde en yüksek oranda katkı kullanımında (%7), viskozite miktarları her katkı için en yüksek değeri ortaya konmasıyla B₁-3TDV'nin viskozite değeri 1613 cP olarak B₁ bitüme göre oranla 4,05 katı, B₁-3SBS bitümün viskozitesi 2061 cP olarak B₁ bitüme göre oranla 5,18 katı ve B₁-3EVA bitümü için ise bu değer 1075 cP olarak B₁ bitüme göre oranla 2,70 katı artış göstermiştir. Benzer şekilde, 165°C’deki viskozite değerlerinde de 135°C’de olduğu gibi katkılar arasında aynı artış sırası tespit edilmiştir.

TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ bitümler ile BSK’lar için hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde (Şekil 5.1-5.3), viskozite değerleriyle doğru orantılı modifiye bitümlerin B₁ bitüme oranla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da artışlar gözlemlenmiştir. Bu artış, modifiye bitümlerin sıcaklığa duyarlılığını önemli derecede düşürdüğünü ve bitümlerin sertleştiği anlamına gelmektedir. Örneğin, B₁ bitümün karıştırma sıcaklığı 153-158°C iken sıkıştırma sıcaklığı 141-146°C, B₁-7TDV bitümün karıştırma sıcaklığı 183-188°C iken sıkıştırma sıcaklığı 172-177°C, ve B₁-7SBS bitümün karıştırma sıcaklığı 197-203°C iken sıkıştırma sıcaklığı 184-189°C olarak hesaplandığı için TDV ve SBS modifiyeli bitümlerin yüksek oranlarda (yüzde 5, 6 ve 7 gibi) B₁ bitüme ilave edilmesi genel olarak katkı üreticileri ve araştırmacılar tarafından önerilen maksimum 175-180 °C civarında olması gerekliliğinden dolayı daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerine ulaştığında uygulama sırasında harcanacak olan enerji miktarının artması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, ağırlıkça %6 ve %7 TDV ve ağırlıkça %5, %6 ve %7 SBS modifiyeli B₁ bitümlerden daha düşük oranlarda kullanılmasının gerekliliği tespit edilmiştir.

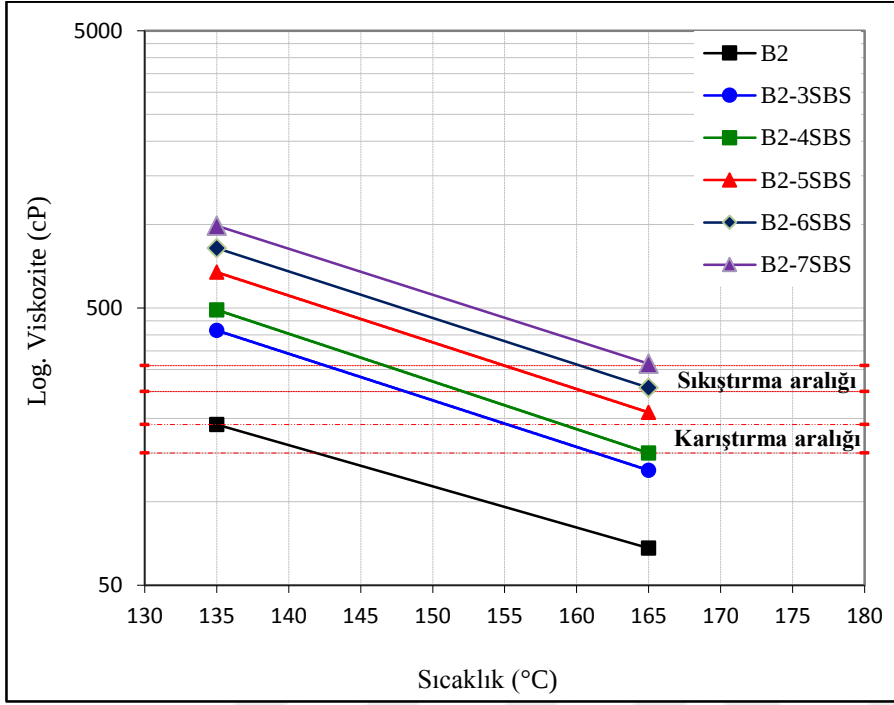
TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₂ bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının hesaplanması için çizilen log-viskozite-sıcaklık eğrisi Şekil 5.4-5.6’da ve dönel viskozite değerleri Çizelge 5.24-5.26’da verilmiştir.

Çizelge 5.24 TDV modifiyeli B₂ bitümlerin viskozite değerleri

Bitüm Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B ₂	190	68	1,00	1,00	136-143	122-128
B ₂ -3TDV	396	112	2,08	1,65	153-158	141-146
B ₂ -4TDV	524	150	2,76	2,20	158-164	147-152
B ₂ -5TDV	596	170	3,14	2,50	162-167	150-155
B ₂ -6TDV	760	293	4,00	4,30	178-185	162-169
B ₂ -7TDV	890	327	4,68	4,80	183-190	168-175

Şekil 5.4 TDV modifiyeli B₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisiÇizelge 5.25 SBS modifiyeli B₂ bitümlerin viskozite değerleri

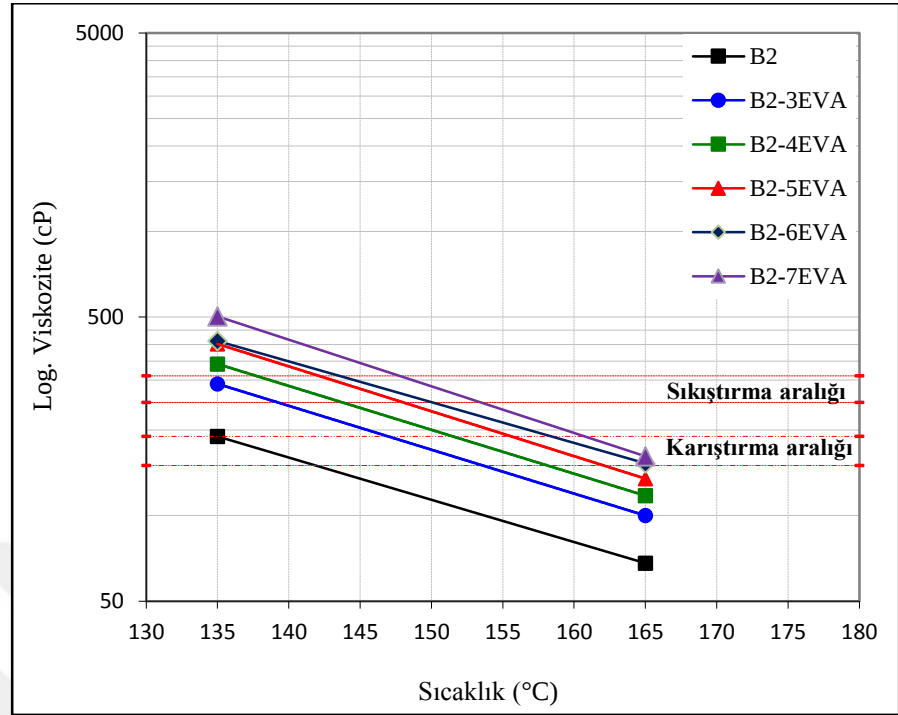
Bitüm Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B ₂	190	68	1,00	1,00	136-143	122-128
B ₂ -3SBS	415	130	2,18	1,65	154-160	141-147
B ₂ -4SBS	493	150	2,59	2,20	158-163	145-151
B ₂ -5SBS	673	210	3,54	2,50	167-173	154-160
B ₂ -6SBS	823	258	4,33	4,30	172-178	159-165
B ₂ -7SBS	990	315	5,21	4,80	179-185	166-172



Şekil 5.5 SBS modifiyeli B₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi

Çizelge 5.26 EVA modifiyeli B₂ bitümlerin viskozite değerleri

BitümTürü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Karıştırma Aralığı (°C)	Sıkıştırma Aralığı (°C)
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C		
B ₂	190	68	1,00	1,00	136-143	122-128
B ₂ -3EVA	291	100	1,53	1,47	145-152	132-138
B ₂ -4EVA	342	118	1,80	1,73	150-156	136-142
B ₂ -5EVA	402	135	2,12	1,98	157-164	144-150
B ₂ -6EVA	412	153	2,16	2,25	159-166	144-150
B ₂ -7EVA	503	162	2,65	2,38	160-166	147-152



Şekil 5.6 EVA modifiyeli B₂ bitümlerin log-viskozite-sıcaklık eğrisi

TDV modifiyeli B₂ bitümlerin üzerinde 135°C ve 165°C’de gerçekleşmiş olan dönel viskozite (RV) deney sonuçlarına göre; saf bitüme ağırlıkça (yüzde 3, 4, 5, 6 ve 7) TDV modifiyeri ilavesi ile bitümün viskozite değerlerinde önemli ölçüde artışlar gözlemlenmiştir (Şekil 5.4 ve Çizelge 5.24). Örneğin %5 TDV modifiyer ilavesiyle, B₂ bitümün 135°C’deki viskozite değeri 190 cP’den 596cP’ye yükselirken, 165°C’de ise 68 cP’den 170 cP’ye yükselmiştir. Aynı şekilde TDV modifiyeli bitümlerin B₂ bitüme oranla yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sağlanmıştır.

Bunun yanı sıra, TDV modifiyerinde olduğu gibi SBS modifiyerinin de bitümün viskozitesini arttırdığı ve dolayısıyla sertleştirdiği görülmektedir. Ancak, TDV modifiyeli bitümde meydana gelen artıştan daha fazla artış görülmektedir.

%7 SBS modifiyeri ilavesi 135°C’de 190cP olan B₂ bitümü viskozite değerini 990 cP’ye çıkarırken, 165°C’de ise 68cP’den 315cP’e yükseltmiştir (Şekil 5.5 ve

Çizelge 5.25). Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da benzer şekilde artışlar ortaya çıkmıştır. Örneğin, B₂ bitümün karıştırma sıcaklığı 136-143°C, sıkıştırma sıcaklığı 122-128°C iken, B₂-7SBS bitümün karıştırma sıcaklığı 179-185°C, sıkıştırma sıcaklığı ise 166-172°C olarak elde edilmiştir. Her üç katkı ile modifiye edilen bitümler birbirleriyle kıyaslandığında TDV ve SBS modifiyeli bitümlerin viskozitelerinin tüm katkı oranlarında her iki sıcaklık için yaklaşık benzer değerlere sahip olduğu, buna karşın B₂-7EVA bitümün 135°C sıcaklıktaki viskozitesi 503cP iken (Şekil 5.6 ve Çizelge 5.26), aynı sıcaklıkta ve katkı oranında B₂-7TDV ve B₂-7SBS bitümlerinin viskozite değerlerinden çok daha düşük (162cP) olduğu belirlenmiştir.

5.4 Dinamik kayma reometresi (DSR) deney sonuçları

Çalışmada referans katkıları olarak seçilen SBS ve EVA modifiyeli ve ana katkı olarak kullanılan geri dönüştürülmüş kompozit TDV modifiyeli B₁ ve B₂ bitümlü numuneler Anton Paar SmartPave Plus dinamik kayma reometresi (DSR) cihazıyla deneye tabi tutulmuştur. Deney hem yaşlandırılmamış (orijinal) ve hem yaşlandırılmış (RTFO) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve yüksek sıcaklık performans sonuçları ayrıntılı bir şekilde Ek 1.1-1.6 ve Şekil 5.7-5.12’de verilmiştir. Numunelerin kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) farklı sıcaklıklarda (46, 52, 58, 64, 70, 76, 82°C) belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Hem orijinal ve hem RTFO ile yaşlandırılmış TDV, SBS ve EVA modifiyeli numuneler incelendiğinde; katkıların ağırlıkça B₁ bitüme ilavesiyle kayma modülünde artış, faz açısında düşüş ve tekerlek izi parametresinde ise artış gözlenmiştir.

TDV modifiyeli B₁ bitümlü numuneler Ek 1.1’de gösterildiği gibi, TDV katkısının B₁ bitüme ağırlıkça %3 ilavesiyle kayma modülü ve tekerlek izi parametresinde artış ve faz açısında düşüş meydana gelmektedir. Örneğin, orijinal

B₁ bitümün PG sınıfı olan 64°C’de kayma modülü 1,4 kPa iken B₁-3TDV numunesinde 2,6 kPa; faz açısı B₁ bitümde 86,9 derece iken B₁-3TDV’de 86,5 derece olarak, tekerlek izi parametresi ise B₁ bitümde 1,40 kPa iken B₁-3TDV’de 2,56 kPa olarak belirlenmiştir. RTFO ile yaşlandırılmış numunelerde de olduğu gibi, TDV’nin az miktarda bitüme ilave edilmesi kayma modülünde artışı ile bitümün sertliğini ve faz açısında düşüşü ile elastisitesini arttırmakta ve bunun sonucunda tekerlek izi parametresini az miktarda arttırarak belirgin şekilde olmasa da malzemenin kalıcı deformasyonunda düşüş ortaya çıkmıştır. Ancak, katkı miktarının oranla artışı bu değişkenlerin performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Örneğin, orijinal B₁-7TDV numunesi 64°C’deki tekerlek izi parametresi 21,51 kPa ve RTFO ile yaşlandırılmış B₁-7TDV’nin ise 23,24 kPa olarak belirlenmiştir. Yüksek kayma modülü ve düşük faz açısı değeri daha yüksek tekerlek izi parametresi değerini sağlamaktadır, böylece bitümün kalıcı deformasyona karşı direncini iyileştirmiştir.

SBS modifiyeri B₁ bitüme ilave edildiğinde bitümün reolojik özelliklerini geliştirmiştir (Ek 1.2). TDV modifiyeli numunelerde olduğu gibi, SBS katkısının ağırlıkça %3 ilavesinde de B₁ bitüme göre kayma modülü ve tekerlek izi parametresinde artış ve faz açısında düşüş meydana gelmekte, ancak sıcaklığın artışı ile kayma modülü ve tekerlek izinde düşüş ve faz açısında artış ortaya çıkmaktadır. Katkı miktarı arttıkça bu özelliklerin artış eğilimi katkı artışıyla doğru orantılı olmuştur. Örneğin, orijinal B₁ bitümün PG sınıfı olan 64°C’de kayma modülü 1,4 kPa iken B₁-7SBS numunesinde 9,01 kPa; faz açısı B₁ bitümde 86,9 derece iken B₁-7SBS’de 57,4 derece olarak, tekerlek izi parametresi ise B₁ bitümde 1,40 kPa iken B₁-7SBS’de 10,70 kPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, RTFO ile yaşlandırılmış SBS modifiyeli numunelerinde reolojik özellikleri artmıştır. Örneğin, yaşlandırılmış B₁ bitümün PG sınıfı olan 64°C’de kayma modülü 4,1 kPa iken B₁-7SBS’de 15,93 kPa; faz açısı B₁ bitümde 84,6 derece iken B₁-7SBS numunesinde 62,1 derece olarak, tekerlek izi parametresi ise B₁ bitümde 4,07 kPa iken B₁-7SBS’de 18,02 kPa olarak belirlenmiştir.

TDV katkısı çalışmada referans katkı olarak kullanılan SBS ile kıyaslandığında; B₁ bitümün PG sınıfına ait olan sıcaklığı dikkate alınır, orijinal

B₁-7TDV numunenin 64°C’de kayma modülü değeri 17,3 kP iken B₁-7SBS’nin değeri 9,01 kPa olmuştur. Dolayısıyla, B₁-7TDV numunesinin sertliği B₁-7SBS’den daha yüksek görülmüştür. Malzemenin sertliği tekerlek izi parametresinin artışını sağlamış olsa da kayma modülünde aşırı artış daha düşük sıcaklıklarda çatlama bozulmalarını meydana getirebilir. Tersine, B₁-7TDV numunesinin faz açısı 53,5 derece olarak 62,1 derece olan B₁-7SBS numunesinden daha düşük olmuştur. Sonuç olarak, TDV’li numunenin tekerlek izi parametre değeri SBS’li numuneden daha fazla olmuştur. RTFO ile yaşlandırılmış numuneler aynı sıcaklıkta kıyaslandığında, B₁-7TDV ve B₁-7SBS numunelerin kayma modülü sıra ile 22,4 kP ve 15,93 kP olarak belirlenerek yaşlanma işleminden sonrada TDV’nin sertliği SBS’den fazla olmuştur. Faz açısı değerleri ise sıra ile 74,9 ve 62,1 derece olarak TDV’nin elastisitesinin SBS’den daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Neticede, TDV katkılı bitümlerin sertliği ve elastisitesi düşük sıcaklıklarda SBS katkılı numunelerden daha iyi olmasına rağmen yüksek sıcaklıkta birbirine yakın davranış sergilediği ortaya çıkmıştır.

EVA katkısı da aynı TDV ve SBS gibi ağırlıkça (%3, %4, %5, %6 ve %7) B₁ bitümüne ilave edilmesiyle bitümün reolojik özelliklerini geliştirmiş ve katkı oranı arttıkça bu iyileşme daha da artmıştır (Ek 1.3). Katkının az miktarda (%3) B₁ bitümüne ilave edilmesiyle bitümün kayma modülünü az miktarda arttırdığından tekerlek izi parametresini de az miktarda etkilemiş ve faz açısında ise düşüş meydana gelmiş ancak katkı oranı arttıkça daha belirgin miktarlarda bu özellikleri geliştirmiştir. Örneğin, orijinal B₁ bitümün PG sınıfı olan 64°C’de kayma modülü 1,4 kPa iken B₁-7EVA bitümünde 7,93 kPa; faz açısı B₁ bitümde 86,9 derece iken B₁-7EVA’da 63,9 derece olarak, tekerlek izi parametresi ise B₁ bitümde 1,40 kPa iken B₁-7EVA’da 7,1 kPa olarak belirlenmiştir. Çalışmada referans katkı olarak seçilen EVA ile ana katkı olarak kullanılan geri dönüştürülmüş TDV aynı katkı yüzdesi ve aynı sıcaklıkta kıyaslandığında, TDV modifiyerin kayma modülünün EVA’dan daha fazla olması, faz açısının daha düşük olması, dolayısıyla tekerlek izi değerinin daha fazla olması tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, aynı katkı türleri ve miktarları penetrasyon sınıfı B160/220 (B₂) ve PG sınıfı 52 olan orijinal ve RTFO ile yaşlandırılmış B₂ bitümü üzerinde

modifikasyon işlemi gerçekleştirilerek uygulanmış ve sonuçlar ayrıntılı şekilde Ek 1.4-1.6'da verilmiştir.

TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₂ bitümlü numuneler incelendiğinde; aynı katkı yüzdelерinde sıcaklığın artışı ile katkılı numunelerin kayma modülünde düşüş ve sonuç olarak tekerlek izi değeri azalması, ancak katkı oranı arttıkça numunelerin tekerlek izi değeri artmıştır. Bunun yanı sıra, aynı katkı yüzdelерinde sıcaklığın artışı ile numunenin faz açısında artış, ancak katkı oranı arttıkça numunelerin faz açısı değeri düşüşün meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklığın artışı ile faz açısı değeri artışı katkılı bitümlerin daha viskoz hale dönüştürür, katkı yüzdesinin artışı neticesinde düşüşü ise B₂ bitümlere elastik özellik kazandırır.

Katkılar yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) kıyaslanırsa, orijinal B₂ bitümün yüksek sıcaklık PG sınıfı 52°C'de TDV katkının kompleks kayma modülü değeri 4,5 kP; SBS katkının 6,1 kP; EVA katkının ise 7,1 kP olarak belirlenmiştir. Faz açısına gelindiğinde ise TDV, SBS ve EVA katkılarının faz açısı değeri sıra ile 85, 68,3 ve 63,7 derece olarak saptanmıştır. Böylelikle, EVA katkılı numunesi daha elastik özellik sergilemiştir. Bu sebeple, yaşlanmamış polimer modifiyeli bitümlerin tekerlek izi parametre değeri sıra ile B₂-7EVA > B₂-7SBS > B₂-7TDV olarak belirlenmiştir.

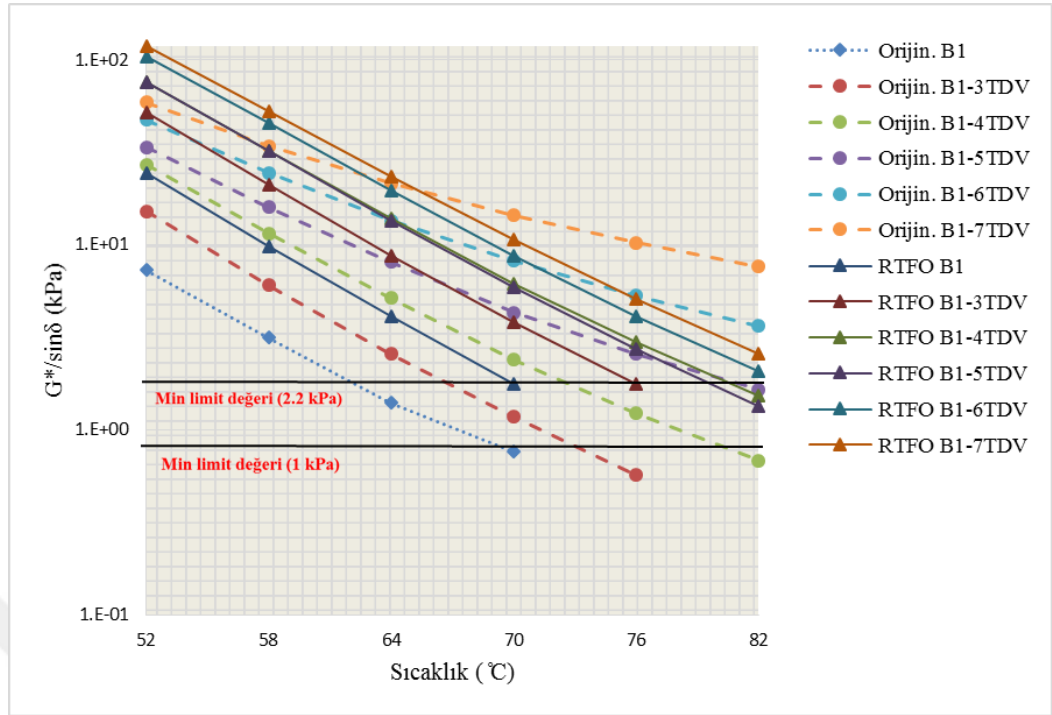
RTFO ile yaşlandırılmış B₂ bitümler yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) polimer katkılar arasında kıyaslamalar gerçekleştirildiğinde; 52°C'de tekerlek izi parametresi değeri sıralaması B₂-7TDV > B₂-7EVA > B₂-7SBS olarak tespit edilmiştir. Böylece, TDV katkılı bitüm kısa süreli yaşlanma sonrası sertliği ve elastik özelliği SBS ve EVA katkılı bitümlere kıyasen daha fazla artmıştır.

Sonuç olarak, Polimer katkılı bitümlerin kompleks kayma modüllerinde (G*) artış ve faz açısında (δ) meydana gelen azalma bitümlerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine ($G^*/\sin \delta$) karşı dayanım kazandığı ve TDV, SBS ve EVA katkılarıyla bitümlerin PG sınıflarını arttırdığını ortaya koymuştur.

5.4.1 Tekerlek izi parametresiyle yüksek sıcaklık PG sınıfının belirlenmesi

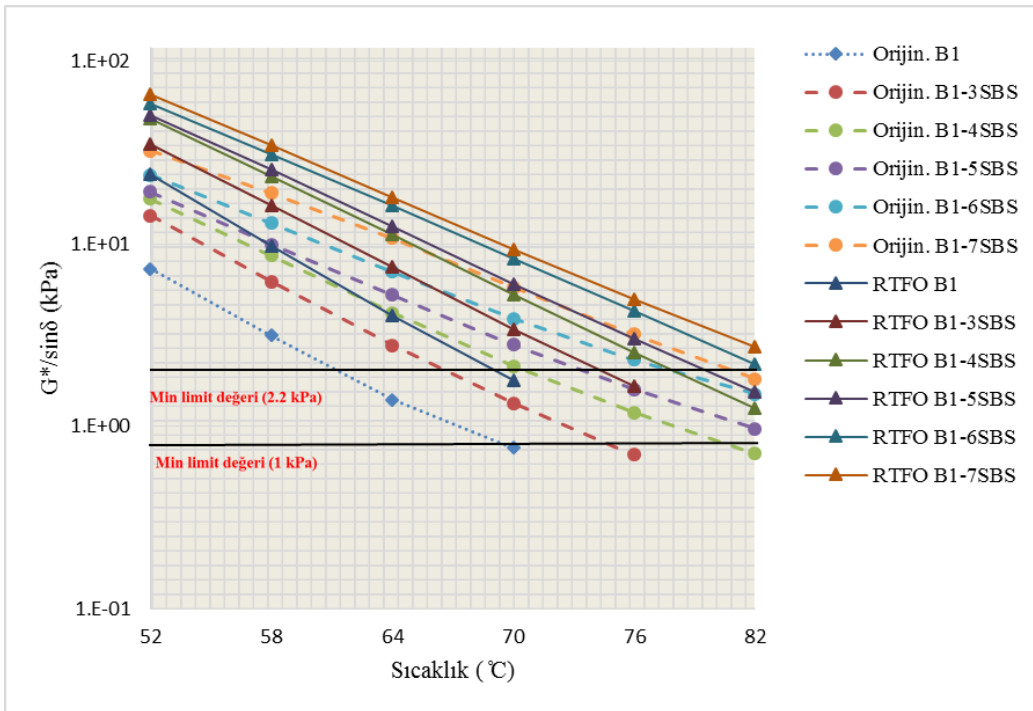
TDV, SBS ve EVA katkılı bitümlerin yüksek sıcaklık performans sınıflarını (PG-X) belirleyen tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) değerleri Ek 1.1-1.6 ve Şekil 5.7-5.12’de verilmiştir. PG sınıflarının belirlenmesi için yapılan DSR deneylerinde daha önce de belirtildiği üzere hem orijinal (yaşlandırılmamış) hem de RTFO ile kısa süreli yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. 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.

TDV modifiyeli bitümler incelendiğinde, hem orijinal ve hem yaşlandırılmış numunelerde katkı miktarlarının artmasıyla birlikte bitümlerin tekerlek izi parametrelerinde ($G^*/\sin\delta$) artışların ortaya çıkması gözlenmektedir (Şekil 5.7). Buna göre, hem orijinal ve hem yaşlandırılmış bitüm numunesinde %7 katkı oranında yüksek sıcaklık PG sınıfları en yüksek mertebe olan PG 82-Y olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra düşük katkı oranlarında dahi PG sınıfında artışlar sağlanmıştır. Buna göre %3 oranında TDV katkılı bitümün PG sınıfı B1 bitümün PG sınıfı PG 64-Y iken bir seviye yüksek olan PG 70-Y olarak belirlenmiştir. %5 ve %6 katkılı numunelerin ise her ikisinin yaşlanmamış performans sınıfları PG 82-Y olarak belirlenmişken, tekerlek izi parametre değerleri kısa süreli yaşlanma sonrası 82°C’de 2,2 kPa koşulunu sağlamadıklarından dolayı B₁-5TDV ve B₁-6TDV numunelerinin PG sınıfı her ikisinde de sağladığı bir alt sınıf, yani PG 76-Y olarak seçilmiştir. Bunun sebebi, TDV katkılı bitümlerin kısa süreli yaşlanma sonrası sıcaklığa duyarlılığının artması ve bunun da daha yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi parametresi değerinin düşmesine neden olması olabilmektedir. Sonuç olarak, B₁-3TDV; B₁-4TDV; B₁-5TDV; B₁-6TDV ve B₁-7TDV numunelerin yüksek sıcaklık performans sınıfları sıra ile PG 70-Y; PG 76-Y; PG 76-Y; PG 76-Y ve PG 82-Y olarak belirlenmiştir.

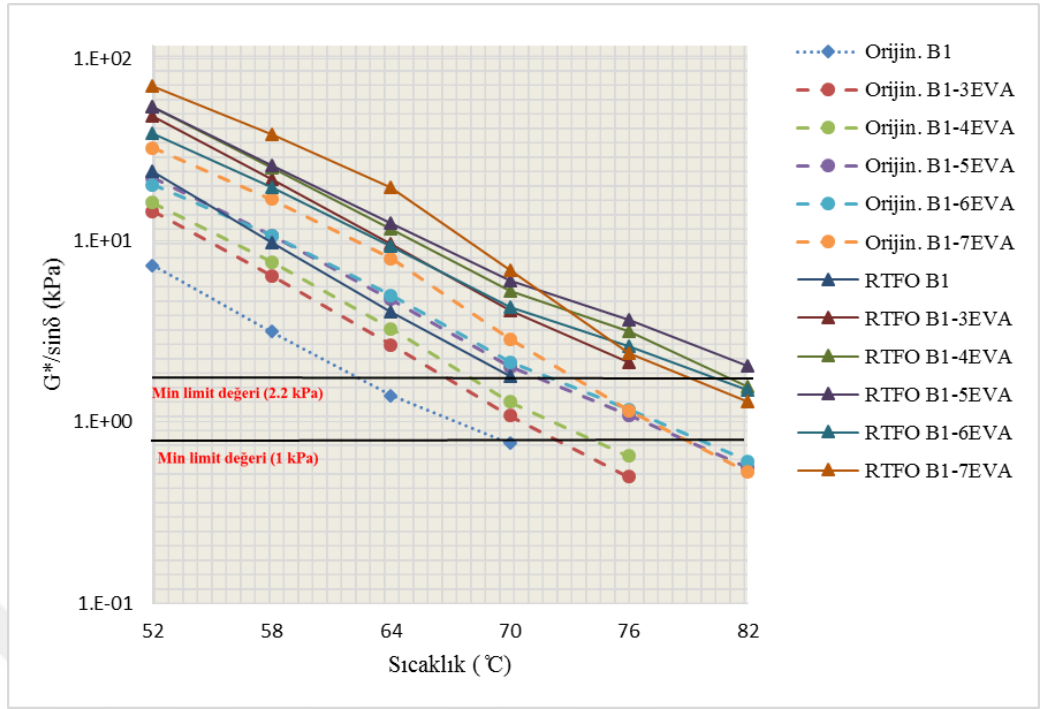


Şekil 5.7 TDV katkılı B₁ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı

SBS modifiyeli bitümler incelendiğinde hem orijinal ve hem yaşlandırılmış numunelerde katkı miktarlarının artmasıyla birlikte bitümlerin tekerlek izi parametrelerinde ($G^*/\sin\delta$) artışların ortaya çıkması gözlenmektedir (Şekil 5.8). Hem orijinal ve hem yaşlandırılmış numunelere ait tekerlek izi parametresi değerleri farklı olsa da bitümlerdeki modifikasyon seviyelerine göre, yüksek sıcaklık PG sınıfları her iki koşulu sağlayarak aynı sınıfta katmıştır. Ek 1.2 ve Şekil 5.8'de görüldüğü üzere %3 oranında SBS katkılı B₁ bitümün sınıfı PG 64-Y'den PG 70-Y'ye yükselmektedir. Bu sonuç, düşük modifikasyon yüzdelerinde dahi SBS katkısının yüksek PG sınıflarını arttırabildiği açısından ayrıca önem arz etmektedir. Dolayısıyla, B₁ bitümüne %4, 5, 6 ve 7 oranlarında SBS katkısı eklendiğinde yüksek sıcaklık PG sınıfları sıra ile PG 70-Y, PG-76-Y, PG-82-Y PG 82-Y olarak bulunmuştur.



Şekil 5.9 ve Ek 1.3’de EVA modifiyeli B1 bitümlere ait tekerlek izi parametresi sonuçları verilmiştir. Diğer modifiyerlerde de olduğu gibi bu modifiyerinde oranının artması tekerlek izi parametrelerini arttırmakta, Ancak EVA tüm modifiyerler içerisinde tekerlek izi değerini en az arttıran modifiyer türü olmaktadır. Katkı oranı %3 ve %4 olduğunda B1 bitümün PG sınıfı bir seviye artarak PG 70-Y belirlenmişken, %5, %6 ve %7 EVA modifiyeli bitümlerin performans sınıfları PG 76-Y şeklinde olmuştur. Bu üç yüzde için PG sınıfında artış olmaması tekerlek izi değerinin aynı bant aralığında kalmasından kaynaklanmaktadır.



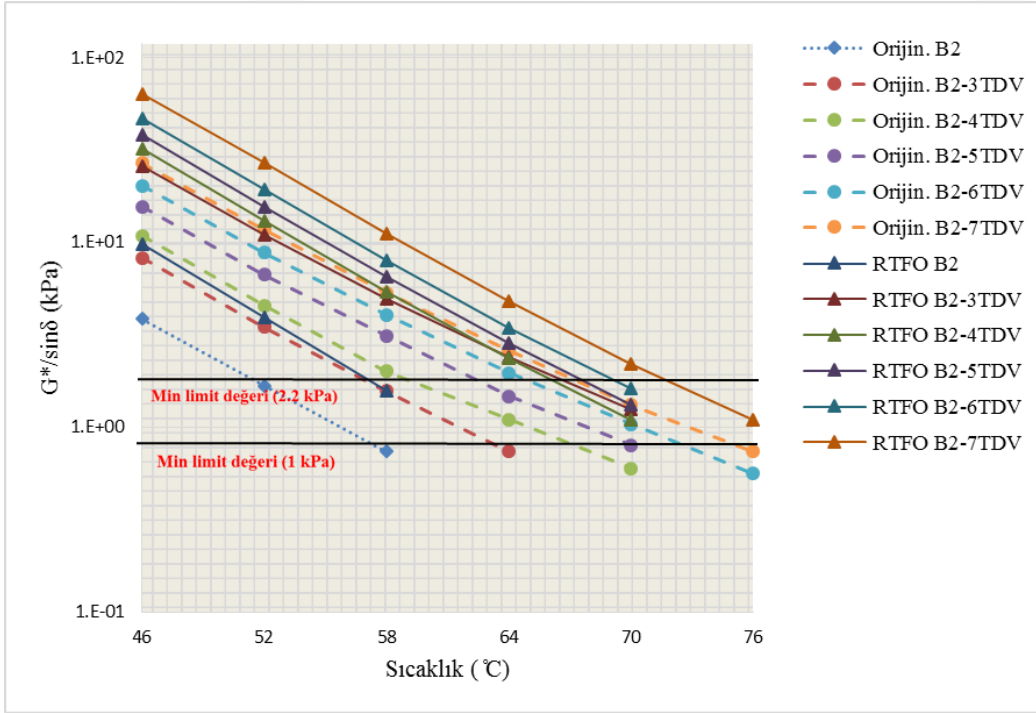
Şekil 5.9 EVA katkılı B₁ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı

Polimerlerin farklı penetrasyona sahip bitümlerde farklı davranış sergileyebilecek kapasitesini incelemek amacıyla çalışmada katkıların etkisi iki farklı penetrasyon sınıfına (B₁ ve B₂) sahip bitümler üzerinde incelenmiştir.

Polimer modifiyeli B₂ bitüme gelindiğinde; B₂ bitümün PG sınıfı PG 52-Y olarak belirlenmiş ve TDV, SBS ve EVA katkılı B₂ bitümlerin tekerlek izi parametresi Ek 1.4-1.6 ve Şekil 5.10-5.12'de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, tüm katkılarda modifikasyon seviyesinin artışı bağlayıcının sertliği (kayma gerilimine karşı direnci) ve elastisitesini artırarak performans sınıfının artmasına neden olmuştur.

TDV modifiyeli B₂ bitüm incelendiğinde, en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) B₂ bitümün PG sınıfı PG 52-Y'den PG 58-Y'e yükseltmiştir (Şekil 5.10). Bu sonuç, TDV katkısının az miktarlarda kullanıldığında da bitüm üzerinde etkili olduğu anlamına gelmektedir. %4, %5 ve %6 TDV modifiyeli B₂ bitümlerin

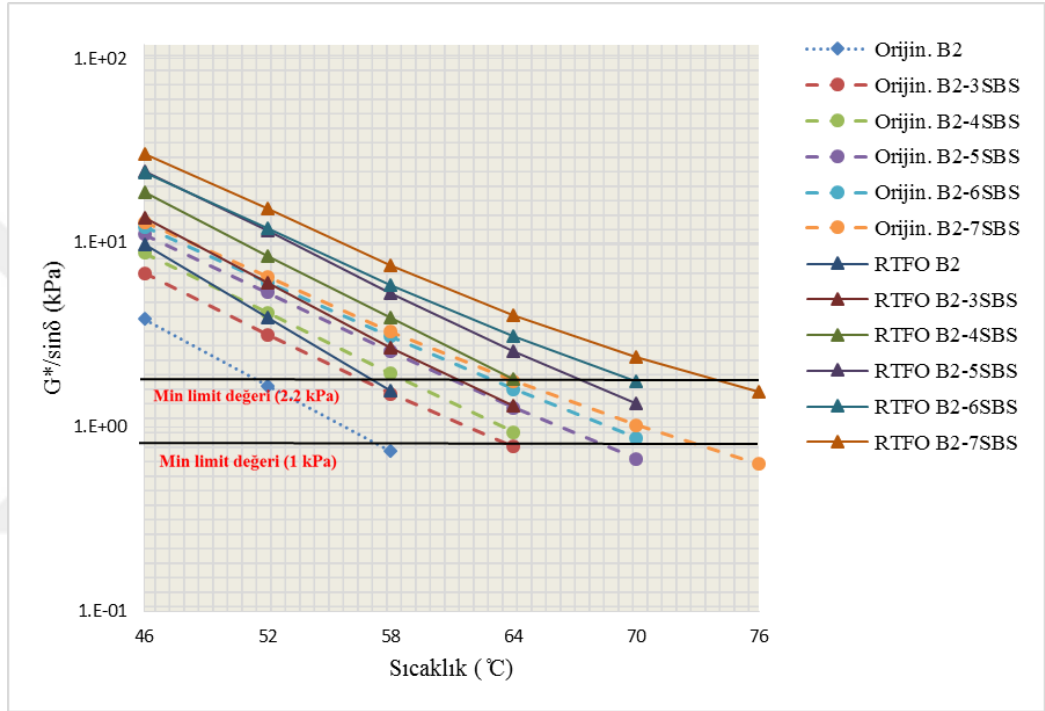
performans sınıfları PG 64-Y şeklinde olmuştur. Dolayısıyla, bu üç yüzde için PG sınıfında artış olmaması tekerlek izi değerinin aynı bant aralığında kalmasından kaynaklanmaktadır. Bunun ardından, en yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) performans sınıfında bir seviye artış sağlanarak PG 70-Y olarak belirlenmiştir. TDV katkılı B₂ bitümde olan performans sınıfındaki artış eğilimi en düşük katkı ağırlığında bir sınıf ve en yüksek katkı ağırlığında üç sınıf artış ile TDV katkılı B₁ bitüme benzer sonuç göstermiştir.



Şekil 5.10 TDV katkılı B₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı

Her polimer malzemede olduğu gibi SBS katkısının da artmasıyla B₂ bitümün tekerlek izi parametreleri artmaktadır (Şekil 5.11). Performans sınıfı PG 52-Y olan B₂ bitüm, B₂-3SBS ve B₂-7SBS numunelerinde sırasıyla PG-58'den PG-70 sınıfına yükselmiş ve en yüksek modifikasyon seviyesinde (B₂-7SBS) B₂ bitüme göre üç sınıf artış göstererek SBS modifiyeli B₁ bitüme benzer davranış sergilemiştir. SBS

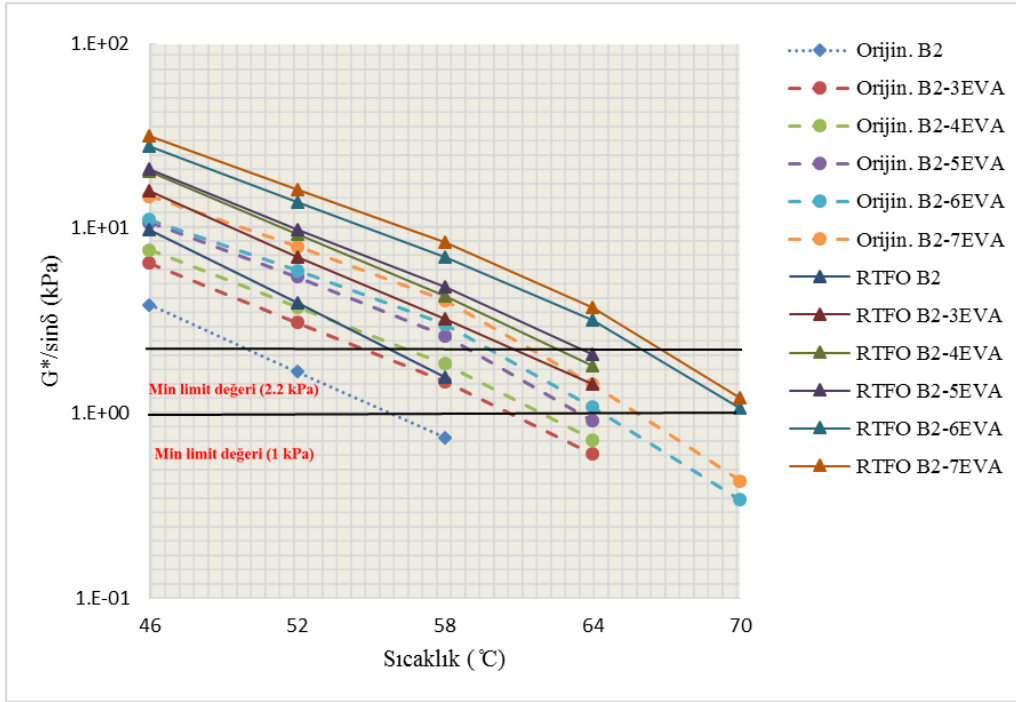
ile TDV karşılaştığında ise, her iki bitüm türüne az miktarda eklendiğinde bitümlerin PG sınıfları bir üst sınıfa ve en yüksek modifikasyon seviyesinde performans sınıfının en üst düzeyi yani PG 70'e ulaşmıştır. Dolayısıyla, TDV ve SBS katkıları her iki bitüm üzerinde farklı sıcaklıklarda tekerlek izi parametresi değerlerinde farklılıklar gösterse bile performans sınıfı açısından birbirine yakın davranış sergilemiştir.



Şekil 5.11 SBS katkılı B₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı

TDV ve SBS katkıların EVA katkısına göre belirgin üstünlük görülmemektedir. Ancak bunun yanı sıra her polimer modifiyerde olduğu gibi EVA miktarının artmasıyla tekerlek izi parametreleri artmakta ve bitümün performans sınıfını etkilemektedir (Şekil 5.12). Performans sınıfı PG 52-Y olan B₂ bitüm, B₂-3EVA ve B₂-7EVA numunelerinde sırasıyla PG-58'den ve PG-64 sınıfına yükselmiş ve en yüksek modifikasyon seviyesinde (B₂-7SBS) B₂ bitüme göre iki sınıf artış sağlayarak EVA modifiyeli B₁ bitüme benzer davranış göstermiştir. TDV ve SBS katkılı B₁ ve B₂ bitümler en yüksek modifikasyon oranında en üst

performans sınıfına ulaşmışken EVA katkısı bir alt sınıfı yani PG 64'e ulaşmıştır. EVA'nın kayma gerilmelerine karşı kompleks kayma değerinin düşük olması ve dolayısıyla tekerlek izi parametresinin düşük olması bu katkıyı TDV ve SBS katkılarına göre daha yetersiz kılmıştır.



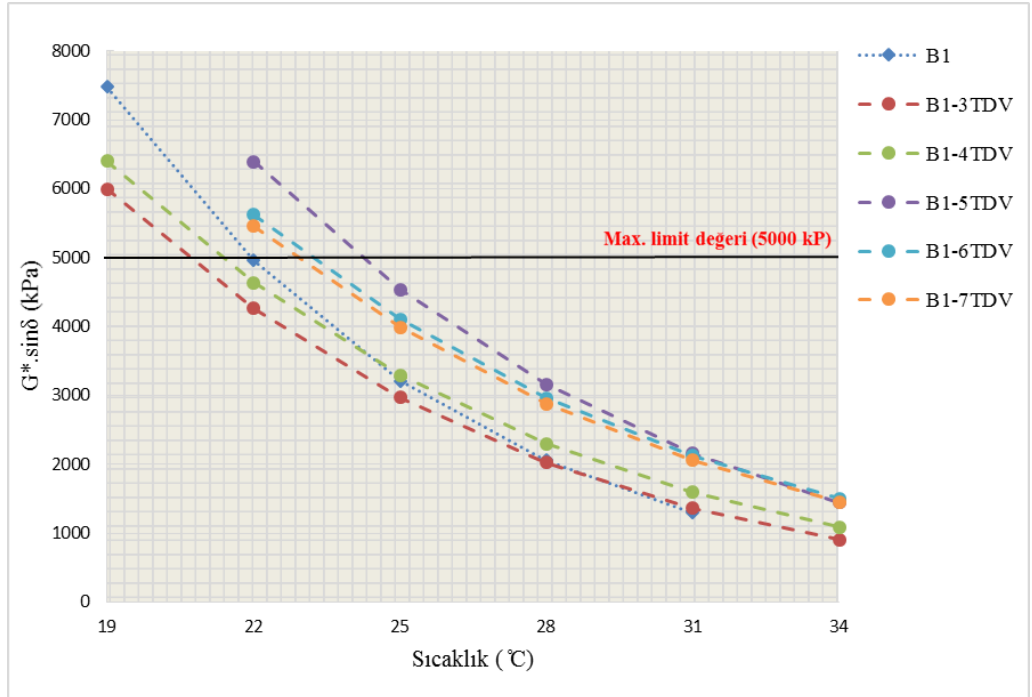
Şekil 5.12 EVA katkılı B₂ numunelerin yüksek sıcaklıkta tekerlek izi parametresi performansı

5.5 Dinamik kayma reometresiyle (DSR) yorulma deney sonuçları

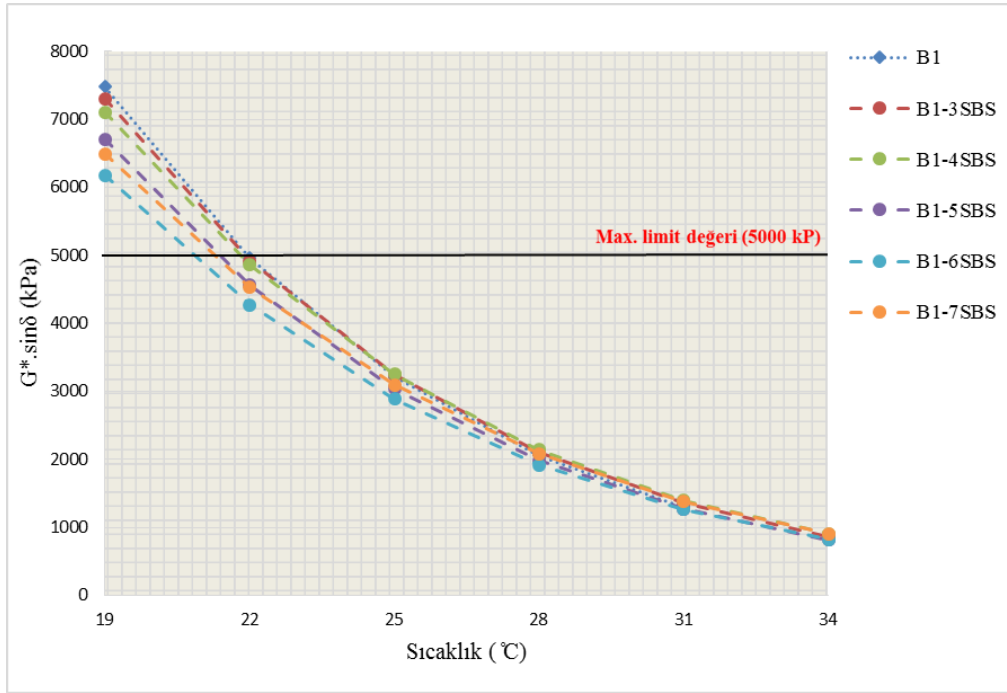
Bitümün arazide servis sıcaklığı daha çok orta sıcaklıklarında olmaktadır. Dolayısıyla bu sıcaklıklarda yorulmaya karşı direnci RTFO-PAV ile yaşlandırılarak bitümün hem arazideki kısa süre ve hem uzun süre yaşlanmasını yansıtarak DSR yorulma deneyi ile gerçekleştirilmektedir. Deneyin sonucunda yorulmaya karşı direnci temsil eden $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi malzemenin orta sıcaklıklardaki davranışını ortaya çıkarmaktadır. SHRP Superpave şartnamesine göre her bitüm

numunesi üzerinde bu değer maksimum 5000 kP olması gerekmektedir. DSR yorulma deneyinden elde edilen kompleks kayma direnci (G^*), faz açısı (δ) ve bu iki parametreden kaynaklanan $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi sonuçları ayrıntılı şekilde Ek 2.1-2.16'da verilmiştir. Bununla birlikte, Superpave şartname kriterini sağlayıp sağlamadığı açısından önemli rol oynamakta olan $G^* \cdot \sin \delta$ parametresinin farklı polimerler üzerinde değişimi görsel olarak Şekil 5.13-5-18'de sunulmuştur.

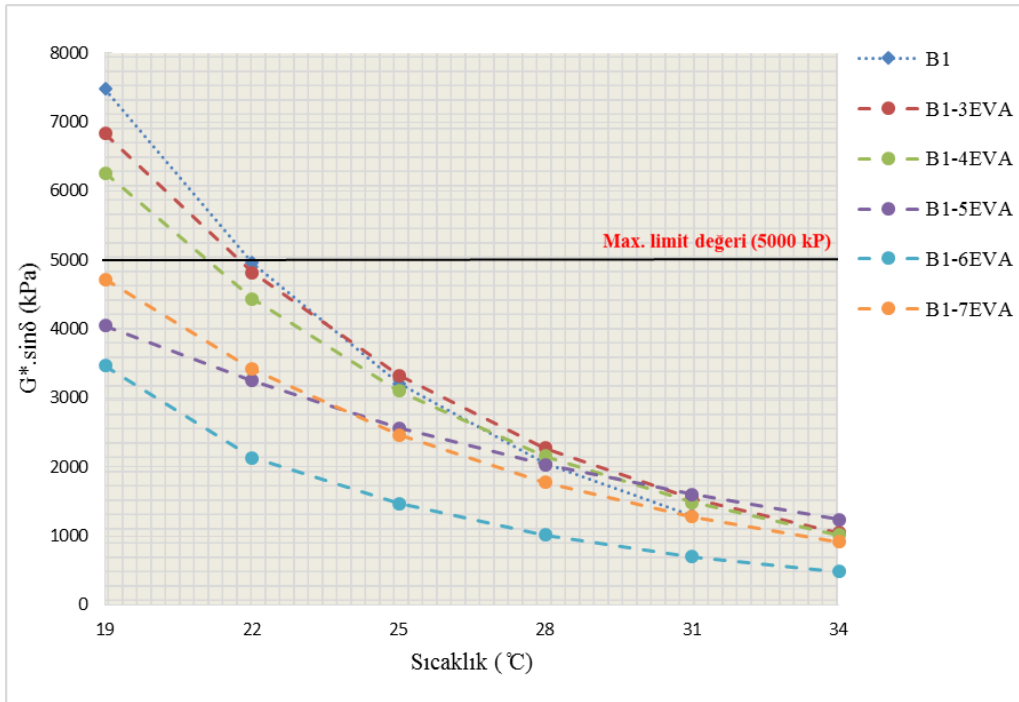
Ek 2.1-2-3 ve Şekil 5.13-5-15'te görüldüğü üzere; TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ bitümlerin yorulma çatlağına karşı dirençleri sıcaklığın düşmesiyle düşmekte ve 25°C'a ulaşana kadar maksimum 5000 kP Superpave şartname limitini sağlamıştır. 25°C şartnameye göre mevcut katkıların yüksek performans PG sınıflarının orta sıcaklıkta yapılması gereken deney sıcaklıkları aralığında olmasından dolayı çalışmada esas alınmıştır. Dolayısıyla, tüm B₁ bitümlü katkılar 25°C'de 5000 kP üst sınırını aşmamış bulunmaktalar. Bu, katkıların orta sıcaklıklarda yorulma çatlağına karşı dirençli olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 5.13 TDV katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı

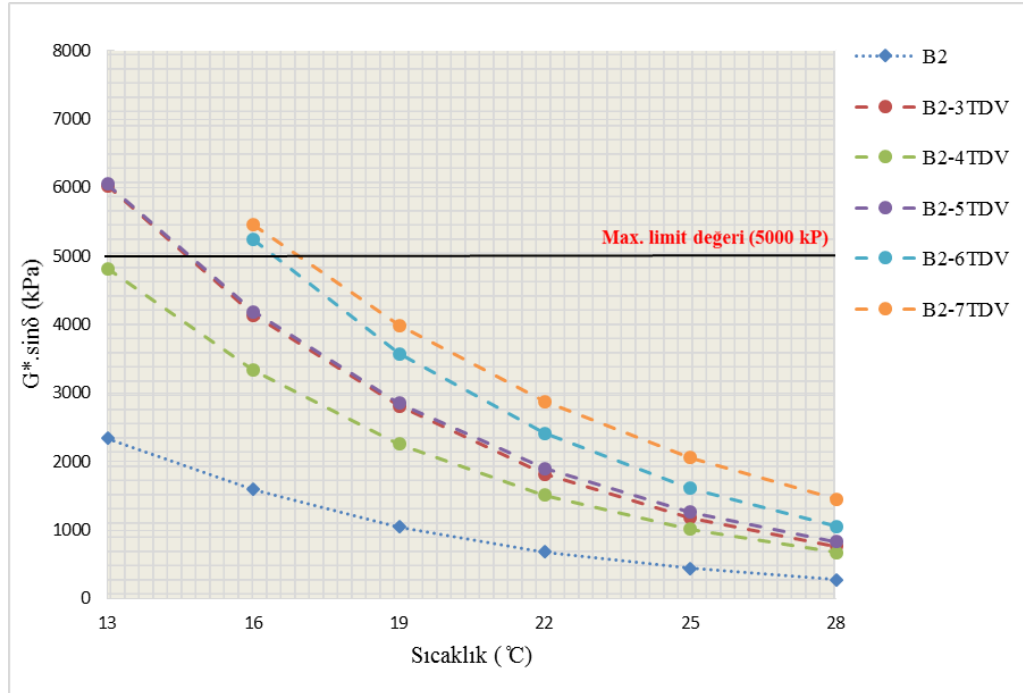


Şekil 5.14 SBS katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı

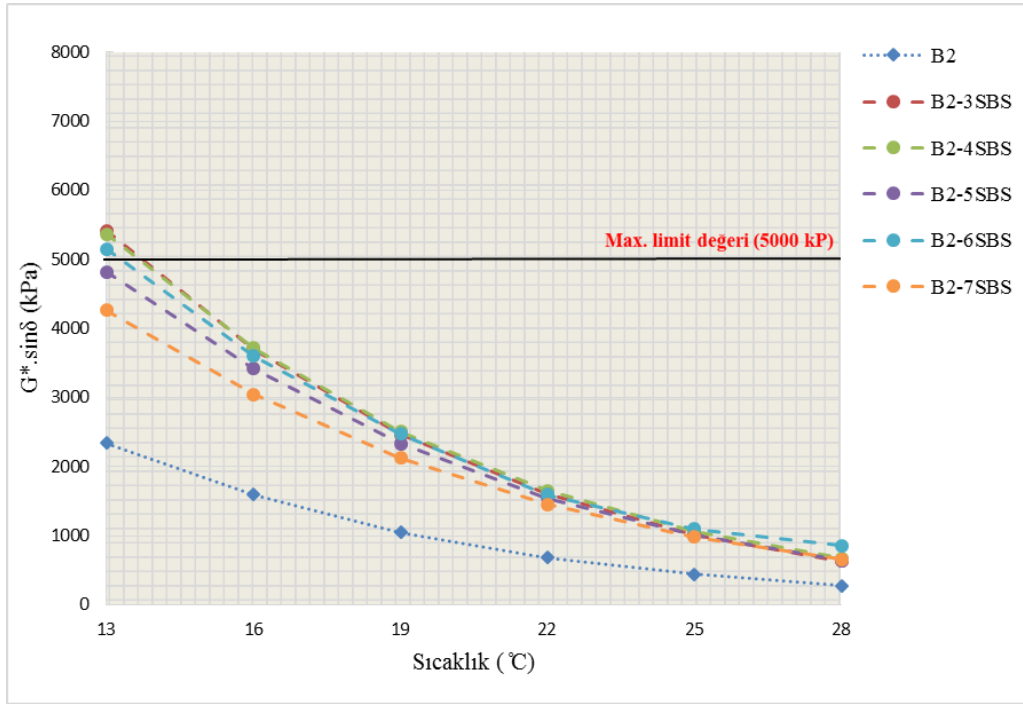


Şekil 5.15 EVA katkılı B₁ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı

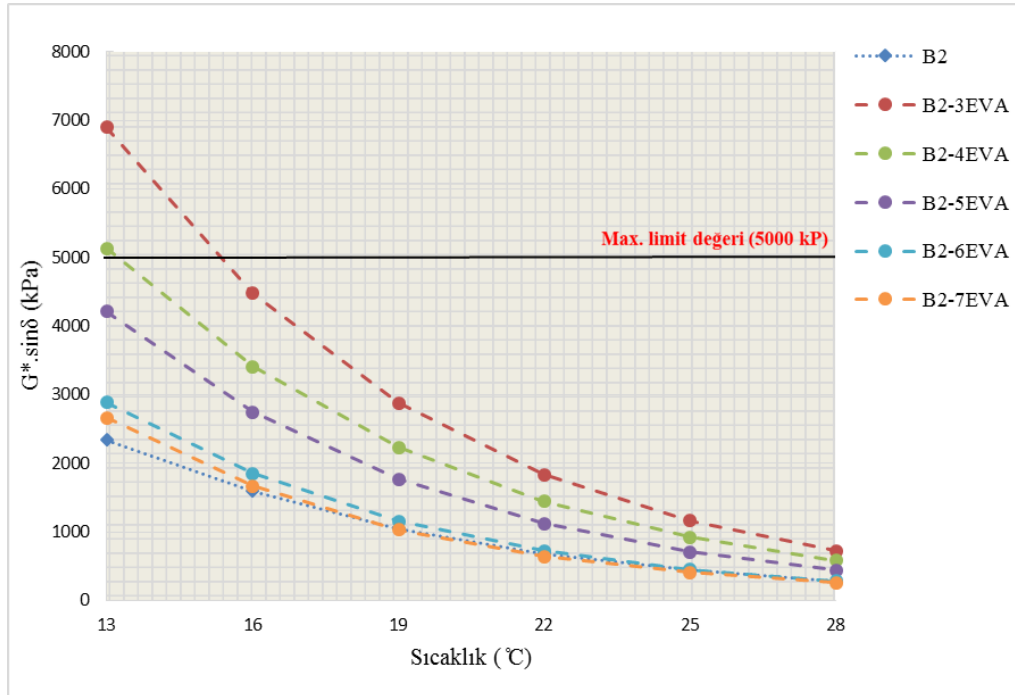
Ek 2.4-2-6 ve Şekil 5.16-5-18’de görüldüğü üzere; TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₂ bitümlerin B₁ bitümlerde de olduğu gibi sıcaklığının düşmesiyle kompleks kayma direnci artmakta ve faz açısı düşmekte, dolayısıyla yorulma çatlağına karşı dirençlerini arttırmaktadır. Numunelerin sıcaklığı 3’er düşüş ile 19°C’a ulaşana kadar $G^* \cdot \sin \delta$ parametresinin maksimum 5000 kP Superpave şartname limitini sağladığı görülmektedir. 19°C şartnameye göre mevcut katkıların yüksek performans PG sınıflarının orta sıcaklıkta yapılması gereken deney sıcaklıkları aralığında olmasından dolayı çalışmada esas alınmıştır. Dolayısıyla, tüm B₂ bitümlü katkıları 19°C’da 5000 kP üst sınırını aşmamış bulunmaktalar. Bu; TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₂ bitümlerin orta sıcaklıklarda yorulma çatlağına karşı dirençli olduğunu ifade etmektedir. Malzemenin sertliğini temsil eden kompleks kayma modülünün orta sıcaklıklarda çok yüksek olması ve elastikliğini temsil eden faz açısının çok düşük olması bitümde yorulma çatlağına karşı çok duyarlı bir hal oluşturmaktadır. Bu nedenle, tekerlek izi parametresinin tersine $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi değerinin düşük olması tavsiye edilmektedir.



Şekil 5.16 TDV katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı



Şekil 5.17 SBS katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı



Şekil 5.18 EVA katkılı B₂ numunelerin orta sıcaklıkta yorulma parametresi performansı

5.6 Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deney sonuçları

Vulkanizat yöntemiyle elde edilen geri dönüştürülmüş kompozit TDV, SBS ve EVA katkıları modifiyer olarak farklı yüzdelerde RTFO ile yaşlandırılmış B₁ ve B₂ bitümler üzerinde kullanılarak çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyine tabi tutulmuş ve deneylere ait parametreler ayrıntılı şekilde EK 3.1-3.18’de verilmiştir. MSCR deneyi sonucunda geri dönmeyen sünme uygunluğu (J_{nr}), geri kazanılan deformasyon (%R), iki yükleme arasındaki geri dönmeyen sünme uyumluluğu farkı ($J_{nr,diff}$) ve iki yükleme arasındaki geri kazanılan deformasyon farkı (R_{diff}) değerleri bitümlerin reolojik parametrelerini oluşturmaktadır.

Tüm katkılarda ve bitümlerde her iki gerilme (0,1 ve 3,2 kP) seviyesindeki R yüzdesi sonuçları incelendiğinde; hem gerilme seviyelerinde hem de tüm deney sıcaklıklarında R yüzdelерinin arttırıldığı görülmektedir. Ayrıca R yüzdesinin artış oranı modifiyerlerin artış oranıyla doğrudan ilişkili olması tespit edilmiştir. Bu, ne kadar yüksek modifiyer miktarı, bitümlerde o kadar yüksek elastik performans olacağı anlamına gelmektedir. Beklendiği gibi, tüm bitümlerin R_{3,2} ve R_{0,1} yüzdeleri deney sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, polimer modifiyeli B₁ ve B₂ bitümlerin daha yüksek sıcaklıklarda daha kalıcı bir deformasyona sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, bitümler yüksek gerilme (3,2 kP) seviyesinde düşük gerilme seviyesinden (0,1 kP) daha düşük R yüzdesine sahip olmuştur. Sıcaklık ve gerilme seviyesinin rolü hakkındaki bu gözlemler, bu çalışmada kullanılan modifiyerleri daha yoğun bir hizmet durumunda daha az etkili hale geldiğini göstermektedir.

Katkıların bitümlerin üzerinde etkisi görsel olarak daha ayrıntılı şekilde anlaşılсын diye R@3,2 kP’da yüksek yükleme ve gerilmelere neden olduğu için bitümlerin en önemli parametrelerinden biri olarak Şekil 5.19-5.24’te sunulmuştur.

TDV katkısı incelendiğinde; TDV katkısının bitümlere eklendiğinde elastik geri kazanım (R_{3,2}) yüzdesinde her iki farklı penetrasyon sınıfına (50/70 ve 160/220) sahip bitümlerde farklı davranış sergilemiştir. Örneğin; 52°C’de B₁

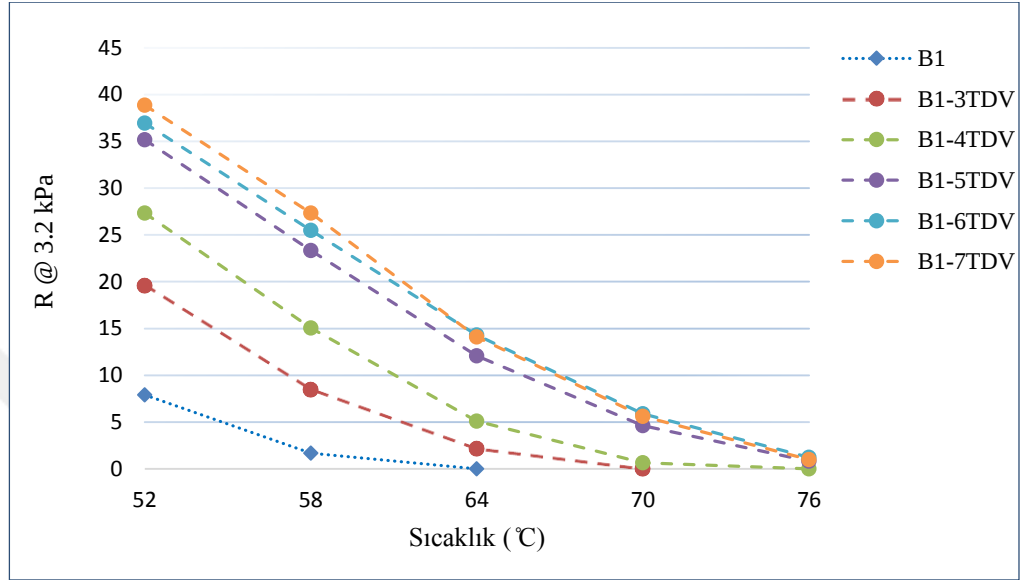
bitüme %7 seviyesinde TDV eklenmesi ile $R_{3,2}$ yüzdesi %7,90'dan %38,88'e (yaklaşık 4,92 kat) artmış ve aynı deney sıcaklığında B_2 bitümü için %7 TDV katkısı ilave edildiğinde $R_{3,2}$ yüzdesi %0,90'dan %16,17'ye (yaklaşık 17,97 kat) artmıştır. B_1 bitümün penetrasyon sınıfı düşük olduğu için daha sert bir malzemedir dolayısıyla elastik geri kazanım miktarı B_2 bitümden daha fazla olmuştur. Bu nedenle, TDV modifiyeri elastikiyet kazandıran sert bir polimer olarak daha yumuşak B_2 bitümün deformasyonunun toparlanmasına daha fazla yardımcı olmuştur.

SBS katkısına gelindiğinde; SBS katkısı modifiyer olarak kullanıldığında $R_{3,2}$ yüzdesinde B_1 ve B_2 bitümlerde TDV'de de olduğu gibi farklı davranış göstermiştir. Örneğin; 52°C'de B_1 bitüme %7 seviyesinde SBS katkısı eklenmesi ile $R_{3,2}$ yüzdesi %7,90'dan %67,49'a (yaklaşık 8,54 kat) artmış ve aynı deney sıcaklığında B_2 bitümü için %7 SBS katkısı ilave edildiğinde $R_{3,2}$ yüzdesi %0,90'dan %93,94'e (yaklaşık 103,38 kat) artmıştır. SBS modifiyeli B_2 bitümde de TDV'ye benzer şekilde elastik geri kazanım etkisi B_1 bitüme kıyasen daha fazla olmuştur.

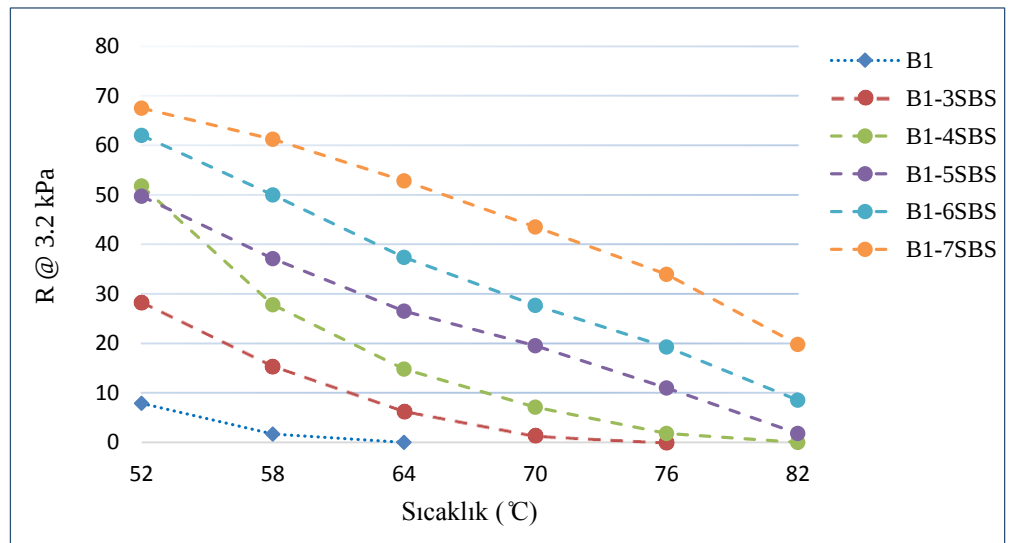
EVA katkısı değerlendirildiğinde; EVA'nın modifiyer olarak kullanıldığında $R_{3,2}$ yüzdesinde B_1 ve B_2 bitümlerde TDV ve SBS'de de olduğu gibi farklı davranış göstermiştir. Örneğin; 52°C'de B_1 bitüme %7 seviyesinde EVA katkısı ilavesiyle $R_{3,2}$ yüzdesi %7,90'dan %77,06'ya (yaklaşık 9,75 kat) artmış ve aynı deney sıcaklığında B_2 bitümü için %7 EVA katkısı eklendiğinde $R_{3,2}$ yüzdesi %0,90'dan %84,09'a (yaklaşık 93,43 kat) artmıştır. EVA modifiyeli B_2 bitümde de TDV ve SBS'e benzer şekilde elastik geri kazanım etkisi B_1 bitüme göre daha fazla olmuştur.

Katkılar arasında kıyaslamalar gerçekleştirildiğinde; B_1 bitümün geri kazanım deformasyonunu pozitif yönde en fazla etkileyen modifiyer maddesi 9,75 kat olarak EVA katkısı belirlenmiş ve EVA'nın ardından 8,54 kat olarak SBS ve 4,92 kat olarak TDV katkısı gelmektedir. B_2 bitümde ise, geri kazanım deformasyon artış oranı 103,38; 93,43 ve 17,97 olarak sıra ile SBS, EVA ve TDV katkılarına ait olmuştur. Sonuç olarak; vuklanizat yöntemiyle elde edilmiş geri dönüştürülmüş TDV katkısı her iki bitümde modifiyer olarak yüksek gerilme ve

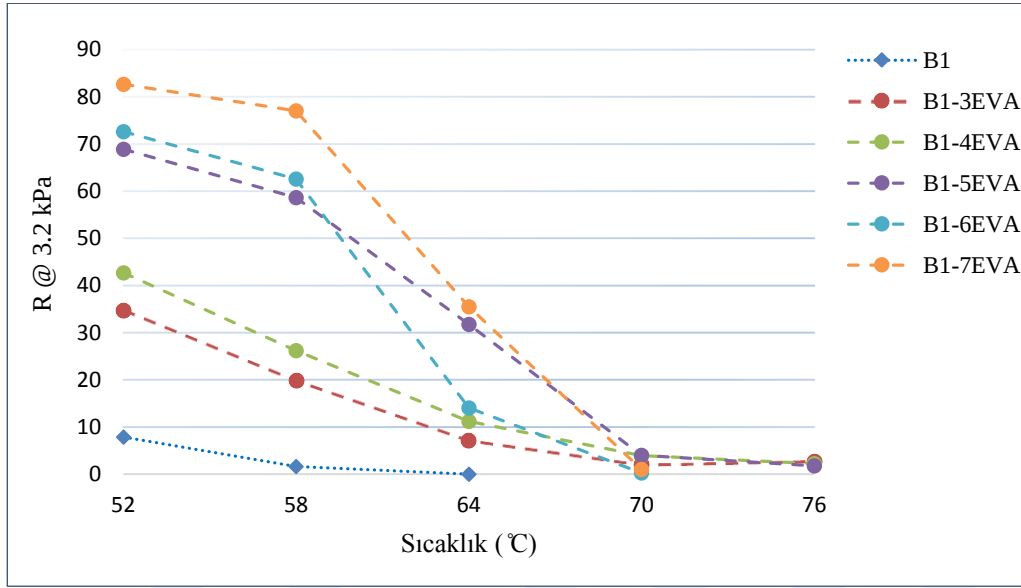
yüklemelere maruz kaldığında, referans olarak seçilen SBS ve EVA katkılarına kıyasen daha az geri kazanım deformasyonuna sahip olduğu tespit edilmiştir.



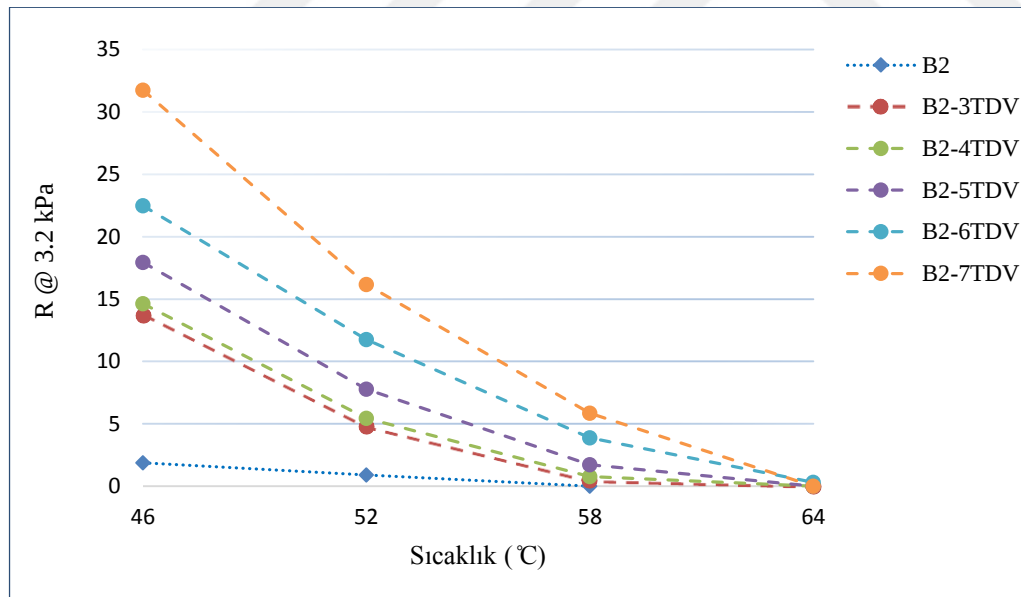
Şekil 5.19 TDV katkılı B₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)



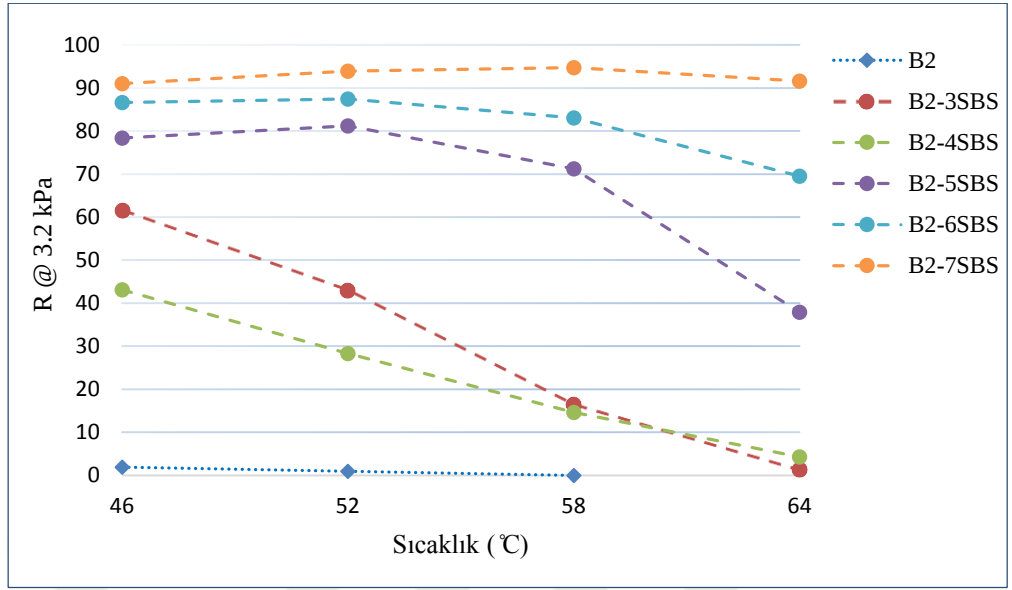
Şekil 5.20 SBS katkılı B₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)



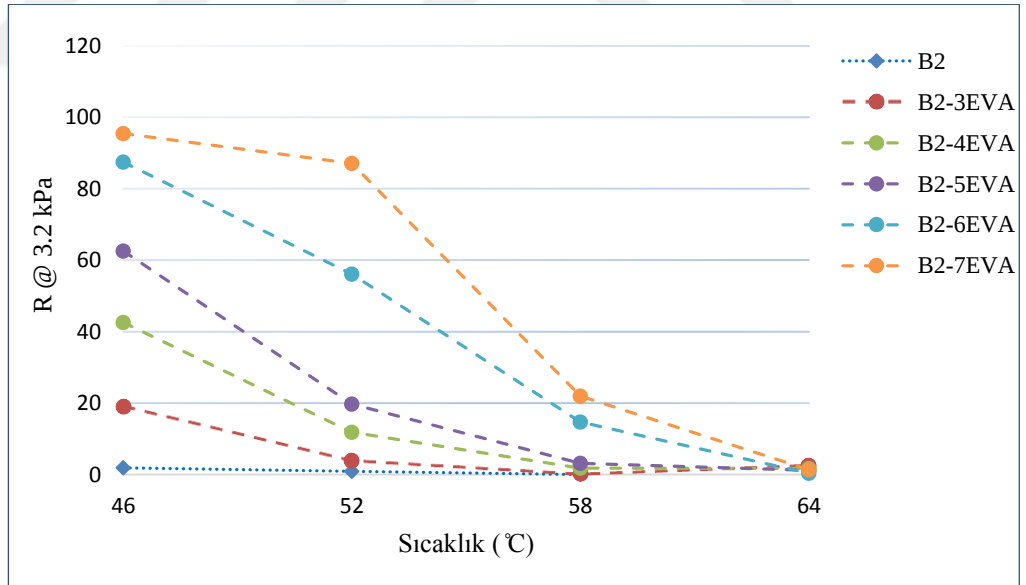
Şekil 5.21 EVA katkılı B₁ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)



Şekil 5.22 TDV katkılı B₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)



Şekil 5.23 SBS katkılı B₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)



Şekil 5.24 EVA katkılı B₂ numunelerin geri kazanılan deformasyonu (%R@3,2 kPa)

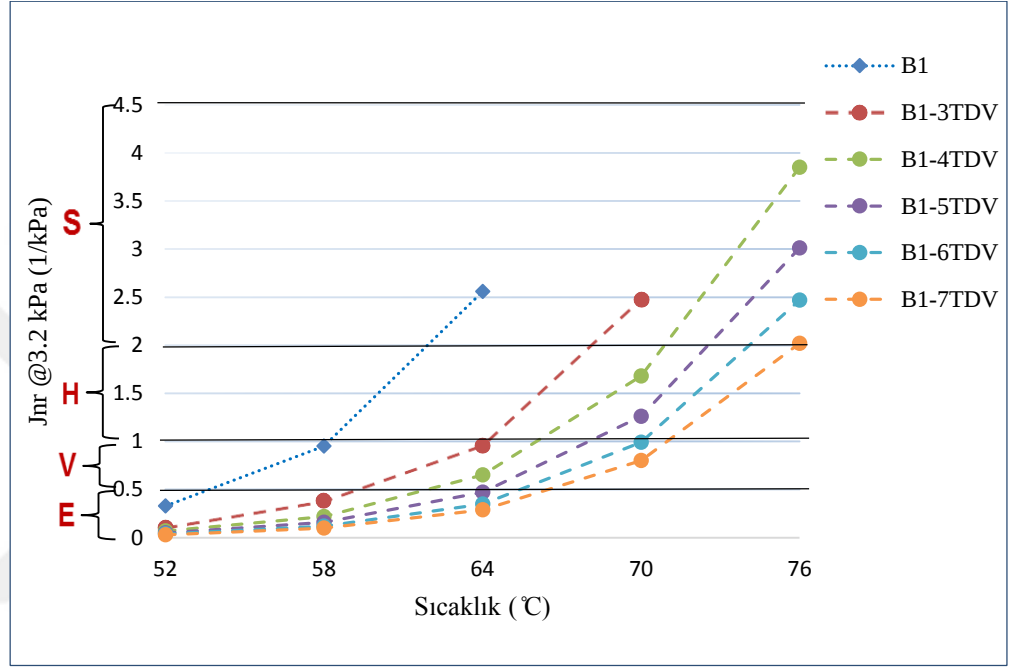
Ek 3'te J_{nr} değerlerine ait tablolarda görüldüğü gibi; tüm polimer bitümünün saf bitümler ile karşılaştırıldığında katkıların eklenmesiyle bitümünün geri dönmeyen sünme uyumluluğunun (J_{nr}) azaldığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca (beklendiği gibi), kullanılan modifiyer tipinin, bitümünün viskoelastik davranışını etkilediği

tespit edilmiştir. Yüksek gerilme seviyesinde (3,2 kPa) lineer olmayan derecesi düşük gerilme seviyesine (0,1 kPa) kıyasen önemli ölçüde artmıştır. Örneğin; %7 TDV ve %7 SBS'nin klasik DSR yüksek sıcaklık sınıfı PG 64 olan B₁ bitümü üzerinde davranışı 64°C'de karşılaştırılırsa, düşük gerilme seviyesinde (0,1 kPa) B₁-7SBS numunesinin B₁-7TDV numunesinden daha düşük geri dönmeyen sünme uyumluluk sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek gerilme seviyesinde (3,2 kPa) %7SBS'nin J_{nr} değeri %7TDV'den daha yüksektir. Bunun nedeni, polimer ağının daha yüksek gerilimlerde yeniden düzenlenmesi ve farklı davranış sergileyebilmesidir. Aynı şekilde, polimer modifiyeli B₂ bitümlerin davranışında da benzer eğilimler görülmektedir.

Bitümlerin gerilmeye bağlı davranış sergilediği iyi bilinmektedir. Modifiye edilmiş bitümlerin gerilmeye bağımlı davranışı, modifiyerlerin tipi ve miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Polimer modifiyeli bitümlerin, düşük polimer içeriğinde, bitümün polimer fazında yayılan sürekli faz olduğu iki fazlı bir sistem olmaktadır. Polimer içeriği arttıkça, matris ters çevrilir ve polimer fazı "çevrelenmiş" bitüm ile daha sürekli faz haline dönüşmektedir. Polimer ağı, polimer modifiyeli bitümlerin gerilmeye bağlı davranışında önemli bir rol almaktadır. Bununla birlikte, polimer ağının mobilizasyonu önceki araştırmalarda sadece daha yüksek gerilme seviyelerinin uygulanmasına bağlanmıştır (Anderson, D'Angelo and Walker, 2010). Dolayısıyla, düşük gerilme seviyelerinde (örneğin, klasik PG sisteminin gerilme seviyesi), polimer ağı tamamen mobilize edilememekte ve rolü bitümün sertleştiren bir dolgu maddesi olmaktır. Ayrıca düşük gerilme seviyelerinde bitümün davranışının lineer olduğu bildirilmektedir. Gerilme seviyesi arttıkça, bu davranış daha lineer olmayan bir hal almaktadır (D'Angelo, 2009; D'Angelo *et al.*, 2010; Jafari, Babazadeh and Aflaki, 2015)(D'Angelo, 2009; D'Angelo *et al.*, 2010; Jafari, Babazadeh and Aflaki, 2015).

Şekil 5.25-5.30, TDV, SBS ve EVA katkılı B₁ ve B₂ bitümlerin 3,2 kPa gerilme seviyesinde geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) değerini göstermektedir. AASHTO M332 şartnamesine dayanarak 3,2 kP gerilme seviyesindeki J_{nr} parametresi (tekerlek izi) farklı trafik seviyelerine göre aynı PG sınıfı içerisinde S: standard (standart), H: heavy (ağır), V: very heavy (çok ağır) ve

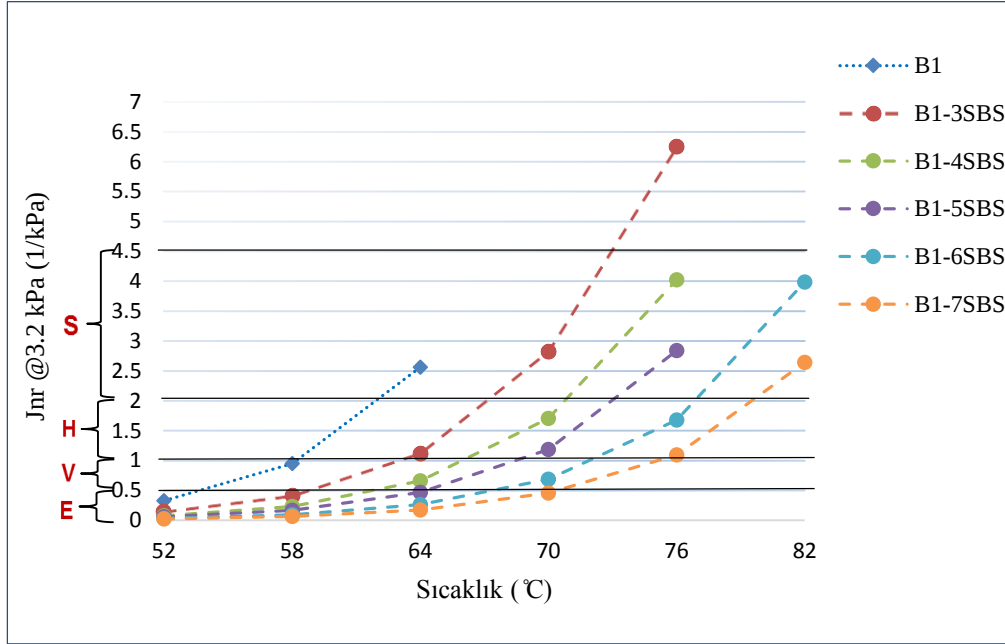
E: extremely heavy (aşırı ağır) sınıflandırılmış ve MSCR PG plus olarak adlandırılmıştır. MSCR PG plus sonuçları klasik DSR PG sınıfları ile tablo halinde kıyaslanmış ve sonuçlar Çizelge 5.27-5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.25 TDV katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.27 TDV katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

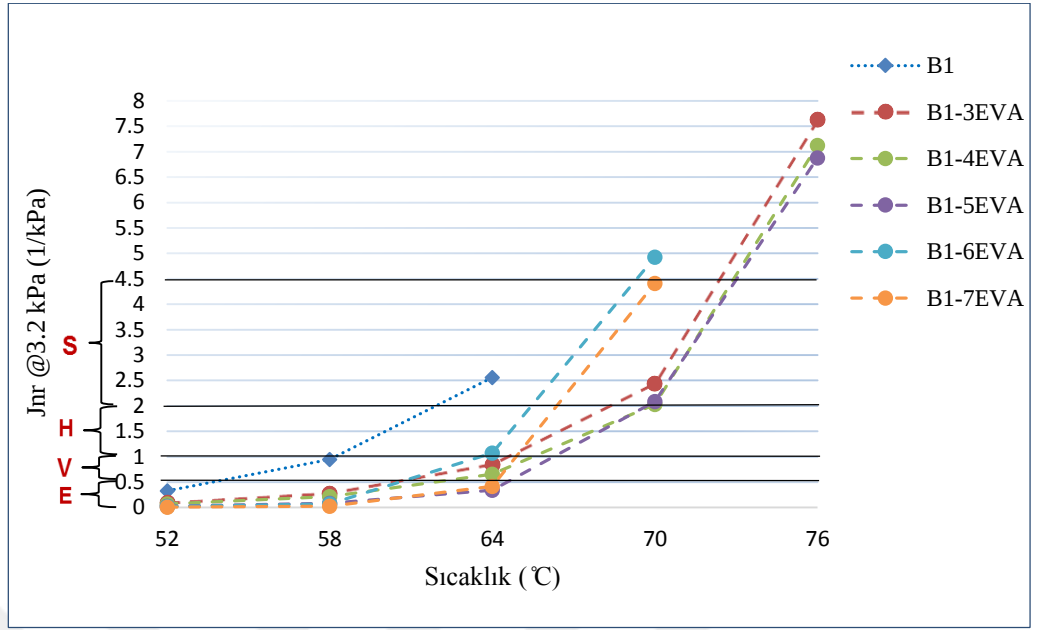
Bitüm Türü	Klasik DSR PG	$J_{nr}@3,2 \text{ kPa}$	MSCR PG Plus
B ₁	PG 64-Y	2,56	PG 64S-Y
B ₁ -3TDV	PG 70-Y	2,48	PG 70S-Y
B ₁ -4TDV	PG 76-Y	3,85	PG 76S-Y
B ₁ -5TDV	PG 76-Y	3,01	PG 76S-Y
B ₁ -6TDV	PG 76-Y	2,47	PG 76S-Y
B ₁ -7TDV	PG 82-Y	2,02	PG 76S-Y



Şekil 5.26 SBS katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.28 SBS katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

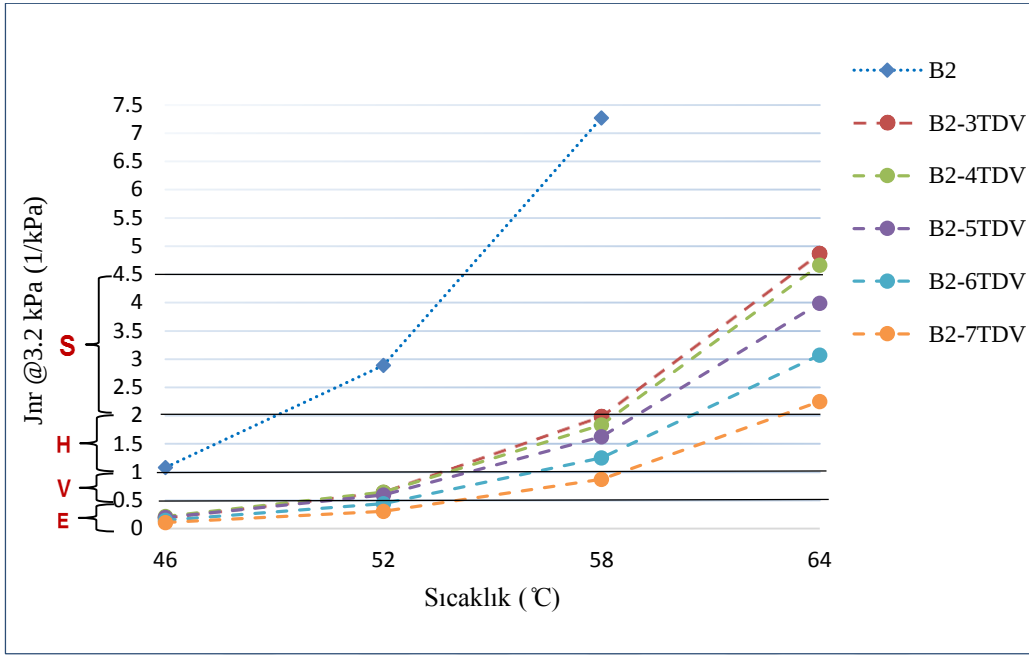
Bitüm Türü	Klasik DSR PG	$J_{nr}@3,2 \text{ kP}$	MSCR PG Plus
B ₁	PG 64-Y	2,56	PG 64S-Y
B ₁ -3SBS	PG 70-Y	2,82	PG 70S-Y
B ₁ -4SBS	PG 76-Y	4,02	PG 76S-Y
B ₁ -5SBS	PG 76-Y	2,84	PG 76S-Y
B ₁ -6SBS	PG 82-Y	3,98	PG 82S-Y
B ₁ -7SBS	PG 82-Y	2,64	PG 82S-Y



Şekil 5.27 EVA katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.29 EVA katkılı B₁ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

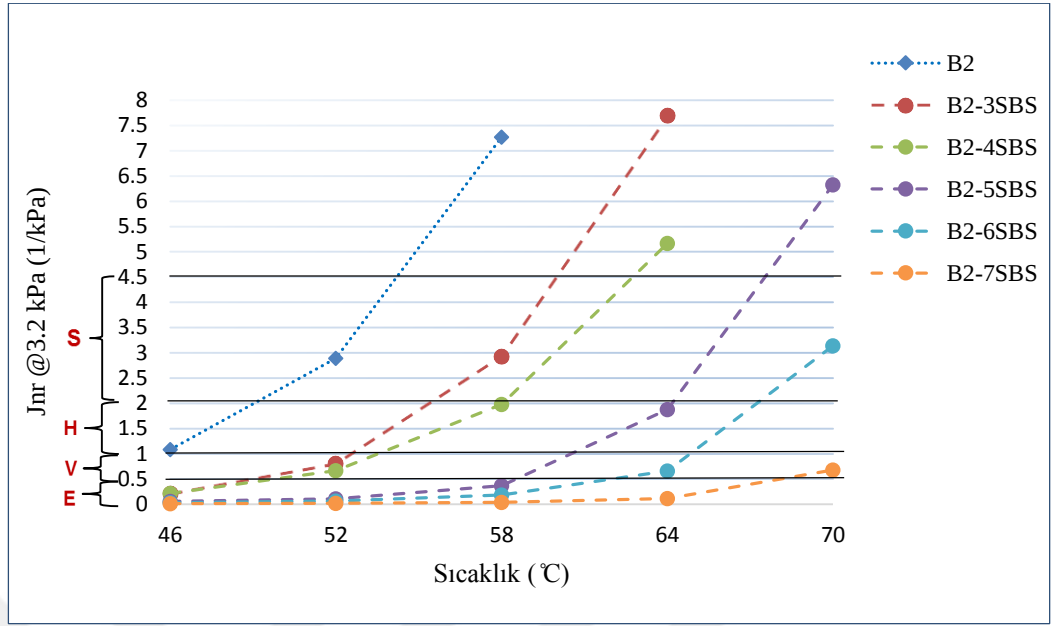
Bitüm Türü	Klasik DSR PG	J _{nr} @3,2 kP	MSCR PG Plus
B ₁	PG 64-Y	2,56	PG 64S-Y
B ₁ -3EVA	PG 70-Y	2,45	PG 70S-Y
B ₁ -4EVA	PG 70-Y	2,03	PG 70S-Y
B ₁ -5EVA	PG 76-Y	2,08	PG 70S-Y
B ₁ -6EVA	PG 76-Y	1,07	PG 64H-Y
B ₁ -7EVA	PG 76-Y	4,41	PG 70S-Y



Şekil 5.28 TDV katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.30 TDV katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

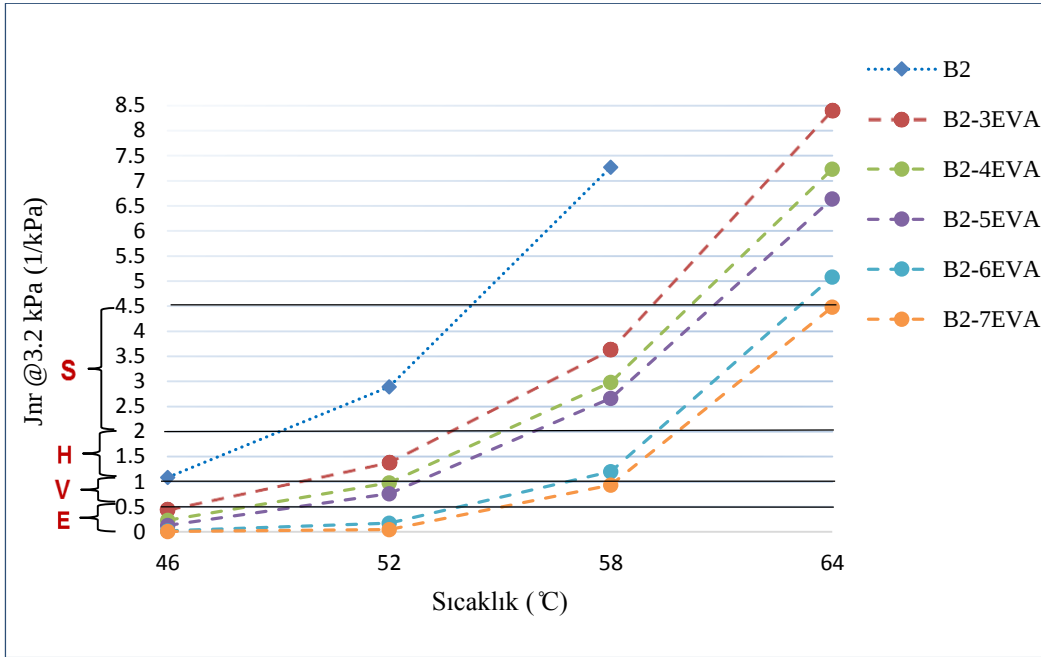
Bitüm Türü	Klasik DSR PG	$J_{nr}@3,2 \text{ kP}$	MSCR PG Plus
B ₂	PG 52-Y	2,89	PG 52S-Y
B ₂ -3TDV	PG 58-Y	1,98	PG 58H-Y
B ₂ -4TDV	PG 58-Y	1,83	PG 58H-Y
B ₂ -5TDV	PG 64-Y	3,98	PG 64S-Y
B ₂ -6TDV	PG 64-Y	3,07	PG 64S-Y
B ₂ -7TDV	PG 70-Y	2,25	PG 64S-Y



Şekil 5.29 SBS katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.31 SBS katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

Bitüm Türü	Klasik DSR PG	$J_{nr}@3,2 \text{ kPa}$	MSCR PG Plus
B ₂	PG 52-Y	2,89	PG 52S-Y
B ₂ -3SBS	PG 58-Y	2,94	PG 58S-Y
B ₂ -4SBS	PG 58-Y	1,98	PG 58H-Y
B ₂ -5SBS	PG 64-Y	1,87	PG 64H-Y
B ₂ -6SBS	PG 64-Y	3,13	PG 70S-Y
B ₂ -7SBS	PG 70-Y	0,68	PG 70V-Y



Şekil 5.30 EVA katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıflandırılması

Çizelge 5.32 EVA katkılı B₂ numunelerin MSCR PG Plus sınıfları

Bitüm Türü	Klasik DSR PG	J _{nr} @3,2 kP	MSCR PG Plus
B2	PG 52-Y	2,89	PG 52S-Y
B2-3EVA	PG 58-Y	3,63	PG 58S-Y
B2-4EVA	PG 58-Y	2,98	PG 58S-Y
B2-5EVA	PG 58-Y	2,67	PG 58S-Y
B2-6EVA	PG 64-Y	1,20	PG 58H-Y
B2-7EVA	PG 64-Y	4,48	PG 64S-Y

3,2 kPa ve 0,1 kPa'daki sünme uyumlulukları arasındaki yüzde farkı ($J_{nr,diff}$) (Ek 3), MSCR protokolünde bitümleri sınıflandırmak için ikinci kriter olarak bilinmektedir. Bu kritere dayanarak, bitümün %75'ten daha fazla bir yüzde farkı göstermesi durumunda tekerlek izine karşı daha duyarlı olduğu düşünülmektedir. MSCR protokolünün bu kriterine dayanarak; örnek olarak, çalışmada %7 TDV, SBS ve EVA ile modifiye edilmiş B₁ bitümlerin 3,2 kPa ve 0,1 kPa'da sünme uyumu arasında %75'ten daha yüksek bir fark gösterdiği için yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı duyarlı olarak kabul edilebilir. Behnood'un tez çalışmasında,

%4SBS ve %12GTR katkıları ile modifiye edilmiş bitüm için 3.2 kPa ve 0.1 kPa’da sünme uyumu arasındaki yüzde farkı sıra ile %89,30 ve %483,60 olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu bağlayıcıların her iki gerilme seviyesinde de en yüksek geri dönme deformasyonu (%R) ve en düşük geri dönmeyen sünme uyumluluğu (J_{nr}) gösterdiği ortaya çıkmıştır (Behnood, 2016). Dolayısıyla; genel olarak TDV, SBS ve EVA katkılarının her iki bitüm üzerindeki $J_{nr,diff}$ parametresi incelendiğinde hem modifikasyon seviyelerinin ve hem sıcaklıkların artışı ile $J_{nr,diff}$ değerinin %75’ten daha fazla olduğu ancak elastik geri dönme (deformasyon) yüksek olduğu ve geri dönmeyen sünme uyumluluğun düşük olduğu, ve bu parametrelerin neticesinde tekerlek izine karşı direncinin arttırıldığı tespit edilmektedir.

5.7 Lineer farklı genlik (LAS) deney sonuçları

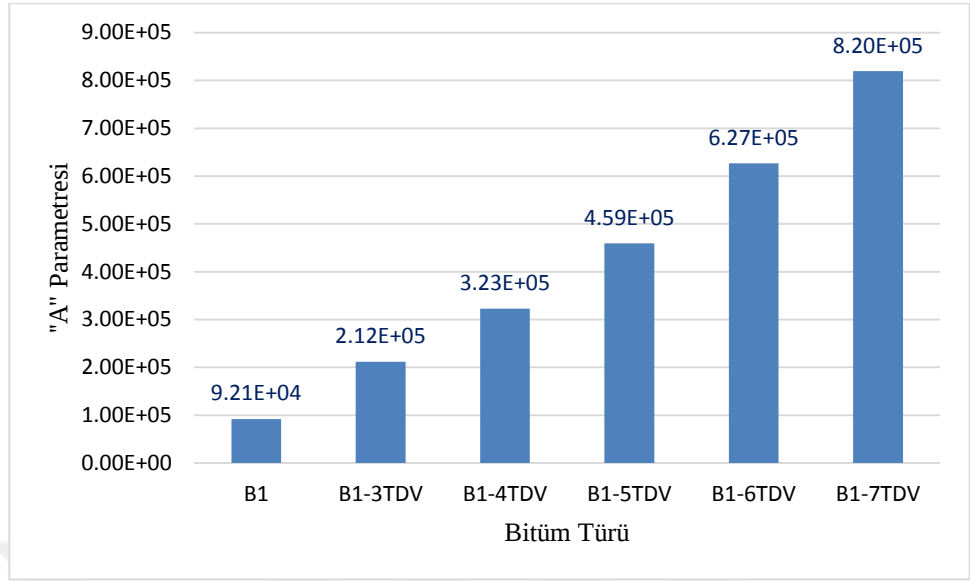
Çalışmada ana katkı olarak kullanılan geri dönüştürülmüş TDV modifiyeli ve referans katkıları olarak seçilen SBS ve EVA modifiyeli B50/70 (B1) ve 160/220 (B2) penetrasyon sınıfına sahip bitümler DSR cihazıyla lineer farklı genlik (LAS) deneyine tabi tutulmuştur. Deney, bitümün uzun süreli hizmet ömrünü laboratuvar ortamında temsil eden PAV ile yaşlandırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve orta sıcaklıktaki yorulma ömrü sonuçları Şekil 5.31-5.48’de verilmiştir. Deney sonucu bitümün bütünlüğünü koruma özelliği (“A” parametresi), deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığı (“B” parametresi) ve yorulma ömrü veya yorulma bozulmasına uğrayan döngü (trafik) sayısı (N_f) 25°C’de belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

TDV modifiyeli B₁ bitümlü numuneler Şekil 5.31-5.33’te gösterildiği gibi, TDV katkısının B₁ bitüme ilavesiyle “A” parametresi ve “B” parametresinin mutlak değeri artmakta ve dolayısıyla yorulma ömründe (N_f) artış meydana gelmektedir. Örneğin, B₁ bitümün “A” parametresinin değeri 9.21E+04 iken %3TDV modifikasyon seviyesinde bu değer 2.12E+05 olarak en düşük modifikasyon seviyesinde B₁ bitümün bütünlüğünü koruma özelliğinde 2,30 kat artış sağlamıştır.

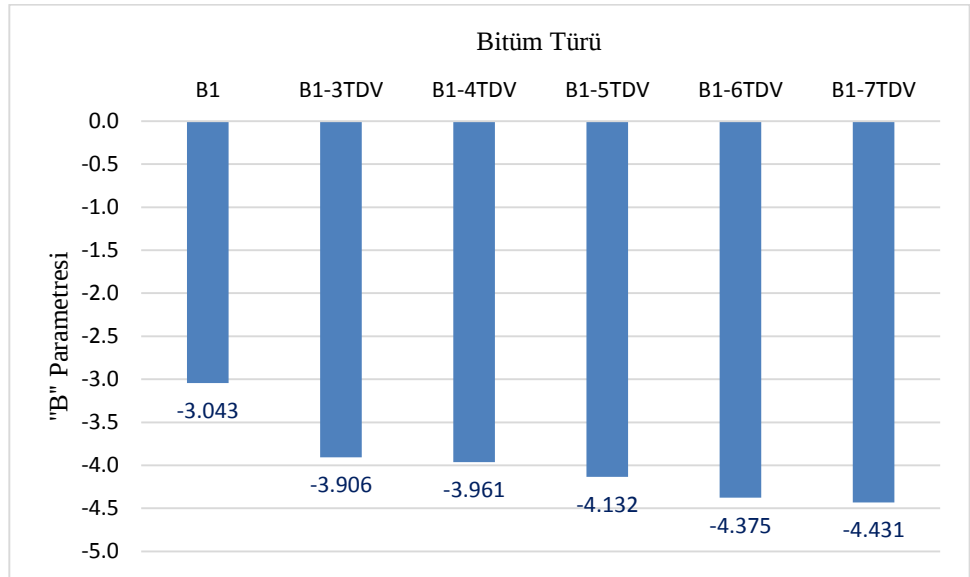
En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise; bu değer $8.20E+05$ 'e yükselerek B₁ bitüme göre 8,90 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.31).

“B” parametresine gelinirse; en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) B₁ bitümün mutlak değeri 3,043'ten 3,906'ya yükselerek deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığı 1,28 kat artmıştır. En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise, “B” değeri 4,431 olarak saf bitüme göre 1,46 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.32). “B” parametresinin artışı bitümün yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle; “B” parametresinin mutlak değeri ne kadar düşük olursa bitümün deformasyon (yükleme) değişimine duyarlılığı o kadar az olmakta ve bunların neticesinde yorulma ömrü artmaktadır.

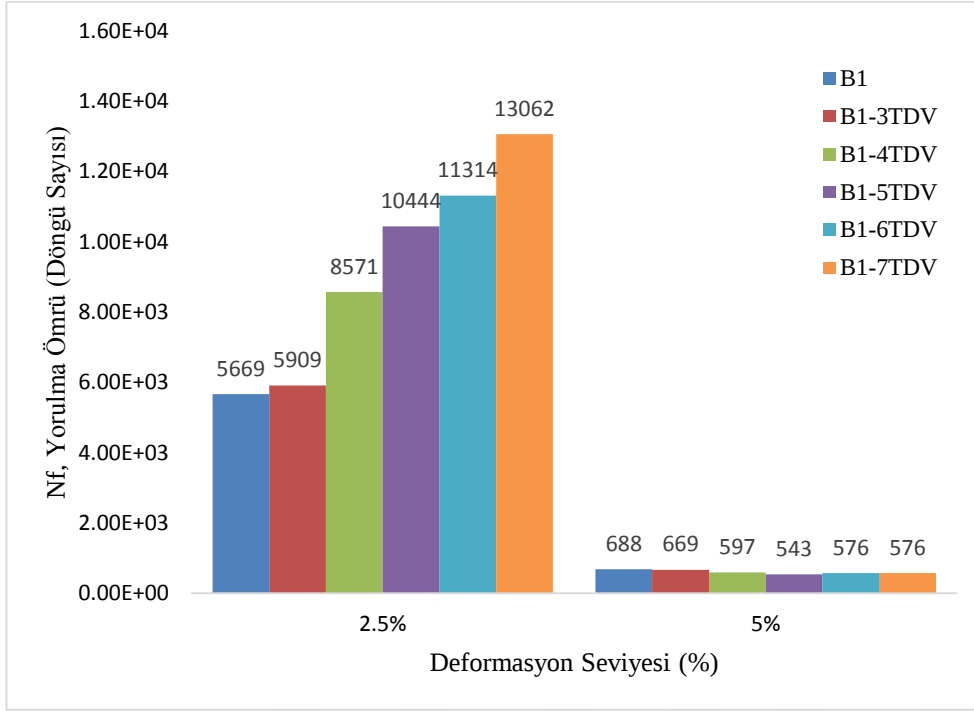
“A” ve “B” parametrelerin ve iki farklı deformasyon seviyesinin (%2,5 ve %5) sonucu iki farklı N_f değerleri elde edilmektedir. Deformasyon seviyesinin iki farklı seviyede öngörülmesinin sebebi üstyapı tasarımında hesaplanan asfalt kaplama tabakasının kalınlığıdır (kalın tabaka olarak adlandırılan tabaka kalınlığı >4 inch için %2,5 deformasyon ve ince tabaka olarak adlandırılan tabaka kalınlığı <4 inch için %5 deformasyon) (Masad *et al.*, 2001). TDV katkılı B₁ bitümün yorulma ömrü (N_f) ayrıntılı şekilde incelendiğinde; B₁ bitümün N_f değeri %2,5 deformasyon seviyesinde 5669 döngü iken B₁-3TDV numunesi için 5909 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan döngü (trafik) sayısı B₁ bitüme göre 1,04 kat artmıştır. Bu oran B₁-7TDV numunesi için 13062 döngü olarak B₁ numunesine göre 2,30 kat olarak belirlenmiştir (Şekil 5.33). TDV modifiyeli B₁ bitümlerin yorulma ömrü %2,5 deformasyonda dikkate değer artış sağlanmasına rağmen %5 deformasyonunda göze çarpan bir değişim görülmemiştir. Dolayısıyla, TDV modifiyeli B50/70 bitümlerin yorulma ömrü kalın tabakalar için daha olumlu yönde etkilendiği için ince tabakalara göre daha uyumlu performans göstermiştir.



Şekil 5.31 TDV katkılı B₁ numunelerine ait “A parametresi”



Şekil 5.32 TDV katkılı B₁ numunelerine ait “B parametresi”

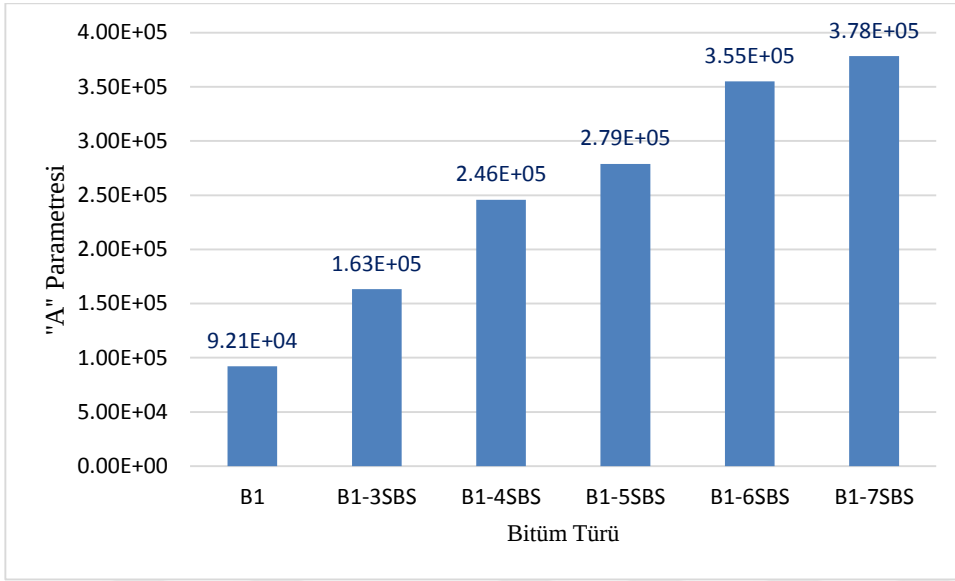


Şekil 5.33 TDV katkılı B₁ numunelerine ait yorulma ömrü

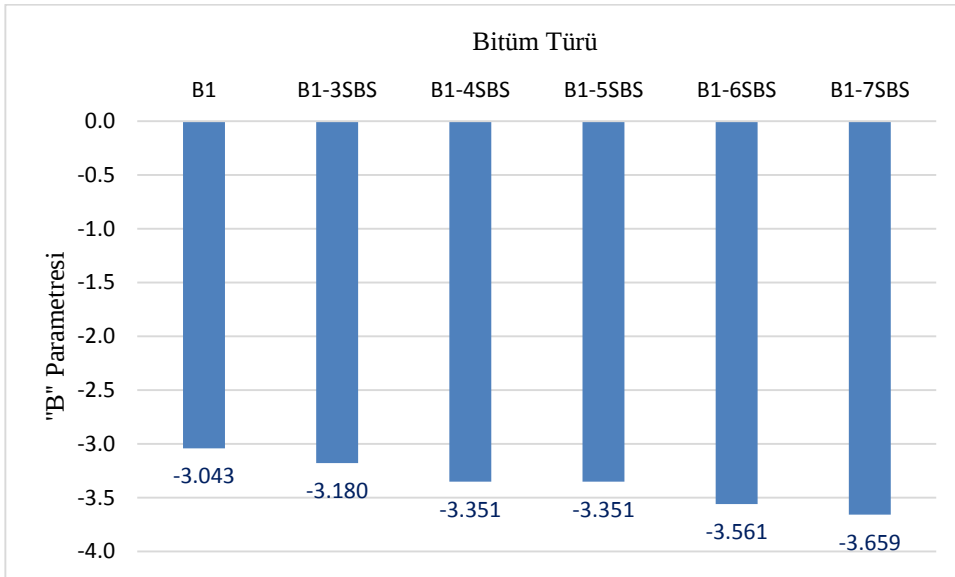
SBS katkılı B₁ bitümler Şekil 5.34-5.36’da incelendiğinde, TDV’de de olduğu gibi SBS katkısının B₁ bitüme ilavesiyle “A” parametresi ve “B” parametresinin mutlak değeri artmakta ve dolayısıyla yorulma ömründe (N_f) artış meydana gelmektedir. Örneğin, B₁ bitümün “A” parametresinin değeri $9.21E+04$ iken %3SBS eklenmesiyle bu değer $1.63E+05$ olarak en düşük modifikasyon seviyesinde B₁ bitümün bütünlüğünü koruma özelliğinde 1,77 kat artış sağlamıştır. En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise; bu değer $3.78E+05$ ’e yükselerek B₁ bitüme göre 4,1 kat artış göstermiştir (Şekil 5.34). TDV ile SBS modifiyerlerin arasında kıyaslama gerçekleştirildiğinde; B₁-3TDV numunesi B₁ bitümün “A” parametresi değerini 2,30 kat arttırarak 1,77 kat artış sağlayan B₁-3SBS’den daha iyi performans sergilemiştir. Benzer şekilde en yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) de TDV katkısı SBS’e göre daha fazla bitümün bütünlüğünü korumuştur.

“B” parametresine gelindiğinde; en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) B₁ bitümün mutlak değeri 3,043’ten 3,180’a yükselerek deformasyon değişimine karşı duyarlılığı 1,04 kat artmış ve dolayısıyla TDV katkısına kıyasla daha az duyarlı hale gelmiştir. En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise, “B” değeri 3,659 olarak B₁ göre 1,20 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.35). Böylelikle, yüksek modifikasyon seviyesinde de SBS katkısı deformasyon seviyesi değişimine TDV’den daha az duyarlı olmuş ve sonuç olarak SBS katkısının yorulma ömrünü TDV’den daha fazla mümkün kılmaktadır.

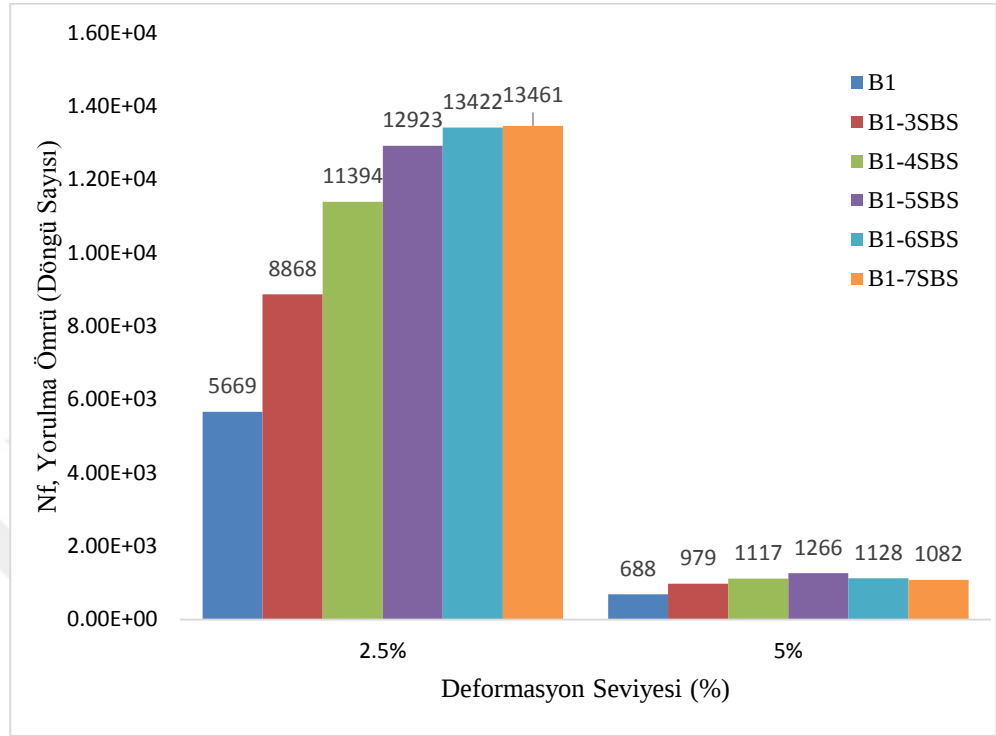
SBS katkılı B₁ bitümün yorulma ömrü (N_f) incelendiğinde; B₁ bitümün N_f değeri %2,5 deformasyon seviyesinde 5669 döngü iken B₁-3SBS numunesi için 8868 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısı B₁ bitüme göre 1,56 kat artmıştır. Bu oran B₁-7SBS numunesi için 13461 döngü olarak B₁ numunesine göre 2,37 kat olarak belirlenmiştir (Şekil 5.36). Böylece, hem düşük ve hem yüksek modifikasyon seviyelerinde SBS katkılı B₁ bitümün yorulma ömrü TDV’den daha fazla olmuştur. Bununla birlikte, B₁ bitümün yorulma ömrü %5 deformasyon seviyesinde 688 döngü iken B₁-7SBS numunesi için 1082 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısı B₁ bitüme göre 1,57 kat artmıştır. Sonuç olarak, SBS katkısının B₁ bitüme ilavesinin artışı ile yorulma ömründeki kalın tabakaya ait (%2,5 deformasyon) artış eğilimi ince tabakadan (%5 deformasyon) daha fazla olmuştur.



Şekil 5.34 SBS katkı B₁ numunelerine ait "A parametresi"



Şekil 5.35 SBS katkı B₁ numunelerine ait "B parametresi"

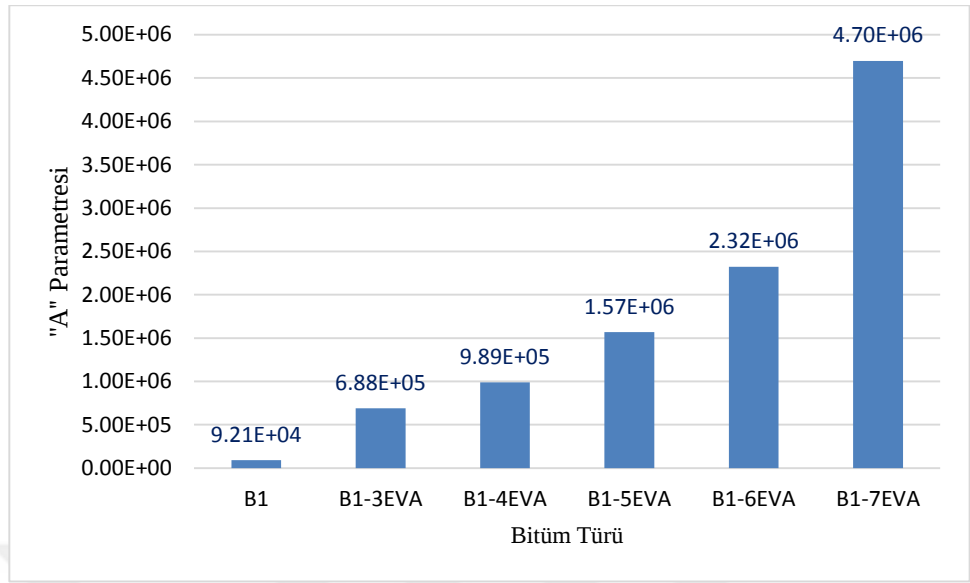


Şekil 5.36 SBS katkılı B₁ numunelerine ait yorulma ömrü

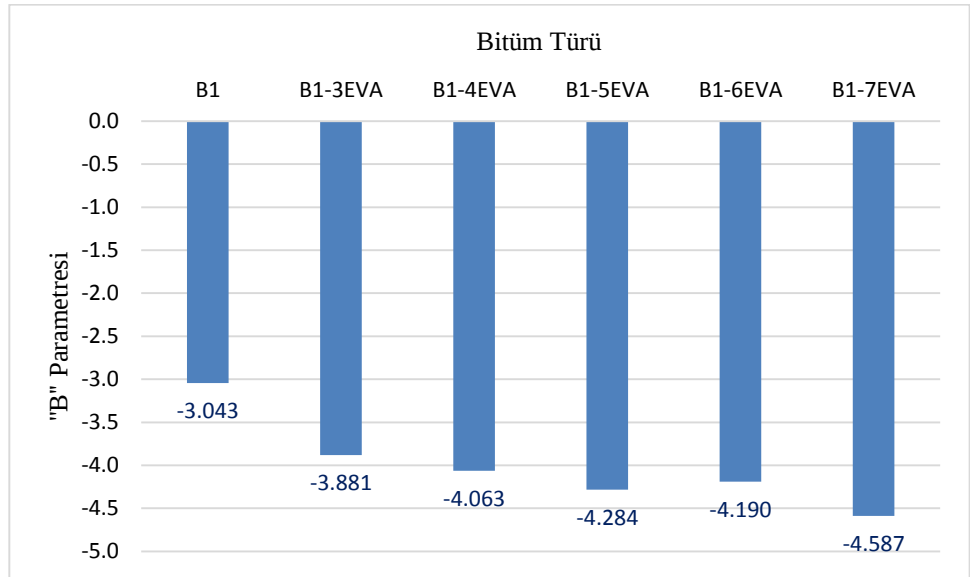
EVA katkılı B₁ bitümlerin LAS deneyi sonuçları Şekil 5.37-5.39’de değerlendirildiğinde, SBS ve TDV modifiyerlerde de olduğu gibi EVA katkısının B₁ bitüme eklenmesiyle “A” parametresi ve “B” parametresinin mutlak değeri artmakta ve dolayısıyla yorulma ömründe (N_f) artış gözlenmektedir. Örneğin, B₁ bitümün “A” parametresinin değeri $9.21E+04$ iken ağırlıkça %3 EVA ilavesiyle bu değer $6.88E+05$ olarak B₁ bitümün bütünlüğünü koruma özelliğini 7,47 kat arttırmıştır. B₁ bitüme ağırlıkça %7 EVA eklendiğinde ise; bu değer $4.70E+06$ ’ya yükselerek B₁ bitüme göre 51,03 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.37). Modifiyerler arasında kıyaslama gerçekleştirildiğinde; “A” parametresinin değerinin sıralaması EVA>TDV>SBS şeklinde olmuş ve böylece EVA katkısı bitümün hasara karşı direncini en çok arttıran katkı olarak belirlenmiştir.

“B” parametresi incelendiğinde; en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) B₁ bitümün mutlak değeri 3,043’ten 3,881’e yükselerek deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığı 1,27 kat artmıştır. En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise, “B” değeri 4,587 olarak B₁ bitüme göre 1,50 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.38). Modifiyerler arasında kıyaslama gerçekleştiğinde; “B” parametresinin değerinin sıralaması SBS<TDV<EVA şeklinde olmuş ve böylece SBS katkısı diğer katkılara göre B₁ bitümü deformasyon seviyesine karşı daha az duyarlı kılmıştır.

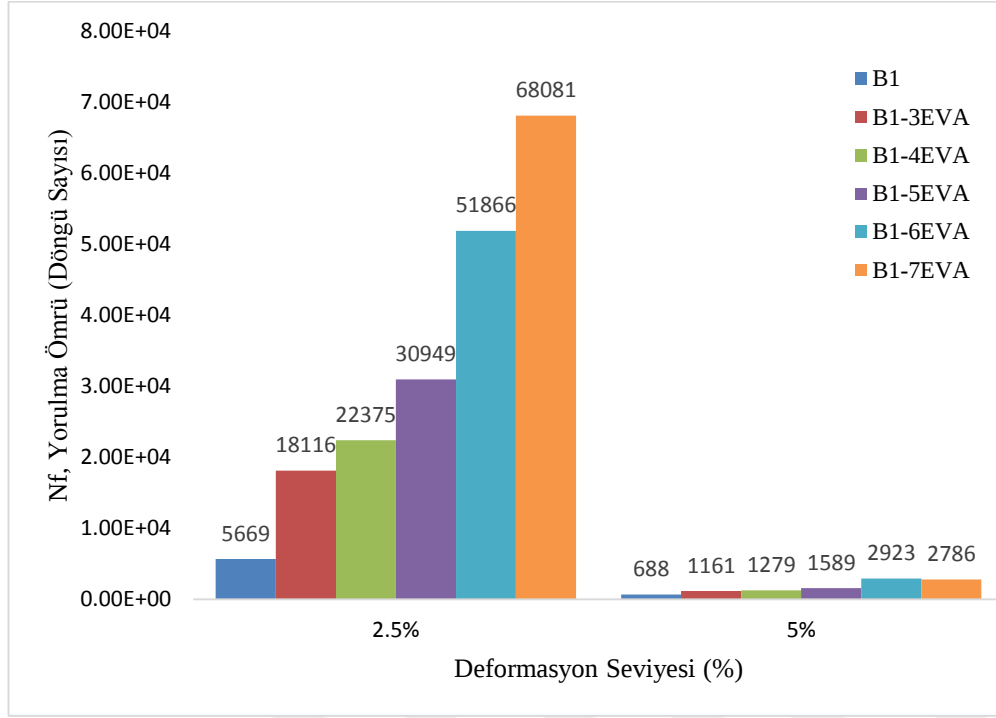
EVA katkılı B₁ bitümün yorulma ömrü (N_f) değerlendirildiğinde; B₁ bitümün N_f değeri %2,5 deformasyon seviyesinde 5669 döngü iken B₁-3EVA numunesi için 18116 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısını B₁ bitüme göre 3,20 kat arttırmıştır. Bu oran B₁-7EVA numunesi için 68081 döngü olarak B₁ bitümüne göre 12 kat olarak belirlenmiştir (Şekil 5.39). Bu sonuç itibarıyla, hem düşük ve hem yüksek modifikasyon seviyelerinde EVA katkılı B₁ bitümün yorulma ömrü hem TDV ve hem SBS’den daha fazla olmuştur. Bunun yanı sıra, B₁ bitümün yorulma ömrü %5 deformasyon seviyesinde 688 döngü iken B₁-7EVA numunesi için 2786 döngü olarak yorulma ömrü B₁ bitüme göre 4,05 kat artmıştır. Sonuç olarak, EVA modifiyeli B₁ bitümün kalın tabakaya ait (%2,5 deformasyon) yorulma ömrü ince tabakadan (%5 deformasyon) daha fazla olmuştur. Hem katkı oranı artışı ile meydana gelen artış eğilimi ve hem yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısının %2,5 deformasyon seviyesindeki iyi performansı çalışmada kullanılan tüm polimer katkıların asfalt kaplamasında kalın tabakalar için kullanımında uygun olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 5.37 EVA katkılı B₁ numunelerine ait “A parametresi”



Şekil 5.38 EVA katkılı B₁ numunelerine ait “B parametresi”



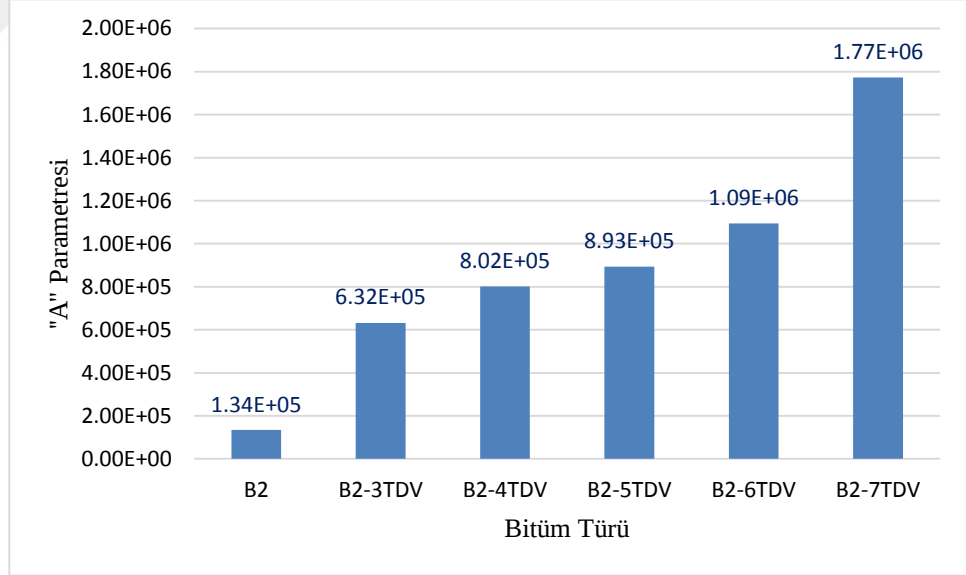
Şekil 5.39 EVA katkılı B₁ numunelerine ait yorulma ömrü

TDV modifiyeli B160/220 (B₂) bitümlerin LAS deneyi sonuçları Şekil 5.40-5.42’de sunulmuştur. TDV katkısının B₂ bitüme eklenmesi “A” parametresi ve “B” parametresinin mutlak değerini arttırmakta ve dolayısıyla yorulma ömrünün uzamasına neden olmaktadır. Örneğin, B₂ bitümün “A” parametresinin değeri 1.34E+05 iken %3 TDV modifikasyon seviyesinde bu değer 6.32E+05 olarak en düşük modifikasyon seviyesinde B₂ bitümün bütünlüğünü koruma özelliğini 4,71 kat arttırmıştır. B₂-7TDV numunesinde ise bu değer 1.77E+06’ya yükselerek B₂ bitüme göre 13,21 kat artış göstermiştir (Şekil 5.40).

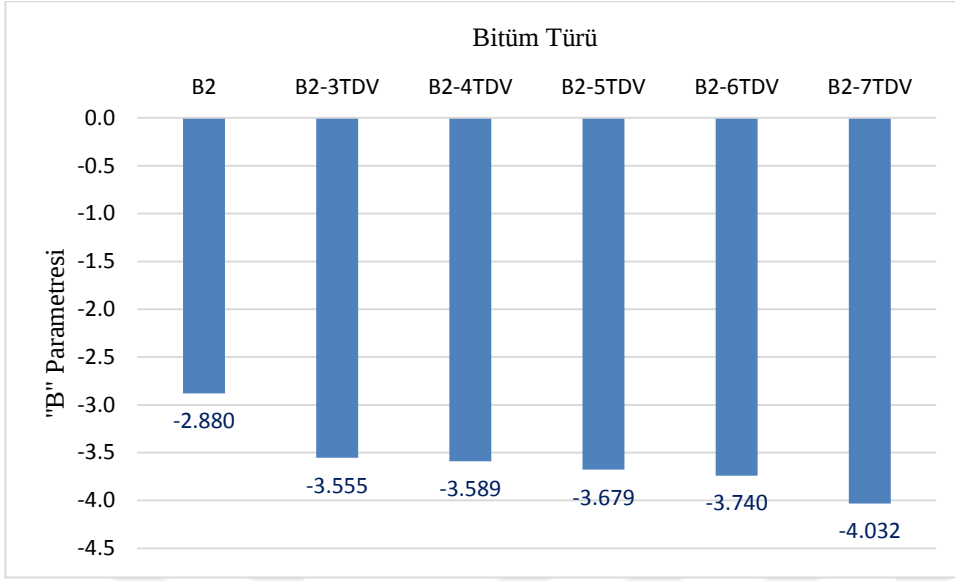
“B” parametresine bakıldığında; en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) B₁ bitümün mutlak değeri 2,880’den 3,555’e yükselerek deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığını 1,23 kat arttırmıştır. En yüksek modifikasyon seviyesinde (%7) ise, “B” değeri 4,431 olarak saf bitüme göre 1,46 kat artış

göstermiştir (Şekil 5.41). Daha önce de belirtildiği üzere, “A” parametresinin değeri daha yüksek olduğunda ve mutlak “B” değeri daha düşük olduğunda bitümün daha yüksek yorulma direncine sahip olduğu ve dolayısıyla yorulma ömrünün daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Bahia *et al.*, 2013).

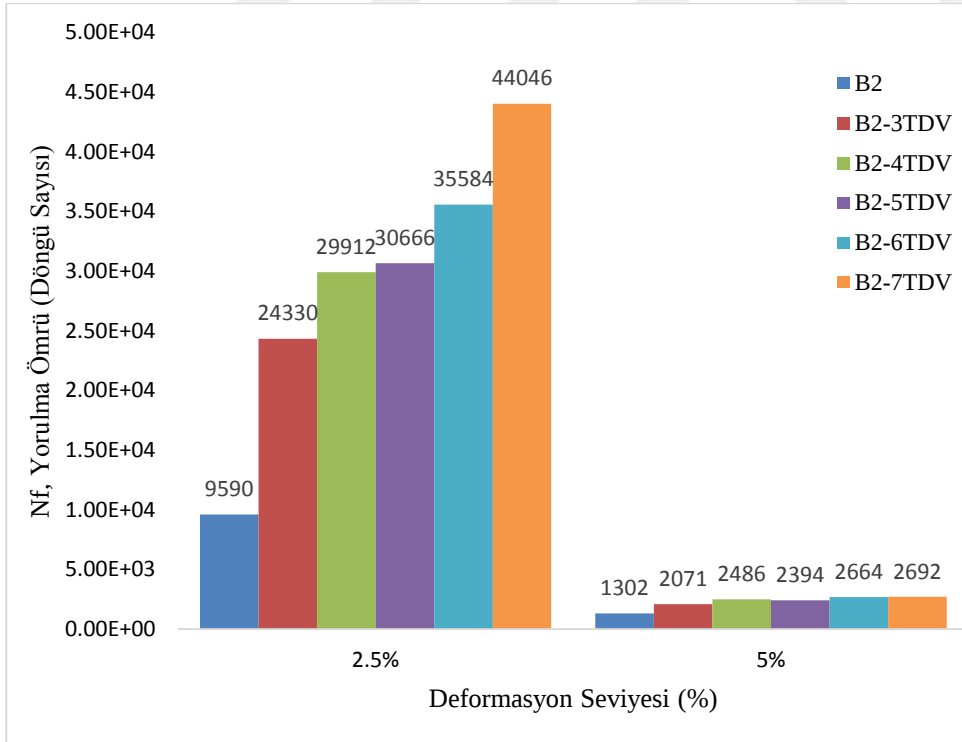
TDV katkılı B₂ bitümün yorulma ömrü (N_f) Şekil 5.42’de incelendiğinde; B₂ bitümün N_f değeri %2,5 deformasyon seviyesinde 9590 döngü iken B₂-3TDV numunesi için 24330 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan döngü (trafik) sayısı B₂ bitüme göre 2,53 kat artmıştır. Bu oran en yüksek modifikasyon seviyesi (%7) için 44046 döngü olarak B₁ numunesine göre 4,59 kat olarak belirlenmiştir. TDV modifiyeli B₂ bitümlerin yorulma ömrü asfalt kaplamasının kalın tabakasını temsil eden %2,5 deformasyondaki artış eğilimi ince tabakanı temsil eden %5 deformasyonundan daha fazla olmuştur.



Şekil 5.40 TDV katkılı B₂ numunelerine ait “A parametresi”



Şekil 5.41 TDV katkılı B₂ numunelerine ait "B parametresi"



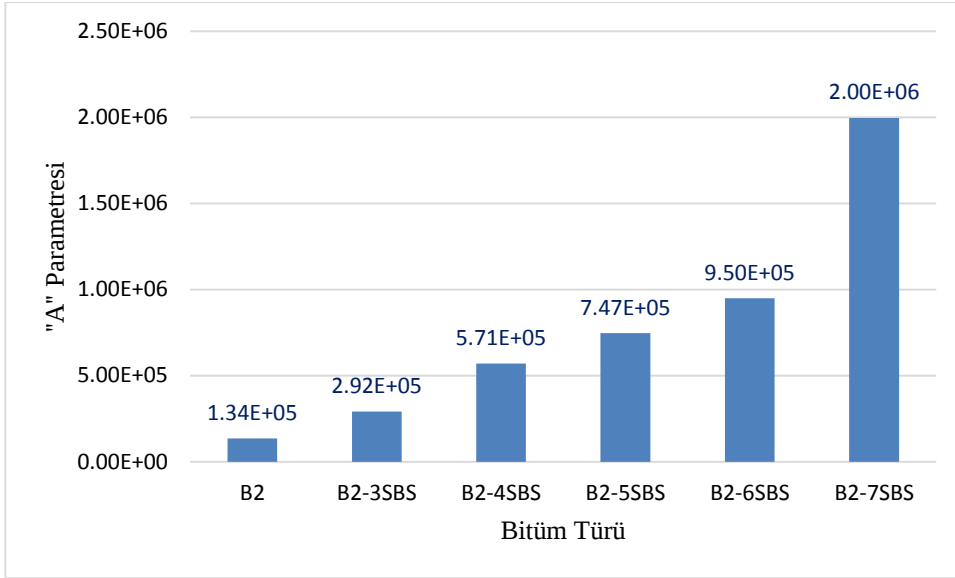
Şekil 5.42 TDV katkılı B₂ numunelerine ait yorulma ömrü

SBS modifiyeli B₂ bitümler Şekil 5.43-5.45'te değerlendirildiğinde, TDV'de olduğu gibi SBS katkısı B₂ bitüme eklenmesi "A" parametresi ve "B" parametresinin mutlak değerini arttırmakta ve dolayısıyla yorulma ömründe (N_f) artış meydana getirmektedir. Örneğin, B₂ bitümün "A" parametresinin değeri 1.34E+05 iken %3SBS ilavesiyle bu değer 2.92E+05 olarak en düşük modifikasyon seviyesinde B₂ bitümün hasara karşı direncini 2,18 kat arttırmıştır. %7SBS eklenmesiyle ise; bu değer 2.00E+06'ya yükselerek B₂ bitüme göre 14,92 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.43). TDV ile SBS katkıların arasında kıyaslama gerçekleştirildiğinde; B₂-7SBS numunesi B₂ bitümün "A" parametresi değerini 14,92 kat arttırarak 13,21 kat artış sağlayan B₂-7TDV'den daha iyi bitümün hasara karşı direncini arttırmıştır.

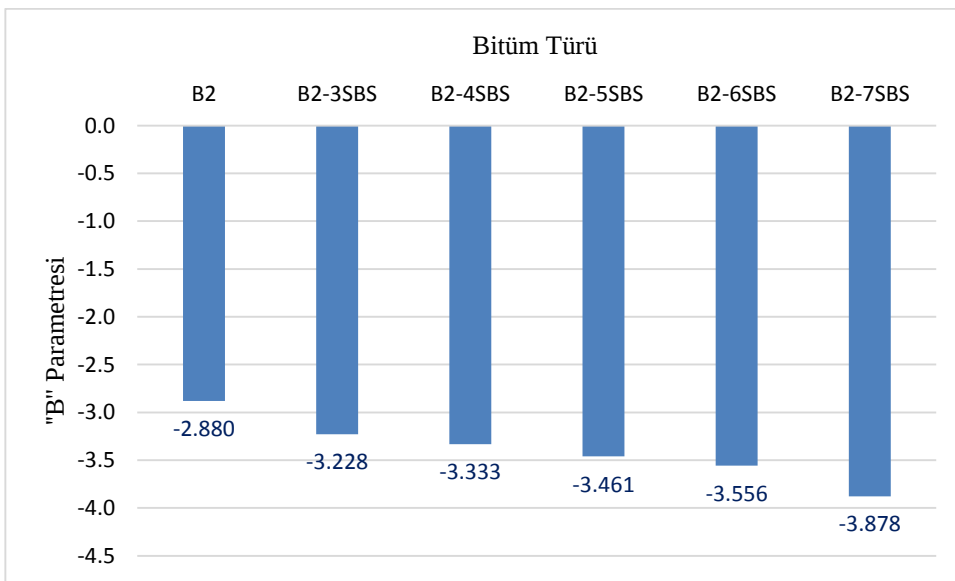
"B" parametresine gelindiğinde; en düşük modifikasyon seviyesinde (%3SBS) B₂ bitümün mutlak değeri 2,880'den 3,228'e yükselerek deformasyon değişimine karşı duyarlılığı 1,20 kat artmış ve böylelikle TDV katkısına kıyasla biraz daha az duyarlı hale gelmiştir. B₂ bitüme %3SBS ilavesinde ise; "B" değeri 3,878 olarak B₂ bitüme göre 1,35 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.44). Sonuç olarak, yüksek modifikasyon seviyesinde de SBS modifiyeli B₂ bitümlerin deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığı TDV modifiyeli B₂ bitümlerden daha az olarak yorulma ömründe daha çok artışa yol açmıştır.

SBS katkılı B₂ bitümün yorulma ömrü performansı Şekil 5.45'te incelendiğinde; B₂ bitümün N_f değeri asfalt kaplamasındaki kalın tabakalar için öngörülen %2,5 deformasyonda 9590 döngü iken B₂-3SBS numunesi için 15145 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısı B₂ bitüme göre 1,58 kat artmıştır. Bu oran B₂-7SBS numunesi için 57196 döngü olarak B₂ numunesine göre 5,96 kat olarak belirlenmiştir. Böylelikle, B₁ bitümde de olduğu gibi hem düşük ve hem yüksek modifikasyon seviyelerinde SBS katkılı B₂ bitümün yorulma ömrü TDV'den daha fazla olmuştur. Üstelik, B₁ bitümün yorulma ömrü asfalt kaplamasındaki ince tabakalar için öngörülen %5 deformasyon seviyesinde 1302 döngü iken B₂-7SBS numunesi için 3891 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısı B₁ bitüme göre 2,99 kat artmıştır. Bunların sonucunda, SBS

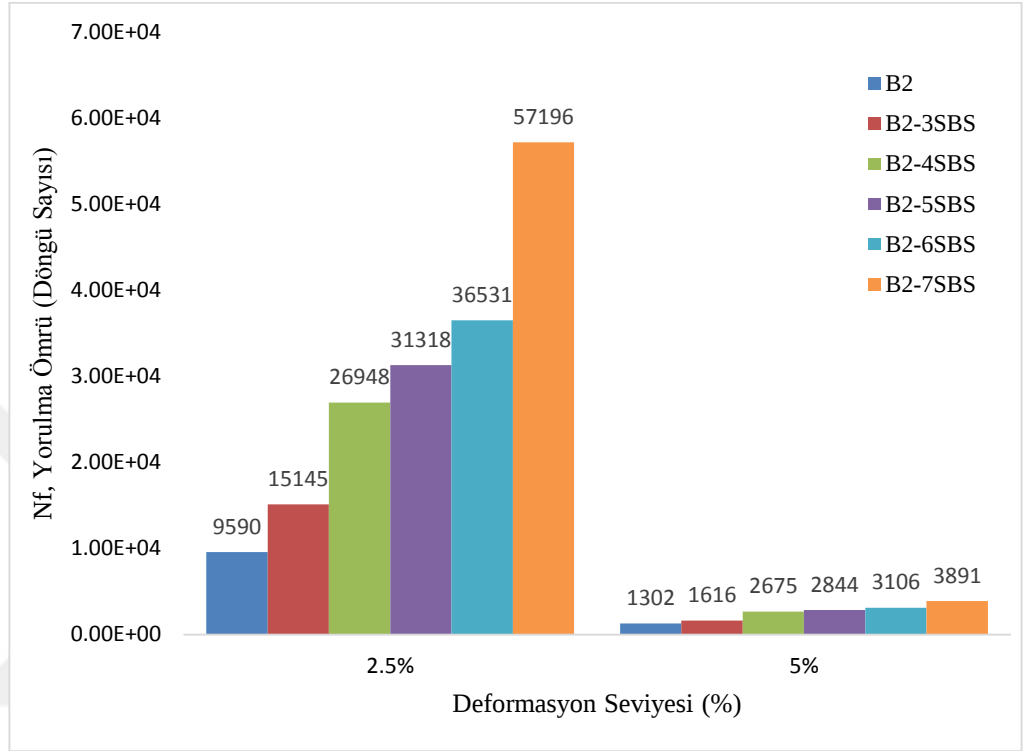
katkısının B₂ bitüme ilavesinin artışı ile yorulma ömründeki kalın tabakaya ait artış eğilimi ince tabakadan daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.43 SBS katkılı B₂ numunelerine ait "A parametresi"



Şekil 5.44 SBS katkılı B₂ numunelerine ait "B parametresi"



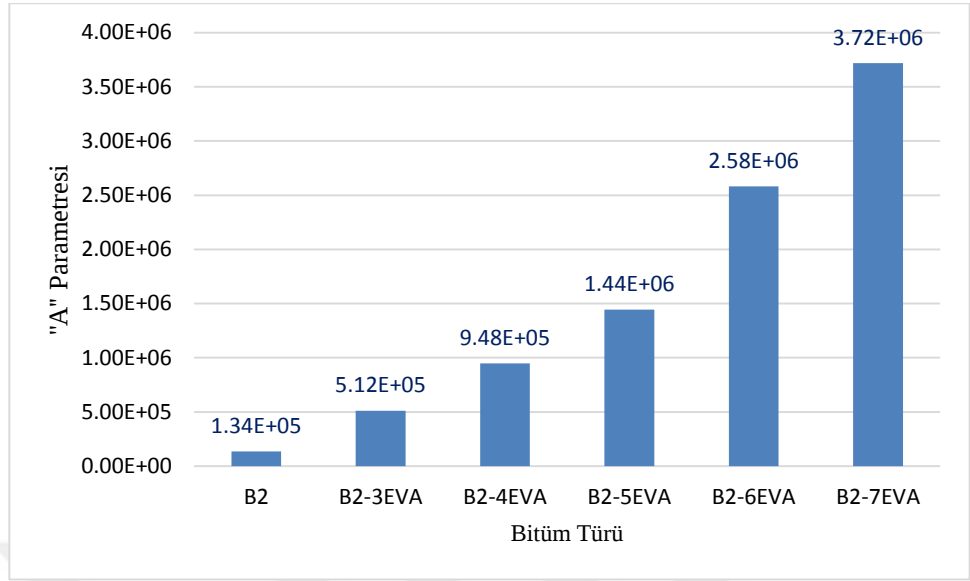
Şekil 5.45 SBS katkılı B₂ numunelerine ait yorulma ömrü

EVA katkılı B₂ bitümlerin LAS deneyi sonuçları Şekil 5.46-5.48’de sunulmuştur. Diğer polimer katkılarda da olduğu gibi EVA modifiyerinde B₂ bitüme ilave edilmesi “A” parametresi ve “B” parametresinin mutlak değerini arttırmakta ve dolayısıyla yorulma ömründe (N_f) artış tespit etmektedir. Örneğin, B₂ bitümün “A” değeri $9.21E+04$ iken en düşük modifikasyon seviyesi olan %3EVA eklenmesiyle bu değer $5.12E+05$ olarak B₂ bitümün bütünlüğünü koruma özelliğini 7,47 kat arttırmıştır. Diğer taraftan; B₂ bitüme ağırlıkça %7EVA eklendiğinde, “A” parametresinin değeri $3.73E+06$ ’ya yükselerek B₂ bitüme göre 51,03 kat arttırarak bitümün hasara karşı direncini önemli derecede iyileştirmiştir (Şekil 5.46). Katkılar arasında kıyaslama gerçekleştiğinde; “A” parametresinin

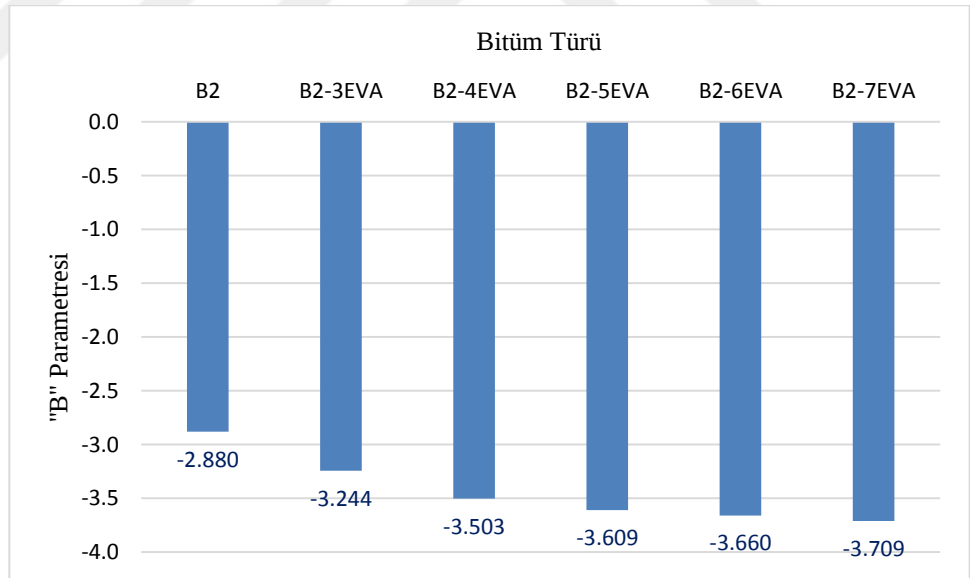
değerinin sıralaması EVA>SBS>TDV olmuş ve böylelikle EVA katkısı B₂ bitümün bütünlüğünü daha çok koruyarak hasara karşı en çok direnç gösteren katkı olarak görülmüştür.

“B” parametresi incelendiğinde; ağırlıkça %3EVA katkısında B₂ bitümün mutlak değeri 2,880’den 3,244’e yükselerek deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığını 1,12 kat arttırmıştır. %7EVA katkısında ise, “B” değeri 3,709 olarak B₂ bitüme göre 1,28 kat artış sağlamıştır (Şekil 5.47). Katkılar arasında kıyaslama gerçekleştiğinde; “B” değerinin sıralaması EVA<SBS<TDV olmuş ve böylelikle EVA katkısı diğer katkılara göre B₂ bitümü deformasyon seviyesine karşı daha az duyarlı hale getirmiştir.

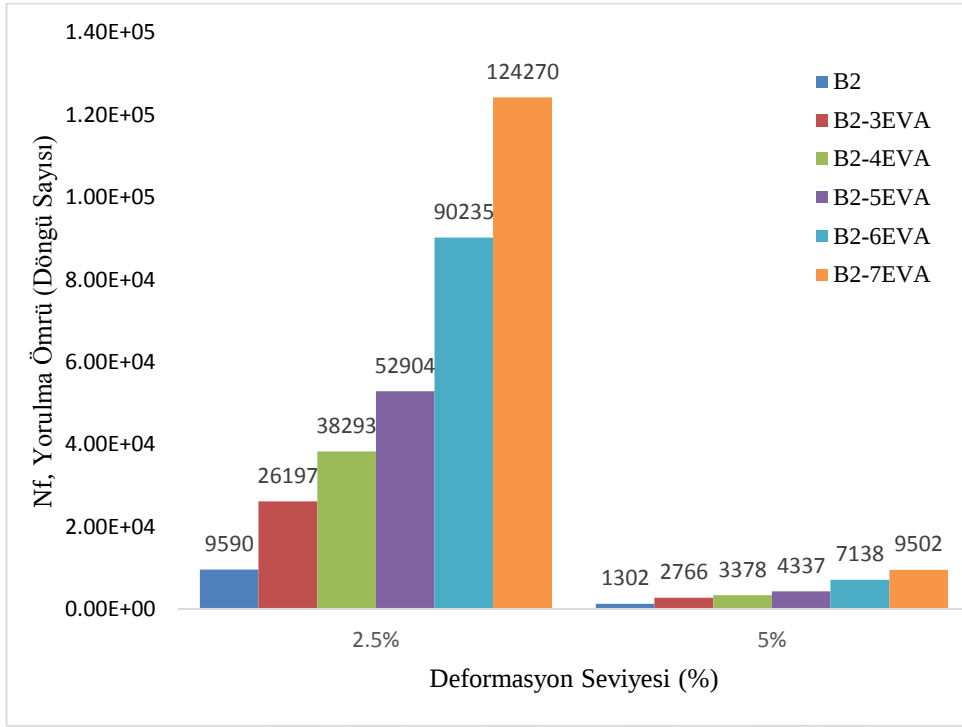
EVA katkılı B₂ bitümün yorulma ömrü (N_f) Şekil 5.48’de değerlendirildiğinde; B₂ bitümün N_f değeri %2,5 deformasyonda 9590 döngü iken en düşük katkı oranında (%3) 26197 döngü olarak yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısını B₂ bitüme göre 2,73 kat arttırmıştır. Bu oran en düşük katkı oranı (%7) için 124270 döngü olarak B₂ bitümüne göre 12,96 kat olarak belirlenmiştir. Böylelikle, B₁ bitümde de olduğu gibi hem düşük ve hem yüksek modifikasyon seviyelerinde EVA katkılı B₂ bitümün yorulma ömrü hem TDV ve hem SBS’den belirgin şekilde daha fazla olmuştur. Buna ek olarak, B₁ bitümün yorulma ömrü %5 deformasyon seviyesinde 1302 döngü iken B₂-7EVA numunesi için 9502 döngü olarak yorulma ömrü B₂ bitüme göre 7,30 kat artmıştır. Bu durum üzerine, EVA modifiyeli B₂ bitümün kalın tabakaya ait (%2,5 deformasyon) yorulma ömrü ince tabakadan (%5 deformasyon) daha fazla olmuştur. Hem katkı oranı artışı ile ortaya çıkan artış eğilimi ve hem yorulma bozulmasına uğrayan trafik sayısının %2,5 deformasyon seviyesinde belirgin bir şekilde daha fazla olması çalışmada kullanılan tüm polimer katkıların asfalt kaplamasındaki kalın tabakalar için kullanımında daha etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 5.46 EVA katkılı B₂ numunelerine ait “A parametresi”



Şekil 5.47 EVA katkılı B₂ numunelerine ait “B parametresi”



Şekil 5.48 EVA katkılı B₂ numunelerine ait yorulma ömrü

5.8 Zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibi performansı

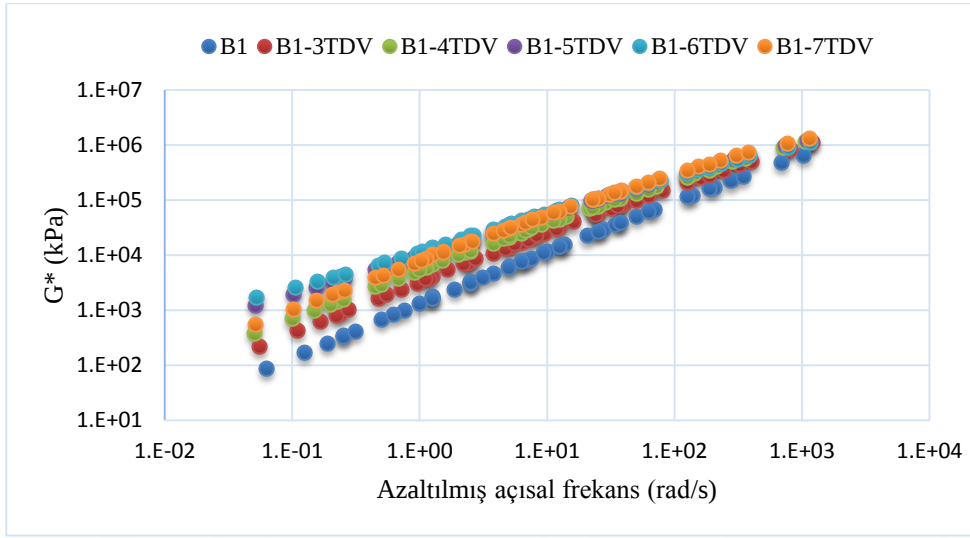
Farklı frekans deneyinden ana eğri (master curve) oluşturmak ve analiz yapabilmek için en az üç deney sıcaklığı ve üç frekansta malzemenin sertliğini veya elastisitesini temsil eden bir parametre verileri gerekmektedir (Cross, Jakatimath and KC, 2007). Çalışmada; geri dönüştürülmüş TDV, SBS ve EVA katkıları üzerinde farklı yüksek sıcaklıklarda (40 , 50 , 60 , 70°C) ve geniş logaritmik frekanslarda (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 30 Hz) olmak üzere sabit deformasyonda (%2,5) belirlenen kompleks kayma modülü (G^*) değerleri kullanılarak “master curve” geliştirilmiştir. Tüm katkıların G^* “master curve” çizgileri, zaman-sıcaklık süper pozisyon prensibini kullanarak 50°C referans sıcaklığı için oluşturulmuştur.

Kompleks kayma modülü bitümün üzerindeki sıcaklık ve yükleme etkilerinin oranını açıklamakta ve bitümün sıcaklığa bağımlılığı, onu oluşturmak için her bir

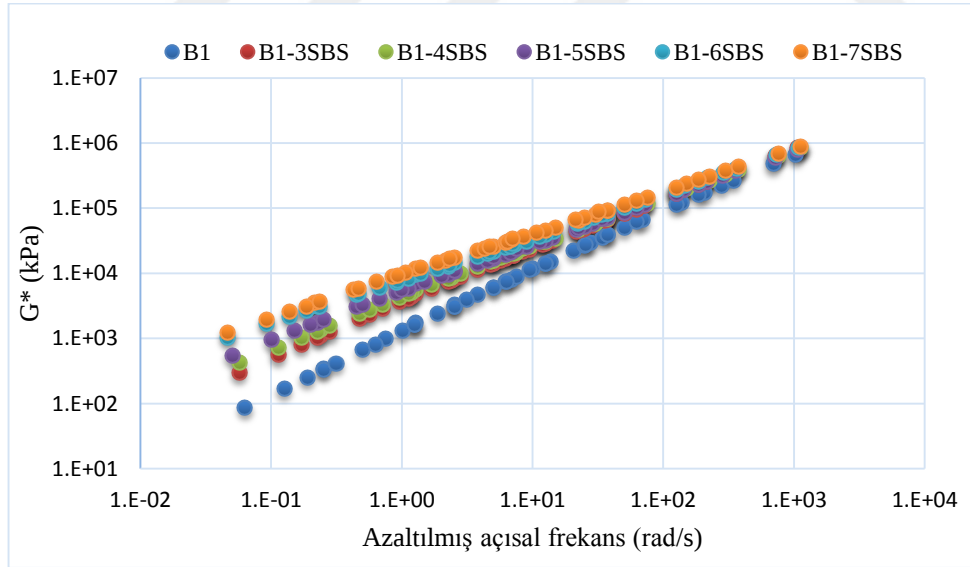
sıcaklıkta gereken kaydırma miktarı ile tanımlamaktadır. Dolayısıyla, çeşitli sıcaklıklardaki G^* verileri, eğriler yuvarlak ve düz fonksiyona (single smooth function) dönüşene kadar zamana göre kaydırılır. Bu şekilde, zamanın bir fonksiyonu olarak oluşturulan kompleks kayma modülün ana eğrisi, malzemenin zamana bağımlılığını ifade edebilmektedir (Williams, Landel and Ferry, 1955).

Geri dönüştürülmüş TDV, SBS ve EVA katkıları üzerinde farklı frekans deney sonucu oluşturulan ana eğrileri Şekil 5.49-5.55'te sunulmuştur. Farklı polimer katkıları B_1 ve B_2 bitümlerin sertliği (kompleks kayma modülü, G^*) üzerindeki etkilerinde benzer değişiklikler bulunmuştur. Bunun üstüne, klasik DSR deneyi sonucunda da olduğu gibi katkı yüzdelерinin artışıyla bitümlerin sertliğinde artış görülmüştür.

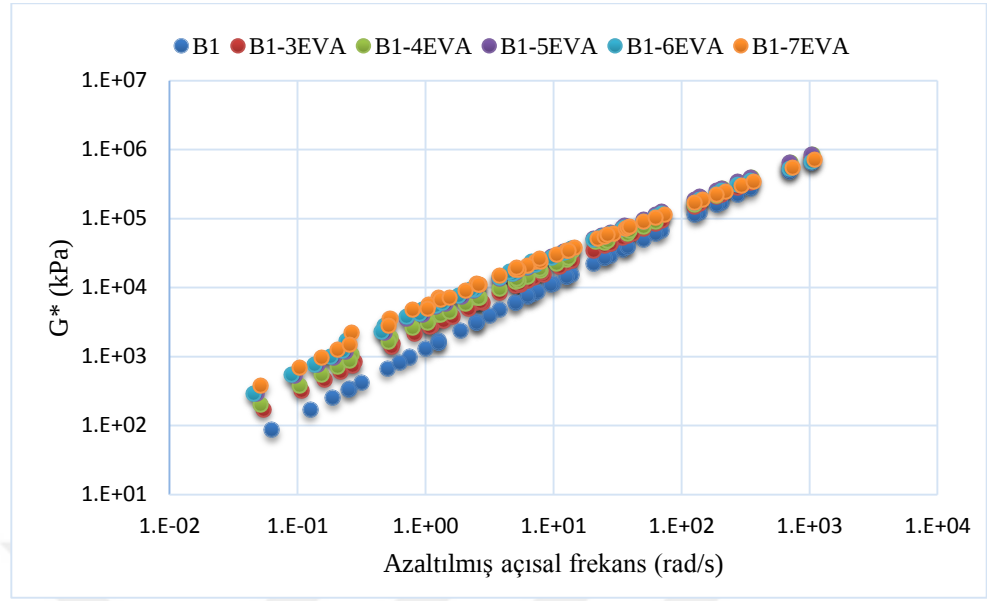
Yükleme frekansı ve sıcaklığın etkisi TDV, SBS ve EVA katkı B_1 ve B_2 bitümlerin üzerinde incelenirse; tüm polimer katkılı bitümlerin kompleks kayma modülü, yükleme frekansı arttıkça artmıştır. Bu, kompleks kayma modülü değeri yüksek sıcaklıkta ve düşük frekansta düşük olduğunu gösterir. Bunun tersine, düşük sıcaklıkta ve yüksek frekansta G^* değeri yüksek olmuştur. Başka anlamda ifade edilirse; örnek olarak, 5 Hz yükleme frekansındaki sıcaklığın artışından dolayı kompleks kayma modülünde düşüş sağlanarak bitümde yumuşama meydana gelmiş ve yüksek sıcaklıkta sertliğini düşürerek tekerlek izine karşı direncini azaltmış olmuştur. Ancak, başka çalışmalarda da olduğu gibi polimer katkıları yüksek frekanslarda ve düşük sıcaklıklarda bitümün sertliğini arttırmakta ve dolayısıyla tekerlek izine karşı direncini iyileştirmiştir (Zhu *et al.*, 2011; Nega, Ghadimi and Nikraz, 2015).



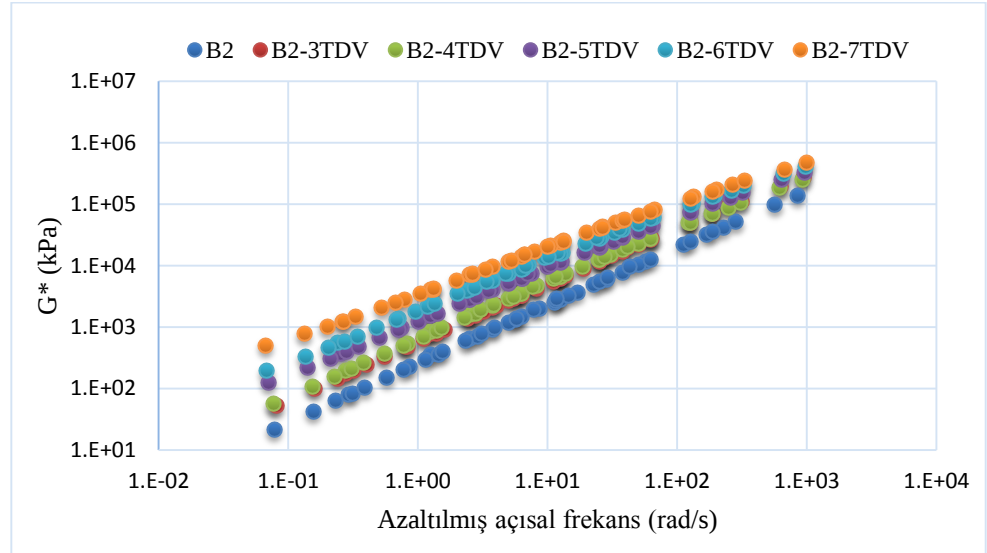
Şekil 5.49 TDV katkılı B₁ numunelerine ait ana eğri



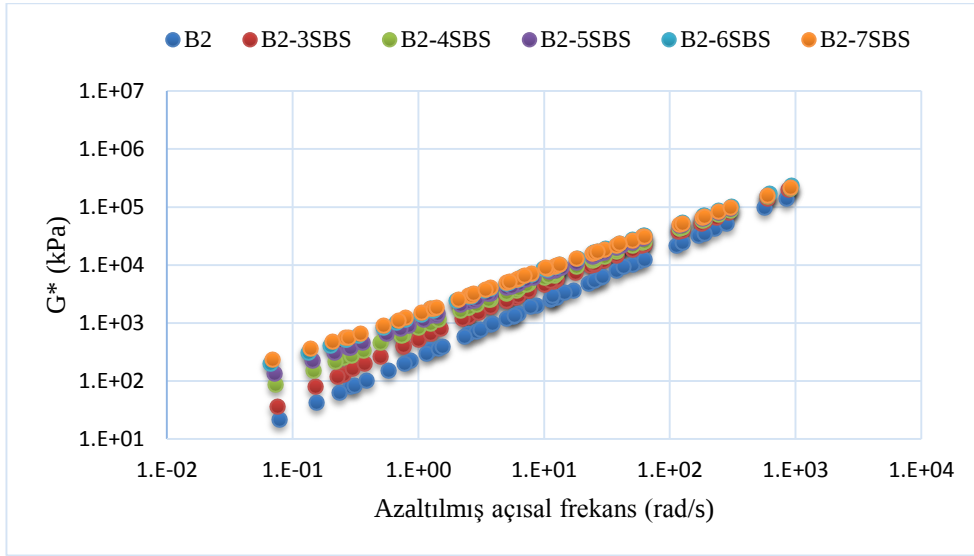
Şekil 5.50 SBS katkılı B₁ numunelerine ait ana eğri



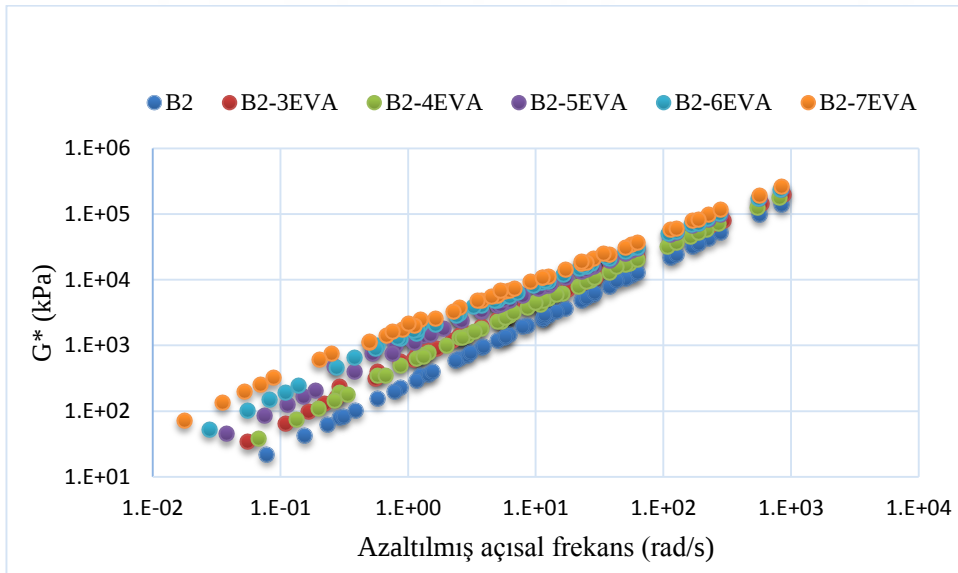
Şekil 5.51 EVA katkılı B₁ numunelerine ait ana eğri



Şekil 5.52 TDV katkılı B₂ numunelerine ait ana eğri



Şekil 5.53 SBS katkılı B₂ numunelerine ait ana eğri



Şekil 5.54 EVA katkılı B₂ numunelerine ait ana eğri

5.9 Marshall deney sonuçları

B50/160 (B₁) ve B 160/220 (B₂) bitümleri toplam agregâ ağırlığının % 3,5; 4; 4,5; 5,0 ve 5,5 oranı olarak seçilmiş ve her bir yüzde için üçer numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları formülleri yardımıyla hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), kuru agregâlar arası boşluk oranları (VMA) ve ADB (asfalt dolu boşluk oranı, V_f) belirlenmiştir. B₁ ve B₂ bitümlere ait değerler ayrıntılı bir şekilde Ek 4.1 ve Ek 4.2’de verilmiştir. Bunun ardından numuneler Marshall stabilite cihazı ile kırılarak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerlerin kullanılmasıyla stabilite, D_p , V_h , VMA, V_f ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

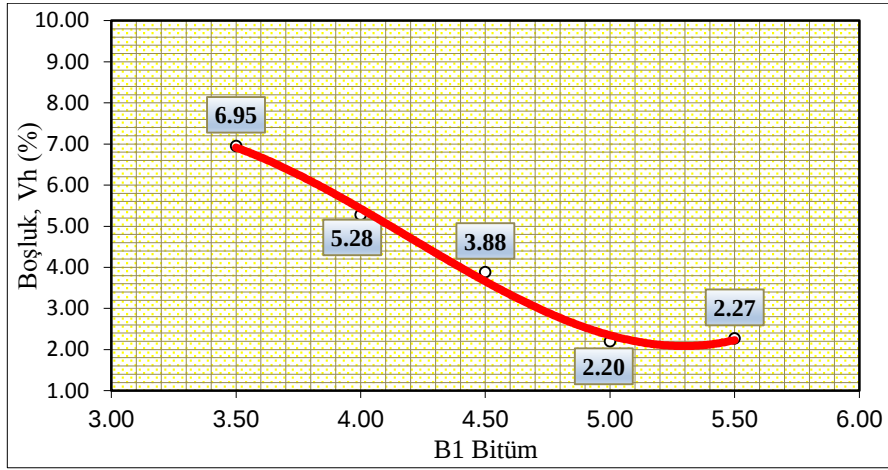
Çizelge 5.33 ve Çizelge 5.34, B₁ ve B₂ bitümler ile hazırlanmış olan numunelerin sonuçlarını, Şekil 5.55-5.66 ise aynı bitümlerden elde edilen Marshall numunelerin optimum bitüm içerikleri tayininde kullanılan grafiklerini sunmaktadır.

Çizelge 5.33 B₁ bitümlerin optimum içeriğini belirlenmesi için kullanılan değerler

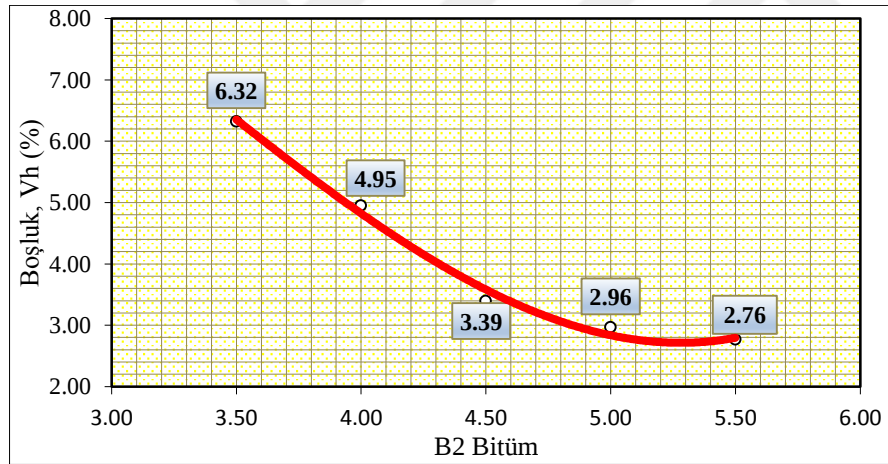
Bitüm (%)	V_h (%)	VMA (%)	V_f (%)	D_p (g/cm ³)	Akma (mm)	Stabilite (kgf)
3,5	6,95	14,50	52,1	2,339	2,22	1125
4	5,28	13,98	62,2	2,364	2,38	1171
4,5	3,88	13,72	71,7	2,383	2,62	1232
5	2,20	13,21	83,4	2,408	2,81	1247
5,5	2,27	14,25	84,1	2,391	3,06	1199

Çizelge 5.34 B₂ bitümlerin optimum içeriğini belirlenmesi için kullanılan değerler

Bitüm (%)	V_h (%)	VMA (%)	V_f (%)	D_p (g/cm ³)	Akma (mm)	Stabilite (kgf)
3,5	6,32	13,92	54,6	2,355	2,45	1062
4	4,95	13,68	63,8	2,373	2,60	1111
4,5	3,39	13,28	74,5	2,395	2,76	1158
5	2,96	13,89	78,7	2,390	3,08	1118
5,5	2,76	14,69	81,2	2,379	3,32	1082



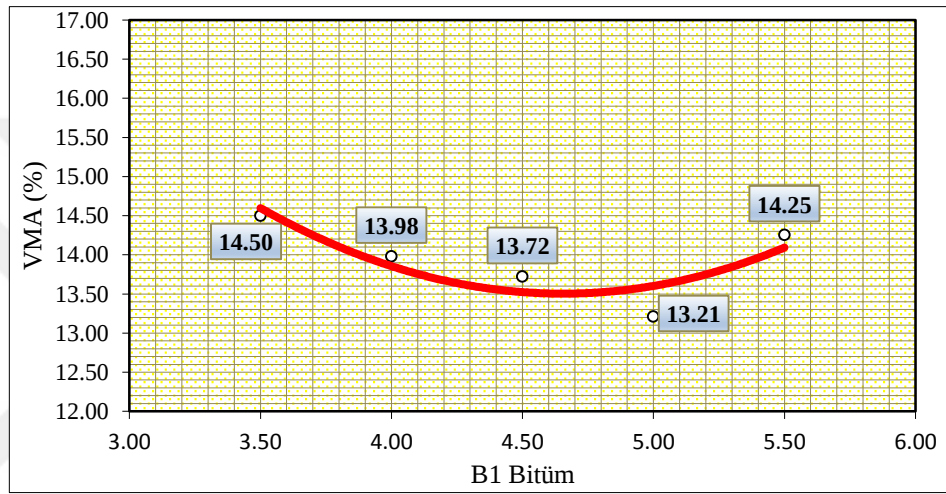
Şekil 5.55 B₁ bitüm için hava boşluğu (V_h) – bitüm içeriği grafiği



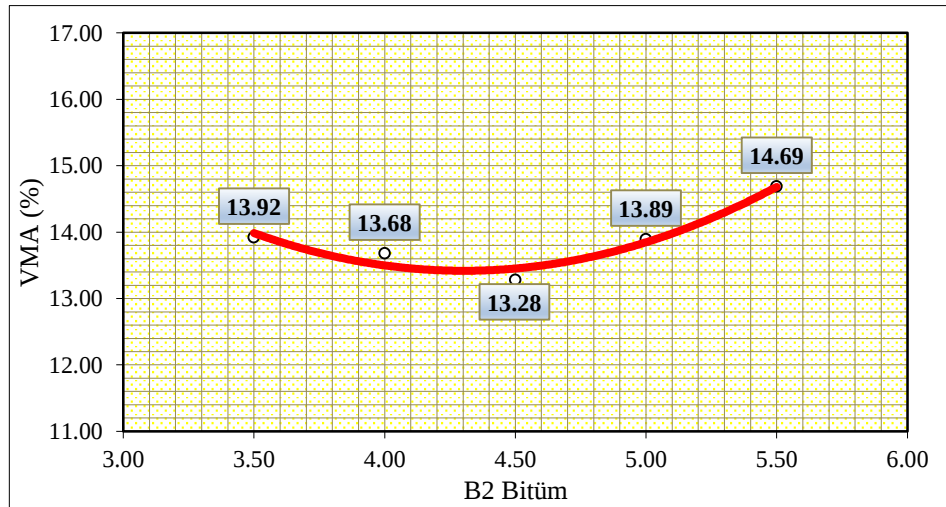
Şekil 5.56 B₂ bitüm için hava boşluğu (V_h) – bitüm içeriği grafiği

Şekil 5.55 ve 5.56’da gösterdiği gibi, karışımdaki hava boşluklarının yüzdesi bitüm içeriğinin artışıyla azalmıştır. Bu, bitüm içeriğinin sabit bir hacim için arttırıldığını, havanın dışarı çıkarıldığını ve böylece artan bitüm içeriği ile doğru ilişkili hava boşluğu yüzdesinin azaldığını göstermektedir.

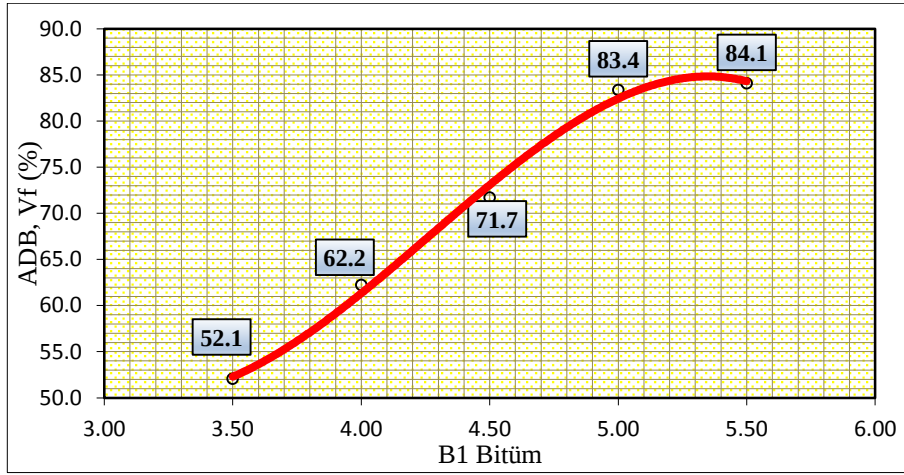
Şekil 5.57 ve 5.58’de, mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) ilk olarak bitüm içeriğindeki artışla azalmış, minimum seviyeye ulaştıktan sonra artmaya başlamıştır. Bu, sıkıştırılmış bir numunenin VMA yüzdesinin artan bitüm içeriği ile azalmasını, minimum seviyeye ulaşmasını ve ardından artması gerektiğini göstermektedir.



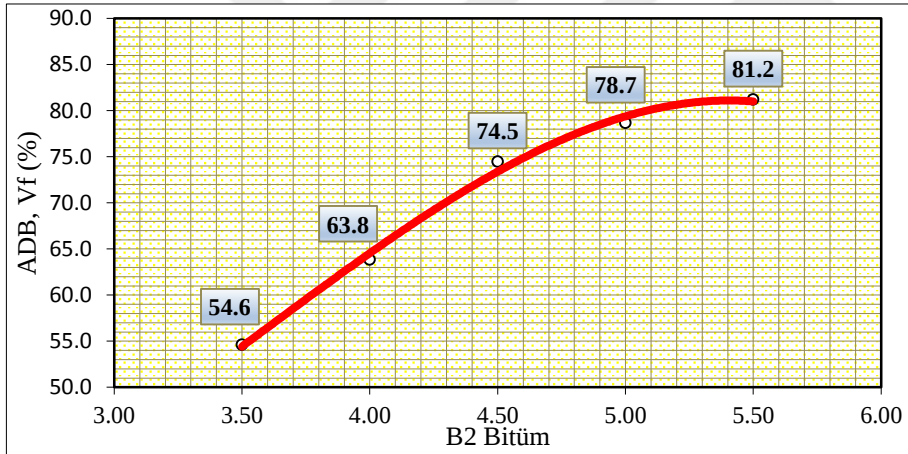
Şekil 5.57 B₁ bitüm için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği



Şekil 5.58 B₂ bitüm için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği



Şekil 5.59 B₁ bitüm için asfalt dolu boşluk (V_f) – bitüm içeriği grafiği

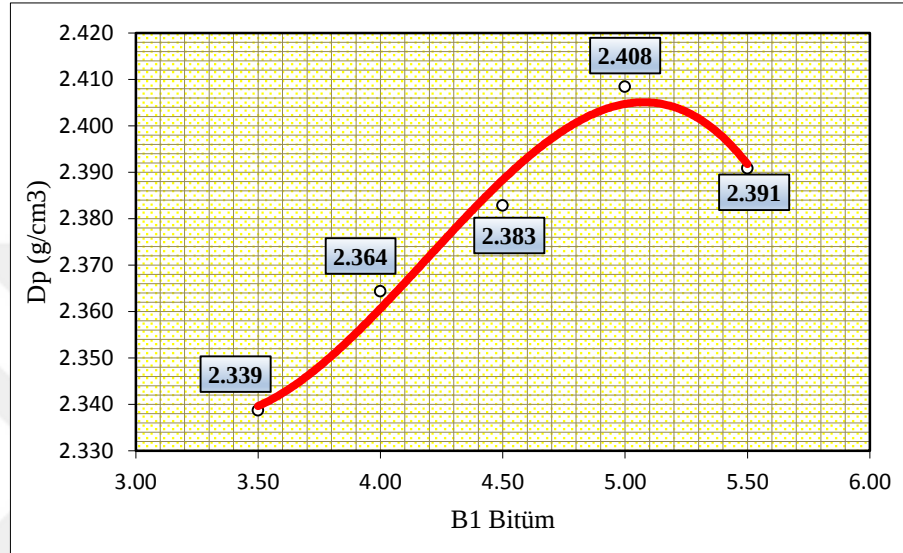


Şekil 5.60 B₂ bitüm için asfalt dolu boşluk (V_f) – bitüm içeriği grafiği

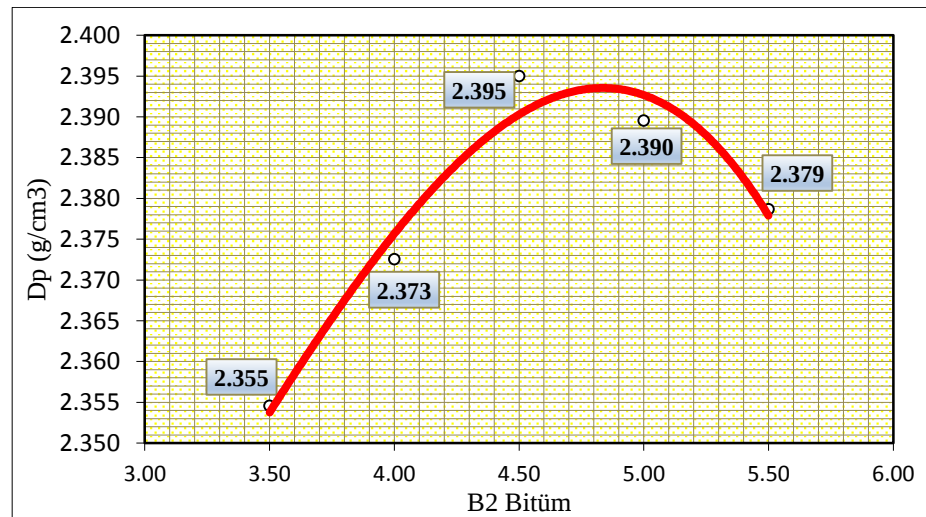
Şekil 5.59 ve 5.60’ta, asfalt dolu boşluk oranı (ADB) artan bitüm içeriği ile artmıştır. Bu, karışımlar için sıkıştırılmış numunelerin ADB yüzdesinin bitüm içeriğinde bir artışla arttığını ortaya çıkarmaktadır.

Şekil 5.61 ve 5.62’de, hacim özgül ağırlık (D_p) genellikle artan asfalt içeriği ile artmış, maksimum seviyeye ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin birim ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla

arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, karışımdaki bitüm içeriği artarken boşlukları doldurması dolayısıyla birim ağırlığını arttırmasıdır.



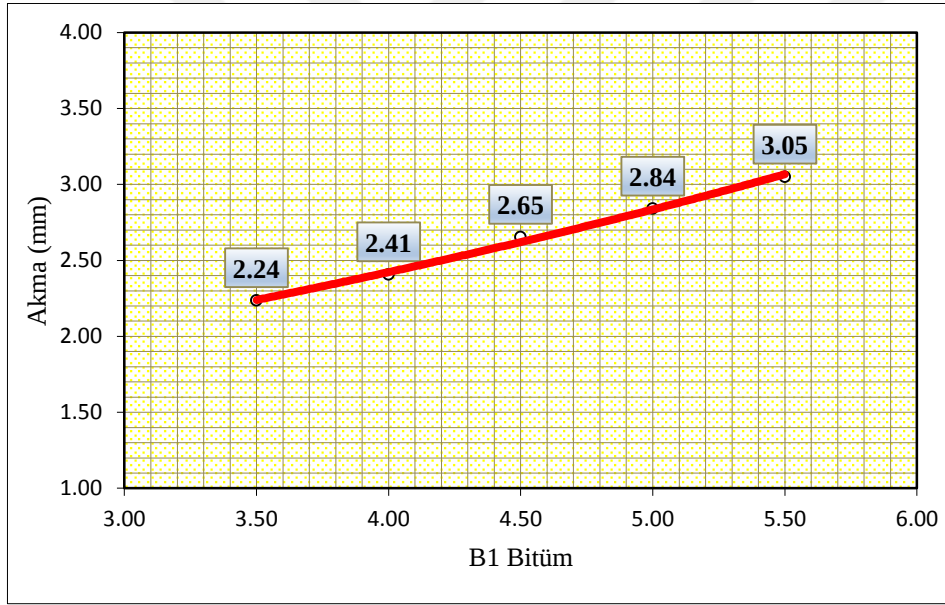
Şekil 5.61 B₁ bitüm için hacim özgül ağırlığı (D_p) – bitüm içeriği grafiği



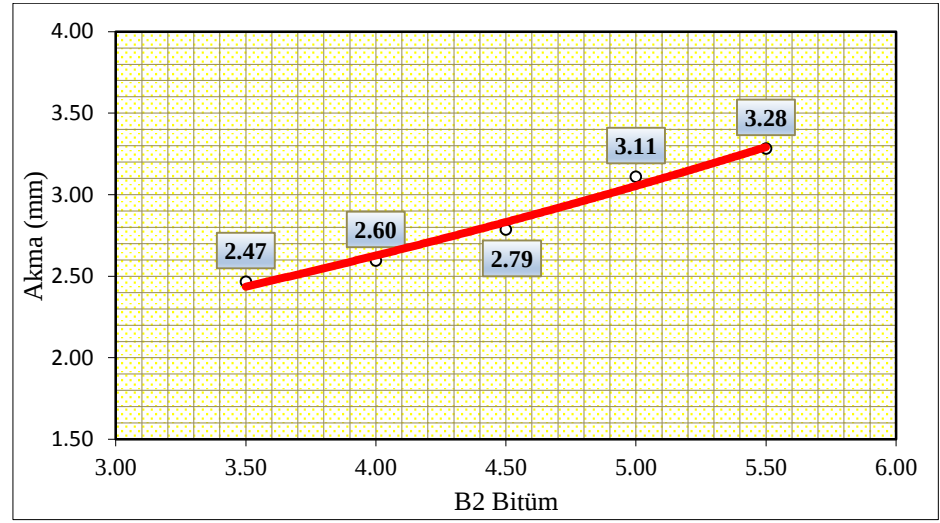
Şekil 5.62 B₂ bitüm için hacim özgül ağırlığı (D_p) – bitüm içeriği grafiği

Şekil 5.63 ve 5.64'te, akış değeri bitüm içeriğindeki artışla artmıştır, bu da akış değerinin karışımdaki sertliğin azalması nedeniyle bitüm içeriğindeki artışla arttığını meydana getirmektedir.

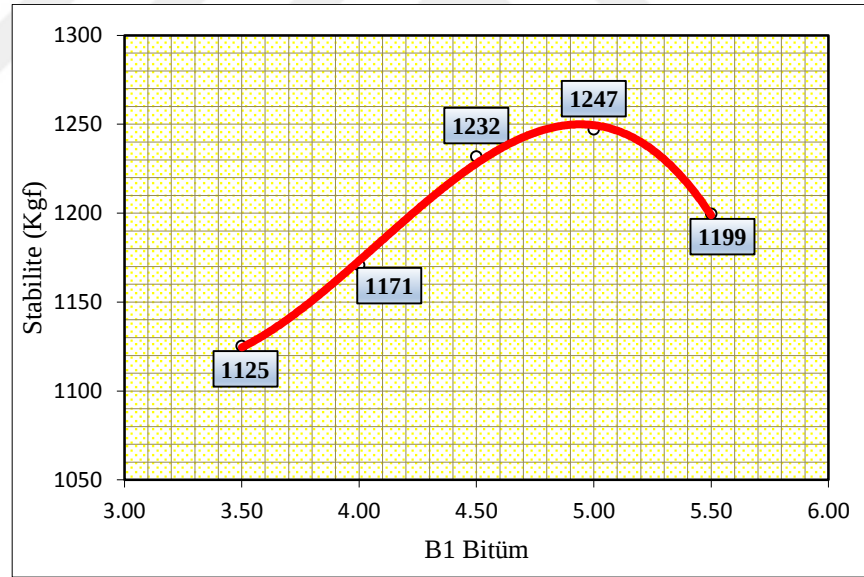
Şekil 5.65 ve 5.66'da, Artan bitüm içeriği ile stabilite artarak zirveye ulaşmış ve ardından azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığı anlamına gelmektedir. Özgül ağırlığındaki artış ve düşüş eğilimleri numunenin stabilitesi ile doğru bağlantılıdır.



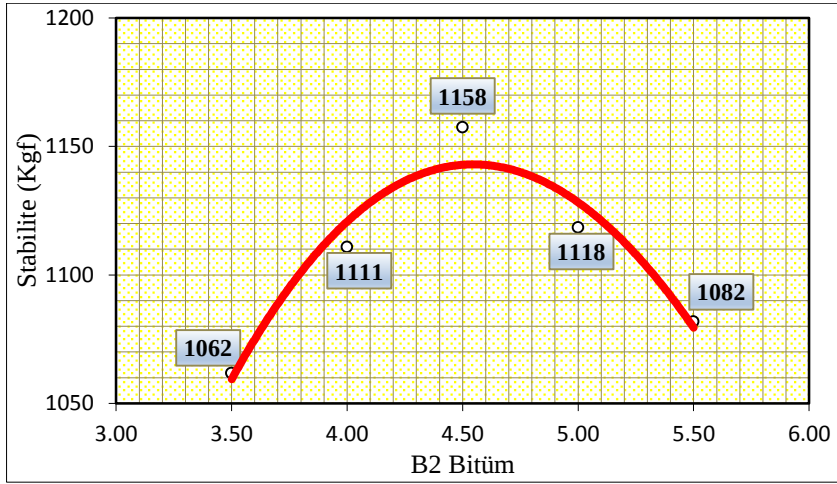
Şekil 5.63 B₁ bitüm için akma değeri – bitüm içeriği grafiği



Şekil 5.64 B₂ bitüm için akma değeri – bitüm içeriği grafiği



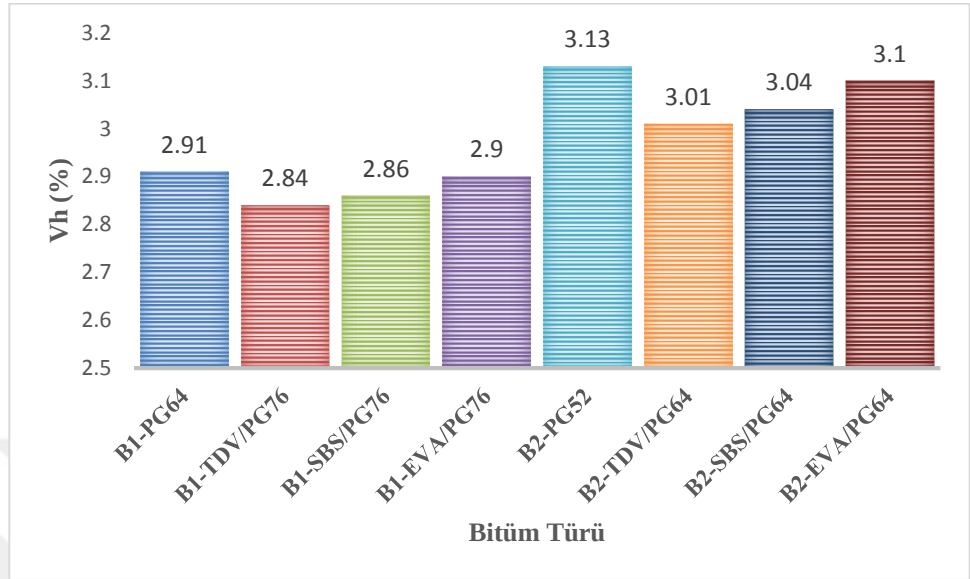
Şekil 5.65 B₁ bitüm için stabilite – bitüm içeriği grafiği



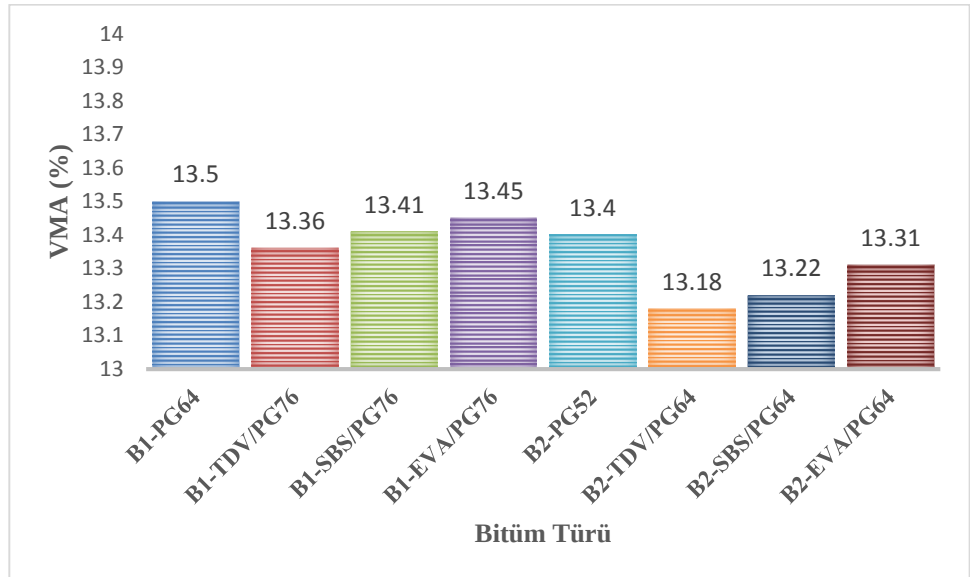
Şekil 5.66 B2 bitüm için stabilite – bitüm içeriği grafiği

Her iki bitümdeki numuneler için gerekli özgül ağırlıkları, boşluk ve stabilite grafikleri çizildikten ve analizleri yapıldıktan sonra, D_p - bitüm % ve stabilite – bitüm % grafiklerin maksimum olduğu bitüm içerikleri, hava boşluğu (V_h) - bitüm % grafiğinde boşluk oranının %4'e tekabül ettiği bitüm içerikleri, ADB - bitüm % grafiğinde asfalta dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği bitüm içerikleri belirlenmiştir. Her dört grafikten elde edilen optimum bitüm değerinin aritmetik ortalaması alınarak, optimum bitüm içeriği bulunmuştur. Sonuç olarak, B_1 bitümü için optimum bitüm içeriği % 4,81 ve B_2 bitümü için % 4,70 olarak bulunmuştur.

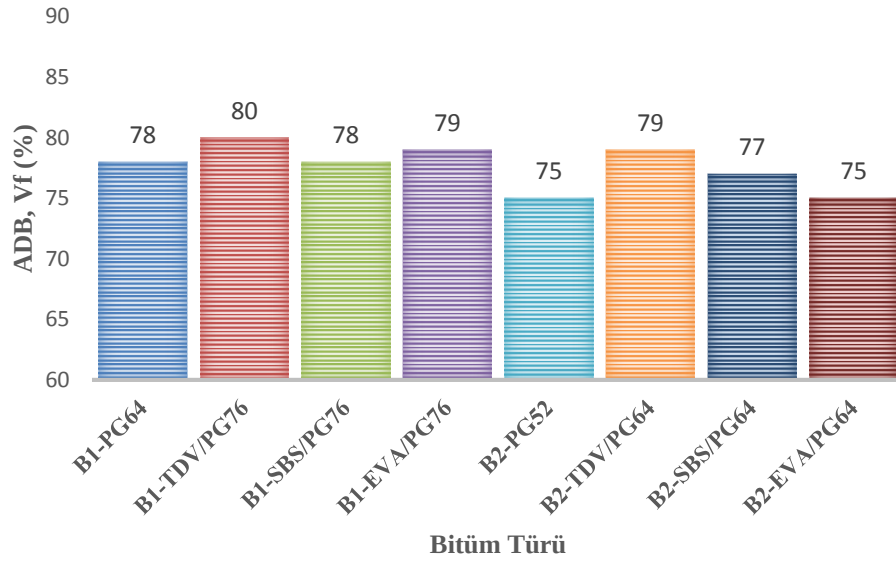
Her iki bitümün karışım içerisindeki optimum yüzdesi hesaplandıktan sonra hem B_1 ve hem B_2 bitümler üzerinde optimum içerikte kontrol amaçlı üçer numune yapılmıştır. Çalışmadaki TDV, SBS ve EVA olmak üzere klasik DSR deney sonucuna göre tüm katkıların en yüksek aynı PG sınıfına ulaşabildiği modifiyeli numuneler seçilmiş ve saf bitümlerin optimum içeriği miktarında marshall numuneleri yapılarak hem saf bitümlerle ve hem katkıları arasında kıyaslamalar gerçekleştirilmiştir. Polimer katkılarda B_1 ve B_2 bitümlerde de olduğu gibi her katkı için üçer numune yapılmış ve tüm verilerin ortalaması Şekil 5.67-5.72'de sunulmuştur.



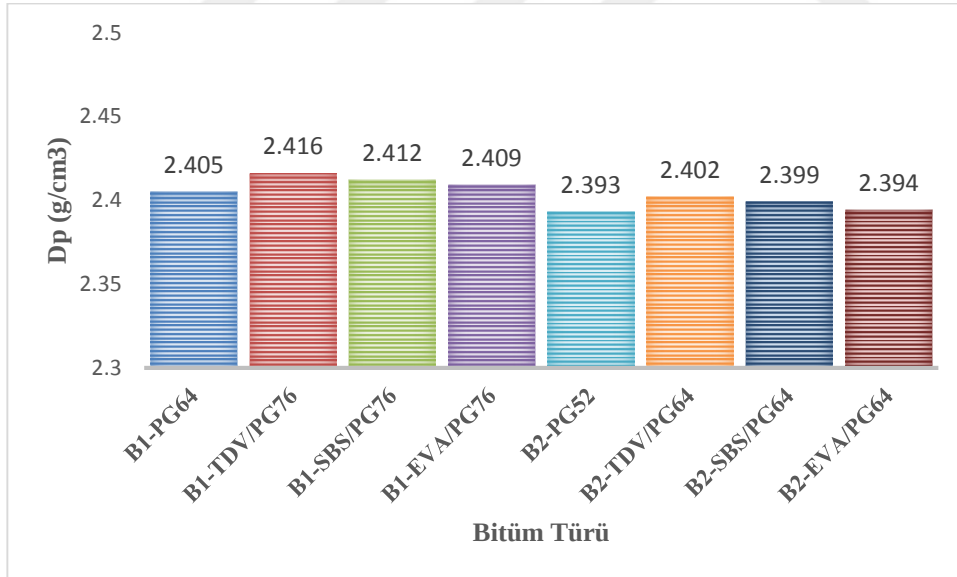
Şekil 5.67 Üç farklı katkıının optimum bitüm yüzdesinde hava boşluğu (V_h)



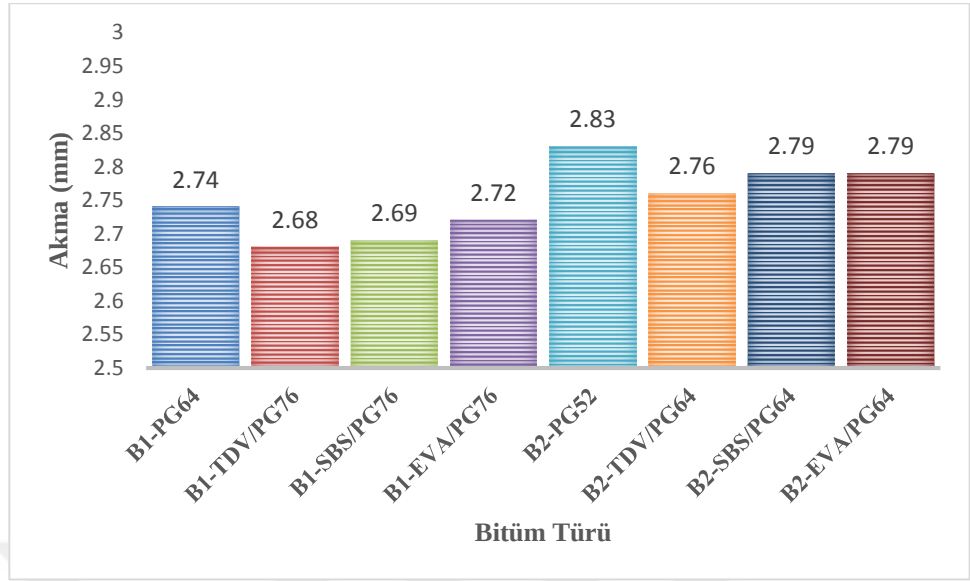
Şekil 5.68 Üç farklı katkıının optimum bitüm yüzdesinde agregalar arasındaki boşluğu (VMA)



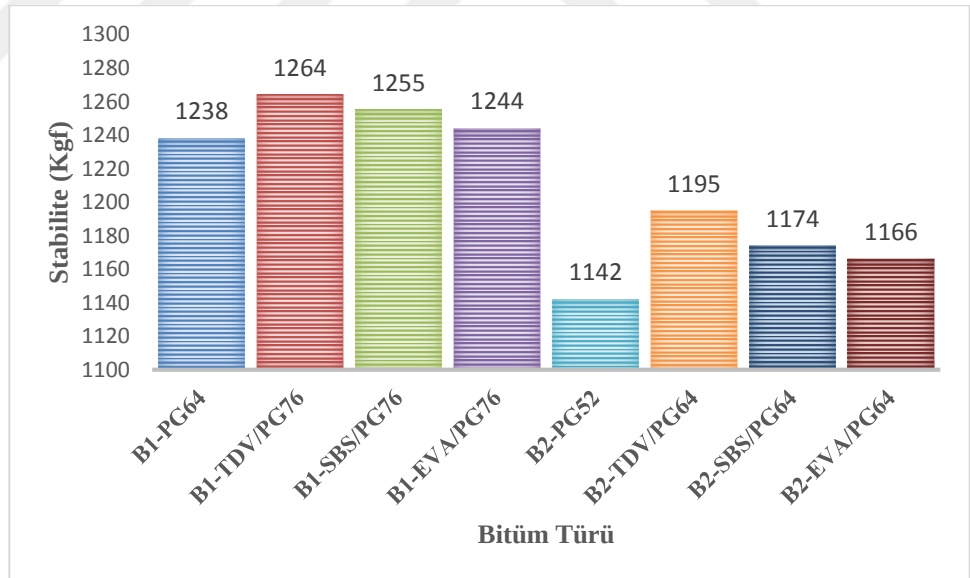
Şekil 5.69 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde asfalt dolu boşluğu (V_f)



Şekil 5.70 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde özgül ağırlığı (D_p)



Şekil 5.71 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde akma değeri



Şekil 5.72 Üç farklı katkının optimum bitüm yüzdesinde stabilitesi

Şekil 5.67-5.72 sonuçlarına göre, modifiye edilmiş B₁ ve B₂ numunelerin hava boşluğu yüzdeleri modifiyerlerden daha fazla olmuştur. Katkıların arasında

kıyaslama gerçekleştiğinde, her iki bitümde en yüksek V_h değerine sahip olan katkı EVA ve en dūřuėu ise TDV olmuştur (şekil 5.67). Kuru agregalar arasında boşluk oranı tüm katkılarda saf bitümlere gre nispeten dūřuk değerler elde edilmiştir. Katkıların arasında en dūřuk değer TDV katkısına ve saf bitümlere yakın olan en yüksek değer ise EVA katkısına ait olmuştur (şekil 5.68). B_1 bitümü ile SBS katkılı ve B_2 bitümü ile EVA katkılı karışım numunelerin asfalt dolu boşluk oranı (V_f) aynı değeri vermiş, bylelikle en yüksek değer TDV katkısında ortaya çıkmıştır (şekil 5.69). TDV katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki oranı dūřuk olarak hava boşluğu da diğer katkılara gre daha dūřuk olmuştur. Bu parametrelerin etkileşimi neticesinde tüm numunelerin hacim özgül ağırlığı (D_p) değeri her iki bitüm için aynı olarak sıra ile TDV>SBS>EVA>B olmuştur (şekil 5.70). Tüm katkıların akma değeri saf bitümlere gre dūřuk olsa da birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ancak, diğer parametrelerde de olduğu gibi en iyi sonucu TDV katkısı vermiştir (şekil 5.71). Akma değerinin dūřuk olması karışım numunesinin daha yüksek yüklemeye maruz kalmasının göstergesidir. D_p değerinin büyük olması ise bir numunenin bütünlüğünün daha sağlam olmasının anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bir numunenin yüksek D_p değeri ve dūřuk akma değeri yüksek stabilite değerini ortaya çıkarmakta yardımcı olabilir. Bu yaklaşımın sonucunda hem B_1 ve hem B_2 bitümlerde en yüksek stabilite değeri TDV katkısına ait olmuştur. Bunun ardından sıra ile SBS ve EVA katkıları olarak saf bitümlerden daha yüksek stabilite değerleri elde edilmiştir (şekil 5.72).

6. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında B50/70 (B₁) ve B160/220 (B₂) penetrasyon sınıflarına sahip bitümlere modifiye amaçlı ağırlıkça 5'er yüzdede (%3, 4, 5, 6 ve 7) üç farklı polimer katkıları eklenmiştir. Geri dönüştürülmüş HDPE, GTR, EPDM ve bitüm içeren vulkanizat yöntemiyle elde edilmiş kompozit TDV katkısı çalışmada ana katkı olarak kullanılarak referans katkı olarak seçilen SBS ve EVA katkıların bitüm ve bitümlü sıcak karışım üzerinde etkileri incelenmiş ve elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

Tüm katkılar B₁ ve B₂ bitümlerin penetrasyonunu düşürmüş ve aynı zamanda yumuşama noktası ve PI değerinin artmasını sağlamıştır. Tüm katkılar B₁ bitümün penetrasyonunu yaklaşık aynı miktarda düşürerek benzer sertliğe sahip olmuştur. Ancak, B₂ bitümde penetrasyon değerinin daha fazla düşmesiyle birlikte en düşük penetrasyon değeri TDV katkısına ait olmuştur. Aynı zamanda penetrasyon sonucunun tersine, yumuşama noktası değeri penetrasyonun düşüş miktarına göre daha az etkilenmiş ve daha az artış eğilimi göstermiştir. Böylece, B₁ bitümde en yüksek yumuşama noktası değeri SBS modifiyeli bitümler ve B₂ bitümde ise EVA modifiyeli bitümler gözlenmiştir. Fiziksel deneyler, yalnızca bitümün performansı ile ilgili pratik deneyim ve gözlemlere bağımlı olduğu için deney sonuçları sadece belirli şartlar için geçerli olmaktadır. Dolayısıyla, Koşullar değiştiğinde sonuçlar artık aynı olmayabilir. Örneğin, deneylerin sınırlı şekilde bir veya iki sıcaklıkta uygulandığı için farklı bitümler farklı sonuçlar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle, kullanılan katkılar bitümlerin penetrasyonunu düşürerek ve yumuşama noktasını arttırarak bitümlerin sertliğini arttırmasını ortaya çıkarsada daha geniş sıcaklıklarda reolojik davranışlarını incelenmesine ihtiyaç duyulması önem arz etmektedir.

Bitümlerin yaşlanma koşullarını göz önünde bulundurmadan sınıflandırma, fiziksel deneylerin başka bir sakıncasıdır. Çünkü, karıştırma, serme ve sıkıştırma sırasındaki karışımın yaşlanmasını ve hizmet ömrü boyunca kaplamanın atmosferdeki oksijenle reaksiyona girmesinden kaynaklanan uzun süreli yaşlanan bitümden sorumlu olmamaktadır. Bu nedenle, çalışmada kısa süreli yaşlanmanı

laboratuvar ortamında simüle etmek amacıyla RTFO cihazı ve uzun süreli yaşlanmayı temsil eden PAV cihazı kullanılmıştır.

RTFOT ile yaşlandırılmış hem saf bitümler ve hem polimer modifiyeli bitümlerin kütle kaybı maks. %1 olarak belirlenen Superpave şartname limitini sağlamıştır. Yaşlandırılmış saf ve katkılı bitümlerin sertliği orijinal bitümlere kıyasen artan katkı miktarlarıyla birlikte daha çok artmıştır. Buradaki sertlik artışı bitümlerin katkıdan etkilenmesinden ziyade oksidasyon ve yaşlanmaktan kaynaklanmaktadır. Bütün bunlara rağmen kalan penetrasyon faktörü bakımından genel olarak TDV, SBS ve EVA katkılı bitümlerin standartları sağladığı görülmektedir. Hem B₁ ve hem B₂ bitümlerinde sadece %7 EVA katkılı bitümlerin kalan penetrasyon değerleri sıra ile 40 ve 44 olarak %50 kriterinin altında kalarak standardı sağlamadığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde yumuşama noktası değerleri de incelendiğinde hemen hemen tüm katkı türlerinde yaşlandırma sonrasında en az -5 °C/ +12 °C standart kriterinin korunduğu tespit edilmiştir. Bu bitümün servis öncesi yaşlanmayı temsil eden kısa süreli yaşlanma nedeniyle çok katı kıvamlara ulaşmayacağını ortaya koymaktadır.

TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ ve B₂ bitümler ile BSK'lar için hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları incelendiğinde; viskozite değerleriyle doğru orantılı modifiye bitümlerin B₁ ve B₂ bitümlere oranla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da artışlar gözlemlenmiştir. Bu artış, modifiye bitümlerin sertleştiği anlamına gelmektedir. TDV ve SBS modifiyeli bitümlerin yüksek oranlarda (yüzde 5, 6 ve 7 gibi) B₁ bitüme ilave edilmesi genel olarak katkı üreticileri ve araştırmacılar tarafından önerilen maksimum 180 °C civarında olması gerekliliğinden dolayı daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerlerine ulaştığında uygulama sırasında harcanacak olan enerji miktarının artması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, ağırlıkça %6 ve %7 TDV ve SBS modifiyeli bitümlerden daha düşük oranlarda kullanılmasının gerekliliği tespit edilmiştir. Dönel viskozite deneyi ayrıca laboratuvar ortamında ilk olarak denenen kompozit TDV katkısının en fazla hangi oranlarda kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Hem orijinal ve hem RTFO ile yaşılandırılmış TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ ve B₂ bitümlerin klasik DSR tekerlek izi performansı incelendiğinde; katkıların ağırlıkça B₁ ve B₂ bitümlere ilavesiyle kayma modülünde artış, faz açısında düşüş ve tekerlek izi parametresinde ise artış gözlenmiştir. Bahsedilen parametrelerdeki değişiklikler artan katkı miktarları ile doğru orantılı olmuştur. Her üç katkı en düşük modifikasyon seviyesinde (%3) yüksek sıcaklık PG sınıfı 64 olan B₁ bitüme ve PG 52 olan B₂ bitüme eklendiğinde bitümlerin performansında bir sınıf artış sağlamıştır. En yüksek modifikasyon seviyesinde ise TDV ve SBS katkılı B₁ bitümler en yüksek performans sınıfına (PG 82) ulaşmayı başarmışlar ancak EVA katkısı diğer iki katkıya kıyasen bir alt sınıfı sağlayarak yetersiz kalmıştır. B₂ bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 52 olduğu için en yüksek katkı miktarları (%7) eklendiğinde B₁ bitümde de olduğu gibi TDV ve SBS katkılı numunelerin performansında üç sınıf artış gözlenmiş ancak EVA katkılı bitümde iki sınıf artış sağlanmıştır. Böylece, tüm katkılar için her iki performans sınıflarına sahip bitümler birbirine benzer davranış sergilemiştir. EVA katkısının her iki penetrasyon sınıflarına sahip bitümlerdeki viskozite değerlerinde TDV ve SBS katkılarına göre daha düşük olması EVA katkısının sertliğinin yüksek sıcaklıkta yetersiz kalmasının bir gerekçesi olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla, DSR PG sınıfı açısından TDV ve SBS modifiyeli bitümler tüm katkılar arasında en iyi performansı sergileyerek birbirine benzer ve kıyaslanabilir performanslar göstermiştir.

PAV ile yaşılandırılmış TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlerin yorulma çatlağına karşı dirençleri sıcaklığın düşmesiyle düşmekte ve B₁ bitümler için 25°C, B₂ bitüm için ise 19°C'a ulaşana kadar maksimum 5000 kP Superpave şartname limitini sağlamıştır. Çalışmada dikkate alınan sıcaklıklar şartnameye göre mevcut katkıların yüksek performans PG sınıflarının orta sıcaklıkta yapılması gereken deney sıcaklıkları aralığında olmasından dolayı çalışmada esas alınmıştır. Dolayısıyla, tüm B₁ bitümlü katkılar 25°C'de ve B₂ bitümlü katkılar ise 19°C'de 5000 kP üst sınırını aşmamış bulunmaktalar. Bu, TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ ve B₂ bitümlerin orta sıcaklıklarda yorulma çatlağına karşı dirençli olduğunu ifade etmektedir. Malzemenin sertliğini temsil eden kompleks kayma modülünün orta sıcaklıklarda çok yüksek olması ve elastikliğini temsil eden faz açısının çok düşük

olması bitümde yorulma çatlağına karşı çok duyarlı bir hal oluşturmaktadır. Bu nedenle, tekerlek izi parametresinin tersine $G^* \cdot \sin \delta$ parametresi değerin düşük olması tavsiye edilmektedir.

Tüm katkılı bitümlerin J_{nr} parametresi ve R yüzdesinde hem gerilme seviyelerinde hem de tüm deney sıcaklıklarında saf B_1 ve B_2 bitümlere göre kalıcı deformasyonun azaldığı ve elastik geri dönen deformasyonun arttırıldığı görülmektedir. Ayrıca J_{nr} parametresinin düşüş oranı ve R yüzdesinin artış oranı modifiyerlerin artış oranıyla doğrudan ilişkili olması tespit edilmiştir. Bu, ne kadar yüksek modifiyer miktarı, bitümlerde o kadar yüksek tekerlek izine karşı dirençli ve elastik performans olacağı anlamına gelmektedir. Beklendiği gibi, tüm yaygın polimer maddelerde olduğu gibi TDV katkılı bitümlerde de deney sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, TDV modifiyeli B_1 ve B_2 bitümlerin daha yüksek sıcaklıklarda daha kalıcı bir deformasyona sahip olduğu ancak saf bitümlere kıyasen tekerlek izine karşı dirençli olduğu görülmektedir.

Katkılar arasında kıyaslamalar gerçekleştirilirse; B_1 bitümün geri kazanım deformasyonunu pozitif yönde en fazla etkileyen modifiyer maddesi 9,75 kat olarak EVA katkısı belirlenmiş ve EVA'nın ardından 8,54 kat olarak SBS ve 4,92 kat olarak TDV katkısı gelmektedir. B_2 bitümde ise, geri kazanım deformasyon artış oranı 103,38; 93,43 ve 17,97 olarak sıra ile SBS, EVA ve TDV katkılarına ait olmuştur. Sonuç olarak; vuklanizat yöntemiyle elde edilmiş geri dönüştürülmüş TDV katkısı her iki bitümde modifiyer olarak yüksek gerilme ve yüklemelere maruz kaldığında, referans olarak seçilen SBS ve EVA katkılarına kıyasen daha az geri kazanım deformasyonuna sahip olduğu tespit edilmiştir.

J_{nr} parametresi aynı yüksek sıcaklık sınıfındaki ancak farklı trafik düzeylerine göre bitümleri sınıflandırmaktadır. TDV modifiyeli B_1 bitümler, 76°C 'ye kadar standart trafik yükleri altında yeterince sert ve yüksek elastisiteye sahip bir bitüm olduğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla TDV katkısı en fazla 76°C sıcaklıkta 70 km/s üzeri araç hızında ve yirmi yıl boyunca trafik dizayn şeridinde beklenen maksimum 10 milyon ESAL sayısında kalıcı deformasyona maruz kalmamaktadır. Bu durum SBS katkılı B_1 bitümler için değişiklik göstermektedir.

En yüksek modifikasyon seviyesindeki SBS katkı maddesi içeren B₁ bitümde TDV'ye göre yüksek sıcaklık performansı bir sınıf yüksek olan 82 °C de standart trafik kategorisinde yer aldığı için 70 km/s üzeri araç hızında ve makisum 10 milyon ESAL sayısında araçların tekerleklerinden oluşan kalıcı deformasyonlara karşı dayanımlı olduğunu ortaya koymaktadır. Katkılar arasında MSCR PG Plus sınıflandırmasına göre en düşük performansı gösteren katkı maddesi EVA olmuştur. Bu durumda, EVA katkısı çalışmadaki en yüksek modifikasyon miktarında B₁ bitümün 64 °C'deki standart trafik seviyesini sadece bir performans sınıfı arttırarak PG70 de 70 km/s üzeri araç hızında ve maksimum 10 milyon ESAL sayısında kalıcı deformasyonun oluşmamasını tahmin etmiştir. Sonuç olarak, tüm katkıların B₁ bitümü üzerinde yüksek sıcaklıktaki trafik kategorisine göre ayırımı ve sıralaması sıra ile SBS PG82S, TDV PG76S, EVA PG 70S ve B₁ PG64S olarak belirlenmiştir.

B₂ bitümünün J_{nr} parametresine göre trafik seviyelerine bakıldığında, MSCR PG Plus sınıfı PG 52S olan B2 bitümün sınıfı en yüksek miktarda TDV ve EVA katkıları ilavesiyle PG 64S seviyesine artarak 64°C de standart trafik kategorisinde yer aldığı için 70 km/s üzeri araç hızında ve maksimum 10 milyon ESAL sayısında ve SBS katkısında ise PG 70V seviyesine artarak 70°C de çok ağır trafik kategorisinde yer aldığı için 20 ile 70 km/s arası ağır trafik şartlarında maksimum 30 milyon ESAL araç sayısı ve 20 km/s altı durgun trafik şartlarında 30 milyon üzeri ESAL araç sayılarında araçların tekerleklerinden oluşan kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olduğunu tespit etmiştir. TDV katkısı katkısının J_{nr} (geri dönmeyen deformasyon) değerinin EVA'ya göre daha düşük olması ve MSCR PG Plus sınıfları aynı olsada TDV katkısı %4 modifikasyon seviyesinde EVA'nın en yüksek PG Plus seviyesine ulaşması TDV modifiyeli B₂ bitümleri EVA modifiyeli B₂ bitümlere daha üstün kılmıştır. Bu değerlendirmelerin neticesinde, tüm katkıların B₂ bitümü üzerinde yüksek sıcaklıktaki trafik kategorisine göre ayırımı ve sıralaması sıra ile SBS PG70V, TDV PG64S, EVA PG 64S ve B₂ PG 52S olarak belirlenmiştir.

PAV ile yaşlandırılmış bitümlerin orta sıcaklıklardaki (25 °C) yorulma çatlaması DSR yorulma deneyinde çok düşük deformasyon (% 0,1) ve frekansta

(10 Hz) şartlarında uygulandığı için malzemenin yüklemeleri temsil eden geniş deformasyonlara ve trafik hızını temsil eden geniş frekanslara maruz kalmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaca ulaşmak için lineer farklı genlik (LAS) deneyi tüm katkılı ve saf bitümlere uygulanmıştır. Böylece deney sonucu, viskoelastik sürekli hasar (VECD) teorisinin yardımıyla deneyden elde edilen “A” parametresi (malzemenin bütünlüğünü koruma özelliği) ve “B” parametresi (deformasyon seviyesi değişimine karşı duyarlılığı) belirlenmiştir. Bu iki parametrenin ve yanı sıra asfalt kaplama tasarımındaki tabaka kalınlığına göre öngörülen farklı deformasyon miktarlarını (kalın tabakalar için %2,5 ve ince tabakalar için %5) dahil ederek yorulma kanunu denklemi $N_f = A \times (\gamma_p)^{-B}$ bitümü tekrarlı yüklemelere ve deformasyon seviyelerine tabi tutarak laboratuvar ortamında hızlandırılmış şekilde yorulma hasarını ölçmekte ve ne kadar trafik sayısına maruz kalarak yorulma bozulmasına uğrayacağını tahmin etmektedir.

B₁ bitümün yorulma ömrü kalın tabakalar (%2,5 ve >4 inch) 5669 trafik sayısı ve ince tabakalar için (%5 ve <4 inch) 576 trafik sayısı olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan tüm polimer katkıları karşılaştırıldığında; en yüksek modifikasyon seviyelerinde TDV katkısının yorulma ömrü kalın ve ince tabakalar için sıra ile 13062 ve 576 trafik sayısı, SBS için sıra ile 13461 ve 1082 trafik sayısı, EVA için ise sıra ile 68081 ve 2786 trafik sayısı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla hem kalın ve hem ince tabakalar için katkıların yorulma ömrü EVA>SBS>TDV olarak öngörülmüştür.

B₂ bitümün yorulma ömrü kalın tabakalar (%2,5 ve >4 inch) 9590 trafik sayısı ve ince tabakalar için (%5 ve <4 inch) 1302 trafik sayısı olarak belirlenmiştir. Katkılar arasında, en yüksek modifikasyon seviyelerinde TDV katkısının yorulma ömrü kalın ve ince tabakalar için sıra ile 44046 ve 2692 trafik sayısı, SBS için sıra ile 57196 ve 3891 trafik sayısı, EVA için ise sıra ile 124270 ve 9502 trafik sayısı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, hem kalın ve hem ince tabakalar için katkıların yorulma ömrü B₁ bitümde de olduğu gibi EVA>SBS>TDV olarak öngörülmüştür. Polimer katkılı B₂ bitümlerin yorulma ömrü katkılı B₁ bitümlerden daha fazla olmuştur. Bunun nedeni, B₂ bitümün yorulma ömrünün B₁ bitüme göre daha fazla olması ve dolayısıyla katkıların B₂ bitümü ile daha uyumlu olduğu ve neticede daha

yüksek yorulma ömrü oranlarına sahipliğini varsayabilmektedir. Ayrıca, tüm katkılardan elde edilen yorulma ömrünü temsil eden trafik sayıları polimer katkıların %2,5 deformasyonda belirgin şekilde yüksek yorulma ömürlerine sahip olduklarından asfalt kaplama dizayn tahmininde kalın tabakalar için kullanımları önerilmektedir.

Farklı frekans deneyi sonucu oluşturulan ana eğrilerinde yükleme frekansı ve sıcaklığın etkisi TDV, SBS ve EVA katkı B₁ ve B₂ bitümlerin üzerinde incelenirse; tüm polimer katkılı bitümlerin kompleks kayma modülü, yükleme frekansı arttıkça artmıştır. Bu, kompleks kayma modülü değerinin yüksek sıcaklıkta ve düşük frekansta düşük olduğunu gösterir. Bunun tersine, düşük sıcaklıkta ve yüksek frekansta G* değeri yüksek olmuştur. Başka anlamda ifade edilirse; örnek olarak, 5 Hz yükleme frekansındaki sıcaklığın artışından dolayı kompleks kayma modülünde düşüş sağlanarak bitümde yumuşama meydana gelmiş ve yüksek sıcaklıkta sertliğini düşürerek tekerlek izine karşı direncini azaltmış olmuştur.

Saf B₁ ve B₂ bitümlerin optimum içeriğinin bulunması amacıyla Marshall deneyi gerçekleştirilmiştir. Her iki bitümdeki numuneler için gerekli özgül ağırlıkları, boşluk ve stabilite grafikleri çizildikten ve analizleri yapıldıktan sonra, D_p - bitüm % ve stabilite – bitüm % grafiklerin maksimum olduğu bitüm içerikleri, hava boşluğu (V_h) - bitüm % grafiğinde boşluk oranının %4'e tekabül ettiği bitüm içerikleri, ADB - bitüm % grafiğinde asfalta dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği bitüm içerikleri belirlenmiştir. Her dört grafikten elde edilen optimum bitüm değerinin aritmetik ortalaması alınarak, optimum bitüm içeriği bulunmuştur. Sonuç olarak, B₁ bitümü için optimum bitüm içeriği % 4,81 ve B₂ bitümü için % 4,70 olarak bulunmuştur.

Her iki bitümün karışım içerisindeki optimum yüzdesi hesaplandıktan sonra hem B₁ ve hem B₂ bitümler üzerinde optimum içerikte kontrol amaçlı üçer numune yapılmıştır. Çalışmadaki TDV, SBS ve EVA olmak üzere klasik DSR deney sonucuna göre tüm katkıların en yüksek aynı PG sınıfına ulaşabildiği modifiyeli numuneler seçilmiş ve saf bitümlerin optimum içeriği miktarında Marshall numuneleri yapılarak hem saf bitümlerle ve hem katkılar arasında kıyaslamalar

gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarına göre, modifiye edilmiş B₁ ve B₂ numunelerin hava boşluğu yüzdeleri modifiyerlerden daha fazla olmuştur. Katkıların arasında kıyaslama gerçekleştiğinde, her iki bitümde en yüksek V_h değerine sahip olan katkı EVA ve en düşüğü ise TDV olmuştur. Kuru agregalar arasında boşluk oranı tüm katkılarda saf bitümlere göre nispeten düşük değerler elde edilmiştir. Katkıların arasında en düşük değer TDV katkısına ve saf bitümlere yakın olan en yüksek değer ise EVA katkısına ait olmuştur. B₁ bitümü ile SBS katkılı ve B₂ bitümü ile EVA katkılı karışım numunelerin asfalt dolu boşluk oranı (V_f) aynı değeri vermiş, böylelikle en yüksek değer TDV katkısında ortaya çıkmıştır. TDV katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki oranı düşük olarak hava boşluğu da diğer katkılara göre daha düşük olmuştur. Bu parametrelerin etkileşimi neticesinde tüm numunelerin hacim özgül ağırlığı (D_p) değeri her iki bitüm için aynı olarak sıra ile TDV>SBS>EVA>B olmuştur. Tüm katkıların akma değeri saf bitümlere göre düşük olsa da birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ancak, diğer parametrelerde de olduğu gibi en iyi sonucu TDV katkısı vermiştir. Akma değerinin düşük olması karışım numunesinin daha yüksek yüklemeye maruz kalmasının göstergesidir. D_p değerinin büyük olması ise bir numunenin bütünlüğünün daha sağlam olmasının anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bir numunenin yüksek D_p değeri ve düşük akma değeri yüksek stabilite değerini ortaya çıkarmakta yardımcı olabilir. Bu yaklaşımın sonucunda hem B₁ ve hem B₂ bitümlerde en yüksek stabilite değeri TDV katkısına ait olmuştur. Bunun ardından sıra ile SBS ve EVA katkıları olarak saf bitümlerden daha yüksek stabilite değerleri elde edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında iki farklı penetrasyon sınıfına (B 50/70 ve B 160/220) sahip bitümlere üç farklı polimer katkısı 5'er yüzdede (%3, 4, 5, 6 ve 7) eklenmiştir. Geri dönüştürülmüş HDPE, GTR, EPDM ve bitüm içeren vulkanizat yöntemiyle elde edilmiş kompozit TDV katkısı çalışmada ana katkı olarak ve referans katkı olarak seçilen SBS ve EVA katkıların bitüm ve bitümlü sıcak karışım üzerinde etkileri incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılan katkı maddelerin bitümler üzerinde etkileri fiziksel deneyler (penetrasyon ve yumuşama noktası), yüksek sıcaklık ve orta sıcaklık performans sınıflandırma (PG), farklı frekans (ana eğri), çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR), lineer farklı genlik (LAS) ve Marshall deneyleri aracılığıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki şekilde olmuştur.

7.1 Sonuçlar

Çalışmada kullanılan tüm katkılar hem B₁ ve hem B₂ bitümlerin penetrasyonunu düşürerek ve yumuşa noktasını arttırarak fiziksel özelliklerini birbirine yakın düzeylerde etkilemiştir. Fiziksel deneyler sadece bir sıcaklıkta uygulanmakta ve bitüm malzemesinin farklı sıcaklıklara ve yüklemelere bağlı farklı davranış sergilemesi fiziksel deneylerin bitümleri sadece sertleştirdiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla TDV, SBS ve EVA katkıları bitümü benzer şekilde sertleştirmiştir. Bu, TDV katkısında SBS ve EVA gibi bitümün sertleştirdiğini ve sertleşme neticesinde çeşitli bozulmalara karşı geliştirebilme kapasitesini ifade etmektedir. Ancak, katkıların daha özgül olarak karşılaştırılabilmeleri için farklı sıcaklıklarda ve yüklemelerde bitümün reolojik özelliklerinin incelenmesine bariz şekilde ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur.

Klasik DSR PG performansı incelendiğinde, tüm katkıların ilavesiyle bitümlerin tekerlek izi parametresinde artış gözlemlenmiştir. TDV ve SBS katkıları en yüksek performans sınıfına (PG 82) ulaşmayı başarmışlar ancak EVA katkısı diğer iki katkıya kıyasen bir alt sınıfı (PG 76) sağlayarak yetersiz kalmıştır. B₂ bitümünde B₁ bitümde de olduğu gibi TDV ve SBS katkılı numunelerin performansında üç sınıf artış gözlenmiş ancak EVA katkılı bitümde iki sınıf artış

sağlanmıştır. Böylece, tüm katkıları için her iki performans sınıflarına sahip bitümler birbirine benzer davranış sergilemiştir. EVA katkısının her iki bitümlerdeki viskozite değerlerinde TDV ve SBS katkılarına göre daha düşük olması EVA katkısının sertliğinin yüksek sıcaklıkta yetersiz kalmasının bir gerekçesi olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla, DSR PG sınıfı açısından TDV ve SBS modifiyeli bitümler tüm katkıları arasında en iyi performansı sergileyerek birbirine benzer ve kıyaslanabilir performanslar göstermiştir.

PAV ile yaşlandırılmış TDV, SBS ve EVA modifiyeli bitümlerin yorulma çatlağına karşı dirençleri sıcaklığın düşmesiyle düşmekte ve B₁ bitümler için 25°C, B₂ bitüm için ise 19°C'a ulaşana kadar maksimum 5000 kP Superpave şartname limitini sağlamıştır.

TDV, SBS ve EVA modifiyeli B₁ bitümlerin J_{nr} parametresi, sıra ile 76, 82 ve 70°C'ye kadar standart trafik yükleri altında yeterince sert ve yüksek elastisiteye sahip bir bitüm olduklarını ifade etmektedir. Öte yandan, B₂ bitüme bakıldığında, TDV ve EVA katkıları 64°C'de standart trafik kategorisinde yer aldığı ve SBS katkısında ise PG 70V seviyesine artarak 70°C'de çok ağır trafik kategorisinde yer aldığı tespit edilmiştir. TDV katkısının MSCR PG Plus sınıfları EVA'ya göre aynı olmasına rağmen J_{nr} (geri dönmeyen deformasyon) değerinin daha düşük olması ve TDV katkısı %4 modifikasyon seviyesinde EVA'nın en yüksek PG Plus seviyesine ulaşması TDV modifiyeli B₂ bitümleri EVA modifiyeli B₂ bitümlere daha üstün kılmıştır. Bu değerlendirmelerin neticesinde, tüm katkıların bitümler üzerinde yüksek sıcaklıktaki trafik kategorisine göre ayırımı ve sıralaması B₁ bitüm için sıra ile SBS PG82S, TDV PG76S, EVA PG 70S ve B₁ PG64S olarak ve B₂ bitümü için sıra ile SBS PG70V, TDV PG64S, EVA PG 64S ve B₂ PG 52S olarak belirlenmiştir.

Lineer farklı genlik (LAS) deneyi PAV ile yaşlandırılmış katkılı ve saf bitümlere uygulanmıştır. Sonuç olarak, her iki penetrasyon sınıflarına sahip bitümlerin hem kalın ve hem ince tabakalar için katkıların yorulma ömrü EVA>SBS>TDV olarak öngörülmüştür. Polimer katkılı B₂ bitümlerin yorulma ömrü katkılı B₁ bitümlerden daha fazla olmuştur. Ayrıca, tüm katkılardan elde edilen yorulma ömrünü temsil eden trafik sayıları polimer katkıların %2,5

deformasyonda belirgin şekilde yüksek yorulma ömürlerine sahip olduklarından asfalt kaplama dizayn tahmininde kalın tabakalar için asfalt kaplamasında kullanımları önerilmektedir. Neticede, tüm koşullar çerçevesinde orta sıcaklıklarda EVA katkısı en iyi yorulma performansına sahip olmuştur.

Farklı frekans deneyi sonucu oluşturulan ana eğrilerin yükleme frekansları ve sıcaklıklarında, tüm polimer katkılı bitümlerin kompleks kayma modülü, yükleme frekansı arttıkça artmıştır. Bu, kompleks kayma modülü değerinin yüksek sıcaklıkta ve düşük frekansta düşük olduğunu gösterir. Bunun tersine, düşük sıcaklıkta ve yüksek frekansta G^* değeri yüksek olmuştur.

Saf B_1 ve B_2 bitümlerin optimum içeriğinin bulunması amacıyla Marshall deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, B_1 bitümü için optimum bitüm içeriği % 4,81 ve B_2 bitümü için % 4,70 olarak bulunmuştur. Saf bitümlerin optimum içeriği miktarında TDV, SBS ve EVA katkılı bitümlerin marshall numuneleri yapılmıştır. Özgül ağırlık, hava boşluğu, agregalar arası boşluk oranı, asfalt dolu boşluk oranı, akma ve stabilite gibi parametreler incelendikten sonra TDV katkısının karışım üzerinde performansı diğer iki katkıya göre daha üstün olması ortaya çıkmıştır. Bu, TDV katkısının farklı polimer bileşenleri olduğundan ve dolayısıyla bitüm ile agregalar arasında yüksek yapışma (adhesion) ve tutturma (bonding) yeteneğine sahip olabilmesinden kaynaklanmaktadır.

SBS ve EVA katkıları gibi yaygın polimer malzemelerin bitümün sertleştirmesi, ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımlarda kullanılırken kalıcı deformasyon gibi yüksek sıcaklıklardaki bozulmaları ve yorulma çatlağı gibi orta sıcaklıklardaki bozulmaları önlemesi iyi bilinmektedir. Bu nedenle çalışmada geri dönüştürülmüş olduğu için ekonomik açıdan normal polimerlere göre daha uygun olan ve daha da önemlisi çevre dostu olduğundan, geri dönüştürülmüş kompozit TDV katkısı çalışmada esas alınmıştır. Sonuç olarak, TDV katkısının geri dönüştürülmüş, çevre dostu bir malzeme olması ve çalışmadaki tüm fiziksel ve reolojik özellikler göz önünde bulunduğunda ve dikkate alındığında SBS ve EVA katkısı gibi yaygın katkılara göre karşılaştırılabilir özelliklere sahip olması bu

modifiyerlere alternatif olarak asfalt endüstrisinde kullanılabilmesi ortaya çıkmıştır.

7.2 Öneriler

Bitümlü sıcak karışımların asfalt tesisinde karıştırma sıcaklığının yüksek olması asfalt endüstrisinde ekonomi açısından yüksek maliyetlere yol açması ve diğer taraftan polimer modifiyeli bitümlerin yüksek sıcaklıklarda hızlı yaşlanması için katkı üreticileri ve araştırmacılar tarafından karıştırma sıcaklığın 180°C'den daha yüksek olmaması önerilmektedir. Dolayısıyla, TDV katkısının maksimum %5 oranda diğer yaygın polimer katkılara alternatif olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılması önerilmektedir.

TDV katkısının ilavesiyle bitümün sertleşmesi doğru orantılı olduğu için katkı artışıyla bitümün sertliği de artmaktadır. Bu durumda, bitümdeki aşırı sertleşmeler yüksek sıcaklıklarda makul sayılsada düşük sıcaklıklarda malzemeler termal çatlaklara maruz kalabilmektedir. Dolayısıyla, TDV katkısının düşük sıcaklıklarda bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerinde etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Bitümün bağlayıcı madde olarak reolojik özellikleri incelendiğinde TDV katkısı SBS ve EVA katkılarına göre karşılaştırılabilir seviyelerde performansa sahip olduğuna rağmen yüksek sıcaklıklarda SBS'den daha düşük ve EVA'dan daha yüksek performans sergilediği ispatlanmıştır. Ancak, bitümlü sıcak karışım üzerinde etkisi diğer iki katkıdan daha üstün görülmektedir. Bu sebeple, TDV modifiyeli bitümün karışım üzerinde etkisi daha belirgin şekilde incelenmesi amacıyla katkılı bitüm ile agrega arasında yapışma ve tutturma özellikleri gibi ve karışım esaslı farklı deneylerin uygulanması önerilmektedir.

HDPE, lastik tozu, EPDM gibi geri dönüştürülmüş katkı maddelerden vulkanitaz yöntemiyle sentezlenen termoplastik dinamik vulkanizat (TDV) katkısı kimyasal laboratuvar ortamında farklı kimyasal geri dönüştürme ve sentezleme yöntemleriyle elde edilmesinin maliyeti farklı imkanlara ve yöntemlere göre

değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla, kimyasal uzmanların ve araştırmacıların bu çerçevede standartlar oluşturması ve maliyetinin orijinal polimer malzemelerine göre ne kadar fark göstermesi için ayrıntılı raporların mevcut olması asfalt endüstri müteahhitlerini bu katkı maddesini kullanmalarına teşvik etmesinde faydalı olması düşünülmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- AASHTO M332**, 2014, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO T315**, 2012, Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR), American Association of state and highway transportation officials, Washington, DC.
- AASHTO T350**, 2014, Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of state and highway transportation officials, Washington, DC.
- AASHTO TP101**, 2014, Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep, American Association of state and highway transportation officials, Washington, DC.
- Ahmedzade, P.**, 2013, The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, 38: 285–291 p.
- Ahmedzade, P., Günay, T., Grigoryeva, O. and Starostenko.**, 2017, Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3): 4016233 p.
- Airey, G.**, 1997, Rheological Characteristics Of Polymer Modified And Aged Bitumens, University of Nottingham.
- Airey, G. D.**, 2002, Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 16(8): 473–487 p.
- Airey, G. D.**, 2003, Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, 82(14): 1709–1719 p.
- Al-Malaika, S. and Amir, E. J.**, 1989, Thermoplastic elastomers: Part III—Ageing and mechanical properties of natural rubber-reclaimed rubber/polypropylene systems and their role as solid phase dispersants in polypropylene/polyethylene blends, *Polymer degradation and stability*, 26(1): 31–41 p.
- Ali, M.**, 2018, Study Of The Bitumen Aging Effects On The Rheological Properties And Fatigue, ALMA MATER STODIORUM - Bologna Università.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- de Almeida Júnior, A. F., Battistelle, R.A., Bezerra, B. S. and de Castro, R.**, 2012, Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil, *Journal of Cleaner Production*, 33: 236–238 p.
- Ameri, M., Mansourian, A. and Sheikhmotevali, A. H.**, 2012, Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology, *Construction and Building Materials*, 36: 1001–1007 p.
- Anderson, M., D'Angelo, J. and Walker, D.**, 2010, MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties, *Asphalt*, 25(2).
- 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 D2872, 2012**, Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test), USA: Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D36/D36M**, 2014, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402, 2015**, Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D5/D5M**, 2013, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, Annu. B. Am. Soc. Test. Mater. ASTM Stand, 5–8 p.
- ASTM D6521**, 2013, Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV), USA: Annual Book of ASTM Standards.
- Bahia, H., Tabatabaee, H., Mandal, T. and Faheem. A.**, 2013, Field Evaluation Of Wisconsin Modified Binder Selection Guidelines-Phase II, Wisconsin Highway Research Program.
- Becker, Y., Mendez, M. P. and Rodríguez, Y.**, 2001, Polymer modified asphalt, *Vision tecnologica, Citeseer*, 9(1): 39–50 p.
- Behera, P. K., Singh, A. K. and Amaranatha Reddy, M.**, 2013, An alternative method for short-and long-term ageing for bitumen binders, *Road Materials and Pavement Design*, 14(2): 445–457 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Behnood, A.**, 2016, Rheological properties of asphalt binders: An analysis of the Multiple Stress Creep Recovery test, PhD thesis, Purdue University.
- Behnood, A. and Gharehveran, M. M.**, 2018, Morphology, rheology and physical properties of polymer-modified asphalt binders, *European Polymer Journal*, 112: 766–791 p.
- Behnood, A. and Olek, J.**, 2017, Stress-dependent behavior and rutting resistance of modified asphalt binders: An MSCR approach, *Construction and Building Materials*, 157: 635–646 p.
- BS 3690**, 1989, Bitumen for Building and Civil Engineering, in *BRITISH STANDARDS Institution*.
- Cao, W., Liu, S. and Li, X.**, 2017, Laboratory evaluation of the effect of composite modifier on the performance of asphalt concrete mixture, *Construction and Building Materials*, 155: 363–370 p.
- Champion, L., Gerard, G. F., Planche, G. P., Martin, D. and Anderson, D.**, 2001, Low temperature fracture properties of polymer-modified asphalts relationships with the morphology', *Journal of Materials Science*, 36(2): 451–460 p.
- Chen, J. S., Liao, M. C. and Shiah, M. S.**, 2002, Asphalt modified by styrene-butadiene-styrene triblock copolymer: Morphology and model, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3): 224–229 p.
- Chen, Z., Pei, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Ye, Q. and Fan, Z.**, 2019, Low Temperature and Fatigue Characteristics of Treated Crumb Rubber Modified Asphalt after a Long Term Aging Procedure, *Journal of Cleaner Production*, 234: 1262-1274 p.
- Collins, J. H. and Bouldin, M. G.**, 1992, Stability of straight and polymer-modified asphalts, *Transportation Research Record*, 1342.
- Cross, S. A., Jakatimath, Y. and KC, S.**, 2007, Determination Of Dynamic Modulus Master Curves For Oklahoma HMA Mixtures, No. FHWA/OK 07 (05), Oklahoma State University.
- D'Angelo, J., Reinke, J., Bahia, H., Wen, H., Johnson, C. M. and Marasteanu, M.**, 2010, Development in asphalt binder specifications, *Transportation Research Circular*, E-C147: 1–13 p.
- D'Angelo, J. A.**, 2009, The relationship of the MSCR test to rutting, *Road Materials and Pavement Design*, Taylor & Francis, 10(sup1): 61–80 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- De, S. K. and Bhowmick, A. K.**, 1990, Thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends. Ellis Horwood.
- Dong, Z., Yang, C., Luan, H., Zhou, T. and Wang, P.**, 2019, Chemical characteristics of bio-asphalt and its rheological properties after CR/SBS composite modification, *Construction and Building Materials*, 200: 46–54 p.
- Duan, S., Muhammad, Y., Li, J., Maria, S., Meng, F., Wei, Y., Su, Z. and Yang, H.**, 2019, Enhancing effect of microalgae biodiesel incorporation on the performance of crumb Rubber/SBS modified asphalt, *Journal of Cleaner Production*, 237: 117725 p.
- Durrieu, F., Farcas, F. and Mouillet, V.**, 2007, The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging', *Fuel*, 86(10–11): 1446–1451 p.
- Eurobitume and A I**, 2011, The bitumen industry—A global perspective, Production, chemistry, use, specification and occupational exposure. Asphalt Institute Inc. & European Bitumen Association-Eurobitume.
- FHWA**, 2011, The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Fu, Q., Xu, G., Chen X., Zhou, J. and Sun, F.**, 2019, Rheological properties of SBS/CR-C composite modified asphalt binders in different aging conditions, *Construction and Building Materials*, 215: 1–8 p.
- Fukumori, K. and Matsushita, M.**, 2003, Material recycling technology of crosslinked rubber waste, *R&D review of toyota CRDL*, 38(1): 39–47 p.
- Galooyak, S. S, Dabir, B., Nazarbeygi, A. E. and Moeini, A.**, 2010, Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites, *Construction and Building Materials*, 24(3): 300–307 p.
- Gan, Y.**, 2012, Continuum Mechanics: Progress in Fundamentals and Engineering Applications, BoD—Books on Demand.
- Goodrich, J. L.**, 1988, Asphalt and polymer modified Asphalt properties related to the performance of Asphalt concrete mixes (with discussion), in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Grigoryeva, O. P.,** Fainleib, A. M., Tolstov, A. M., Starostenko, O. M., Lievana, E. and Karger-Kocsis, J., 2005, Thermoplastic elastomers based on recycled high-density polyethylene, ethylene–propylene–diene monomer rubber, and ground tire rubber, *Journal of applied polymer science*, 95(3): 659–671 p.
- Günay, T.,** 2016, Nano Malzemelerin Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, EGE Üniversitesi.
- Han, M., Li, J., Muhammad, Y., Yin, Y., Yang, J., Yang, S. and Duan, S.,** 2018, Studies on the secondary modification of SBS modified asphalt by the application of octadecyl amine grafted graphene nanoplatelets as modifier, *Diamond and Related Materials*, 89: 140–150 p.
- Hassanpour-Kasanagh, S., Ahmedzade, P., Fainleib, A. M. and Benhood, A.,** 2020, Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), *Construction and Building Materials*, 230: 117047 p.
- Hunter, R. N., Self, A. and Read, J.,** 2015, The Shell bitumen handbook. Thomas Telford.
- Isacsson, U. and Lu, X.,** 1995, Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art, *Materials and Structures*, 28(3): 139–159 p.
- Jafari, M., Babazadeh, A. and Aflaki, S.,** 2015, Effects of stress levels on creep and recovery behavior of modified asphalt binders with the same continuous performance grades, *Transportation Research Record*. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2505(1): 15–23 p.
- Kanitpong, K. and Bahia, H.,** 2005, Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, 1901(1): 33–43 p.
- KGM,** 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi. Ankara.
- Karger-Kocsis, J.,** 1999, Thermoplastic dynamic vulcanizates, in *Polypropylene*. Springer, 853–858 p.
- Kennedy, T. W., Huber, G. A., Harrigan, E. T., Cominsky, R. J., Hughes, C. S., Von Quintus, H., and Moulthrop, J. S.,** 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave), The product of the SHRP asphalt research program.
- Kerbs, R. D. and Walker, R. D.,** 1971, Highway Materials. New York: Mc-Graw Hill.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kraus, G.**, 1982, Modification of asphalt by block polymers of butadiene and styrene, *Rubber Chemistry and Technology*, 55(5): 1389–1402 p.
- Król, J., Radziszewski, P. and Kowalski, K. J.**, 2015, Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen, *Procedia Engineering*, 111: 478–484 p.
- Kumar, C. R., Fuhrmann, I. and Karger-Kocsis, J.**, 2002, LDPE-based thermoplastic elastomers containing ground tire rubber with and without dynamic curing, *Polymer degradation and stability*, 76(1): 137–144 p.
- Lewandowski, L. H.**, 1994, Polymer modification of paving asphalt binders', *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3): 447–480 p.
- Li, Y., Li, L., Zhang, Y., Zhao, S., Xie, L., and Yao, S.**, 2010, Improving the aging resistance of styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer and application in polymer-modified asphalt, *Journal of applied polymer science*, 116(2): 754–761 p.
- Lucena, M. da C. C., Soares, S. de A. and Soares, J. B.**, 2004, Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt, *Materials Research*, 7(4): 529–534 p.
- Magioli, M., Sirqueira, A. S. and Soares, B. G.**, 2010, The effect of dynamic vulcanization on the mechanical, dynamic mechanical and fatigue properties of TPV based on polypropylene and ground tire rubber, *Polymer Testing*, 29(7): 840–848 p.
- Masad, E., Somadevan, N., Bahia, H. U. and Kose, S.**, 2001, Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes, *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, 127(6): 477–485 p.
- Masson, J. F., Collins, P., Robertson, G., Woods, J. R. and Margeson, J.**, 2003, Thermodynamics, phase diagrams, and stability of bitumen– polymer blends, *Energy & Fuels*, 17(3): 714–724 p.
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W. and Solaimanian, M.**, 1995, Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis (No. FHWA-SA-95-003), United States. Federal Highway Administration, Office of Technology Applications.
- Mezger, T. G.**, 2006, *The Rheology Handbook: for Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*, Vincentz Network GmbH & Co KG.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mohammad, L. N., Wu, Z., Obulareddy, S., Cooper, S. and Abadie, C.**, 2006, Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanistic–Empirical Pavement Design Software, *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1970(1): 133–142 p.
- Morgan, P. and Mulder, A.**, 1995, The Shell Bitumen Industrial Handbook. Surrey: Shell Bitumen.
- Mülhaupt, R.**, 1999, Metallocene catalysts and tailor-made polyolefins, in Polypropylene. Springer, 454–475 p.
- Naskar, A. K.**, Bhowmick, A. K. and De, S. K., 2001, Thermoplastic elastomeric composition based on ground rubber tire, *Polymer Engineering & Science*, 41(6): 1087–1098 p.
- Naskar, A. K., De, S. K. and Bhowmick, A. K.**, 2002, Thermoplastic elastomeric composition based on maleic anhydride–grafted ground rubber tire, *Journal of applied polymer science*, 84(2): 370–378 p.
- Nega, A., Ghadimi, B. and Nikraz, H.**, 2015, Developing master curves, binder viscosity and predicting dynamic modulus of polymer-modified asphalt mixtures, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 7(3): 190–197 p.
- Nevatia, P., Banerjee, T. S., Dutta, B., Jha, A., Naskar, A. K. and Bhowmick, A. K.**, 2002, Thermoplastic elastomers from reclaimed rubber and waste plastics, *Journal of applied polymer science*, 83(9): 2035–2042 p.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C.**, 2007, High temperature stability of different polymer-modified bitumens: A rheological evaluation, *Journal of applied polymer science*, 103(2): 1166–1174 p.
- Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J. and Zanzotto, L.**, 2005, Asphalt modification with different polyethylene-based polymers, *European Polymer Journal*, 41(12): 2831–2844 p.
- Polacco, G., Muscente, A., Biondi, D. and Santini, S.**, 2006, Effect of composition on the properties of SEBS modified asphalts, *European Polymer Journal*, 42(5): 1113–1121 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D. and Zanzotto, L.**, 2006, Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts, *Current opinion in colloid & interface science*, 11(4): 230–245 p.
- Qurashi, I. A. and Swamy, A. K.**, 2018, Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil, *Journal of Cleaner Production*, 182: 992–1000 p.
- Radheshkumar, C. and Karger-Kocsis, J.**, 2002, Thermoplastic dynamic vulcanisates containing LDPE, rubber, and thermochemically reclaimed ground tyre rubber, *Plastics, rubber and composites*, 31(3): 99–105 p.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y. and Kennedy, T. W.**, 1991, Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design And Construction. NAPA Research and Education Foundation.
- Sarnowski, M., Kowalski, K. J., Król, J. B. and Radziszewski, P.**, 2019, Influence of Overheating Phenomenon on Bitumen and Asphalt Mixture Properties, *Materials*, 12(4): 610 p.
- Satapathy, S., Nag, A. and Nando, G. B.**, 2010, Thermoplastic elastomers from waste polyethylene and reclaim rubber blends and their composites with fly ash, *Process Safety and Environmental Protection*, 88(2): 131–141 p.
- Scholz, H., Potschke, P., Michael, H. and Mennig, G.**, 2002, Morphology and mechanical properties of elastomeric alloys from rubber crumb and thermoplastics, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 55(11): 584–589 p.
- Sengoz, B., Topal, A. and Isikyakar, G.**, 2009, Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 23(5): 1986–1992 p.
- Shanks, R. and Kong, I.**, 2012, Thermoplastic Elastomers, Edited by A. El-Sonbati.
- Shu, X. and Huang, B.**, 2014, Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview, *Construction and Building Materials*, 67: 217–224 p.
- Sridhar, V., Xiu, Z. Z., Xu, D., Lee, S. H., Kim, J. K., Kang, D. J. and Bang, D. S.**, 2009, Fly ash reinforced thermoplastic vulcanizates obtained from waste tire powder, *Waste management*, 29(3): 1058–1066 p.
- Stastna, J., Zanzotto, L. and Vacin, O. J.**, 2003, Viscosity function in polymer-modified asphalts, *Journal of Colloid and Interface Science*, 259(1): 200–207 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vargas, M. A., Chavez, A. E., Herrera, R. and Manero, O.**, 2005, Asphalt modified by partially hydrogenated SBS tri-block copolymers, *Rubber Chemistry and Technology*, 78(4): 620–643 p.
- Wang, T., Yi, T. and Yuzhen, Z.**, 2010, The compatibility of SBS-modified asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 28(7): 764–772 p.
- Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K. and Fan, Y.**, 2002, Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts, *Polymer Testing*, 21(3): 295–302 p.
- Williams, M. L., Landel, R. F. and Ferry, J. D.**, 1955, The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids, *Journal of the American Chemical society*, ACS Publications, 77(14): 3701–3707 p.
- Wloczynski, P., Vidal, A. and Papirer, E.**, 1997, Relationships between rheological properties, morphological characteristics, and composition of bitumen–styrene butadiene styrene copolymers mixes. II. A thermodynamical interpretation, *Journal of applied polymer science*, 65(8): 1609–1618 p.
- Zaniewski, J. P. and Pumphrey, M. E.**, 2004, Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, *Asphalt technology program*, 107.
- Zanzotto, L., Stastna, J. and Vacin, O.**, 2000, Thermomechanical properties of several polymer modified asphalts, *Applied Rheology*, 10(4): 185–191 p.
- Zhang, Y., Zhao, S., Li, Y., Xie, L. and Sheng, K.**, 2008, Radiation effects on styrene–butadiene–styrene copolymer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(15): 3431–3436 p.
- Zhou, J., Chen, X., Xu, G. and Fu, Q.**, 2019, Evaluation of low temperature performance for SBS/CR compound modified asphalt binders based on fractional viscoelastic model, *Construction and Building Materials*, 214: 326–336 p.
- Zhu, H., Sun, L., Yang, J., Chen, Z. and Gu, W.**, 2011, Developing master curves and predicting dynamic modulus of polymer-modified asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, 23(2): 131–137 p.
- Zhu, J., Birgisson, B. and Kringos, N.**, 2014, Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *European Polymer Journal*, 54: 18–38 p.

TEŞEKKÜR

Herşeyden önce, çalışmalarımı her zaman etkili bir şekilde sürdürmeme yardımcı olan akademik danışmanım Prof. Dr. Perviz Ahmedzade'ye Doktora eğitimin boyunca bana sağladığı akademik ve profesyonel danışmanlık ve desteğinden dolayı içten ve en samimi teşekkürlerimi sunuyorum. Durumumu anlamak için gösterdiği sabırdan ötürü hep minnettarım.

Tez komitesinin diğer üyeleri Prof. Dr. Burak Şengöz ve Doçent. Dr. Yalçın Alver'e de yardımları ve önerileri için teşekkür ediyorum.

Öğretim Üyesi Dr. Taylan Günay'a da ayrıca çalışmalarım sırasında yaptığı destekler ve önerileri için teşekkür etmek istiyorum.

En önemlisi, değerli aileme hayatım boyunca sundukları sevgi, destek, cesaret ve sabırları için ve geldiğinden beri hayatıma renk katan ve motive eden sevgili nişanlım Roya'ya teşekkürlerimi bildirmek istiyorum. Hepinizi sonsuza dek seviyorum!

ÖZGEÇMİŞ

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH, 1989 yılında İran'ın Doğu Azerbaycan eyaletinin Ahar şehrinde doğmuştur. Azad Üniversitesinde 2006 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitime başlamış ve 2013 yılında aynı üniversiteden Ulaştırma/İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır. 2015 yılının güz döneminden itibaren Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Doktora eğitim düzeyini kazanmayı başarmıştır. Doktorasını Ulaştırma Ana Bilim Dalının laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yaparak, bitümlü/Polimer/geri dönüştürülmüş malzemeler, bitüm/Polimer modifikasyonu, bitümlü sıcak karışımlar, Superpave yöntemleri, gelişmiş reoljik deneyler ve yol esnek üstyapıları üzerine gerçekleştirmiştir.

EKLER

Ek 1. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney sonuçları

Ek 2. Dinamik kayma reometresiyle (DSR) yorulma deney sonuçları

Ek 3. Çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deney sonuçları

Ek 4. Marshall deney sonuçları

Ek 1.1 TDV katkılı B₁ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	Orijinal	52	7,2	84,8	7,28	≥1,00	PG 64-Y
		58	3,1	86	3,15		
		64	1,4	86,9	1,40		
		70	0,76	88,1	0,769		
	RTFO	52	23,8	79,5	24,20	≥2,20	
		58	9,7	82,3	9,75		
		64	4,1	84,6	4,07		
		70	1,8	86,4	1,78		
B ₁ -3TDV	Orijinal	52	15	82,8	15,15	≥1,00	PG 70-Y
		58	6	85	6,04		
		64	2,6	86,5	2,56		
		70	1,2	87,6	1,17		
		76	0,6	88,5	0,57		
	RTFO	52	49,7	74,3	51,58	≥2,2	
		58	20,5	78,1	20,94		
		64	8,6	81,3	8,69		
		70	3,8	83,7	3,80		
		76	1,76	85,52	1,76		
B ₁ -4TDV	Orijinal	52	26,4	77,4	27,10	≥1,00	PG 76-Y
		58	11,3	79,8	11,48		
		64	5,1	81	5,16		
		70	2,4	81,9	2,39		
		76	1,2	81,8	1,23		
		82	0,7	81,3	0,68		
	RTFO	52	71,9	71,4	75,83	≥2,20	
		58	31,2	75,1	32,30		
		64	13,6	77,9	13,86		
		70	6,1	80	6,19		
		76	2,9	81,2	2,97		
		82	1,5	81,9	1,52		
B ₁ -5TDV	Orijinal	52	31,7	69,8	33,76	≥1,00	PG 76-Y
		58	15,1	71,4	15,92		
		64	7,7	71,4	8,08		
		70	4,1	70,7	4,31		
		76	2,4	68,9	2,57		
		82	1,5	67,5	1,65		

	RTFO	52	71,9	71,4	75,9	≥2,20	
		58	31	75,9	31,99		
		64	13,2	79,7	13,43		
		70	5,8	82,4	5,89		
		76	2,7	84,4	2,73		
		82	1,3	85,8	1,34		
B ₁ -6TDV	Oriġinal	52	41,9	62,2	47,41	≥1,00	PG 76-Y
		58	21,8	62,9	24,52		
		64	12	62,7	13,51		
		70	7,2	61,9	8,19		
		76	4,6	60,9	5,29		
		82	3,2	60,4	3,63		
	RTFO	52	96,8	68,6	103,93	≥2,20	
		58	43,2	73	45,21		
		64	19	76,7	19,51		
		70	8,6	79,6	8,75		
		76	4,1	81,6	4,12		
		82	2	83	2,06		
B ₁ -7TDV	Oriġinal	52	48,7	56,2	58,69	≥1,00	PG 82-Y
		58	27,9	54,9	34,16		
		64	17,3	53,5	21,51		
		70	11,5	52,7	14,42		
		76	8,2	52,5	10,28		
		82	6,1	53	7,62		
	RTFO	52	108,3	67,1	117,55	≥2,20	
		58	49,4	71,2	52,19		
		64	22,4	74,9	23,24		
		70	10,4	77,9	10,60		
		76	5	80,3	5,08		
		82	2,6	82	2,58		

Ek 1.2 SBS katkılı B₁ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	Orijinal	52	7,2	84,8	7,28	≥1,00	PG 64-Y
		58	3,1	86	3,15		
		64	1,4	86,9	1,40		
		70	0,76	88,1	0,76		
	RTFO	52	23,8	79,5	24,20	≥2,20	
		58	9,7	82,3	9,75		
		64	4,1	84,6	4,07		
		70	1,8	86,4	1,78		
B ₁ -3SBS	Orijinal	52	13.89	77.6	14.23	≥1,00	PG 70-Y
		58	6.13	80.1	6.22		
		64	2.74	81.9	2.77		
		70	1.33	82.7	1.34		
		76	0.69	82.7	0.70		
	RTFO	52	33.3	70.4	35.35	≥2,20	
		58	15.52	73.0	16.22		
		64	7.26	76.5	7.47		
		70	3.37	79.9	3.42		
		76	1.63	82.6	1.65		
B ₁ -4SBS	Orijinal	52	16.63	70.1	17.69	≥1,00	PG 76-Y
		58	8.14	71.3	8.59		
		64	3.98	72.6	4.18		
		70	2.04	73.0	2.14		
		76	1.13	72.2	1.19		
		82	0.67	70.6	0.71		
	RTFO	52	44.39	66.2	48.51	≥2,20	
		58	21.59	67.2	23.43		
		64	10.64	70.2	11.31		
		70	5.11	74.7	5.30		
		76	2.49	78.9	2.53		
		82	1.25	81.9	1.26		
B ₁ -5SBS	Orijinal	52	17.49	65.5	19.21	≥1,00	PG 76-Y
		58	9.10	66.2	9.91		
		64	4.85	67.5	5.25		
		70	2.60	68.2	2.80		
		76	1.48	67.9	1.59		
		82	0.89	67.0	0.97		

	RTFO	52	45.16	63.7	50.38	≥2,20	
		58	22.95	64.7	25.40		
		64	11.50	67.9	12.41		
		70	5.73	72.4	6.01		
		76	2.94	76.4	3.03		
		82	1.52	79.4	1.55		
B ₁ -6SBS	Orijinal	52	21.02	61.8	23.86	≥1,00	PG 82-Y
		58	11.36	61.4	12.94		
		64	6.20	61.9	7.02		
		70	3.43	62.1	3.88		
		76	2.03	60.9	2.32		
		82	1.29	59.4	1.50		
	RTFO	52	51.04	60.2	58.82	≥2,20	
		58	26.75	59.5	31.03		
		64	14.23	61.4	16.20		
		70	7.58	65.7	8.32		
		76	4.04	70.9	4.27		
		82	2.12	75.7	2.20		
B ₁ -7SBS	Orijinal	52	26.32	54.7	32.26	≥1,00	PG 82-Y
		58	15.49	54.5	19.04		
		64	9.01	57.4	10.70		
		70	5.10	61.2	5.77		
		76	2.87	64.2	3.19		
		82	1.70	66.7	1.82		
	RTFO	52	56.25	58.8	65.78	≥2,20	
		58	30.10	59.6	34.89		
		64	15.93	62.1	18.02		
		70	8.48	65.5	9.32		
		76	4.60	68.4	4.95		
		82	2.58	70.4	2.74		

Ek 1.3 EVA katkılı B₁ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	Orijinal	52	7,2	84,8	7,28	≥1,00	PG 64-Y
		58	3,1	86	3,15		
		64	1,4	86,9	1,40		
		70	0,76	88,1	0,76		
	RTFO	52	23,8	79,5	24,20	≥2,20	
		58	9,7	82,3	9,75		
		64	4,1	84,6	4,07		
		70	1,8	86,4	1,78		
B ₁ -3EVA	Orijinal	52	14,2	77,6	14,52	≥1,00	PG 70-Y
		58	6,3	78,5	6,40		
		64	2,6	79,6	2,66		
		70	1,1	83,4	1,08		
		76	0,5	87,5	0,50		
	RTFO	52	45,8	70,5	48,64	≥2,2	
		58	20,7	73,0	21,71		
		64	9,2	75,2	9,59		
		70	4,0	79,0	4,12		
		76	2,1	83,6	2,13		
B ₁ -4EVA	Orijinal	52	15,6	74,3	16,19	≥1,00	PG 70-Y
		58	7,3	75,1	7,59		
		64	3,2	76,5	3,26		
		70	1,3	83,6	1,29		
		76	0,6	87,2	0,65		
	RTFO	52	50,6	68,6	54,42	≥2,20	
		58	23,6	71,0	24,98		
		64	11,1	73,3	11,61		
		70	5,1	77,9	5,26		
		76	3,1	81,6	3,15		
B ₁ -5EVA	Orijinal	52	21	72,2	22,04	≥1,00	PG 76-Y
		58	10,2	73,1	10,65		
		64	4,6	74,6	4,74		
		70	2	81,1	2,01		
		76	1,1	85,3	1,09		
		82	0,6	86,7	0,56		
	RTFO	52	49,7	65,4	54,70	≥2,20	

		58	23,8	67,6	25,80		
		64	11,6	70,4	12,38		
		70	5,7	75,3	5,98		
		76	3,6	79,2	3,68		
		82	2,0	81,3	2,03		
B ₁ -6EVA	Oriġinal	52	19,1	70,4	20,31	≥1,00	PG 76-Y
		58	10,1	70,7	10,69		
		64	4,7	71,8	4,99		
		70	2,1	80	2,13		
		76	1,2	84,6	1,17		
		82	0,6	86,1	0,61		
	RTFO	52	35,0	64,2	38,9	≥2,20	
		58	18,0	66,3	19,6		
		64	8,7	69,4	9,3		
		70	4,2	74,6	4,3		
		76	2,5	80,9	2,6		
		82	1,4	82,9	1,5		
B ₁ -7EVA	Oriġinal	52	61,7	32,41	28,5	≥1,00	PG 76-Y
		58	62,3	16,89	14,9		
		64	63,9	7,93	7,1		
		70	75,7	2,86	2,7		
		76	89,8	1,16	1,1		
		82	86,2	0,53	0,5		
	RTFO	52	57,4	70,89	59,7	≥2,20	
		58	59,6	38,16	32,9		
		64	62,2	19,48	17,2		
		70	70,5	6,86	6,4		
		76	80,9	2,39	2,3		
		82	83,7	1,29	1,2		

Ek 1.4 TDV katkılı B₂ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B2	Orijinal	46	3,9	85,9	3,86	≥1,00	PG 52-Y
		52	1,7	86	1,68		
		58	0,7	86,5	0,74		
	RTFO	46	9,8	83,7	9,84	≥2,20	
		52	3,98	85,2	3,94		
		58	1,6	86,5	1,57		
B2-3TDV	Orijinal	46	8,2	84,2	8,22	≥1,00	PG 58-Y
		52	3,5	85,6	3,47		
		58	1,6	86,6	1,57		
		64	0,7	87,1	0,74		
	RTFO	46	24,6	72,7	25,77	≥2,2	
		52	10,6	75,7	10,97		
		58	4,9	78	4,98		
		64	2,4	79,8	2,39		
		70	1,2	80,7	1,25		
B2-4TDV	Orijinal	46	10,8	83,1	10,87	≥1,00	PG 64-Y
		52	4,5	85	4,54		
		58	2	86,2	2		
		64	1,1	87	1,10		
		70	0,6	87,5	0,60		
	RTFO	46	31,4	76,7	32,28	≥2,20	
		52	12,8	80,7	12,98		
		58	5,3	83,3	5,37		
		64	2,3	85	2,35		
		70	1,1	86,1	1,10		
B2-5TDV	Orijinal	46	15,3	79,5	15,56	≥1,00	PG 64-Y
		52	6,6	80,3	6,69		
		58	3,1	81,2	3,13		
		64	1,45	81,6	1,47		
		70	0,8	82,1	0,80		
	RTFO	46	36,9	75,2	38,18	≥2,20	
		52	15,3	79,4	15,58		
		58	6,4	82,4	6,49		
		64	2,8	84,4	2,85		
		70	1,3	85,6	1,33		
	Orijinal	46	19,8	77,3	20,26	≥1,00	PG 64-Y

B2-6TDV		52	8,7	79,9	8,82		
		58	4	81,2	4,05		
		64	1,9	81,8	1,97		
		70	1	81,6	1,04		
		76	0,6	81	0,56		
	RTFO	46	44,9	73,5	46,85	≥2,20	
		52	18,8	78,2	19,22		
		58	7,9	81,6	7,95		
		64	3,4	83,8	3,45		
		70	1,6	85,2	1,61		
B2-7TDV	Orijinal	46	25,8	74,2	26,82	≥1,00	PG 70-Y
		52	11,5	78,3	11,74		
		58	5,3	80,5	5,35		
		64	2,6	81,6	2,58		
		70	1,3	82,2	1,32		
		76	0,7	82,2	0,74		
	RTFO	46	59,2	69	63,44	≥2,20	
		52	26,2	75,2	27,10		
		58	11	79,7	11,15		
		64	4,8	82,5	4,80		
		70	2,2	84,4	2,21		
		76	1,1	85,4	1,10		

Ek 1.5 SBS katkılı B₂ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B2	Orijinal	46	3,9	85,9	3,86	≥1,00	PG 52-Y
		52	1,7	86	1,68		
		58	0,7	86,5	0,74		
	RTFO	46	9,8	83,7	9,84	≥2,20	
		52	3,98	85,2	3,94		
		58	1,6	86,5	1,57		
B2-3SBS	Orijinal	46	6,6	76,8	6,81	≥1,00	PG 58-Y
		52	3,1	76,7	3,16		
		58	1,5	76,2	1,51		
		64	0,8	75,4	0,78		
	RTFO	46	13,2	75,4	13,64	≥2,2	
		52	5,9	77,6	6,06		
		58	2,7	79,3	2,71		
		64	1,3	80,1	1,30		
B2-4SBS	Orijinal	46	8,5	75	8,80	≥1,00	PG 58-Y
		52	4,1	77,7	4,16		
		58	1,9	79,4	1,95		
		64	0,9	80,2	0,94		
	RTFO	46	17,9	72,5	18,75	≥2,20	
		52	8,2	75,4	8,51		
		58	3,8	77,9	3,92		
		64	1,8	79,5	1,83		
B2-5SBS	Orijinal	46	10,5	71,3	11,10	≥1,00	PG 64-Y
		52	5,2	73,8	5,39		
		58	2,5	75,3	2,57		
		64	1,2	75,7	1,27		
		70	0,7	75,6	0,67		
	RTFO	46	22,4	67,7	24,23	≥2,20	
		52	10,8	69,7	11,56		
		58	5,1	71,8	5,35		
		64	2,5	73,1	2,58		
		70	1,3	73,2	1,35		
B2-6SBS	Orijinal	46	11,4	69,3	12,16	≥1,00	PG 64-Y
		52	5,7	71	6,08		
		58	2,9	71,7	3,11		
		64	1,5	71,6	1,60		

		70	0,8	70,7	0,87		
	RTFO	46	21,6	64,5	23,92	≥2,20	
		52	10,8	65,2	11,89		
		58	5,4	65,5	5,89		
		64	2,8	64,8	3,10		
		70	1,6	63,1	1,78		
B2-7SBS	Oriġinal	46	11,9	66,6	12,94	≥1,00	PG 70-Y
		52	6,1	68,3	6,56		
		58	3,1	68,9	3,28		
		64	1,6	68,3	1,77		
		70	0,9	67,1	1,02		
		76	0,6	66,4	0,63		
	RTFO	46	26,9	61,9	30,48	≥2,20	
		52	13,7	62,8	15,36		
		58	6,8	63	7,58		
		64	3,6	62,1	4,06		
		70	2,1	60,1	2,39		
		76	1,3	57,2	1,55		

Ek 1.6 EVA katkılı B₂ bitümlerin DSR deney sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B2	Orijinal	46	3,9	85,9	3,86	≥1,00	PG 52-Y
		52	1,7	86	1,68		
		58	0,7	86,5	0,74		
	RTFO	46	9,8	83,7	9,84	≥2,20	
		52	3,98	85,2	3,94		
		58	1,6	86,5	1,57		
B2-3EVA	Orijinal	46	6,3	78,6	6,46	≥1,00	PG 58-Y
		52	3	77,8	3,08		
		58	1,4	76,8	1,48		
		64	0,6	81,6	0,60		
	RTFO	46	15,4	76,4	15,88	≥2,2	
		52	6,8	77,8	6,97		
		58	3,2	78,5	3,24		
		64	1,4	79,1	1,43		
B2-4EVA	Orijinal	46	7,4	76	7,61	≥1,00	PG 58-Y
		52	3,6	75	3,74		
		58	1,8	74,1	1,85		
		64	0,7	78,8	0,72		
	RTFO	46	19,4	72,6	20,28	≥2,20	
		52	8,9	73,2	9,27		
		58	4,1	72,9	4,28		
		64	1,7	74,7	1,81		
B2-5EVA	Orijinal	46	10,2	71	10,74	≥1,00	PG 58-Y
		52	5,1	69,1	5,47		
		58	2,4	67,3	2,62		
		64	0,9	74,4	0,91		
	RTFO	46	19,5	69,5	20,77	≥2,20	
		52	9,2	70	9,76		
		58	4,5	69,9	4,82		
		64	2	71,7	2,07		
B2-6EVA	Orijinal	46	10,4	69	11,12	≥1,00	PG 64-Y
		52	5,4	67,2	5,91		
		58	2,8	65,9	3,03		
		64	1,0	72	1,08		
		70	0,3	84,7	0,34		
	RTFO	46	24,9	64,2	27,63	≥2,20	

		52	12,5	65,1	13,73		
		58	6,4	66,2	7,03		
		64	3	68	3,19		
		70	1,0	81	1,06		
B2-7EVA	Orijinal	46	13,6	65,7	14,87	≥1,00	PG 64-Y
		52	7,1	63,7	7,96		
		58	3,6	61,9	4,07		
		64	1,3	68,5	1,43		
		70	0,5	82,5	0,46		
	RTFO	46	27,6	61,6	31,39	≥2,20	
		52	14,3	62	16,16		
		58	7,5	62,7	8,43		
		64	3,4	65,4	3,73		
		70	1,2	78,8	1,21		

Ek 2.1 TDV katkılı B₁ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	$G^* \times \sin \delta$ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	PAV	31	1491	60.6	1300	≥ 5000	PG 64-Y
		28	2433	57.7	2056		
		25	3944	54.5	3210		
		22	6363	51.1	4955		
		19	10104	47.7	7476		
B ₁ -3TDV	PAV	34	1146	52.27	906	≥ 5000	PG 70-Y
		31	1789	49.74	1365		
		28	2762	47.18	2026		
		25	4232	44.50	2966		
		22	6403	41.73	4262		
		19	9532	38.93	5990		
B ₁ -4TDV	PAV	34	1429	49.5	1087	≥ 5000	PG 76-Y
		31	2169	47.2	1592		
		28	3620	44.8	2299		
		25	4881	42.3	3289		
		22	7235	39.8	4631		
		19	10588	37.2	6403		
B ₁ -5TDV	PAV	34	1855	51.2	1446	≥ 5000	PG 76-Y
		31	2882	48.4	2155		
		28	4418	45.6	3156		
		25	6677	42.7	4536		
		22	9963	39.9	6395		
B ₁ -6TDV	PAV	34	2084	46.2	1506	≥ 5000	PG 76-Y
		31	3056	44.0	2125		
		28	4444	41.8	2964		
		25	6445	39.5	4107		
		22	9281	37.2	5623		
B ₁ -7TDV	PAV	34	2002	46.54	1453	≥ 5000	PG 82-Y
		31	2956	44.17	2060		
		28	4314	41.86	2879		
		25	6263	39.54	3987		
		22	9022	37.17	5451		

Ek 2.2 SBS katkılı B₁ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	$G^* \times \sin \delta$ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	PAV	31	1491	60.6	1300	≥5000	PG 64-Y
		28	2433	57.7	2056		
		25	3944	54.5	3210		
		22	6363	51.1	4955		
		19	10104	47.7	7476		
B ₁ -3SBS	PAV	34	1747	47.1	1280	≥5000	PG 70-Y
		31	2602	44.8	1834		
		28	3817	42.5	2582		
		25	5559	40.3	3599		
		22	8023	38.1	4952		
		19	11387	35.9	6680		
B ₁ -4SBS	PAV	34	1014	50.0	777	≥5000	PG 76-Y
		31	1568	47.4	1156		
		28	2281	45.2	1619		
		25	3233	43.12	2210		
		22	4605	41.04	3024		
		19	6428	39.1	4058		
B ₁ -5SBS	PAV	34	1226	46.0	882	≥5000	PG 76-Y
		31	1795	44.0	1245		
		28	2585	42.0	1732		
		25	3722	39.5	2340		
		22	5321	38.2	3299		
		19	7437	36.4	4421		
B ₁ -6SBS	PAV	34	1435	45.1	1017	≥5000	PG 76-Y
		31	2097	43.0	1431		
		28	3011	41.0	1978		
		25	4288	39.0	2704		
		22	6043	37.13	3648		
		19	8442	35.2	4870		
B ₁ -7SBS	PAV	34	1390	45.8	998	≥5000	PG 82-Y
		31	2036	43.6	1406		
		28	2946	41.4	1952		
		25	4230	39.3	2680		
		22	5992	37.1	3621		
		19	8362	35.1	4812		

Ek 2.3 EVA katkılı B₁ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G* $\times$ sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₁	PAV	31	1688	53.1	1351	≥ 5000	PG 64-Y
		28	2667	50.0	2044		
		25	4172	46.8	3043		
		22	6423	43.6	4433		
		19	9720	40.5	6314		
B ₁ -3EVA	PAV	34	1332	51.5	1044	≥ 5000	PG 70-Y
		31	2044	49.1	1546		
		28	3120	46.6	2270		
		25	4775	44.1	3324		
		22	7265	41.5	4815		
		19	10857	38.9	6829		
B ₁ -4EVA	PAV	34	1335	49.44	1014	≥ 5000	PG 76-Y
		31	2030	47.2	1490		
		28	3042	45.0	2154		
		25	4559	42.8	3099		
		22	6830	40.5	4435		
		19	10121	38.1	6257		
B ₁ -5EVA	PAV	34	1764	44.6	1240	≥ 5000	PG 76-Y
		31	2341	43.1	1601		
		28	3057	41.7	2037		
		25	3948	40.5	2564		
		22	5142	39.2	3252		
		19	6559	38.0	4046		
B ₁ -6EVA	PAV	34	672	45.9	483	≥ 5000	PG 76-Y
		31	994	44.9	703		
		28	1458	44.0	1014		
		25	2146	43.0	1466		
		22	3193	41.98	2135		
		19	4777	40.0	3466		
B ₁ -7EVA	PAV	34	1340	43.0	914	≥ 5000	PG 82-Y
		31	1922	41.7	1279		
		28	2732	40.4	1772		
		25	3897	39.1	2462		
		22	5568	37.8	3414		
		19	7923	36.5	4716		

Ek 2.4 TDV katkılı B₂ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G* × sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₂	PAV	28	318	60.0	275	≥5000	PG 64-Y
		25	529	56.8	443		
		22	851	53.7	685		
		19	1369	50.0	1049		
		16	2182	46.8	1591		
		13	3377	43.8	2340		
B ₂ -3TDV	PAV	28	965	52.3	763	≥5000	PG 70-Y
		25	1545	49.9	1182		
		22	2466	47.4	1815		
		19	3983	44.8	2810		
		16	6188	41.9	4136		
		13	9552	39.1	6026		
B ₂ -4TDV	PAV	28	895	48.7	670	≥5000	PG 76-Y
		25	1385	46.8	1010		
		22	2138	45.0	1513		
		19	3316	42.9	2260		
		16	5103	40.7	3330		
		13	7757	38.3	4814		
B ₂ -5TDV	PAV	28	1067	50.9	828	≥5000	PG 76-Y
		25	1685	48.6	1265		
		22	2637	46.1	1901		
		19	4126	43.7	2851		
		16	6380	41.0	4191		
		13	9745	38.3	6048		
B ₂ -6TDV	PAV	28	1376	50.2	1058	≥5000	PG 76-Y
		25	2165	47.9	1608		
		22	3373	45.6	2411		
		19	5228	43.1	3575		
		16	8071	40.5	5241		
B ₂ -7TDV	PAV	28	1643	47.2	1206	≥5000	PG 82-Y
		25	2495	45.1	1769		
		22	3765	43.0	2571		
		19	5672	40.7	3704		
		16	8582	38.3	5320		

Ek 2.5 SBS katkı B₂ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	$G^* \times \sin \delta$ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₂	PAV	28	318	60.0	275	≥ 5000	PG 64-Y
		25	529	56.8	443		
		22	851	53.7	685		
		19	1369	50.0	1049		
		16	2182	46.8	1591		
		13	3377	43.8	2340		
B ₂ -3SBS	PAV	28	756	56.8	633	≥ 5000	PG 70-Y
		25	1261	53.7	1016		
		22	2074	50.4	1600		
		19	3366	47.1	2466		
		16	5354	43.7	3699		
		13	8175	40.2	5414		
B ₂ -4SBS	PAV	28	825	55.0	676	≥ 5000	PG 76-Y
		25	1352	52.0	1066		
		22	2186	48.9	1649		
		19	3504	45.7	2508		
		16	5503	42.4	3716		
		13	8477	39.2	5361		
B ₂ -5SBS	PAV	28	798	53.6	643	≥ 5000	PG 76-Y
		25	1299	50.7	1006		
		22	2087	47.7	1545		
		19	3312	44.6	2328		
		16	5151	41.5	3414		
		13	7741	38.4	4816		
B ₂ -6SBS	PAV	28	1098	51.3	857	≥ 5000	PG 76-Y
		25	1433	49.7	1094		
		22	2161	47.4	1591		
		19	3541	44.3	2474		
		16	5435	41.5	3603		
		13	8225	38.7	5148		
B ₂ -7SBS	PAV	28	853	50.0	654	≥ 5000	PG 82-Y
		25	1329	47.5	981		
		22	2057	45.0	1456		
		19	3136	42.5	2121		
		16	4731	40.0	3042		
		13	6987	37.6	4263		

Ek 2.6 EVA katkılı B₂ numunelerin DSR yorulma sonuçları

Bitüm Türü		Sıcaklık (°C)	G* (kPa)	δ (°)	G* × sin δ (kPa)	Limit değerler (kPa)	Sınıf
B ₂	PAV	28	318	60.0	275	≥5000	PG 64-Y
		25	529	56.8	443		
		22	851	53.7	685		
		19	1369	50.0	1049		
		16	2182	46.8	1591		
		13	3377	43.8	2340		
B ₂ -3 EVA	PAV	28	885	55.1	726	≥5000	PG 70-Y
		25	1448	53.2	1160		
		22	2349	51.4	1836		
		19	3772	49.8	2881		
		16	5985	48.4	4475		
		13	9420	47.1	6900		
B ₂ -4 EVA	PAV	28	724	53.5	581	≥5000	PG 76-Y
		25	1185	51.1	922		
		22	1921	48.7	1443		
		19	3093	46.2	2232		
		16	4931	43.7	3406		
		13	7806	41.1	5131		
B ₂ -5 EVA	PAV	28	564	52.0	444	≥5000	PG 76-Y
		25	921	50.3	709		
		22	1493	48.7	1122		
		19	2415	46.9	1764		
		16	3878	44.9	2742		
		13	6193	42.8	4208		
B ₂ -6 EVA	PAV	28	368	50.1	282	≥5000	PG 76-Y
		25	591	49.6	450		
		22	953	49.0	720		
		19	1549	48.1	1154		
		16	2534	46.9	1853		
		13	4038	45.6	2889		
B ₂ -7EVA	PAV	28	330	50.8	256	≥5000	PG 82-Y
		25	527	50.1	405		
		22	847	49.4	644		
		19	1381	48.4	1033		
		16	2274	47.2	1669		
		13	3723	45.7	2666		

Ek 3.1 TDV katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede R değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₁	11,86	7,90	6,03	1,67	2,24	0,72	-	-	-	-
B ₁ -3TDV	25,74	19,60	18,42	8,48	11,24	2,14	5,04	0,48	-	-
B ₁ -4TDV	58,83	27,33	40,82	15,04	27,49	5,10	12,79	0,65	6,58	1,24
B ₁ -5TDV	47,41	35,19	41,97	23,32	36,16	12,09	26,67	4,63	18,07	0,83
B ₁ -6TDV	50,33	36,96	42,43	25,50	35,31	14,31	28,17	5,89	21,32	1,23
B ₁ -7TDV	51,80	38,88	53,41	27,35	50,57	14,09	35,23	5,62	23,19	0,99

Ek 3.2 TDV katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₁	0,31	0,33	0,87	0,95	2,32	2,56	-	-	-	-
B ₁ -3TDV	0,10	0,11	0,32	0,38	0,79	0,96	2,07	2,48	-	-
B ₁ -4TDV	0,03	0,07	0,14	0,22	0,41	0,65	1,24	1,68	2,97	3,85
B ₁ -5TDV	0,04	0,05	0,11	0,16	0,30	0,47	0,79	1,26	1,99	3,01
B ₁ -6TDV	0,03	0,04	0,09	0,12	0,24	0,35	0,63	0,99	1,53	2,47
B ₁ -7TDV	0,02	0,03	0,06	0,10	0,14	0,29	0,42	0,80	1,16	2,02

Ek 3.3 TDV katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₁	5,21	33,43	8,68	72,29	10,45	132,27	-	-	-	-
B ₁ -3TDV	10,44	23,88	17,60	53,95	22,14	81,01	19,51	109,50	-	-
B ₁ -4TDV	89,23	53,55	58,62	63,15	56,66	81,46	34,92	94,95	29,57	118,81
B ₁ -5TDV	27,83	25,77	40,88	44,42	54,77	66,57	58,59	82,64	51,68	95,38
B ₁ -6TDV	31,39	26,56	35,43	39,90	45,91	59,48	56,86	79,11	61,27	94,24
B ₁ -7TDV	31,24	24,93	66,80	48,79	103,82	72,14	88,02	84,06	74,07	95,74

Ek 3.4 SBS katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede R değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C		82 °C	
	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa
B ₁	11,86	7,90	6,03	1,67	2,24	0,00	-	-	-	-	-	-
B ₁ -3SBS	33,68	28,19	24,74	15,41	16,50	6,34	10,58	1,37	5,40	0,00	-	-
B ₁ -4SBS	42,45	51,79	40,70	27,80	29,80	14,81	20,47	7,09	13,06	1,84	-	-
B ₁ -5SBS	60,15	49,72	57,40	37,13	54,89	26,49	53,63	19,56	43,29	11,01	25,49	1,82
B ₁ -6SBS	67,01	61,99	66,71	49,98	64,09	37,36	61,19	27,68	60,81	19,26	43,35	8,53
B ₁ -7SBS	72,16	67,49	81,28	61,24	85,63	52,80	88,53	43,51	88,62	33,94	84,93	19,82

Ek 3.5 SBS katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa ⁻¹) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C		82 °C	
	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa
B ₁	0.31	0.33	0.87	0.95	2.32	2.56	-	-	-	-	-	-
B ₁ -3SBS	0.1308	0.1436	0.3484	0.4112	0.90	1.11	2.23	2.82	5.03	6.25	-	-
B ₁ -4SBS	0.0655	0.0797	0.1811	0.2306	0.49	0.66	1.25	1.70	2.97	4.02	-	-
B ₁ -5SBS	0.0473	0.0610	0.1095	0.1706	0.26	0.46	0.58	1.18	1.45	2.84	3.77	6.63
B ₁ -6SBS	0.0291	0.0340	0.0600	0.0946	0.13	0.26	0.31	0.68	0.65	1.67	1.81	3.98
B ₁ -7SBS	0.0218	0.0259	0.0299	0.0648	0.04	0.17	0.07	0.45	0.14	1.09	0.32	2.64

Ek 3.6 SBS katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri											
	Test sıcaklıkları											
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C		82 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₁	5,21	33,43	8,68	72,29	10,45	132,27	-	-	-	-	-	-
B ₁ -3SBS	9,81	16,30	18,01	37,72	23,61	61,56	26,80	87,10	24,42	100,0	-	-
B ₁ -4SBS	21,62	18,04	27,33	31,69	33,46	50,30	35,26	65,39	35,20	85,92	-	-
B ₁ -5SBS	28,94	17,34	55,75	35,30	80,11	51,74	103,63	63,53	95,14	74,57	75,50	92,85
B ₁ -6SBS	17,06	7,49	57,59	22,08	90,61	41,71	117,24	54,77	158,00	68,22	119,15	80,32
B ₁ -7SBS	18,56	6,48	116,60	24,65	259,18	38,34	478,88	50,85	647,96	61,70	703,02	76,66

Ek 3.7 EVA katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₁	0.31	0.33	0.87	0.95	2.32	2.56	-	-	-	-
B ₁ -3EVA	0.0718	0.0895	0.2000	0.2799	0.5077	0.8523	1.3222	2.4481	-	-
B ₁ -4EVA	0.0530	0.0696	0.1274	0.2202	0.2982	0.6587	0.7467	2.0335	-	-
B ₁ -5EVA	0.0184	0.0272	0.0325	0.0839	0.0922	0.3454	0.4238	2.0884	-	-
B ₁ -6EVA	0.0162	0.0204	0.0399	0.0715	0.1132	1.0718	0.9048	4.9270	-	-
B ₁ -7EVA	0.0062	0.0096	0.0125	0.0260	0.0358	0.4208	0.3411	4.4105	-	-

Ek 3.8 EVA katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede R değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₁	11,86	7,90	6,03	1,67	2,24	0,72	-	-	-	-
B ₁ -3EVA	46.78	34.72	38.51	19.81	34.91	7.16	31.77	2.00	-	-
B ₁ -4EVA	56.13	42.72	54.47	26.17	52.51	11.21	48.45	3.93	-	-
B ₁ -5EVA	79.10	68.89	89.90	58.64	79.33	31.76	59.41	4.03	-	-
B ₁ -6EVA	78.80	72.61	79.33	62.55	77.64	14.06	61.97	0.25	-	-
B ₁ -7EVA	89.38	82.66	89.72	77.06	88.57	35.53	80.53	1.04	-	-

Ek 3.9 EVA katkılı B₁ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	52 °C		58 °C		64 °C		70 °C		76 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₁	5,21	33,43	8,68	72,29	10,45	132,27	-	-	-	-
B ₁ -3EVA	24.66	25.78	39.92	50.19	67.87	79.50	85.15	93.71	-	-
B ₁ -4EVA	31.27	23.88	72.81	51.96	120.89	78.66	172.34	91.89	-	-
B ₁ -5EVA	47.54	12.91	158.36	30.10	274.77	59.96	392.76	93.22	-	-
B ₁ -6EVA	25.81	7.85	79.23	21.15	846.98	81.89	444.52	100.40	-	-
B ₁ -7EVA	54.79	7.52	108.97	14.11	1074.06	59.89	1193.20	98.71	-	-

Ek 3.10 TDV katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	8.59	1.88	5.39	0.90	-	-	-	-	-	-
B ₂ -3TDV	25.12	13.71	17.76	4.76	9.78	0.44	3.78	1.58	-	-
B ₂ -4TDV	26.42	14.63	19.85	5.44	10.98	0.76	4.09	1.29	-	-
B ₂ -5TDV	27.71	17.95	23.37	7.78	14.44	1.73	6.85	0.72	-	-
B ₂ -6TDV	32.07	22.48	31.43	11.76	21.73	3.89	12.95	0.3	-	-
B ₂ -7TDV	59.91	31.75	52.56	16.17	38.91	5.86	26.87	0.59	-	-

Ek 3.11 TDV katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede R değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	0.9290	1.0851	2.3864	2.8906	-	-	-	-	-	-
B ₂ -3TDV	0.1017	0.1915	0.3042	0.6482	0.9788	1.9845	2.5951	4.8696	-	-
B ₂ -4TDV	0.1759	0.2139	0.5025	0.6450	1.4299	1.8372	3.7630	4.6622	-	-
B ₂ -5TDV	0.1720	0.2008	0.4555	0.5969	1.2515	1.6257	3.2403	3.9887	-	-
B ₂ -6TDV	0.1335	0.1482	0.3323	0.4413	0.9397	1.2528	2.4040	3.0742	-	-
B ₂ -7TDV	0.0968	0.1072	0.2170	0.3079	0.6029	0.8761	1.5865	2.2522	-	-

Ek 3.12 TDV katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₂	16.80	78.10	21.14	116.60	-	-	-	-	-	-
B ₂ -3TDV	88.29	45.40	113.04	73.19	102.75	95.53	87.64	141.76	-	-
B ₂ -4TDV	21.62	44.63	28.34	72.61	28.49	93.08	23.90	131.41	-	-
B ₂ -5TDV	16.79	35.21	31.06	66.73	29.90	88.02	23.10	110.56	-	-
B ₂ -6TDV	11.05	29.90	32.80	62.59	33.31	82.08	27.88	97.66	-	-
B ₂ -7TDV	10.78	47	41.90	69.22	45.32	84.93	41.96	97.79	-	-

Ek 3.13 SBS katkılı B₂ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede R değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	8.59	1.88	5.39	0.90	-	-	-	-	-	-
B ₂ -3SBS	69.19	61.57	76.75	43.02	74.02	16.51	69.31	1.31	-	-
B ₂ -4SBS	54.02	43.15	55.84	28.34	50.12	14.65	46.41	4.25	-	-
B ₂ -5SBS	87.41	78.40	92.09	81.19	93.73	71.21	93.34	37.91	87.14	8.12
B ₂ -6SBS	95.11	86.63	97.59	87.45	97.90	83.05	97.64	69.56	96.17	33.64
B ₂ -7SBS	97.12	91.01	98.31	93.94	98.48	94.73	98.07	91.64	97.08	74.51

Ek 3.14 SBS katkılı B₂ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa ⁻¹) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	0.9290	1.0851	2.3864	2.8906	-	-	-	-	-	-
B ₂ -3SBS	0.1533	0.2121	0.2708	0.8074	0.7244	2.9386	1.7156	7.6893	-	-
B ₂ -4SBS	0.1678	0.2189	0.3588	0.6670	0.9518	1.9811	2.1610	5.1684	-	-
B ₂ -5SBS	0.0320	0.0577	0.0434	0.1096	0.0746	0.3708	0.1603	1.8780	0.5348	6.3280
B ₂ -6SBS	0.0115	0.0335	0.0114	0.0648	0.099	0.1833	0.0402	0.6625	0.1001	3.1393
B ₂ -7SBS	0.0054	0.0177	0.0062	0.0240	0.0108	0.0400	0.0238	0.1141	0.0543	0.6822

Ek 3.15 SBS katkılı B₂ bitümlerin 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri									
	Test sıcaklıkları									
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C		70 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₂	16.80	78.10	21.14	116.60	-	-	-	-		
B ₂ -3SBS	38.32	11.01	198.19	43.95	305.66	77.69	348.19	98.11	-	-
B ₂ -4SBS	30.43	20.11	85.86	49.25	108.14	70.78	139.17	90.85	-	-
B ₂ -5SBS	80.64	10.31	152.71	11.84	397	24.03	107.34	59.38	1083.18	90.68
B ₂ -6SBS	190.47	8.92	469.62	10.38	820.60	15.17	1549.23	28.76	3036.03	65.02
B ₂ -7SBS	230.97	6.29	285.31	4.44	270.71	3.80	379.79	6.56	1155.71	23.25

Ek 3.16 EVA katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi R (kPa ⁻¹) değerleri							
	Test sıcaklıkları							
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	8.59	1.88	5.39	0.90	-	-	-	-
B ₂ -3EVA	88.54	19.14	59.82	3.92	40.67	0.20	-	-
B ₂ -4EVA	97.16	42.58	89.24	11.87	71.33	1.82	-	-
B ₂ -5EVA	98.69	62.54	96.79	19.73	91.68	3.18	-	-
B ₂ -6EVA	97.81	87.48	97.01	56.14	92.93	14.73	89.79	0.40
B ₂ -7EVA	99.17	95.44	99.31	84.09	97.72	21.95	94.56	1.32

Ek 3.17 EVA katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr} değerleri.

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr} (kPa-1) değerleri							
	Test sıcaklıkları							
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C	
	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa	0,1 kPa	3,2 kPa
B ₂	0.9290	1.0851	2.3864	2.8906	-	-	-	-
B ₂ -3EVA	0.0545	0.4400	0.4660	1.3893	1.5968	3.6255	-	-
B ₂ -4EVA	0.0107	0.2330	0.0930	0.9807	0.5805	2.9852	-	-
B ₂ -5EVA	0.0044	0.1285	0.0228	0.7588	0.1389	2.6660	-	-
B ₂ -6EVA	0.0037	0.0194	0.0113	0.1725	0.0655	1.2013	0.2792	5.0812
B ₂ -7EVA	0.0011	0.0055	0.0019	0.0435	0.0163	0.9329	0.1230	4.4855

Ek 3.18 EVA katkılı B₂ bitümünün 0,1 kPa ve 3,2 kPa gerilmede J_{nr, diff} ve R_{diff} değerleri

Bitüm Türü	MSCR deneyi J _{nr, diff} (%) ve R _{diff} (%) değerleri							
	Test sıcaklıkları							
	46 °C		52 °C		58 °C		64 °C	
	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}	J _{nr, diff}	R _{diff}
B ₂	16.80	78.10	21.14	116.60	-	-	-	-
B ₂ -3EVA	707.24	78.38	198.12	93.44	127.05	100.50	-	-
B ₂ -4EVA	2075.81	56.18	954.17	86.70	414.25	97.44	-	-
B ₂ -5EVA	2831.48	36.63	3224.16	79.61	1819.13	96.53	-	-
B ₂ -6EVA	419.14	10.56	1421.30	42.13	1735.22	87.14	1719.93	99.55
B ₂ -7EVA	395.05	3.77	2138.65	15.33	5628.98	77.53	3547.57	98.60

Ek 4.1 B₁ bitümün optimum içeriği belirlenmesinde gereken Marshall deney sonuçları

No	Bitüm		YÜKSEKLİKLER, mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp g/cm ³	Dt g/cm ³	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab. Kg.f	Düz. Fak.	Düz. Stab. Kg.f
	Wa,%	g	1	2	3	Ort													
1	3.50	42.0	65.6	65.7	65.6	65.6	1233.2	716.9	1242.2	525.3	2.348					2.22	1200	0.951	1142
2	3.50	42.0	66.3	66.4	66.4	66.4	1235.3	714.9	1244.6	529.7	2.332					2.28	1195	0.936	1118
3	3.50	42.0	66.5	66.2	66.1	66.3	1236.7	716.5	1245.8	529.3	2.337					2.21	1190	0.938	1116
											2.339	2.513	6.95	14.50	52.1	2.24			1125
4	4.00	48.0	65.3	65.6	65.5	65.5	1240.9	722.3	1247.3	525.0	2.364					2.44	1235	0.955	1179
5	4.00	48.0	65.7	65.7	65.7	65.7	1239.5	722.7	1247.6	524.9	2.362					2.40	1230	0.950	1169
6	4.00	48.0	65.7	65.8	65.7	65.7	1240.0	724.3	1248.0	523.7	2.368					2.38	1226	0.950	1164
											2.364	2.496	5.28	13.98	62.2	2.41			1171
7	4.50	54.0	65.1	64.6	64.8	64.8	1248.9	727.7	1252.1	524.4	2.381					2.68	1265	0.968	1225
8	4.50	54.0	64.4	64.2	64.6	64.4	1245.0	726.4	1249.6	523.2	2.379					2.69	1260	0.978	1232
9	4.50	54.0	64.6	64.7	64.6	64.6	1249.6	728.6	1252.0	523.4	2.388					2.59	1272	0.973	1238
											2.383	2.479	3.88	13.72	71.7	2.65			1232
10	5.00	60.0	64.5	64.8	64.5	64.6	1247.3	733.3	1248.7	515.4	2.420					2.88	1290	0.974	1256
11	5.00	60.0	64.6	64.6	64.3	64.5	1249.4	730.5	1251.6	521.1	2.397					2.83	1286	0.976	1255
12	5.00	60.0	65.2	65.4	65.2	65.2	1253.2	734.5	1255.0	520.5	2.408					2.81	1282	0.959	1230
											2.408	2.463	2.20	13.21	83.4	2.84			1247
13	5.50	66.0	65.8	65.7	65.7	65.7	1253.6	729.3	1254.7	525.4	2.386					3.02	1250	0.950	1188
14	5.50	66.0	65.5	64.6	64.7	64.9	1259.0	733.1	1260.0	526.9	2.390					3.10	1255	0.967	1213
15	5.50	66.0	65.4	65.0	65.2	65.2	1251.4	730.5	1252.6	522.1	2.397					3.03	1247	0.960	1198
											2.391	2.446	2.27	14.25	84.1	3.05			1199

Ek 4.2 B₂ bitümün optimum içeriği belirlenmesinde gereken Marshall deney sonuçları

No	Bitüm		YÜKSEKLİKLER, mm				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp g/cm ³	Dt g/cm ³	Vh %	V.M.A %	Vf %	Akma mm	Stab. Kg.f	Düz. Fak.	Düz. Stab. Kg.f
	Wa,%	g	1	2	3	Ort													
1	3.50	42.0	65.4	65.1	65.2	65.2	1234.5	720.0	1244.0	524.0	2.356					2.41	1105	0.960	1061
2	3.50	42.0	65.4	65.2	65.3	65.3	1235.5	720.7	1246.1	525.4	2.352					2.48	1102	0.958	1056
3	3.50	42.0	65.4	65.4	64.5	65.1	1234.1	720.4	1244.2	523.8	2.356					2.51	1110	0.963	1069
											2.339	2.513	6.32	13.92	54.6	2.47			1062
4	4.00	48.0	65.1	65.3	65.2	65.2	1239.2	721.6	1244.6	523.0	2.370					2.58	1152	0.960	1106
5	4.00	48.0	64.9	64.8	64.7	64.8	1238.2	721.1	1243.0	521.9	2.373					2.64	1160	0.969	1124
6	4.00	48.0	65.2	65.1	65.0	65.1	1241.8	722.6	1245.4	522.8	2.375					2.57	1145	0.963	1103
											2.364	2.496	4.95	13.68	63.8	2.60			1111
7	4.50	54.0	64.8	64.5	64.6	64.6	1240.2	723.4	1242.1	518.7	2.391					2.79	1185	0.972	1152
8	4.50	54.0	64.5	64.6	64.6	64.6	1248.4	730.6	1251.1	520.5	2.398					2.81	1200	0.974	1169
9	4.50	54.0	64.8	64.9	64.9	64.9	1245.7	727.8	1247.8	520.0	2.396					2.76	1190	0.967	1151
											2.383	2.479	3.39	13.28	74.5	2.79			1158
10	5.00	60.0	64.2	64.2	64.2	64.2	1243.3	724.9	1245.2	520.3	2.389					3.12	1150	0.982	1130
11	5.00	60.0	64.8	65.0	65.1	65.0	1253.7	731.2	1255.6	524.4	2.391					3.17	1156	0.966	1116
12	5.00	60.0	64.6	64.7	64.7	64.7	1245.0	725.1	1246.4	521.3	2.388					3.04	1142	0.972	1110
											2.408	2.463	2.96	13.89	78.7	3.11			1118
13	5.50	66.0	64.6	64.3	64.4	64.4	1248.4	725.3	1249.4	524.1	2.382					3.30	1110	0.977	1084
14	5.50	66.0	64.4	64.3	64.5	64.4	1252.3	726.2	1253.4	527.2	2.375					3.26	1105	0.978	1080
15	5.50	66.0	64.2	64.2	64.2	64.2	1251.1	726.2	1252.2	526.0	2.379					3.29	1100	0.983	1081
											2.391	2.446	2.76	14.69	81.2	3.28			1082