

**AYNI PERFORMANS SEVİYESİNE SAHİP
BAĞLAYICILARLA HAZIRLANAN BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN KALICI DEFORMASYONA KARŞI
DAYANIMLARININ VE YORULMA ÖMÜRLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

İnş. Müh. Aykut Fatih KORAL

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ
ARALIK-2012**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AYNI PERFORMANS SEVİYESİNE SAHİP BAĞLAYICILARLA HAZIRLANAN
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN KALICI DEFORMASYONA KARŞI
DAYANIMLARININ VE YORULMA ÖMÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aykut Fatih KORAL

(101115101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Kasım 2012

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Aralık 2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü)

Doç. Dr. Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)

ARALIK-2012

ÖNSÖZ

Bu araştırmanın planlanması ve yürütülmesinde benden destek ve ilgisini esirgemeyen, bilgi ve önerilerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Taner ALATAŞ'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

AYKUT FATİH KORAL

ELAZIĞ-2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIII
1.GİRİŞ.....	1
2.BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	4
2.1.Modifikasyonun Amacı.....	4
2.2. Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri.....	6
2.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	6
2.4. Modifiye Bitümlerde Aranılan Teknik Özellikler.....	9
2.5. Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimer Kullanımı ve SBS'nin Genel Özellikleri.....	11
3.ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ.....	15
3.1.Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler	15
3.1.1.Penetrasyon Deneyi	15
3.1.2.Yumuşama Noktası Deneyi	16
3.1.3.Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi	17
3.1.4.Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	20
3.1.5.Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi.....	23
3.1.6.Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi.....	26
3.1.7.Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	27

3.2.Superpave Yöntemine Göre Bağlayıcıların Performans Seviyelerinin Belirlenmesi.....	29
3.2.1.Güvenlik (Parlama Noktası) (AASHTO T248)	32
3.2.2.İşlenebilme ve Pompalanabilme.....	33
3.2.3. Yaşlanma ve Fiziksel Sertleşme	33
3.2.4. Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi)	33
3.2.5. Yorulma Çatlakları	34
3.2.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	34
3.3.Marshall Yöntemine Göre Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi.....	35
3.4.Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler.....	39
3.4.1.İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	39
3.4.2.Dinamik Sünme Deneyi.....	40
3.4.3.İndirekt Çekme Yorulma Deneyi.....	43
4.DENEY SONUÇLARI.....	45
4.1.Bağlayıcı Deney Sonuçları	45
4.2. Agrega Deney Sonuçları.....	52
4.3. Karışımların Optimum Bitüm Muhtevalarının Belirlenmesi.....	53
4.4. Karışımların İndirekt Çekme Rijitlik Modüllerinin Belirlenmesi	74
4.5.Dinamik Sünme Deney Sonuçları.....	76
4.6. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları.....	85
5. SONUÇLAR.....	90
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	96

ÖZET

Bu çalışmada, Superpave dizayn sistemine göre aynı performans seviyesine ait bağlayıcılarla optimum bitüm içeriklerinde hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların indirekt çekme rijitlik modülleri, kalıcı deformasyona karşı dayanımları ve yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca SBS ile bitüm modifikasyonunun karışımların mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan bütün karışımların hacimsel özellikleri ve Marshall Stabilité değerleri karşılaştırılmıştır. Dinamik süne ve indirekt çekme yorulma deneyleri üç farklı yük tekrar periyodunda uygulanmıştır. Bağlayıcı deneyleri sonucunda, B 70/100 bitümü ile aynı performans seviyesini sağlayan en uygun SBS içeriğinin B160/220 bitümü + %3 SBS olduğu belirlenmiştir. Bütün deney sonuçlarından B160/220 bitümü ile birlikte, bitümün ağırlığının %3'ü kadar SBS kullanımı ile karışımların özelliklerinin önemli derecede iyileştirildiği, en yüksek performansa B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük performansa ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Superpave sistemine göre aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımların benzer davranış sergilemesi beklenmesine rağmen rijitliklerinin, kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve yorulma ömürlerinin önemli oranda farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, Superpave, Performans seviyesi, Yorulma, Kalıcı deformasyon

SUMMARY

In this study, the volumetric properties, Marshall stabilities, the indirect tensile stiffness moduli, and the fatigue and permanent deformation strengths of hot mix asphalts prepared with the same performance grade binders in accordance with Superpave method at optimum binder contents were comparatively investigated. In addition, the effect of bitumen modification using SBS on the mechanical characteristics of the mixtures was evaluated. Dynamic creep and indirect tensile fatigue tests were conducted at three different loading periods. As the binder tests, it was determined that the modified bitumen obtained by adding of 3% SBS by weight into the B160/220 binder yielded the same level of performance with the B70/100 bitumen. It was also found that using 3% SBS by weight for the purpose of bitumen modification enhanced the desired properties of the mixture to a significant degree. It was observed that the best performance belonged to the mixtures containing B70/100 bitumen, while the worst performance was found for the mixtures made from B160/220 bitumen. Additionally, although the mixtures prepared by the same performance grade binders in accordance with the Superpave system were expected to behave similarly, it was found that they differed considerably with respect to their stiffness, tensile strength and strength against permanent deformation.

Keywords: Hot mix asphalt, Superpave, Performance grade, Fatigue, Permanent deformation

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı	4
Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı	5
Şekil 2.3. SBS türü polimerlerin yapısı	11
Şekil 2.4. SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman.....	13
Şekil 3.1. Penetrasyon deney aleti	16
Şekil 3.2. Yumuşama noktası deney aleti	16
Şekil 3.3. Dinamik kesme reometresi deney aleti	17
Şekil 3.4. Dinamik kesme reometresi (DSR) çalışma şekli	18
Şekil 3.5. DSR asfalt numunesinin taşmış (a), düzeltilmiş (b) ve deneye hazır (c) şekli	19
Şekil 3.6. Dönel viskozimetre deney aleti.....	21
Şekil 3.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması.....	21
Şekil 3.8. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi	22
Şekil 3.9. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti.....	24
Şekil 3.10. Dönel ince film halinde ısıtma deney aletine şişelerin yerleştirilmesi.....	24
Şekil 3.11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyinin yapılışı	25
Şekil 3.12. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi öncesi ve sonrasında şişelerin görünümü	25
Şekil 3.13. PAV deney aleti	27
Şekil 3.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti	28
Şekil 3.15. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması	28
Şekil 3.16. Sünme oranının belirlenmesi	29
Şekil 3.17. Superpave bağlayıcı şartnamesi gerekleri	32
Şekil 3.18. Karıştırıcı	35
Şekil 3.19. Marshall tokmağı	36

Şekil 3.20. Marshall stabilite ve akma aleti	38
Şekil 3.21. Temsili marshall karışım dizayn grafikleri.....	38
Şekil 3.22. İndirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği.	40
Şekil 3.23. Yük tekrar sayısı-Şekil değiştirme ilişkisi.....	41
Şekil 3.24 Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi.	41
Şekil 3.25. Dinamik sünme deney düzeneği.	42
Şekil 3.26. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği.....	44
Şekil 4.1. Modifiye bağlayıcı hazırlama aparatı.....	47
Şekil 4.2. $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi	48
Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları.....	51
Şekil 4.4. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi.....	55
Şekil 4.5. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi.....	55
Şekil 4.6. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi.....	56
Şekil 4.7. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi	56
Şekil 4.8. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi	57
Şekil 4.9. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi.....	60
Şekil 4.10. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi.....	60
Şekil 4.11. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi.....	61
Şekil 4.12. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi	61
Şekil 4.13. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi.....	62
Şekil 4.14. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi	65
Şekil 4.15. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi	65
Şekil 4.16. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi	66
Şekil 4.17. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi	66

Şekil 4.18. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi	67
Şekil 4.19. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların optimum bitüm içerikleri	69
Şekil 4.20. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlıkları	70
Şekil 4.21. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların boşluk oranları.....	70
Şekil 4.22. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların asfaltla dolu boşluk oranları	71
Şekil 4.23. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların agregalar arası boşluk oranları	71
Şekil 4.24. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların stabilite değerleri	72
Şekil 4.25. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların akma değerleri	72
Şekil 4.26. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların marshall oranı değerleri	73
Şekil 4.27. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların 20°C sıcaklıktaki ITSM değerleri..	75
Şekil 4.28. 1500 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	77
Şekil 4.29. 2000 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	77
Şekil 4.30. 2500 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi.....	78
Şekil 4.31. B 70/100 ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi.....	79
Şekil 4.32. B 160/220 ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi.....	79
Şekil 4.33. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi	80
Şekil 4.34. 1500 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	81
Şekil 4.35. 2000 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	81
Şekil 4.36. 2500 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	82
Şekil 4.37. 1500 ms yük periyodunda 2000 yük tekrardan sonra sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi	82
Şekil 4.38. B 70/100 ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi.....	83
Şekil 4.39. B 160/220 ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi.....	84

Şekil 4.40. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi	84
Şekil 4.41. 1500 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	86
Şekil 4.42. 2000 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	86
Şekil 4.43. 2500 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	87
Şekil 4.44. B 70/100 ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi	88
Şekil 4.45. B 160/220 ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi	88
Şekil 4.46. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi	89

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	7
Tablo 2.2. Bitüm modifikasyon tipleri	8
Tablo 2.3. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladığı faydalar	9
Tablo 2.4. KGM modifiye bitüm şartname limitleri	10
Tablo 2.5. KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri.....	14
Tablo 3.1. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri.....	19
Tablo 3.2. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları.....	26
Tablo 3.3. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi	30
Tablo 3.3. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi (Devamı)	31
Tablo 4.1. Saf bağlayıcıların deney sonuçları.....	46
Tablo 4.2. DSR deney sonuçları.	49
Table 4.3. BBR deney sonuçları	50
Tablo 4.4. Dönel viskozite deney sonuçları.....	52
Tablo 4.5. Agreganın fiziksel özellikleri.....	52
Tablo 4.6. Agrega gradasyonu	53
Tablo 4.7. B 70/100 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	54
Tablo 4.8. B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler	57
Tablo 4.9. B 70/100 bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar	58
Tablo 4.10. B 160/220 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar	59
Tablo 4.11. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler	62
Tablo 4.12. B 160/220 bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar.....	63

Tablo 4.13. B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar.....	64
Tablo 4.14. B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler.....	67
Tablo 4.15. B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar.....	68
Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerden elde edilen değerler.....	69
Tablo 4.17. Karışımların ITSM deney sonuçları	75

SEMBOLLER LİSTESİ

BSK	:Bitümlü sıcak karışım
SBS	:Stiren - Butadiyen - Stiren
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
DMA	:Dinamik Mekanik Analizler
PG	:Performans seviyesi
KGM	:Karayolları genel müdürlüğü
PMB	:Polimer modifiye bitüm
DSR	:Dinamik kesme reometresi
RV	:Dönel viskozimetre
RTFOT	:Dönel ince film halinde ısıtma deneyi
TS EN	:Türk Standartları – Euro Norm
PAV	:Basınçlı yaşlandırma kaybı
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
BBR	:Kiriş Eğme Reometresi
ITSM	:İndirek çekme rijitlik modülü
AC	:Asfalt Çimentosu
PI	:Penetrasyon indeksi
OBİ	:Optimum bitüm içeriği

1. GİRİŞ

Ulaştırma canlıların veya eşyaların bir yerden başka bir yere nakledilmesine denilmektedir. Bir ülkenin kalkınmasında önemli bir yere sahip olan ulaştırma sistemleri karayolu, demiryolu, havayolu, deniz ulaşımı ve boru hatları olmak üzere beş dala ayrılmaktadır.[1] Ülkemizde ekonomik kalkınmanın ve refahın gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının, ulaştırma sektörü içindeki payı giderek artan bir eğilim göstermektedir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi ile insanların güvenli ve konforlu sürüş talebi de artmıştır. Bu talep doğrultusunda geliştirilen esnek üstyapılar; alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. [2]

Taşıt lastikleri ile temas eden ve karayolu üstyapısının en pahalı kısmı olan kaplama tabakaları sathi kaplama, road-mix, bitümlü sıcak karışım gibi farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bu yöntemler içerisinde en yüksek dayanıma sahip olan bitümlü sıcak karışımlar (BSK), temel olarak bitüm ve agrega olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. BSK'larda kohezyon, bitümlü bağlayıcı tarafından karşılanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar, viskoelastik ve termoplastik davranış sergilemektedir. Viskoelastik özelliğinden dolayı bitümlü malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik özellik nedeniyle malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Başta kırılma ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımlarında viskoelastik ve termoplastik özellik göstermesine sebep olmaktadır [3].

Kalıcı deformasyon (tekerlek izi oluşumu), çatlama (termal ya da yorulma), nem hasarı esnek kaplamalarda en fazla karşılaşılan bozulma çeşitleridir. Kalıcı deformasyon, yola etkiyen yükün oluşturduğu çok küçük deformasyonların birikerek kaplama yüzeyini bozması sonucu oluşmaktadır. Sıcaklığın artışı bu bozulmayı hızlandırmaktadır. SBS'in yapısında var olan yüksek elastiklik ve artan viskozite kalıcı deformasyonu önemli ölçüde geciktirmektedir. Sıcaklık düşüşü ile bitüm gevrek bir yapı almaktadır. Mevsimsel değişikliklerle artan gerilmeler termal çatlaklara neden olmaktadır.

Gece-gündüz sıcaklık farklarından da beslenen termal çatlama, bitümün sertleşmesi ile ilgilidir. Sıcak bölgelerde bile termal çatlama görülmesinin nedeni bu bölgelerde sert bitüm kullanılmasıdır[4].

Çatlak oluşumu ve bu çatlakların büyümesi sonucu esnek kaplamalarda büyük sorunlar meydana gelmektedir. Başlangıçta oluşan mikro çatlaklar kaplamanın ısınması ile eski halini alsa da eğer bu çatlakları hapseden kuvvetli bir bitüm yapısı bulunmuyor ise oluşan bu mikro çatlaklar büyümekte ve makro çatlaklara dönüşmektedir. Termal çatlama mekanizması yorulma çatlağı için de geçerlidir. Sayısız küçük bozulmalarla oluşan mikro çatlaklar daha sonra yolun yüzeyine doğru ilerleyen makro çatlaklar haline gelmektedir. Oluşan çatlaklar yolun yüzeyini bozacağından kaplama yapısından içeri giren suyun özellikle soğuk iklimlerde temel tabakasına kadar tahribata yol açmasına neden olmaktadır[4].

Kaplamaların farklı performans parametrelerine olumsuz etkide bulunmadan oluşan bozulmaları engellemek ya da geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır [5,6]. Asfalt çimentosuna veya karışıma bağlayıcı katkı malzemesi olarak ya da karışıma agrega olarak ilave edilebilen birçok katkı türü bulunmaktadır [7]. Bitüm modifikasyonunda en çok polimer türü katkı maddeleri kullanılmaktadır. Polimerler; plastikler, elastomerler, fiberler ve kaplayıcılar olmak üzere 4 ana gruba ayrılabilirler. Bitümün özelliklerini iyileştirme amacını sağlayabilmek için seçilen polimer ya moleküler etkileşimle bitümde yeni bir sistem veya ikinci dereceden bir bağ oluşturmalıdır ya da bağlayıcıyla kimyasal reaksiyona girmelidir. Elastomer sınıfı stiren-butadiyen-stiren (SBS) bitüm modifikasyonunda en çok kullanılan polimer türüdür[8]. SBS modifiye bitümlü asfalt, üç boyutlu ağ yapısı ve elastik kauçuk adacıkları ile mikro çatlakları hapsetmekte ve büyüüp yayılmasını önlemektedir. Özellikle ağır trafik yükü ve sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde, SBS'li modifiye bitüm kullanılması yaygın bir uygulama çeşididir. SBS, üstün adezyon, kohezyon ve elastik özelliklerinden dolayı sürtünmelerden kaynaklanan soyulma ve agrega kaybına karşı da dayanımı arttırmaktadır. [4].

Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda SBS kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona [9,10], yorulmaya [11] ve nem hasarına [12,13] karşı dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

SBS ve düşük yoğunluklu polietilen'in (LDPE) bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansı üzerindeki etkileri incelenmiş deney sonuçlarından her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir. [4,14] Stiren-Bütadiyen-Stiren içeren modifiye bitümlerin düşük sıcaklık özellikleri geleneksel metotlar, dinamik mekanik analizler (DMA) ve kırılgan eğme reometresi kullanarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan her üç yöntemde de SBS'in bağlayıcı parametrelerini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. [4,15] Ayrıca SBS katkı maddesinin bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulanan deneyler sonucu SBS'in bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir. [4,16]

Kaplama yapısının servis ömrü boyunca hizmet verebilmesi, kaplama tabakasını laboratuvarda uygun şekilde tasarlamak ile mümkündür. Uygulama bölgesi iklim ve coğrafi şartları dikkate alınarak bağlayıcı ve kaplama tasarımı yapmak, böylece kaplamanın rehabilitasyon ve yeniden yapım ihtiyaçlarını geciktirmek amacıyla Superpave (Superior Performance Asphalt Pavement) metodu geliştirilmiştir [17]. Bu yöntemde, standart bağlayıcı deneylerinin yerine bağlayıcı performans deneyleri kullanılmaktadır. Superpave bağlayıcı deney sonuçlarına göre bağlayıcıların performans seviyeleri (PG) belirlenmektedir. Bu sınıflandırma; kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük ısı çatlağı parametreleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Dolayısıyla aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımların benzer kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük ısı çatlağı performansı göstermesi beklenmektedir. Fakat Superpave bağlayıcı şartnamesinin özellikle modifiye bağlayıcılar için uygun olmadığı belirtilmiştir [17,18].

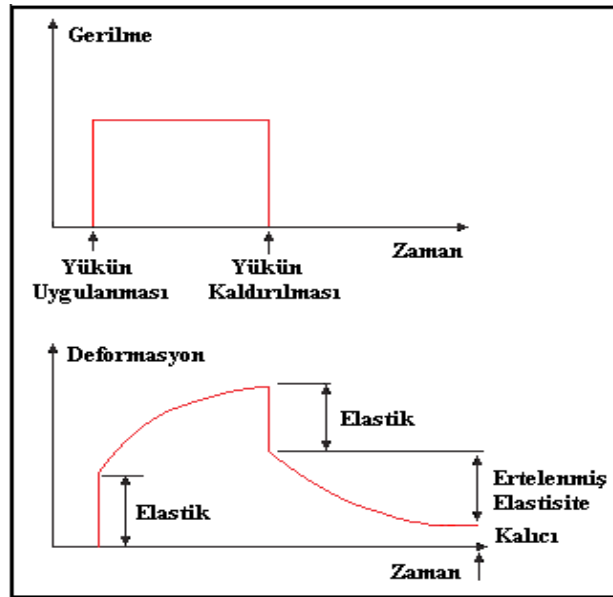
Superpave şartnamesi ve katkı maddesi olarak SBS kullanımı üzerine bir çok çalışma olmasına rağmen aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ların performanslarının kıyaslanması üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada bu konuda az sayıda bulunan çalışmalardan farklı olarak indirekt çekme rijitlik modülü, dinamik sünme ve indirekt çekme yorulma deneyleri ile aynı performans seviyelerine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımların performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca dinamik sünme ve indirekt çekme yorulma deneyleri üç farklı yük tekrar periyodunda uygulanarak yük periyodunun BSK'ların yorulma ve kalıcı deformasyona etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

2.1. Modifikasyonun Amacı

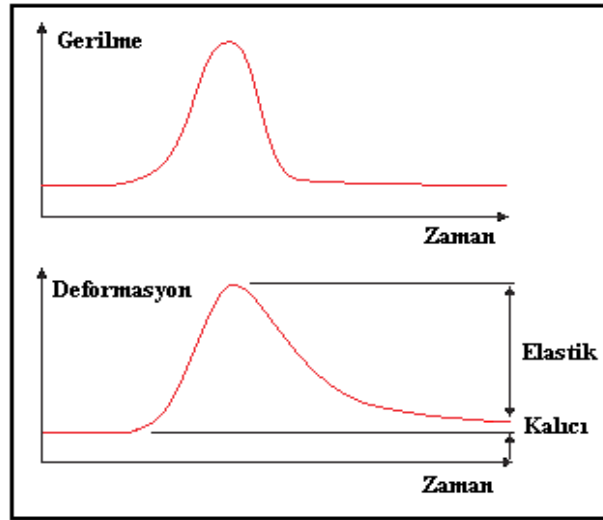
Bitüm başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayarak, asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Genel olarak, asfalt kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 2.1. ve Şekil 2.2. esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir [4,19].

Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılınca kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin visko-elastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zamanla 'ertelenmiş elastisite' adı verilen bir kısım geri dönüşüm daha meydana gelmektedir. Sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı [19].

Şekil 2.2.'de, bitümlü sıcak karışımların (BSK) hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekrarı sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.



Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı [19].

Bitüm modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya BSK'nın farklı sıcaklıklardaki özelliklerine aksi tesirde bulunmadan, yüksek sıcaklık değerlerinde kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımı arttırmaktır. Bunun için birinci yol, bitüm içerisindeki toplam viskoz öge oranını azaltmak amacıyla elastik ögelerin oranını arttırmak, ikinci yol ise BSK'nın toplam visko-elastik deformasyonunu azaltmak amacıyla bitümü sertleştirmektir. Bitüm bünyesindeki elastik öge oranının yükseltilmesi, çekme deformasyonu bakımından önemli olan kaplama esnekliğinde artış sağlamaktadır. Bitüm sertliğinin artırılması, aynı zamanda BSK'nın da sertliğinin artmasını sağlamaktadır. Bu sayede kaplama yapısı dayanımında, malzemelerin yük dağıtma yeteneğinde ve kaplamadan hedeflenen servis ömründe artış elde edilebilmektedir.

Aynı etki kaplama tabakaları kalınlıklarının arttırılmasıyla da elde edilebilmektedir. Fakat bu yöntem ilk inşaat masrafının yüksek olmasına neden olmaktadır. [4,19].

2.2. Katkı Maddelerinin Kullanım Yöntemleri

Genel olarak iki türlü modifikasyon işlemi yapılabilmektedir. Bunlar;

- 1- Katkı maddesi bitüme katılarak, 'modifiye bitüm' elde edilmesi.
- 2- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan karışıma katılarak, 'modifiye karışım' elde edilmesi.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm üzerinde çeşitli standart test yöntemleri uygulayarak bağlayıcı özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilmesi mümkündür. Bu sayede, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır [20].

Karışımın modifikasyonunda ise katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma gibi sorunlarla karşılaşmamaktadır. Ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü alarak özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılamamaktadır.

Bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede yapılabilmektedir. Karışıma yönelik deneylerde, daha uzun sürelerle, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı deney ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Hazırlanan bağlayıcının kontrol edilebilmesi nedeniyle bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi kullanım açısından daha ön plana çıkmaktadır [20].

2.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 2.1.'de verilmiştir [20].

Tablo 2.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [20].

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

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırmada yapılmaktadır. Böyle bir sınıflandırma Tablo 2.2.'de verilmiştir [20].

Tablo 2.2. Bitüm modifikasyon tipleri [20].

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

Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddelerinin etkileri Tablo 2.3.'te gösterilmiştir [19].

Tablo 2.3. Farklı tipteki modifiyerlerin sağladığı faydalar [19].

Modifiyer	Kalıcı Deformasyon	Termal Çatlama	Yorulma Çatlağı	Nem Hasarı	Yaşlanma
Elastomerler	+	+	+		+
Plastomerler	+				
İşlenmiş Kauçuk		+	+		
Siyah Karbon	+				+
Kireç					+
Sülfür	+				
Kimyasal Modifiyerler	+				
Antioksidanlar					+
Hidrate Kireç				+	+

2.4. Modifiye Bitümlerde Aranılan Teknik Özellikler

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kaplama performansını arttırıp yapım ve bakım masraflarını azaltmak amacıyla modifiye bitümler kullanılmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen tekerlek izi ve çatlak şeklindeki bozulmaları geciktirmek ve kaymaya karşı direnci arttırarak trafik güvenliğini sağlamak amacıyla, 'Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi'ni hazırlamıştır. KGM tarafından belirtilen Modifiye Bitüm Teknik Şartname Limitleri Tablo 2.4.'te verilmiştir [21].

Tablo 2.4. KGM modifiye bitüm şartname limitleri [21].

Sıra No	DENEY ADI	STANDARDI	BİRİMİ	PMB 64-28	PMB 70-16	PMB 70-22	PMB 70-28	PMB 76-16	PMB 76-22	PMB 76-28	PMB 82-16
1	PENETRASYON (25°C,100g,5sn.)	TS EN 1426	0,1mm	50-90	30-70	30-90	30-90	20-60	20-70	20-70	10-50
2	YUMUŞAMA NOKTASI min.	TS EN 1427	°C	52	62	62	62	67	67	67	72
3	KUVVET ÖLÇÜMLÜ DÜKTİLİTE ^a (25°C'de, 5cm/dk) min.	TS EN 13587	J	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
4	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C) min.	TS EN 13398	%	80	60	70	80	60	70	80	60
5	PARLAMA NOKTASI min.	TS EN ISO 2592	°C	220	220	220	220	220	220	220	220
6	ÖZGÜL AĞIRLIK	TS EN 15326	g/cm ³	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1
7	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^b										
7,1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI maks.	TS EN 13399	°C	5	5	5	5	5	5	5	5
7,2	PENETRASYON FARKI maks.		0,1mm	12	12	12	12	9	9	9	9
8	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >1kPa) Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
9	DÖNMELİ İNCE FİLM ETÜVÜ DENEYİ ^c	TS EN 12607-1									
9,1	KÜTLE KAYBI		%	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,5
9,2	YUMUŞAMA NOKTASI min.	TS EN 1427	°C	50	60	60	60	65	65	65	70
9,3	Yumuşama Noktasındaki Değişiklik										
	artma maks.		°C	8	8	8	8	8	8	8	8
	azalma maks.		°C	5	5	5	5	5	5	5	2
9,4	KALICI PENETRASYON min.	TS EN 1426	%	50	50	50	50	45	45	45	40
9,5	DİNAMİK KESME REOMETRESİ (DSR) (G*/sinδ >2,2kPa) Yenilme Sıcaklığı min.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	64	70	70	70	76	76	76	82
10	RTFOT+PAV İle Yaşlandırılmış Modifiye Bitüme Yapılan Deneyler	TS EN 14769 AASHTO R28									
10,1	DSR (G*sinδ <5000kPa) Yenilme Sıcaklığı maks.	TS EN 14770 AASHTO T315	°C	22	31	28	25	34	31	28	37
10,2	KIRIŞ EĞME REOMETRESİ (BBR) Eğilme-Sünme Sertliği (S≤300 MPa, m≥0,300) Sıcaklık min.	TS EN 14771 AASHTO T313 ASTM D6648	°C	-18	-6	-12	-18	-6	-12	-18	-6

^a Bu koşul gerekli olduğunda aranacaktır.

^b Modifiye bitüm depolanmadan kullanılacaksa, depolama stabilitesi deneyinin yapılması zorunlu değildir.

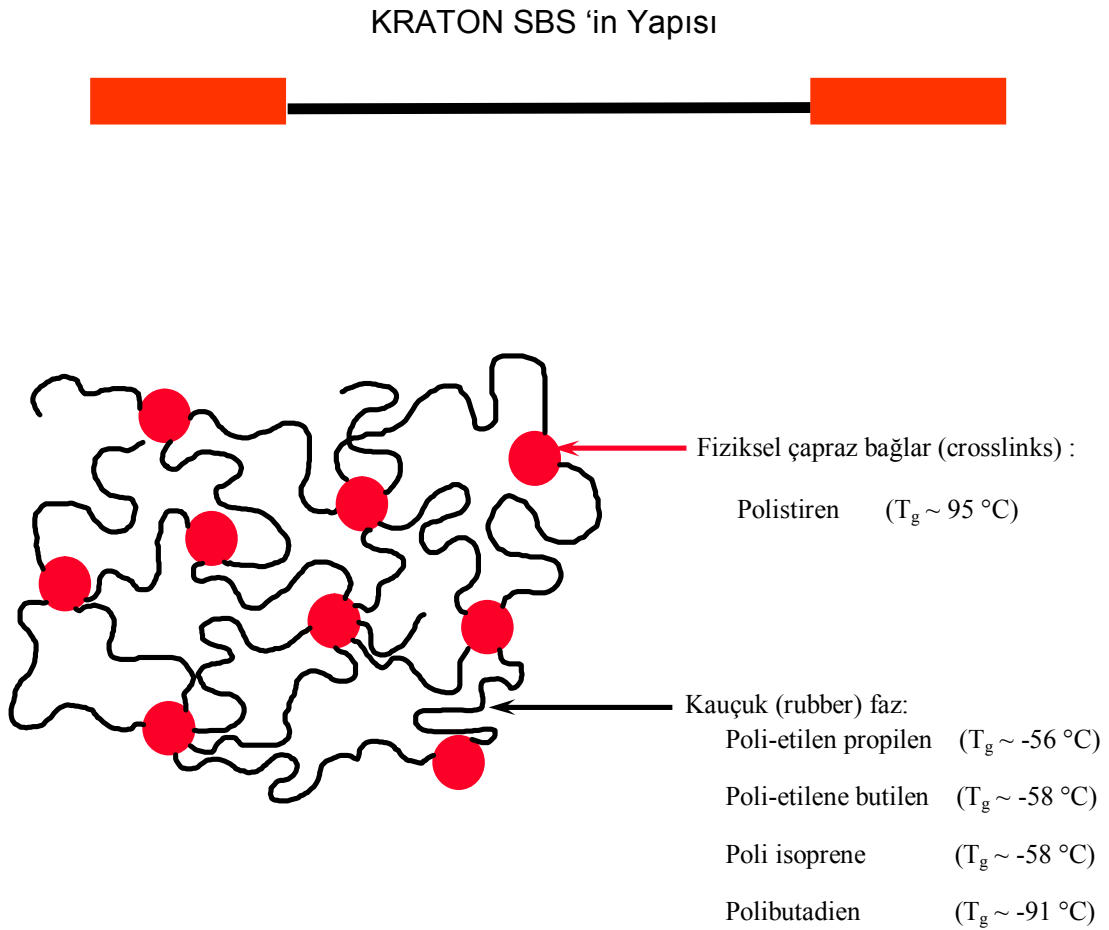
^c Yüksek viskoziteli modifiye bitümlerde RTFO deneyi 163° C 'den daha yüksek (180° C geçmeyen) sıcaklıkta yapılabilecektir. TFO deneyi idarenin izni ile RTFO yerine kullanılabilir.

NOT: 1,2,4,9.1,9.2 ve 9.4 sıra nolu deneylerin şantiyede yapılması zorunludur.

2.5. Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimer Kullanımı ve SBS'nin Genel Özellikleri

SBS, Stiren-Butadien-Stiren Blok Kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır. Shell firması tarafından 1960'larda yapılan petrokimya türevi bu sentetik kauçuk ailesi, su yalıtım membranı, polimer ve bitüm modifikasyonu, ayakkabı tabanı, hot-melt yapıştırıcılar gibi endüstriyel birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. SBS, esnek kaplamalarda 1985 yılından beri kullanılmaktadır. 16 yıllık süre içerisinde kullanımdaki büyük artış sonucu 2001 yılında yol sektöründe 125.000 ton SBS tüketilmiştir.

Kraton D 1101 adlı SBS 'in yapısı aşağıdaki gibi lineer bir yapıya sahiptir (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. SBS türü polimerlerin yapısı

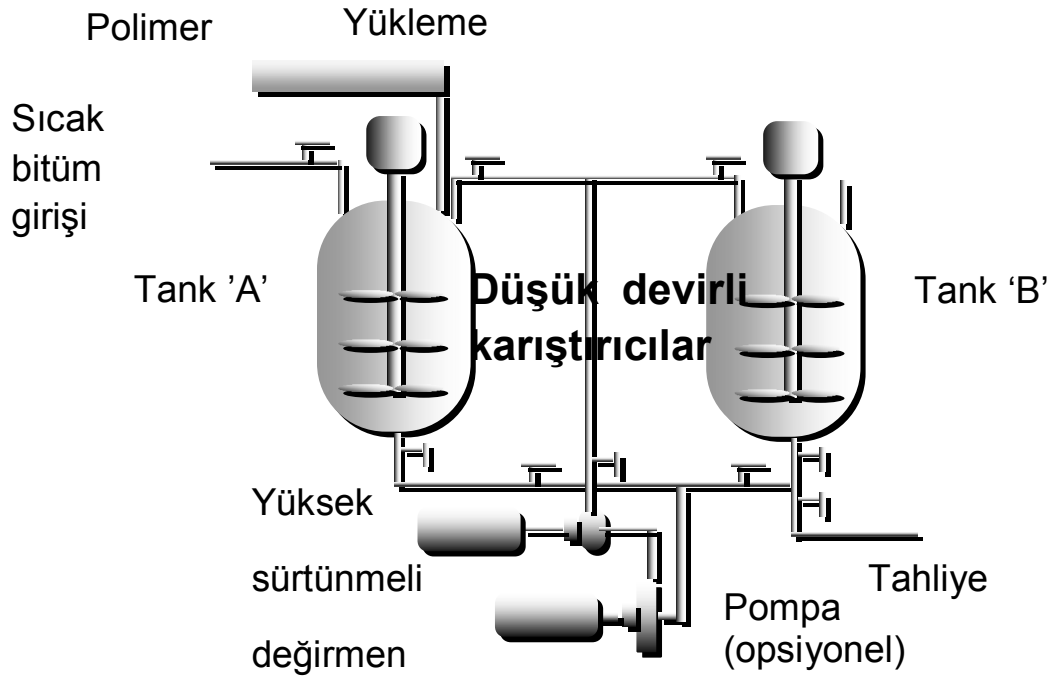
SBS'in yapısı incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilmektedir:

- Polibütadien köprüleri elastiklik ve esneklik sağlar.
- Polistiren adacıkları fiziksel çapraz bağlar oluşturarak sağlamlık verir.
- -40°C ile +80°C arasında özelliğini korur.
- 100°C nin üstünde polimer akıcı hale gelir soğuyunca üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşur. Madde termoplastik elastomer olduğu için bu ısıtma ve soğumalarda özelliğinden hiçbir şey kaybetmez.

SBS'in bitüme ne oranda katılacağı tamamen uygulama bölgesi iklim ve trafik şartlarına ve kullanılan bitümün özelliklerine bağlıdır. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır. En fazla oranda ise %7'ye kadar SBS kullanıldığı olmuştur.

Farklı SBS çeşitlerine uygun olarak yüksek sürtünme güçlü veya düşük devirli karıştırıcı ekipmanlar kullanılarak polimer modifiye bitüm (PMB) üretmek mümkündür (Şekil 2.4.). Tamamen çözünme olduktan sonra karışımın bir süre olgunlaşması için beklenmesi tavsiye edilmektedir. Böylece SBS'in bitümün tüm uygun bileşenlerini bünyesine alması sağlanmaktadır.

Hazırlanan PMB agregayla karıştırıldıktan sonra serme ve sıkıştırması mevcut ekipmanlarla yapılır. Bu işlemler sırasında dikkat edilmesi gereken tek nokta serme sıkıştırma sıcaklığının her bir SBS yüzdesi için 2,5°C artırılmasıdır. Serme ve sıkıştırma işlemleri sırasında soğumaya izin vermeden işlemin bitirilmesine dikkat edilmelidir. Aksi takdirde homojen bir serme yapılamama riski bulunmaktadır.



Şekil 2.4. SBS modifikasyonunda kullanılan ekipman

Shell firması tarafından üretilen KRATON SBS tipleri aşağıda belirtilmiştir.

- D 1101 linear
- D 1184 radial
- D 1186 radial
- D 1116 radial
- D 1192 radial
- D 1118 di-block

KRATON D 1101 yol uygulamalarında en fazla kullanılan üründür. KRATON D 1192 polimerinin stabilite ve yaşlanma direnci açısından özellikle modifiye bitüm emülsiyonu uygulamalarında daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Shell firması tarafından üretilen KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri Tablo 2.5.'te verilmiştir.

Tablo 2.5. KRATON D 1101 ve D 1192 SBS türlerinin özellikleri

Özellik	D 1101	D 1192
Çekme Dayanımı, psi ^{1,2}	4600	-
%300 modülü, psi ^{1,2}	400	-
Uzama, % ^{1,2}	880	-
Kopma uzaması, % ^{1,2}	10	-
Sertlik, (10 sn) ³	69	66
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	0,94	0,94
Brookfield viskozitesi, cP, 25°C ⁴	4000	1500
Yumuşama indeksi, 200°C/5 kg	< 1	< 1
Yağ içeriği, ağırlığın %'si	0	0
Stiren/Kauçuk oranı	31/69	30/70
Fiziksel yapısı	Gözenekli granül, toz	Gözenekli granül, toz
Diblok, %	16	< 1
1. ASTM D 412 yöntemi ile çekme deneyinde çekme hızı 10 in./dak. 2. Tipik özellikleri toluen solüsyonundaki film halindeki görüntüsünden elde edilmiştir. 3. Polimer özellikleri 175°C sıcaklıkta tespit edilmiştir. 4. Ağırlıkça %25 oranında toluende çözünmüş saf polimer solüsyonu denenmiştir.		

Üç tip Kraton D 1101 SBS polimer bulunmaktadır. Bunlar;

- Kraton D 1101 CS → Gözenekli granül görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 AF → Patlamış mısır görünümünde olanlar
- Kraton D 1101 CM → Toz halinde olanlardır.

Bütün bu ürünlerde tanelerin birbirine yapışmasını önlemek için amorf silika kullanılmıştır. [4]

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

3.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Bağlayıcıların kullanılabilirliğini tespit edebilmek amacıyla kullanılan deney yöntemlerinden penetrasyon; bağlayıcı kıvamlarının tespitinde, yumuşama noktası; yüksek sıcaklık dayanımlarının tespitinde, dinamik kesme reometresi; yorulma ve tekerlek izine karşı dayanımın tespitinde, dönel viskozimetre; yüksek sıcaklıktaki bağlayıcının işlenebilirliğinin tespitinde, dönel ince film halinde ısıtma; bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen kısa süreli yaşlanmada, basınçlı yaşlandırma kabı; bağlayıcıların kaplama ömrü boyunca maruz kalacağı uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemede, kiriş eğme reometresi; düşük servis sıcaklıklarındaki bağlayıcıların sertliğinin ve termal çatlama potansiyelinin tespitinde kullanılmaktadır.

3.1.1. Penetrasyon Deneyi

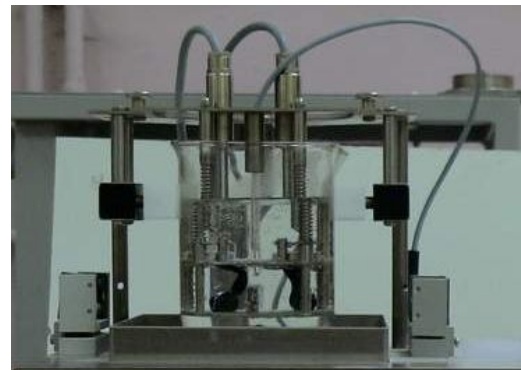
Bitümün sertliğini veya kıvamını belirlemek amacıyla penetrasyon deneyi yapılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde yol aldığı düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır [22]. Penetrasyonun birimi 10^{-1} mm.dir. Penetrasyonu yüksek bitümlerin kıvamı düşük, penetrasyonu düşük bitümlerin kıvamı yüksektir. Penetrasyon deney aleti Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Penetrasyon deney aleti

3.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrede okunan değerdir [23]. Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Yumuşama noktası deney aleti

3.1.3. Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik kesme reometresi deneyi ile bağlayıcının hem yorulmaya hem de tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımı tespit edilebilmektedir. Orijinal bağlayıcılar ve RTFOT deneyinden elde edilen numuneler üzerinde uygulanan DSR deneyi, bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yorulmaya karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla da PAV deneyinden elde edilen bağlayıcılar kullanılmaktadır.

Geleneksel deney yöntemlerinde bağlayıcı özelliklerini belirlemek için farklı deney yöntemleri bulunmasına rağmen, bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik davranışının bir arada dikkate alındığı herhangi bir deney bulunmamaktadır. DSR aleti, bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla bu iki faktör göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bağlayıcının davranışı yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olduğundan, SHRP tarafından geliştirilen DSR deneyi ile bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (kompleks kayma modülü, faz açısı vb.) karakterize edilmektedir [1,24]. Dinamik kesme reometresi deney aleti şekil 3.3.'te görülmektedir.



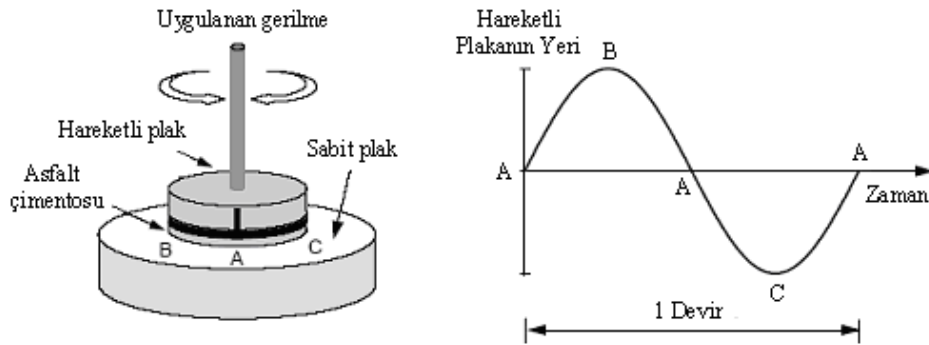
Şekil 3.3. Dinamik kesme reometresi deney aleti

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının yapımdan hemen sonra tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesini sağlamakta ve ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir.

Ayrıca, servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır [1,26].

Gerilme ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki tip dinamik kayma reometresi bulunmaktadır. Gerilme kontrollü reometreler, sinüsoidal gerilmeler uygulayarak oluşan deformasyonları belirlemektedir. Deformasyon kontrollü reometreler ise sinüsoidal deformasyonlar uygulayarak oluşan gerilmeleri belirlemektedir. Superpave bağlayıcı deneyleri gerilme kontrolü ile teste tabi tutulur [24,25].

DSR deneyinde asfalt numunesi Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi, sabit bir plaka ile sola ve sağa küçük dönme hareketleri (salınım) yapabilen bir plaka arasına sabit kalınlıkta yerleştirilerek belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya uygulanan gerilme veya deformasyon ile tabla A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra döner tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Döner tablanın bu hareketine bir devir denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir [1,24,25].



Şekil 3.4. Dinamik kesme reometresi (DSR) çalışma şekli [1,24,25].

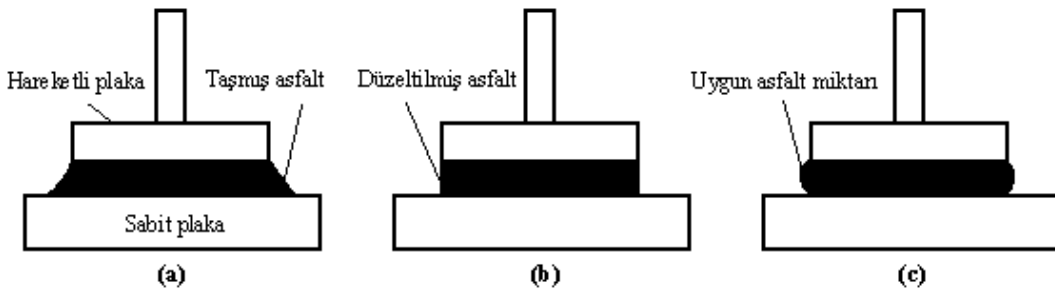
DSR deneyinde deney sıcaklık aralığı, asfalt bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46 ile 82 °C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4 ile 40 °C arasında değişmektedir. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak kayma gerilmesi veya kayma deformasyonu değeri hedef verisi olarak bilgisayara

girilmelidir [1,24,25]. Bağlayıcının yaşlanma durumuna göre bilgisayara girilen bu değerler Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri [25,26].

Bağlayıcı Çeşidi	Hedef Kayma Deformasyonu, %	Hedef Kayma Gerilmesi, kPa
İşlem görmemiş	12	0,12
RTFOT'ta yaşlandırılmış	10	0,22
PAV'da yaşlandırılmış	1	50

Deney numunesini hazırlamak için asfalt bağlayıcı 130–140 °C'de akıcı hale gelinceye kadar ısıtılır. Modifiye bağlayıcılar daha fazla sıcaklık gerektirirler ancak ısıtma sıcaklığı 163 °C'yi geçmemelidir. Asfalt numune hazırlanırken, asfalt ya doğrudan sabit plaka üzerine dökülür ya da yaygın olarak kullanılan silikon kalıp içerisine dökülerek soğutulduktan sonra plakalar arasına yerleştirilir. Her iki şekilde de asfalt numunesi yerleştirildikten sonra, üst plaka aşağı indirilerek numune sıkıştırılır ve iki plaka arasında taşan kısım temizlenir. Daha sonra, deney öncesi 50 mikron fazla bırakılan aralık indirilerek gerekli deney aralığına getirilir (Şekil 3.5.) [1,24,26].



Şekil 3.5. DSR asfalt numunesinin taşmış (a), düzeltilmiş (b) ve deneye hazır (c) şekli [1,26].

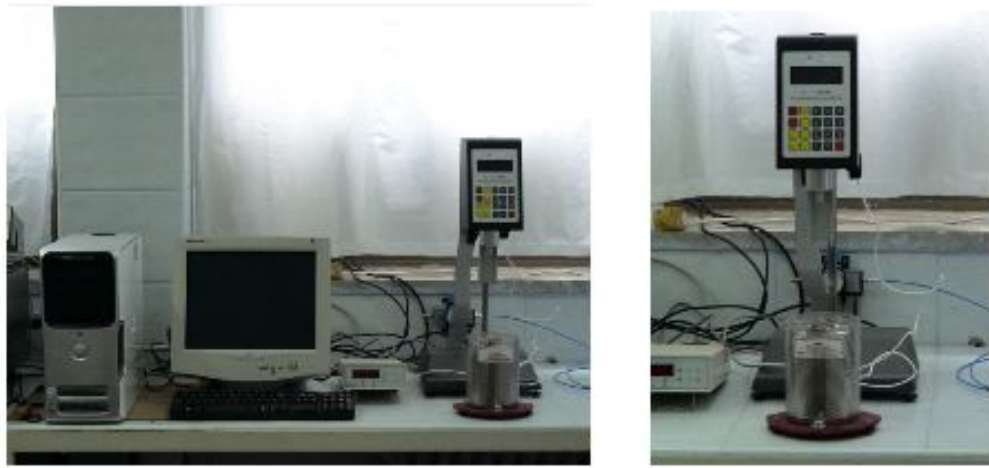
Deneye hazır hale getirilen numune hava fırını veya su banyosu yardımıyla 0,1 °C hassasiyetle deney sıcaklığına getirildiğinde bu sıcaklıkta ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilir. On dakikalık denge periyodunun sonunda Superpave şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/san frekansta gerekli gerilme veya deformasyon uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmaktadır. 10 devirlik hazırlıktan sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilir. Reometre yazılımı tarafından otomatik olarak uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri hesaplanır [1,24,25,26].

3.1.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

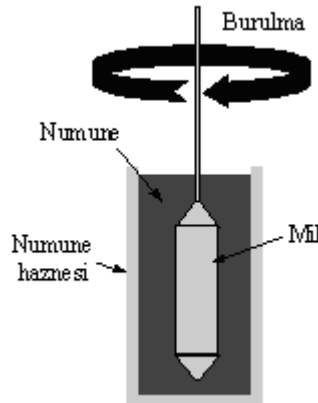
Dönel vizkozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık vizkozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değeri 3 Pa.s’u aşmamalıdır [1,28]

Dönel viskozimetre, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere başlıca iki ana üniteden oluşmaktadır. Viskozimetre; motor, mil, kontrol paneli ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Motor, milin kendi etrafında dönmelerini sağlayan burulma kuvvetini üretmektedir. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm.) hızla döndürülürken, viskozluk değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır. Şakul topuzuna benzeyen silindirik mil, viskoz haldeki bağlayıcı içerisinde dönerken dirençle karşılaşmaktadır. Deneye tabi tutulacak 30 gr kadar asfalt numunesi etüvde 150 °C’nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılan asfalt, daha önceden belirli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabının içerisine, deneyde kullanılacak silindirik milin boyutuna göre 8–11 gr arasında dökülür. İçerisinde asfalt bulunan numune kabı önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilir [1,28,29]. Deney parametreleri sisteme girildikten sonra, öncelikli olarak viskozimetrenin bağlantı noktasında bulunan vida ile silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak

viskozimetre sıfırlanır. Daha sonra, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki asfalt içerisine daldırılır [1,27] (Şekil 3.7.). Deney için, 135 °C'lık sabit bir numune sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık 30 dakika kadar beklenir. Bekleme periyodu boyunca silindirik milin dönme hızı 20 rpm olarak ayarlanır ve motor çalıştırılarak viskozite ve dönme (tork) oranı gözlemlenir. Şayet dönme oranı %2 ile %98 arasında bir değerde değilse farklı boyutlu bir silindirik mil gerekebilir. Numune sıcaklığı dengeli bir duruma geldikçe, viskozite okumaları da sabitleşmeye başlar ve birer dakika aralıklarla üç okuma yapılarak deney sonuçları kaydedilir [29].



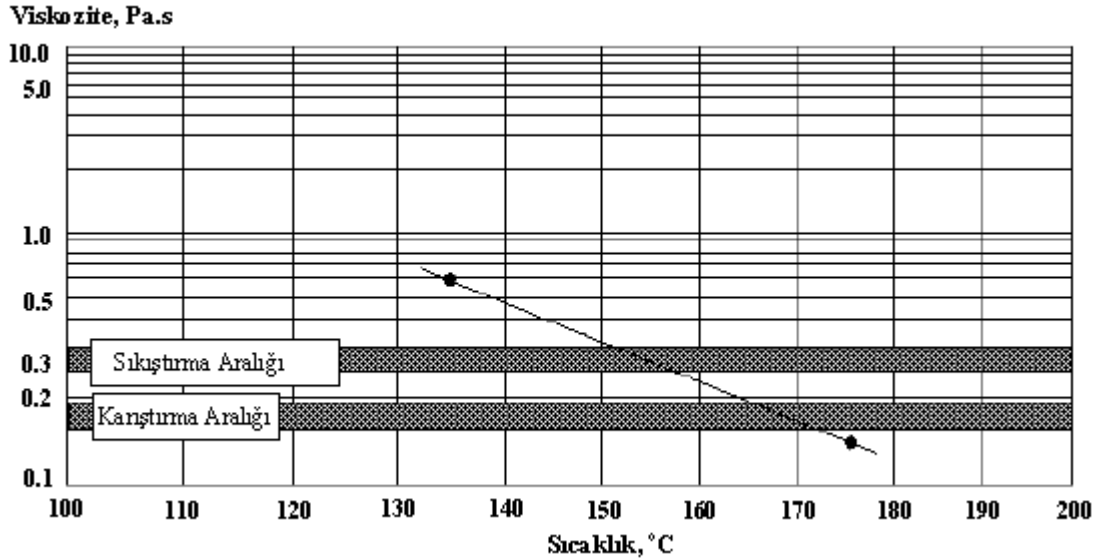
Şekil 3.6. Dönel viskozimetre deney aleti



Şekil 3.7. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması [1,27].

Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılmakta ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir [1,27,28]. Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta asfalt bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Bu burulma kuvveti, viskozimetre tarafından belirlenen bağlayıcı viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir [1,27].

Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Şekil 3.8'de tipik bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir [1,27,29].



Şekil 3.8. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi [1,27].

Karıştırma ve sıkıştırma sırasında, işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerini sağlayan sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Asfalt enstitüsü, bu amaçla ilk deneyin 135°C’de ikincisinin ise 165°C sıcaklıkta yapılması gerektiğini belirtmiştir. Başlangıçta düşük sıcaklıkta deney yapılmasının tercih edilmesinin sebebi sıcaklık kontrollü numune bölmesinde soğumaya nazaran ısınmanın daha hızlı meydana gelmesidir. Böylece deneyler daha kısa bir sürede bitirilebilmektedir. Farklı iki sıcaklıkta belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma için tavsiye edilen viskozite değerlerini sağlayacak sıcaklık aralıkları belirlenmektedir [1,27,28,29].

3.1.5. Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi

Bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen kısa süreli yaşlanma Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deney (RTFOT) yöntemiyle tespit edilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. [30]

Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuarda RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile sağlanmaktadır. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisini değerlendirilmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir. TS EN 12607-1’de belirtilen bu deney, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 3.9-10.). [30,31]



Şekil 3.9. Dönel ince film halinde ısıtma deney aleti



Şekil 3.10. Dönel ince film halinde ısıtma deney aletine şişelerin yerleştirilmesi

Deneyde, her bir şişeye 35 gram bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir (Şekil 3.11.). Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Dönel ince film etüvü ve deney öncesinde ve sonrasındaki şişelerin durumu Şekil 3.12.'de verilmiştir. [30,31]



Şekil 3.11. Dönel ince film halinde ısıtma deneyinin yapılışı



Şekil 3.12. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi öncesi ve sonrasında şişelerin görünümü

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir. Denklemden M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir [30,31].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

3.1.6. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), bağlayıcıların kaplama ömrü boyunca maruz kalacağı uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gram RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90 – 100 – 110°C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [30,32].

Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 3.2.'de verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 3.13.'te görülmektedir.

Tablo 3.2. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları [24].

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



Şekil 3.13. PAV deney aleti

RTFOT ve PAV deneyinden elde edilen numuneler Superpave deneylerinde kullanılmakta ve yaşlandırılmış bağlayıcıların performansları ve şartname kriterlerine uygunlukları tespit edilmektedir [29,30,32].

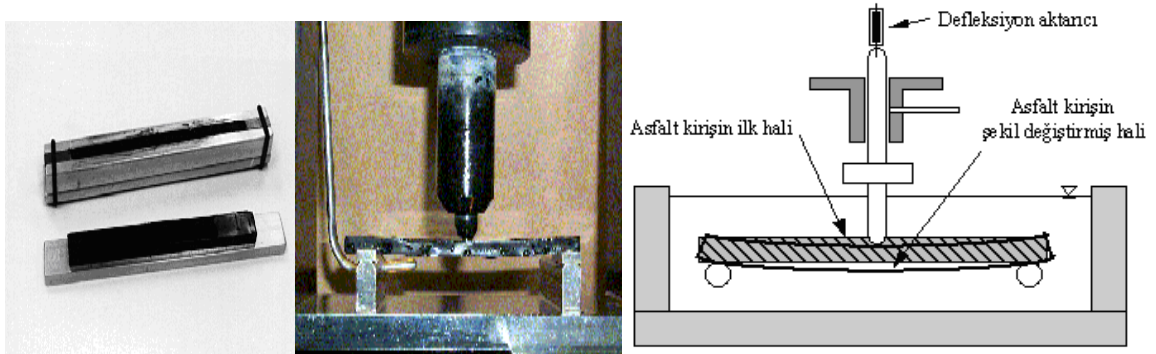
3.1.7. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Termoplastik özelliğinden dolayı bitüm, düşük sıcaklıklarda rijit (katı) özellik göstermektedir. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinin amacı, düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak belirlenememesinden dolayı belirli bir sıcaklıkta sabit yük altında bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmektir. Bu deney için PAV deneyinden elde edilen yaşlandırılmış bağlayıcılar kullanılmaktadır. Deney aleti şekil 3.14'te görülmektedir [30].



Şekil 3.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

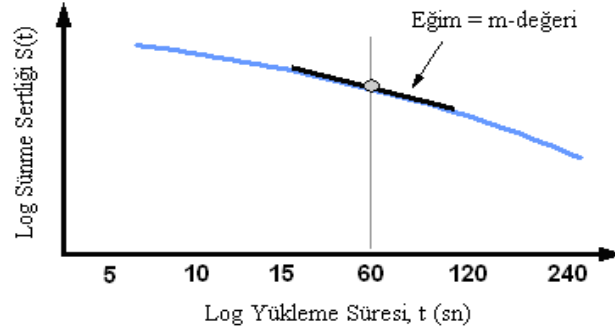
Deney boyunca asfalt kiriş bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük sıcaklık değerinde tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. boyutlarındaki kalıplar kullanılmaktadır. AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir. Kiriş eğme reometresi deney aleti şekil 3.15.'te görülmektedir [24,30,33].



Şekil 3.15. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması

Deney sonunda yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını (m-değeri) tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımın bir göstergesi iken sünme oranı (m-değeri) ise sünme sertliğindeki değişiklikler ile yükleme süresi arasındaki oranı ifade etmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik

değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 3.16). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m-değeri) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir [30,33].



Şekil 3.16. Sünme oranının belirlenmesi

3.2. Superpave Yöntemine Göre Bağlayıcıların Performans Seviyelerinin Belirlenmesi

Superpave bağlayıcı şartnamesi (Tablo 3.3), sıcak karışımlarda oluşması muhtemel olan kalıcı deformasyonlara ve yorulma ile düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bitümlü bağlayıcının özelliklerini yukarıda ifade edilen deneyler yardımıyla sınırlandırarak performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Mevcut şartnamelere göre önemli bir farkı ise, bütün performans dereceli asfaltlarda (PG) fiziksel özelliklerin sabit kalması, ancak bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıkların asfaltın kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık göstermesidir. Burada, bağlayıcı şartnamesine göre PG 52-40 olarak tanımlanan performans dereceli asfaltının, en yüksek kaplama sıcaklığının 52 °C ve en düşük kaplama sıcaklığının ise -40 °C olacağı iklim şartlarına uygun olacağını göstermektedir [1,26].

Tablo 3.3. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi [26].

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum KaplamaTasarım Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORİJİNAL BAĞLAYICI																					
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																				
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90							100					100					
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor																				
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Tablo 3.3. Superpave performans esaslı asfalt bağlayıcı şartnamesi (Devamı) [26].

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

Superpave bağlayıcı şartnamesinde gerekli olan şartname kriterleri, Şekil 3.17’de görülmektedir. Belirtilen her bir özellik aşağıda değerlendirilmiştir.

PERFORMANS SINIFI	
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	
ORJİNAL BAĞLAYICI	
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	Güvenlik
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s, Test Sıcaklığı, °C	İşlenebilirlik ve Pompalanabilirlik
Dinamik Kayma, TP5, $G^*/\sin\delta$, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s’de, Test sıcaklığı, °C	Yaşlanma (Sertleşme)
RTFOT KALINTISI	
Ağırlık Kaybı, Maksimum, % 1.00	Tekerlek İzi Şartname Gereklileri
Dinamik Kayma, TP5, $G^*/\sin\delta$, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s’de, Test sıcaklığı, °C	
PAV KALINTISI	
PAV Deney Sıcaklığı, °C	
Dinamik Kayma, TP5, $G^*/\sin\delta$, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s’de, Test sıcaklığı, °C	Yorulma Çatlak Şartname Gereklileri
Fiziksel Sertleşme, (Rapor)	
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	Düşük Sıcaklık Şartname Gereklileri
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0, Test sıcaklığı, °C	

Şekil 3.17. Superpave bağlayıcı şartnamesi gereklileri

3.2.1. Güvenlik (Parlama Noktası) (AASHTO T248)

Parlama noktası deneyi, yaşlandırılmamış bağlayıcıya uygulanan güvenlikle ilgili bir deneydir. Parlama noktası, ısınan asfalt buharının alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmaya başlamadığı en düşük sıcaklıktır ve en az 230 °C olmalıdır. Deneyin amacı, şantiyede asfaltın yanmadan hangi sıcaklığa kadar emniyetle ısıtılabilceğinin tespit edilmesidir [1,26].

3.2.2. İşlenebilme ve Pompalanabilme

Sıcak karışım tesisinde bağlayıcının işlenebilme ve pompalanabilme özellikleri viskozite deneyi ile tayin edilir. Şartnameye göre, bütün bağlayıcı sınıfları için bu değer 135 °C için en fazla 3 Pa.s (3000 cP) olmalıdır [1,26].

3.2.3. Yaşlanma ve Fiziksel Sertleşme

Şartnamede, asfaltın karıştırma ve serme sırasındaki yaşlanmasından dolayı kütlede oluşacak kayıp sınırlandırılmış ve AASHTO T240'a göre yapılan RTFOT deney sonucundaki bu kayıp en fazla % 1 tutulmuştur [1].

Ayrıca şartname, özellikle düşük sıcaklıklarda depolama ve diğer bekletme süreçlerinde asfaltta meydana gelen fiziksel sertleşme miktarının belirlenmesini ve rapor edilmesini tavsiye eder. Bunun için gerekli deney sıcaklığında 24 saat şartlandırılmış ve PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcı üzerinde BBR deneyi yapılır. Sünme sertliği (S) ve m-değerini bulmak için iki takım asfalt numune hazırlanır ve numunelerden biri gerekli deney sıcaklığına ulaşıldıktan bir saat sonra, diğeri ise 24 saat şartlandırıldıktan sonra deneye tabi tutulur. Her iki numunenin sünme sertliği ve m-değer sonuçları değerlendirilmek üzere rapor haline getirilir [1,26].

3.2.4. Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi)

Yüksek sıcaklıklarda ve sürekli tekrar eden yükler altında kaplamada oluşan kalıcı deformasyonlar asfaltın viskoz davranışının bir sonucudur. Superpave şartnamesi, kalıcı deformasyona karşı direnç ve yüksek sıcaklıklardaki bağlayıcı kıvamının ölçüsünü temsil eden " $G^*/\sin \delta$ " tekerlek izi faktörünü gerekli bir değer olarak kabul etmiştir. Burada kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) olarak tanımlanan ifadeler DSR deneyi ile belirlenmektedir. Yüksek tekerlek izi direnci için $G^*/\sin \delta$ değeri orijinal asfaltlar için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış asfaltlar için ise en az 2,20 kPa olmalıdır.

Yüksek kayma modülü ve düşük faz açısı değerleri tekerlek izi direncine karşı artışı ifade eder [1,26].

3.2.5. Yorulma Çatlakları

Bağlayıcı şartnamesinde, asfalt kaplamalarda oluşan yorulma çatlaklarının değerlendirilmesinde kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) kullanılmaktadır. Yolun hizmete açılmasından sonra normal ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşması sebebiyle şartname, deneylerde RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış asfalt numunelerin kullanılmasını gerekli görür. Yorulma çatlaklarını temsil eden “ $G^*\sin \delta$ ” faktörü, gerekli bir değer olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.30’da görüldüğü üzere bu değer en fazla 5000 kPa olmalıdır. Bu değer PAV bakiyesi asfalt bağlayıcının elastik olmasını yani yorulma direncinin yüksek olacağını ifade etmektedir. Yorulma çatlaklarına karşı büyük direnç bakımından düşük G^* ve δ değerleri tercih edilmektedir [1,26].

3.2.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklıklardan dolayı kaplama bünyesinde oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlakları temsil etmek amacıyla, asfaltın sünme sertliğinin ölçüldüğü BBR eğilme deneyi kullanılmaktadır. Şartnamede bu çatlakların oluşmaması için sünme sertliğinin (S) en fazla 300 Mpa olası istenmektedir. Bu değer yüksek ise bağlayıcı gevrek davranış göstereceğinden daha çok çatlama oluşacaktır. Bu çatlamlar, kaplamanın hizmete açılmasından bir süre sonra düşük sıcaklıklarda oluştuğundan, deneylerde RTFOT veya PAV ile yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Düşük sıcaklıklarda asfalt sertliğinin zamanla değişme oranı, m-değer yardımı ile kontrol edilir. Sıcaklık düştükçe ve termal gerilmeler devam ettikçe, asfalttaki sertlik zamanla değişeceğinden, yüksek m-değerleri tercih edilmektedir. Yüksek m-değeri, daha az sert asfalt anlamına geleceğinden kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle, bağlayıcı şartnamesi 60 sn yükleme sonunda m-değerinin en az 0,300 olması şartını getirmiştir [1,26].

3.3. Marshall Yöntemine Göre Karışımların Optimum Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Marshall karışım dizayn metodunda aşınma ve binder tabakaları için farklı gradasyon limitleri bulunmaktadır. Optimum bitüm muhtevasını tespit etmek için belirli bir yüzdeden başlayarak ardışık olarak agreganın % 0,5'i oranında artan en az 5 bitüm içeriğinde üçer numune hazırlanır. Bu yöntemde her bir numune için belirlenen gradasyona uygun olarak yaklaşık 1200 gr. agrega alınır. Hazırlanan agrega ve asfalt çimentosu, 150 – 160 °C sıcaklıkta bekletilir. Belirli bir süre bu sıcaklıkta bekletilen agrega ve AC, karıştırıcıya alınarak agrega daneleri tamamen bitümle kaplanıncaya kadar karıştırılır (Şekil 3.18). Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım kalıba doldurulur ve Marshall tokmağı yardımıyla sıkıştırılır (Şekil 3.19). Marshall tokmağında karışıma trafik seviyelerine bağlı olarak 50 veya 75 darbe uygulanır. Her iki tarafına darbe uygulanan numune soğumaya bırakılır.



Şekil 3.18. Karıştırıcı



Şekil 3.19. Marshall tokmağı

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

$$V = B - C \quad (3.2.)$$

$$D_p = A / B \quad (3.3)$$

$$D_{\text{Port}} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (3.4)$$

$$W_a = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (3.5)$$

$$W_b = \frac{M_b}{M_a + M_b} \times 100 \quad (3.6)$$

$$G_{\text{ag}} = \frac{100}{\frac{P_k}{G_k} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}} \quad (3.7)$$

$$D_T = \frac{100}{\frac{100 - W_b}{G_{ag}} + \frac{W_b}{G_b}} \quad (3.8)$$

$$V_h = \frac{D_T - D_{Port}}{D_T} \times 100 \quad (3.9)$$

$$V_b = \frac{D_{Port} \times W_b}{G_b} \quad (3.10)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (3.11)$$

$$V.M.A = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (3.12)$$

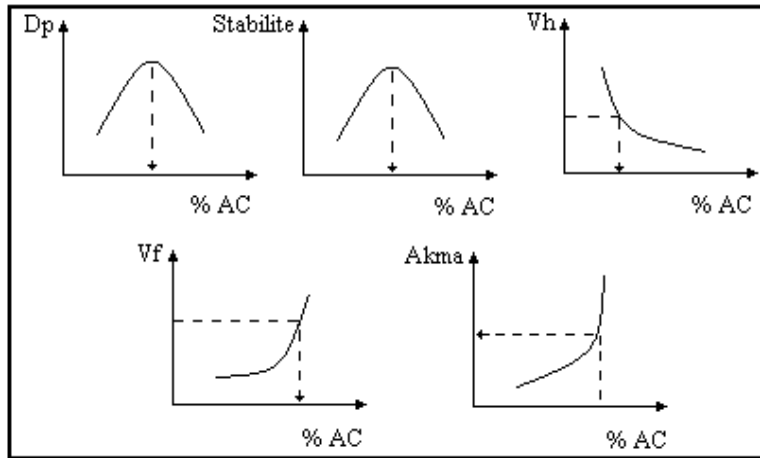
$$V_f = \frac{V_b}{V.M.A} \times 100 \quad (3.13)$$

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune 60 ± 1 °C suda 30 – 40 dakika bekletilir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilir, akma çubuğu sabitlenir ve yükleme yapılır (Şekil 3.20.). Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir. Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63.5 mm.dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin düzeltilmiş stabilite değerleri arasındaki farkın 120 kgf.den az olması durumunda üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarında 60 kgf.den daha az fark olan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak kabul alınır. Bu da sağlanmadığı takdirde deney yenilenir.



Şekil 3.20. Marshall stabilite ve akma aleti

En az beş ayrı bitüm içeriğinde ve üçer tane hazırlanan numunelerin; pratik özgül ağırlık (D_p) - % AC, stabilite - % AC, boşluk oranı (V_h) - % AC, asfaltla dolu boşluk oranı (V_f) - % AC grafikleri çizilir (Şekil 3.21.). D_p - % AC ve stabilite - % AC grafiklerinin maksimum olduğu bitüm içerikleri, V_h - % AC grafiğinden boşluk oranının % 4'e tekabül ettiği bitüm içeriği ve V_f - % AC grafiğinden asfaltla dolu boşluk oranının % 80'e tekabül ettiği bitüm içeriği toplanarak aritmetik ortalaması alınır. Bu değer optimum bitüm içeriğini vermektedir. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan üç numune denenerek bütün grafiklere uygun olup olmadığı kontrol edilir. Ayrıca kontrol numunelerinin akma değerlerinin standarda uygun olup olmadığı akma - % AC grafiğinde kontrol edilir [34].



Şekil 3.21. Temsili marshall karışım dizayn grafikleri

3.4. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

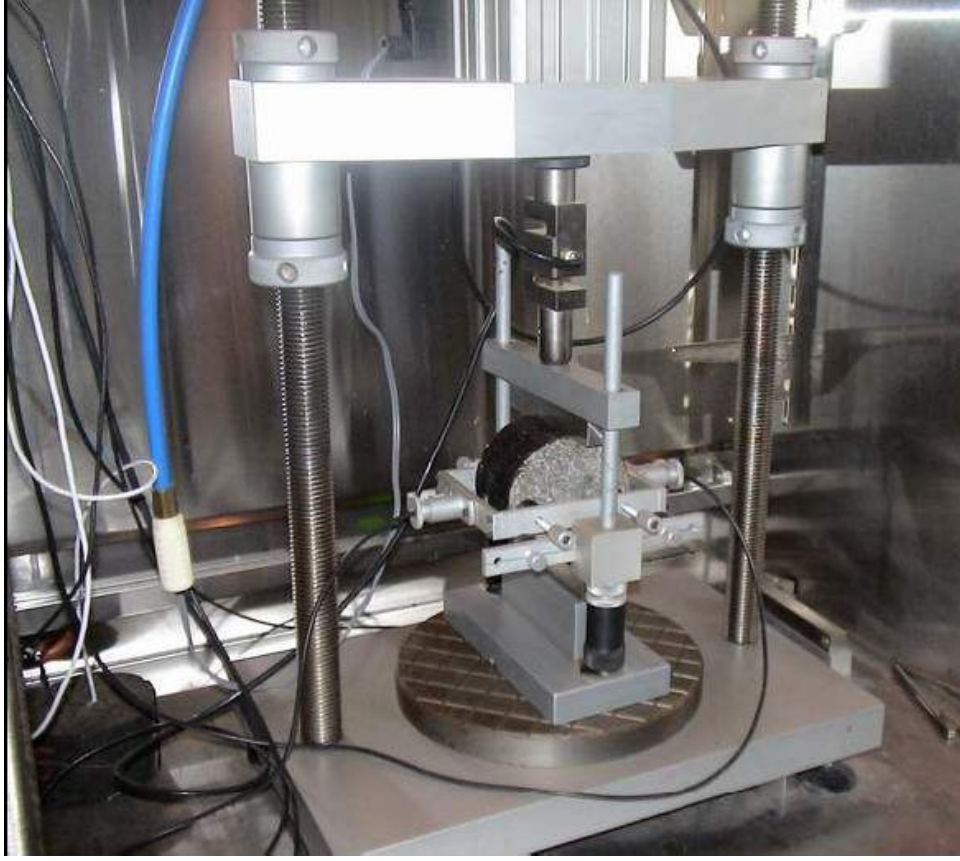
3.4.1. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirek çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir.

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Direk basınç deneyindeki asfalt karışımlarda agregalar arasındaki kenetlenme ve bağlayıcının rijitliği söz konusu olurken, çekme deneyinde agrega kenetlenmesi daha az öneme sahiptir [2,30]. Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü (S_m , MPa) Formül 5.4 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = F(R + 0,27) / LH \quad (3.14)$$

Burada F, maksimum dikey yük (N); H, 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm); L, ortalama numune kalınlığı (mm); R ise poisson oranıdır (0,35). Çalışmada Şekil 3.22'deki deney düzeneği kullanılmıştır.

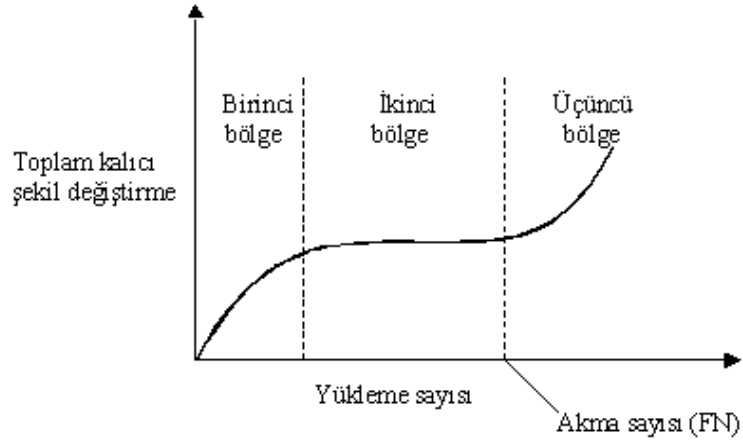


Şekil 3.22. İndirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği.

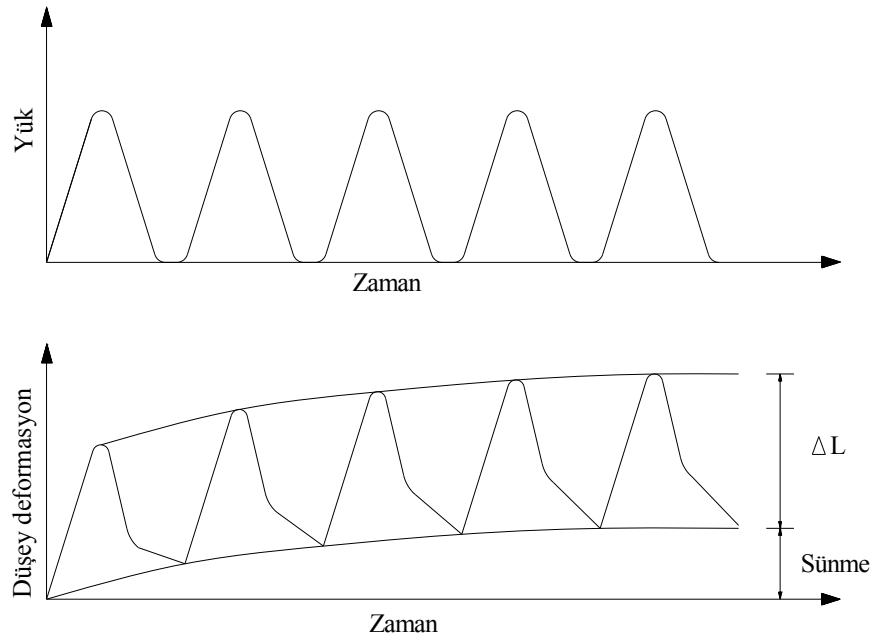
3.4.2. Dinamik Sünme Deneyi

Dinamik sünme deneyinde sabit bir değerdeki yük, silindirik numunenin yatay yüzüne belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile rezilans modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi (Şekil 3.23.) sonuç olarak verilmektedir. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Diğer deneyler arasından dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi benzerlik

gösterdiği belirtilmiştir [2,35]. Şekil 3.24'te yük zaman ve yük deformasyon arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 3.23. Yük tekrar sayısı-Şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 3.24 Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi.

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim Şekil değiştirme (ϵ_c) ve snme rijitliği E_c aşağıdaki formüllerden hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (3.15)$$

$$E_c = \sigma / \epsilon_c \quad (3.16)$$

Burada $L3_n$, n darbe sayısındaki deplasman (mm), $L1$, başlangıç referans deplasmanı (mm), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), σ , maksimum düşey gerilmedir (kPa). Çalışmada Şekil 3.25'teki test dzeneneğine sahip UTM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.25. Dinamik sünme deney dzeneneği.

3.4.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Yollardaki bitümlü malzemeler her taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalırlar. Bu, malzemenin rijitliğinde azalmayla sonuçlanan çok küçük hasarlara neden olur. Bu hasarların birikmesi ile uzun sürede malzeme bozulmaktadır. Yorulma dayanımı, asfalt betonunun tekrarlı trafik yüklerine, dolayısıyla tekrarlı eğilme yüklemesine kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma, genel olarak asfalt betonu kullanılan üstyapılarda tekrarlı yükleme ile ilerleyen bir çatlak formudur. Yorulma çatlağı trafik yüklerinin belirli bir tekrar sayısından sonra yavaş yavaş meydana gelmektedir. İnce kaplama veya zayıf alt tabakalar olması halinde ağır trafik yükleri altında aşırı defleksiyonlar oluşur. Bu defleksiyonlar kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarını doğurmaktadır.

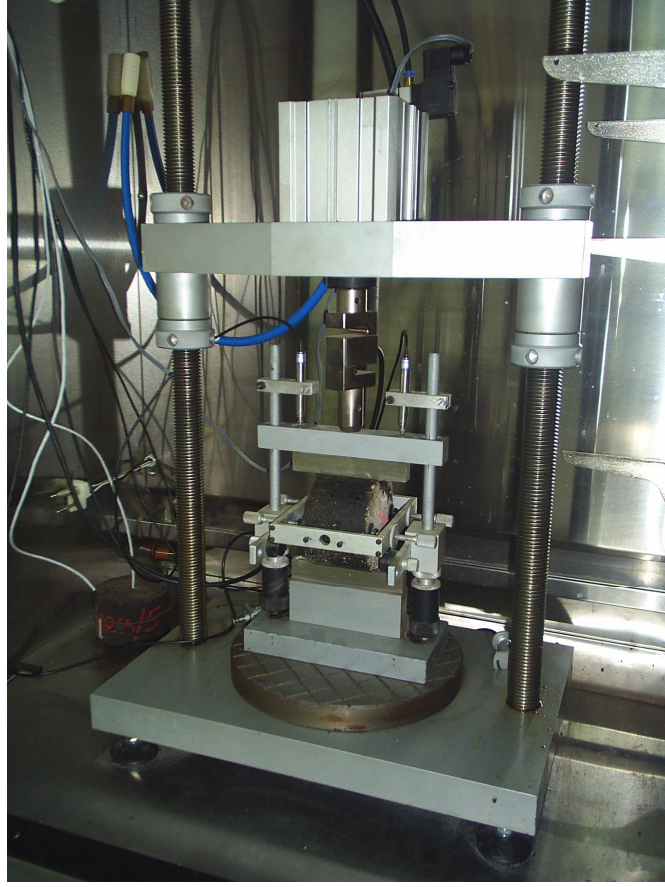
Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK'ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir.

Yorulma karakteristikleri genel olarak başlangıç gerilmesi ya da birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. BSK'ların yorulma karakteristikleri genellikle gerilme ya da şekil değiştirme kontrollü olmak üzere, tekrarlı eğilme kirişi, direk çekme ve diametral deneylerle belirlenmektedir. BSK'ların yorulma davranışı logaritmik eksenlerde gerilme ya da şekil değiştirmenin bozulmaya neden olan yük tekrarı sayısı arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmekte ve bu ilişki formül 3.17'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_o} \right)^b \left(\frac{1}{S_o} \right)^c \quad (3.17)$$

Burada N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı) ϵ_o , başlangıç şekil değiştirmesi, S_o karışımın başlangıç rijitliği, a, b, c , deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır. Gerilme kontrollü deneyde gerilme sabit kalmakta şekil değiştirme yük tekrarı ile artmaktadır.

Şekil değiştirme kontrollü deneyde şekil değiştirme sabit kalmakta gerilme ise azalmaktadır. Gerilme kontrollü deneyde bozulma, numunenin kırılması olarak tarif edilirken, şekil değiştirme kontrollü deneylerde bozulma, rijitlikte %50 azalmanın olması olarak tarif edilir. [30,35] Yorulma çatlağı, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamaya ayrılabilir. Çalışmada Şekil 3.26.'daki test düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 3.26. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Bağlayıcı Deney Sonuçları

Çalışmada öncelikle TÜPRAŞ rafinesinden temin edilen iki farklı penetrasyon sınıfına ait bitümün (B 70/100 ve B 160/220) TS EN 12591 standardına göre kullanılabilirlikleri belirlenmiştir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığını tespit etmek amacıyla Penetrasyon İndeksi (PI) kullanılmaktadır. Penetrasyon İndeksi, standart penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları kullanılarak belirlenmektedir (Formül 4.1–4.2). Formüldeki P_{25} , bitümün 25⁰C’deki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktasını göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır. Penetrasyon İndeksi’nin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [36].

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (4.1)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Bağlayıcılara uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1.’de verilmiştir. Deneyler sonucunda bitümlü bağlayıcıların şartname kriterlerini sağladıkları belirlenmiştir. PI değerlerinden B 160/220 bağlayıcısının ısıya karşı duyarlılığının B 70/100 bağlayıcısından fazla olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Saf bağlayıcıların deney sonuçları

Özellikler	Standart	B 70/100		B 160/220	
		Sonuç	Şartname limiti	Sonuç	Şartname limiti
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	97	70-100	190	160-220
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	49.6	43 – 51	40.9	35 – 43
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.481	-	0.12	-
RTFOT sonrası					
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	0.769	mak. 0,8	0.935	mak. 1.0
Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	52	-	97	-
Kalıcı penetrasyon, (%)	-	54	min. 46	51	min. 37
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	58.3	min. 45	50.3	min. 37
Yumuşama noktasındaki artış (°C)	-	8.7	mak. 9	9.4	mak. 11
Penetrasyon indeksi (PI)	-	0.782	-	0.67	-
Birim hacim ağırlıkları (gr/cm³)	TS 1087	1.04	1 – 1.1	1.03	1 - 1.1

Çalışmada Shell firması tarafından üretilen Kraton D1101 sınıfı SBS kullanılmıştır. Modifiye bağlayıcıları hazırlamak için, bitüm ve bitüme belirlenmiş oranlarda ilave edilen SBS 180°C sıcaklıkta, 1000 rpm. hıza sahip bir karıştırıcıda, 60 dakika süreyle karıştırılmıştır. Şekil 4.1’de görülen IKA marka karıştırıcı ile dört kollu karıştırma aparatı kullanılarak modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. SBS, B 160/220 bitümüne %2–6 aralığında %1 artışla 5 farklı oranda ilave edilmiştir. B 70/100 ve B 160/220 saf bitümleri dört farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C), 5 farklı oranda SBS içeren yaşlandırılmamış bağlayıcılar ise 5 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64, 70 ve 76°C), DSR deneyine tabi tutulmuştur. Sıcaklıkla bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin değişimi Şekil 4.2.’de

verilmiştir. DSR deneyleri sonucunda sadece %2 ve %3 SBS içeren bağlayıcıların tekerlek izi şartname kriterini (1 kPa) en son sağladığı sıcaklığın (64°C) B 70/100 bağlayıcısıyla aynı olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın geri kalanında kullanılacak SBS içeriğini belirlemek için en küçük kareler yönteminden faydalanılmış, böylece B 70/100 bağlayıcının tekerlek izi parametre değerine en yakın değeri sağlayan SBS içeriği belirlenmiştir. Tüm sıcaklıklar göz önünde bulundurularak B70/100 referans bağlayıcısına yakın olan karışımı belirlemek için en küçük kareler metodu (formül 4.3) kullanılmıştır.

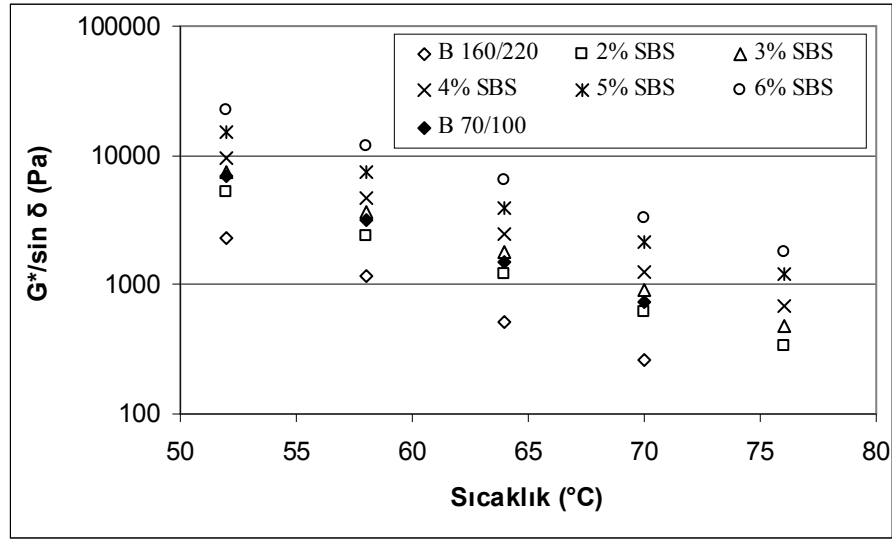
$$\sum_{i=52}^{70} \left[\left((G^* / \sin \delta_{B70/100})_{T_i} \right)^2 - \left((G^* / \sin \delta_{x\%SBS})_{T_i} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

x=3 ve 2

Sonuçta B 70/100 bitümlü bağlayıcısıyla en yakın tekerlek izi parametresine sahip bağlayıcının %3 SBS içeren bağlayıcı olduğu belirlenmiştir. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır.



Şekil 4.1. Modifiye bağlayıcı hazırlama aparatı



Şekil 4.2. $G' / \sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Bitümlü bağlayıcılarda oluşan kısa dönem yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla bütün bağlayıcılar RTFOT deneyine tabi tutulmuştur. RTFOT deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılara uzun dönem yaşlanmayı laboratuvar ortamına yansıtması amacıyla basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi uygulanmıştır. PAV deneyinde RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılara 100°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmıştır. Yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV yöntemleriyle yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanan DSR deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. DSR deney sonuçları.

Sıcaklık.(°C)	G*/sinδ (Pa)						
	B 70/100	B 160/220	B160/220+ 2%SBS	B160/220+ 3%SBS	B160/220+ 4%SBS	B160/220+ 5%SBS	B160/220+ 6%SBS
52	6861	2263	5168	7452	9551	15001	22133
58	3172	1182	2387	3690	4735	7551	11803
64	1495	523	1194	1788	2444	3896	6352
70	739	265	615	902	1271	2104	3276
76			333	484	687	1202	1801
	δ (°)						
52	75.94	79.96	72.66	66.33	65.40	61.70	60.10
58	78.96	81.43	76.26	71.48	69.98	66.61	61.50
64	81.46	83.99	78.88	76.15	73.39	70.26	66.30
70	83.57	84.85	80.68	79.84	75.70	72.70	70.21
76			81.75	82.49	78.04	74.80	73.02
	G*/sin δ (Pa) RTFOT kalıntısı						
58		7277					
64	5778		10960	11938			
70					7602		
76						6340	8311
	G*.sin δ (Pa.10⁶) PAV kalıntısı						
16		2.205					
19	0.4581	1.6270	1.3463	1.224			
22			0.6998	1.1521	0.359		
25					0.4947	0.584	
28						0.3500	0.631
31							0.501

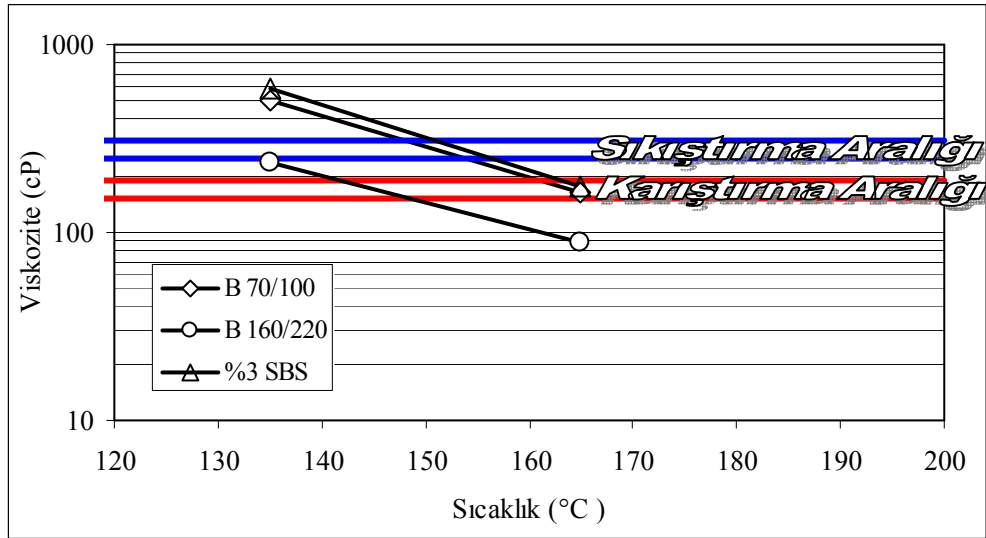
Tablo 4.2.'de görüldüğü üzere SBS içeriği arttıkça orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerleri artmıştır. Ayrıca SBS içeriği arttıkça faz açısı değerleri azalmıştır. Bu durum SBS içeriği arttıkça bağlayıcıların daha elastik davranış sergileyeceğini göstermektedir.

Bağlayıcıların performans seviyesi düşük sıcaklık seviyesini belirlemek amacıyla bağlayıcılara Tablo 3.3'te belirtilen sıcaklıklarda giriş eğme reometresi (BBR) deneyi uygulanmıştır. BBR deney sonuçları ve bağlayıcıların performans seviyeleri Tablo 4.3.'te verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere B 70/100 saf bağlayıcısının, B160/220 + %2 ve %3 SBS içeren modifiye bitümlerin performans seviyesinin aynı olduğu (PG 64-34) belirlenmiştir. %2 SBS içeren bağlayıcıyla karşılaştırıldığında %3 SBS içeren bağlayıcıya uygulanan DSR deneylerinden elde edilen değerler B 70/100 bağlayıcısından elde edilen değerlere daha yakın olduğundan çalışmanın geri kalanı için %3 SBS içeriği seçilmiştir.

Table 4.3. BBR deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	m-değeri						
	B 70/100	B 160/220	B160/220 + 2%SBS	B160/220 + 3%SBS	B160/220 + 4%SBS	B160/220 + 5%SBS	B160/220 + 6%SBS
-18	0.329	0.362	0.355	0.372	0.330	0.338	0.345
-24	0.305	0.338	0.328	0.313	0.313	0.303	0.274
-30	0.268	0.270	0.239	0.260	0.216	0.242	0.245
Sünme sertliği (Mpa)							
-18	110.21	89.31	97.22	99.41	91.92	100.72	94.74
-24	225.68	112.45	144.25	149.85	138.97	142.67	158.84
-30	226.30	129.31	224.55	267.15	207.53	202.55	207.25
Defleksiyon (mm)							
-18	0.736	0.893	0.825	0.801	0.880	0.796	0.843
-24	0.354	0.709	0.541	0.533	0.583	0.570	0.514
-30	0.353	0.620	0.362	0.299	0.387	0.398	0.390
Performans Seviyesi (PG)							
	64-34	58-34	64-34	64-34	70-34	76-34	76-28

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla B 70/100, B 160/220 ve B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitümlere orijinal bağlayıcılara 135°C ve 165°C sıcaklıklarda dönel viskozimetre deneyleri uygulanmıştır. Çizilen sıcaklık–viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. BSK’ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [24]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 4.3’te verilmiştir. Viskozite deneylerinden elde edilen bütün sonuçlar Tablo 4.4.’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bağlayıcının işlenebilirlik şartını sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca SBS içeriği arttıkça bağlayıcıların viskozitesinin arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla gerekli karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı artmıştır.



Şekil 4.3. Bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Tablo 4.4. Dönel viskozite deney sonuçları

	Standart	B 70/100	B 160/220	B160/220 + 3% SBS
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	500.0	237.5	587.5
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	162.5	87.5	175.0
Karıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	159–165	142–149	164–167
Sıkıştırma Sıcaklığı Aralığı (°C)	-	145–151	127–133	155–160

4.2. Agrega Deney Sonuçları

Çalışmada agrega olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker (kireçtaşı) türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Agrega karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri Tablo 4.5'te, kullanılan gradasyon ise Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	Şartname limitleri	Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı (%) (Los Angeles)	ASTM D 131	Maks 30	29	-	-
Donma kaybı (%) (Na ₂ SO ₄ ile)	ASTM C 88	Maks10	4.5	-	-
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D 4791	Maks 10	4		
Su absorpsiyonu (%)	ASTM C127	Maks 2	1.37		
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C127		2.613	-	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM C128		-	2.622	-
Özgül ağırlık (g/cm ³)	ASTM D854		-	-	2.711

Tablo 4.6. Agrega gradasyonu

Elek çapı (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Geçen (%)	100	95	88	65	39	24	18	14	9.5	5

4.3. Karışımların Optimum Bitüm Muhtevalarının Belirlenmesi

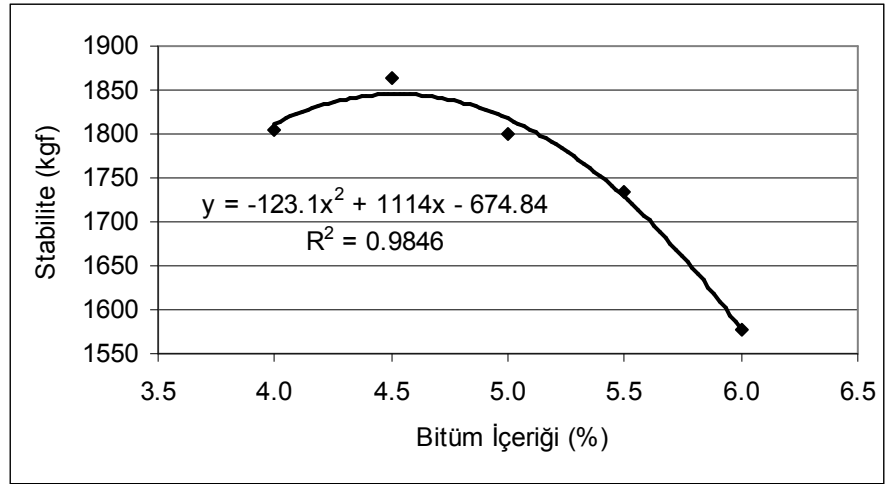
B 70/100, B 160/220 saf bağlayıcıları ve B160/220 + %3 SBS modifiyeli bağlayıcı içeren bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm içerikleri Marshall yöntemine göre belirlenmiştir.

B 70/100, B 160/220 sınıfı saf bağlayıcıları ve B160/220 + %3 SBS modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda bitümler, toplam agrega ağırlığının % 4,0 ; 4,5 ; 5,0 ; 5,5 ve 6,0'sı oranında kullanılmış ve her bir yüzde için üçer numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları alınarak Formül 3.2 – 3.13'ün yardımıyla hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde denenerek stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler kullanılarak stabilite, D_p , V_h , V_f ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

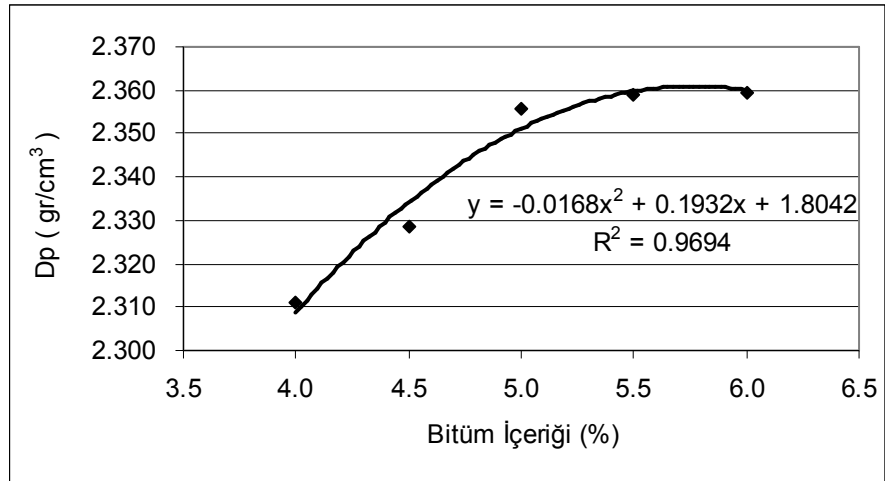
Tablo 4.7, B 70/100 bağlayıcısı içeren numunelerin sonuçlarını, Şekil 4.4 – 4.8 ise aynı bağlayıcı kullanılarak elde edilen numunelerin optimum bitüm içeriklerinin tayininde kullanılan grafiklerini göstermektedir.

Tablo 4.7. B 70/100 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

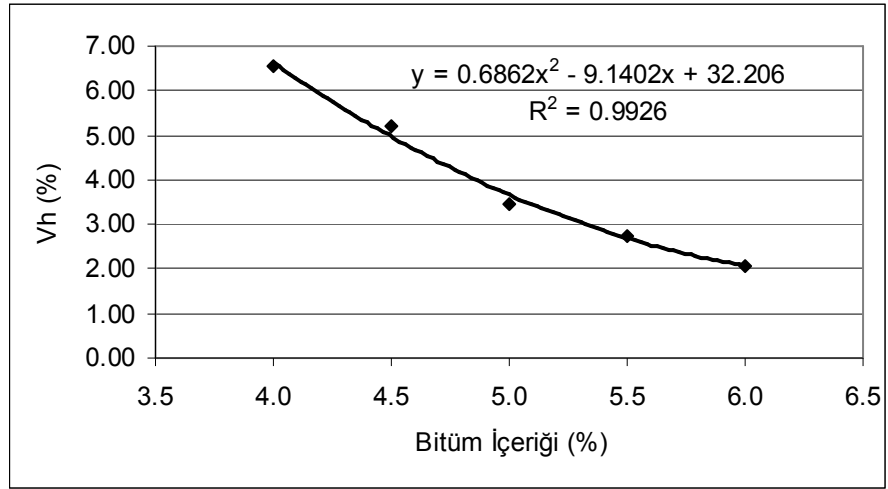
Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	4.0	3.85	48	66.3	66.5	66.8	66.5	1243.83	712.71	1249.18	536.47	2.319	2.473	6.54	15.10	56.67	2.57	1971	0.942	1856
2	4.0	3.85	48	66.7	67	66.7	66.8	1238.9	706.52	1244.72	538.2	2.302					2.12	1892	0.935	1769
3	4.0	3.85	48	66.6	67.1	66.9	66.9	1242.63	709.37	1246.83	537.46	2.312					2.69	1918	0.933	1790
ORTALAMALAR												2.311					2.46			1805
4	4.5	4.31	54	67.1	66.8	66.3	66.7	1252.54	717.66	1255	537.34	2.331	2.456	5.20	14.85	64.97	3.35	2002	0.937	1875
5	4.5	4.31	54	66.5	66.9	66.5	66.6	1251.57	716.74	1254.54	537.8	2.327					2.99	1977	0.939	1857
6	4.5	4.31	54	66.5	66.9	66.6	66.7	1250.48	715.95	1253.22	537.27	2.327					3.52	1982	0.938	1860
ORTALAMALAR												2.329					3.29			1864
7	5.0	4.76	60	65.5	65.6	65.7	65.6	1257.6	724.74	1259.09	534.35	2.354	2.440	3.46	14.26	75.71	4.03	1942	0.964	1873
8	5.0	4.76	60	66.1	66.1	66	66.1	1256.73	724.40	1258.01	533.61	2.355					3.50	1833	0.953	1747
9	5.0	4.76	60	65.9	65.9	66.2	66.0	1256.85	725.99	1258.74	532.75	2.359					3.88	1863	0.955	1778
ORTALAMALAR												2.356					3.80			1799
10	5.5	5.21	66	65.4	66.6	66.4	66.1	1263.95	729.38	1265.66	536.28	2.357	2.425	2.72	14.56	81.31	4.00	1742	0.951	1657
11	5.5	5.21	66	66.3	66	66.3	66.2	1265.22	730.73	1266.88	536.2	2.360					4.60	1862	0.950	1768
12	5.5	5.21	66	66.1	65.6	65.3	65.7	1262.96	731.15	1266.23	535.08	2.360					4.66	1844	0.963	1775
ORTALAMALAR												2.359					4.42			1734
13	6.0	5.66	72	65.7	66.6	66.5	66.3	1268.23	732.58	1269.53	536.95	2.362	2.410	2.09	14.94	86.04	5.94	1651	0.948	1565
14	6.0	5.66	72	66.2	65.7	65.5	65.8	1269.46	731.27	1269.81	538.54	2.357					5.63	1710	0.960	1641
15	6.0	5.66	72	65.7	65.7	65.4	65.6	1268.03	731.96	1269.37	537.41	2.360					6.05	1583	0.964	1527
ORTALAMALAR												2.360					5.87			1578



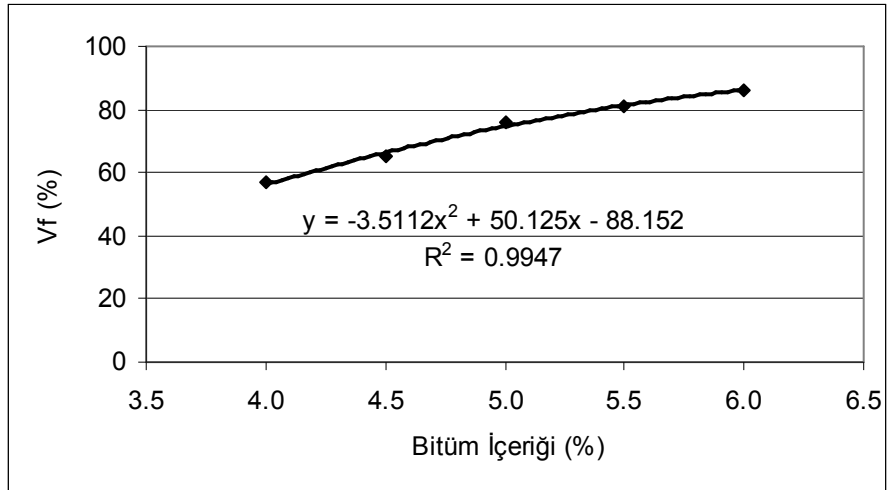
Şekil 4.4. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi



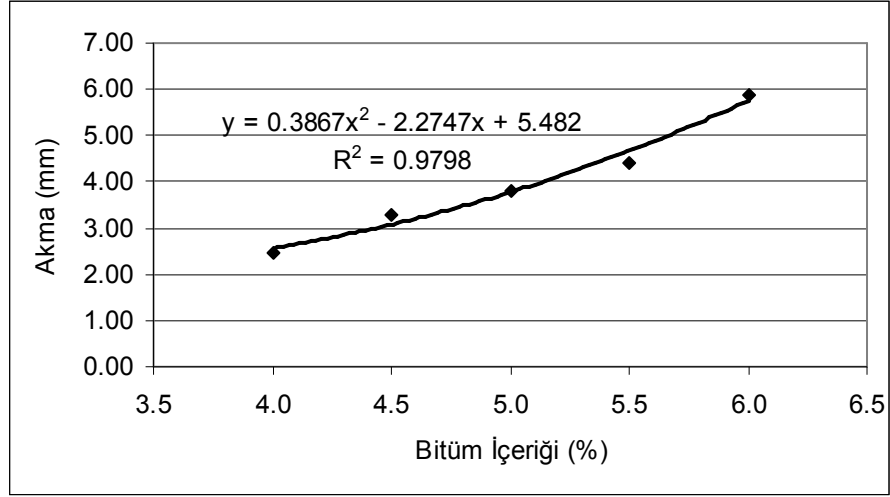
Şekil 4.5. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.6. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.7. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.8. B 70/100 bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi

Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdeler, boşluk oranının % 4'e, asfaltla dolu boşluk oranının % 80'e tekabül ettiği yüzdeler alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Tablo 4.8, OBİ'lerin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir. Her bir bağlayıcı türü için OBİ'lerinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.8. B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler

Kriterler	Elde Edilen Değerler
Maksimum Stabilité	4,53
Maksimum D _p	5,75
% 4 V _h	4,86
% 80 V _f	4,71
Optimum	% 4,96

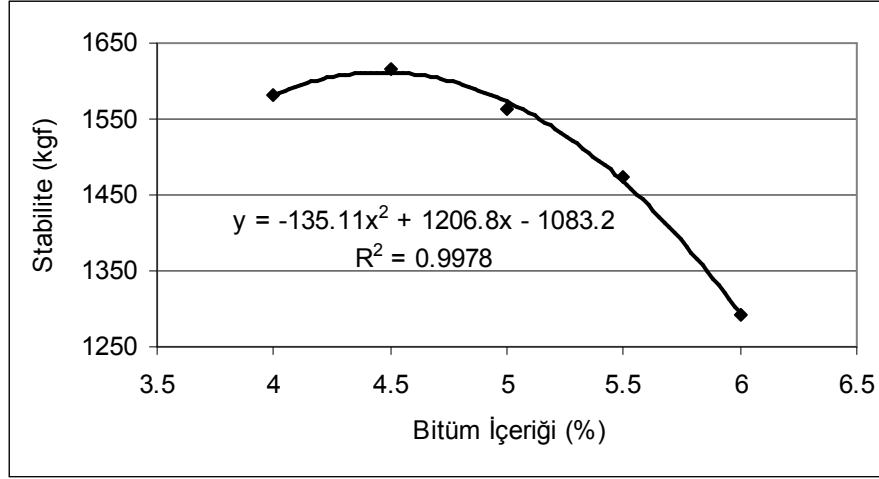
Tablo 4.10, B 160/220 bitümü kullanılan numunelerin sonuçlarını, Şekil 4.9 – 4.13 ise aynı bağlayıcının OBİ hesabında kullanılan grafiklerini göstermektedir.

Tablo 4.9. B 70/100 bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar

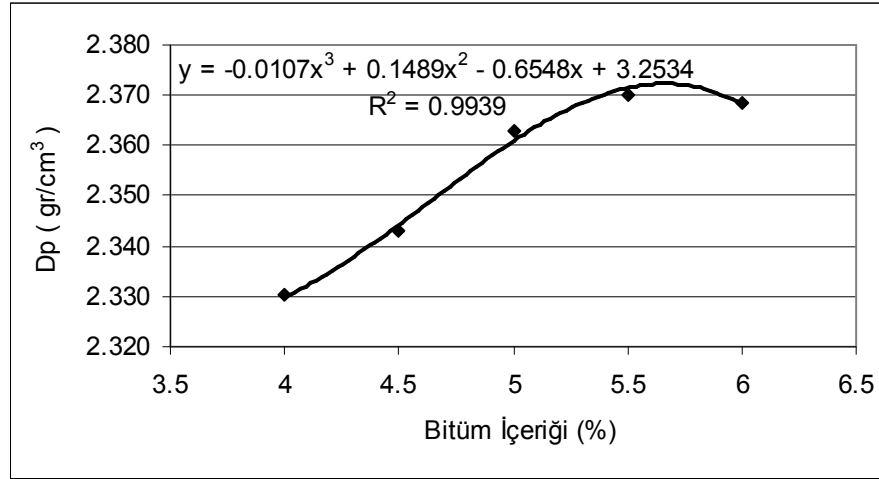
Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	4.96	4.73	59.6	66.2	65.5	65.2	65.6	1257.39	724.13	1259.22	535.09	2.350	2.442	3.71	14.41	74.27	4.02	1909	0.964	1840
2	4.96	4.73	59.6	65.5	65.8	66.1	65.8	1257.83	724.59	1259.43	534.8	2.352					3.86	1814	0.960	1741
3	4.96	4.73	59.6	66	65.6	65.9	65.8	1257.14	724.79	1259.32	534.53	2.352					3.78	1862	0.959	1785
ORTALAMALAR												2.351					3.89			1788

Tablo 4.10. B 160/220 bitümü ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

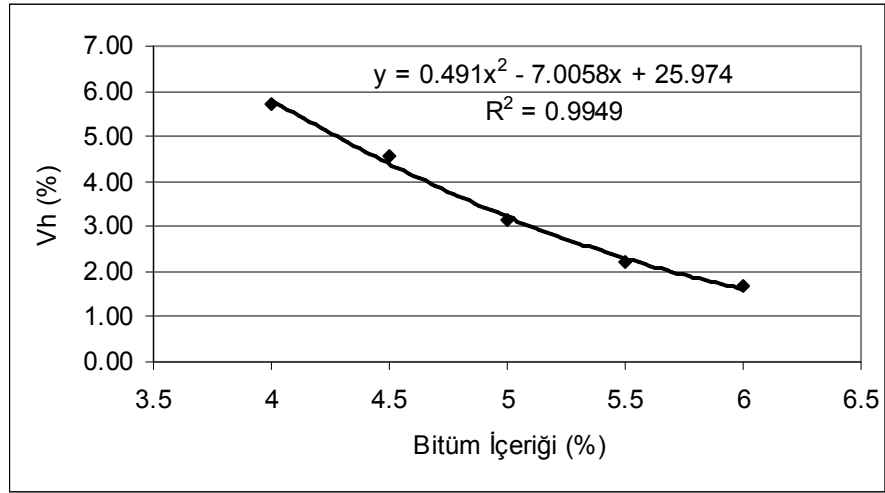
Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	4.0	3.85	48.0	66.5	66.4	66.7	66.5	1242.33	715.41	1247.98	532.57	2.333	2.472	5.73	14.39	60.19	2.36	1719	0.942	1619
2	4.0	3.85	48.0	66.8	67.1	67.0	67.0	1244.07	715.53	1250.14	534.61	2.327					2.88	1682	0.931	1566
3	4.0	3.85	48.0	67.1	66.7	66.7	66.8	1245.73	715.54	1250.03	534.49	2.331					3.03	1670	0.934	1560
ORTALAMALAR												2.330					2.76			1582
4	4.5	4.31	54.0	66.4	66.5	66.2	66.4	1249.58	722.57	1255.42	532.85	2.345	2.455	4.58	14.33	68.05	2.58	1676	0.946	1585
5	4.5	4.31	54.0	66.7	66.5	66.8	66.7	1250.79	723.49	1256.31	532.82	2.347					2.84	1747	0.938	1639
6	4.5	4.31	54.0	66.2	66.6	66.4	66.4	1251.05	721.92	1257.37	535.45	2.336					2.95	1718	0.945	1623
ORTALAMALAR												2.343					2.79			1616
7	5.0	4.76	60.0	66.2	66.1	66.1	66.1	1257.44	728.6	1260.43	531.83	2.364	2.439	3.14	14.01	77.59	3.82	1683	0.951	1601
8	5.0	4.76	60.0	66.4	66.5	66.2	66.4	1256.99	727.96	1259.03	531.07	2.367					3.79	1685	0.946	1593
9	5.0	4.76	60.0	66.4	66.6	66.6	66.5	1258.11	728.16	1261.87	533.71	2.357					3.91	1592	0.942	1499
ORTALAMALAR												2.363					3.84			1564
10	5.5	5.21	66.0	65.8	65.9	66.0	65.9	1263.22	732.82	1265.47	532.65	2.372	2.424	2.21	14.15	84.36	3.89	1493	0.957	1429
11	5.5	5.21	66.0	66.1	65.5	65.6	65.7	1264.85	732.51	1266.74	534.2	2.368					4.20	1526	0.961	1467
12	5.5	5.21	66.0	65.9	66.1	66.1	66.0	1263.59	732.86	1265.71	532.85	2.371					3.96	1602	0.954	1528
ORTALAMALAR												2.370					4.02			1475
13	6.0	5.66	72.0	65.9	65.6	65.7	65.7	1270.64	736.03	1272.48	536.45	2.369	2.409	1.67	14.62	88.59	5.04	1397	0.961	1343
14	6.0	5.66	72.0	66.1	65.8	65.7	65.9	1269.73	735.88	1271.68	535.8	2.370					4.67	1344	0.958	1287
15	6.0	5.66	72.0	66.0	65.7	65.8	65.8	1269.64	735.15	1271.56	536.41	2.367					4.91	1298	0.959	1244
ORTALAMALAR												2.368					4.87			1292



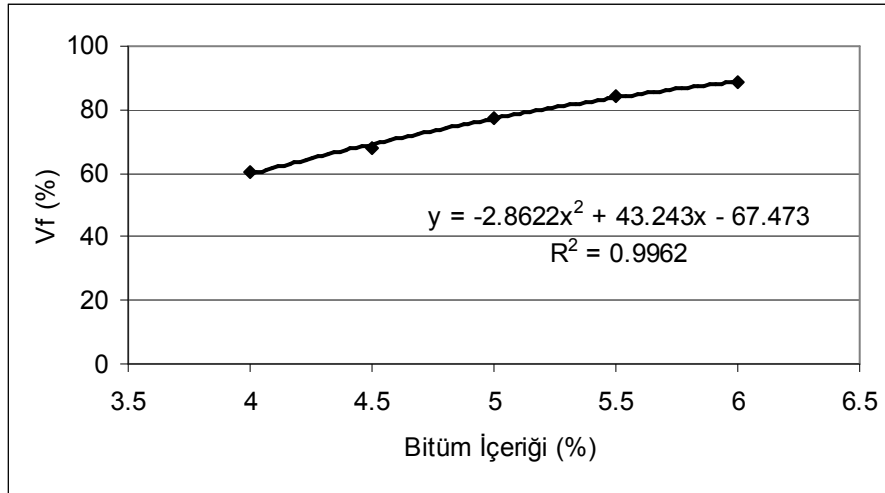
Şekil 4.9. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi



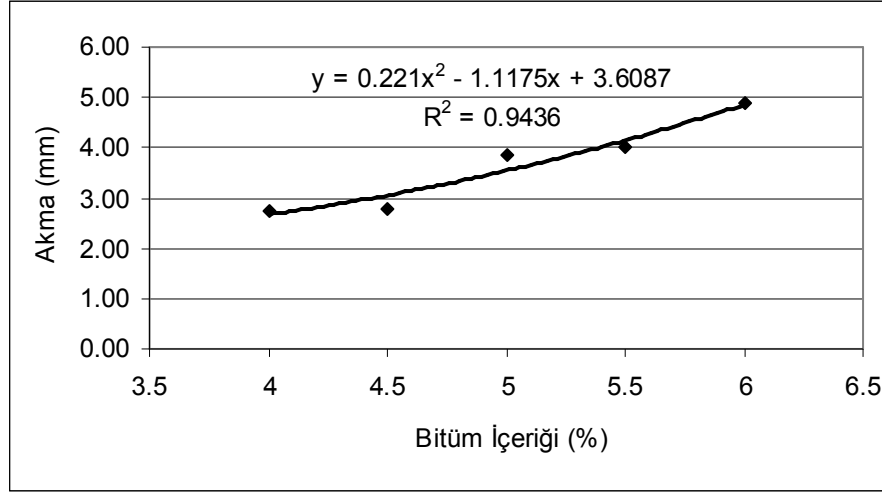
Şekil 4.10. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.11. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.12. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.13. B 160/220 bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi

Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdeler, boşluk oranının % 4'e, asfaltla dolu boşluk oranının % 80'e tekabül ettiği yüzdeler alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Tablo 4.11, OBİ'lerin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir. Her bir bağlayıcı türü için OBİ'lerinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.11. B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler

Kriterler	Elde Edilen Değerler
Maksimum Stabilite	4,47
Maksimum D _p	5,65
% 4 V _h	4,66
% 80 V _f	4,55
Optimum	% 4,83

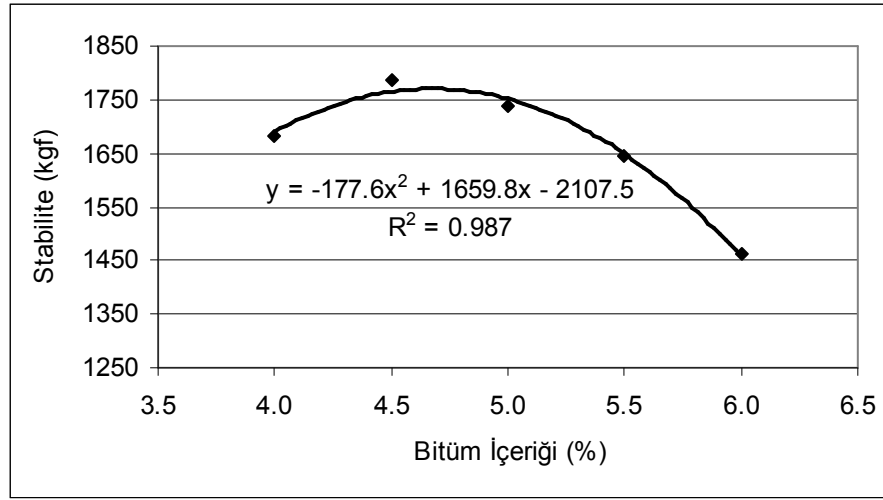
B 160/220 bitümüne %3 oranında SBS katılarak elde edilen modifiye bitümün kullanıldığı numunelerin sonuçları Tablo 4.13'te, OBİ'nin belirlenmesinde kullanılan grafikler ise Şekil 4.14 – 4.18'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12. B 160/220 bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar

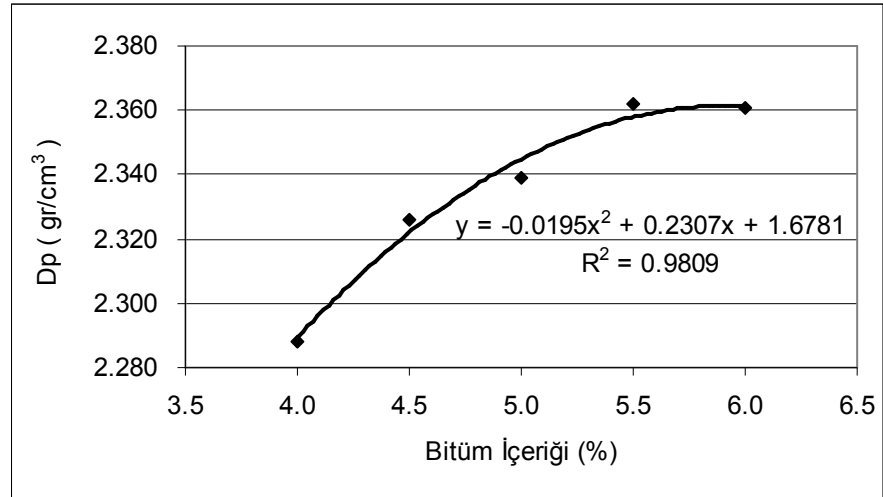
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	4.83	4.61	58.0	66.2	66	67	66.4	1253.41	722.86	1253.16	530.3	2.364	2.457	4.07	14.08	71.11	3.68	1695	0.945	1601
2	4.83	4.61	58.0	66.7	66.6	66.6	66.6	1254.04	722.13	1255.4	533.3	2.352					3.12	1688	0.939	1585
3	4.83	4.61	58.0	66.1	66.3	66.2	66.2	1254.32	723.04	1255.28	532.2	2.357					3.59	1630	0.950	1548
ORTALAMALAR												2.357					3.46			1578

Tablo 4.13. B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinden elde edilen sonuçlar

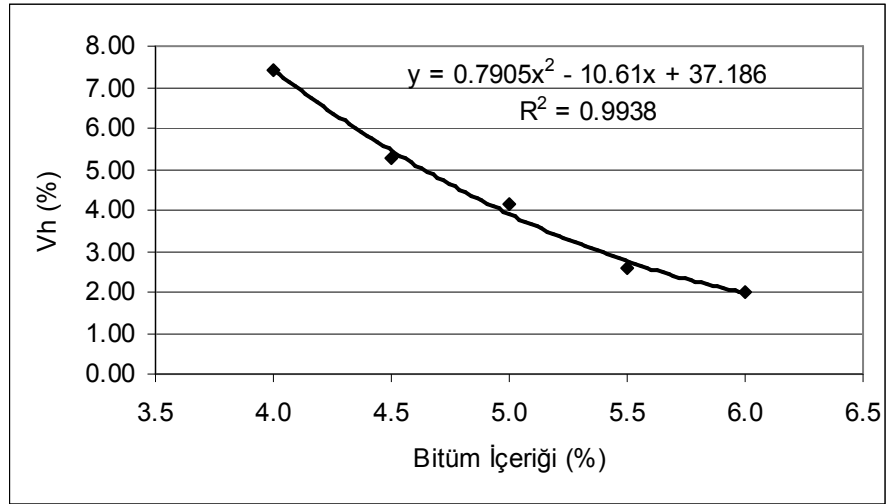
Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	4.0	3.85	48.0	67.3	66.9	67.8	67.3	1244.15	706.46	1249.32	542.86	2.292	2.472	7.44	15.92	53.29	2.12	1859	0.922	1715
2	4.0	3.85	48.0	68.9	67.3	67.5	67.9	1245.35	705.22	1250.22	545.00	2.285					2.98	1836	0.909	1669
3	4.0	3.85	48.0	67.7	67.7	67.4	67.6	1245.73	705.54	1250.03	544.49	2.288					2.33	1812	0.916	1660
ORTALAMALAR												2.288					2.48			1681
4	4.5	4.31	54.0	66.7	66.6	67.1	66.8	1250.1	715.08	1252.19	537.11	2.327	2.456	5.28	14.94	64.65	2.58	1876	0.935	1754
5	4.5	4.31	54.0	66.7	66.7	67.4	66.9	1251.5	715.7	1253.49	537.79	2.327					2.84	1947	0.932	1814
6	4.5	4.31	54.0	66.5	66.8	67.0	66.8	1249.89	714.94	1252.78	537.84	2.324					2.95	1918	0.936	1795
ORTALAMALAR												2.326					2.79			1788
7	5.0	4.76	60.0	66.7	66.2	66	66.3	1257.88	722.5	1259.6	537.06	2.342	2.440	4.14	14.88	72.16	3.22	1883	0.947	1784
8	5.0	4.76	60.0	67.1	66.4	67.4	67.0	1256.77	719.98	1258.39	538.41	2.334					3.19	1885	0.931	1755
9	5.0	4.76	60.0	66.8	66.5	66.9	66.7	1257.42	721.54	1258.86	537.32	2.340					3.51	1792	0.937	1679
ORTALAMALAR												2.339					3.31			1739
10	5.5	5.21	66.0	67.1	66.1	66.9	66.7	1262.83	728.63	1264.53	535.9	2.356	2.424	2.59	14.46	82.11	3.89	1693	0.938	1587
11	5.5	5.21	66.0	66.1	65.5	66.4	66.0	1265.15	731.46	1266.61	535.2	2.364					4.20	1726	0.955	1648
12	5.5	5.21	66.0	66.6	66.6	66.5	66.6	1264.17	729.81	1264.43	534.62	2.365					3.96	1802	0.941	1695
ORTALAMALAR												2.362					4.02			1643
13	6.0	5.66	72.0	65.8	66.1	66.5	66.1	1269.16	734.03	1270.96	536.93	2.364	2.409	2.02	14.91	86.43	5.04	1597	0.951	1519
14	6.0	5.66	72.0	66.1	66.2	66.6	66.3	1268.91	732.27	1270.07	537.8	2.359					4.67	1544	0.947	1463
15	6.0	5.66	72.0	66.8	66.7	66.4	66.6	1268.58	732.03	1269.97	537.94	2.358					4.91	1498	0.939	1407
ORTALAMALAR												2.360					4.87			1463



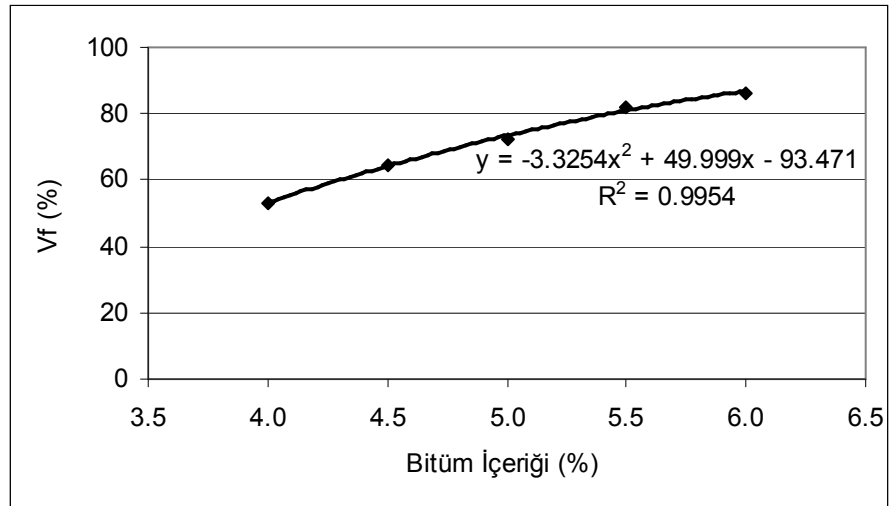
Şekil 4.14. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin stabilite - % bitüm ilişkisi



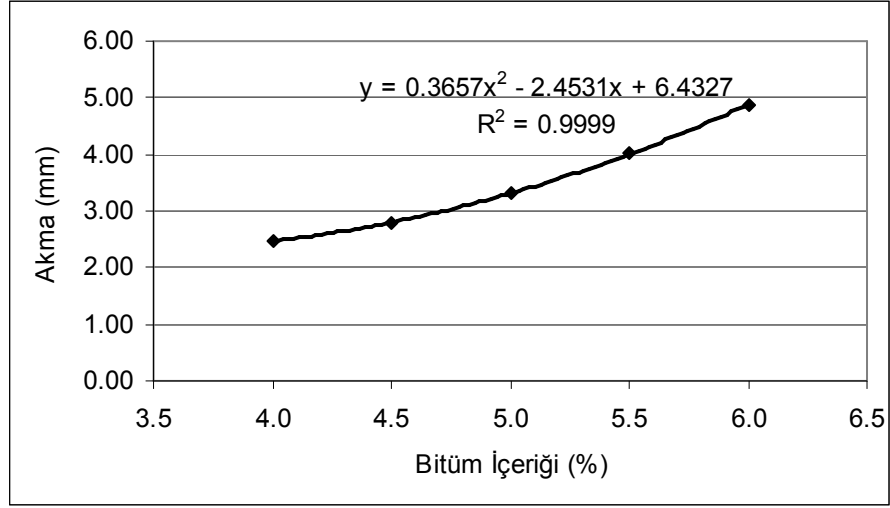
Şekil 4.15. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin D_p - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.16. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin V_h - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.17. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin V_f - % bitüm ilişkisi



Şekil 4.18. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan numunelerin akma - % bitüm ilişkisi

Çizilen grafiklerden stabilitenin ve hacim özgül ağırlığın maksimum olduğu yüzdelere, boşluk oranının % 4'e, asfaltla dolu boşluk oranının % 80'e tekabül ettiği yüzdelere alınmıştır. Bu yüzde değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Tablo 4.14, OBİ'lerin belirlenmesinde kullanılan değerleri göstermektedir. Her bir bağlayıcı türü için OBİ'lerinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de aynı işlemler yapılarak elde edilen değerlerin grafiklerle uygunluğu karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinden elde edilen değerler Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.14. B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların optimum bağlayıcı oranlarının tespitinde kullanılan değerler

Kriterler	Elde Edilen Değerler
Maksimum Stabilite	4,67
Maksimum D _p	5,92
% 4 V _h	4,96
% 80 V _f	4,81
Optimum	% 5,09

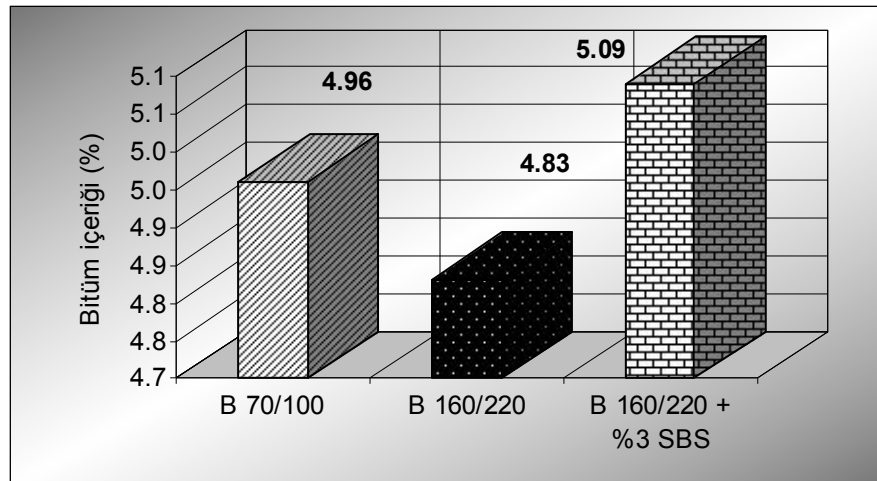
Tablo 4.15. B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlar

Bri ket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A	C	B	V	Dp	D _t	V _h	V.M.A	V _f	Akma	Stab	Düz.	Düz.
	W _a %	W _b %	gr	1	2	3	Ort	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%	mm	kg	Fak.	Stab
1	5.09	4.84	61.1	65.8	65.9	66	65.9	1259.68	724.22	1261.32	537.1	2.345	2.437	3.88	14.82	73.82	3.39	1768	0.957	1692
2	5.09	4.84	61.1	65.9	66.2	66.1	66.1	1258.79	724.29	1260.3	536.0	2.349					3.79	1792	0.953	1708
3	5.09	4.84	61.1	65.6	66.3	65.6	65.8	1260.24	722.79	1262.78	539.99	2.334					3.62	1826	0.959	1751
ORTALAMALAR												2.343					3.60			1717

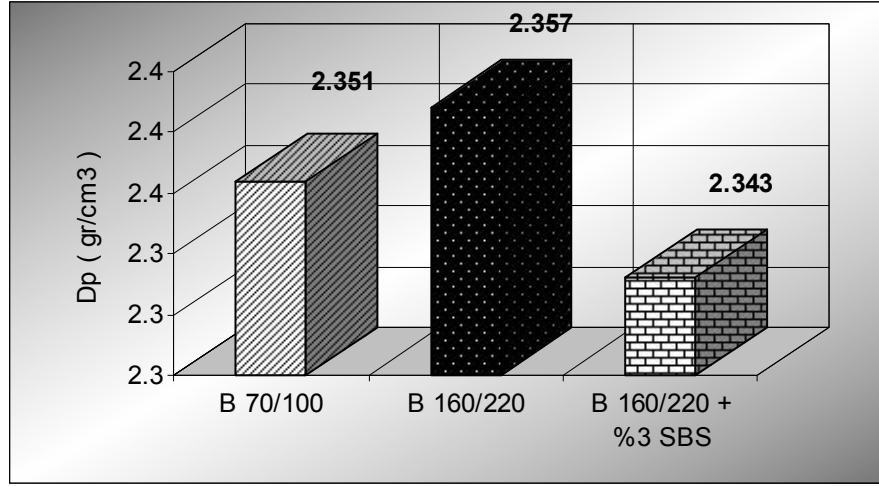
Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerden elde edilen değerler ve şartname kriterleri Tablo 4.16.'te ve Şekil 4.19-26.'da verilmiştir.

Tablo 4.16. Optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerden elde edilen değerler

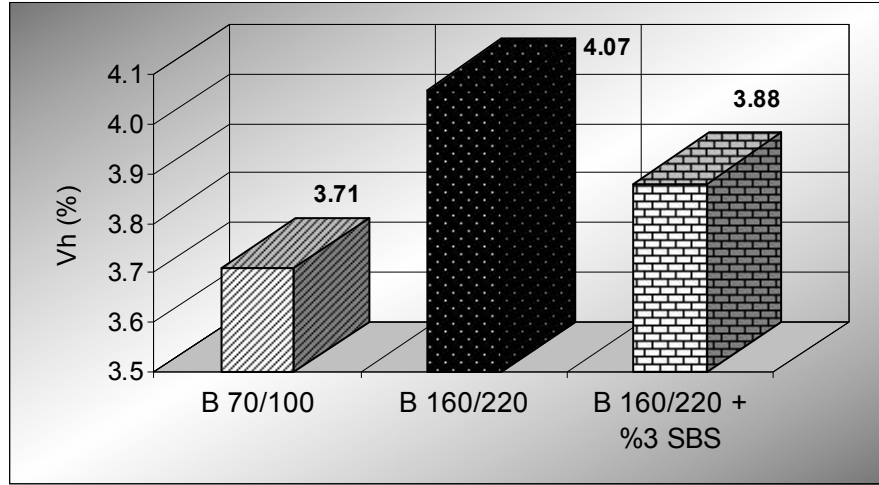
Kriterler	Karışımlarda kullanılan bağlayıcı türü			Şartname kriteri
	B 70/100	B 160/220	B160/220 + %3 SBS modifiyeli bitüm	
Optimum bitüm içeriği (%)	4,96	4,83	5,09	%4–7
Dp (gr/cm ³)	2,351	2,357	2,343	-
Boşluk (Vh, %)	3,71	4,07	3,88	3–5
Asfaltla dolu boşluk (Vf, %)	74,27	71,11	73,82	65–75
Agregalar arası boşluk miktarı (VMA, %)	14,41	14,08	14,82	min. 14
Stabilite (kgf)	1788	1578	1717	min. 900
Akma (mm)	3,89	3,46	3,60	2–4
Filler/bitüm oranı	1,06	1,09	1,03	maks. 1.5
Marshall oranı (kgf/mm)	460.15	456.07	476.88	-



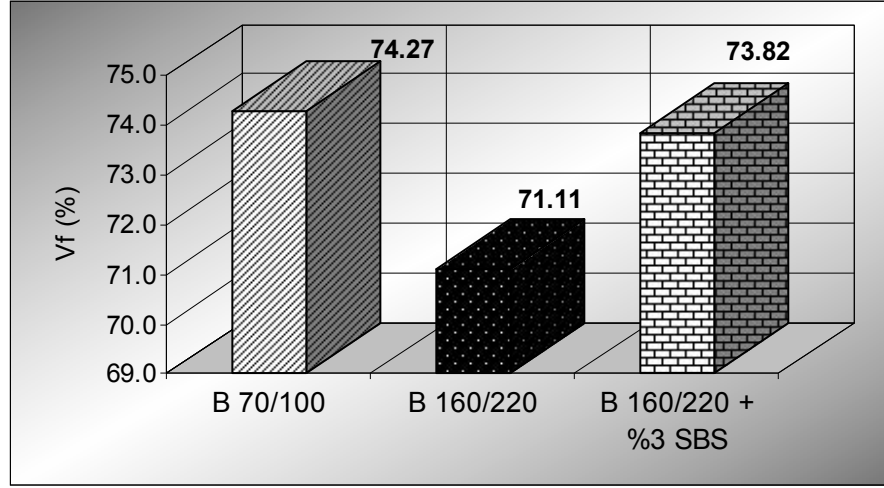
Şekil 4.19. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların optimum bitüm içerikleri



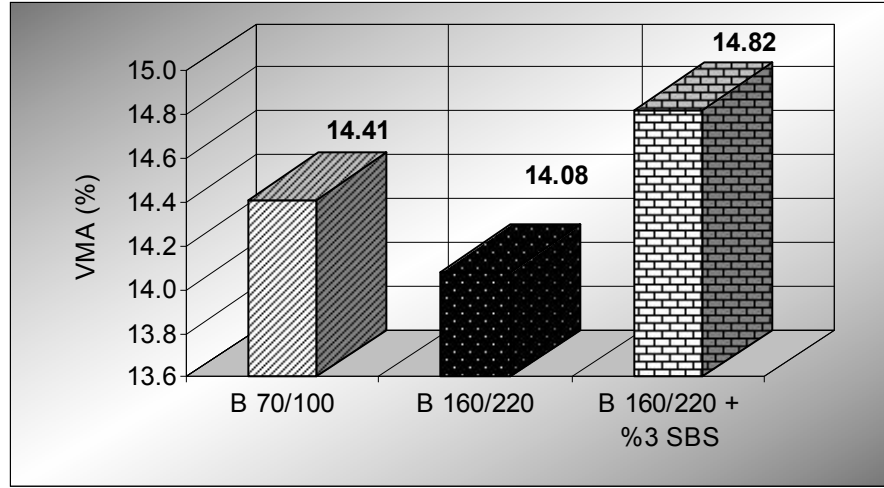
Şekil 4.20. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlıkları



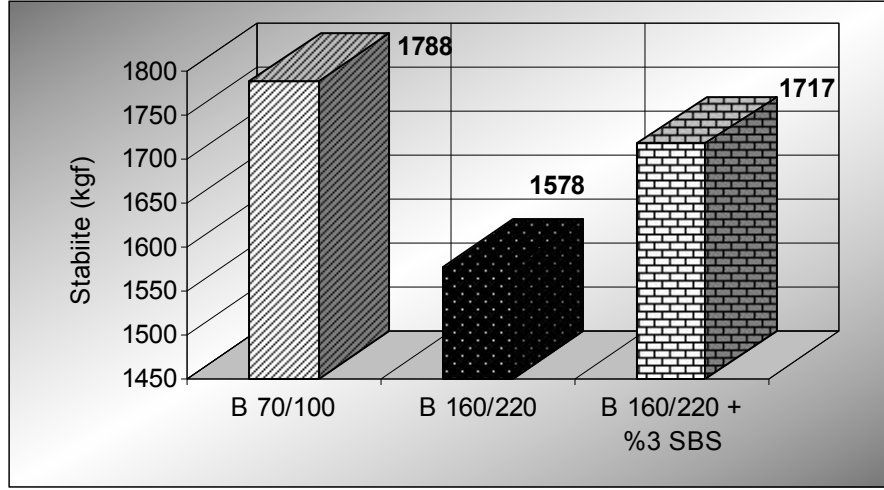
Şekil 4.21. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların boşluk oranları



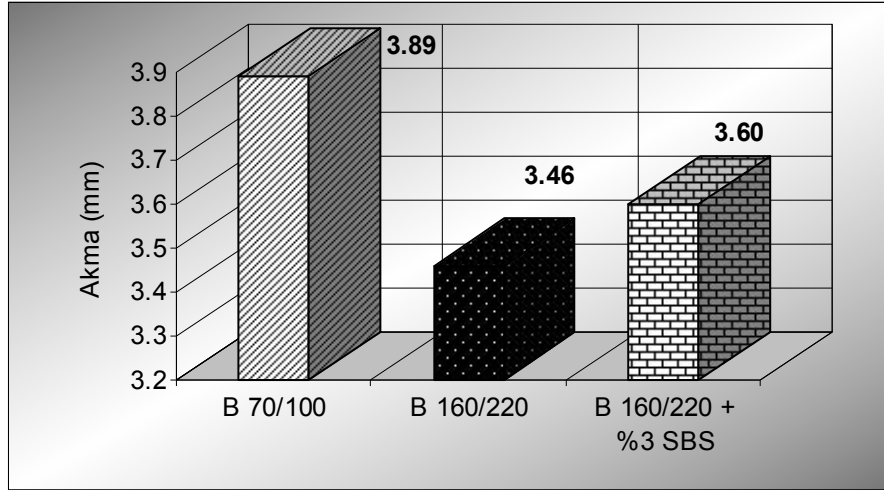
Şekil 4.22. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların asfaltla dolu boşluk oranları



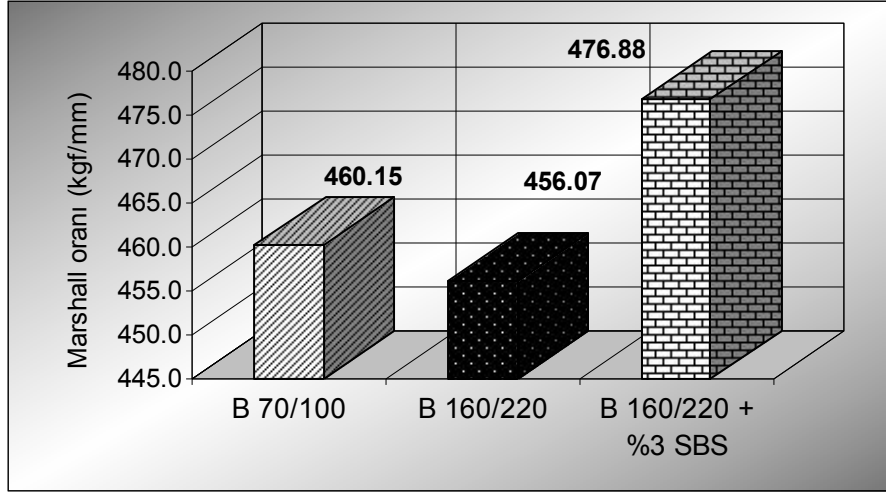
Şekil 4.23. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların agregalar arası boşluk oranları



Şekil 4.24. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların stabilite değerleri



Şekil 4.25. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların akma değerleri



Şekil 4.26. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların marshall oranı değerleri

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere karışımlar içerisinde optimum bitüm içeriği en düşük olan karışımın B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, optimum bitüm içeriği en yüksek olan karışımın B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir. Pratik özgül ağırlıklar değerlendirildiğinde (Şekil 4.20) Dp değeri en düşük karışımın %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışım olduğu, Dp değeri en yüksek olan karışımın ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde bütün karışımların boşluk oranlarının birbirine yakın olduğu ve şartname kriterin (%3-5) sağladığı belirlenmiştir. Vf değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.22) en yüksek Vf değerine B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu, en düşük Vf değerine ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu ve bütün karışımların şartname limitini (%65-75) sağladığı belirlenmiştir. Agregalar arası boşluk oranı değerleri incelendiğinde (Şekil 4.23) bütün karışımların şartname limitini (min. %14) sağladığı belirlenmiştir. Stabilite değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 4.24) en yüksek stabilite değerine B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük stabilite değerine ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. %3 SBS kullanılması ile Stabilite değeri %8.1 oranında artmıştır. B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların stabilite değerinin ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %11.8 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.25’te görülen akma değerleri incelendiğinde en yüksek akma değerine B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük akma değerine ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.

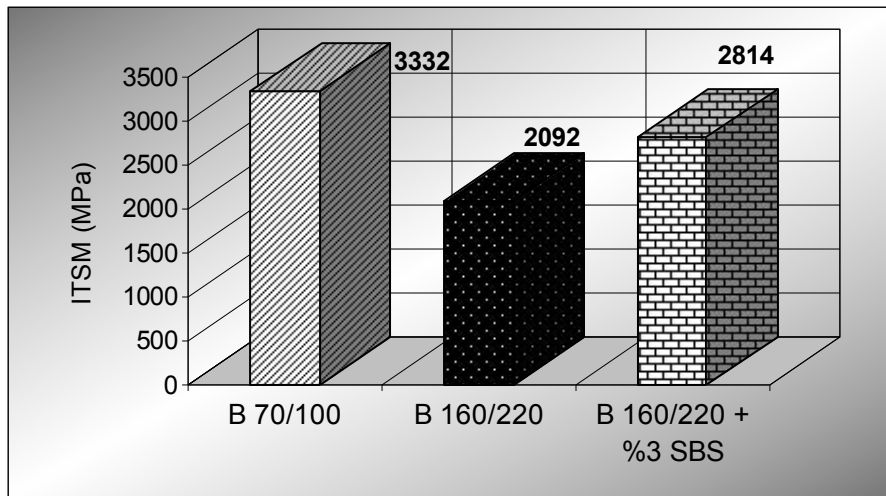
Marshall oranı değerleri (Şekil 4.26) incelendiğinde ise bütün karışımların Marshall oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu, değerler arasında %5'den daha az farklılık olduğu belirlenmiştir. Elde edilen değerler değerlendirildiğinde en yüksek Marshall oranı değerine B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların akma değeri en düşük olsa da bu bitüm ile hazırlanan karışımların Stabilitate değeri düşük olduğundan B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın Marshall oranı değeri diğer karışımlara göre daha düşük çıkmıştır.

4.4. Karışımların İndirekt Çekme Rijitlik Modüllerinin Belirlenmesi

B 70/100 ve B 160/220 saf bitümleri ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde kullanılan numuneler yorulma deneylerinde de kullanılmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmektedir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 µm. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 µm. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 3.14 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır. Deney, 20°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.17'da verilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen sonuçların ortalaması Şekil 4.27'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Karışımların ITSM deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Deneme No	ITSM, (MPa)	$ITSM_{ort}$, (MPa)
B 70-100	1	66.1	1	3338	3384
			2	3430	
	2	66.6	1	3328	3387
			2	3404	
	3	66.0	1	3245	3224
			2	3203	
	Ortalama				3332
B 160-220	1	65.3	1	2261	2187
			2	2113	
	2	65.2	1	2151	2107
			2	2062	
	3	65.5	1	2054	1983
			2	1911	
	Ortalama				2092
B160/220 + %3 SBS	1	65.7	1	2975	2869
			2	2763	
	2	65.9	1	2685	2814
			2	2942	
	3	65.4	1	2642	2760
			2	2878	
	Ortalama				2814

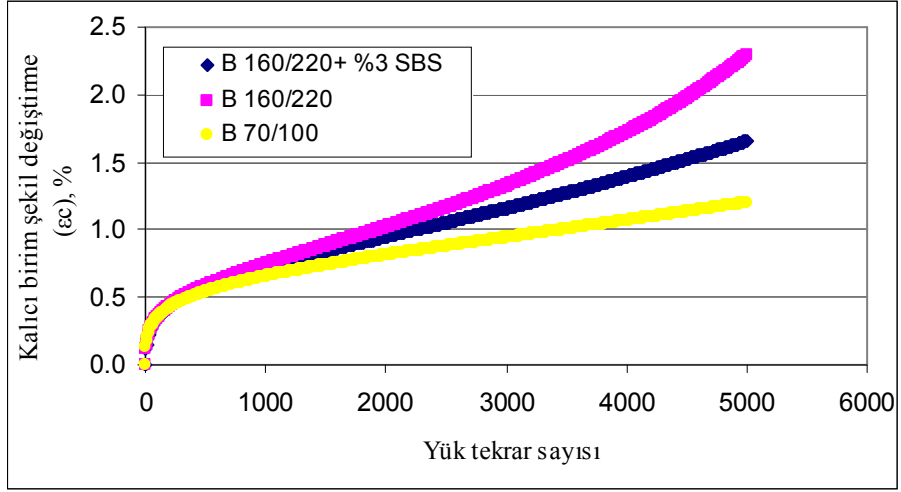


Şekil 4.27. Farklı bitümler ile hazırlanan karışımların 20°C sıcaklıktaki ITSM değerleri

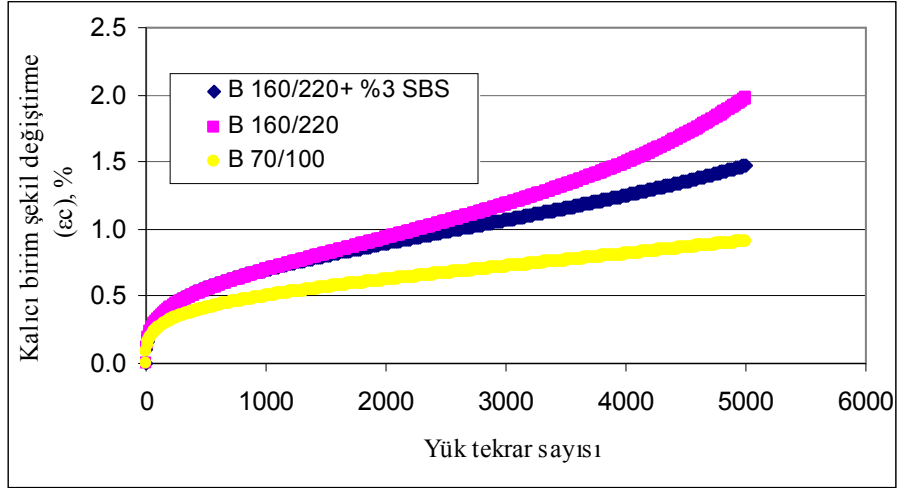
Şekil 4.27’de görüldüğü üzere en yüksek ITSM değerine B 70/100 bitümü içeren karışımların sahip olduğu, en düşük ITSM değerine ise B 160/220 bitümü içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. %3 oranında SBS ilave edilmesi ile B 160/220 bitümü ile optimum bitüm muhtevasında hazırlanan karışımların ITSM değerleri artmıştır. %3 SBS kullanılması ile ITSM değeri %34.5 oranında artmıştır. B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %59.3 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. ITSM deney sonuçlarından %3 oranında SBS kullanılması ile bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin artacağı söylenebilmektedir.

4.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

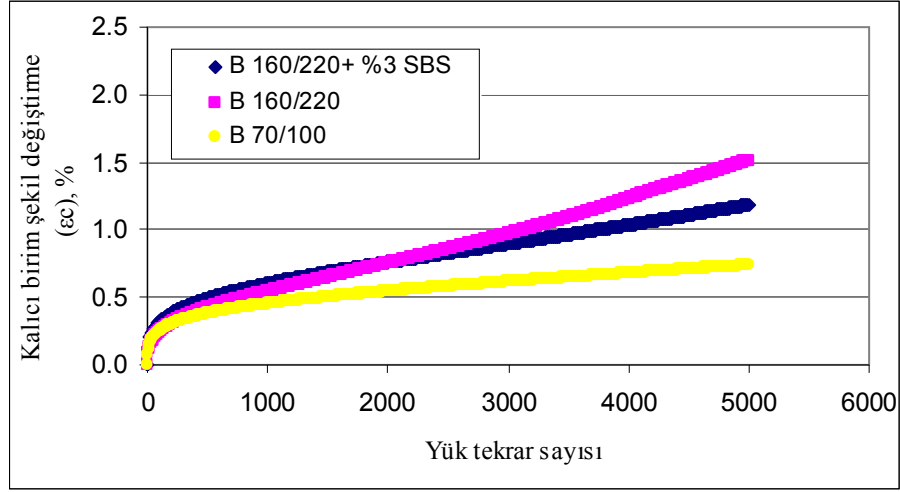
Dinamik sünme deneyi, iki farklı saf bitümle hazırlanan ve B160/220 + %3 SBS modifiyeli bağlayıcıyla hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde UMATTA deney aleti kullanılarak uygulanmıştır. Her bir karışım türü için üç numune olmak üzere toplamda 27 numune deneye tabi tutulmuştur. Deney 50°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 4 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, deney aparatına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT’ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce numunelere 90 saniye süresince 10 kPa gerilme altında statik bir ön yükleme yapılmıştır. Dinamik sünme deneyi 300 kPa gerilme altında ve üç farklı yük tekrar süresinde (1500, 2000 ve 2500 ms) gerçekleşmiştir. Yük etki süresi ise 500 ms olarak seçilmiştir. Deneylere 5000 yük tekrarına kadar devam edilmiştir. 1500, 2000 ve 2500 ms yük tekrar sürelerinde elde edilen kalıcı birim şekil değiştirme-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.28–4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.28. 1500 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



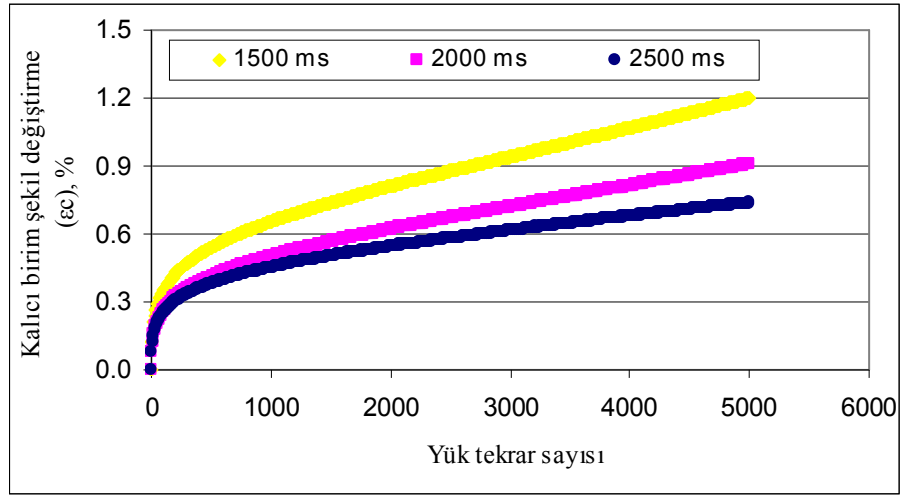
Şekil 4.29. 2000 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi



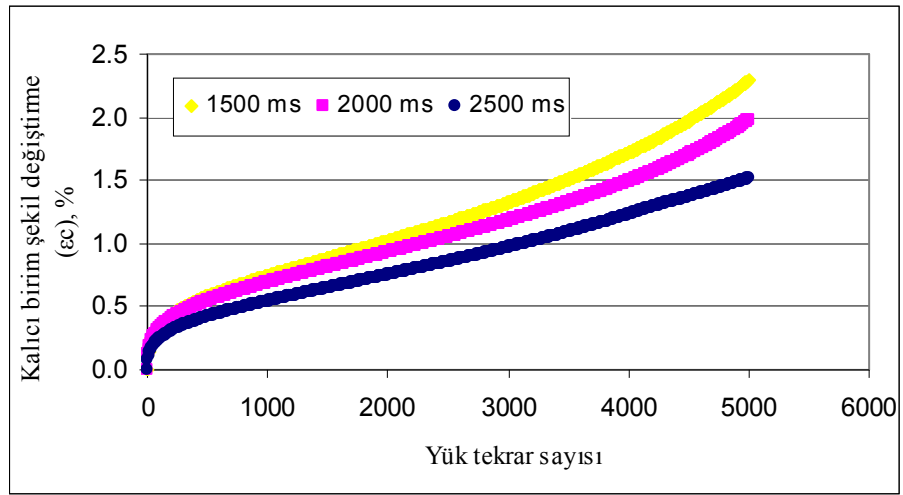
Şekil 4.30. 2500 ms yük periyodunda ϵ_c -yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.28-4.30’da görüldüğü üzere bütün yük periyotlarında en fazla kalıcı birim şekil değiştirmeye B 160/220 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların, en düşük kalıcı birim şekil değiştirmeye ise B 70/100 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 1500 ms yük periyodunda 5000 yük tekrarı sonunda B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %27,7 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşurken B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise %47,6 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşmuştur. 2000 ms yük periyodunda 5000 yük tekrarı sonunda %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %25,3 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşurken B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise %53,9 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşmuştur. 2500 ms yük periyodunda ise 5000 yük tekrarı sonunda B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %21,6 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşurken B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise %51,4 daha az kalıcı birim şekil değiştirme oluşmuştur.

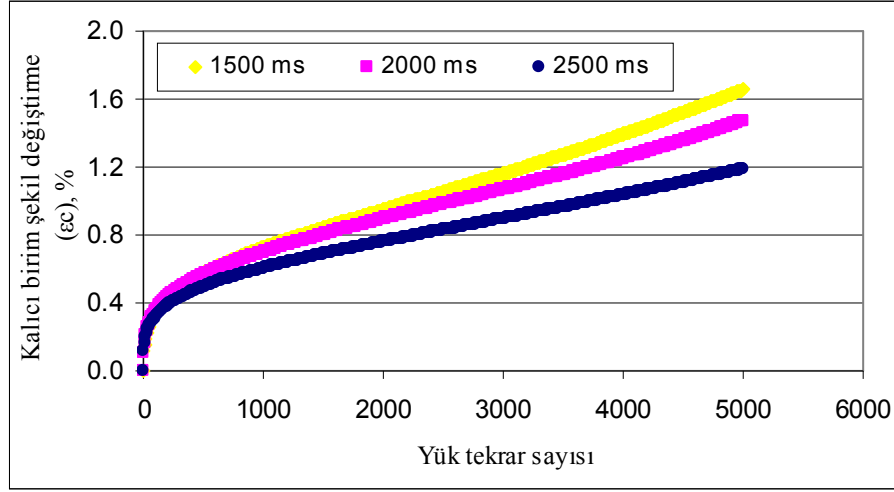
Farklı yükleme periyotlarında B 70/100 bitümü, B 160/220 bitümü ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların kalıcı birim şekil değiştirmelerinin 5000 yük tekrarına kadar değişimi sırasıyla Şekil 4.31-33’te verilmiştir.



Şekil 4.31. B 70/100 ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi



Şekil 4.32. B 160/220 ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi

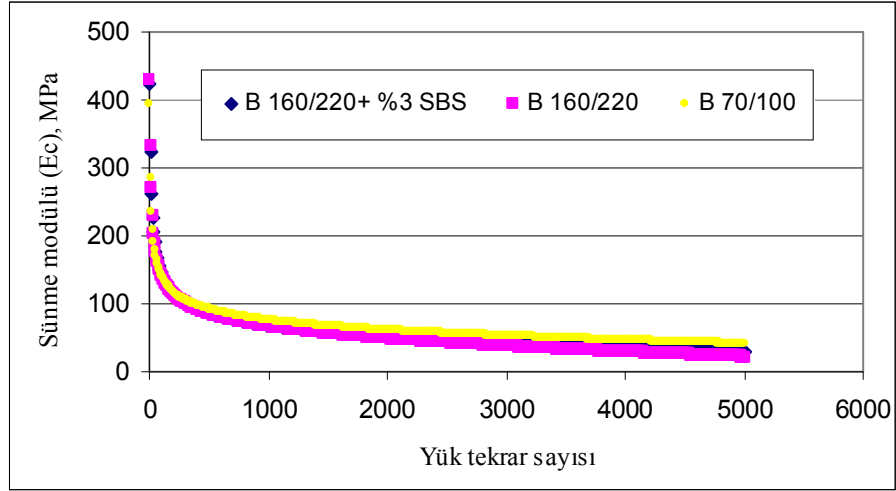


Şekil 4.33. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi

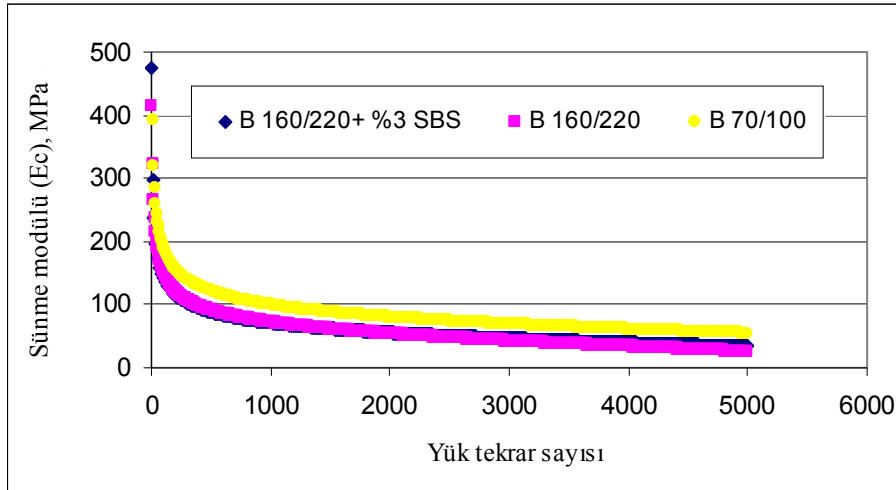
Şekil 4.31-33'te görüldüğü üzere yükleme periyodu arttıkça kalıcı birim şekil değiştirme miktarları azalmıştır. Şekillerde görüldüğü üzere B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlar dışında diğer karışımlarda III. Bölge gözlenmemiştir. Şekil 4.31'de görülen B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların ϵ_c değerlerinin yük tekrarı ile değişimi incelendiğinde yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile 5000 yük tekrarı sonunda ϵ_c değeri %24,2 azalırken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %38,6 azalmıştır. Şekil 4.32 incelendiğinde B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda 5000 yük tekrarı sonunda yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile ϵ_c değeri %13,8 azalırken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %33,8 azalmıştır. Şekil 4.33 incelendiğinde %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 5000 yük tekrarı sonunda yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile ϵ_c değeri %10,9 azalırken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %28,2 azalmıştır. Elde edilen değerlerden yükleme periyodundan en fazla etkilenen karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, en az etkilenen karışımın ise B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir.

1500, 2000 ve 2500 ms yük tekrar sürelerinde elde edilen sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.34–4.36'da verilmiştir. Sünme modüllerinde 500 yük tekrarından sonraki azalma net olarak görülmediğinden örnek olarak 2000 yük tekrarından sonraki

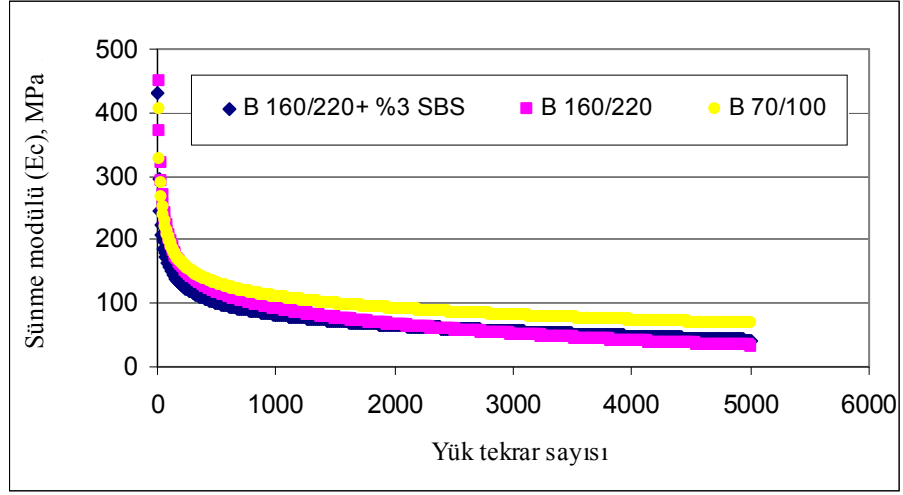
1500 ms yükleme periyodundaki sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.37’de verilmiştir.



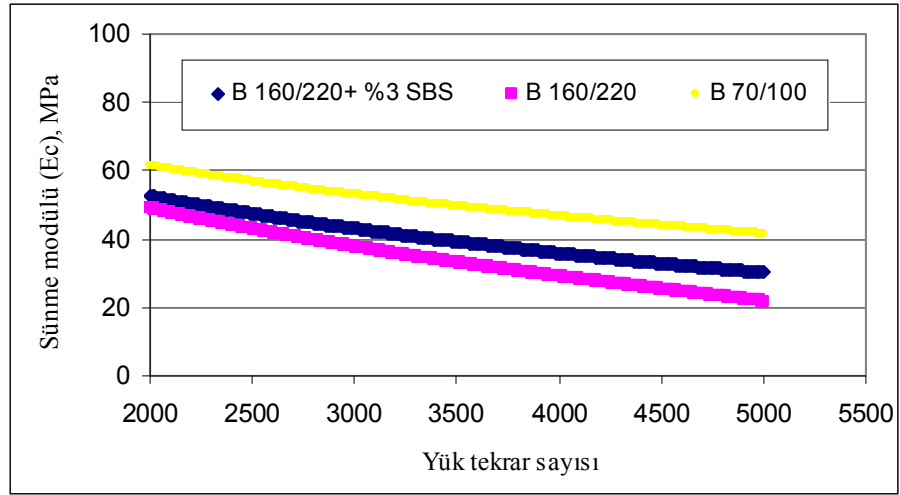
Şekil 4.34. 1500 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.35. 2000 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.36. 2500 ms yük periyodunda sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi

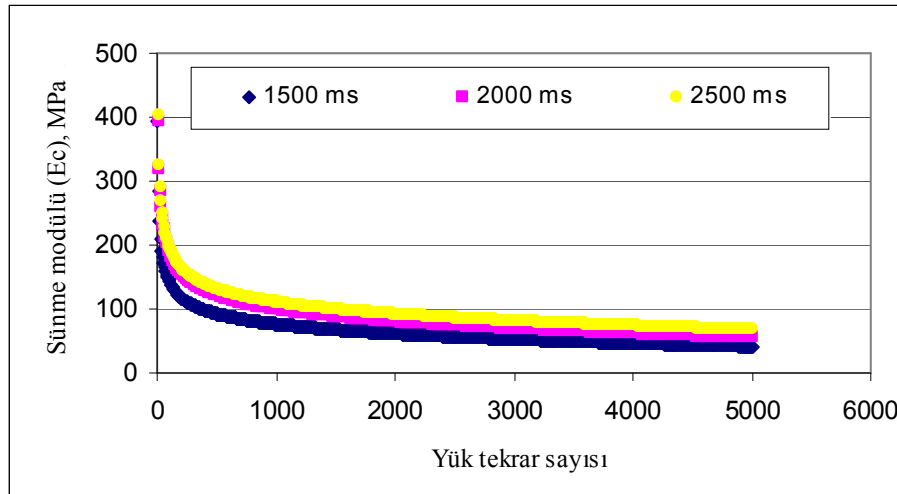


Şekil 4.37. 1500 ms yük periyodunda 2000 yük tekrarından sonra sünme modülü-yük tekrar sayısı ilişkisi

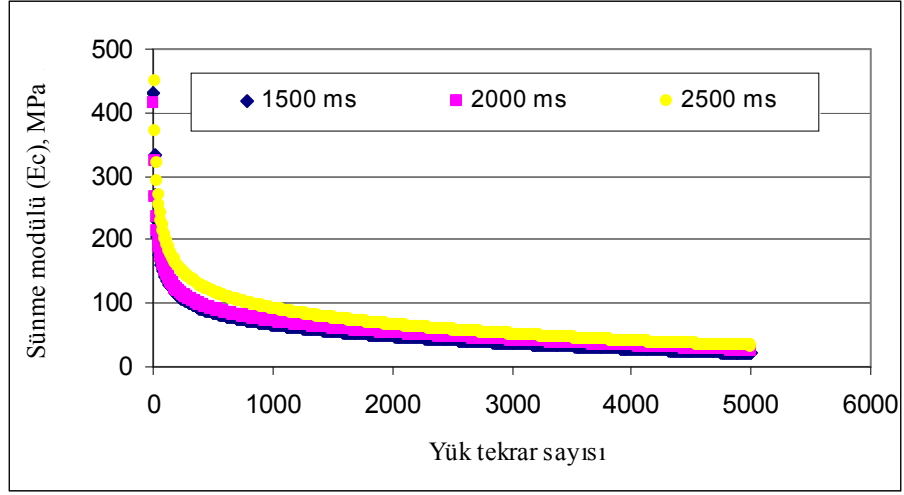
Şekil 4.34-4.36'da görüldüğü üzere bütün yükleme periyotlarında en düşük sünme modülü değerine B 160/220 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların, en yüksek sünme modülü değerine ise B 70/100 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımların sünme modülleri ilk 500 yük tekrarına kadar hızlı olarak azalmış daha sonra sünme modülündeki azalma miktarı düşmüştür. Başlangıçtaki hızlı düşüş karışımlarda konsolidasyondan kaynaklanan sıkışmanın meydana gelmesinden kaynaklanmıştır.

1500 ms yük periyodunda 5000 yük tekrarı sonunda B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %38,3 daha yüksek, B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü ise %90,7 daha yüksek çıkmıştır. 2000 ms yük periyodunda 5000 yük tekrarı sonunda B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü, B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %33,9 daha yüksek çıkarken B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü ise %117,1 daha yüksek çıkmıştır. 2500 ms yük periyodunda 5000 yük tekrarı sonunda B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre %27,5 daha yüksek, B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modülü ise %105,6 daha yüksek çıkmıştır.

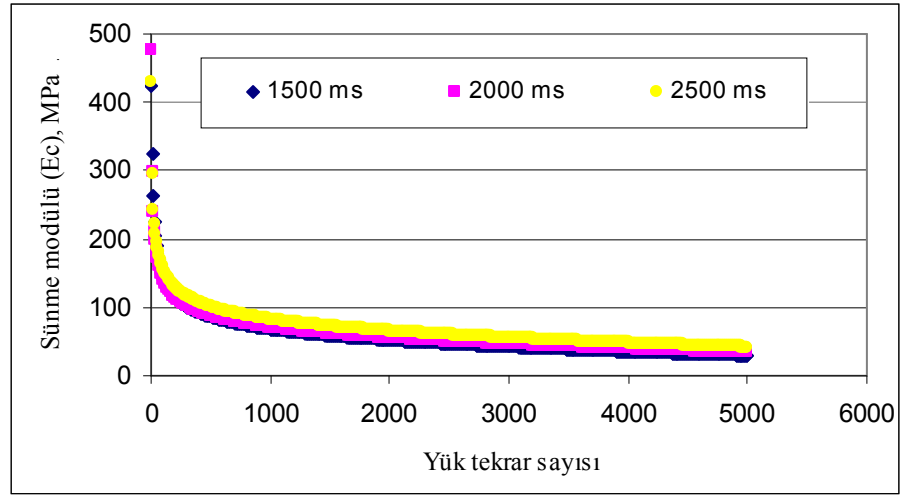
Farklı yükleme periyotlarında B 70/100 bitümü, B 160/220 bitümü ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme modüllerinin 5000 yük tekrarı kadar değişimi sırasıyla Şekil 4.38-40'ta verilmiştir.



Şekil 4.38. B 70/100 ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi



Şekil 4.39. B 160/220 ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi



Şekil 4.40. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi

Şekil 4.38-40'ta görüldüğü üzere yükleme periyodu arttıkça sünme modülü değeri de artmıştır. Dolayısıyla yük tekrar periyodu azaldıkça bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımları azalmıştır. Şekil 4.38'de görülen B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların E_c değerlerinin yük tekrarı ile değişimi incelendiğinde yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile 5000 yük tekrarı sonunda E_c değeri %32,0 artarken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %62,9 artmıştır.

Şekil 4.39 incelendiğinde B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda 5000 yük tekrarı sonunda yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile E_c değeri %16,0 artarken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %51,1 artmıştır. Şekil 4.40 incelendiğinde %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 5000 yük tekrarı sonunda yük periyodunun 1500 ms.'den 2000 ms.'ye yükselmesi ile E_c değeri %12,3 artarken 2500 ms.'ye yükselmesi ile %39,3 artmıştır. Elde edilen değerlerden yükleme periyodundan en fazla etkilenen karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, en az etkilenen karışımın ise %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir.

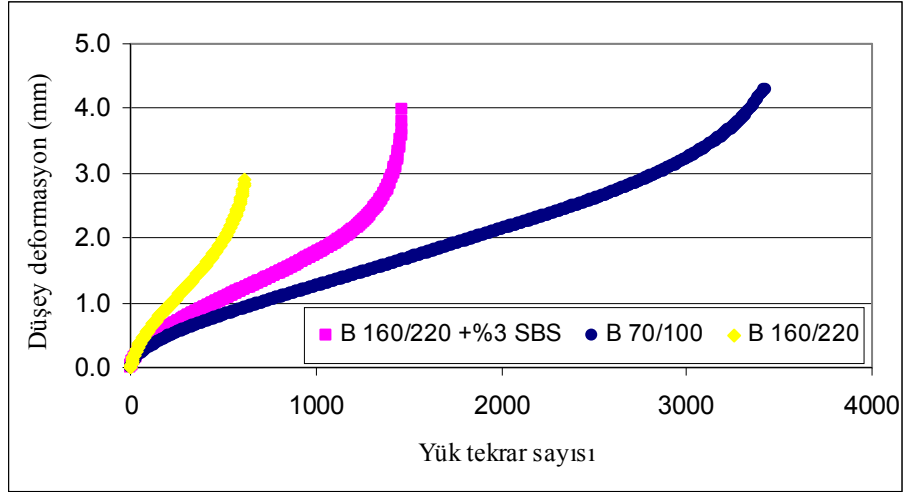
Sünme deneyleri sonucunda aynı performans seviyelerine sahip olmalarına rağmen B 70/100 saf bitümü ve %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme davranışlarının farklı olduğu belirlenmiştir. Üç karışım değerlendirildiğinde kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, kalıcı deformasyona karşı dayanımı en düşük olan karışımların ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Yükleme periyotları değerlendirildiğinde ise en fazla etkilenen karışımların B 70/100 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, en az etkilenen karışımların ise %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir.

4.6. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

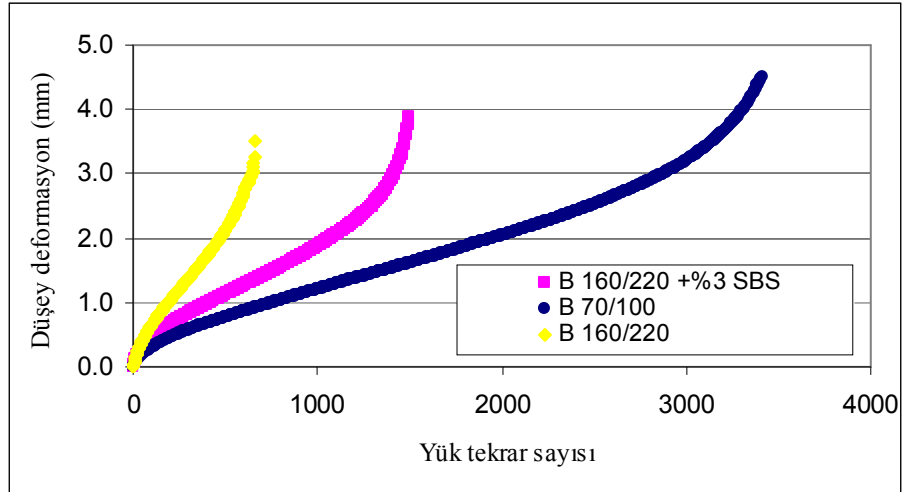
İndirekt çekme yorulma deneyi, B 70/100 sınıfı saf bitüm, B 160/220 sınıfı saf bitüm ve B 160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deney 300 kPa gerilme seviyesinde uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Deney üç farklı yükleme periyodunda (1500, 2000 ve 2500 ms.) yapılmıştır. ITSM deneyinde olduğu gibi yükleme periyodunun 124 ms.si yük etki süresi olarak ayarlanmıştır.

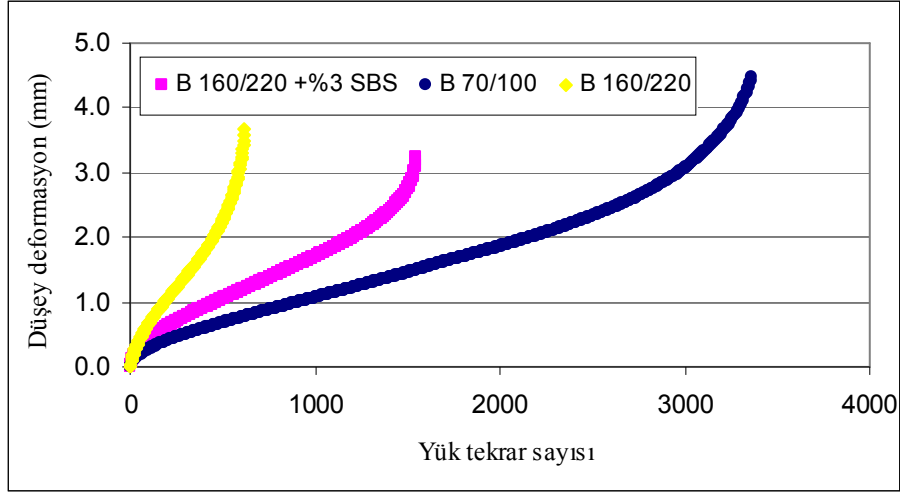
Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. 1500, 2000 ve 2500 ms yük tekrar sürelerinde elde edilen düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 4.41–4.43’te verilmiştir.



Şekil 4.41. 1500 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



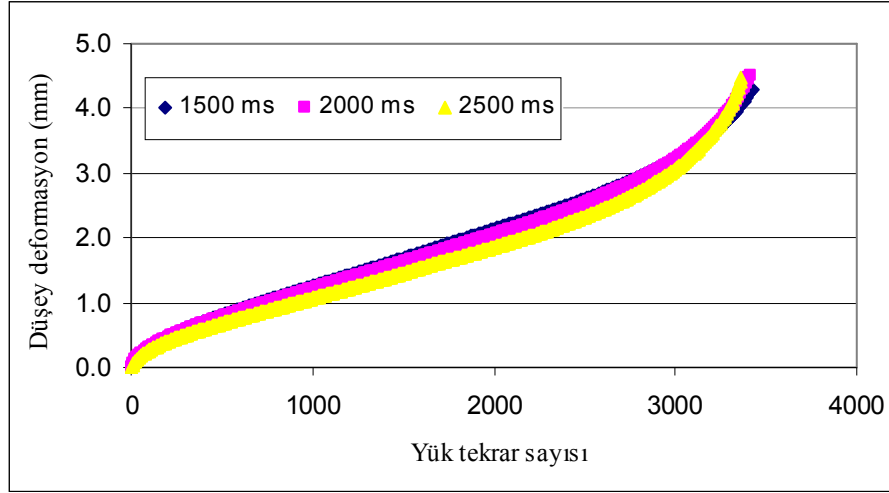
Şekil 4.42. 2000 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



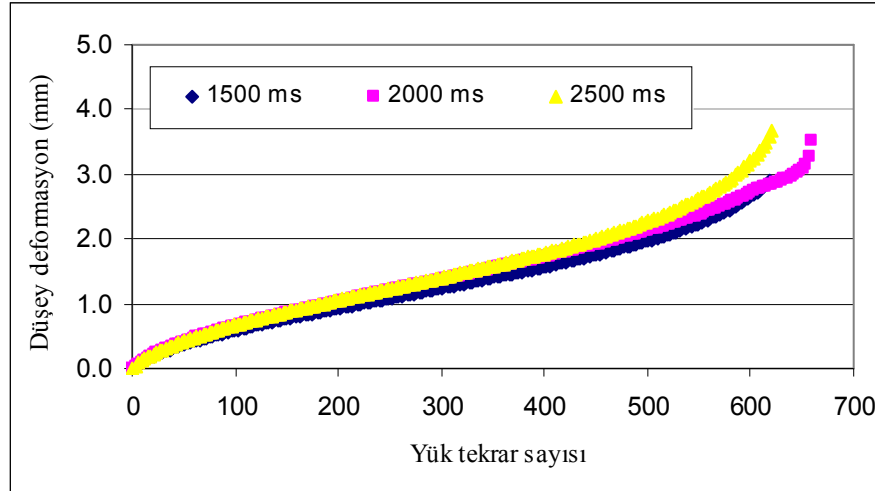
Şekil 4.43. 2500 ms yük periyodunda düşey deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.41–43'te görüldüğü üzere bütün yük periyotlarında en fazla düşey deformasyonun B 160/220 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlarda, en düşük düşey deformasyonun ise B 70/100 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlarda olduğu belirlenmiştir. En düşük kırılmaya kadarki yük tekrarına 1500 ms yük tekrar periyodunda B 160/220 bitümü ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların (618) sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımları değerlendirmek amacıyla 3 mm deformasyondaki yük tekrar sayıları karşılaştırılmıştır. 1500 ms yük tekrar periyodunda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrarının 618 olduğu belirlenmiştir. %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısının B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre 2,3 kat, B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise 4,6 kat fazla olduğu belirlenmiştir. 2000 ms yük tekrar periyodunda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrarının 642 olduğu belirlenmiştir. %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısının B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre 2,2 kat, B 70-100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise 4,5 kat fazla olduğu belirlenmiştir. 2500 ms yük tekrar periyodunda B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrarının 588 olduğu belirlenmiştir. %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlarda 3 mm deformasyona neden olan yük tekrar sayısının B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre 2,6 kat, B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlarda ise 5,1 kat fazla olduğu belirlenmiştir.

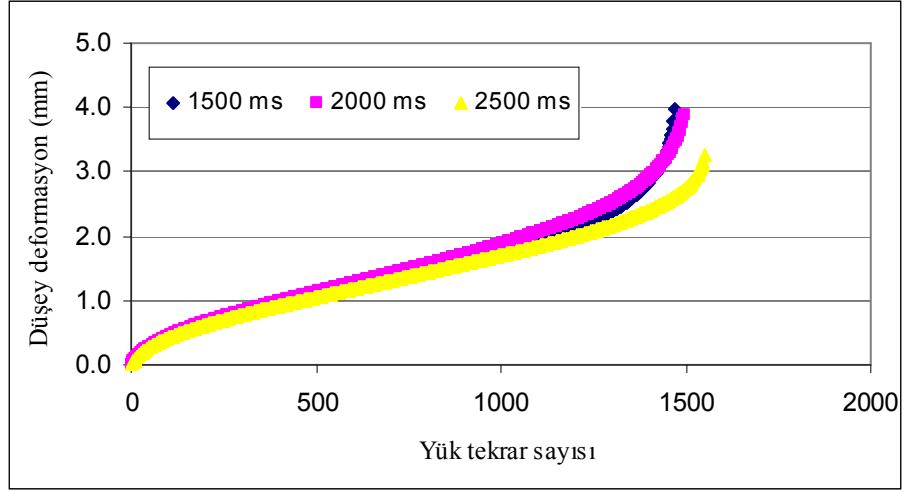
Farklı yükleme periyotlarında B 70/100 bitümü, B 160/220 bitümü ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların kalıcı birim şekil değiştirmelerinin yük tekrarı ile değişimi sırasıyla Şekil 4.44-46’da verilmiştir.



Şekil 4.44. B 70/100 ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi



Şekil 4.45. B 160/220 ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi



Şekil 4.46. B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların düşey deformasyon değerlerinin farklı yükleme periyotlarında değişimi

Şekil 4.44–46’da görüldüğü üzere her üç bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda deformasyon ve bozulmaya neden olan yük tekrar sayılarının yük tekrar periyoduyla önemli oranda değişmediği belirlenmiştir. Bu durum 300 kPa gerilme seviyesinde yük tekrar periyodunun karışımların yorulma ömürleri üzerinde etkin olmadığını göstermektedir.

Yorulma deneyleri sonucunda aynı performans seviyelerine sahip olmalarına rağmen B 70/100 saf bitümü ve %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların yorulma davranışlarının farklı olduğu belirlenmiştir. Üç karışım değerlendirildiğinde yorulma dayanımı en yüksek karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, yorulma dayanımı en düşük olan karışımların ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Yük tekrar periyotları değerlendirildiğinde ise 300 kPa gerilme seviyesinde yük tekrar periyodunun karışımların yorulma ömürleri üzerinde etkin olmadığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, Superpave sistemine göre aynı performans seviyesine ait bağlayıcılarla optimum bitüm içeriklerinde hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların indirekt çekme rijitlik modülleri, kalıcı deformasyona karşı dayanımları ve yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca SBS ile bitüm modifikasyonunun karışımların mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan bütün karışımların hacimsel özellikleri ve Marshall Stabilité değerleri karşılaştırılmıştır. Dinamik sünmeye ve indirekt çekme yorulma deneyleri üç farklı yük tekrar periyodunda uygulanmış, böylece yük tekrar periyodunun karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarına ve yorulma ömürlerine etkisi değerlendirilmiştir.

B 160/220 saf bitümüne farklı oranlarda SBS ilave edilerek Superpave bağlayıcı deney sonuçları B 70/100 saf bitümü ile karşılaştırılmış, Superpave bağlayıcı deneyleri sonucunda B 70/100 bitümünün performans seviyesinin PG 64–34 olduğu, sadece %2 ve %3 SBS içeren bağlayıcıların aynı performans seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir. DSR deney sonuçlarından B 70/100 bağlayıcısına en yakın sonuçlara %3 SBS içeren bağlayıcının sahip olduğu belirlenmiş, bu nedenle çalışmada kullanılacak SBS içeriği %3 olarak belirlenmiştir.

Karışımlar içerisinde optimum bitüm içeriği en düşük olan karışımın B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, optimum bitüm içeriği en yüksek olan karışımın %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir. SBS modifikasyonu nedeniyle karışımların bitüm ihtiyacı artmıştır. Optimum bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların hacimsel özelliklerinin birbirine yakın olduğu, şartname kriterini sağladığı belirlenmiştir. Stabilité değerleri karşılaştırıldığında en yüksek stabilité değerine B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımların, en düşük stabilité değerine ise B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Marshall oranı değerleri incelendiğinde ise bütün karışımların Marshall oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu, değerler arasında %5’den daha az farklılık olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımların akma değeri en düşük olsa da bu bitüm ile hazırlanan karışımların Stabilité değeri düşük olduğundan B 160/220 bitümü ile hazırlanan karışımın Marshall oranı değeri diğer karışımlara göre daha düşük çıkmıştır.

İndirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçlarından en yüksek ITSM değerine B 70/100 bitümü içeren karışımların sahip olduğu, en düşük ITSM değerine ise B 160/220 bitümü içeren karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. ITSM deney sonuçlarından B160/220 + %3 SBS ile bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin artacağı söylenebilmektedir.

Dinamik sünme deneyleri sonucunda aynı performans seviyelerine sahip olmalarına rağmen B 70/100 saf bitümü ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sünme davranışlarının farklı olduğu belirlenmiştir. Üç karışım değerlendirildiğinde kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, kalıcı deformasyona karşı dayanımı en düşük olan karışımların ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, yükleme periyotları değerlendirildiğinde ise en fazla etkilenen karışımların B 70/100 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, en az etkilenen karışımların ise B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda aynı performans seviyelerine sahip olmalarına rağmen B 70/100 saf bitümü ve B160/220 + %3 SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların yorulma davranışlarının farklı olduğu belirlenmiştir. Üç karışım değerlendirildiğinde yorulma dayanımı en yüksek karışımların B 70/100 bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, yorulma dayanımı en düşük olan karışımların ise B 160/220 saf bitümü ile hazırlanan karışımlar olduğu, yük tekrar periyotları değerlendirildiğinde ise 300 kPa gerilme seviyesinde yük tekrar periyodunun karışımların yorulma ömürleri üzerinde etkin olmadığı belirlenmiştir.

Bütün deney sonuçlarından %3 SBS kullanımı ile karışımların özelliklerinin önemli derecede iyileştirildiği, ayrıca Superpave sistemine göre aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımların benzer davranış sergilemesi beklenmesine rağmen rijitliklerinin, kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının ve yorulma ömürlerinin önemli oranda farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu da Superpave sisteminin modifiye karışımlarda çok da tutarlı olmadığını göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Geçkil, T.**, 2008. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
- [4] **Ahmedzade P, Kuloğlu N, Ahmedzade M, Karakaş A. S., Yılmaz M., Kuloğlu M.**, “Saf ve SBS Modifiyeli Bitümlerin Klasik ve Superpave Yöntemleriyle Reolojik Yapılarının İncelenmesi” DPT, Proje No: 2005K120440.
- [5] **A.I. Al-Hadidy, Tan Yi-qiu**, Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements, *Materials and Design* 30 (2009) 1133–1140.
- [6] **Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., Shafigh,P.**, Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials and Design* 32 (2011) 4844–4849.
- [7] **Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., Sholar, G.**, Guidelines for Use of Modified Binders, Florida Department of Transportation Project Number: 4910-4504-964-12, 2005.
- [8] **Kok, B.V. and Yılmaz, M.**, The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt, *Constr Build Mater* **23** (2009), pp. 1999–2006.
- [9] **Ozen, H.**, Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples, [Volume 25, Issue 2](#), February 2011, Pages 756-765.
- [10] **Khodaii, A., Mehrara, A.**, Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2586–2592.

- [11] **Birlikler, R.Y.**, 1998, Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu tip bitümlü karışımların davranışlarının araştırılması ve bir yorulma eğrisi tahmin modeli, PhD thesis, İTÜ, In Turkish.
- [12] **Gorkem, C., Sengoz B.**, Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2227–2236.
- [13] **Yilmaz, M. And Kok, B.V.** Effects of **ferrochromium slag** with neat and polymer modified binders in hot bituminous mix, *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, 2009, Vol. 16 (5), 310-318
- [14] **Kumar, P., Chandra, S., Bose, S.** 2006. Strength Characteristics of Polymer Modified Mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 7, 63 – 71.
- [15] **Lu, X. and Isacsson, U.**, 2000. Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens, *Construction and Building Materials*, 14, 79-88.
- [16] **Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R.**, 1993. Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, 178-186.
- [17] **D'angelo J.**, Modified Binders and Superpave Plus Specifications, http://www.asphaltinstitute.org/public/engineering/PDFs/Superpave/Modified_Binders_SP_Plus_Specification.pdf
- [18] **Wasage, T.L.J., Stastna J., and Zanzotto L.**, Comparison of the rutting potential of paving mixes produced from different asphalt binders with the same superpave high-temperature performance, *Can. J. Civ. Eng.* 37: 1406–1413 (2010).
- [19] **Whiteoak, D. ve Read, J.**, 2003. *The Shell Bitumen Handbook*, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.
- [20] İSFALT bilimsel yayınları, Asfalt ve Uygulamaları, No : 1, 280 s., 2001.
- [21] Karayolları Genel Müdürlüğü, 2011. Karayolları Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü.
- [22] **TS 118 EN 2146**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – İğne Batma Derinliği Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [23] **TS 120 EN 1427**, 2002. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar - Yumuşama Noktası Tayini – Halka ve Bilye Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara

- [24] **Zaniewski, J.P. ve Pumphrey, M.E.**, 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, p. 107, Morgantown, West Virginia.
- [25] **AASHTO TP5-98**, 1998. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [26] **McGennis, R.B., Shuler, S. ve Bahia, H.U.**, 1994. Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069*, 104 p., Washington, DC.
- [27] **AASHTO TP48**, 1997. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [28] **McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W. ve Solaimanian, M.**, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003*, 172 p., Washington, DC.
- [29] **Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Antle, C.E. ve Sharma, M.G.**, 1994. Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, *Strategic Highway Research Program, SHRP A-370*, 197 p., National Research Council Washington, DC.
- [30] **Yılmaz M.**, 2011. Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [31] **TS EN 12607-1**, 2003. Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar – Sıcaklık ve Havanın Etkisiyle Sertleşmeye Karşı Direncin Tayini – Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [32] **AASHTO PP1-98**, 1998. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [33] **AASHTO TP1-98**, 1998. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, Washington DC.
- [34] **TS EN 12697-34+A1**, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları İçin Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- [35] **Çolak H.**, 2010. Öğütölmüş araç lastiğinin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [36] **Ullidtz, P.**, 1987. Pavement Analysis, Elsevier, pp. 318, Amsterdam

ÖZGEÇMİŞ

Aykut Fatih KORAL, 1988 yılında Elazığ'da doğmuş, ilköğretimi ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır. 2005 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2009 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Elazığ'da özel bir firmada İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya başlamış, 2010 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.