

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STİREN-BUTADİEN-STİREN VE GİLSONİT'İN BİRLİKTE
KULLANIMININ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Özge ERDOĞAN YAMAÇ
131115101

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

AĞUSTOS-2015

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**STİREN-BUTADİEN-STİREN VE GİLSONİT'İN BİRLİKTE
KULLANIMININ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Özge ERDOĞAN YAMAÇ

131115101

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 Ağustos 2015

AĞUSTOS-2015

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STİREN-BUTADİEN-STİREN VE GİLSONİT'İN BİRLİKTE KULLANIMININ
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Özge ERDOĞAN YAMAÇ
131115101

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Ağustos 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ağustos 2015

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet YILMAZ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Necati KULOĞLU
Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV

AĞUSTOS-2015

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmasının her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimi ve tecrübeleriyle her konuda yol göstericim olan, gerek akademik gerekse sosyal hayatındaki özverili tutumu ile örnek aldığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a desteği ve anlayışı için gönülden teşekkür ederim.

Bilgilerinden istifade ettiğim ve her konuda ufkumu açan bölümümüzün değerli hocaları Prof. Dr. Necati KULOĞLU'na, Doç. Dr. Baha Vural KÖK'e ve Doç. Dr. Taner ALATAŞ'a, PAV deneyi ile ilgili yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e şükranlarımı sunarım.

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve yardımına koşan Arş. Gör. M. Ertuğrul ÇELOĞLU'na, Arş. Gör. Erkut YALÇIN'a ve laboratuvar teknisyenimiz Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi yönden 214M669 nolu 1002 projesi ile tezimi ve yüksek lisans eğitimim boyunca 2210-A Yurtiçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederim.

Son olarak dualarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve eşime sonsuz teşekkür ederim.

Özge ERDOĞAN YAMAÇ

Elazığ-2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	3
3. YÜKSEK PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA(SUPERPAVE) TASARIM YÖNTEMİ	13
3.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi.....	14
3.2. Superpave Agrega Şartnamesi	15
3.2.1. Agrega Mutabakat Özellikleri.....	15
3.2.2. Agrega Kaynak Özellikleri	15
3.2.3. Tasarım Agrega Gradasyonu	15
3.3. Karışımların Hacimsel Özellikleri	17
3.4. Superpave Karışım Tasarımı.....	18
3.4.1. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı	18
4. DENEY YÖNTEMLERİ.....	20
4.1. Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deneyler	20
4.1.1. Penetrasyon Deneyi	20
4.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi	21
4.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	23
4.1.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi.....	25

4.1.5.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi	31
4.1.6.	Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri	34
4.1.6.1.	Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)	35
4.1.6.2.	Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi	36
4.2.	Agrega Deneyleri	37
4.2.1.	Los Angeles Aşınma Deneyi	37
4.2.2.	Mikro-Deval Deneyi	38
4.2.3.	Magnezyum Sülfat Deneyi	39
4.2.4.	Metilen Mavisı Deneyi	40
4.3.	Karışım Deneyleri	42
4.3.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	42
4.3.2.	Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi	43
4.3.3.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	46
4.3.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	47
4.3.5.	Dinamik Sünme Deneyi	49
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA	53
5.1.	Katkı Oranlarının Belirlenmesi	57
5.2.	Konvansiyonel Bağlayıcı Deneyleri	66
5.2.1.	Penetrasyon Deney Sonuçları	66
5.2.2.	Yumuşama Noktası Deney Sonuçları	67
5.2.3.	Bitümlü Bağlayıcıların Özgül Ağırlıkları	67
5.3.	Agrega Deney Sonuçları	68
5.4.	Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi	69
5.4.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları	74
5.4.2.	Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları	78
5.4.3.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	81
5.4.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	83
5.4.5.	Dinamik Sünme Deney Sonuçları	100
6.	SONUÇLAR	110
	KAYNAKLAR	110
	ÖZGEÇMİŞ	121

ÖZET

Çalışmada, stiren-butadien-stiren (SBS) ve Amerikan Gilsoniti'nin (AG) bitüm modifikasyonunda birlikte kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Superpave yöntemine göre Şanlıurfa ili için uygun bağlayıcı performans seviyesinin PG 76-10 olduğu belirlenmiştir. Öncelikle sadece SBS ve Amerikan Gilsoniti kullanılarak Şanlıurfa için uygun performans seviyesine sahip modifiye bitümler (PG 76-16) elde edilmiştir. Ardından SBS modifiyeli bitümlerde SBS içeriği azaltılarak yerine farklı oranlarda Amerikan Gilsoniti ilave edilmiştir. Böylece Şanlıurfa için uygun performans seviyesine sahip 3 farklı SBS+Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitüm elde edilmiştir. Saf, 2 tane tek bir katkı içeren (%5 SBS ve %18 AG) ve 3 tane iki farklı katkı içeren (%4 SBS + %6 AG, %3 SBS + %10 AG ve %2 SBS + %13 AG) aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Böylece SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanımının stabilite, nem hasarı, rijitlik, yorulma ve kalıcı deformasyona karşı etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda katkı kullanımı ile bağlayıcıların reolojik özelliklerinin iyileştiği, bütün katkıların, karışımların stabilite, nem hasarına karşı dayanım, rijitlik, yorulma ömrü ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını olumlu yönde etkiledikleri belirlenmiştir. Marshall stabilite, Marshall oranı, çekme dayanımı, akma sayısı ve sünme modülü değerleri üzerinde en etkin katkıların %18 AG ve %3 SBS + %10 AG olduğu, rijitlik ve yorulma ömrü üzerinde en etkin katkıların %18 AG, %2 SBS + %13 AG ve %3 SBS + %10 AG kullanımı olduğu, nem hasarına karşı dayanım üzerinde en etkin katkıların %5 SBS, %2 SBS + %13 AG ve %3 SBS + %10 AG olduğu, karışımların elastikiyetini en fazla arttıran katkının %5 SBS kullanımı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar dikkate alındığında tek başına SBS veya AG kullanımı yerine SBS ve AG'nin birlikte kullanılmasının daha faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, Superpave, Modifikasyon, Gilsonit, Stiren-butadien-stiren.

SUMMARY

Investigation of the Effects of Using Styrene-Butadiene-Styrene in Conjunction with Gilsonite on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts

In this study, the effect of the combined use of styrene-butadiene-styrene (SBS) and the American Gilsonite (AG) modifications on rheological properties of bituminous binders and mechanical properties of hot mix asphalts was investigated. Suitable binder performance level for Sanliurfa province was determined to be PG 76-10 according to the Superpave method. Firstly, the modified bitumen (PG 76-16) with an appropriate performance level for Şanlıurfa was obtained using SBS and American Gilsonite only. Then, the SBS content in SBS-modified bitumens was reduced, and American Gilsonite at different portions was added instead. Thus, at least 3 different modified bitumens with SBS + American Gilsonite with an appropriate level of performance for Şanlıurfa was obtained. Sample mixtures were prepared with 2 binders containing a single additive (5% SBS ve 18% AG) and at least 3 binders containing two different additives (4% SBS + 6% AG, 3% SBS + 10% AG ve 2% SBS + 13% AG), which have the same performance level. Marshall stability and flow, resistance to moisture damage, indirect tensile stiffness modulus, indirect tensile fatigue and dynamic creep tests were applied to hot mix asphalt samples prepared in the design bitumen content. Thus, the effect of the use of American Gilsonite in conjunction with SBS on stability, moisture damage, stiffness, permanent deformation was tried to determine.

As a result of the experiments in aforementioned study, improvement of the rheological properties of the binder, positive effect on the mix of all additives stability, resistance to moisture damage, stiffness, fatigue life and resistance to permanent deformation with the use of additive was determined. The most effective additives as 18% AG and 3% SBS + 10% AG on Marshall stability, Marshall quotient, tensile strength, flow number and the creep modulus, the most effective additives as 18% AG, 2% SBS + 13% AG and 3% SBS + 10% AG on stiffness and fatigue life, the most effective additives as 5% SBS, 2% SBS + 13% AG and 3% SBS + 10% AG on the resistance to moisture damage, the use of 5% SBS as the additive which increased the elasticity of mixture most were determined. When considering all the results, the conclusion was reached that instead of the use of alone SBS or AG, the combined use of SBS and AG is more beneficial.

Keywords: Hot mix asphalt, Superpave, Modification, Gilsonite, Styrene-butadiene-styrene.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bitümlü bağlayıcı davranışının sıcaklıkla değişimi	3
Şekil 2.2. SBS polimerinin yapısı	4
Şekil 2.3. SBS - bitüm etkileşimi	4
Şekil 2.4. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'nin yapısı	5
Şekil 2.5. Gilsonit'in kayaç ve işlenmiş görünümü	7
Şekil 3.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı	13
Şekil 3.2. Superpave gradasyon limitleri	16
Şekil 3.3. Sıkışmış BSK numunesinin bileşen diyagramı	17
Şekil 3.4. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı	19
Şekil 4.1. Penetrasyon deney aleti	20
Şekil 4.2. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları	21
Şekil 4.3. Yumuşama noktası deney düzeneği	22
Şekil 4.4. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması	23
Şekil 4.5. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi	24
Şekil 4.6. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem	24
Şekil 4.7. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli	26
Şekil 4.8. Viskoelastik davranış	27
Şekil 4.9. Numunenin DSR deney aletine yerleşimi	28
Şekil 4.10. Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme- deformasyon ilişkisi	29
Şekil 4.11. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi	29
Şekil 4.12. Kayma modülünün bileşenleri	29
Şekil 4.13. Kiriş eğme reometresinin (BBR) şematik görünüşü	31
Şekil 4.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) numunesinin şematik görünüşü	32
Şekil 4.15. BBR deneyinde kullanılan kalıplar ve numune	33
Şekil 4.16. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi	34
Şekil 4.17. Dönel ince film etüvü (RTFOT) aleti şematik görünüşü	35

Şekil 4.18. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve parçaları.....	36
Şekil 4.19. Los Angeles deney aleti ve deney numuneleri.....	38
Şekil 4.20. Mikro-Deval deney aleti ve deney numuneleri	39
Şekil 4.21. Magnezyum sülfat deneyi	40
Şekil 4.22. Metilen mavisi deneyi	41
Şekil 4.23. Marshall stabilite ve akma aleti	42
Şekil 4.24. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması.....	44
Şekil 4.25. Çekme dayanımı deney düzeneği.....	45
Şekil 4.26. UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği	47
Şekil 4.27. Yorulma deney düzeneği.....	48
Şekil 4.28. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği.....	48
Şekil 4.29. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi.....	50
Şekil 4.30. Dinamik sünme deney düzeneği	51
Şekil 4.31. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi	51
Şekil 4.32. Akma sayısının bulunması	52
Şekil 5.1. Şanlıurfa için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı	55
Şekil 5.2. Şanlıurfa için bağlayıcı sınıfı seçimi.....	56
Şekil 5.3. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı	57
Şekil 5.4. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi	63
Şekil 5.5. Modifikasyon indeksi değerlerinin sıcaklıkla değişimi	64
Şekil 5.6. %18 AG içeren modifiye bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği.....	65
Şekil 5.7. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	65
Şekil 5.8. Penetrasyon deney sonuçları	66
Şekil 5.9. Yumuşama noktası deney sonuçları.....	67
Şekil 5.10. Saf ve modifiye bitümlerin özgül ağırlıkları.....	68
Şekil 5.11. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların tasarım değerleri	72
Şekil 5.12. Marshall stabilitesi – katkı türü ve koşullandırma ilişkisi	74
Şekil 5.13. Karışımların akma değerlerinin katkı kullanımı ve koşullandırmayla değişimi.....	75
Şekil 5.14. Karışımların MQ değerlerinin katkı kullanımı ve koşullandırma ile değişimi	76
Şekil 5.15. Karışımların RMS değerlerinin katkı türü ile değişimi	77
Şekil 5.16. Karışımların çekme dayanımı değerlerinin katkı türü ve koşullandırma ile değişimi	79

Şekil 5.17. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların TSR değerleri	80
Şekil 5.18. Katkı kullanımının ITSM değerleri üzerindeki etkisi	82
Şekil 5.19. Sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkisi	83
Şekil 5.20. PG 52-28 ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	85
Şekil 5.21. MB _{5S} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	85
Şekil 5.22. MB _{18G} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	85
Şekil 5.23. MB _{2S+13G} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	86
Şekil 5.24. MB _{3S+10G} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	86
Şekil 5.25. MB _{4S+6G} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	86
Şekil 5.26. PG 52-28 ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	87
Şekil 5.27. MB _{5S} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	87
Şekil 5.28. MB _{18G} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	87
Şekil 5.29. MB _{2S+13G} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	88
Şekil 5.30. MB _{3S+10G} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi.....	88
Şekil 5.31. MB _{4S+6G} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	88
Şekil 5.32. Karışımların Ni değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	94
Şekil 5.33. Karışımların Nf değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi.....	94
Şekil 5.34. Karışımların Np değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	94
Şekil 5.35. Karışımların Nmak değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	95
Şekil 5.36. 300 kPa gerilme seviyesinde karışımların Ni, Nf, Np ve Nmak değerleri.....	95
Şekil 5.37. 350 kPa gerilme seviyesinde karışımların Ni, Nf, Np ve Nmak değerleri.....	96

Şekil 5.38. Karışımların δ_i değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	97
Şekil 5.39. Karışımların δ_f değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	97
Şekil 5.40. Karışımların δ_{mak} değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	98
Şekil 5.41. Karışımların r_p değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi	99
Şekil 5.42. Karışımların akma sayısının bulunmasına bir örnek.....	101
Şekil 5.43. 600 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c – yük tekrar sayısı ilişkisi	102
Şekil 5.44. 500 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c – yük tekrar sayısı ilişkisi	103
Şekil 5.45. Karışımların akma değerlerinin katkı türü ile değişimi	106
Şekil 5.46. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin katkı türü ile değişimi	107
Şekil 5.47. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki sünme modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi	107
Şekil 5.48. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki esneklik modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi	108

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Bağlayıcıya uygulanan Superpave bağlayıcı deneyleri ve amaçları.....	14
Tablo 4.1. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar.....	21
Tablo 4.2. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri.....	30
Tablo 4.3. Bağlayıcı Sınıfına Göre Uygulanacak PAV Deney Sıcaklıkları.....	37
Tablo 5.1. Şanlıurfa'nın 21 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri	53
Tablo 5.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları	54
Tablo 5.3. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları.....	55
Tablo 5.4. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları	58
Tablo 5.5. Çalışmada kullanılacak bağlayıcılar ve kısaltmaları.....	59
Tablo 5.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları.....	60
Tablo 5.7. PG 52-Y ve PG 76-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi	62
Tablo 5.8. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları	63
Tablo 5.9. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri.....	69
Tablo 5.10. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu.....	69
Tablo 5.11. Saf ve modifiye karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları.....	70
Tablo 5.12. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri	71
Tablo 5.13. 300 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları	90
Tablo 5.14. 350 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları	92
Tablo 5.15. 600 kPa gerilme seviyesinde karışımların dinamik sünme deney sonuçları.....	104
Tablo 5.16. 500 kPa gerilme seviyesinde karışımların dinamik sünme deney sonuçları.....	105

SEMBOLLER LİSTESİ

s	: Standart sapma
T_{20mm}	: Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı
T_{havamaks}	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı
E	: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi
T_{min}	: Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı
T_{havamin}	: En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı
G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
Vba	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
Pb	: Bağlayıcı yüzdesi
Ps	: Agregaya yüzdesi
Gb	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
Va	: Hava boşluğu hacmi
Vbe	: Efektif bağlayıcı hacmi
Wb	: Toplam agregaya ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı
Gmm	: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı
Gmb	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
P_{0.075}	: Karışımında kullanılan 0.075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agregaya karışımındaki ağırlıkça yüzdesi
Gb	: Asfaltın özgül ağırlığı
Gse	: Agregaya karışımının efektif özgül ağırlığı
VMA	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
DP	: Filler oranı
h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doymuşluk derecesi
I	: Hava boşluğu hacmi
V	: Numune hacmi
TS	: Çekme dayanımı
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
TS_{yaş}	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
F	: İndirekt çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
L	: Ortalama numune yüksekliği

R	: Poisson oranı
N_f	: Yorulma ömrü
r_f	: Çatlak ilerleme oranı
N_p	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
δ_f	: Bozulma anında toplam deformasyon
δ_i	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu
N_i, N_f, N_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
δ_i, δ_f, δ_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları
R²	: Belirtme katsayısı

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DDT	: Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kayma Reometresi)
ETDY	: Eşdeğer standart tek dingil yükü
IÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü)
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basıncılı Yaşlandırma Aleti)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavement (Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama)
TSR	: Çekme Dayanımı Oranı
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UTM	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)

1. GİRİŞ

Orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak ve üst yapıdaki diğer tabakaları çevre koşullarının olumsuz etkilerinden korumak için yapılan bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama tabakaları, bitüm ve agreganın ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar; agregası, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluğundan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Bitümlü sıcak karışımların özellikleri; farklı agregası gradasyonlarının, bağlayıcı-agregası kombinasyonlarının ve modifikasyon tekniklerinin kullanılmasına göre değişmektedir.

Esnek üstyapılar; alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Taşıt lastiklerinin temas ettiği ve üstyapının en pahalı kısmı olan kaplama tabakası; sathi kaplamadan bitümlü sıcak karışıma (BSK) kadar değişik yöntemlerle inşa edilebilmektedir. Sathi kaplamalar uygun temel üzerine uygulanan bitüm ve daha sonra da agreganın serilip sıkıştırılması şeklinde yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar ise hem dayanıklı hem de pahalı bir kaplama türüdür. BSK'lar sabit bir tesiste agregası ve bitümün ısıtılması ve karıştırılması, daha sonra uygulama yerine taşınarak belirli bir sıcaklıkta sıkıştırılması şeklinde uygulanmaktadır. BSK'larda agregası, karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini; bitümlü bağlayıcı ise kohezyonu sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcı ayrıca agregası tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, düzgün yüzeyler sağlayarak sürüş konforunu arttırmakta, karışımın stabilitesini arttırmakta ve boşlukları doldurarak geçirimsizliği sağlamaktadır.

Esnek üstyapı kaplamalarında, artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirmek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını arttırmak amacıyla bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek özellikleri iyileştirilmiş modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir (Lav ve Lav, 2004; Francken, 1998; Nicholls, 1998).

Modifikasyon işlemi ya katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile yada asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir.

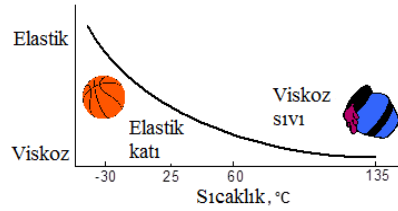
Modifiye bitüm üretilmesinde elastomer ve plastomer polimerlerin yanı sıra polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri ile göl asfaltları, kaya asfaltları ve Gilsonitler gibi doğal katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Doğal asfaltlar metamorfoz (başkalaşım) derecelerine göre sınıflandırılmaktadır. Metamorfoz derecesi arttıkça bitümün yapısı değişmekte akıcı halden katı hale dönüşmektedir. Dünyada metamorfozun ilk aşamalarını göl asfaltları temsil ederken en son derecesini ise pirobitümler oluşturmaktadır (Yılmaz, 2011).

Kaplama yapısının proje ömrü boyunca hizmet verebilmesi, kaplama tabakalarını laboratuvarda uygun bir şekilde tasarlanması ile mümkün olmaktadır. Uygulama bölgesinin iklimini ve coğrafi şartlarını dikkate alarak tasarım yapmak ve böylelikle kaplamanın rehabilitasyon ve yeniden yapım ihtiyaçlarını geciktirmek amacıyla Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, standart bağlayıcı deneylerinin yerine bağlayıcı performans deneyleri kullanılmakta ve bitümlü sıcak karışımların arazideki sıkıştırılmasını laboratuvar ortamına yansıtmak amacıyla yoğurmalı pres ile sıkışma sağlanmaktadır. Çalışmada arazi şartlarını laboratuvar ortamına en iyi şekilde yansıtan Superpave yöntemine göre bağlayıcı ve karışım tasarımı yapılmıştır.

Çalışmada, Superpave yöntemine göre Türkiye'nin en sıcak ili olan Şanlıurfa ili için uygun bağlayıcı performans seviyesi belirlenmiştir. Ardından sadece SBS ve Amerikan Gilsoniti kullanılarak Şanlıurfa için uygun performans seviyesine sahip modifiye bitüm elde edilmiştir. Daha sonra SBS modifiyeli bitümlerde SBS içeriği azaltılarak yerine farklı oranlarda Amerikan Gilsoniti eklenmiştir. Böylece Şanlıurfa için uygun performans seviyesine sahip en az 3 farklı SBS+Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitüm elde edilmiştir. Literatürde iki farklı katkının birlikte kullanımı üzerine çeşitli bağlayıcı çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmanın özgün değerini ise çalışmanın bundan sonraki kısmı oluşturmuştur. 2 tane tek bir katkı içeren ve en az 3 tane iki farklı katkı içeren aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Öncelikle her bir karışım türü için Superpave yöntemine göre tasarım bitüm içeriği belirlenmiş, ardından tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Böylece SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanımının stabilite, nem hasarı, rijitlik, yorulma ve kalıcı deformasyona karşı etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

Esnek üstyapıların temel ve kaplama tabakalarında kullanılabilen bitümlü sıcak karışımların (BSK) ana bileşenleri bitümlü bağlayıcı ve agregadır. Bitümlü bağlayıcılar, reolojik özelliğinden dolayı yüksek taşıt hızlarında ve düşük sıcaklıklarda elastik katı, düşük taşıt hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda ise viskoz sıvı özelliği göstermektedir (Airey, 2004) (Şekil 2.1). Bitümlü bağlayıcıların bu özelliği karışıma da yansıdığından esnek üstyapı tabakaları da benzer davranış sergilemektedir.



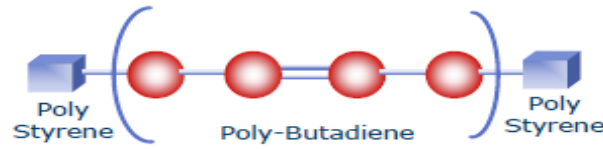
Şekil 2.1. Bitümlü bağlayıcı davranışının sıcaklıkla değişimi (McGennis vd., 1994).

Trafik yükleri ve çevre koşulları nedeniyle bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen tekerlek izi, nem hasarı, düşük ısı ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar üstyapının beklenen servis ömründen önce bozulmasına sebep olmaktadır (Janoo ve Korhonen, 1999). Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını artırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri (modifiyerler) kullanılmaktadır (Roque vd., 2005). Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir. Modifiye bitüm üretilmesinde elastomer ve plastomer polimerlerin yanı sıra polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri de yaygın olarak kullanılabilir. Ayrıca göl asfaltları, kaya asfaltları ve Gilsonitler de doğal katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır.

SBS, stiren-butadien-stiren blok kopolimerinin kısaca adlandırılmasıdır.

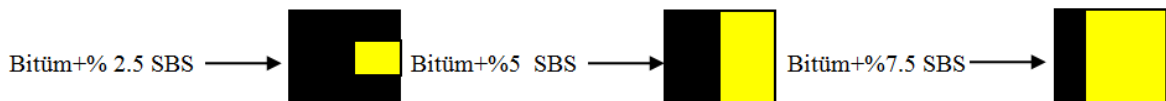
Bulunuşu Shell firması tarafından 1960'larda yapılan petrokimya türevi bu sentetik kauçuk ailesi, ayakkabı tabanı, su yalıtım membranı, hot-melt yapıştırıcılar gibi endüstriyel birçok alanda hammadde olarak kullanılmaktadır. SBS, 1985 yılından beri esnek kaplamalarda kullanılmaktadır.

SBS blok kopolimerleri kullanılarak yapılan birçok çalışma sonucunda SBS'nin bitümün rijitliğini arttırmasının yanı sıra düşük servis sıcaklıklarında çatlama, yüksek servis sıcaklıklarında ise tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir (Kumar vd., 2006; Tayfur vd., 2007; Kok ve Yılmaz, 2009; Gorkem ve Sengoz, 2009; Aglan vd., 1993). Ancak asfaltten oranı yüksek bitümlerle polimer modifiye bitüm üretimi elverişsizdir. Yol uygulamalarında en fazla kullanılan ürün lineer yapıya sahip SBS'tir. SBS yapısındaki polistiren adacıkları fiziksel çapraz bağlar oluşturarak sağlamlık verirken polibütadien köprüleri elastiklik ve esneklik sağlamaktadır (Şekil 2.2). Bitüme hangi oranda SBS'nin katılacağı tamamen uygulama bölgesinin iklimine, trafik şartlarına ve kullanılan bitümün özelliklerine bağlıdır. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır. En fazla ise %7 oranına kadar SBS kullanıldığı olmuştur (Lu ve Isacson, 1997a).



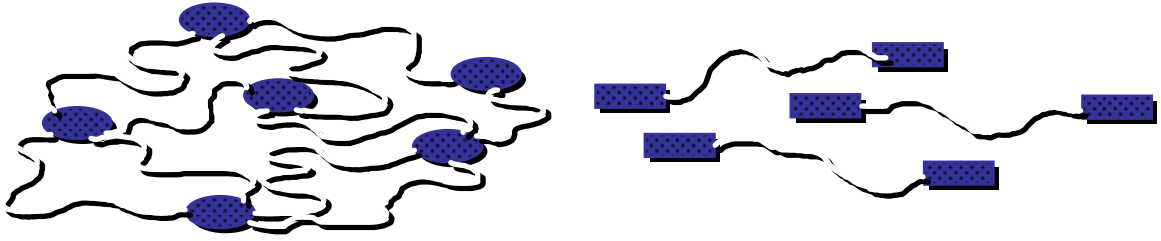
Şekil 2.2. SBS polimerinin yapısı (Scholten, 2010).

SBS ile bitümün karıştırılması tamamen bir çözünme olayı olup kimyasal bir reaksiyon değildir. SBS, bitüm ile karıştırıldığında yağsı fraksiyonları bünyesine alarak hacmi artar. Bitüm içindeki kendine benzeyen yapıları içine alan SBS, hacminin 10 katına kadar şişebilmektedir. Böylece bitüme %5 oranında SBS katıldığında, %50'si polimer fazı olan bir karışım elde edilmektedir. SBS ile bitüm arasındaki etkileşim Şekil 2.3'te gösterilmektedir (Airey, 2006). Şekilde siyah kısım bitümü, sarı ile gösterilen kısım ise polimer fazı göstermektedir.



Şekil 2.3. SBS - bitüm etkileşimi (Airey, 2006).

Bitüm içerisindeki SBS ısıtıldığında ağ yapısından sıyrılarak akıcı hale gelmekte ve bitümle kolayca karışmaktadır. Karışımın yumuşama noktasının altına düşüldüğünde ise üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşmaktadır (Şekil 2.4). 100°C'nin üstünde polimer akıcı hale gelirken soğuyunca üç boyutlu ağ yapısı tekrar oluşmaktadır. SBS termoplastik elastomer olduğu için bu ısıtma ve soğumalarda özelliğinden hiçbir şey kaybetmez.



Şekil 2.4. Bitümle karışım sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda SBS'nin yapısı

Yapılan çeşitli çalışmalarda SBS modifiyeli bitümlerin reolojik özelliklerinin katkısız bağlayıcıya göre daha üstün olmasına rağmen depolama stabilitelerinin düşük olduğu belirtilmiştir (Wen vd., 2002; Lu ve Isacsson, 1997b; Yılmaz vd., 2013; Sun ve Lu, 2003). Yılmaz ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada da SBS ve Amerikan Gilsoniti ile hazırlanan bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan SBS ile hazırlanan modifiye bitümlerin depolama stabilitelerinin düşük olduğu, Amerikan Gilsoniti ile hazırlanan modifiye bitümlerin depolama stabilitelerinin ise yüksek olduğu yapılan çeşitli konvansiyonel (penetrasyon, yumuşama noktası gibi) ve gelişmiş deneyler (DSR, BBR gibi) ile belirlenmiştir (Yılmaz vd., 2014).

Yılmaz ve diğerleri tarafından yapılan BAP projesinde SBS ile Gilsonit'in birlikte kullanımının bitümlü bağlayıcıların depolama özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda depolama özelliği en düşük olan modifiye bitümün sadece SBS içeren modifiye bitümler olduğu, SBS ile birlikte AG kullanılması ile modifiye bitümlerin depolama özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir (Yılmaz vd., 2015).

Katkı maddelerinin birlikte kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Kök ve ekibi yapmış oldukları çeşitli çalışmalarda SBS ve Sasobit birlikte kullanımını değerlendirmişlerdir. SBS bitüm özelliğini önemli derecede iyileştirmekte ve bunun yanı sıra viskoziteyi de yüksek oranda arttırmaktadır. Bu istenmeyen durumu ortadan kaldırarak yüksek SBS oranlarının kullanımına olanak sağlamak amacıyla bir ılık asfalt katkısı olan ve viskoziteyi düşüren Sasobit birlikte kullanılmıştır. Yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda Sasobit kullanımı ile yüksek SBS içeriklerinin uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir (Kök

vd., 2014a) Ayrıca SBS ile Sasobit'in birlikte kullanılması ile taş mastik asfaltların rijitlik ve stabilitesinin arttığı belirlenmiştir (Kök vd., 2014b).

SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların depolama stabilitesini arttırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemlerden biri depolama stabilitesini arttırmak amacıyla sülfür kullanımıdır. Carcer ve ekibi yapmış oldukları çalışmada SBS ve bitümün yoğunlukları arasındaki farktan ve karışım parametrelerinden ötürü uzun süre yüksek sıcaklıkta bekletildiklerinde tam olarak stabil olmadıklarını belirtmişlerdir. Bu tür bağlayıcılarda yüksek sıcaklık stabilitesini arttırmak amacıyla modifiye bitüm hazırlanma sürecinde genellikle sülfür ilave edildiği belirtilmiştir. Sülfürün SBS içerisinde bulunan alken parçalarla reaksiyona girdiğini böylece modifiye bitümün stabilizasyonuna yardım eden kimyasal bağların oluştuğunu belirtmişlerdir (Carcer vd., 2014).

Liang ve ekibi yapmış oldukları çalışmada atık araç lastiğinin (CR) SBS ile birlikte kullanılmasının bitümlü bağlayıcıların depolama stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. SBS'nin sağladığı faydaların yanında CR ile birlikte kullanımının etkisinin değerlendirildiği çalışmada SBS ile birlikte CR kullanılmasının depolama stabilitesini arttırdığı, uzun süre sıcaklığa tabi tutulan modifiye bitümler için kararlılık süresinin uzadığı tespit edilmiştir (Liang vd., 2015).

Pamplona ve ekibi yapmış oldukları çalışmada SBS modifiyeli bitümlerin özelliklerini iyileştirme düşüncesiyle bir kil çeşidi olan montmorilonit kullanmışlardır. Çalışmada kil kullanımı ile polimer modifiyeli bitümün özelliklerinin iyileştirildiği kullanılacak polimer içeriğinin azaldığı ayrıca yüksek sıcaklık stabilitesinin arttığı belirtilmiştir (Pamplona vd., 2012).

Peng ve ekibi yapmış oldukları çalışmada SBS ve atık polietileni bitüm modifikasyonunda birlikte değerlendirmişlerdir. Bu iki malzemenin birlikte kullanılması ile bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerinin daha fazla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ayrıca depolama stabilitesini arttırmak amacıyla SBS ve atık polietilen ile birlikte sülfür kullanılmıştır. Sonuçta iki katkının birlikte kullanılmasının modifiye bitümün reolojik özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği ayrıca modifiye bitümün depolama stabilitesi açısından sülfür kullanımının büyük önem arz ettiği belirlenmiştir (Peng vd., 2012).

Domingos ve Faxina yapmış oldukları çalışmada SBS ve polifosforik asidin ayrı ayrı ve birlikte bitüm modifikasyonunda kullanımını araştırmışlardır. Çoklu gerilme sünme ve geri dönüş deneyi ile katkı maddelerinin değerlendirildiği çalışmada SBS ve polifosforik asidin

birlikte kullanılması ile kalıcı deformasyona karşı dayanım parametresinin arttığı tespit edilmiştir (Domingos ve Faxina, 2014).

Shih ve ekibi çalışmalarında SBS, polistiren ve stiren butadien kauçuğun birlikte kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda bu üç katkının birlikte kullanımı ile sertlik, kırılma dayanımı, çekme dayanımı, düktilite ve basınç dayanımı açısından daha üstün bir modifiye bitüm elde edildiği belirlenmiştir (Shih vd., 2011).

Doğal asfaltlar metamorfoz (başkalaşım) derecelerine göre sınıflandırılmakta ve metamorfoz derecesi arttıkça bitümün yapısı değişmekte, akıcı halden katı hale dönüşmektedir. Dünyada metamorfozun ilk aşamalarını göl asfaltları temsil ederken en son derecesini ise pirobitümler oluşturmaktadır. Trinidad Göl Asfaltı (TLA) ve Gilsonit, en sık kullanılan doğal asfalt katkı maddeleridir. Yapılan çeşitli çalışmalarda TLA ve Gilsonit kullanımının bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabaee, 2009; Sönmez vd., 2005).

Gilsonit, bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip, doğal olarak oluşan bir katı hidrokarbon mineralidir (Hamidi, 1998). Gilsonit, kolay kullanımı ve asfalt ile olan iyi uyumuyla bilinmektedir. Gilsonit, doğada bulunan bir tür asfalt bağlayıcı olması nedeniyle bitüm içinde hızlı bir şekilde çözölebilmektedir (Liu ve Li, 2008). Gilsonit, genellikle birbirine paralel dikey damarlar halinde yerin derinliklerinde bulunmaktadır. Kütle halindeki Gilsonit obsidiyen mineraline benzer görünümde, oldukça parlak, siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyine sahip ve çizgisi kahverengi olan bir bitümlü maddedir (Şekil 2.5). Kırılgan bir yapıya sahip olmasından dolayı kolaylıkla ezilebilir ve koyu kahverengi toz halini alır (URL-1, 2015).



Şekil 2.5. Gilsonit'in kayaç ve işlenmiş görünümü (URL-1, 2015).

Gilsonit'in özgül ağırlığı 1.03 ile 1.10 arasında değişmektedir ve Mohs skalasına göre sertliği 2'dir. %10-20 sabit C, %0-2 O₂ ve eser halde mineral madde içerir. 120°C ile

175°C arasında erir. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi %98-100'dür. Gilsoniti diğer doğal asfaltlardan ayıran özellikleri yüksek asfaltten içermesi, organik çözücülerde yüksek çözünürlüğe sahip olması, yüksek saflık derecesine sahip olması, molekül ağırlığı yüksek olması ve yüksek nitrojen içeriğine sahip olmasıdır (Nakoman, 1977).

Sert bir doğal asfalt olan Gilsonit, asfaltum ya da uintaite olarak da isimlendirilir ancak genellikle ticari olarak Gilsonit ismiyle bilinir. Katkı maddesi olarak kullanılmasının yanında çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda da değerlendirilmektedir. Gilsonit aromatik ve alifatik çözücülerde çözünebilir. Petrol ürünleriyle çok iyi uyum sağlamasından dolayı genellikle daha yumuşak petrol asfaltlarının sertleştirilmesinde kullanılır. Gilsonit'in asfalt karışımlarına kolaylıkla karıştırılması ve uyumlu olması gibi özellikleriyle diğer modifiyerlerden farklı avantajlar sağlamaktadır (URL-1, 2014).

Gilsonit'in bitüme ilave edilmesiyle bitümün penetrasyonu azalmakta, viskozitesi artmakta ve bunun sonucunda daha sert modifiye bitüm üretilmektedir. Gilsonit genel olarak iki yolla kaplama inşaatında kullanılabilir. Bitüme önceden ilave edilebildiği gibi fabrikada ön karıştırma esnasında agregalarla karıştırılarak da kullanılabilir (Bardesi ve Brule, 1999).

Gilsonit BSK modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri arasında hidrokarbonlar sınıfına giren bir reçinedir. Bitüm modifikasyonunda sıklıkla kullanılan SBS polimeriyle kısmen yada tamamen yer değiştirerek karışımlar için önemli bir maliyet düşüşü getirmektedir (Davis ve Tooman, 1989). Gilsonit modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar, modifiye edilmemiş bitümlerle hazırlanan karışımlara göre daha yüksek stabiliteye, daha düşük deformasyona ve sıcaklık hassasiyetine bunun yanında suyun sebep olduğu soyulmaya karşı daha yüksek dirence sahip olmaktadır (URL-2, 2015). Dünyada bulunan Gilsonit yataklarına örnek olarak Utah (A.B.D.), Oregon (A.B.D.), Talaxa (Vera Cruz, Meksika) ve Ukhta (Archangel, Rusya) zuhurları verilebilir (Nakoman, 1977). İran da dünyadaki zengin Gilsonit yataklarına sahip bir yer olup, başlıca Zagros dağlarında ve Kermanşah, Luristan ve İlam eyaletlerinde Gilsonit madenleri bulunmaktadır (Ameri vd., 2011a).

Sudan kaynaklanan bozulmaların ve ağır taşıt trafiğinin fazla olduğu Norveç'in Oslo kentindeki yollarda 1970'lerin başında bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak Gilsonit kullanılmıştır. Gilsonit kullanılması ile karışımların rijitliği artmış, sudan kaynaklanan bozulmalar azalmış, yolların servis ömrü önceki döneme göre iki kat artmıştır. Ayrıca Gilsonit kullanımının karışımı sertleştirmesine rağmen düşük ısı

çatlaklarına neden olmadığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008; Dokken ve Evensen, 2015).

Huang ve ekibi yapmış oldukları çalışmada kaba agregaları önce Gilsonitle kaplamış daha sonra bu malzemeyle BSK numuneleri hazırlamışlardır. Hazırlanan BSK numuneleri üzerine dinamik modül, tekerlek izi, indirekt çekme dayanımı, yorulma ve nem hasarına karşı dayanım deneyleri uygulanmıştır. Kaba agreganın öncelikle Gilsonit ile kaplanmasının BSK'ların performansını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir (Huang vd., 2006).

Yalçın'ın yapmış olduğu tez çalışmasında, saf ve hidrate kireç içeren bitümlü sıcak karışımlarda SBS, İran ve Amerikan Gilsonit'inin etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda nem hasarına karşı dayanım bakımından en etkin katkının SBS olduğu, stabilite, rijitlik, kalıcı deformasyona karşı dayanım ve yorulma açısından ise Amerika Gilsoniti olduğu belirlenmiştir (Yalçın, 2014).

Huang ve Xu yapmış oldukları çalışmada İran kaya asfaltı, Buton adası kaya asfaltı, Trinidad Göl Asfaltı ve SBS modifiyeli bitümlerle ve saf bitümle hazırlanan karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda etkinliği en fazla olan katkının İran kaya asfaltı olduğu, en az olan katkının ise Trinidad göl asfaltı olduğu belirlenmiştir (Huang ve Xu, 2014).

Babagoli ve ekibi yapmış oldukları çalışmada bitüm modifikasyonunda İran gilsoniti kullanımının taş mastik asfaltların performansına etkisini değerlendirmişlerdir. Bağlayıcı deneyleri sonucunda gilsonit kullanımı ile penetrasyon ve düktilite değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca taş mastik asfalt numuneleri üzerinde uygulanan deneyler sonucunda karışımların rijitliklerinin, indirekt çekme dayanımlarının, çekme dayanımı oranı değerlerinin, akma sayılarının ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının bitüm modifikasyonunda gilsonit kullanımı ile arttığı tespit edilmiştir (Babagoli vd, 2015).

Prapaitrakul ve ekibi, Amerika'nın Utah eyaletinde çıkarılan Gilsonit'in %45 oranında reçine, yüksek oranda yaşlanmayı ve soyulmayı önleyici kimyasallar içerdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca Amerika'nın Utah eyaletinde çıkarılan Gilsonit'in bütün agrega türleriyle çok iyi uyum sağladığı belirlenmiştir (Prapaitrakul vd., 2005).

Çeloğlu'nun yapmış olduğu tez çalışmasında, bitümlü sıcak karışımlarda Trinidad Göl Asfaltı (TLA), SBS ve İran Gilsoniti'nin bitüm modifikasyonunda kullanımının etkileri incelenmiştir. Tasarım bitüm içeriğinde hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan deneyler

sonucunda %60 TLA ile hazırlanan karışımların en yüksek rijitliğe, stabiliteye, çekme dayanımına, yorulma ve kalıcı deformasyona karşı dayanıma; %9.5 IG ve %3.8 SBS ile hazırlanan karışımların ise en yüksek nem hasarına karşı dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir (Çeloğlu, 2014).

Ameri ve diğerleri, İran'ın Kermanşah bölgesinden temin edilen Gilsonit'i bitüm modifikasyonunda kullanmışlardır. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde yorulma ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Bitüm ağırlığınca %12 oranında Gilsonit kullanımı ile modifiye bitümlerin daha yüksek $G^*/\sin\delta$ ve $G^*.\sin\delta$ değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan karışımların daha yüksek elastik modüle, yorulma ömrüne, tekerlek izi direncine sahip olduğu belirlenmiştir (Ameri vd., 2011b).

Hamidi yapmış olduğu çalışmada Gilsonit kullanımı ile bitümlü bağlayıcının penetrasyonunun azaldığını ve yumuşama noktasının arttığını belirlemiştir. %4 ve %8 Gilsonit ile hazırlanan modifiye bağlayıcılar içeren karışımlar üzerinde uygulanan deneyler sonucunda Gilsonit'in BSK'ların stabilitesini ve tekerlek izine karşı dayanımlarını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir. İndirekt çekme rijitlik modülü deneyleri sonucunda katkı maddesi olarak Gilsonit kullanımının 25°C sıcaklıkta rijitliği önemli oranda arttırmasına rağmen 35°C ve 45°C sıcaklıkta Gilsonit'in önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Hamidi, 1998).

Yoğun trafiğin hakim olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonu azaltmak amacıyla Avustralya'nın New South Wales bölgesinde kaplama tabakasında kullanılan bitümlü sıcak karışımlarda katkı maddesi olarak toplam karışım ağırlığının %0.25'i oranında Gilsonit kullanılmıştır. Rutin kontrollerde (yapımı takip eden 6, 12 ve 24 ay) Gilsonit'in kalıcı deformasyonu önemli oranda azalttığı belirlenmiştir (URL-3, 2015).

Gilsonit'in katkı malzemesi olarak kullanıldığı Amerika'nın New Jersey ve Washington eyaletlerinde yapılan uygulamalarda Gilsonit sırasıyla bitüme ağırlıkça %8 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Yapılan incelemelerde kaplamanın servis ömrünün iki yıl arttığı belirlenmiştir (URL-3, 2015).

Ana bağlayıcı olarak farklı İran bitümlerinin kullanıldığı çalışmada farklı katkıların bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, Gilsonit, bitüm ağırlığınca %2, %4, %7, %10 ve %13 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan Gilsonit oranı arttıkça bağlayıcıların viskozitesinin, yumuşama

noktasının ve kompleks modülünün arttığı, faz açısı ve penetrasyonun azaldığı belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabaee, 2009).

İran Gilsonit'i ve öğütülmüş atık araç lastiği (CR) ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık performansları BBR deneyi ile incelenmiştir. Gilsonit, bitüme ağırlıkça %2, %7, %13 oranlarında, öğütülmüş araç lastiği ise ağırlıkça %10, %14, %16 oranlarında ilave edilerek 6 farklı numune elde edilmiştir. BBR deneyleri 5 farklı sıcaklıkta (-6, -12, -18, -24, -30°C) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları düşük sıcaklıklarda öğütülmüş araç lastiğinin Gilsonit'e göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir (Hajikarimi vd., 2013).

Suo ve Wong yapmış oldukları çalışmada Gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK, normal BSK ve taş mastik asfalt numuneleri üzerinde indirek çekme yorulma deneyi uygulamışlardır. Deneye tabi tutulan karışımlar içerisinde en yüksek yorulma dayanımına Gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK numunelerinin sahip olduğunu belirlemişlerdir. Çatlak oluşuktan sonra ise kontrol karışımlarının Gilsonit modifiyeli karışımlardan daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir (Suo ve Wong, 2009).

İran'ın 3 farklı bölgesinden (Kermanşah, İlam ve Luristan) elde edilen 5 Gilsonit numunesinin kullanıldığı bir çalışmada PG 58-22 ve PG 64-22 performans dereceli 2 çeşit saf bitüme ağırlıkça farklı yüzdelerde (%4, %8 ve %12) Gilsonit ilave edilmesiyle modifiye bitümler hazırlanmıştır. Elde edilen modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık performansları değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda Gilsonit kullanımı ile bitümlerin orta ve yüksek sıcaklık performanslarının önemli derecede arttığı görülmüştür. Gilsonit içeriklerinin artmasıyla bu iyileşmenin devam ettiği tespit edilmiştir. Gilsonit, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarında olumlu etki göstermesine rağmen düşük sıcaklık performanslarında olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve modifiye bitümlerdeki Gilsonit içeriğinin artmasıyla beraber düşük sıcaklık performanslarının düştüğü ortaya çıkmıştır (Ameri vd., 2011a).

Amerikan Gilsoniti'nin endüstriyel bir katkı maddesi olan SBS'nin yerine kısmen veya tamamen kullanılabilirliği bir çalışmada değerlendirilmiştir. Gilsonit ve SBS'nin tek başına kullanıldığı numuneler ve Gilsonit ile SBS'nin farklı oranlarda bir arada kullanılmasıyla elde edilen numuneler üzerine aynı reolojik testler (DSR ve RV) uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları bitüm modifikasyonunda Gilsonit ve SBS kullanımının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ($G^*/\sin \delta$) artırdığını fakat SBS'nin daha etkin olduğunu

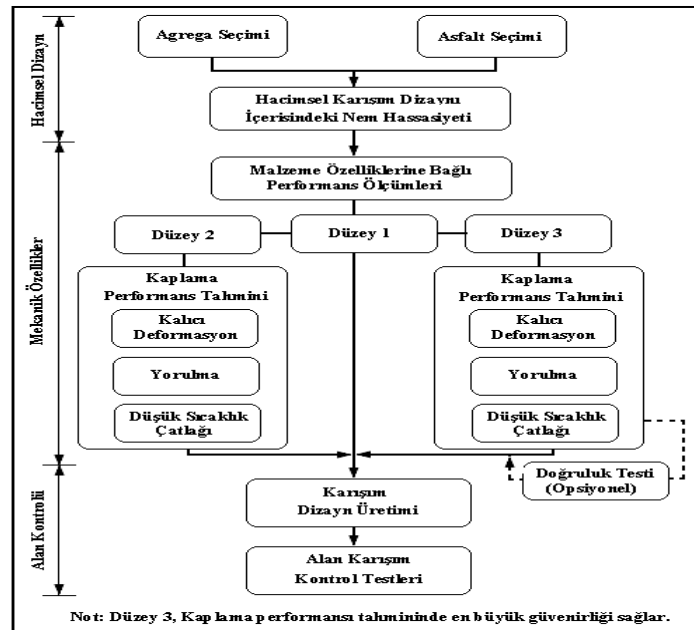
göstermiştir. İki katkı maddesi aynı bağlayıcıda karıştırıldığında Gilsonit/SBS oranına göre %1 SBS'nin yerine yaklaşık %3-4 Gilsonit'in gerektiği ortaya çıkmıştır (Kök vd., 2011).

SBS modifikasyonunun olumsuz yönlerine rağmen bitümlü bağlayıcının reolojisine ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine sağladığı faydalar katkı kullanımında SBS'nin birinci sırada olmasını sağlamaktadır. Fakat özellikle depolama stabilitesi açısından SBS bitümle kimyasal bağ kuran katkılara göre daha kötü sonuç vermektedir. SBS modifiyeli bitümün reolojik özelliklerini ve aynı zamanda depolanma özelliğini iyileştirmek amacıyla SBS ile birlikte çeşitli katkıları kullanılabilmektedir. Bölümümüzde daha önce tamamlanan SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanıldığı bir yayın bulunmaktadır. Ayrıca yine bölümümüzde yapılan çalışma ile Amerikan Gilsoniti'nin depolama stabilitesi açısından SBS'e göre daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Fakat yapılan çeşitli bağlayıcı deneylerine rağmen literatürde az miktarda SBS ile farklı katkıların birlikte kullanımı üzerine çalışma bulunmaktadır. Çalışmanın başlıca özgün değeri SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanılmasıyla hazırlanan modifiye bitümlerin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir. Bu yönde literatürde herhangi çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmada Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi, nem hasarına karşı dayanım (AASHTO T283), indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneyleri ile bitüm modifikasyonunda SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanılmasının bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir aralıkta değerlendirilmiştir.

3. YÜKSEK PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA (SUPERPAVE) TASARIM YÖNTEMİ

Superpave Yöntemi, Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı dahilinde yapılan 5 yıllık bir çalışma sonucu ortaya çıkmıştır. Superpave karışım tasarım yöntemi, uygulama bölgesine ait trafik yükü ve iklim koşullarını dikkate almakta ve meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını kontrol ederek, dizayn çevre koşullarında kaplama performansını arttırmak için performans esaslı bağlayıcı malzemenin geliştirilmesini içermektedir. (Asphalt Institute, 1996). Superpave karışım tasarım yönteminin amacı, servis ömrü boyunca istenilen performans özelliklerini gösteren kaplama tabakasını, ekonomik bağlayıcı ve agrega karışımları ile elde etmektir (Kennedy vd., 1994). Superpave'in üç ana bileşenini; bağlayıcı şartnamesi, karışım tasarımı ile analiz ve bilgisayar yazılım sistemleri oluşturmaktadır (Altaş, 2002). Superpave karışım tasarım yönteminin genel akış karakteristiği aşağıda Şekil 3.1'de verilmiştir.

Superpave yönteminin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılmasıdır. Bu sayede asfaltın fiziksel ve reolojik özellikleri analitik deneylerle belirlenmekte ve saha performansı daha doğru ve gerçekçi olarak yansıtılabilmektedir.



Şekil 3.1. Superpave karışım tasarım yönteminin yapısı (Cominsky vd., 1994).

3.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi

Superpave yönteminde meteoroloji istasyonlarından uygulama bölgesine ait en az 20 yıllık süre içerisindeki her bir yılın ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıkları ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık verileri alınmaktadır. Bu verilerden, ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki tasarım yüksek sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı SHRP yöntemine göre hesaplanır (Asphalt Institute, 1996).

Superpave yönteminde bağlayıcı sınıfları, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılarak PG X-Y şeklinde gösterilmektedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının performans şartlarını sağladığı yüksek sıcaklık derecesini; ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının performans şartlarını sağladığı düşük sıcaklık derecesini belirtmektedir.

Bağlayıcı performans sınıflarının belirlenmesinde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bağlayıcıya uygulanan Superpave bağlayıcı deneyleri ve amaçları

Deney Adı	Kullanım Amacı	Bağlayıcı Türü
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFO)	Bitümlü bağlayıcının kısa dönem yaşlanma karakteristiklerini belirlemek	Orijinal
Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	Bitümlü bağlayıcının uzun dönem yaşlanma karakteristiklerini belirlemek	RTFOT kalıntısı
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Bitümlü bağlayıcıların yüksek ve orta sıcaklık karakteristiklerini belirlemek	Orijinal RTFOT kalıntısı PAV kalıntısı
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcıların yüksek sıcaklıkta akışkanlık karakteristiklerini, BSK'ların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek	Orijinal
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık karakteristiklerini belirlemek	PAV kalıntısı

3.2. Superpave Agregasartnamesi

Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı kapsamında yapılan çalışmalarda, agregas özelliklerinin bitümlü sıcak karışımların performansına önemli ölçüde etki ettiği belirlenmiştir. Superpave yönteminde, mevcut agregas deneyleri geliştirilerek bu yöntemle uyarlanmış, agregas özellikleri "mutabakat" ve "kaynak" zellikleri olmak üzere iki kısımda tanımlanmış ve "tasarım agregas gradasyonu" olarak isimlendirilen yeni bir agregas gradasyonu belirleme yöntemi geliştirilmiştir (Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Superpave Mixture Design Guide, 2001).

3.2.1. Agregas Mutabakat zellikleri

Mutabakat zellikleri, yüksek trafik koşullarında ve ince kaplamalarda dikkatli seçilmeli ve karışımda kullanılacak agregaların, bu özellikleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir (Altaş, 2002; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995).

3.2.2. Agregas Kaynak zellikleri

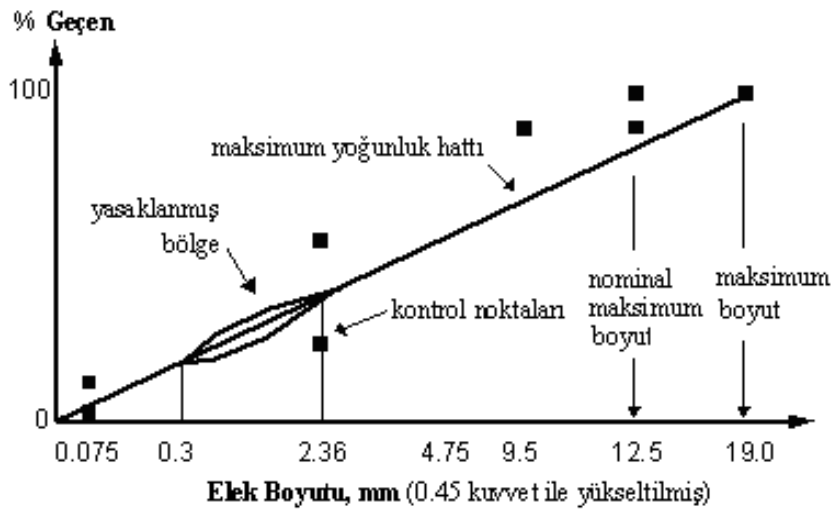
Bölgesel agregas kaynaklarının niteliklerinin belirlenmesi için kullanılan kaynak özellikleri, önemli olmasına karşın, kaynağa özel olduğundan kritik değerler olarak tanımlanmamış, ancak kullanılması tavsiye edilmiştir. Agregas kaynak özellikleri dayanıklılık, sağlamlık ve zararlı maddeler olarak sıralanmaktadır (Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995).

3.2.3. Tasarım Agregas Gradasyonu

Superpave yönteminde, müsaade edilebilir agregas gradasyonunu belirlemek amacıyla geleneksel yöntemlerden farklı bir gradasyon grafiği kullanılmakta ve grafiğin düşey ekseninde % geçen, yatay ekseninde ise elek açıklıklarının "mm" olarak 0.45'lik üstel kuvvet ile yükseltilmiş boyutları yer almaktadır. Burada, 0.45 üstel kuvvet eğrisi ile maksimum yoğunluk gradasyonu elde edilmektedir. Maksimum yoğunluk gradasyon eğrisi, grafiğin orijininden yani 0.0 noktasından maksimum agregas boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir (Tunç, 2001; Asphalt

Institute, 1996; McGennis vd., 1995). Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemeler istenilen kalınlıkta bitüm film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğa sahip olmakla beraber, bu tür malzemeler bitüm içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Bu nedenle bu tür gradasyona sahip agregalar karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır (McGennis vd., 1995; Dinç, 1999). Agregalar gradasyonunu tespit etmek amacıyla, eğri üzerinde "yasaklanmış bölge" ve "kontrol noktaları" belirlenmiştir (Şekil 3.2). Kontrol noktaları, agregalar gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları, yasaklanmış bölge ise gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bölgeyi tanımlar.

Yasaklanmış bölge, 0.3 mm ile 2.36 mm elekler arasında kalan agregalar boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller. Superpave yöntemi, agregalar gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini önermekte ancak herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımdan iyi bir performans elde etmek için gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi önerilmektedir (Tunç, 2001; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Superpave Mixture Design Guide, 2001).

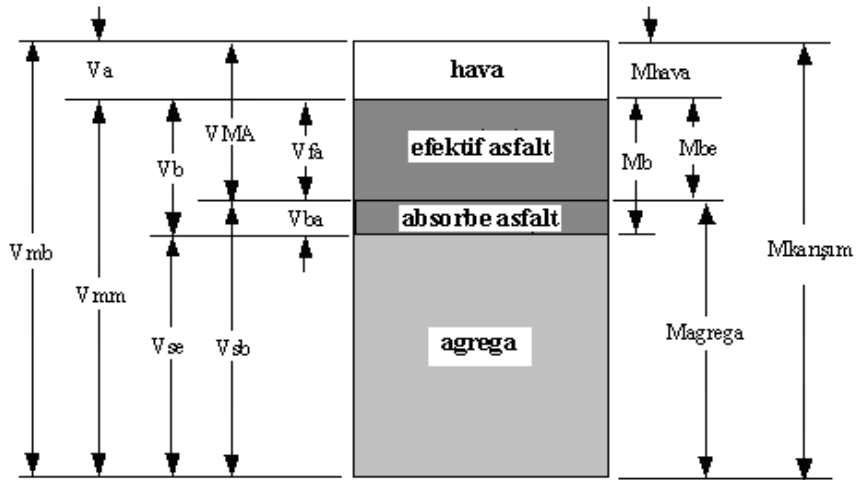


Şekil 3.2. Superpave gradasyon limitleri (Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995).

3.3. Karışımların Hacimsel Özellikleri

Superpave yöntemini geliştiren araştırmacılar, bitümlü karışımların hacimsel özelliklerinin asfalt karışımlarının davranışları üzerinde çok etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Sıkıştırılmış bir kaplama karışımına ait hava boşlukları (V_a), asfaltla dolu boşluklar (V_{fa}), mineral agregalar arasındaki boşluklar (VMA) ve efektif asfalt içeriği (P_{be}) kaplamanın olası servis performansının bir göstergesidir. (Asphalt Institute, 1996; Druta, 2006). Bitümlü sıcak karışımların kütle ve hacim özelliklerini tanımlamak için bileşen diyagramı modeli kullanılmaktadır. Bu diyagram, sıkışmış bir BSK numunesindeki hava boşluklarını, asfalt çimentosunu ve mineral agregası bileşenlerini, ayrı bileşenler gibi göstermektedir (Şekil 3.3) (Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Druta, 2006).



Şekil 3.3. Sıkışmış BSK numunesinin bileşen diyagramı (McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006; Druta, 2006)

- V_{mb} : Sıkışmış karışımın hacmi
 V_a : Hava boşluk hacmi
 V_{mm} : Asfalt karışımının boşluksuz hacmi
 V_b : Asfalt bağlayıcısının hacmi
 V_{se} : Mineral agreganın hacmi (efektif özgül ağırlığı)
VMA : Mineral agregadaki boşluk hacmi
 V_{sb} : Mineral agreganın hacmi (hacim özgül ağırlığı)
 V_{fa} : Asfalt ile dolu boşluk hacmi
 V_{ba} : Absorbe (emilen) asfalt bağlayıcı hacmi

$M_{\text{karışım}}$: Asfalt karışımının toplam kütlesi
 M_{be} : Asfalt bağlayıcının efektif kütlesi
 M_{agrega} : Agreganın kütlesi
 M_{hava} : Havanın kütlesi
 M_b : Asfalt bağlayıcının kütlesi

3.4. Superpave Karışım Tasarımı

Superpave karışım tasarımı, Superpave kriterlerini sağlayan uygun bitümlü bağlayıcı ve agrega malzemesinin seçilmesini kapsamaktadır. Karışım tasarımı, Superpave gradasyon grafiğini ve sınırlarını sağlayan farklı agrega deneme karışımlarının hazırlanması, deneme karışımlarının bitümlü bağlayıcı ile karıştırılarak kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulması, yaşlandırılmış numunelerin sıkıştırılması, agrega deneme karışımlarının hacimsel özellikleri tespit edilerek tasarım agrega gradasyonunun belirlenmesi ve seçilen tasarım gradasyonu için gerekli olan tasarım bitüm içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli bitüm içeriklerinde karışım numunesi hazırlayarak bunların sıkıştırılması işlemlerini kapsamaktadır.

Superpave karışım numunesi hazırlama deney prosedürleri, AASHTO TP4 ve AASHTO PP2 standartları ile belirtilmiştir.

3.4.1. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı

Superpave karışım tasarımının en önemli cihazı Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı'dır. Bu cihaz, Superpave karışım numunelerini üretmek ve numuneler üretilirken sıkıştırma işlemi boyunca veriler kaydederek numunenin yoğunluğunu tayin etmek için kullanılır (Asphalt Institute, 1996).

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı, laboratuarda sıcak karışımların arazideki sıkışmasını en iyi temsil edecek sıkışmayı sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Cihazın 150 mm (6 inç) iç çapa sahip kalıbı sayesinde maksimum tane boyutu 50 mm (nominal maksimum 37.5mm) olan agrega içeren karışım numuneleri hazırlanabilmektedir (Lavin, 2003; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006).

SHRP tarafından geliştirilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı

Yükleme başlığı numune üzerine 600 ± 18 kPa (6.12 kg/cm^2)'lik sabit bir basınç uygularken numune kalıbı altındaki döner taban $1.25 \pm 0.02^\circ$ 'lik açı ile dakikada 30 ± 0.5 dönüş yapmaktadır. Numune yüksekliğinin ölçümü yoğurmalı sıkıştırıcının en önemli özelliklerinden biridir. Numunenin ağırlığı, numune kalıbının iç çapı ve numunenin yüksekliği bilindiğinden numune yoğunluğu hesaplanabilmektedir (Tunç, 2001; Asphalt Institute, 1996; McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006; Kennedy vd., 1994).

4. DENEY YÖNTEMLERİ

4.1. Bağlayıcılar Üzerine Uygulanan Deneyler

4.1.1. Penetrasyon Deneyi

Penetrasyon deneyi, asfalt çimentosunun sertliğini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli bir yük altında ve belirli bir süre içinde, belirli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultudaki batma miktarının bir ölçüsüdür. Penetrasyonun birimi 0.01 cm'dir. Penetrasyon değeri 500'e kadar olan bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25°C sıcaklıkta 5 saniye süre ile 100 gramlık bir yük uygulanmaktadır. Penetrasyon değeri 500'ün üzerinde olan numuneler için deney 15°C'de yapılmakta ve yükleme şartları değişmektedir.

Deneyde penetrasyon cihazı, penetrasyon iğnesi, numune kabı, su banyosu, aktarma kabı ve zaman ölçer kullanılmaktadır. (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Penetrasyon deney aleti

Alınan numune yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek kadar ısıtılıp, içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırıldıktan sonra numune kabına aktarılır ve 5-30°C ortam sıcaklığında soğumaya bırakılır. Daha sonra numune kabı aktarma kabının içine konularak sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1-1.5 saat bekletilir.

İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı cihazın tablası üzerine konulur. İstenilen ağırlık ile yüklenmiş iğne, numunenin yüzeyi üzerine temas edecek fakat numuneye batmayacak şekilde ayarlanır ve deneye hazır hale getirilir.

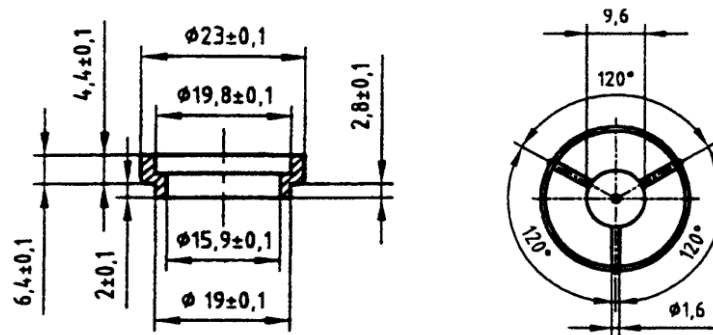
Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme alınır ve kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması numunenin penetrasyon değeri olarak kabul edilir. Denemelerin geçerli olabilmesi için penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük fark Tablo 4.1'de verilen değerleri aşmamalıdır (TS EN 1426, 2002).

Tablo 4.1. Penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük farklar

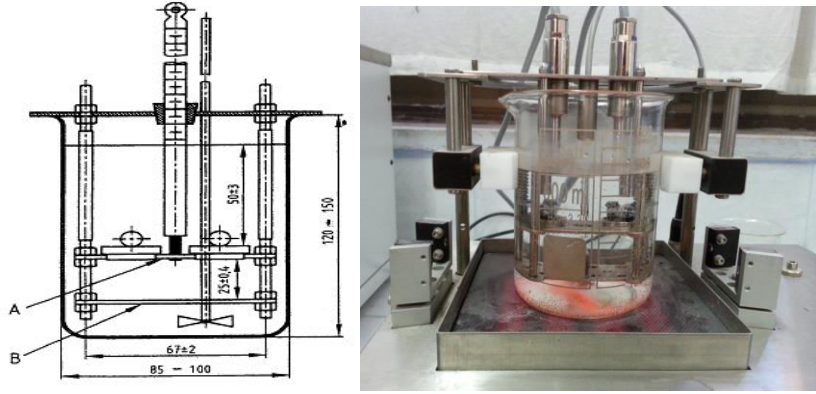
Penetrasyon değeri	≤ 49	50-149	150-249	≥ 250
Maks. penetrasyon farkı	2	4	6	8

4.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Yumuşama noktası deneyi, asfalt çimentolarının sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için yapılan bir deneydir. Yumuşama noktası; su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde standart boyutlarda bir bilye bulunan, standart halka içerisindeki bitümlü bağlayıcının belli bir hızla ısıtılması ile yumuşayarak tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklıktır. Deneyde pirinçten yapılmış 2 adet standart halka, 2 adet standart çelik bilye, ısıya dayanıklı 600 veya 800 cm³'lük bir cam beher ve termometre kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan standart halka ve bilyelerin boyutları Şekil 4.2'de, deney düzeneği Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.2. Yumuşama noktası halka ve bilye boyutları



Şekil 4.3. Yumuşama noktası deney düzeneği

Deneyden önce bitüm numunesi ısıtılarak akıcı hale getirilir. Bir pirinç levha üzerine yapışmayı önleyici bir madde sürüldükten sonra halkalar levha üzerine konulur. Numune bu halka içine halkanın üst seviyesini geçecek şekilde dökülür ve 1 saat süre ile soğutulur. Halka üzerinden taşan bitüm, ısıtılmış bir spatula yardımıyla kesilip atılır.

Deney, yumuşama noktası 80°C 'nin altında ve üstünde olan bitümlü malzemeler için farklı şekillerde yapılmaktadır:

a) Yumuşama noktası 80°C veya daha aşağı olan bitümlü bağlayıcılarda deneyin yapılışı: Cam behere 5°C sıcaklığa sahip saf su konur. İçinde numune bulunan halka suyun içine sarkıtılır. Daha sonra bilye su dolu beher içine konulur. Beher içindeki suyun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C 'de sabit tutulur. Ardından bilye, uygun bir maşa yardımıyla halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5°C artacak şekilde beher ısıtılmaya başlanır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir.

b) Yumuşama noktası 80°C 'den yüksek olan bitümlü bağlayıcılarda deneyin yapılışı: Deney yine yukarıda anlatılan şekilde yapılır, ancak saf su yerine gliserin kullanılır. Bu durumda başlangıç sıcaklığı 5°C değil $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ olmalıdır.

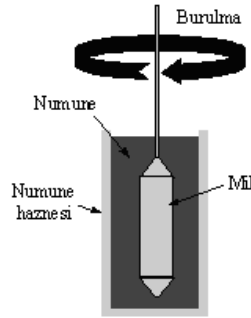
Yumuşama noktasının belirlenebilmesi için iki numune üzerinde deney yapılmalı ve sonuç olarak bu iki değerin ortalaması alınmalıdır. Her iki bilyeden elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, yumuşama noktası 80°C 'nin altında olan numuneler için 1°C 'yi, 80°C 'nin üzerinde olan numuneler için ise 2°C 'yi geçerse deneyler tekrar edilmelidir (TS EN 1427, 2002).

4.1.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

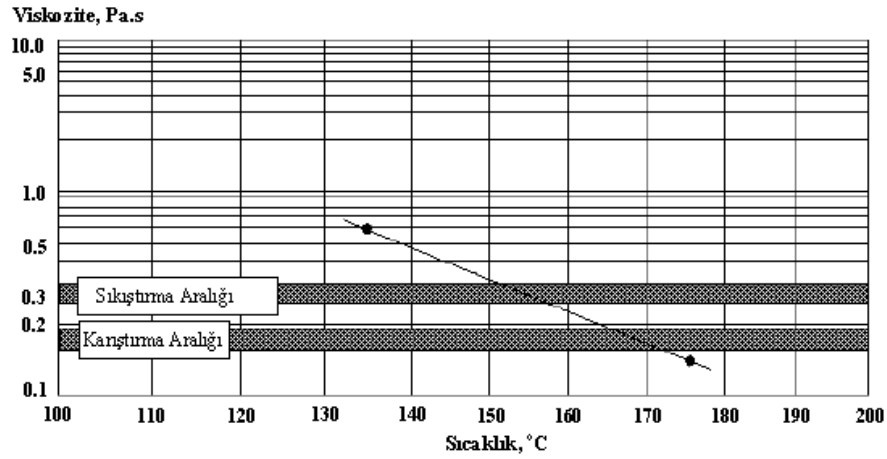
Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olacağını tespit etmek için malzemenin yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının ölçülmesinde kullanılmaktadır.

Dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması gerekmektedir (Altaş, 2002; Zaniwski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994). Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıktaki bitümlü bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir (Şekil 4.4).

Dönel viskozimetre deneyinden elde edilen viskozite değerleri karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasına yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Şekil 4.5'te bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir (Zaniwski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994).

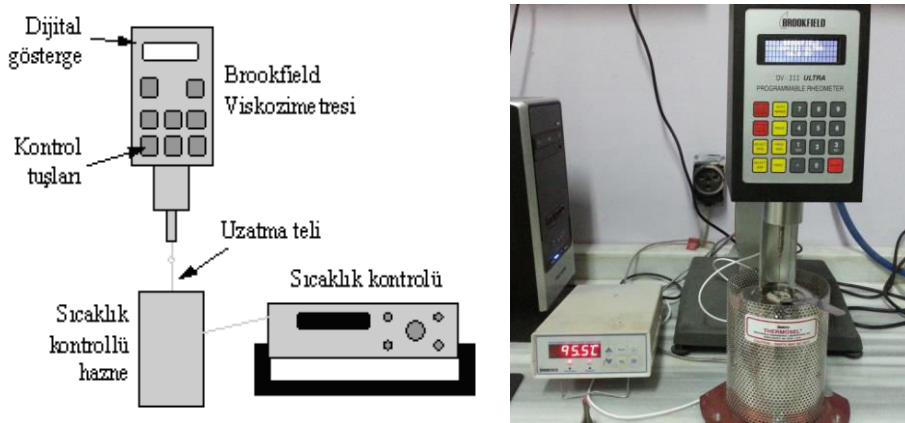


Şekil 4.4. Dönel viskozimetre (RV) deney şeması



Şekil 4.5. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi

Dönel viskozimetre, Şekil 4.6'da şematik olarak gösterildiği gibi Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere iki ana ünitelerden oluşmaktadır. Viskozimetrenin motoru, milin kendi etrafında dönmesini sağlayan burulma kuvvetini üretmektedir. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm) hızla döndürülürken, viskozite değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır. Silindirik mil, viskoz haldeki bağlayıcı içerisinde dönerken dirençle karşılaşmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların viskozite değeri tayininde No. 21 ve No. 27 olarak numaralandırılan iki farklı mil kullanılmakla birlikte yaygın olarak No. 27 mili tercih edilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994; Petersen vd., 1994).



Şekil 4.6. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem

RV deneyinde, kayma gerilmesi (τ) ile burulma (M) ve kayma oranı ($\dot{\gamma}$) ile açısal hız (ω) arasındaki ilişkiler aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir.

$$\text{Kayma oranı (s}^{-1}\text{); } \dot{\gamma} = \omega \left[\frac{2R_c^2}{(R_c^2 - R_s^2)} \right] \quad (4.1)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi (din/cm}^2\text{); } \tau = \frac{M}{2\pi R_s^2 L} \quad (4.2)$$

Burada;

ω : Sabit mil hızı (rad/s),

R_c : Numune kabının çapı (1.9525 cm),

R_s : Milin çapı (No:27 için 1.176 cm),

M : Uygulanan burulma (din.cm),

L : Milin efektif uzunluğu (No:27 için 3.302 cm)'dur.

Asfaltın viskozite değeri santipois (cP) olarak aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.3)$$

Deneye tabi tutulacak asfalt numunesi etüvde 150°C'nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılan asfalt, önceden ısıtılmış olan numune kabının içerisine, 8-11 gr arasında dökülür. İçerisinde asfalt bulunan numune kabı önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994). Deney parametreleri sisteme girildikten sonra, silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak viskozimetre sıfırlanır. Daha sonra, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki asfalt içerisine daldırılır. Deney için, numune 135°C'lik sabit sıcaklığa ulaşınca kadar yaklaşık 30 dakika kadar beklenir ve silindirik milin dönme hızı 20 rpm olarak ayarlanarak motor çalıştırılır. Numune sıcaklığı dengeli duruma geldikçe, viskozite okumaları da sabitleşir ve birer dakika arayla üç okuma yapılarak deney sonuçları kaydedilir (Altaş, 2002; Warren vd., 1994).

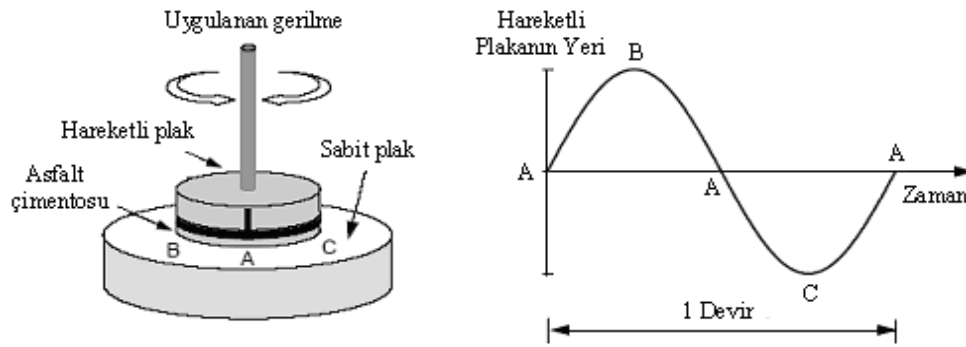
4.1.4. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

DSR cihazı, bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik davranışı bir arada göz önüne alınarak geliştirilmiştir.

Bağlayıcının davranışı yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olduğundan, DSR deneyi ile bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri tespit edilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994).

DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının yolun hizmete açıldığı andan itibaren tekerlek izine karşı dayanımı belirlenmekte ve ömrünün ilk dönemlerinde yüksek servis sıcaklıkları altında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, bu deney servis ömrünün ilerleyen yıllarında orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır. DSR deneyinde ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı frekanslarda elde edilebilmekte ve asfalt numunesinin sinüsoidal gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (kayma sertliği) (G^*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır. Kompleks kayma modülü ve faz açısı, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumunu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Petersen vd., 1994).

DSR deneyinde, sabit bir plak ile sağa ve sola küçük dönme hareketleri yapan bir plak arasına yerleştirilen sabit kalınlıktaki asfalt numunesi belirli bir ısıda ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır (Şekil 4.7).



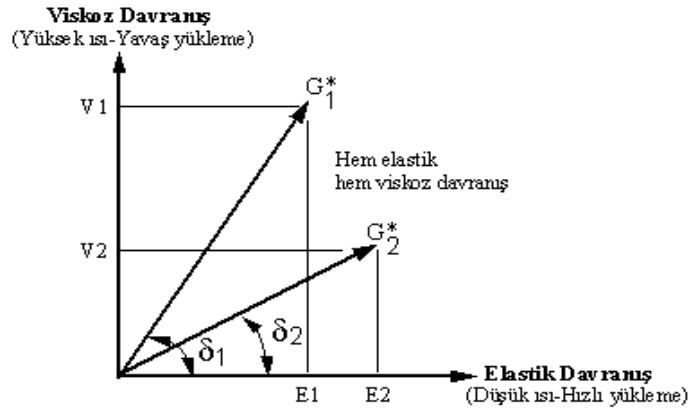
Şekil 4.7. Dinamik kayma reometresi (DSR) çalışma şekli

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına eşdeğer kabul edilmektedir. 10 rad/sn'lik sabit frekans (4.4) bağıntısı kullanıldığında yaklaşık 1.59 Hz (devir/sn) sabit frekansa (f) ve (4.5) bağıntısı kullanıldığında 0.1 sn yükleme süresine (t) eşit olmaktadır.

$$\omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (4.5)$$

Dinamik kayma reometresi, asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçerek malzemenin hem viskoz hem de elastik davranışını karakterize etmek için kullanılmaktadır. Kayma modülü (G^*), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür. Kayma modülünün elastik ve viskoz olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır (Şekil 4.8). Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının bir göstergesidir.

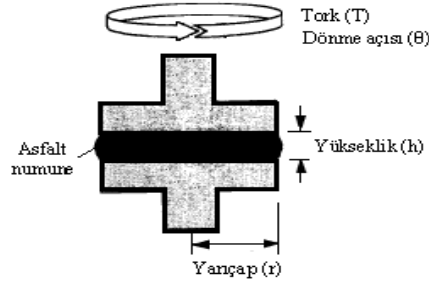


Şekil 4.8. Viskoelastik davranış

Kompleks kayma modülü (G^*), toplam kayma gerilmesinin ($\tau_{maks}-\tau_{min}$), toplam deformasyona ($\gamma_{maks}-\gamma_{min}$) oranı olarak (4.6) bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$G^* = \frac{|\tau_{maks} - \tau_{min}|}{|\gamma_{maks} - \gamma_{min}|} \quad (4.6)$$

DSR yazılımı tarafından bitüm numunesinin DSR aletinde yerleşimini temsil eden Şekil 4.9'da görülen parametreler kullanılarak kayma gerilmesi (τ) ve kayma deformasyonu (γ) değerlerinin hesabı (4.7) ve (4.8) bağıntıları ile yapılmaktadır.



Şekil 4.9. Numunenin DSR deney aletine yerleşimi

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (4.7)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (4.8)$$

Burada;

τ : Kayma gerilmesi (Pa),

T : Uygulanan tork (N.m),

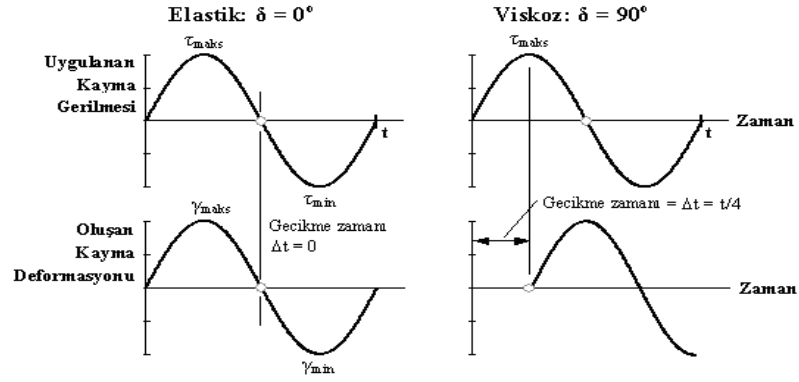
r : Numunenin yarıçapı (mm),

γ : Kayma deformasyonu (%),

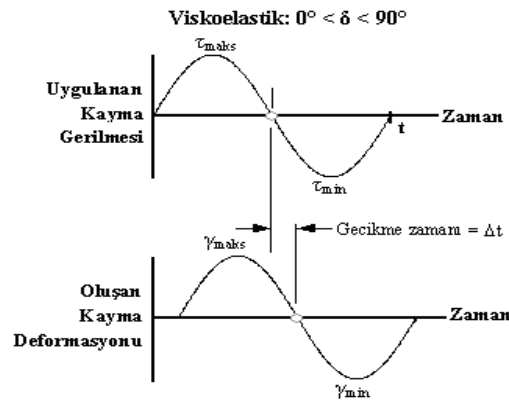
θ : Dönme açısı (rad),

h : Numunenin yüksekliği (mm)'dir.

Faz açısı (δ) uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Asfalt çimentosunun viskoelastik yapısı nedeniyle numuneye uygulanan gerilmeler önce numune tarafından karşılanırken belirli bir süre sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, meydana gelen kayma deformasyonu ve faz açısı arasındaki ilişki Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de görülmektedir.

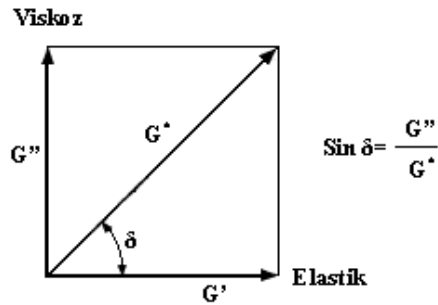


Şekil 4.10. Viskoz ve elastik malzemelerde gerilme- deformasyon ilişkisi



Şekil 4.11. Viskoelastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi

Kompleks kayma modülüne bağlı olarak faz açısının değişimi grafiksel olarak Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Kayma modülünün bileşenleri

Kompleks kayma modülü; kayıp modül (G'') ve depolama modülü (G') olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Elastik bileşeni ifade eden depolama modülü her bir yükleme

devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını, viskoz bileşeni ifade eden kayıp modül ise her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını temsil etmektedir.

DSR deneyinde, sabit plaka, çıkarılıp takılabilen hareketli plaka ve disk şeklindeki asfalt bağlayıcı numuneye ihtiyaç vardır. Deney numunesinin kalınlığı iki plaka arasındaki aralığın ayarlanmasıyla elde edilir. Deneyde, plakalar arasındaki aralığa göre iki farklı çapta plaka kullanılmaktadır. Orijinal veya işlem görmemiş ve RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılarda 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2000 mikron (2 mm) aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır.

DSR deneyinde sıcaklık, asfalt bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46°C ile 82°C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış numuneler için bu sıcaklık aralığı 4°C ile 40°C arasında değişmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994). Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak bağlayıcının yaşlanma durumuna göre belirlenen ve DSR yazılımına girilen hedef veriler Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Hedeflenen kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri

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 akıcı hale gelinceye kadar (130-140°C) ısıtılır. Ardından asfalt ya doğrudan sabit plaka üzerine ya da silikon kalıp içerisine dökülerek soğutulduktan sonra plakalar arasına yerleştirilir. Numune yerleştirildikten sonra, üst plaka aşağı indirilerek numune sıkıştırılır ve plakalar arasından taşan kısım temizlenir. Daha sonra, deney öncesi plakalar arasında bırakılan 50 mikronluk fazla aralık da indirilerek gerekli deney aralığına getirilir. Deneye hazır hale getirilen numune deney sıcaklığına geldiğinde ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilir. Denge periyodunun sonunda Superpave şartnamesine uygun frekansta, gerekli gerilme veya deformasyon uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma ve daha sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilir. Kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ)

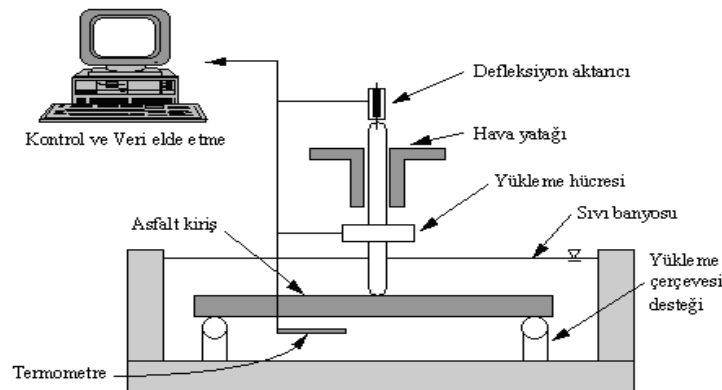
değerleri yazılım tarafından gerilme-deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak hesaplanır (McGennis vd., 1994; Warren vd., 1994; Petersen vd., 1994).

4.1.5. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, kaplamaya gelen yükten bağımsız, iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak adı verilen düşük sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda rijit davranış göstermesi kaplamanın da rijit davranmasına sebep olur ve bu durum termal çatlak riskini artırır. Bu nedenle SHRP tarafından, asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki davranışının incelenmesi amacı ile kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını ölçerek asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklarda sahip olabileceği elastik davranışı belirlemeye yardımcı olur (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Loh ve Olek, 1999; McGennis vd., 1994). Deney, RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de yapılabildiğinden, bağlayıcının zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir. Bununla birlikte, asfaltın yüksek ve düşük sıcaklıklarda nasıl bir sertlik davranışı gösterdiği, DSR ve BBR deney sonuçları birlikte incelenerek geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilebilmektedir (Tunç, 2001).

BBR deneyi ile asfalt bağlayıcının sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değeri) tespit edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç değerlendirilmektedir (Tunç, 2001; Loh ve Olek, 1999; McGennis vd., 1994).

BBR deney aletinin şematik görünüşü Şekil 4.13'te verilmiştir.

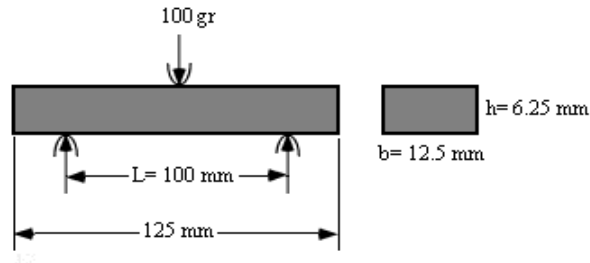


Şekil 4.13. Kiriş eğme reometresinin (BBR) şematik görünüşü

BBR deneyinde üzerine ağırlık takılan küt uçlu bir mil ile basit destekli asfalt kirişin ortasına yük uygulanmaktadır. Bu esnada milin etrafına yerleştirilen hava yatağı sayesinde sürtünme ortadan kaldırılır. Milin üzerindeki defleksiyon aktarıcı sayesinde oluşan hareketler bilgisayardan gözlemlenebilmektedir. Yük uygulanırken bir regülatör yardımıyla basıncın sabit tutulması sağlanmaktadır. Sıvı yatağında kullanılacak sıvı, -36°C'ye varan düşük sıcaklıklarda bile donmayan ve özgül ağırlığı 1.05 kg/m³'ü aşmayan bir sıvı olmalıdır. Sıvı yatağında bulunan bir karıştırıcı vasıtasıyla sıcaklığın homojen bir şekilde dağılması sağlanmaktadır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

BBR deneyinde kiriş teorisi kullanılmaktadır. Standart ölçülerde kiriş şeklindeki asfalt numunesine 100±5 gr (980±5 mN) sabit bir tekil kuvvet uygulanır ve 240 saniye boyunca çubuğun ortasında oluşan sünme farklı sürelerde (8, 15, 30, 60, 120, 240 sn) sistem tarafından ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Sünme sertliği (S), asfaltın sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç ve sünme oranı (m-değer) ise yükleme süresince asfaltın sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir.

Asfalt bağlayıcının sünme sertliğinin belirlenmesi amacıyla kullanılan, standart ölçüleri 12.5x125x6.25 mm (0.50x5x0.25 inç) olan asfalt kiriş Şekil 4.14'te şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) numunesinin şematik görünüşü

Deney süresince, sistem tarafından numunenin sabit yük altındaki defleksiyonu belirlenir ve sünme sertliği hesaplanırken (4.9) bağıntısı kullanılır.

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \quad (4.9)$$

Burada;

$S_{(t)}$: t anındaki (60 sn) sünme sertliğini (MPa),

P : Uygulanan sabit yükü, 100 ± 5 gr (980 mN),

L : Mesnetler arası uzaklığı.100 mm (4 inç),

b : Kiriş genişliğini, 12.5 mm (0.50 inç),

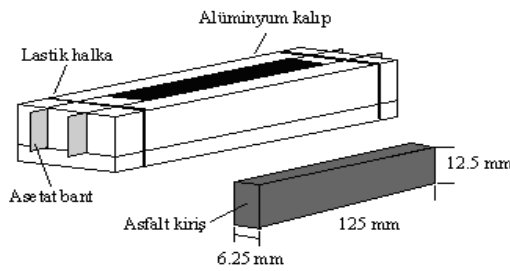
h : Kiriş kalınlığını, 6.25 mm (0.25 inç)

$\delta_{(t)}$: t anındaki (60 sn) defleksiyonu ifade etmektedir.

Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertliği değerinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir (Kennedy vd., 1994; Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Ancak bu değer 300-600 MPa arasında ise numunenin doğrudan çekme deneyi kopma deformasyon değeri şartname şartını sağlamalıdır (Tunç, 2001).

Deney sonucunda elde edilen sünme oranı (m-değeri) ise, farklı yükleme zamanlarındaki sünme sertliği ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde belirli bir andaki teğetin eğimi olarak alınmaktadır. Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme oranı değerinin en az 0.3 olması istenmektedir (McGennis vd., 1994; Petersen vd., 1994).

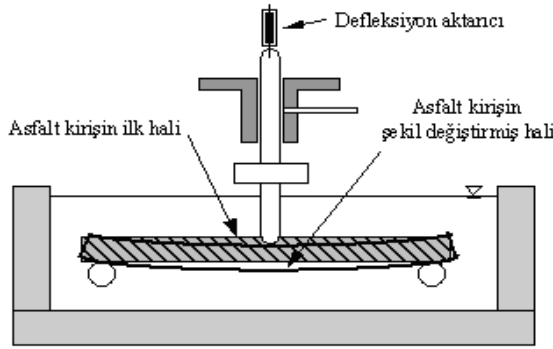
Deneyde kullanılacak asfalt kiriş numuneleri, Şekil 4.15'te görülen dikdörtgen kesitli alüminyum kalıplar kullanılarak hazırlanmaktadır.



Şekil 4.15. BBR deneyinde kullanılan kalıplar ve numune

Kalıp kurulmadan önce alüminyum parçaların iç yüzeyleri madeni bir yağla hafifçe yağlanır. Asetat bantlar yağlanan yüzeylere yerleştirilir. Uçlardaki küçük parçalara bitümün yapışmasını engelleyici bir malzeme uygulanarak kalıp kurulur ve parçaların ayrılmaması için uçlardan birer lastik halka ile sıkıştırılır. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı, 163°C 'yi aşmayacak şekilde ısıtılır ve bir uçtan diğerine doğru kalıbın yüzeyini taşıyacak şekilde içerisine dökülür. 45-60 dakikalık bir soğutma işleminden sonra

numunenin kalıptan taşan kısımları sıcak bir spatula ile alınır, oda sıcaklığında 2 saati geçmeyecek şekilde bekletilir ve deney koşulları hazır olduğunda kalıptan çıkarılır. Son olarak numune deney sıcaklığındaki sıvı banyosunda 60 ± 5 dakika bekletilerek koşullandırılır ve deneye başlanır. Koşullandırma için numuneler soğutma sıvı banyosunda beklerken, sistemin kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilir. Sıcaklık koşulları oluştuktan sonra asfalt kiriş, mesnetler üzerine oturtulur. Bu işlemin ardından kiriş bir seri yükleme hazırlığı adımına tabi tutulur. Hazırlıkların ardından esas deney başlar ve toplam 240 saniye süreyle kirişe 980 ± 5 mN yük uygulanır (Şekil 4.16). Deney esnasında uygulanan yükün etkisiyle kirişte meydana gelen sünme, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik haline getirilir. Deney süresi sonunda deney yükü otomatik olarak kalkar ve yazılım tarafından sünme sertliği ve sünme oranı hesaplanır (McGennis vd., 1994; Warren vd., 1994).



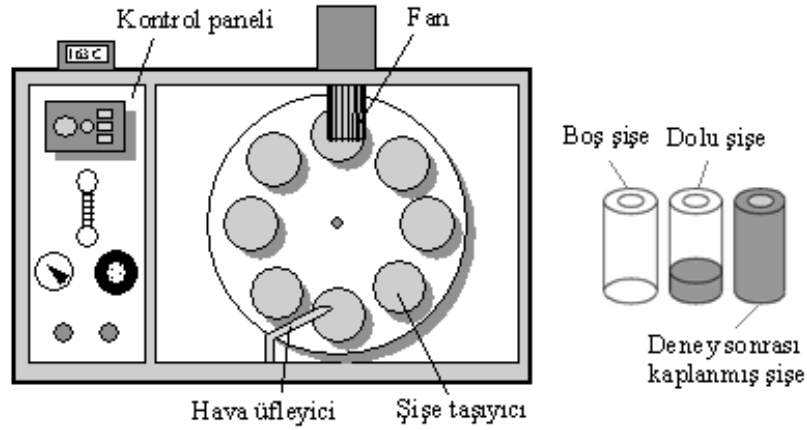
Şekil 4.16. Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

4.1.6. Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri

Organik bir malzeme olan asfalt; oksijen, ultraviyole ışınlar ve sıcaklık değişimlerinden etkilenerek yaşlanma (sertleşme) eğilimi göstermektedir. Asfaltın yaşlanması, yapım boyunca meydana gelen "kısa süreli yaşlanma" ve hizmet ömrünün ilk 5-10 yılı boyunca meydana gelen "uzun süreli yaşlanma" olmak üzere iki çeşittir. Superpave bağlayıcı şartnamesi, asfaltın kısa süreli yaşlanmasını değerlendirebilmek için Dönel İnce Film Etüvü Deneyi'ni (RTFOT), uzun süreli yaşlanmasını değerlendirebilmek için ise Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyini gerekli görmektedir (Kennedy vd., 1994; Öztürk ve Çubuk, 2004).

4.1.6.1. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)

Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) ile sıcaklık ve havanın etkisiyle asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım aşamalarında meydana gelen uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve deneyden sonra yaşlanmış numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmektedir (Tunç, 2001; Kennedy vd., 1994; Zaniewski ve Pumphrey, 2004; URL-4, 2014). RTFOT cihazı Şekil 4.17'de şematik olarak gösterilen 163°C'lik ısıya sahip bir etüv, etüvün içerisinde silindirik cam şişelerin yerleştirildiği dönen tablası bulunan bir taşıyıcı ve şişelere hava püskürten bir hava üfleyici parçaya sahiptir.



Şekil 4.17. Dönel ince film etüvü (RTFOT) aleti şematik görünüşü (Altaş, 2002; Dinç, 1999; URL-4, 2014; Rebush, 1999).

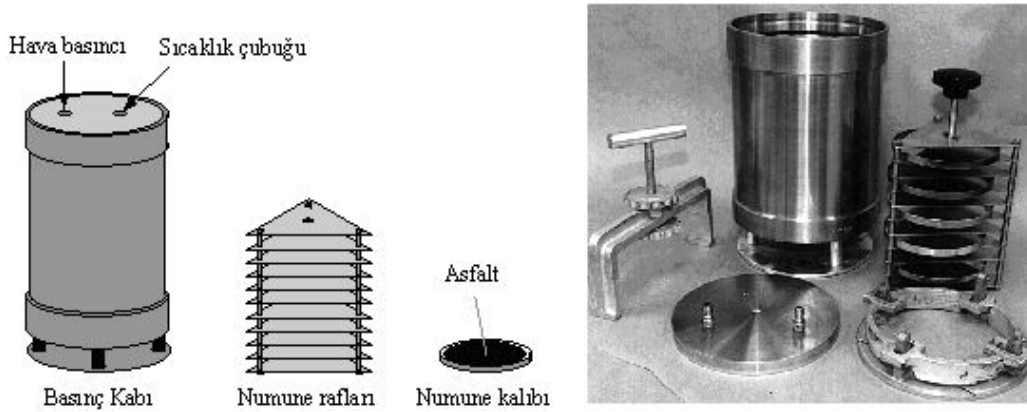
Numuneleri deneye hazırlamak için numune akışkan hale gelinceye kadar ısıtılır. Deneyde kullanılacak 8 adet şişenin her birinin içine 35 ± 0.5 gr asfalt bağlayıcı numunesi doldurularak döner tablanın içerisine yerleştirilir ve tabla 15 devir/dakika yapacak şekilde 85 dakika süreyle döndürülür. Bu esnada hava üfleyici yardımıyla şişelere hava püskürtülür. Dönme hareketi, hava üfleme ve sıcaklığın etkisi ile asfalt bağlayıcı şişenin içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturur ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanır. Deneyden sonra, bu şişelerden 6 tanesi başka bir kaba boşaltılır ve daha sonra PAV ve DSR deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Diğer iki şişe ise oda sıcaklığında soğutulularak, bağlayıcıda oluşan kütle kaybının tespiti için tartılır. Kütle kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Altaş, 2002; Tunç, 2001; Dinç, 1999; Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Warren vd., 1994).

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{[(\text{İlk Kütle} - \text{Son Kütle}) / \text{İlk Kütle}] \times 100}{(4.10)}$$

4.1.6.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi

Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) yöntemi, kaplama servis ömrünün ilk 5-10 yılı boyunca bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuara yansıtabilmek amacıyla SHRP tarafından geliştirilmiştir (Kennedy, 1994; Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Christensen ve Anderson, 1992). Deneyde, asfalt numunesi bir basınç kabına konularak etüvde 20 saat süreyle sabit sıcaklık ve basınç etkisinde bırakılır. Deneyde RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numuneler kullanılmaktadır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşılabilecek çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır (Altaş, 2002; Tunç, 2001; Öztürk ve Çubuk, 2004).

Deney aparatı, içerisinde rafları bulunan basınçlı yaşlandırma kabı ve etüvden meydana gelir. Hava basıncı, valfli basınçlı kuru hava silindiri tarafından sağlanır. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) ve parçaları Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.18. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) ve parçaları (McGennis vd., 1994; Warren vd., 1994; Petersen vd., 1994).

Basınç kabı, 2.1 ± 0.1 MPa (305 ± 15 psi) sabit hava basıncı ve kullanılacak bağlayıcı sınıfına bağlı olarak farklı test sıcaklığı şartlarında çalışacak şekilde dizayn edilmiştir ve içerisinde 10 adet numune kalıbı bulunmaktadır. Bağlayıcı sınıfına göre belirlenen deney sıcaklıkları Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Bağlayıcı Sınıfına Göre Uygulanacak PAV Deney Sıcaklıkları (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994)

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

Deneyden önce RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt numune akıcı bir hale gelinceye kadar ısıtılır. Hazır durumdaki numune kaplarının her birine 50 ± 0.5 gr asfalt malzeme dökülür ve bu kaplar taşıyıcının raflarına yerleştirilir. Basınç kabı, deneyden önce, istenilen test sıcaklığına (90, 100 veya 110°C) kadar ısıtılır. Isıtmadan sonra raflı taşıyıcı, basınç kabına yerleştirilerek kapak kapatılır. Kabin sıcaklığı test sıcaklığına $\pm 2^\circ\text{C}$ yaklaştığında, kaba 2.1 ± 0.1 MPa'lık basınç, 20 saat ± 10 dakika süreyle verilerek yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir. Deney sonrasında kaptaki basınç, asfaltta köpürmeye neden olmaması için 9 ± 1 dakika sürecek şekilde boşaltılır. Bu işlemden sonra asfalt numuneler kaptan çıkartılır ve içinde sıkışan havanın uzaklaştırılması için 163°C 'de 30 dakika etüvde tutulur (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Loh ve Olek, 1999; Warren vd., 1994; Petersen vd., 1994).

4.2. Agrega Deneyleri

4.2.1. Los Angeles Aşınma Deneyi

Los Angeles Deneyi, agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını tespit etmek için yapılmaktadır. Deney, Los Angeles makinesiyle gerçekleştirilmektedir. Alet iç çapı 71 cm, iç uzunluğu 51 cm olan içi boş çelik bir silindir ve her biri 390-444 gr ağırlığında 4.68 cm çapında dökme demir yada çelik bilyelerden oluşmaktadır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Los Angeles deney aleti ve deney numuneleri

Gerekli numune miktarları, kullanılan bilye sayısı ve yükleme ağırlığı Los Angeles deney standardında verilmektedir. Standarda göre hazırlanan deney numunesi ve aşındırıcı yükler deney aletine konur ve ağzı sıkıca kapatılır. Makine 30-33 devir/dakika hızla döndürülerek A, B, C, D granülometri sınıfındaki numuneler için 500 devir, E, F, G sınıfındaki numuneler için 1000 devir yaptırılır. Daha sonra numune makineden çıkarılır ve 12 no'lu elekten elenir (TS EN 1097-2). Elek üstünde kalan kısım yıkanır ve $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulur ve tartılır. Aşınma kaybı aşağıdaki formül ile belirlenmektedir:

$$\text{Aşınma Kaybı, \%} = (A-B)/A \times 100 \quad (4.11)$$

A : İlk ağırlık (kuru)

B : Son ağırlık (kuru)

4.2.2. Mikro-Deval Deneyi

Mikro-Deval deneyi, belirli boyutlara göre sınıflandırılan agrega numunelerinin bir tambur içerisinde ve yağ ortamında, belirli bir dönüş hızında ve belirli bir tur sayısı boyunca aşındırılması ve ardından standartlarla belirlenmiş elekten geçen malzemenin ilk malzeme miktarına göre oranlanmasına dayanan bir agrega dayanım deneyidir. (URL-5, 2015)

Deney öncesinde Mikro-Deval deney standardında gradasyonu belirlenmiş, yıkanmış ve $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulmuş agregalardan 500 ± 2 gr kütleyle sahip iki deney numunesi oluşturulur. Her bir deney numunesi, ayrı bir tamburun içine konularak her bir tambura 5000 ± 5 gr çelik bilye ve 2.5 ± 0.05 lt su ilave edilir (Şekil 4.20). Kapağı sıkıca kapatılan tamburlar iki adet mil üzerine yerleştirilerek 100 ± 5 devir/dakika hızda 12000 ± 10 devir tamamlanına kadar döndürülür (TS EN-1092-1).



Şekil 4.20. Mikro-Deval deney aleti ve deney numuneleri

Deneyden sonra malzeme kaybı olmamasına özen göstererek malzeme bilyelerden ayıklanır ve 12 nolu elekten elenerek yıkanır. Yıkanan malzeme sabit ağırlığa ulaşınca kadar $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulur ve tartılır. Her bir deney numunesi için Mikro-Deval katsayısı (M_{de}) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$M_{de}=(500-m)/5 \quad (4.12)$$

m : 12 nolu elek üzerinde kalan malzeme kütlesi (gr)

4.2.3. Magnezyum Sülfat Deneyi

Magnezyum sülfat deneyi agregaların hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan dirençlerini laboratuarda kısa süre içinde tespit edebilmek amacıyla uygulanan hızlandırılmış bir deneydir (İlcalı, 2001). Çözeltinin hazırlanması için saf ve susuz magnezyum sülfat tuzu yada kristalize magnezyum sülfat tuzu kullanılmaktadır. Her litre su için 350 gr susuz MgSO_4 yada 1500 gr kristalize MgSO_4 eklenir.

Şartnamede belirtilen sınırlar içinde kalacak şekilde elenmiş agregalar 110°C 'lik etüvde kurutulur ve şartnamede belirtilen miktarlarda tel sepetin üstüne konularak, üzeri en az 2 cm kaplanacak şekilde çözelti içine daldırılır. 21°C sıcaklıktaki ortamda 16-18 saat bekletilir ve süre sonunda numune çözeltilerden çıkarılarak 5 dakika süzölmeye bırakılır. Süzölme işlemi sonrasında 110°C etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulur (Şekil 4.21). Etüvden çıkarılınca oda sıcaklığına kadar soğutulur ve ikinci kez çözeltiye daldırılarak aynı işlemler uygulanır. Bitümlü kaplama agregaları için bu işlem 5 kez tekrar edilir. 5. tekrarın sonunda çözelti tamamen temizleninceye kadar numune yıkanır,

kurutulur ve tartılır. Deney sonrasında donma kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanır (TS EN 1367-2).

$$\text{Donma Kaybı, \%} = (A-B)/A \times 100 \quad (4.13)$$

A : İlk ağırlık (kuru)

B : Son ağırlık (kuru)



Şekil 4.21. Magnezyum sülfat deneyi

4.2.4. Metilen Mavisi Deneyi

Metilen mavisi deneyi, zararlı kil minerallerinin miktarı hakkında fikir sahibi olmak için yapılan bir deneydir.

Metilen mavisi çözeltisi, su içerisindeki deney numunesinden oluşan süspansiyona arka arkaya ilave edilir. Boya çözeltisinin deney numunesi tarafından adsorpsiyonu, çözeltinin her ilavesinden sonra süzgeç kağıdında bir leke deneyi yapılarak serbest boyanın varlığının belirlenmesiyle kontrol edilir. Serbest boyanın varlığı teyit edildiğinde, metilen mavisi değeri hesaplanır ve deneye tabi tutulan agreganın kilogramı başına adsorplanan boya, gram cinsinden ifade edilir.

Metilen mavisi çözeltisi 10 ± 0.1 gram/litre olacak şekilde hazırlanmalıdır. Çözeltinin kullanım süresi en fazla 28 gün olmalıdır. Çözelti, ışık almayacak şekilde muhafaza edilmelidir.

Laboratuar numuneleri 0-2 mm tane büyüklüğüne sahip 200 gr'lık agregalardan oluşur. Deney numunesi $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve soğumaya

birakılır. 500±5 ml'lik damıtık veya demineralize su behere konur, kurutulmuş deney numunesi behere ilave edilir ve karıştırıcının pervanesi tabana değmeyecek şekilde ayarlanır. Süzgeç kağıdı, yüzeyinin büyük kısmı herhangi bir yere temas etmeyecek şekilde uygun bir destek üzerine yerleştirilir. Süspansiyon, 600±60 devir/dakika hızda 5 dakika karıştırıldıktan sonra behere 5 ml boya çözeltisi ilave edilir ve beherdeki malzeme 400±40 devir/dakika hızda en az 1 dakika karıştırılır ve süzgeç kağıdı üzerinde leke deneyi yapılır. Leke deneyinde, her boya ilavesinden sonra bir çubuk yardımıyla süspansiyondan bir damla alınarak süzgeç kağıdı üzerine bırakılır. Islak bölgede, yaklaşık 1 mm'lik açık mavi bir halka içeren halenin birikinti etrafında meydana gelmesi durumunda deney pozitif kabul edilir. Kil minerallerinin boya adsorpsiyonu geç tamamlandığından, leke deneyi daha fazla boya çözeltisi ilave edilmeksizin 1 dakika aralıklarla 5 dakika süreyle tekrarlanarak dönüm noktası tayin edilir (Şekil 4.22).

5 ml'lik boya çözeltisi ilavesinden sonra hale belirmezse tekrar 5 ml boya ilavesi yapılır ve deney tekrarlanır. Bu işlem hale belirinceye kadar devam eder. Hale görüldükten sonra boya ilavesi yapılmaksızın karıştırmaya devam edilir ve 1 dakika aralıklarla leke deneyleri yapılır.

0-2 mm tane büyüklüğü aralığının kilogramı başına tüketilen boyanın gram cinsinden ifadesi olan metilen mavisi değeri (MB) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (TS EN 933-9).

$$MB = (V_1/M_1) \times 10 \quad (4.14)$$

V_1 : İlave edilen boya çözeltisinin toplam hacmi (ml)

M_1 : Deney numunesinin kütlesi (gr)



Şekil 4.22. Metilen mavisi deneyi

4.3. Karışım Deneyleri

4.3.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

BSK numuneleri üzerinde uygulanan Marshall Stabilite ve Akma Deneyi, numunelerin deformasyona karşı maksimum dayanımını (stabilite) ve maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyonu (akma) tespit etmek için yapılmaktadır. Deneye başlamadan önce sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilir. Daha sonra numuneler $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40-60 dak arasında bekletilir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesini ortalayacak biçimde yerleştirilir ve numuneye 50 ± 2 mm/dak hızla yükleme yapılır. Marshall deney düzeneği Şekil 4.23'te görülmektedir.



Şekil 4.23. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve bu yüke ulaşıldığı andaki deformasyon değerleri kaydedilir. Numune sudan çıkarıldıktan sonra 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63.5 mm olduğu kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları kullanılmaktadır.

Deney sonunda elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınır. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılır. Geriye kalan numunelerin tekrar

ortalaması alınır ve aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa bu numune serisi iptal edilerek yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanır.

Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınıslıoğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla kalıcı Marshall stabilitesi deneyi de uygulanmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması karışımın nem hasarına karşı dayanımının da yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi yönteminde numuneler $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. Deney sonunda bu numunelerin stabilite değerlerinin normal stabilite değerlerine oranı kalıcı Marshall stabilitesi değerini vermektedir.

4.3.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Agrega ile bitüm arasındaki adezyon, uzun vadede kaplamanın performansını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Agreg a ile bitüm arasına giren su, adezyonu azaltarak bitümlü sıcak karışım kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına etki eden faktörler (Behiry, 2013) aşağıda verilmiştir:

- a) Kaba ve ince agreganın türü karışımda meydana gelebilecek nem hasarını önemli ölçüde etkiler.
- b) Karışımın nem hasarına etki eden ikinci faktör ham petrolün kaynağı ve asfalt çimentosunun üretiminde kullanılan rafineri sürecidir. Ancak çoğu asfalt çimentosu nem hasarı açısından büyük bir etkiye sahip değildir.
- c) Üçüncü faktör asfalt beton karışımının özelliğidir. Karışımın permabilitesi, boşluk oranı, asfalt çimentosu ve agreg a gradasyonu gibi özellikler suyun doygunluk seviyesini ve drenajını kontrol ettikleri için önemlidir. %6'nın üzerinde boşluğa sahip karışımlarda daha fazla nem hasarı meydana gelir.
- d) Asfalt film kalınlığı da bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyeti üzerinde etkilidir. Suyun zararlı etkilerine karşı ince asfalt film kalınlığına sahip karışımlar, asfalt film kalınlığı fazla olan karışımlardan daha hassastır.

e) Trafik ve çevresel şartlar karışımların soyulma miktarını etkiler.

Nem hasarı deneyi karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ve kullanılan katkı maddesinin etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Deney için 7 ± 0.5 hava boşluğuna sahip en az 6 adet numune yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Nem hasarı numunelerinin hazırlanmasında tek fark kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat süresince 60°C sıcaklıkta, ardından 2 saat süresince karıştırma sıcaklığındaki etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler iki gruba ayrılmakta ve birinci grupta bulunan numuneler saf su içeren piknometre içerisine konulup 13-67 kPa vakum uygulanarak koşullandırılmaktadır. Vakum işlemi, numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam etmektedir. Boşlukların su ile dolma oranının %70'ten az olması durumunda vakum işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2003). Piknometre ve vakum aleti Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.24. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmaktadır:

$$J = B' - B \quad (4.15)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (4.16)$$

$$S' = J / I * 100 \quad (4.17)$$

J : Absorbe su hacmi (cm^3)

B' : Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

I : Hava boşluğu hacmi (cm^3)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm^3)

S' : Doygunluk derecesi (%)

Vakum işleminden sonra numuneler streç film ile kaplanarak ağzı kapanabilen plastik torbaların içine konulmaktadır. Numuneler öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmektedir. Bu sürenin sonunda numuneler poşet ve streç filmden çıkarılmaktadır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numuneler 25°C 'deki suda 2 saat bekletilmekte ve ardından 50 ± 2 mm/dak hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deney sonunda çekme dayanımı değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre Çekme Dayanımı Oranının (TSR) minimum %80 olması istenmektedir.

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (4.18)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (4.19)$$

TS : Çekme dayanımı (kPa)

P_{mak} : Kırılmaya neden olan maksimum yük (kN)

t : Ortalama numune yüksekliği (m)

d : Numune çapını (m)

TSR : Çekme dayanımı oranı (TSR)

TS_{yaş} : Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri (kPa)

TS_{kuru} : Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri (kPa)

4.3.3. İndirekt ekme Rijitlik Modülü Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların en önemli performans özelliklerinden biri olan rijitlik modülü, bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değıştirme ölçümlerinin en yaygın şekli rijitlik modülünün indirekt çekme modunda ölçülmesidir. Rijitlik modülü, uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değıştirme ile hesaplanmaktadır.

Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. İklimlendirme kabini sayesinde deney standardın dışında farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, tahmini poisson oranı, yük etki süresi, yük artış süreleri, hedef yatay deformasyon ve tahmini rijitlik modülü gibi değeri önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler uygun konuma getirilmektedir (Şekil 4.26). Öncelikle numunelere 5 defa tekrarlanan ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. Böylece cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye cihazın belirlediği yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşığıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değeri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \quad (4.20)$$

S_m : İndirekt ekme rijitlik modülü (MPa)

F : Maksimum dikey yük (N)

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

L : Ortalama numune yüksekliği (mm)

R : Poisson oranıdır (0.35)

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmakta, iki değer arasındaki fark %10'dan fazla olursa bu işlem yenilenmektedir. Numunenin ITSM değeri, aralarında %10'dan az sapma olan iki değer in ortalaması alınarak belirlenmektedir.



Şekil 4.26. UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği

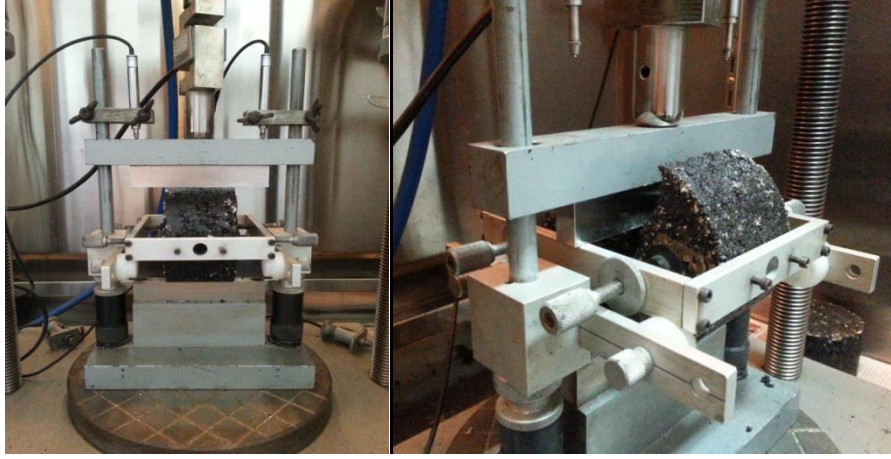
4.3.4. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, üzerinden geçen her taşıtta kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemede mikro hasarlara, mikro hasarlar da uzun dönemde yorulma çatlaklarına neden olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en sık görülen ve tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artan bir bozulma türüdür (Kök, 2007).

İndirekt çekme yorulma deneyinde silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik çekme gerilmeleri oluşturmakta ve numunenin düşey doğrultuda orta kısmından yarılmasına neden olmaktadır.

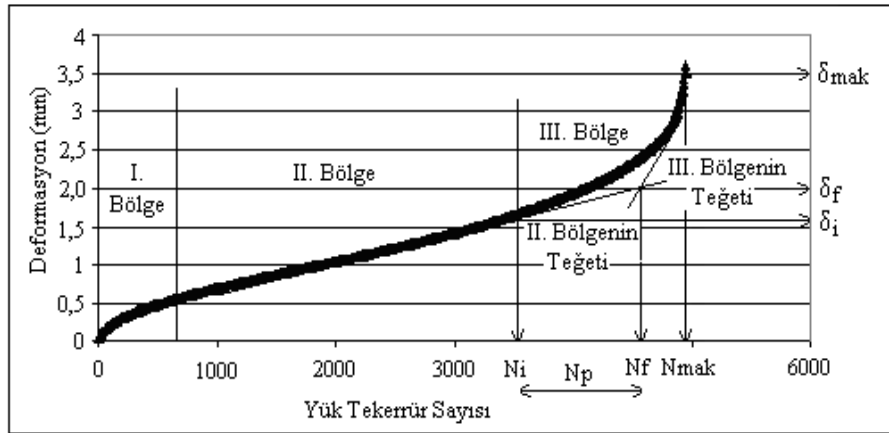
İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme kontrollü olarak UTM deney aleti ile yapılmaktadır (Şekil 4.27). İklimlendirme kabini sayesinde deney standart deney sıcaklığından farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilir. Numune yüksekliği, numune çapı, yük periyodu, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerler önceden yazılıma girilir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilir, düşey deformasyonu okuyacak LVDT olarak

adlandırılan doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler ayarlanır ve deneye başlanır. Numuneler tam olarak kırılana kadar deneye devam edilir.



Şekil 4.27. Yorulma deney düzeneği

Yorulma deneyi sonucunda Şekil 4.28'de temsili olarak görülen yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, yük tekerrür sayısı-deformasyon grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. bölge ve III. bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır (Subagio vd., 2003; Aragao vd., 2010).



Şekil 4.28. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı grafiği

Çatlak ilerleme oranı (r_p), çatlak oluşuktan itibaren yorulma ömrünün sonuna kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının deformasyon miktarına oranını ifade etmektedir Çatlak ilerleme oranının formülü aşağıda verilmiştir (Subagio vd., 2003).

Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_p = \frac{N_p}{\delta_f - \delta_i} \quad (4.21)$$

Burada;

r_p : Çatlak ilerleme oranını (darbe sayısı/mm),

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısını,

δ_i : Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu (mm),

δ_f : Yorulma ömründeki toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

4.3.5. Dinamik Sünme Deneyi

Tekerlek izi, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması ile meydana gelmektedir (Tayfur vd., 2007). Trafik yüklerine direkt maruz kalan kaplama tabakası kalıcı deformasyondan en çok etkilenen tabakadır (Khodaii ve Mehrara, 2009).

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan deneylerden biri dinamik sünme deneyidir. Bu deneyde sabit değerdeki yük, silindirik numunenin yüzeyine belirli bir periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır (Şekil 4.29). Numunenin yüzeyine yerleştirilen metal plak üzerine dik olarak ayarlanan LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarında oluşan plastik ve elastik deformasyonlar tespit edilebilmektedir. Sünme ve esneklik modülleri aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenebilmektedir (ELE, 1994).

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (4.22)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (4.24)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (4.25)$$

$$\sigma = F / A \quad (4.26)$$

E_c : Sünme modülü

E_r : Esneklik modülü

ε_c : Toplam plastik eksenel birim şekil değiştirme

ε_r : Toplam elastik eksenel birim şekil değiştirme

L_1 : LVDT'nin başlangıç referans deplasmanı (mm)

L_{2n} : n darbe sayısındaki maksimum deplasman (mm) (elastik + plastik)

L_{3n} : (n+1). darbe uygulanmadan önceki deplasman (mm) (plastik)

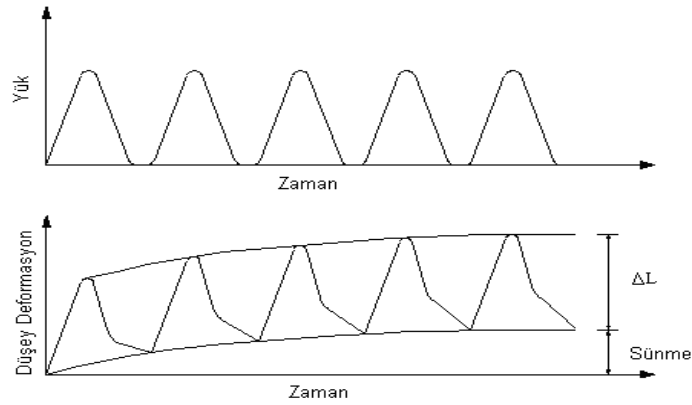
G : Numunenin başlangıç yüksekliği (mm)

σ : Maksimum düşey gerilme (kPa)

F : Maksimum düşey yük (N)

A : Numunenin kesit alanı (cm²)

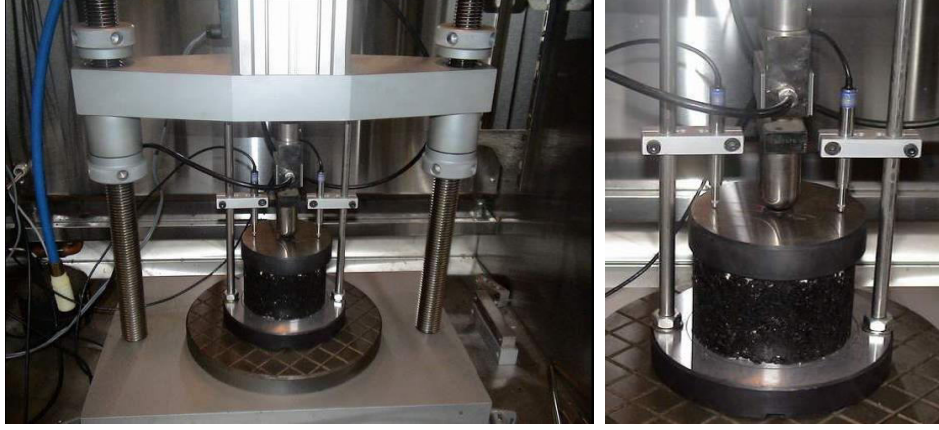
Formül 4.22 ve 4.23'te görüldüğü üzere plastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda sünme modülü düşük, elastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda esneklik modülü düşük olmaktadır.



Şekil 4.29. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi

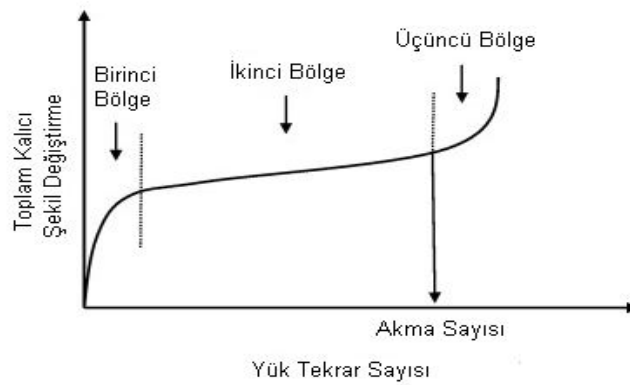
Dinamik sünme deneyi, UTM deney aleti ile yapılmaktadır (Şekil 4.30). İklimlendirme kabini sayesinde deney istenilen sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, ön yükleme gerilmesi, ön yükleme süresi, yük periyodu, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerler yazılıma girildikten sonra, numune yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde öncelikle ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması

hedeflenmektedir. Ön yüklemenin sonunda sisteme girilen gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanarak numuneler kırılincaya kadar deney devam etmektedir.



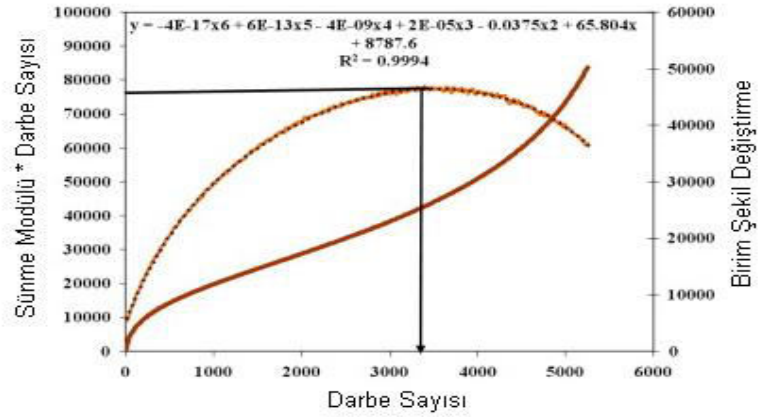
Şekil 4.30. Dinamik sünme deney düzeneği

Deney sonucunda yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 4.31'de görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, konsolidasyon meydana gelerek hacim azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta hızla artarken daha sonra artış hızı düşmektedir. İkinci bölgede toplam şekil değiştirme lineere yakın bir değişim göstermektedir. Üçüncü bölgede ise kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı noktadaki yük tekrar sayısı "akma sayısı" olarak tanımlanmış ve akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir (Witczak vd., 2002).



Şekil 4.31. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısını tespit etmek için bir diğer yöntem de Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Bu yöntemde yatay eksen darbe sayısı, düşey eksen ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olmak üzere grafik çizilerek ve grafiğin pik noktası akma sayısı olarak bulunmaktadır (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. Akma sayısının bulunması (Bausano ve Williams, 2007).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada, ana bağlayıcı olarak Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak Shell Firması tarafından üretilen SBS (Kraton D 1101) ve American Gilsonite şirketinden temin edilen Amerikan Gilsoniti kullanılmıştır. Bağlayıcı ve karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır.

Çalışmada uygulama bölgesi olarak coğrafi konumu 37°08' enleminde bulunan Şanlıurfa ili seçilmiştir. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen son 21 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Şanlıurfa'nın 21 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık (°C)
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün		
13.08.1994–19.08.1994	41.5	42.7	42.9	42.8	40.0	36.3	37.6	06.12.1994	-5.2
01.08.1995–07.08.1995	42.2	42.5	41.0	40.1	38.6	39.8	39.0	21.01.1995	-2.1
09.07.1996–15.07.1996	42.2	41.4	41.5	42.1	42.9	43.3	41.0	02.02.1996	-3.1
02.08.1997–08.08.1997	38.7	40.2	41.2	39.9	38.5	39.1	38.8	06.02.1997	-5.6
19.07.1998–25.07.1998	41.5	45.4	44.1	42.6	43.6	44.6	43.0	09.02.1998	-2.5
14.08.1999–20.08.1999	41.8	43.0	42.0	39.3	39.5	42.3	42.8	21.02.1999	-3.2
11.07.2000–17.07.2000	42.8	44.3	44.0	45.5	46.8	46.5	43.0	21.01.2000	-2.4
22.07.2001–28.07.2001	40.1	43.6	43.6	44.0	41.6	40.4	40.2	22.02.2001	-3.3
16.07.2002–22.07.2002	38.9	40.3	41.6	43.0	43.4	43.4	40.0	27.12.2002	-5.0
02.08.2003–08.08.2003	41.4	43.2	42.4	43.3	41.2	41.0	41.5	22.02.2003	-1.0
03.07.2004–09.07.2004	40.0	42.0	42.4	42.2	43.0	43.0	39.0	16.02.2004	-4.7
08.07.2005–14.07.2005	41.9	42.2	42.5	42.3	42.5	43.5	41.7	13.02.2005	-2.2
03.08.2006–09.08.2006	40.0	42.8	43.5	44.6	43.4	40.0	37.0	29.12.2006	-4.3
26.07.2007–01.08.2007	43.0	43.2	43.0	42.5	43.0	43.7	44.8	01.02.2007	-4.0
19.07.2008–25.07.2008	42.5	44.0	42.0	39.1	43.7	41.0	42.0	10.01.2008	-3.2
15.08.2009–21.08.2009	40.0	41.1	41.2	39.5	41.2	39.9	38.5	01.01.2009	-4.7
26.07.2010–01.08.2010	40.0	43.8	44.5	42.2	45.0	45.2	41.2	27.01.2010	-3.2
27.07.2011–02.08.2011	42.8	44.5	40.5	42.5	42.4	42	42.2	12.02.2011	-0.9
18.07.2012–24.07.2012	44.2	43.1	43.2	43.2	40.8	43.4	42.9	20.01.2012	-4.3
08.07.2013–14.07.2013	40.8	41.0	41.5	41.1	39.7	40.1	40.5	11.01.2013	-3.0
11.08.2014–17.08.2014	38.6	40.8	41.6	41.7	43.5	40.1	40.2	04.02.2014	-1.1

Buna göre, son 21 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (147 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (21 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması, aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Tablo 5.2'de verilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ort})^2}{n - 1}} \quad (5.1)$$

Burada;

σ : Standart sapma,

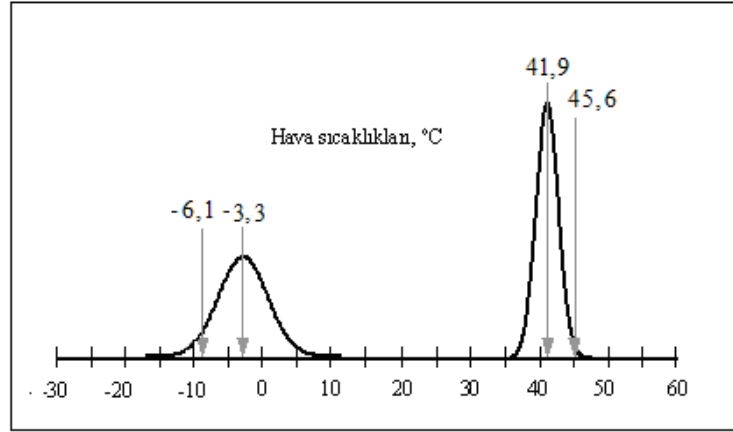
n : Örnekteki toplam gözlem sayısını,

x_{ort} : Örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalamasıdır.

Tablo 5.2. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	41.9	-3.3
Standart Sapma (°C)	1.9	1.4

21 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilirlik için sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları (σ) kullanılarak %98 güvenilirlik için sıcaklık değerleri (ortalama+2 σ) belirlenmiştir. Şekil 5.1'de, uygulama bölgesine ait Tablo 5.2'de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak bir frekans dağılım eğrisi olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. Şanlıurfa için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı

Superpave yönteminde, bitümlü bağlayıcı sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak kaplama sıcaklığı alındığından, Şanlıurfa için ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek tasarım sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki düşük tasarım sıcaklığı SHRP yöntemine göre %50 güvenilirlikte aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0.00618E^2 + 0.2289E + 42.2) \times (0.9545) - 17.78$$

$$T_{20mm} = (41.9 - 0.00618 \times 37.13^2 + 0.2289 \times 37.13 + 42.2) \times (0.9545) - 17.78 = 62.4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{min} = T_{havamin} = -3.3 \text{ } ^\circ\text{C'dir.}$$

Yukarıda SHRP yöntemi ile %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanmış kaplama tasarım sıcaklıklarının %98 güvenilirlik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 62.4 + 2 \times 1.9 = 66.2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

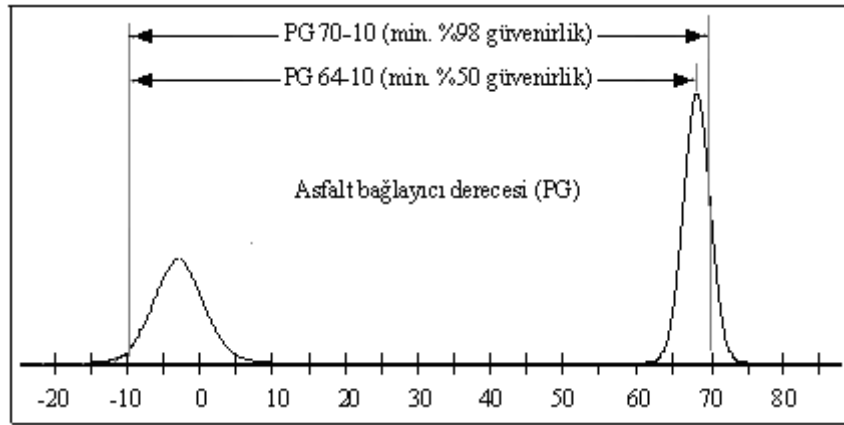
$$T_{min\%98} = T_{min\%50} + 2S_{min} = -3.3 - 2 \times (1.4) = -6.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenilirlik değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

% 50 Güvenirlik (°C)				% 98 Güvenirlik (°C)			
T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}	T _{havamaks}	T _{20mm}	T _{havamin}	T _{min}
41.9	62.4	-3.3	-3.3	45.6	66.2	-6.1	-6.1

Tablo 5.3'te, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için %50 güvenilirlikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 62.4°C, düşük sıcaklık değeri -3.3°C'dir. Bu güvenilirlik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64-10 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenilirlik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 66.2°C, düşük sıcaklık değeri -6.1°C olduğundan uygulama bölgesi için bağlayıcı sınıfı PG 70-10 olarak seçilmiştir. Şanlıurfa için seçilen bu bağlayıcı sınıfının güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Şanlıurfa için bağlayıcı sınıfı seçimi

Şanlıurfa ili için 21 yıllık tasarım trafiği tahmininin 3-30 milyon eşdeğer standart dingil yükü aralığında olduğu ve trafiğin düşük hızda (<50 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafiğinin 3-30 milyon eşdeğer standart dingil yükü aralığında ve trafiğin düşük hızda olması durumunda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin 1 derece artırılması gerektiğinden Şanlıurfa için belirlenen tasarım kriterlerindeki bağlayıcı sınıfı PG 76-10 olarak seçilmiştir.

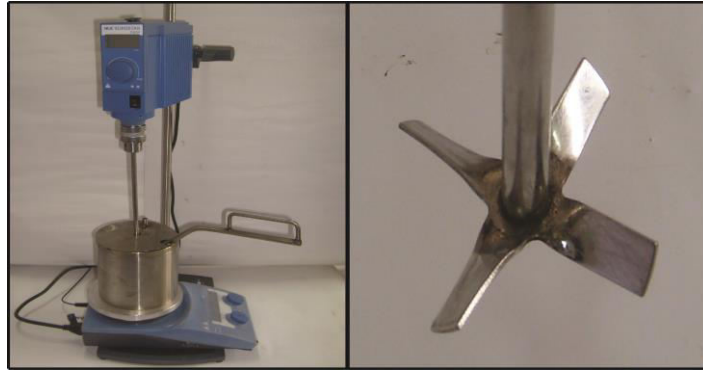
Çalışmada SBS ile birlikte Amerikan Gilsoniti kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik ve bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle farklı oranlarda SBS ve Amerikan Gilsoniti kullanılarak PG 76-Y bağlayıcı performans seviyesi değerini verecek katkı oranları belirlenmiştir. Ardından aynı performans seviyesini sağlayacak şekilde SBS içeriği azaltılıp Amerikan Gilsoniti içerikleri artırılarak iki katkı birden içeren modifiye bitümler hazırlanmıştır. Elde edilen modifiye bitümler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre, dinamik kayma reometresi ve kırılgan eğme reometresi deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B 160/220 (PG 52-28) sınıfı

bağlayıcı kullanılmıştır. Katkı türlerinin etkilerini ve daha fazla SBS-Amerikan Gilsoniti bağlayıcı çeşidini değerlendirmek amacıyla ana bağlayıcı olarak B 160/220 saf bağlayıcı ile PG 76-Y elde edilmeye çalışılmıştır.

5.1. Katkı Oranlarının Belirlenmesi

Çalışmada modifiye bitümler aşağıda belirtildiği şekilde hazırlanmıştır:

- a. Saf bitüm sıcaklığı 135°C olan bir etüv içerisinde bir saati geçmeyecek şekilde eriyinceye kadar bekletilmiştir.
- b. Yaklaşık 400 gr saf bitüm karıştırıcının haznesine aktarılmıştır. Belirlenen orana göre katkı maddesi hesaplanmış ve hazırlanmıştır.
- c. Karıştırıcı haznesi hot-plate'e yerleştirilmiş ve overhead karıştırıcı için ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır.
- d. Karıştırma işleminde Şekil 5.3'te görülen dört bıçaklı karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma başladıktan sonra 5 dakika içerisinde katkı maddesi bitüme ilave edilmiştir.



Şekil 5.3. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

- e. Karıştırma sıcaklığı olarak 180°C seçilmiştir. Saf bitüm ve katkı maddesi 1000 rpm dönme hızında 1 saat süresince karıştırılmıştır.
- f. Hazırlanan modifiye bitüm cam behere aktarılmıştır.

Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanmış böylece karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.

Çalışmada öncelikle %2, %3, %4 ve %5 oranlarında SBS; %12, %14, %16, %18 ve %20 oranlarında Amerikan Gilsoniti kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Elde

edilen sonuçlardan %5 SBS modifiyeli ve %18 Amerikan Gilsoniti içeren yaşlandırılmamış modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans seviyesinin PG 76-Y olduğu ve tekerlek izi parametrelerinin ($G^*/\sin \delta$) birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılacak en yüksek SBS içeriği %5, Amerikan Gilsoniti içeriği ise %18 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamında %2, %3, %4 SBS ve farklı oranlarda Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitümler hazırlanarak yüksek sıcaklık performans seviyesi PG 76-Y olacak ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) %5 SBS ve %18 Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitümlere yakın (en fazla $\pm\%5$ fark) olacak Amerikan Gilsoniti içerikleri belirlenmiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Katkı türü	Katkı içeriği (%)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)							Performans
		Sıcaklık (°C)							Seviyesi
		52	58	64	70	76	82	88	
PG 52-28		2.021	0.964	-	-	-	-	-	PG 52
SBS	2.0	-	2.734	1.264	0.653	-	-	-	PG 64
	3.0	-	3.423	1.642	0.838	-	-	-	PG 64
	4.0	-	5.994	3.107	1.616	0.892	-	-	PG 70
	5.0	-	7.773	4.312	2.372	1.367	0.852	-	PG 76
AG	12.0	-	7.266	3.413	1.750	0.879	-	-	PG 70
	14.0	-	9.673	4.557	2.250	1.131	0.631	-	PG 76
	16.0	-	10.264	5.016	2.516	1.259	0.697	-	PG 76
	18.0	-	12.029	5.846	3.038	1.504	0.817	-	PG 76
	20.0	-	15.773	7.701	3.825	1.962	1.017	0.558	PG 82
%2 SBS + % A AG	12.0	-	9.918	5.142	2.864	1.370	0.726	-	PG 76
	13.0	-	10.942	5.695	2.889	1.495	0.797	-	PG 76
	14.0	-	11.947	6.235	3.208	1.672	0.904	-	PG 76
%3 SBS + % B AG	8.0	-	9.067	4.661	2.401	1.271	0.689	-	PG 76
	10.0	-	10.572	5.600	2.812	1.481	0.805	-	PG 76
%4 SBS + % C AG	6.0	-	9.476	5.096	2.618	1.405	0.763	-	PG 76

Elde edilen sonuçlardan çalışmanın devamında %5 SBS, %18 Amerikan Gilsoniti, %2 SBS + %13 AG, %3 SBS + %10 AG ve %4 SBS + %6 AG kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmanın geri kalanında kullanılacak bağlayıcılar ve kısaltmaları Tablo 5.5'te görülmektedir.

Tablo 5.5. Çalışmada kullanılacak bağlayıcılar ve kısaltmaları

Bağlayıcı türü	Kısaltma
Saf	PG 52-28
%5 SBS	MB _{5S}
%18 AG	MB _{18G}
%2 SBS + %13 AG	MB _{2S+13G}
%3 SBS + %10 AG	MB _{3S+10G}
%4 SBS + %6 AG	MB _{4S+6G}

Katkı oranları belirlendikten sonra saf ve belirlenen oranlarda katkı içeren modifiye bitümler dönel ince film halinde ısıtma deneyine (RTFOT) tabi tutularak kısa dönem yaşlandırılmışlardır. TS EN 12607-1'e uygun olarak yapılan RTFOT deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. PAV deneyinde RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılara 100°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmıştır. Basınçlı yaşlandırma deney aleti bölümümüzde bulunmadığından PAV deneyi İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır. Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde DSR, uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde BBR deneyleri uygulanarak saf ve modifiye bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR ve BBR deneylerinden elde edilen değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6'da görüldüğü üzere RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının 52°C sıcaklıkta ve modifiye bitümlerin 76°C sıcaklıkta şartname limiti değeri olan 2200 Pa değerini sağladıkları belirlenmiştir. Orijinal ve RTFOT kalıntısı numuneler üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 52-Y, modifiye bitümlerin ise PG 76-Y olduğu belirlenmiştir. RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda %18 AG kullanımının RTFOT sonrası tekerlek izi parametresi açısından %5 SBS kullanımına göre önemli oranda artış sağladığı belirlenmiştir. Modifiye bitümlerdeki SBS içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izi parametresi azalmıştır. Benzer sonuç PAV kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneylerinde de görülmüştür. En yüksek yorulma parametresi %18 AG modifiyeli bitümde görülürken en düşük değer %5 SBS modifiyeli bitümde görülmüştür.

Tablo 5.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları

DSR deney sonuçları						
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)					
	PG 52-28	MB _{5S}	MB _{18G}	MB _{2S+13G}	MB _{3S+10G}	MB _{4S+6G}
52	2.021	-	-	-	-	-
76	-	1.367	1.504	1.495	1.481	1.405
	G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (Şartname limiti min. 2.2 kPa)					
52	8.782	-	-	-	-	-
76	-	4.673	8.678	7.810	7.084	6.364
	G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (Şartname limiti maks. 5000 kPa)					
16	2023	-	-	-	-	-
25	-	739	4213	2991	2683	2193
28	-	556	3186	2234	1948	1643
31	-	398	2345	1674	1454	1219
34	-	300	1761	1243	1095	911
37	-	227	1315	929	825	688
BBR deney sonuçları						
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)					
	PG 52-28	MB _{5S}	MB _{18G}	MB _{2S+13G}	MB _{3S+10G}	MB _{4S+6G}
-6		0.330	0.333	0.326	0.310	0.305
-12	-	0.291	0.294	0.286	0.247	0.262
-18	0.562					
-24	0.451					
	Sünme sertliği (Mpa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)					
-6	-	43.2918	151.0398	83.8838	92.6497	60.0304
-12		76.790	283.9786	146.885	139.314	108.923
-18	165.7					
-24	325.4					
Performans seviyesi (PG)						
	52-28	76-16	76-16	76-16	76-16	76-16

Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini belirlemek amacıyla saf bağlayıcının PAV kalıntısı üzerinde değişik sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucunda PAV kalıntılarının hepsinin uygulanan sıcaklıklarda G*.sin δ şartname limitini (maks. 5000 kPa) şartını sağlamıştır.

Ayrıca -6, -12, -18 ve -24°C sıcaklıklarda PAV kalıntıları üzerinde BBR deneyleri uygulanmıştır. BBR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının -18°C sıcaklıkta, modifiye

bitümlerin ise bütün bağlayıcıların -6°C sıcaklıklarda m-değeri ve sünme sertliği şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir. Tablo 5.7'de verilen PG 52-Y ve PG 76-Y bağlayıcılarına ait Superpave şartname kriterleri dikkate alındığında saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 52-28, modifiye bağlayıcıların performans seviyelerinin ise PG 76-16 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen modifiye bitümlerin Şanlıurfa için uygun olan bağlayıcı kriterlerini (PG 76-10) sağladığı tespit edilmiştir.

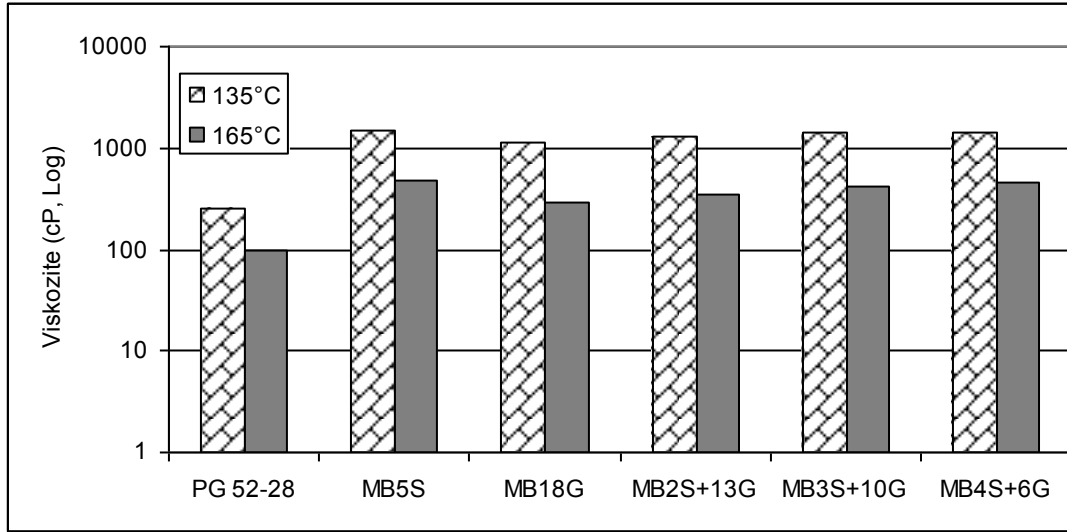
Tablo 5.7. PG 52-Y ve PG 76-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994)

PERFORMANS SINIFI	PG 52-							PG 76-				
	10	16	22	28	34	40	46	10	16	22	28	34
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 52							< 76				
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34
ORJİNAL BAĞLAYICI												
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230											
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s, Test Sıcaklığı, °C	135											
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	52							76				
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	52							76				
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI												
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90							100 (110)				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	10	7	37	34	31	28	25
Fiziksel Sertleşme,	Rapor											
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24

Saf ve modifiye bitümlere 135°C ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyleri uygulanmıştır. Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.8'de verilmiştir. 135°C ve 165°C sıcaklıktaki bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.8. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları

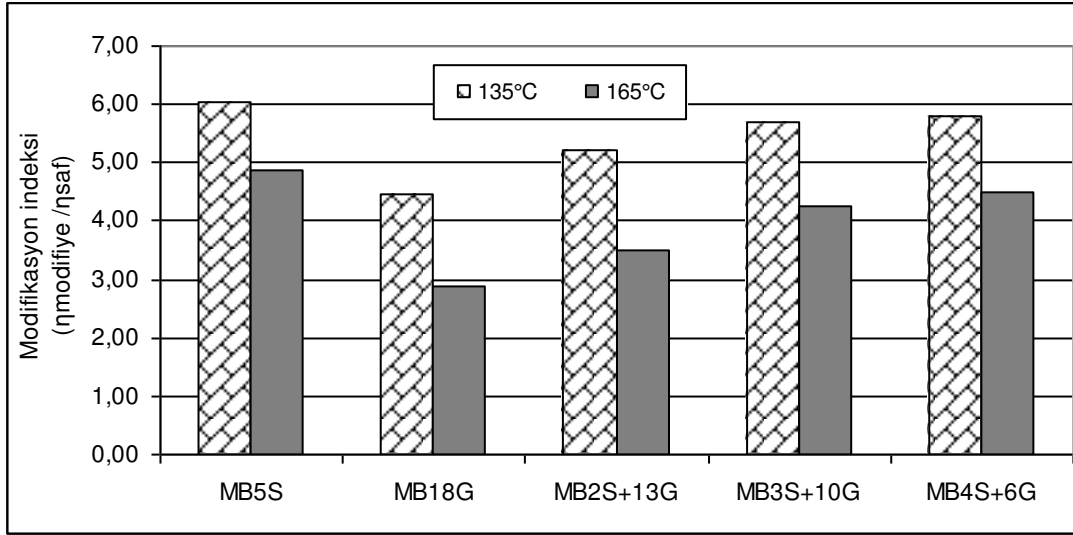
Özellik	PG 52-28	MB _{5S}	MB _{18G}	MB _{2S+13G}	MB _{3S+10G}	MB _{4S+6G}
Viskozite (cP, 135°C)	250.0	1513	1113	1300	1425	1450
Viskozite (cP, 165°C)	100	487.5	287.5	350	425	450
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}}/\eta_{\text{saf}}$, 135°C)	1.00	6.05	4.45	5.20	5.70	5.80
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}}/\eta_{\text{saf}}$, 165°C)	1.00	4.88	2.88	3.50	4.25	4.50
Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	146.2-153.9	190.1-194.9	174.6-179.9	177.9-183.2	186.5-192.4	187.1-193.2
Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	130.5-137.4	175.8-181.5	163.8-168.5	166.8-171.7	174.2-179.6	174.6-180.1



Şekil 5.4. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri Superpave şartname limiti olan maks. 3000 cP değerini sağlamıştır. Katkı kullanımı ile bütün sıcaklıklarda viskozite değerleri artmıştır. Aynı performans seviyesine sahip olmalarına rağmen %5 SBS içeren modifiye bitümün viskozite değerlerinin en yüksek olduğu ve %18 AG modifiyeli bitümün viskozite değerinin ise en düşük olduğu

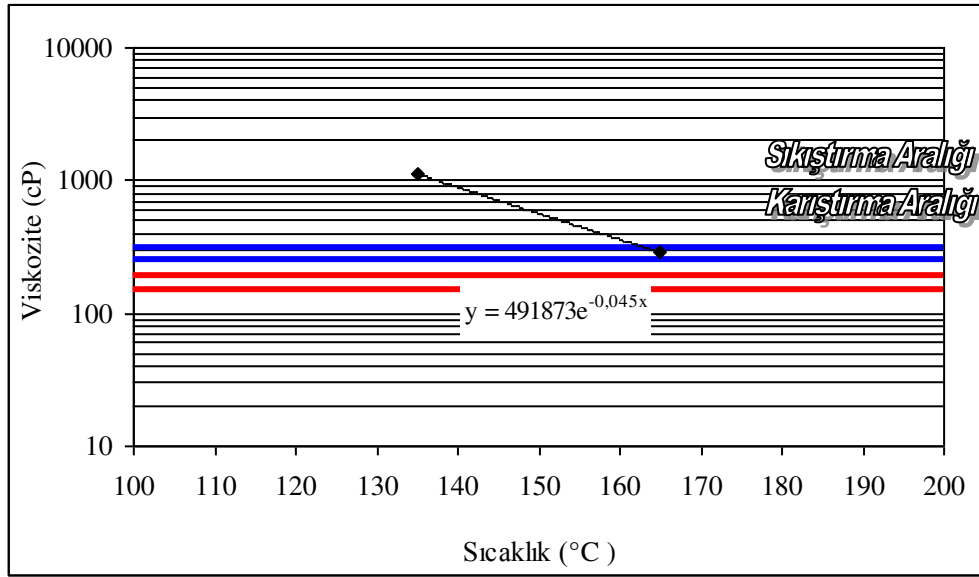
belirlenmiştir. Modifiye bitümlerdeki SBS içeriği arttıkça her iki sıcaklıkta viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin saf bağlayıcının viskozite değerine oranlanması ile belirlenen modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$) değerleri Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Modifikasyon indeksi değerlerinin sıcaklıkla değişimi

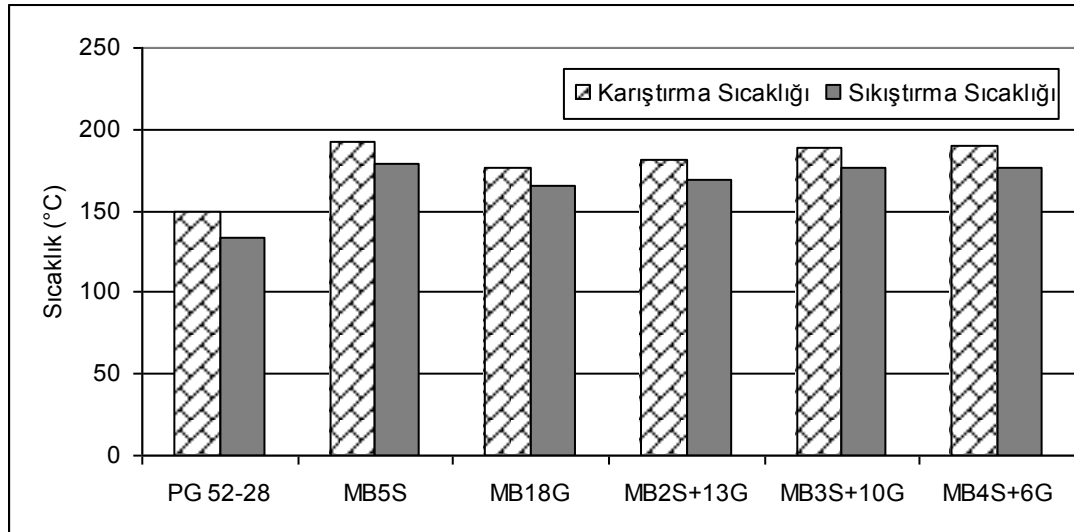
Modifikasyon indeksi değerleri incelendiğinde bütün sıcaklıklarda viskozite değerini en fazla arttıran katkının SBS olduğu, en az oranda arttıran katkının ise AG olduğu tespit edilmiştir. SBS ve AG'nin birlikte kullanılması ile sadece AG kullanımına göre viskozite değerlerinin daha yüksek olduğu ve SBS oranı arttıkça viskozite değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcıların plentte agregayla karıştırılırken ve bitümlü sıcak karışımların arazide sıkıştırılırken yeterli işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Örnek olarak %18 AG içeren modifiye bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. %18 AG içeren modifiye bağlayıcının viskozite-sıcaklık grafiği

Tablo 5.8'de verilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Şekil 5.7'de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı gerekmiştir. Bu durum katkı kullanımı ile bağlayıcı performansının artmasına rağmen agregayla karıştırma ve BSK'nın sıkıştırılması sırasında daha yüksek sıcaklık gerekeceğini dolayısıyla plentte hazırlama sırasında daha fazla enerji gerekeceğini göstermektedir. Katkı türleri ve birlikte kullanımının etkileri değerlendirildiğinde modifiye

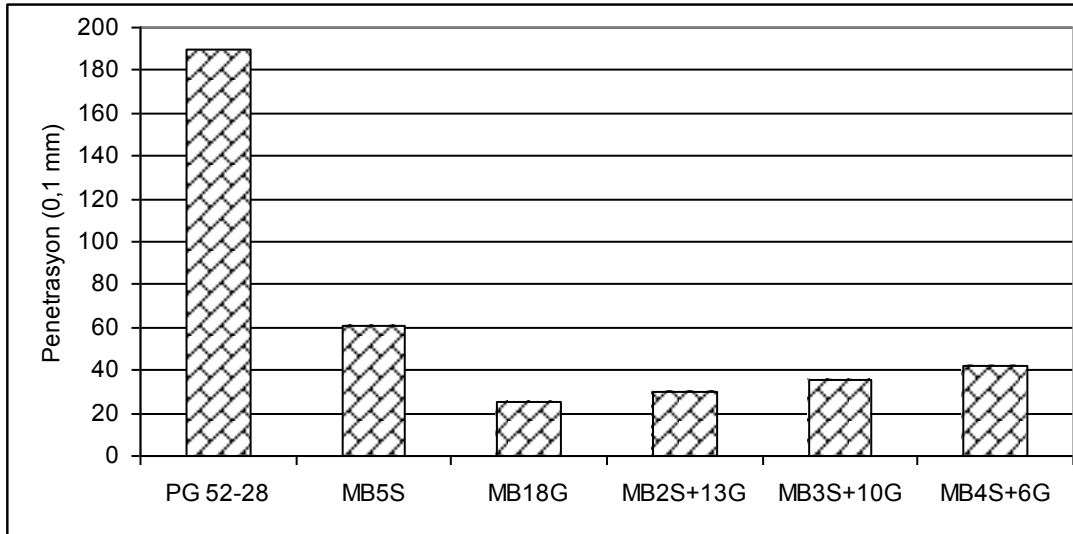
bitümler arasında en yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına viskozite değerlerine bağlı olarak %5 SBS modifiyeli bitümün en düşük değerlere ise %18 AG modifiyeli bitümün sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bitümlerdeki SBS içeriği arttıkça daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyulmuştur.

5.2. Konvansiyonel Bağlayıcı Deneyleri

Hazırlanan modifiye bitümler üzerinde Superpave bağlayıcı deneylerinin yanı sıra penetrasyon, yumuşama noktası ve özgül ağırlık deneyleri de uygulanmıştır.

5.2.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

Bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.8'de verilmiştir.



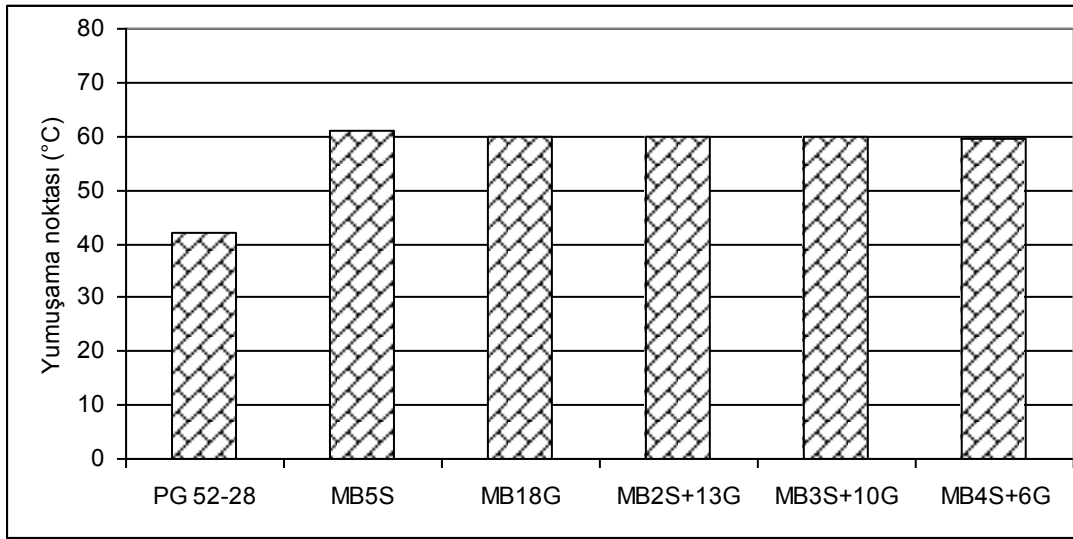
Şekil 5.8. Penetrasyon deney sonuçları

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile penetrasyon değerleri azalmıştır. Penetrasyon değerlerinde saf bitüme göre en fazla azalmaya %18 AG kullanımının, en az azalmaya ise %5 SBS kullanımının neden olduğu belirlenmiştir. Katkıların ikili kullanılmasında SBS içeriği arttıkça penetrasyon değerleri artmıştır. %5 SBS, %18 AG, %2 SBS + %13 AG, %3 SBS + %10 AG ve %4 SBS + %6 AG içeren modifiye bitümlerin

penetrasyon değerlerinin saf bağlayıcıya göre sırasıyla 3.14, 7.50, 6.32, 5.34 ve 4.56 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Bağlayıcılara uygulanan yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.9'da görülmektedir.

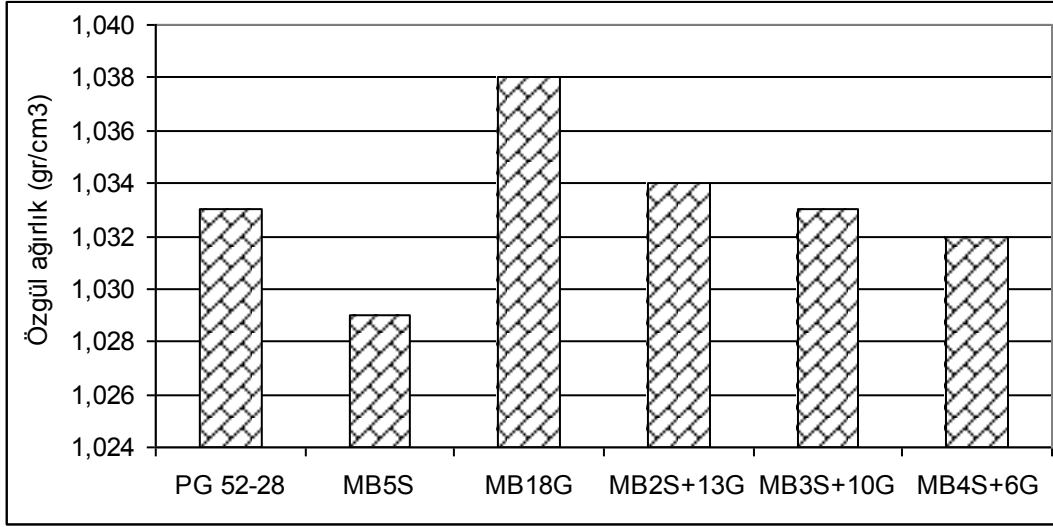


Şekil 5.9. Yumuşama noktası deney sonuçları

Şekil 5.9'da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile yumuşama noktası değerleri artmıştır. Bu durum kullanılan bütün katkıların bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımını arttıracaklarını göstermektedir. Katkıların yumuşama noktası değerleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde bütün katkıların yumuşama noktaları üzerinde benzer etkilere sahip olduğu ve saf bağlayıcıya göre yumuşama noktası değerlerini yaklaşık %45 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

5.2.3. Bitümlü Bağlayıcıların Özgül Ağırlıkları

Saf ve modifiye bitümlerin özgül ağırlıkları EN 15326 standardına göre belirlenmiştir. Özgül ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Saf ve modifiye bitümlerin özgül ağırlıkları

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere bitümlü bağlayıcıların özgül ağırlıkları şartname limitleri olan 1.0-1.1 arasındadır. Katkı kullanımı ile özgül ağırlıkların değişimleri incelendiğinde Amerikan Gilsoniti kullanımı ile bağlayıcı özgül ağırlığı artarken SBS kullanımı ile özgül ağırlık değerleri azalmıştır. AG ve SBS'nin birlikte kullanılması ile özgül ağırlık değerleri %5 SBS kullanımına göre düzenli olarak artarken %18 AG kullanımına göre düzenli şekilde azalmıştır.

5.3. Agrega Deney Sonuçları

Çalışmada agregası olarak Elazığ'ın Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Deneylerde agregası karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış olarak kullanılmıştır. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan Superpave agregası gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregası yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agregası			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), (%)	TS EN 1097-2	29.2	-	-	Maks. 30
Aşınma Direnci (Mikro-Deval), (%)	TS EN 1097-1	17.4	-	-	Maks. 25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO ₄ ile kayıp), (%)	TS EN 1367-4	16.7	-	-	Maks. 18
Metilen Mavisi (gr/kg)	TS EN 933-9	-	0.5	-	Maks. 1.5

Çalışmada maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan Superpave gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan gradasyon Tablo 5.10'da görülmektedir.

Tablo 5.10 Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu

Elek boyutu (mm)	Geçen (%)	Kontrol noktaları		Yasaklanmış bölge	
		Min.	Min.	Maks.	Maks.
19 (3/4")	100				
12,5 (1/2")	95	90	100		
9,5 (3/8")	88				
4,75 (No.4)	65				
2,36 (No.8)	35	28	58	39,1	39,1
1,18 (No.16)	23			25,6	31,6
0,6 (No.30)	14			19,1	23,1
0,3 (No.50)	10			15,5	15,5
0,15 (No.100)	8				
0,075 (No.200)	6	2	10		

5.4. Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Çalışmada karışımlarda kullanılacak modifiye bitümler belirlendikten sonra her bir bağlayıcı için karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Öncelikle saf ve modifiye bitümlerden %5 oranında kullanılarak 4 adet karışım numunesi hazırlanmıştır. Etüvde kısa dönem yaşlandırma işleminden sonra numunelerin iki tanesi yoğurmalı pres ile

sıkıştırılırken 2 adet numune AASHTO T209 standardına göre karışımların maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespiti amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.11'de görülmektedir.

Tablo 5.11. Saf ve modifiye karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	PG 52-28		%5 SBS		%18 AG	
	1	2	1	2	1	2
Piknometre, A (gr)	639.6	504.7	639.6	639.6	504.7	504.7
Piknometre +Su, B (gr)	2975.7	1764	2975.7	2975.7	1764	1764
Piknometre +Numune, C (gr)	1790.40	1655.66	1791.52	1791.84	1657.05	1657.16
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	3660.0	2448.2	3656.3	3656.5	2448.2	2448.3
$Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))$	2.467	2.466	2.444	2.444	2.461	2.462
Ortalama, Gmm	2.466		2.444		2.462	

Tablo 5.11. Saf ve modifiye karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları (devamı)

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	%2 SBS + %13 AG		%3 SBS + %10 AG		%4 SBS + %6 AG	
	1	2	1	2	1	2
Piknometre, A (gr)	504.7	504.7	639.6	639.6	639.6	639.6
Piknometre +Su, B (gr)	1764	1764	2975.7	2975.7	2975.7	2975.7
Piknometre +Numune, C (gr)	1656.71	1656.43	1790.66	1791.45	1791.66	1792.64
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	2447.7	2447.8	3656.1	3656.8	3657.0	3657.3
$Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))$	2.460	2.461	2.446	2.447	2.447	2.446
Ortalama, Gmm	2.461		2.446		2.447	

Tablolarda görüldüğü üzere en yüksek Gmm değerine saf karışımın en düşük Gmm değerine ise %5 SBS içeren karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. SBS ve AG içeren karışımların Gmm değerlerinin ise sadece SBS ve sadece AG içeren karışımların değerlerinin arasında çıktığı tespit edilmiştir.

Karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları belirlendikten sonra Superpave yöntemine göre tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Daha sonra tasarım bitüm içeriklerinde karışım numuneleri hazırlanarak Hava Boşluğu Yüzdesi (Va), Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA), Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA), Filler Oranı (DP), %Gmm@Nini, %Gmm@Ndes, %Gmm@Nmaks değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımda servis ömrü boyunca toplam eşdeğer standart dingil yükü geçiş sayısının 3-30 milyon

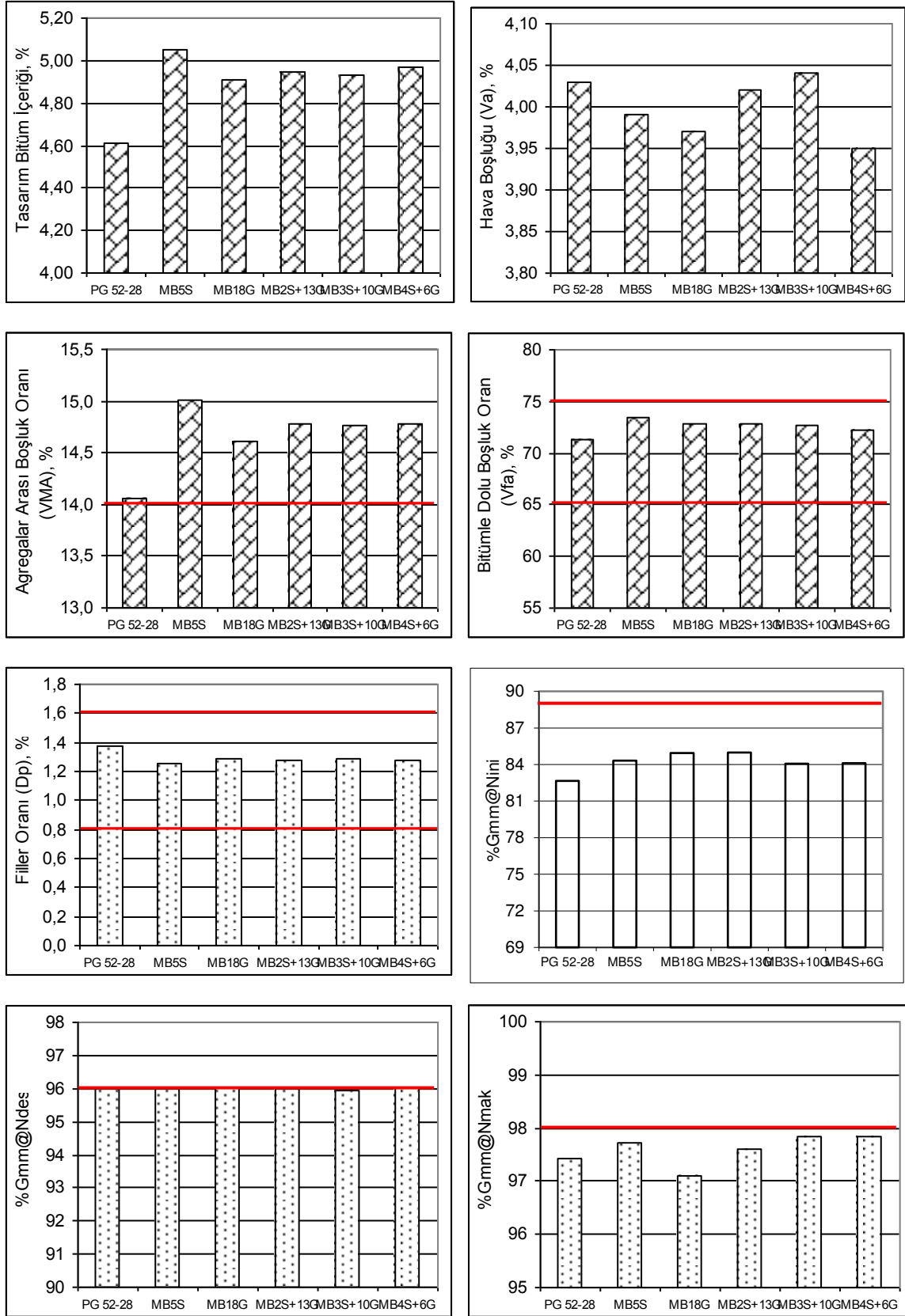
olduğu çift yönlü yüksek trafikli bir karayolu için tasarım yapıldığı kabul edilmiştir. Buna göre yağurmalı preste Nini değeri 8, Ndes değeri 100 ve Nmak değeri 160 olarak alınmıştır. Karışımların tasarım değerleri Tablo 5.12 ve Şekil 5.11'de görülmektedir.

Tablo 5.12. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü		
		PG 52-28	MB _{5S}	MB _{18G}
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.61	5.05	4.91
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	4.03	3.99	3.97
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.06	15.01	14.61
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	71.34	73.44	72.83
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.38	1.25	1.29
%Gmm@Nini. = 8 (%)	max. 89	82.66	84.31	84.93
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95.97	96.01	96.03
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	max. 98	97.44	97.73	97.10

Tablo 5.12. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri (devamı)

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü		
		MB _{2S+13G}	MB _{3S+10G}	MB _{4S+6G}
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.95	4.93	4.97
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	4.02	4.04	3.95
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.78	14.77	14.78
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	72.78	72.62	72.29
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.28	1.29	1.28
%Gmm@Nini. = 8 (%)	max. 89	84.97	84.07	84.11
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95.98	95.96	96.05
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	max. 98	97.60	97.83	97.85

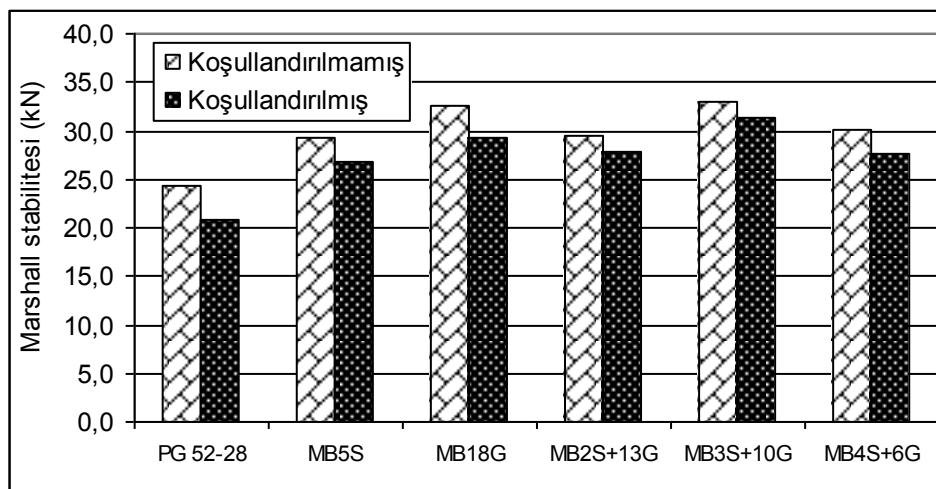


Şekil 5.11. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların tasarım değerleri

Şekil 5.11 incelendiğinde katkı kullanımı ile saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma göre tasarım bitüm içeriklerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum bağlayıcıların viskozitesinin artmasından ötürü agregayı kaplamak için daha fazla bitüm gerekmesinden kaynaklanmıştır. Superpave karışım tasarımının temelini oluşturan karışımların hava boşlukları karşılaştırıldığında bütün karışımların Superpave şartname kriterini sağladığı, hava boşluğu değerlerinin yaklaşık %4 olduğu tespit edilmiştir. Karışımların agregalar arası boşluk oranı değerleri (VMA) karışımdaki hava boşluğu değerleri ve efektif bitüm içeriği değerlerinin toplamına eşittir. Saf karışımda her ne kadar hava boşluğu değeri %4'e yakın olsa da bitüm içeriği az olduğundan efektif bitüm içeriğinin düşük olması VMA değerinin Superpave şartnamesi alt sınırı olan %14'ün sınırdan sağlanmasına neden olmuştur. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda ise bitüm içeriği saf bitüme göre daha fazla olduğundan efektif bitüm içeriği artmış dolayısıyla saf karışıma göre VMA değerleri daha yüksek çıkmıştır. Böylece bütün modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar VMA Superpave şartname kriterini sağlamıştır. Bitümle dolu boşluk oranları incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriterlerini sağladıkları belirlenmiştir. Filler oranı değerleri incelendiğinde bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, en yüksek değere tasarım bitüm içeriği en düşük olan PG 52-28 ile hazırlanan karışımların en düşük değere ise tasarım bitüm içeriği en yüksek olan MB_{5S} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımların erken kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının bir göstergesi olan %Gmm@Nini değerleri incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriteri olan maksimum %89 kriterini sağladığı, dolayısıyla karışımlarda erken kalıcı deformasyonla ilgili sorunla karşılaşılmayacağı belirlenmiştir. Karışımların %Gmm@Ndes değerleri incelendiğinde karışımların tasarım bitüm içeriklerinde tasarım hava boşluğu şartını sağladıklarından hedeflenen değer olan %96 değerini yaklaşık olarak sağladıkları belirlenmiştir. Karışımların %Gmm@Nmak değeri karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu değer maksimum yağurma sayısında %98'den az olması gerekmektedir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların %Gmm@Nmak değerleri incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriterini sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında belirlenen tasarım bitüm içeriklerinde bütün karışımların Superpave şartname kriterlerini sağladığı, belirlenen tasarım bitüm içeriklerinin uygun olduğu tespit edilmiştir.

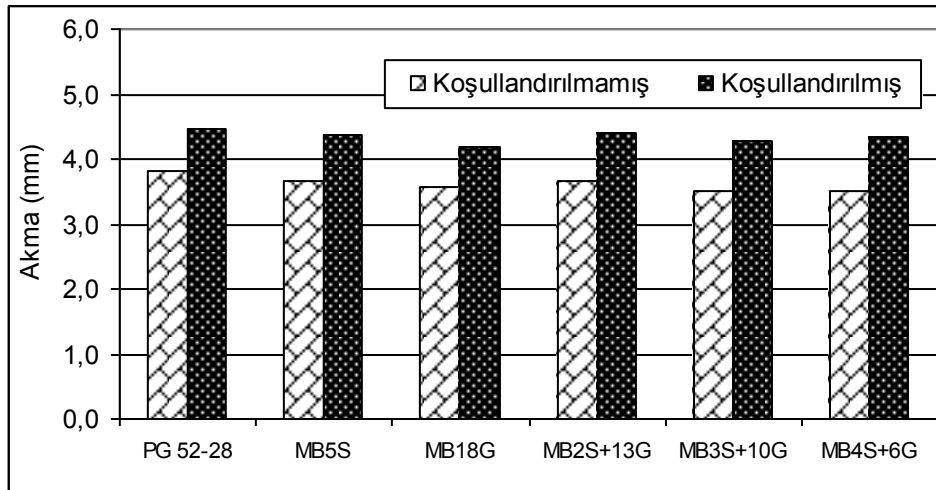
5.4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

Saf (PG 52-28) ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile kalıcı Marshall stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Her bir karışım için tasarım bitüm içeriklerinde 6 adet olmak üzere 36 numune hazırlanmıştır. Numuneler, yoğurmalı pres kullanılarak %4 boşluk içeriğine sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Her bir karışım türünden 3 adet olmak üzere toplam 18 numune EN 12697-34 standardına göre 60°C suda 40 dakikada bekletilmiş ve 50.8 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Diğer 18 numune ise 60°C suda 48 saat bekletilerek koşullandırılmıştır. Bu gruptaki numuneler de 50.8 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Deney numunelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve Marshall stabilite değerleri ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılarak yerlerine yeni numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Karışımların stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlarından Marshall oranı (MQ) değerleri, koşullandırılmış karışımların stabilite değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin stabilite değerlerine oranlarından nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerleri belirlenmiştir. Karışımların Marshall stabilite değerleri Şekil 5.12'de görülmektedir. Şekilde 60°C suda 40 dakikada bekletilen numuneler koşullandırılmamış, 60°C suda 48 saat bekletilen numuneler ise koşullandırılmış olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 5.12. Marshall stabilitesi – katkı türü ve koşullandırma ilişkisi

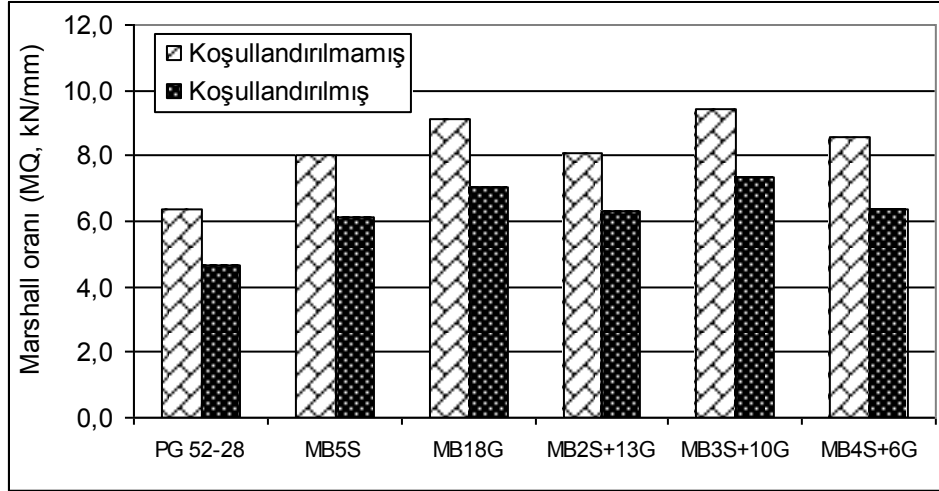
Şekil 5.12'de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile Marshall stabilitesi değerleri artarken koşullandırma nedeniyle bu değerler azalmıştır. Koşullandırma öncesinde %5 SBS kullanımı ile stabilite değeri saf karışıma göre %20.1, %18 AG kullanımı ile %33.6 oranlarında artmıştır. Koşullandırılmamış karışımlarda %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG modifiye bitümler ile hazırlanan karışımlarda ise Marshall stabilite değerleri saf karışıma göre sırasıyla %21.3, %35.2 ve %23.9 oranlarında artmıştır. Koşullandırma sonrasında ise %5 SBS, %18 AG, %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG ile hazırlanan karışımlarda Marshall stabilitesi değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %28.1, %40.7, %33.4, %50.1 ve %32.2 oranlarında artmıştır. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma sonrasında katkıların Marshall stabilitesi değerleri üzerindeki etkinliklerinin arttığı ve koşullandırmadan önce Marshall stabilitesi değerleri üzerinde en etkin katkı oranlarının %18 Amerikan Gilsoniti ve %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti olduğu belirlenmiştir. Koşullandırılmış karışımlar arasında ise en etkin katkı oranının %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti olduğu tespit edilmiştir. Marshall stabilite değerleri üzerinde etkinliği en az olan katkıların %5 SBS ve %2 SBS ile %13 AG olduğu tespit edilmiştir. Marshall stabilitesi açısından özellikle bitüm modifikasyonunda %3 SBS ve %10 AG'nin birlikte kullanılmasının daha faydalı olduğu tespit edilmiştir. Karışımların akma değerleri Şekil 5.13'de görülmektedir.



Şekil 5.13. Karışımların akma değerlerinin katkı kullanımı ve koşullandırmayla değişimi

Şekil 5.13 incelendiğinde katkı kullanımı ile akma değerleri azalırken koşullandırma nedeniyle bu değerler artmıştır. Koşullandırılmamış karışımlarda akma değerlerinin 3-4 mm arasında olduğu koşullandırılmış karışımlarda ise bu değerlerin 4-5 mm arasında

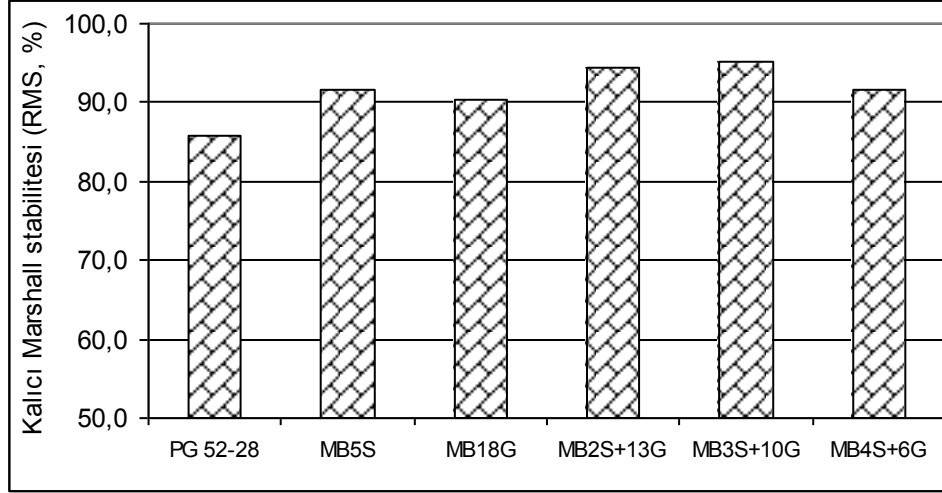
olduğu tespit edilmiştir. Akma değerlerindeki bu azalma katkı kullanımı ile karışımlarda daha az deformasyon olacağını göstermektedir. Karışımların Marshall oranı değerleri Şekil 5.14'te görülmektedir.



Şekil 5.14. Karışımların MQ değerlerinin katkı kullanımı ve koşullandırma ile değişimi

Şekil 5.14'te görüldüğü üzere katkı kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımının bir göstergesi olan Marshall oranı değerleri artmıştır. Koşullandırma nedeniyle karışımların dayanımı azaldığından Marshall oranı değerleri de azalmıştır. Aynı performans seviyesine sahip modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların Marshall oranı değerleri incelendiğinde özellikle sadece %18 Amerikan Gilsoniti ve %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanıldığı bitümlü sıcak karışımların Marshall oranı değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırılmamış karışımlarda %5 SBS, %18 AG, %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG ile hazırlanan karışımlarda Marshall oranı değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla %26.0, %43.7, %27.2, %48 ve %35.2 oranlarında artmıştır. Koşullandırma sonrasında ise sadece %5 SBS ve %18 Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların Marshall oranı değerleri saf karışıma göre sırasıyla %30.4 ve %50.5 oranlarında artmıştır. Aynı performans seviyesine sahip fakat SBS ve AG'nin birlikte kullanıldığı koşullandırılmış karışımlar değerlendirildiğinde ise %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG modifiye bitümlerin kullanımı ile Marshall oranı değerleri saf karışıma göre %34.9, %56.4 ve %35.6 oranlarında artmıştır. Bu değerlerden yola çıkarak kalıcı deformasyona karşı etkinliği en fazla olan katkıların hem koşullandırma öncesinde hem de koşullandırma sonrasında %18 AG ve %3 SBS ile %10 AG'nin birlikte

kullanımı olduğu tespit edilmiştir. Karışımların kalıcı Marshall oranı değerleri Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.15. Karışımların RMS değerlerinin katkı türü ile değişimi

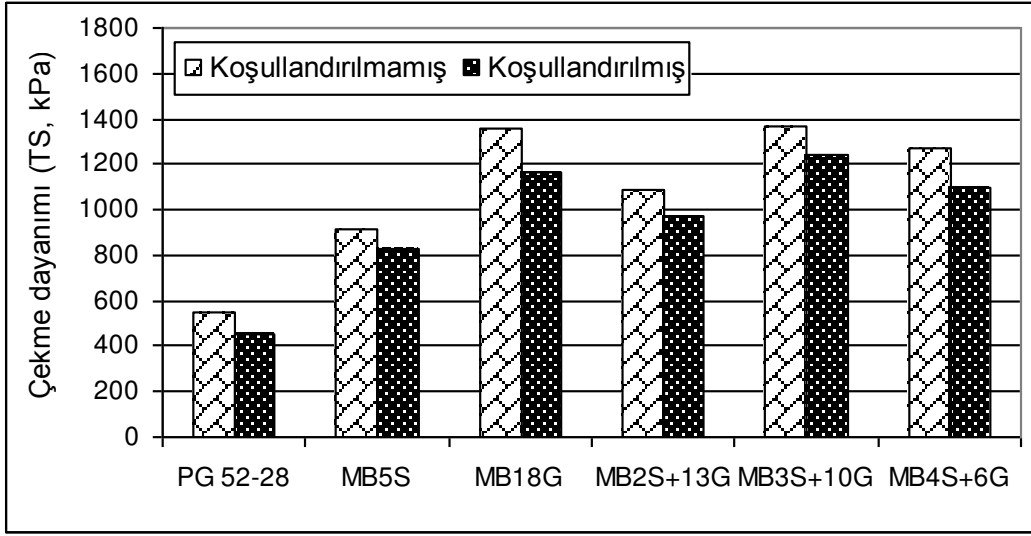
Bitüm modifikasyonunda katkı kullanımının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan kalıcı Marshall stabilitesi değerleri üzerindeki etkilerinin görüldüğü Şekil 5.15 incelendiğinde katkı kullanımı ile RMS değerlerinin arttığı görülmektedir. Karışımlar içerisinde en düşük kalıcı Marshall stabilitesi değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımın, en yüksek RMS değerine ise bitüm modifikasyonunda %2 SBS ile %13 Amerikan Gilsoniti ve %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanıldığı modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bütün modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların RMS değerlerinin %90'ın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerden bitüm modifikasyonunda SBS, AG veya SBS ile AG'nin birlikte kullanılması durumunda nem hasarına karşı dayanımın artacağı söylenebilmektedir.

Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artarken akma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Stabilite değerlerindeki artış ve akma değerlerindeki azalışa bağlı olarak Marshall oranı değerlerinin arttığı dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Karışımların nem hasarına karşı dayanımının bir göstergesi olan RMS değerleri incelendiğinde katkı kullanımı ile bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde en

etkin katkının stabilite ve MQ değerlerinde %3 SBS ile %10 AG'nin birlikte kullanımı ve %18 AG kullanımı olduğu, RMS değerlerinde ise %2 SBS ile %13 Amerikan Gilsoniti ve %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanımı olduğu belirlenmiştir.

5.4.2. Çekme Dayanımı Oranı Deney Sonuçları

Saf bağlayıcı ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bitümle hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımları AASHTO T283 standardına göre belirlenmiştir. Bu amaçla her bir bağlayıcı ile 6 numune yoğurmalı pres ile 7 ± 0.5 boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan numuneler standarda uygun olarak 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Sıkıştırılan numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ertesi gün karışımların hacimsel özellikleri belirlenmiştir. 6 numune yakın boşluk oranına sahip olacak şekilde 2 ayrı gruba ayrılmıştır. Bu numunelerden 3 tanesi (1. grup) 25°C sıcaklıktaki suda 2 saat bekletilmiş ve sıkıştırma yüzeyine dik düzlemde 50.8 mm/dak hızla yükleme yapılarak kırılmıştır. Diğer gruptaki numunelere vakum uygulanarak su emdirilmiş ve %70-80 oranında boşlukların su dolması sağlanmıştır. Boşluk oranı 7 ± 0.5 'den farklı olan ve boşlukları %80'den fazla su dolan numuneler iptal edilerek yerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Su emdirilen numuneler streç film ile kaplanarak emdirilen su oranının değişimi engellenmiştir. Streç film ile kaplanan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmuştur. Koşullandırma işleminde numuneler öncelikle -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat, ardından 60°C'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler 25°C sıcaklıktaki suda en az 2 saat bekletildikten sonra koşullandırılmamış numunelerde olduğu gibi 50.8 mm/dak yükleme hızında kırılmıştır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numunelerde çekme dayanımı değerinden %10 farklı değere sahip olan numuneler değerlendirmeden çıkarılarak yerine yeni numuneler hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Karışımların koşullandırma işleminden önce ve sonra çekme dayanımı değerleri Şekil 5.16'da görülmektedir.

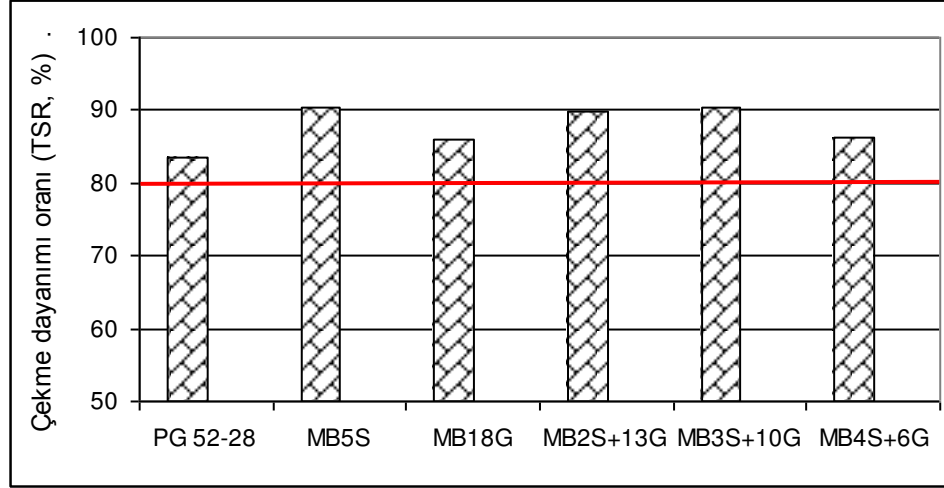


Şekil 5.16. Karışımların çekme dayanımı değerlerinin katkı türü ve koşullandırma ile değişimi

Şekil 5.16'da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile hem koşullandırma öncesi hem de koşullandırma sonrasında çekme dayanımı değerleri artmıştır. Koşullandırma nedeni ile çekme dayanımı değerleri azalmıştır. Çekme dayanımı değerleri içerisinde hem koşullandırma öncesinde hem de koşullandırma sonrasında en düşük çekme dayanımı değerine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerlerine koşullandırma öncesinde MB_{18G} ve MB_{3S+10G} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların, koşullandırma sonrasında ise MB_{3S+10G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma öncesinde ve sonrasında karışımların çekme dayanımları büyükten küçüğe sıralandırıldığında kullanılan bağlayıcı türüne göre sıralama MB_{3S+10G} > MB_{18G} > MB_{4S+6G} > MB_{2S+13G} > MB_{5S} > PG 52-28 şeklinde olmuştur. Bu durum modifiye bitümler arasında etkinliği en az olanın %5 SBS içeren modifiye bitüm olduğunu göstermektedir.

Koşullandırma öncesinde MB_{18G} ve MB_{3S+10G} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre 2.49 ve 2.51 kat daha yüksek olduğu, koşullandırma sonrasında ise 2.57 ve 2.72 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma öncesinde MB_{5S}, MB_{2S+13G} ve MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.67, 1.99 ve 2.32 kat daha yüksek olduğu koşullandırma sonrasında ise sırasıyla 1.81, 2.14 ve 2.41 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma sonrasında çekme dayanımı değerleri üzerinde modifiye bitümlerin daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Saf ve aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımların nem hasarına karşı

dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.17. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların TSR değerleri

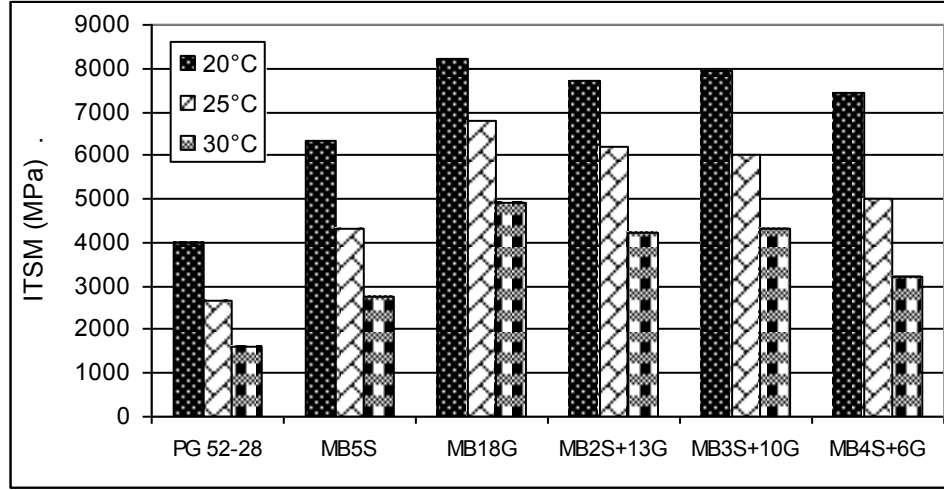
Şekil 5.17 incelendiğinde modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların hepsinin çekme dayanımı oranı değerlerinin saf karışıma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum çalışmada kullanılan bütün modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının saf karışıma göre daha yüksek olacağını göstermektedir. Karışımlar içerisinde en düşük değere saf karışımın, en yüksek değere ise MB_{5S}, MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bütün karışımlar Superpave çekme dayanımı oranı şartname kriteri olan %80 şartını sağlamıştır. Bu durum nem hasarına karşı dayanım açısından bütün karışımların kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca bitüm modifikasyonunda sadece SBS kullanımının sadece Amerikan Gilsoniti kullanımına göre nem harına karşı dayanım açısından daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Çekme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde bitüm modifikasyonunda %18 Amerikan Gilsoniti ve %3 SBS ile %10 Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanımının çekme dayanımı açısından en etkin modifikasyon yöntemleri olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde en düşük çekme dayanımı değerlerine %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. Çekme dayanımı üzerinde etkinliği en az olan katkıların %5 SBS ve %2 SBS ile birlikte %13 Amerikan Gilsoniti kullanımı olmasına rağmen çekme dayanımı oranı açısından en yüksek

değerlere sahip olmuşlardır. Çekme dayanımı deney sonuçlarından bütün karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının yeterli olduğu, özellikle MB_{5S}, MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekme dayanımı deneylerinden elde edilen çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı değerlerinden yola çıkılarak bitüm modifikasyonunda %3 SBS ile birlikte %10 Amerikan Gilsoniti kullanımının en etkin bitüm modifikasyon yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

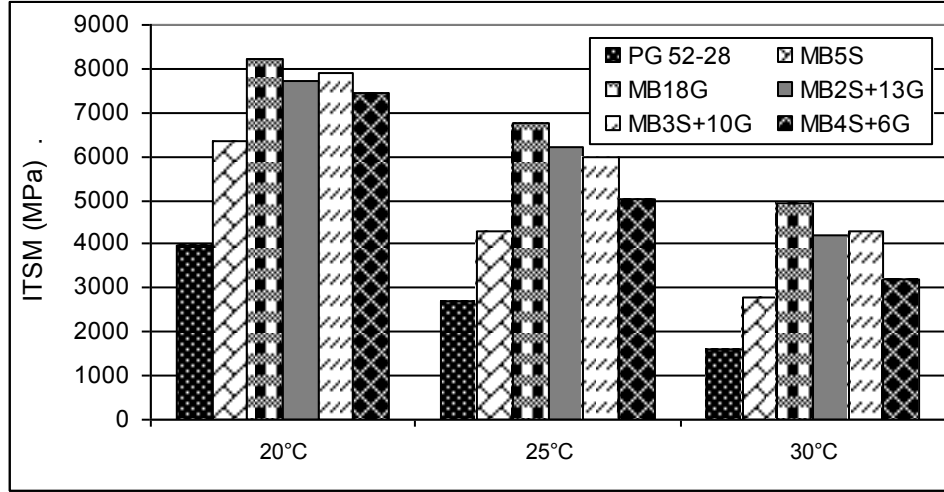
5.4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Saf ve aynı performans seviyesine sahip modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) değerleri BS DD 213 standardına göre belirlenmiştir. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelere ITSM deneyi 20°C, 25°C ve 30°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. ITSM deneyi üniversal deney aleti (UTM) kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin deney sıcaklığına tam olarak ulaşması amacıyla numuneler deneyden 3 saat önce UTM'nin iklimlendirme kabineye yerleştirilmiştir. Daha sonra deney yazılımına numune adı, numune yüksekliği, tahmini rijitlik değeri, tahmini poisson oranı, yük artış süresi ve hedef deformasyon değerleri girilmiştir. Çalışmada tahmini poisson oranı 0.35, yük artış süresi 124 ms ve hedef deformasyon 5 µm olarak seçilmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deneydir. Bu nedenle ITSM deneyine tabi tutulan numuneler daha sonra indirekt çekme yorulma deneylerinde kullanılmıştır. Çalışmada her bir bağlayıcı ile hazırlanan karışımdan 3 adet numune ITSM deneyine tabi tutulmuştur. Her bir numune deneye tabi tutulduktan sonra 90 derece döndürülmüş ve deney tekrarlanmıştır. İki deney sonucunda ITSM değerleri arasındaki farkın %10'dan fazla olması durumunda numune 90 derece daha döndürülerek 3. ölçüm yapılmıştır. ITSM değerleri arasında %10'dan daha az fark olması durumunda iki değerlerin ortalaması numunenin ITSM değeri olarak alınmıştır. Katkı kullanımının ITSM değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.18'de, sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkisi ise Şekil 5.19'da görülmektedir.



Şekil 5.18. Katkı kullanımının ITSM değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 5.18'de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile bütün sıcaklıklarda katkı kullanımı ile ITSM değerleri artmıştır. Bütün sıcaklıklarda en yüksek ITSM değerlerine %18 AG katkıli modifiye bitüm ile hazırlanan karışımların sahip olduğu, en düşük ITSM değerlerine ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bütün sıcaklıklarda MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımların benzer ITSM değerine sahip oldukları tespit edilmiştir. 20 ve 30°C sıcaklıklarda karışımların ITSM değerlerinin kullanılan bağlayıcı türüne göre büyükten küçüğe sıralanışının MB_{18G} > MB_{3S+10G} > MB_{2S+13G} > MB_{4S+6G} > MB_{5S} > PG 52-28 şeklinde olduğu, 25°C sıcaklıkta ise MB_{18G} > MB_{2S+13G} > MB_{3S+10G} > MB_{4S+6G} > MB_{5S} > PG 52-28 şeklinde olduğu tespit edilmiştir. 20°C sıcaklıkta %5 SBS, %18 AG, %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG ile hazırlanan karışımların ITSM değerlerinin saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla 1.59, 2.06, 1.94, 1.99 ve 1.86 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 25°C sıcaklıkta MB_{5S}, MB_{18G}, MB_{2S+13G}, MB_{3S+10G} ve MB_{4S+6G} modifiye bitümleri kullanılarak hazırlanan karışımların ITSM değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışımların ITSM değerlerinden sırasıyla 1.60, 2.53, 2.31, 2.24 ve 1.87 kat daha yüksek olduğu, 30°C sıcaklıkta ise sırasıyla 1.71, 3.05, 2.61, 2.67 ve 1.98 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarından sıcaklığın artışı ile katkıların etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklığın karışımların ITSM değerleri üzerindeki etkileri Şekil 5.19'da görülmektedir.



Şekil 5.19. Sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkisi

Şekil 5.19'da görüldüğü üzere bütün karışımlarda sıcaklığın artması ile ITSM değerleri azalmıştır. Sıcaklığın 20°C'den 25°C'ye yükselmesi ile PG 52-28, MB_{5S}, MB_{18G}, MB_{2S+13G}, MB_{3S+10G} ve MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışımların ITSM değerleri sırasıyla 1.48, 1.48, 1.21, 1.25, 1.32 ve 1.48 kat azalırken 20°C'den 30°C'ye yükselmesi ile ITSM değerleri 2.47, 2.30, 1.67, 1.83, 1.84 ve 2.32 kat azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan sıcaklıktaki değişimden en az MB_{18G} ile hazırlanan karışımların, en fazla ise PG 52-28 ile hazırlanan karışım etkilendiği tespit edilmiştir.

ITSM deney sonuçlarından saf karışıma göre ITSM değerini en fazla arttıran ve sıcaklıktaki değişimden en az etkilenen karışımların %18 AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. En düşük rijitlik değerine sahip olan ayrıca sıcaklıktan en fazla etkilenen karışımların ise PG 52-28 saf bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir. SBS ile AG'nin birlikte kullanıldığı modifiye bitümler dikkate alındığında hem rijitlik hem de sıcaklıktan etkilenme açısından en etkin karışımların MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımlar oldukları belirlenmiştir.

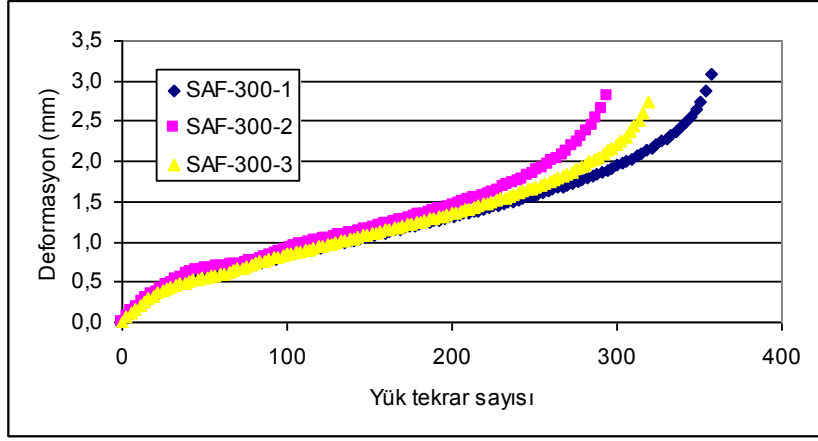
5.4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

Saf ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bitümle hazırlanan karışımlar üzerinde UTM deney aleti kullanılarak indirekt çekme yorulma deneyi uygulanmıştır. Deneyler gerilme kontrollü olarak uygulanmış olup çalışmada 300 ve 350 kPa gerilme seviyeleri kullanılmıştır. Deney sıcaklığı 25°C olarak seçilmiştir. Deney öncesinde numuneler deney sıcaklığında en az 3 saat koşullandırılmıştır. UTM yazılımına yükleme

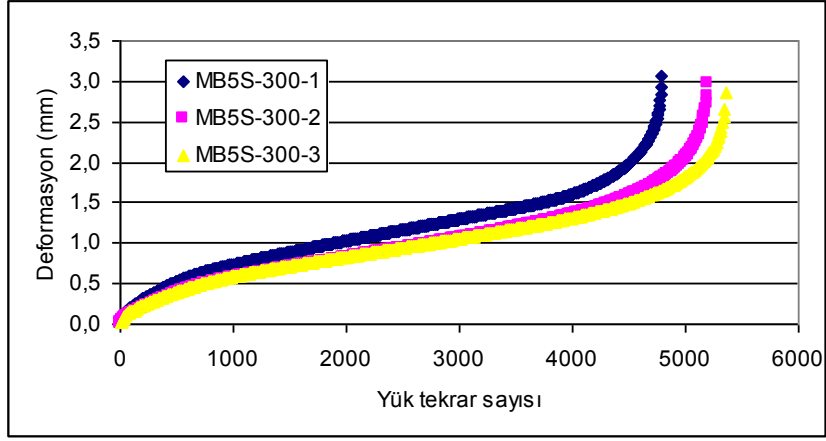
periyodu (1.5 sn), yük etki süresi (0.124 sn), gerilme seviyesi, numune çapı ve yüksekliği girilmiş ve deneye başlanmıştır. Numuneler kırılıncaya kadar indirekt çekme yorulma deneyine devam edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri sonucunda yazılım sayesinde belirli aralıklarla yük tekrar sayıları ve bu yük tekrar sayılarına karşılık gelen deformasyon miktarları milimetre cinsinden elde edilmiştir. Elde edilen en son değerler numunenin kırıldığı maksimum yük tekrar sayısını (N_{mak}) ve maksimum yük tekerrür sayısındaki deformasyonları (δ_{mak}) göstermektedir. Elde edilen veriler Excel ortamına taşınmış grafikler çizilerek her bir karışım numunesi için yük tekrar sayısı – deformasyon grafiklerinin II. ve III. kısımları belirlenmiştir. II. ve III. kısımlardan doğru geçirilerek doğru denklemleri elde edilmiştir. II. ve III. kısımların denklemleri birbirine eşitlenerek kesişim noktaları olan yorulma değerleri (N_f) elde edilmiştir. Daha sonra yazılım sayesinde elde edilen verilerden N_f değerine karşılık gelen deformasyon miktarları (δ_f) tespit edilmiştir. Ayrıca her bir grafikte II. bölgede yük deformasyon eğrisinde eğimin artmaya başladığı nokta olan çatlak başlangıcı yük tekrar sayıları (N_i) ve bu değere karşılık gelen deformasyon miktarı (δ_i) belirlenmiştir. Yorulma ömrü değerleri ile I. bölgenin sonu olan çatlak başlangıcı yük tekrar sayısı arasındaki farktan çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca Formül 4.21 kullanılarak N_i - N_f aralığı için çatlağın her bir mm ilerlemesi için gerekli olan yük tekrar sayıları (r_p) değerleri tespit edilmiştir.

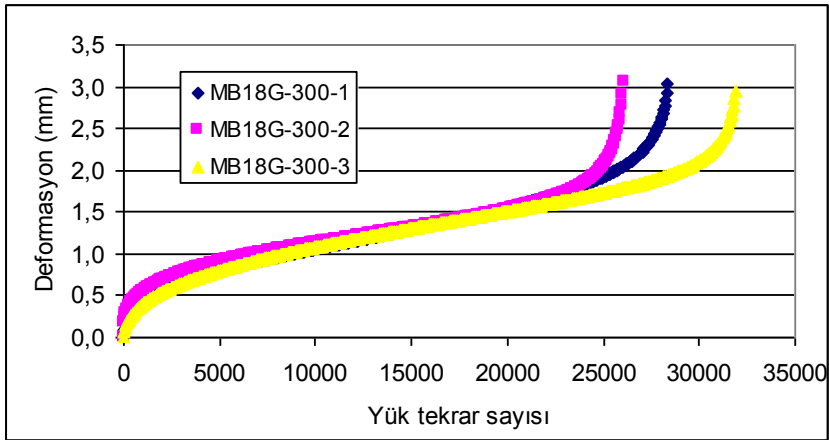
300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde her bir bağlayıcıyla hazırlanan karışımların indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen deformasyon–yük tekrar sayısı ilişkisi Şekil 5.20-5.31'de çizilmiştir.



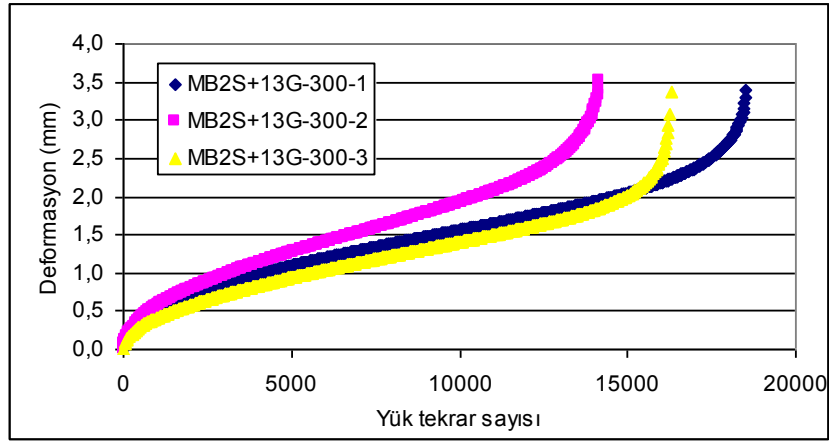
Şekil 5.20. PG 52-28 ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



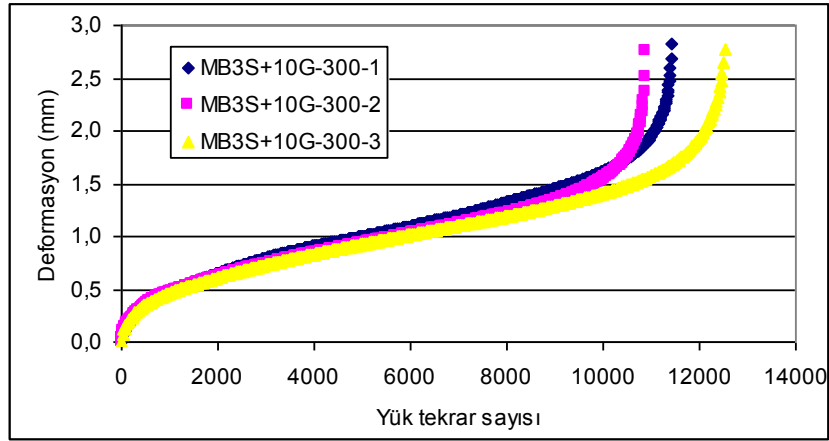
Şekil 5.21. MB_{5S} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



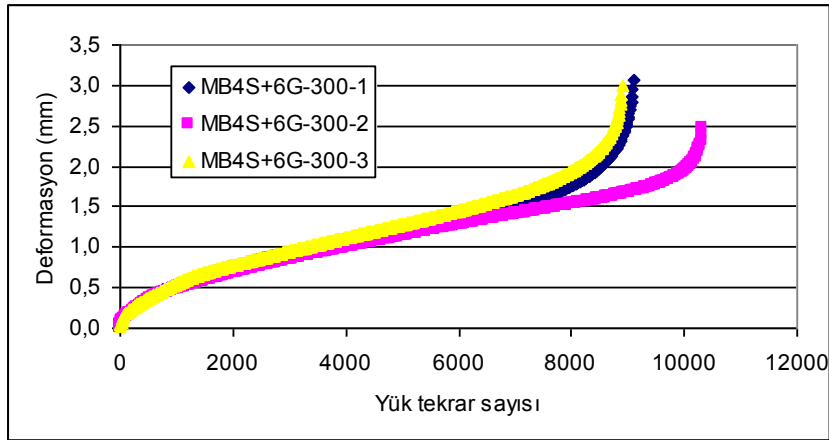
Şekil 5.22. MB_{18G} ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



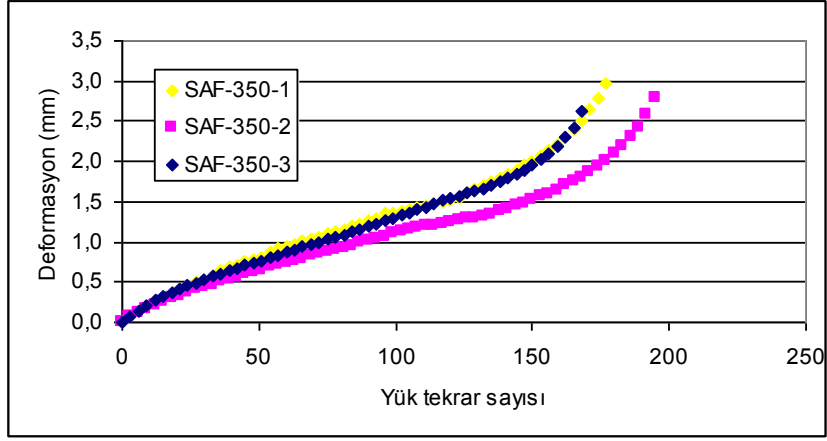
Şekil 5.23. MB_{2S}+13G ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



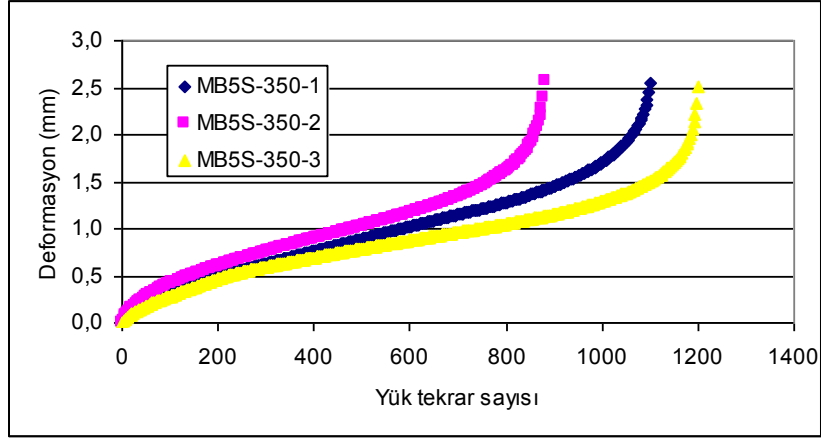
Şekil 5.24. MB_{3S}+10G ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



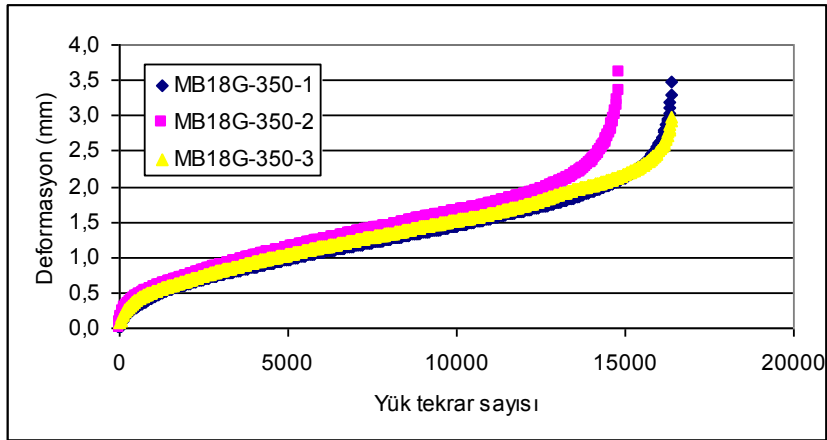
Şekil 5.25. MB_{4S}+6G ile hazırlanan karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



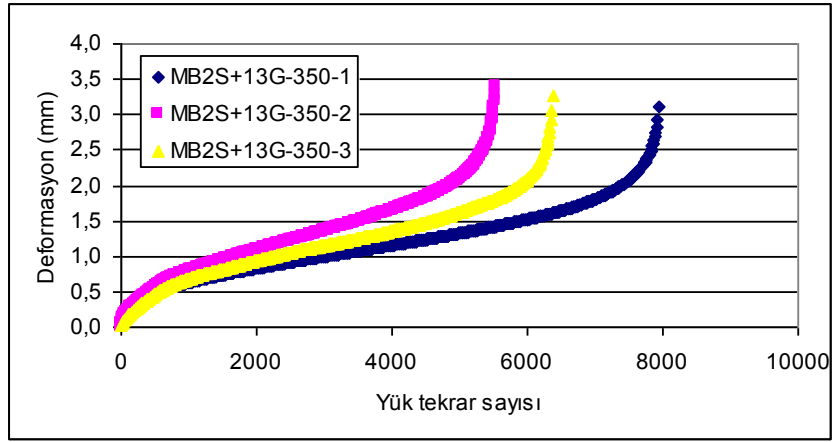
Şekil 5.26. PG 52-28 ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



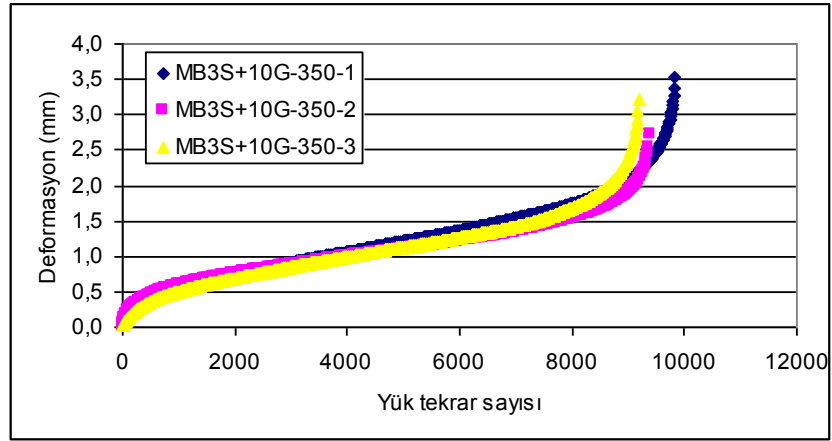
Şekil 5.27. MB_{5S} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



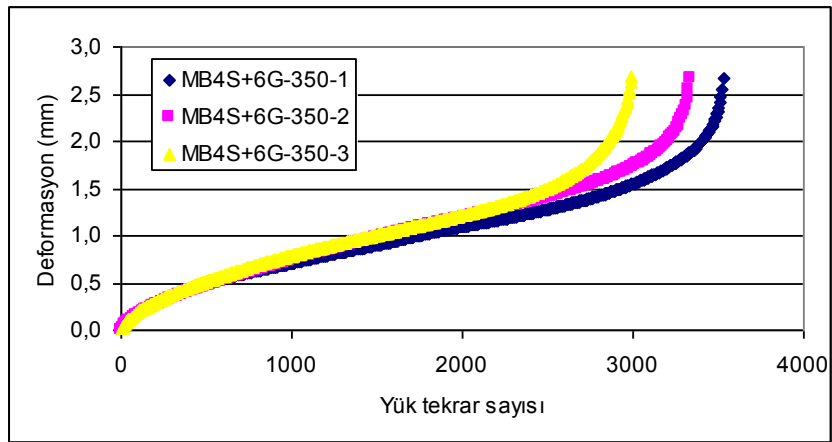
Şekil 5.28. MB_{18G} ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.29. MB_{2S}+13G ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.30. MB_{3S}+10G ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 5.31. MB_{4S}+6G ile hazırlanan karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Bitümlü sıcak karışım numunelerine 300 ve 350 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen değerler Tablo 5.13 ve Tablo 5.14'te verilmiştir. Ayrıca ortalama ilk çatlağın oluştuğu yük tekrar sayısı (N_i), yorulma ömrü (N_f), çatlak ilerlemesi yük tekrar sayısı (N_p), maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 5.32-5.35'de görülmektedir. Bu değerler ayrıca toplu olarak Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de verilmiştir.

Tablo 5.13. 300 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p
PG 52-28	1	300	$y = 0.0049x + 0.3319$	$y = 0.0256x - 6.1872$	234	1.490	315	2.098	81	357	3.086	133
	2		$y = 0.0054x + 0.3512$	$y = 0.0359x - 7.7912$	207	1.492	267	2.079	60	294	2.800	102
	3		$y = 0.0051x + 0.3273$	$y = 0.0305x - 7.0014$	228	1.516	289	2.060	61	319	2.730	112
	Ort.				223	1.499	290	2.079	67	323	2.872	116
MB _{5S}	1	300	$y = 0.0003x + 0.5003$	$y = 0.0097x - 43.413$	4566	2.074	4671	2.280	105	4794	3.068	510
	2		$y = 0.0002x + 0.3209$	$y = 0.0121x - 60.034$	4956	1.979	5071	2.179	115	5202	2.983	575
	3		$y = 0.0002x + 0.3788$	$y = 0.0078x - 38.994$	5148	1.992	5180	2.049	32	5358	2.861	561
	Ort.				4890	2.015	4974	2.169	84	5118	2.971	549
MB _{18G}	1	300	$y = 4E-05x + 0.649$	$y = 0.001x - 28.429$	28800	1.970	30289	2.153	1489	31872	2.955	8159
	2		$y = 5E-05x + 0.5788$	$y = 0.0009x - 22.861$	26160	2.069	27576	2.381	1416	28368	3.041	4538
	3		$y = 4E-05x + 0.7452$	$y = 0.0015x - 35.533$	23904	1.823	24848	1.996	944	26064	3.061	5457
	Ort.				26288	1.954	27571	2.177	1283	28768	3.019	6051
MB _{2S+13G}	1	300	$y = 9E-05x + 0.6594$	$y = 0.0009x - 13.061$	14304	1.968	16938	2.361	2634	18528	3.389	6702
	2		$y = 0.0001x + 0.6143$	$y = 0.002x - 25.377$	11976	2.236	13679	2.817	1703	14184	3.508	2931
	3		$y = 9E-05x + 0.4787$	$y = 0.0037x - 56.32$	14976	2.008	15733	2.287	757	16296	3.381	2713
	Ort.				13752	2.071	15450	2.488	1698	16336	3.426	4116

Tablo 5.13. 300 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları (devamı)

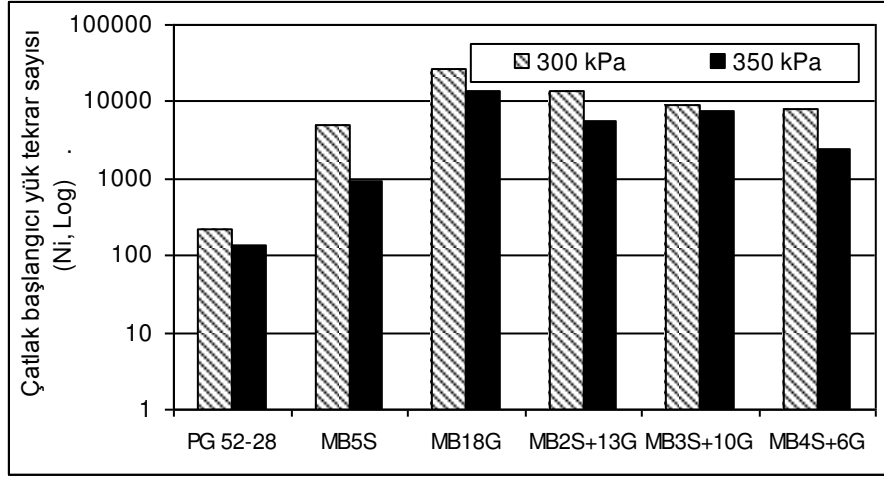
Bağlayıcı türü	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p
MB _{3S+10G}	1	300	$y = 0.0001x + 0.4906$	$y = 0.004x - 42.501$	9420	1.514	11023	1.973	1603	11424	2.832	3492
	2		$y = 9E-05x + 0.4635$	$y = 0.0057x - 59.37$	9144	1.358	10665	1.876	1521	10896	2.763	2936
	3		$y = 9E-05x + 0.4769$	$y = 0.0021x - 23.175$	9096	1.301	11767	1.807	2671	12528	2.776	5279
	Ort.				9220	1.391	11152	1.885	1932	11616	2.790	3902
MB _{4S+6G}	1	300	$y = 0.0001x + 0.5211$	$y = 0.0043x - 36.174$	7536	1.626	8736	2.165	1200	9096	3.065	2226
	2		$y = 0.0001x + 0.4722$	$y = 0.0021x - 19.544$	8892	1.656	10008	1.944	1116	10332	2.464	3875
	3		$y = 0.0002x + 0.453$	$y = 0.0039x - 31.45$	7560	1.788	8622	2.307	1062	8904	2.990	2046
	Ort.				7996	1.690	9122	2.139	1126	9444	2.840	2716

Tablo 5.14. 350 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları

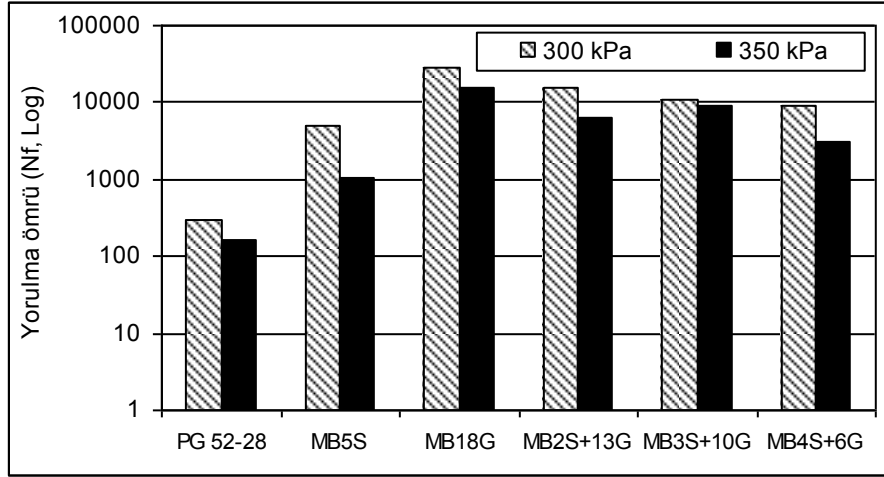
Bağlayıcı türü	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p
PG 52-28	1	350	$y = 0.011x + 0.2765$	$y = 0.047x - 5.3733$	126	1.620	157	2.164	31	177	2.969	57
	2		$y = 0.0092x + 0.2111$	$y = 0.0502x - 7.0249$	138	1.374	176	1.986	38	195	2.794	62
	3		$y = 0.0108x + 0.2214$	$y = 0.0429x - 4.6206$	138	1.744	151	1.974	13	168	2.619	57
	Ort.				134	1.579	161	2.041	27	180	2.794	59
MB _{5S}	1	350	$y = 0.0013x + 0.2477$	$y = 0.0185x - 17.849$	945	1.550	1.052	1.931	107	1101	2.550	281
	2		$y = 0.0014x + 0.349$	$y = 0.0284x - 22.577$	714	1.367	849	1.874	135	882	2.567	266
	3		$y = 0.0009x + 0.3481$	$y = 0.0259x - 28.657$	1077	1.444	1160	1.764	83	1200	2.501	259
	Ort.				912	1.454	1020	1.856	108	1061	2.539	269
MB _{18G}	1	350	$y = 9E-05x + 0.5149$	$y = 0.0032x - 49.092$	14184	1.969	15950	2.556	1766	16392	3.488	3009
	2		$y = 0.0001x + 0.6059$	$y = 0.0027x - 37.378$	13320	2.111	14609	2.824	1289	14832	3.604	1808
	3		$y = 1E-04x + 0.5691$	$y = 0.0018x - 26.595$	14952	2.167	15979	2.493	1027	16416	3.056	3150
	Ort.				14152	2.082	15513	2.624	1361	15880	3.383	2656
MB _{2S+13G}	1	350	$y = 0.0002x + 0.5123$	$y = 0.0052x - 38.395$	6744	1.717	7.782	2.404	1038	7932	3.111	1511
	2		$y = 0.0003x + 0.545$	$y = 0.0082x - 42.143$	4704	1.916	5.403	2.591	699	5538	3.388	1036
	3		$y = 0.0002x + 0.5287$	$y = 0.0069x - 40.727$	4932	1.601	6.158	2.275	1226	6372	3.274	1819
	Ort.				5460	1.745	6448	2.423	988	6614	3.258	1455

Tablo 5.14. 350 kPa gerilme seviyesinde BSK numunelerinin indirekt çekme yorulma deney sonuçları (devamı)

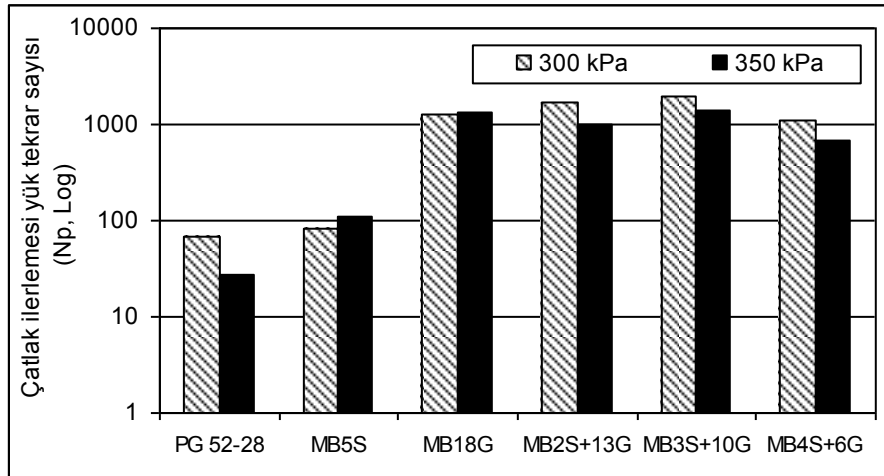
Bağlayıcı türü	Num. No	σ (kPa)	II. Kısım Teğet Denklemi	III. Kısım Teğet Denklemi	N_i	δ_i	N_f	δ_f	N_p	N_{mak}	δ_{mak}	r_p
MB _{3S+10G}	1	350	$y = 0.0002x + 0.4588$	$y = 0.0036x - 32.119$	8184	1.790	9.582	2.586	1398	9840	3.540	1756
	2		$y = 0.0001x + 0.5453$	$y = 0.0033x - 28.03$	7335	1.402	8.929	1.854	1594	9390	2.728	3527
	3		$y = 0.0001x + 0.4449$	$y = 0.0061x - 52.884$	7716	1.589	8.888	2.216	1172	9192	3.219	1869
	Ort.				7745	1.594	9133	2.219	1388	9474	3.162	2384
MB _{4S+6G}	1	350	$y = 0.0004x + 0.3397$	$y = 0.0101x - 33.06$	2424	1.250	3.443	2.105	1019	3528	2.676	1192
	2		$y = 0.0004x + 0.323$	$y = 0.0087x - 26.525$	2610	1.462	3.234	2.063	624	3342	2.676	1038
	3		$y = 0.0004x + 0.3638$	$y = 0.0082x - 21.754$	2418	1.437	2836	1.954	418	2994	2.695	809
	Ort.				2484	1.383	3171	2.041	687	3288	2.682	1013



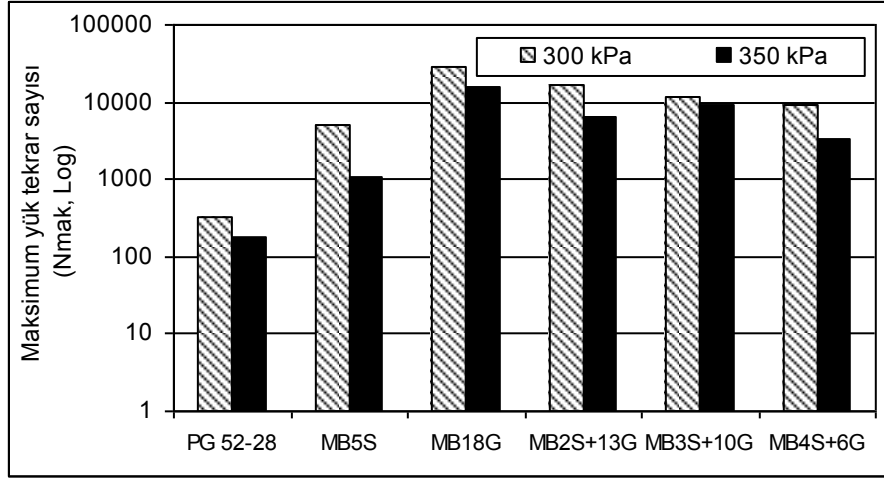
Şekil 5.32. Karışımların Ni değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi



Şekil 5.33. Karışımların Nf değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi

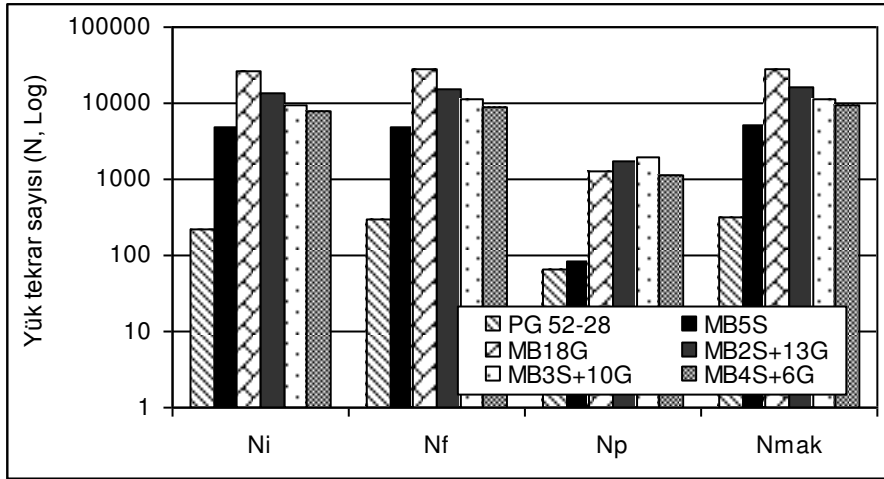


Şekil 5.34. Karışımların Np değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi



Şekil 5.35. Karışımların Nmak değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi

Ayrıca karışımların Ni, Nf, Np ve Nmak değerlerinin katkı türü ile değişimleri Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de görülmektedir.

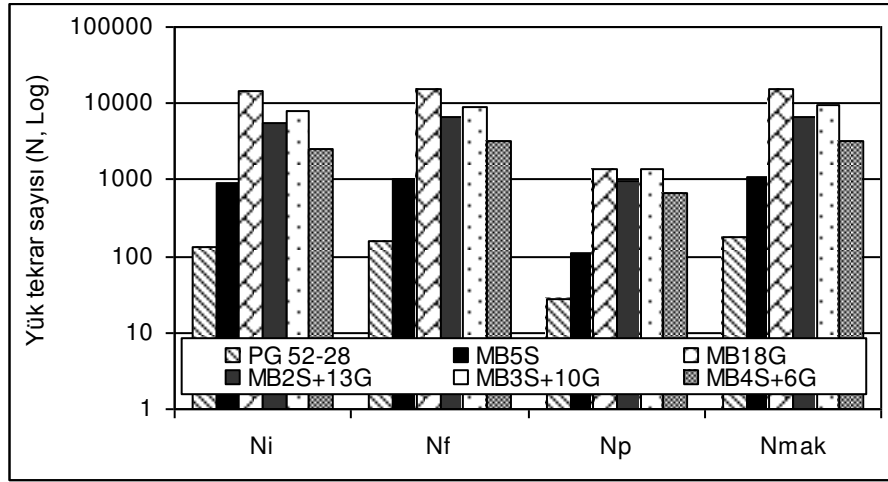


Şekil 5.36. 300 kPa gerilme seviyesinde karışımların Ni, Nf, Np ve Nmak değerleri

Şekil 5.36'da görülen 300 kPa gerilme seviyesindeki yük tekrar sayılarının katkı kullanımı ile değişimleri incelendiğinde en düşük değerlere saf karışımın, en yüksek değerlere ise %18 AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde bütün yük tekrar sayıları için kullanılan bağlayıcı türüne göre $MB_{18G} > MB_{2S+13G} > MB_{3S+10G} > MB_{4S+6G} > MB_{5S} > PG\ 52-28$ sıralamasının olduğu belirlenmiştir.

Bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını belirten Nf değerleri incelendiğinde %18 Amerikan Gilsoniti modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların saf karışıma göre

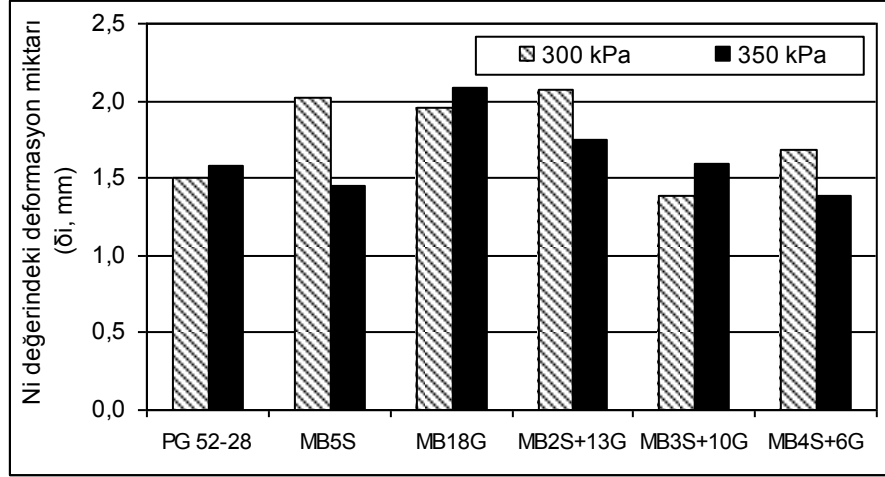
94.96 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG, %4 SBS ile %6 AG ve %5 SBS ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 53.21, 38.41, 31.42 ve 17.13 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer değişimler Nmak değerlerinde de gözlenmiştir. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayıları incelendiğinde 1000 yük tekrarına dayanan karışımların MB_{18G}, MB_{2S+13G}, MB_{3S+10G} ve MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışımlar olduğu ve bitüm modifikasyonunda kullanılan bütün katkıların çatlak ilerleyişine karşı dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir.



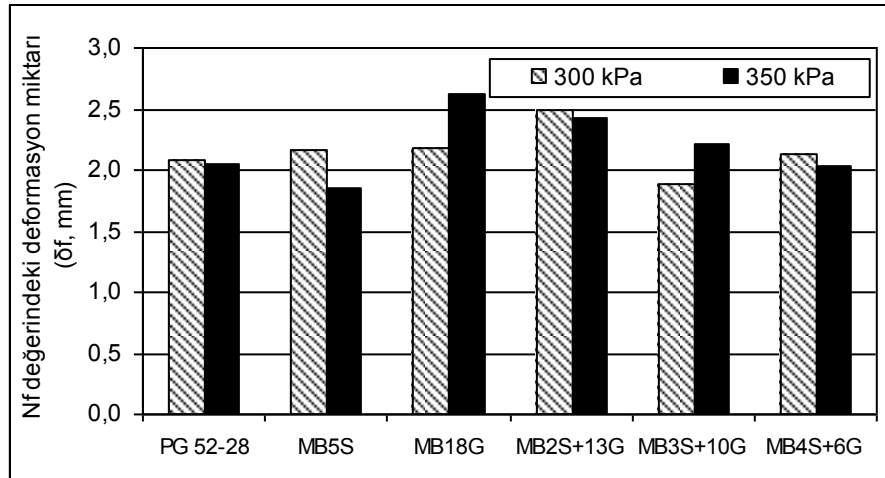
Şekil 5.37. 350 kPa gerilme seviyesinde karışımların Ni, Nf, Np ve Nmak değerleri

Şekil 5.37'de görüldüğü üzere bitüm modifikasyonunda katkı kullanımı ile 300 kPa gerilme seviyesinde olduğu gibi karışımların yorulma ömürleri artmıştır. Ni, Nf ve Nmak değerlerinin katkı türü ile değişimlerinin benzer olduğu belirlenmiştir. Karışımların Ni, Nf ve Nmak değerlerinin kullanılan bağlayıcı türüne göre değişiminin MB_{18G} > MB_{3S+10G} > MB_{2S+13G} > MB_{4S+6G} > MB_{5S} > PG 52-28 şeklinde olduğu belirlenmiştir. Karışımların yorulma ömürleri değerlendirildiğinde MB_{18G}, MB_{3S+10G}, MB_{2S+13G}, MB_{4S+6G} ve MB_{5S} ile hazırlanan karışımların Nf değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 96.15, 56.61, 39.96, 19.65 ve 6.32 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çatlak ilerlemesi yük tekrar sayıları incelendiğinde 1000 yük tekrarına dayanan karışımların MB_{18G}, MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımlar olduğu, bitüm modifikasyonunda kullanılan bütün katkıların çatlak ilerleyişine karşı dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir. Çatlak başlangıcı yük tekrar sayısındaki deformasyon değeri (δ_i), yorulma ömrü yük tekrarındaki deformasyon değeri

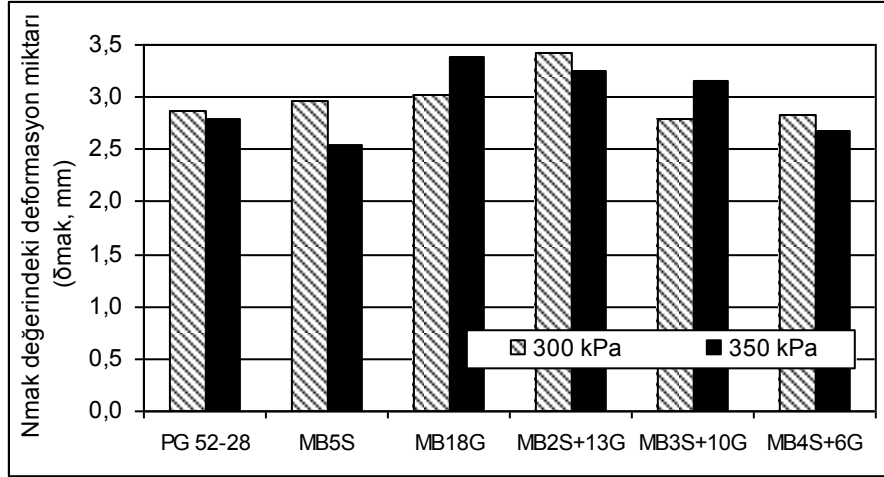
(δ_f) ve maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon değerinin (δ_{mak}) katkı türü ile değişimi Şekil 5.38-5.40'da görülmektedir.



Şekil 5.38. Karışımların δ_i değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi



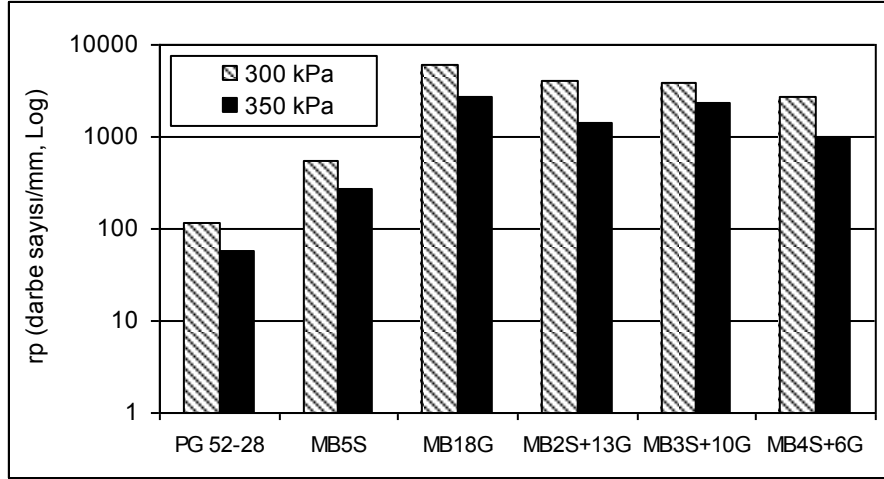
Şekil 5.39. Karışımların δ_f değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi



Şekil 5.40. Karışımların δ_{mak} değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi

Karışımların N_i , N_f ve N_{mak} değerlerindeki deformasyon miktarları değerlendirildiğinde en yüksek deformasyon değerlerine 300 kPa gerilme seviyesinde MB_{2S+13G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB_{18G} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük deformasyon değerlerine ise 300 kPa gerilme seviyesinde MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımların, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB_{5S} ve MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Deformasyon değerlerinden 300 kPa gerilme seviyesinde en duktıl davranışı MB_{2S+13G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB_{18G} ile hazırlanan karışımların sergileyeceği söylenebilmektedir.

Karışımlarda her 1 mm deformasyon meydana gelmesi için uygulanması gereken yük tekrar sayısı olan r_p değerleri Şekil 5.41'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere karışımlarda en düşük r_p değerine saf karışımın, en yüksek r_p değerine ise MB_{18G} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımlardaki SBS içeriği arttıkça r_p değerleri genel olarak azalmıştır. 300 kPa gerilme seviyesinde MB_{18G} , MB_{2S+13G} , MB_{3S+10G} , MB_{4S+6G} ve MB_{5S} ile hazırlanan karışımların r_p değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 52.21, 35.51, 33.67, 23, 43 ve 4.73 kat daha yüksek olduğu, 350 kPa gerilme seviyesinde ise 45.37, 40.73, 24.86, 17.30 ve 4.59 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.41. Karışımların r_p değerlerinin katkı kullanımı ve gerilme ile değişimi

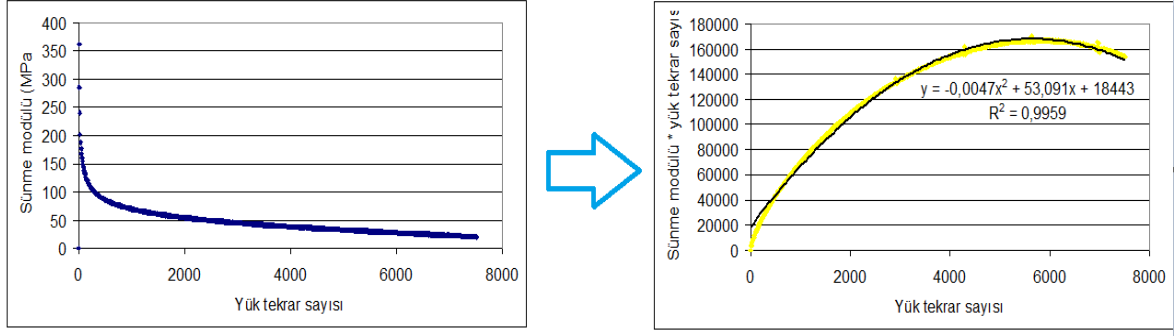
Gerilme değişiminin indirekt çekme yorulma deney sonuçlarına etkileri değerlendirildiğinde gerilmenin 300 kPa'dan 350 kPa'a yükselmesi ile N_i , N_f , N_{mak} ve r_p değerlerinin azaldığı, N_p değerlerinin MB_{5S} ve MB_{18G} ile hazırlanan karışımlarda artarken diğer karışımlarda azaldığı belirlenmiştir. Deformasyon değerleri dikkate alındığında gerilmedeki değişimle δ_i , δ_f ve δ_{mak} değerlerinde düzenli bir değişimin olmadığı, PG 52-28, MB_{18G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımlarda gerilmenin artışı ile δ_i değerlerinde artış meydana geldiği diğer karışımlarda ise azalma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca MB_{18G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımlarda gerilmenin artışı ile δ_f ve δ_{mak} değerlerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir.

İndirekt çekme yorulma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin ve karışımlarda her 1 mm deformasyon meydana gelmesi için gerekli olan yük tekrar sayılarının arttığı, bütün karışımlarda gerilmedeki artış ile yorulma ömürlerinin azaldığı, 300 kPa gerilme seviyesinde en duktıl davranışı MB_{2S+13G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların, 350 kPa gerilme seviyesinde ise MB_{18G} ile hazırlanan karışımların sergileyeceği söylenebilmektedir. Katkı türleri karşılaştırıldığında yorulma ömrü açısından en etkin katkının %18 AG kullanımı olduğu, ardından ise %2 SBS ile %13 AG ve %3 SBS ile %10 AG kullanımı olduğu belirlenmiştir. En az katkıyı sağlayan %5 SBS kullanımı bile 350 kPa gerilme seviyesinde 6 kat yorulma ömrünün artmasını sağlamıştır.

5.4.5. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

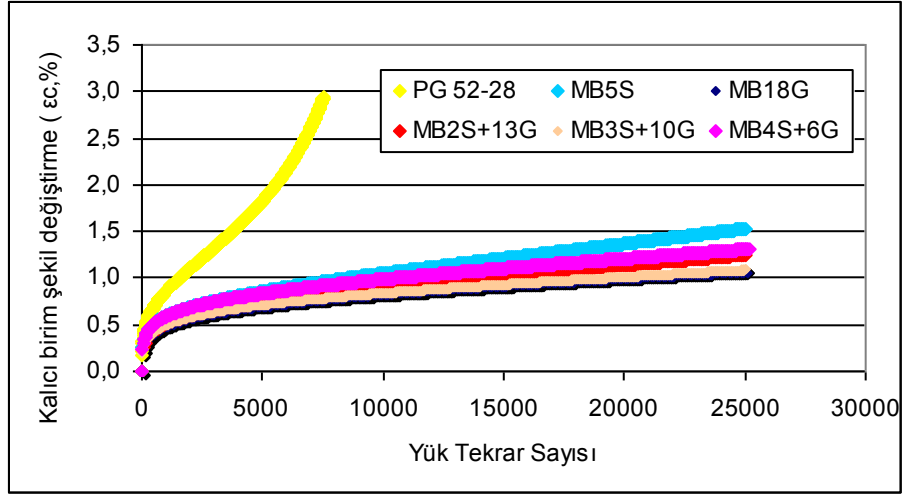
Dinamik sünme deneyi, saf ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı bağlayıcı ile tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde uygulanmıştır. Deneyde indirekt çekme yorulma ve indirekt çekme rijitlik modülü deneylerinde olduğu gibi UTM deney aleti kullanılmıştır. Deney 60°C sıcaklıkta ve 2 farklı gerilme seviyesinde (500 ve 600 kPa) uygulanmıştır. Saf ve modifiye bitümlerle tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numunelerinden her bir gerilme seviyesi için en az 3 tane olmak üzere toplam 36 numune dinamik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Deney öncesinde numunelerin deney sıcaklığına tam olarak ulaşabilmesi için numuneler UTM iklimlendirme kabininin içerisinde 4 saat bekletilmiştir. Koşullandırma süresinin sonunda numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney yazılımına uygulanacak gerilme, numunenin çapı ve yüksekliği girilmiş, düşey deformasyonu tespit eden LVDT'ler yerleştirildikten sonra deneye başlanmıştır. Deneyde öncelikle 1.5 dakika boyunca numunelere 10 kPa ön yükleme uygulanarak numunelerin deney düzeneğine tam olarak oturması sağlanmıştır. Deneyde yük etki süresi ve dinlenme süresi eşit (500 ms) olacak şekilde 1 sn'lik yükleme periyodu uygulanmıştır.

Modifiye bitümlerin performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri fazla olduğundan (PG 76) modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda rijitlik değerleri yüksek çıkmış buna bağlı olarakta modifiye bitümlerle hazırlanan karışım numuneleri üzerinde 500 kPa gerilme seviyesinde 35.000, 600 kPa gerilme seviyesinde ise 25.000 yük tekrarı uygulanmasına rağmen III. bölge tam olarak belirlenememiştir. Bu nedenle akma sayıları Bausano ve Williams tarafından önerilen yöntemle belirlenmiştir (Bausano ve Williams, 2007). Bu yöntemde düşey ekseninde “sünme modülü * yük tekrar sayısı” yatay ekseninde ise yük tekrar sayısı olacak şekilde grafikler çizilmiştir. Grafiğe 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak eğri modellenmiş ve modellere uygun denklemler tespit edilmiştir. Denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenerek akma sayısı olarak ifade edilen pik noktaya karşılık gelen yük tekrar sayıları belirlenmiştir. Saf karışımın akma sayısının bulunuşuna bir örnek Şekil 5.42'de görülmektedir.

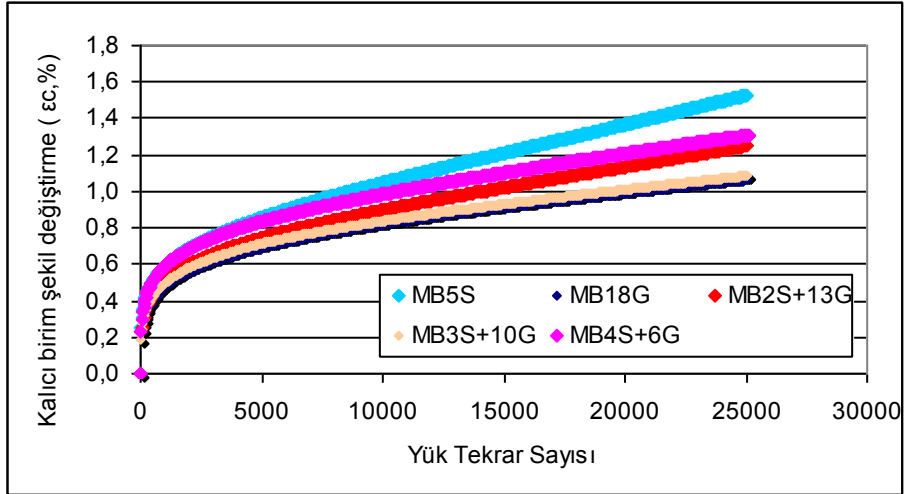


Şekil 5.42. Karışımların akma sayısının bulunmasına bir örnek

600 ve 500 kPa gerilme seviyelerinde karışımların kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin değişimi Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te görülmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere saf karışımda her iki gerilme seviyesinde numunelerde tamamen bozulma meydana gelerek III. bölge gözlenirken, modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda III. bölge gözlenememiştir. Karışımlar içerisinde en erken bozulma saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda gözlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek karışımın MB_{18G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar, en düşük karışımın ise MB_{5S} ile hazırlanan karışımlar olduğu gözlenmiştir.

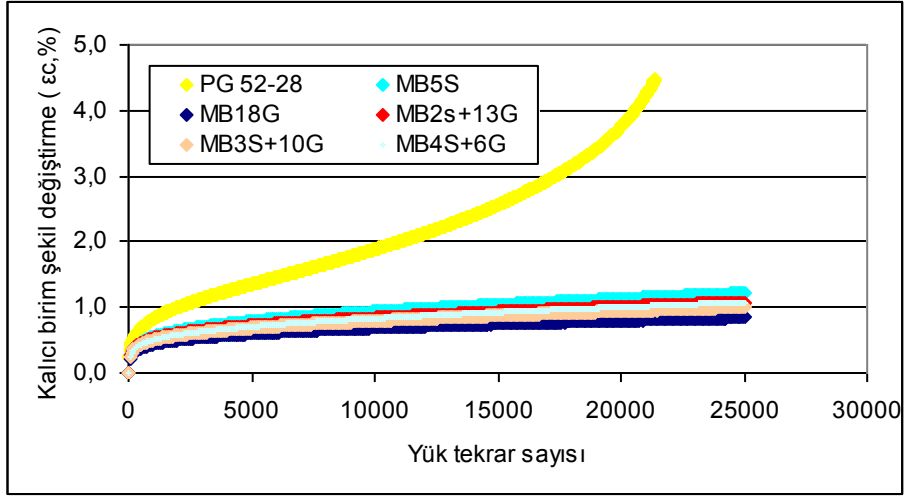


(a)

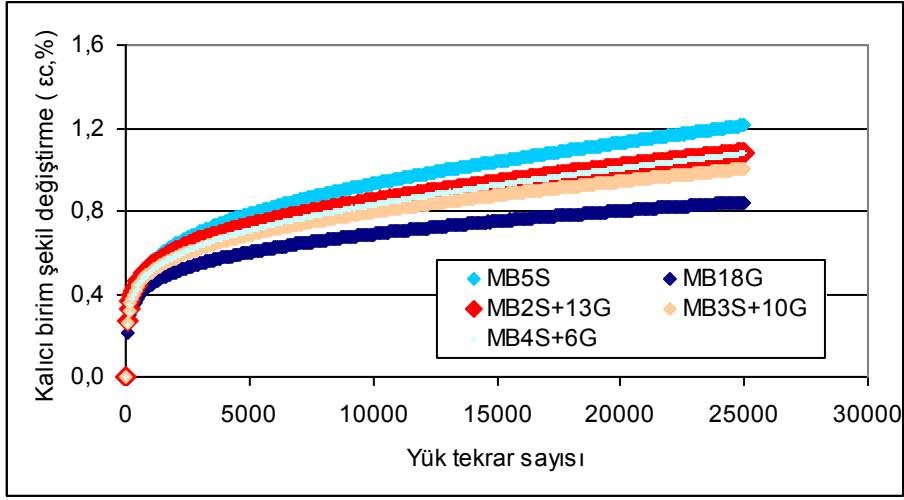


(b)

Şekil 5.43. 600 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c – yük tekrar sayısı ilişkisi



(a)



(b)

Şekil 5.44. 500 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c – yük tekrar sayısı ilişkisi

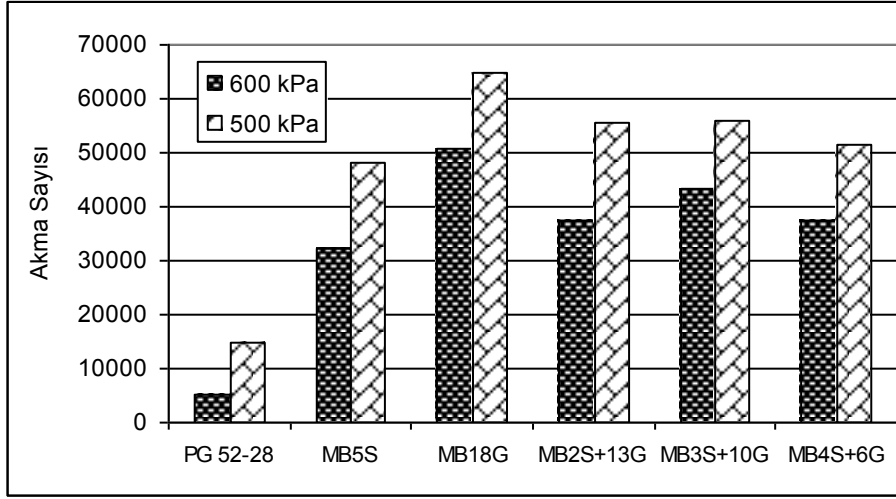
Çalışmada ayrıca 25.000 yük tekrarı dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.15 ve 5.16'da verilmiştir. Saf karışım 600 kPa gerilme seviyesinde en fazla 8.000 yük tekrarında, 500 kPa gerilme seviyesinde yaklaşık 23.000 yük tekrarında tamamen deforme olduğundan tabloda 25.000 yük tekrarındaki PG 52-28 ile hazırlanan karışımların değerleri bulunmamaktadır. Ayrıca karışımların akma sayısı değerlerinin, 25.000 yük tekrarındaki ϵ_c , 25.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü, 25.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 5.45-Şekil 5.48'de görülmektedir.

Tablo 5.15. 600 kPa gerilme seviyesinde karışımların dinamik sünme deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune No	Gerilme seviyesi (σ, kPa)	Sünme modülü * yük tekrar sayısı - yük tekrar sayısı denklemi	Belirtme katsayısı (R ²)	Akma Sayısı	25.000 yük tekrarındaki εc	25.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü	25.000 Yük tekrarındaki Sünme Modülü
PG 52-28	1	600	$y = -0.0047x^2 + 53.091x + 18443$	0.9959	5648	-	-	-
	2		$y = -0.005x^2 + 48.977x + 18229$	0.9938	4898	-	-	-
	3		$y = -0.0048x^2 + 45.981x + 8788$	0.9979	4790	-	-	-
	Ort.				5112	-	-	-
MB _{5S}	1		$y = -0.001x^2 + 62.009x + 53942$	0.9987	31005	1.528	727.8	39.29
	2		$y = -0.001x^2 + 68.436x + 57485$	0.9992	34218	1.295	761.3	46.29
	3		$y = -0.0012x^2 + 75.329x + 64081$	0.9985	31387	1.244	724.2	48.20
	Ort.				32203	1.356	737.8	44.6
MB _{18G}	1		$y = -0.0007x^2 + 70.948x + 148780$	0.9973	50677	1.028	722.8	58.38
	2		$y = -0.0008x^2 + 80.197x + 61695$	0.9994	50123	0.941	841.4	63.80
	3		$y = -0.0007x^2 + 71.629x + 80037$	0.9991	51164	1.061	780.2	56.6
	Ort.				50655	1.010	781.5	59.6
MB _{2S+13G}	1		$y = -0.001x^2 + 71.414x + 82459$	0.9984	35707	1.211	765.3	49.49
	2		$y = -0.0008x^2 + 65.997x + 78620$	0.9988	41248	1.248	770.8	48.02
	3		$y = -0.0009x^2 + 63.963x + 136619$	0.9961	35535	1.267	788.1	47.4
	Ort.				37497	1.242	774.7	48.3
MB _{3S+10G}	1		$y = -0.0008x^2 + 76.054x + 66214$	0.9992	47534	1.029	786.1	58.27
	2		$y = -0.0009x^2 + 73.927x + 61057$	0.9993	41071	1.086	781.6	55.18
	3		$y = -0.0009x^2 + 74.104x + 96054$	0.9987	41169	1.073	742.8	55.9
	Ort.				43258	1.063	770.2	56.5
MB _{4S+6G}	1		$y = -0.0008x^2 + 63.58x + 51347$	0.9993	39738	1.307	822.0	45.88
	2		$y = -0.001x^2 + 73.615x + 74446$	0.9985	36808	1.142	793.5	52.53
	3		$y = -0.0009x^2 + 64.776x + 36887$	0.9994	35987	1.299	658.5	46.15
	Ort.				37511	1.249	758.0	48.2

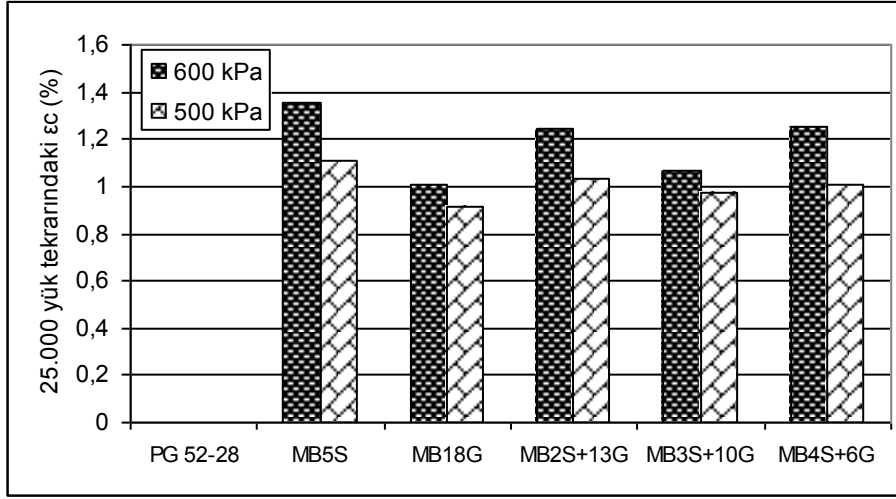
Tablo 5.16. 500 kPa gerilme seviyesinde karışımların dinamik sünme deney sonuçları

Bağlayıcı türü	Numune No	Gerilme seviyesi (σ, kPa)	Sünme modülü * yük tekrar sayısı - yük tekrar sayısı denklemi	Belirtme katsayısı (R^2)	Akma Sayısı	25.000 yük tekrarındaki ϵ	25.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü	25.000 Yük tekrarındaki Sünme Modülü
PG 52-28	1	500	$y = -0.0013x^2 + 40.37x + 33953$	0.9969	15527	-	-	-
	2		$y = -0.0012x^2 + 35.772x + 30391$	0.9962	14905	-	-	-
	3		$y = -0.0012x^2 + 32.909x + 25739$	0.9967	13712	-	-	-
	Ort.				14715	-	-	-
MB _{5S}	1		$y = -0.0006x^2 + 58.107x + 75499$	0.9985	48423	1.117	717.3	44.76
	2		$y = -0.0005x^2 + 51.579x + 61406$	0.9991	51579	1.214	730.4	41.17
	3		$y = -0.0007x^2 + 62.323x + 118711$	0.9980	44516	0.999	715.2	50.01
	Ort.				48173	1.110	721.0	45.3
MB _{18G}	1		$y = -0.0005x^2 + 61.727x + 59300$	0.9995	61727	0.972	785.1	51.39
	2		$y = -0.0005x^2 + 69.552x + 68223$	0.9995	69552	0.843	776.5	59.24
	3		$y = -0.0005x^2 + 63.403x + 61557$	0.9995	63403	0.927	775.3	53.90
	Ort.				64894	0.914	779.0	54.8
MB _{2S+13G}	1		$y = -0.0005x^2 + 58.895x + 70704$	0.9993	58895	1.004	760.2	50.12
	2		$y = -0.0005x^2 + 58.005x + 59660$	0.9991	58005	1.078	741.8	46.53
	3		$y = -0.0006x^2 + 60.329x + 95623$	0.9986	50274	1.024	731.7	48.75
	Ort.				55725	1.035	744.6	48.5
MB _{3S+10G}	1		$y = -0.0005x^2 + 59.349x + 68324$	0.9992	59349	1.003	764.1	49.92
	2		$y = -0.0005x^2 + 53.189x + 63958$	0.9990	53189	1.168	751.4	42.77
	3		$y = -0.0007x^2 + 77.968x + 161895$	0.9986	55691	0.745	680.3	67.1
	Ort.				56076	0.972	731.9	53.3
MB _{4S+6G}	1		$y = -0.0006x^2 + 58.35x + 60496$	0.999	48625	1.077	724.6	46.28
	2		$y = -0.0006x^2 + 63.586x + 67442$	0.9992	52988	0.965	711.4	51.82
	3		$y = -0.0006x^2 + 63.485x + 95317$	0.9988	52904	0.978	740.8	51.20
	Ort.				51506	1.007	725.6	49.8



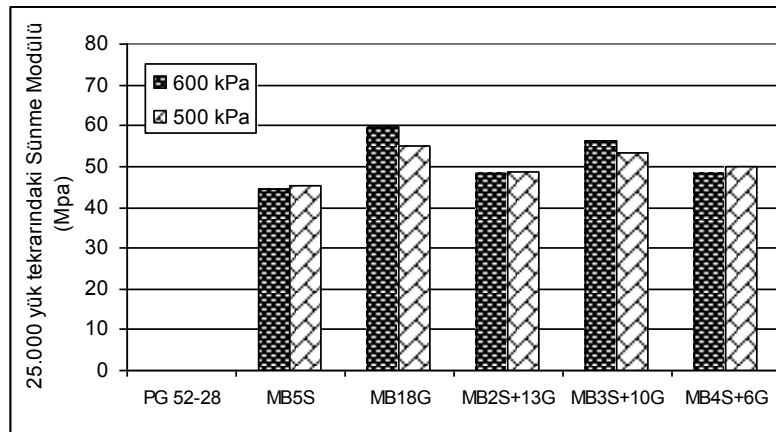
Şekil 5.45. Karışımların akma değerlerinin katkı türü ile değişimi

Şekil 5.45 incelendiğinde katkı kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan akma sayısı değerleri artmıştır. En düşük akma sayısı değerine saf karışımın, en yüksek akma sayısı değerine ise MB_{18G} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımların akma sayıları kullanılan bağlayıcı cinsine göre; MB_{18G} > MB_{3S+10G} > MB_{2S+13G} > MB_{4S+6G} > MB_{5S} > PG 52-28 şeklinde sıralanmıştır. 600 kPa gerilme seviyesinde MB_{18G}, MB_{3S+10G}, MB_{2S+13G}, MB_{4S+6G} ve MB_{5S} ile hazırlanan karışımların akma sayısı değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla 9.91, 8.46, 7.34, 7.33 ve 6.30 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 500 kPa gerilme seviyesinde ise bu değişimin sırasıyla 4.41, 3.81, 3.79, 3.50 ve 3.27 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum özellikle yüksek gerilme seviyelerinde katkıların daha etkin olduğunu göstermektedir. Gerilmenin artması ile akma sayıları azalmıştır. Gerilmenin 500 kPa'dan 600 kPa'a yükselmesi ile MB_{18G}, MB_{3S+10G}, MB_{2S+13G}, MB_{4S+6G}, MB_{5S} ve PG 52-28 ile hazırlanan karışımların akma sayısı değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.30, 1.49, 1.37, 1.50 ve 2.88 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu durum kalıcı deformasyon açısından gerilmedeki artıştan en fazla etkilenen karışımın PG 52-28 ile hazırlanan karışım olduğunu, en az etkilenen karışımın ise MB_{18G} ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir.



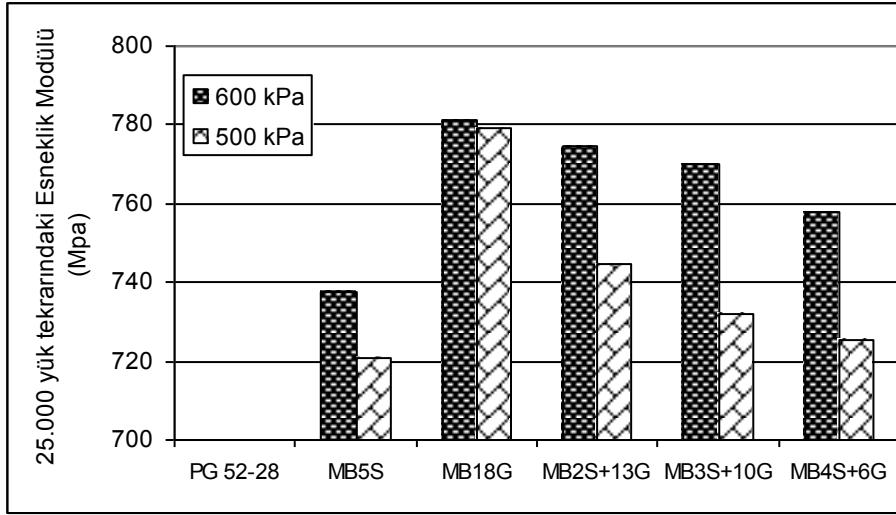
Şekil 5.46. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin katkı türü ile değişimi

Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde (Şekil 5.46) en düşük ϵ_c değerlerine MB_{18G} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu görülmektedir. PG 52-28 ile hazırlanan karışımlar 25.000 yük tekrarına ulaşmadan bozulduklarından saf karışımlardan değer alınamamıştır. Bunun yanı sıra gerilmedeki artış ile bütün karışımlarda kalıcı birim şekil değiştirme değerleri artmıştır. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde gerilmedeki değişimden en fazla etkilenen karışımın MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışım olduğu, en az etkilenen karışımın ise MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında en fazla deformasyonun her iki gerilme seviyesinde de MB_{5S} ile hazırlanan karışımlarda olduğu, MB_{2S+13G} ve MB_{4S+6G} ile hazırlanan karışımların da benzer kalıcı deformasyon sergiledikleri belirlenmiştir.



Şekil 5.47. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki sünme modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi

Karışımların sünme modülü değerleri gerilme değerlerinin kalıcı birim şekil değiştirme (ϵ_c) değerlerine oranlanması ile elde edilmiştir (Şekil 5.47). Gerilme değerleri sabit olduğundan sünme modülü değerleri birim şekil değiştirme değerlerindeki değişimle benzerlik göstermektedir. Sünme modülü değeri, gerilmenin kalıcı birim şekil değiştirmeye oranı olduğundan bu değer yüksek olması kalıcı deformasyona karşı dayanımın yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlardan akma sayısı değerlerinde olduğu gibi kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek olan karışımın MB_{18G} ile hazırlanan karışım, dayanımı en düşük olan karışımın 25.000 yük tekrarına kadar mukavemet gösteremeyen PG 52-28 ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.48. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki esneklik modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi

Karışımların esneklik modülü değerleri uygulanan gerilme değerlerinin elastik birim şekil değiştirmeye oranlanması ile elde edilmiştir (Şekil 5.48). Bu nedenle daha düşük esneklik modülü değeri daha fazla elastik davranışı ifade etmektedir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde her iki gerilme seviyesinde de en düşük esneklik modülü değerine MB_{5S} ile hazırlanan karışımın sahip olduğu dolayısıyla en fazla elastik birim şekil değiştirmeye MB_{5S} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki gerilme seviyesinde de karışımlardaki SBS içeriği arttıkça esneklik modülü değerlerinin azaldığı dolayısıyla elastik davranışın arttığı belirlenmiştir. 600 kPa gerilme seviyesinde MB_{5S} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların esneklik modülü değerlerinin MB_{4S+6G}, MB_{3S+10G}, MB_{2S+13G} ve MB_{18G} ile hazırlanan karışımların esneklik modüllerinden sırasıyla %2.74, %4.39, %5.01 ve %5.92 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 500 kPa gerilme

seviyesinde ise bu deęerlerin sırasıyla %0.64, %1.52, %3.27 ve %8.04 daha dūřuk olduęu belirlenmiřtir.

Bütün dinamik sūnme deney sonuçları dikkate alındığında katkı kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir gōstergesi olan akma sayısı ve sūnme modūlū değerlerinin artacağı, bitūm modifikasyonunda %18 AG ve %3 SBS ile %10 AG'nin birlikte kullanımının kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından en etkin katkılar olacağı, bitūm modifikasyonunda %5 SBS kullanımının ise etkinliği en az olan katkı olacağı belirlenmiştir. Esneklik modūlū değerlerinden en yūksek elastik davranışı %5 SBS modifiyeli bitūm ile hazırlanan karışımların sergileyeceği, elastikliği en dūřuk karışımın ise %18 AG modifiyeli bitūm ile hazırlanan karışım olacağı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sadece SBS kullanımının elastikliği, sadece AG kullanımının ise önemli oranda kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttıracaağı sōylenebilmektedir. Bir karayolunun kalıcı deformasyonlara karşı dayanıklı olmasının yanı sıra elastik davranış sergilemesi de beklenmektedir. Bu nedenle sadece SBS veya AG kullanımı yerine bitūm modifikasyonunda %3 SBS ile %10 AG kullanımının daha faydalı olacağı sōylenebilmektedir.

6. SONUÇLAR

Çalışmada ülkemizin en sıcak ili olan Şanlıurfa dikkate alınarak bu il için uygun bağlayıcı sınıfı Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Daha sonra PG 52-28 saf bağlayıcısı kullanılarak Şanlıurfa ili için uygun stiren-butadien-stiren (SBS) katkı içeriği %5 ve Amerikan Gilsoniti katkı içeriği %18 olarak belirlenmiştir. Daha sonra %5 SBS ve %18 AG modifiyeli bitüm ile benzer özelliklere ve aynı performans seviyesine sahip olacak şekilde %2, %3 ve %4 SBS ile birlikte hangi oranlarda AG kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Superpave bağlayıcı deneyleri sonucunda %2 SBS ile birlikte %13 AG, %3 SBS ile birlikte %10 AG ve %4 SBS ile birlikte %6 AG kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Saf ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bitüm (MB_{18G}, MB_{3S+10G}, MB_{2S+13G}, MB_{4S+6G} ve MB_{5S}) kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde uygulanan Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve dinamik sünme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Marshall stabilite ve akma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile Marshall stabilite değerleri artarken, akma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde en etkin katkının stabilite ve MQ değerleri açısından MB_{3S+10G} ve MB_{18G} kullanımı olduğu, RMS değerlerinde ise MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} olduğu belirlenmiştir.
- Çekme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde en yüksek değerlere MB_{3S+10G} ve MB_{18G} ile hazırlanan karışımların, çekme dayanımı oranı değerleri incelendiğinde ise en yüksek değerlere MB_{2S+13G}, MB_{3S+10G} ve MB_{5S} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir.
- ITSM deney sonuçlarından saf karışıma göre ITSM değerini en fazla arttıran ve sıcaklıktaki değişimden en az etkilenen karışımların %18 AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir. En düşük rijitlik değerine sahip olan ayrıca sıcaklıktan en fazla etkilenen karışımların ise PG 52-28 saf bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir.

SBS ile AG'nin birlikte kullanıldığı modifiye bitümler dikkate alındığında hem rijitlik hem de sıcaklıktan etkilenme açısından en etkin karışımların MB_{2S+13G} ve MB_{3S+10G} ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir.

- İndirekt çekme yorulma deney sonuçları değerlendirildiğinde katkı kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin ve karışımlarda her 1 mm deformasyon meydana gelmesi için gerekli olan yük tekrar sayılarının arttığı, bütün karışımlarda gerilmedeki artış ile yorulma ömürlerinin azaldığı belirlenmiştir. Katkı türleri karşılaştırıldığında yorulma ömrü açısından en etkin katkının %18 AG kullanımı olduğu, ardından ise %2 SBS ile %13 AG ve %3 SBS ile %10 AG kullanımı olduğu belirlenmiştir.
- Dinamik sünme deney sonuçları dikkate alındığında katkı kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın göstergesi olan akma sayısı ve sünme modülü değerlerinin arttığı, bitüm modifikasyonunda %18 AG ve %3SBS ile %10 AG kullanımının kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından en etkin katkılar olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülü değerlerinden en yüksek elastik davranışı %5 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların sergileyeceği tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda katkı kullanımı ile bağlayıcıların reolojik özelliklerinin iyileştiği; bütün katkıların karışımların stabilite, nem hasarına karşı dayanım, rijitlik, yorulma ömrü ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını olumlu yönde etkiledikleri belirlenmiştir. Marshall stabilite, Marshall oranı, çekme dayanımı, akma sayısı ve sünme modülü değerleri üzerinde en etkin katkıların %18 AG ve %3 SBS + %10 AG kullanımı olduğu, rijitlik ve yorulma ömrü üzerinde en etkin katkıların %18 AG, %2 SBS + %13 AG ve %3 SBS + %10 AG kullanımı olduğu, nem hasarına karşı dayanım üzerinde en etkin katkıların %5 SBS, %2 SBS + %13 AG ve %3 SBS + %10 AG olduğu, karışımların elastikiyetini en fazla arttıran katkının %5 SBS kullanımı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar dikkate alındığında tek başına SBS veya AG kullanımı yerine SBS ve AG'nin birlikte kullanılmasının daha faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. **AASHTO T283**, 2003. Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
2. **Aflaki, S, Tabatabaee, N.** 2009. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran, *Construction and Building Materials*, 23, p. 2141-2150.
3. **Aglan, H, Othman, A, Figueroa, L, Rollings, R.** 1993. Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, p. 178-186.
4. **Airey, G.D.** 2004. Styrene-butadiene-styrene polymer modification of road bitumens, *Journal of Materials Science*, 39, p. 951-959.
5. **Airey, G.D.** 2006. Performance of polymer modified bitumens: Emphasis on the UK market, Norwegian Asphalt Association Annual Conference, Oslo, Norway.
6. **Alshamsi, K.S,** 2006. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom, 226p.
7. **Altaş, Ö.Y,** 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. **Ameri, M, Mansourian, A, Ashani, S.S, Yadollahi, G.** 2011a. Technical study on the Iranian gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction, *Construction and Building Materials*, 25, p. 1379-1387.
9. **Ameri, M, Mansourian, A, Ziari, H.** 2011b. Experimental investigation of the effect of gilsonite on performance of hot-mix asphalt, *Transportation Research Journal*, 1, p. 1-8.
10. **Aragao, F.T.S, Lee J, Kim, Y.R. ve Karki, P,** 2010. Material specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements, *Construction and Building Materials*, 24(4), p. 538-544.

11. **Asphalt Institute**, 1996. Superpave mix design, Superpave Series No. 2 (SP-2), 128p, USA.
12. **Babagoli, R, Hasaninia, M, Namazi, N.M**, 2015. Laboratory evaluation of the effect of gilsonite on the performance of stone matrix asphalt mixture, Road Materials and Pavement Design, ahead-of-print, p. 1-18.
13. **Bardesi, A, Brule, B.** 1999. Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements, World Road Association (PIARC), p. 118-120.
14. **Bausano, J. ve Williams, C**, 2007. A new approach to calculating flow number, Unpublished Paper.
15. **Behiry, A.E.** 2013. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures, Ain Shams Engineering Journal, 4, p. 351-363.
16. **Carcer, I.A, Masegosa, R.M, Vinas, M.T, Salom, C, Prolongo, M.G, Contreras, V, Barcelo, F, Paez, A.** 2014. Storage stability of SBS/Sulfur modified bitumens at high temperature: Influence of bitumen composition and structure, Construction and Building Materials, 52, p. 245-52.
17. **Christensen, D.W, Anderson, D.A**, 1992. Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements, Proc. Assn. Asphalt Paving Technol, Vol. 61, p. 67–116.
18. **Cominsky, R.J, Huber, G.A, Kennedy, T.W. ve Anderson, M**, 1994. The Superpave mix design manuel for new construction and overlays, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-407, 184p, National Research Council, Washington, DC.
19. **Çeloğlu, E.M**, 2014. Farklı doğal asfaltların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkileri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 130s. Elazığ.
20. **Çolak, K.M**, 2006. Asfalt kaplamalarda sinerjetik fayda konusunun anlaşılmasında marshall oranı yaklaşımının kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
21. **Davis II, N, Tooman, C.E.** 1989. New laboratory tests evaluate the effectiveness of gilsonite resin as a borehole stabilizer, SPE Drilling Engineering, 4(1), p. 47-56.
22. **Dinç, E**, 1999, Performans sınıfı asfaltlar, bağlayıcı özellikleri ve deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.

23. **Dokken, K, Evensen, T.** 2015. Gilsonite resin - A modifier for high stability pavements, American Gilsonite Company, <http://www.americangilsonite.com/asphalt—oslo.html>, 20 Mayıs 2015.
24. **Domingos, M, Faxina, A.** 2014. Creep-recovery behavior of asphalt binders modified with SBS and PPA, Journal of Materials in Civil Engineering, 26(4), p. 781-783.
25. **Druta, C,** 2006. A Micromechanical approach for predicting the complex shear modulus and accumulated shear strain of asphalt mixtures from binder and mastics, Doctor of Philosophy, Louisiana State University, 250p.
26. **ELE,** 1994. Universal materials testing apparatus for asphalt and unbound specimens, Reference and Operating Manual, ELE International Ltd, Hertfordshire, UK.
27. **Francken, L,** 1998. Bituminous binders and mixes, London, Rilem Reports, E&FN Spon, 352p.
28. **Gorkem, C, Sengoz, B.** 2009. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, Construction and Building Materials, 23, p. 2227-36.
29. **Hajikarimi, P, Aflaki, S, Hoseini, A.S.** 2013. Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders, Construction and Building Materials, 49, p. 682-687.
30. **Hamidi, H.** 1998. Stiffness modulus and permanent deformation characteristics of asphalt mix containing gilsonite, PhD Thesis, Bandung Technology Institute.
31. **Hınıslioğlu, S. ve Ağar, E,** 2004. Use of the waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, Materials Letters, 58, p. 267-271.
32. **Huang, B, Li, G, Shu, X.** 2006. Investigation into three-layered hma mixtures, Composites Part B, 37(7-8), p. 679-690.
33. **Huang, W, and Xu, G,** 2012. Anti-rutting performance analysis of asphalt mixture with different natural asphalt, Blucher Mechanical Engineering Proceedings, 1(1), p. 4755-4759.
34. **İlcalı, M,** 2001. Asfalt ve uygulamaları, İsfalt Bilimsel Yayınları, No: 1, 280s, İstanbul.

35. **Janoo, V.C, Korhonen, C.** 1999. Performance testing of hot-mix asphalt aggregates, US Army Corps of Engineering Project Number: 99-20.
36. **Kennedy, T.W, Huber, G.A, Harrigan, E.T, Cominsky, R.J, Hughes, C.S, Quintus, H.V, Moulthrop, J.S,** 1994, Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC, 170p.
37. **Khodaii, A. ve Mehrara, A,** 2009. Evaluation of permanent deformation of unmodified and sbs modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Construction and Building Materials*, 23(7), p. 2586-2592.
38. **Kok, B.V, Yilmaz, M.** 2009. The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 23, p. 1999-2006.
39. **Kök, B.V,** 2007. Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
40. **Kök, B.V, Yılmaz, M, Akpolat, M.** 2014a. Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS + Sasobit modified binder, *Construction and Building Materials*, 63, p. 174-179.
41. **Kök, B.V, Yılmaz, M, Akpolat, M.** 2014b. The Effect of SBS and wax modification on stability and stiffness of stone mastic asphalt, *Turkish Journal of Science and Technology*, 9(1), p. 56-72.
42. **Kök, B.V, Yılmaz, M, Güler, M.** 2011. Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel*, 90, p. 3093-3099.
43. **Kumar, P, Chandra, S, Bose, S.** 2006. Strength characteristics of polymer modified mixes, *The International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), p. 63-71.
44. **Lav, A.H. ve Lav, M.A,** 2004. Shell bitüm el kitabı, İsfalt Bilimsel Yayınları, No:3, 334s, İstanbul.
45. **Lavin, P.G,** 2003. Asphalt pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.

- 46. Liang, M, Xin, X, Fan, W, Luo, H, Wang, X, Xing, B.** 2015. Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 74, p. 235-240.
- 47. Liu, J, Li, P.** 2008. Experimental study on gilsonite-modified asphalt, *Proceeding of the 2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference*, Washington, p. 222-228.
- 48. Loh, S, Olek, J,** 1999. Contributions of PG graded asphalt to low temperature cracking resistance of pavement, *Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22*, Perdue University, Indiana, 172p.
- 49. Lu, X, Isacsson, U.** 1997a. Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens, *Journal of Construction and Building Materials*, 11(1), p. 23-32.
- 50. Lu, X, Isacsson, U.** 1997b. Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens, *Materials and Structures*, 30(10), p. 618-626.
- 51. McGennis, R.B, Anderson, R.M, Kennedy, T.W, Solaimanian, M,** 1995. Background of Superpave asphalt mixture design and analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172p.
- 52. McGennis, R.B, Shuler, S, Bahia, H.U.** 1994. Background of superpave asphalt binder test methods, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, 104p, Washington, DC.
- 53. Nakoman, E.** 1977. Güneydoğu anadolu asfaltik madde zuhurları, *Madencilik Dergisi*, 16(6), s. 41-51.
- 54. Nicholls, C,** 1998. Aspalh surfacings, E & FN Spon, p. 68-79.
- 55. Öztürk, E.A, Çubuk, M.K,** 2004. Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: yüksek performanslı asfalt kaplama, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 19, No 2, s. 175-184.
- 56. Pamplona, T.F, Amoni, B.C, Alencar, A.E.V, Lima, A.P.D, Ricardo, N.M. Soares, J.B, Soares, S.A.** 2012. Asphalt binders modified by SBS and SBS/Nanoclays: Effect on rheological properties, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 23(4).

- 57. Peng, Y, Ruibo, R, Lizhi, W, Xiaoning, Z.** 2012. Characteristic behavior of asphalt with SBS and PE, *Sustainable Construction Materials*, p. 421-429.
- 58. 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, 197p, National Research Council Washington, DC.
- 59. Prapaitrakul, N, Freeman, T, Glover C.J.** 2005. Analyze existing fog seal asphalts and additives: Literature review, Texas Department of Transportation, FHWA/TX-06/0-5091-1, 21p, USA.
- 60. Reubush, S.D,** 1999. Effects of storage on the linear viscoelastic response of polymer-modified asphalt at intermediate to high temperatures, Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351p.
- 61. Roque, R, Birgisson, B, Drakos, C, Sholar, G.** 2005. Guidelines for use of modified binders, Florida Department of Transportation Project Number: 4910-4504-964-12.
- 62. Scholten, E.J.** 2010. Build sustainable and economical roads with a novel class of sbs polymers, *Isfalt*, Istanbul, 10 May.
- 63. Shih, R.S, Kuo, S.W, Chang, F.C.** 2011. Thermal and mechanical properties of microcellular thermoplastic sbs/ps/sbr blend: effect of crosslinking, *Polymer*, 52(3), p. 752-759.
- 64. Sönmez, İ, Deniz, M.T, Tayfur, S, Özen, H, Yıldırım, S.A, Eren, B.K.** 2005. Modifiye katkı maddelerinin bitümlü sıcak karışıma etkisi ve performans üstünlükleri, 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 23-25 Mayıs, s. 334-348.
- 65. Subagio, B.S, Siswosoebrotho, B.I. ve Karsaman, R.H,** 2003. Development of laboratory performance of Indonesian rock asphalt (asbuton) in hot rolled asphalt mix, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4, p. 436-449.
- 66. Sun, D, Lu, W.** 2003. Investigation and improvement of storage stability of sbs modified asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 21(5-6), p. 901-910.
- 67. Suo, Z, Wong, W.G.** 2009. Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete material in wearing course, *Construction and Building Materials*, 23, p. 462-468.

- 68. Superpave Mixture Design Guide**, 2001. WesTrack forensic team consensus report, FHWA-RD-01-052, Washington, DC, 23p.
- 69. Tayfur, S, Ozen, H, Aksoy, A.** 2007. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials*, 21, p. 328-37.
- 70. TS EN 1092-1**, 2011. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro-Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 71. TS EN 1097-2**, 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler – Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için yöntemler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 72. TS EN 1367-2**, 2010. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler – Bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 73. TS EN 1426**, 2002. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar – İğne batma derinliği tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 74. TS EN 1427**, 2002. Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Yumuşama noktası tayini – Halka ve bilye metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 75. TS EN 933-9**, 2010. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler – Bölüm 9: İnce malzeme tayini – Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- 76. Tunç, A**, 2001, Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- 77. URL-1**, <http://www.asiagilsonite.com/?page=home> Asia Gilsonite. 25 Nisan 2015.
- 78. URL-2**, <http://www.gilsonite.org/index.htm> The Chemical Mine World Company. 03 Ağustos 2015.
- 79. URL-3**, <http://www.americangilsonite.com> American Gilsonite Company. 05 Nisan 2015.
- 80. URL-4**, http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BiTVaL Project, FEHRL, 213p. 03 Ağustos 2015.
- 81. URL-5**, www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_f4f7a.pdf Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Maden İşletme Laboratuvarı. 03 Ağustos 2015.

82. **Warren, R.S, McGennis, R.B, Bahia, H.U,** 1994. Superpave asphalt binder test methods an illustrated overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.
83. **Wen, G, Zhang, Y, Zhang, Y, Sun, K, Fan, Y.** 2002. Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts, *Polymer Testing*, 21, p. 295-302.
84. **Widyatmoko, I, Elliott, R.** 2008. Characteristics of elastomeric and plastomeric binders in contact with natural asphalts, *Construction and Building Materials*, 22, p. 239–249.
85. **Witczak, M.W, Kaloush, K.E, Pellinen, T, El-Basyouny, M. ve Von Quintus, H,** 2002. Simple performance test for Superpave mix design, The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Rep 465, 465p, Washington, DC.
86. **Yalçın, E,** 2014. Filler olarak kireç kullanımının modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların performansına etkisinin incelenmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 116s. Elazığ.
87. **Yılmaz, M. ve Kök, B.V,** 2008. Stiren-butadien-stiren modifiyeli bitümlü bağlayıcıların Superpave sistemlerine göre yüksek sıcaklık performans seviyesine ve işlenebilirliğinin belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 23(41), s. 811-819.
88. **Yılmaz, M,** 2011. Asfaltitin bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 330s. Elazığ.
89. **Yılmaz, M, Kök, B.V, Çeloğlu, M.E, Yalçın, E, Erdoğan Yamaç, Ö, Akpolat, M,** 2015. Stiren-butadien-stiren ve Gilsonit'in birlikte kullanımının modifiye bitümlerin depolama stabilitesi üzerindeki etkisinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP), Performans Projesi, Proje No: MF.14.22. Elazığ.
90. **Yılmaz, M, Kök, B.V, Kuloğlu, N, Alataş, T.** 2013. Elastomer türü polimerler ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların depolama stabilitelerinin ve reolojik özelliklerinin incelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(1), s. 67-77.
91. **Yılmaz, M, Kök, B.V, Kuloğlu, N, Yamaç Erdoğan, Ö.** 2014. Farklı katkılarla modifiye edilen bağlayıcıların depolama stabilitesi deneyi sonrası reolojik özelliklerinin değerlendirilmesi, *Karayolu 3. Ulusal Kongresi*, Ankara, 25-27 Kasım.

- 92. Zaniwski, J.P. ve Pumphrey, M.E,** 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, Asphalt Technology Program, 107p, Morgantown, West Virginia.
- 93. Zoorob, S.E. ve Suparma, L.B,** 2000. Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt), Cement&Concrete Composites, 22, p. 233-242.

ÖZGEÇMİŞ

Özge ERDOĞAN YAMAÇ, 1989 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlamıştır.

2008 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Ana Bilim Dalına Öğretim Elemanı Yetiştirme Programı kapsamında araştırma görevlisi olarak atanmış ve bu program kapsamında 2012-2013 eğitim döneminde Hacettepe Üniversitesi'ne dil eğitimi almak üzere gitmiştir. 2013 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.