

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARIŞTIRMA SICAKLIĞININ BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN NEM HASARINA KARŞI DAYANIMINA VE
YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Gül BALIK
142115102

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

AĞUSTOS-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARIŞTIRMA SICAKLIĞININ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
NEM HASARINA KARŞI DAYANIMINA VEYORULMA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gül BALIK

142115102

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08.08.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 15.09.2017

Tez Danışmanı: Doç.Dr.Mehmet YILMAZ

Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr.Taner ALATAŞ

Yrd.Doç.Dr.Tacettin GEÇKİL

EYLÜL - 2017

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması aşamasında yardımlarını esirgemeyen gerek laboratuvar çalışmalarında verdiği destekle gerekse engin bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ve yol gösteren çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a desteği ve anlayışı için gönülden teşekkür ederim.

Kendilerinden ders alarak bilgilerinden istifade ettiğim bölümümüzün değerli hocaları Prof. Dr. Necati KULOĞLU, Doç. Dr. Baha Vural KÖK ve Doç. Dr. Taner ALATAŞ hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve yardımına koşan Arş. Gör. Özge ERDOĞAN YAMAÇ, Arş. Gör. Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU, Arş. Gör. Erkut YALÇIN, Arş. Gör. Mustafa AKPOLAT'a ve laboratuvar teknisyenimiz Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımdaya faydalandığım Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

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

Gül BALIK

Elazığ-2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
SEMBOLLER LİSTESİ	xii
KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	xiii
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	3
2.1. Bitümlü Sıcak karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	3
2.1.1. Agregalarda Minerolojik Sınıflandırma.....	3
2.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması	4
2.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması.....	4
2.1.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı	5
2.1.5. Agregalarda Poroze, Yüzey Alanı ve Boşluk.....	6
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar	7
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	8
2.3.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi	8
2.3.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği.....	9
2.3.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı(Durabilitesi).....	9
2.3.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti	10
2.3.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği(Fleksibilitesi).....	10
2.3.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği(Permeabilitesi).....	10
2.3.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci.....	11
2.3.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği.....	11
2.4. Karayolu Teknik Şartnamesine Göre Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranacak Özellikler.....	12
2.4.1. Mineral Agrega ve Genel Özellikleri.....	12
2.4.2. Kaba Agrega	12

2.4.3.	İnce Agrega	13
2.4.4.	Mineral Filler	14
2.4.5.	Bitümlü Bağlayıcılar ve Genel Özellikleri	14
2.4.6.	Bitümlü Sıcak Karışım Dizaynı	15
2.5.	Bitümlü Sıcak Karışımların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarının Belirlenmesi	16
3.	BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	19
3.1.	Bitümlü Bağlayıcıların Modifiye Edilme Nedenleri.....	20
3.2.	Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	21
3.3.	Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü	21
3.4.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması	24
3.5.	Bitüme Eklenen Katkı Maddeleri	26
3.5.1.	Gilsonit.....	27
3.5.2.	Stiren-Butadien-Stiren (SBS).....	32
4.	ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ	35
4.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	35
4.2.	Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi.....	36
4.3.	İndirek Çekme Rijitlik Deneyi.....	39
4.4.	İndirek Çekme Yorulma Deneyi.....	40
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA	43
5.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Sonuçları.....	49
5.2.	AASHTO T 283 Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi Sonuçları.....	53
5.3.	İndirek Çekme Rijitlik Deneyi Sonuçları	57
5.4.	İndirek Çekme Yorulma Sonuçları	61
6.	SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR.....		76
ÖZGEÇMİŞ		85

ÖZET

Karayolu esnek üstyapıları; bağlayıcı olarak kaplama tabakasında bitümlü malzemelerin kullanıldığı, alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Kaplama tabakaları farklı şekillerde yapılabildiği gibi en yüksek dayanımı bitümlü sıcak karışımlar göstermektedir. Bitümlü sıcak karışım kaplamalar; sabit bir tesiste agrega ve bitümün belirli bir yüksek sıcaklık değerinde karıştırılması ve uygulama bölgesine taşınarak uygun bir sıcaklıkta belirli oranda sıkıştırılması ile elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımın yeterli performansı sergilemesi için uygun malzemelerin kullanılması, uygun şekilde tasarlanması, uygun şekilde yapılması ve uygulanması gerekmektedir. Uygulamada teknik sebepler veya işçi kusurlarından ötürü plentte agregayla bitümün karıştırma sıcaklığı sağlanamayabilmektedir. Bu çalışmada karıştırma sıcaklığında, karıştırma sıcaklığından 10°C, 15°C ve 20°C düşük sıcaklıklarda karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karışım numuneleri saf bağlayıcı yanında, %5 stiren-butadien-stiren (SBS) polimer modifiyeli ve %18 Amerika Gilsoniti (G) modifiyeli bağlayıcılarla da hazırlanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda katkı kullanımı ile karışımların stabilitelerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, rijitliklerinin ve yorulma ömürlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ancak karıştırma sıcaklığı azaldıkça karışımların stabilitelerinin, nem hasarına karşı dayanımlarının, rijitliklerinin ve yorulma ömürlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, karıştırma sıcaklığı, stiren-butadien-stiren, Amerika Gilsoniti, rijitlik.

ABSTRACT

Investigation of Effects of Mixing Temperature on the Resistance to Moisture-Induced Damage and Fatigue Life of Hot Mix Asphalts

Highway flexible pavements consist of subbase, base and pavement layers. Bituminous materials are used in the pavement and base layers as binder. Pavement layers can be constructed in various ways, but hot mix asphalts offer utmost durability. Hot mix asphalt pavements are attained through blending bitumen and aggregate at a certain high temperature in a stable plant, transporting the material to the application area and compacting the mixture at a proper temperature and compaction ratio. For the hot mix asphalt to perform well, it is essential to have proper materials, adequate design, efficient manufacture and application. Owing to technical reasons and labour defects, adequate temperature of bitumen and aggregate mixture may not be attained. In this study, mixture samples have been prepared at mixing temperature and 10°C, 15°C ve 20°C lower than the mixing temperature. Samples have been prepared with 5% styrene-butadiene-styrene (SBS) and 18% American Gilsonite (G) modified binders as well as pure binder. Marshall stability and flow, resistance to moisture-induced damage, indirect tensile stiffness modulus and indirect tensile fatigue tests were applied on the mixture samples. As a result of the tests, it was determined that Marshall stability, indirect tensile strength, resistance to moisture-induced damage, stiffness and fatigue lives of mixtures increased with additive usage. Meanwhile, as mixing temperature decreased, so did these levels.

Key Words: Bituminous hot mixture, mixing temperature, styrene-butadiene-styrene, American Gilsonite, stiffness.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri (a) ve görsel dağılımı (b)	5
Şekil 2.2. Farklı agrega tane şekilleri	6
Şekil 2.3. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi.	18
Şekil 2.4. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi.....	18
Şekil 3.1. Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı.....	22
Şekil 3.2. Bitümün dinamik yükler altındaki visko-elastik davranışı	23
Şekil 3.3. Gilsonitin şematik şekli.....	27
Şekil 3.4. SBS'in granül ve toz hali	33
Şekil 4.1. Marshall stabilite ve akma aleti.....	35
Şekil 4.2. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması.....	37
Şekil 4.3. Çekme dayanımı deney düzeneği.....	38
Şekil 4.4. UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği	39
Şekil 4.5. Deformasyon-yük tekerrür sayısı grafiği	42
Şekil 5.1. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı.....	45
Şekil 5.2. Saf bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği	45
Şekil 5.3. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği	46
Şekil 5.4. %5 SBS modifiyeli bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği	46
Şekil 5.5. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem	47
Şekil 5.6. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu.....	48
Şekil 5.7. Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulan numuneler.....	50
Şekil 5.8. Marshall stabilite deney sonuçları.....	50
Şekil 5.9. Akma deney sonuçları.....	51
Şekil 5.10. Marshall oranı deney sonuçları	52
Şekil 5.11. Nem hasarına karşı dayanım deneyine tabi tutulan numuneler	54
Şekil 5.12. Koşullandırılmamış numunelerin TS değerleri.....	54
Şekil 5.13. Koşullandırılmış numunelerin TS değerleri.....	55
Şekil 5.14. Karışımların çekme dayanımı oran (TSR) değerleri.....	56

Şekil 5.15. ITSM deneyi arayüzü.....	58
Şekil 5.16. 30°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları.....	59
Şekil 5.17. 40°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları.....	59
Şekil 5.18. İndirekt çekme yorulma deney ara yüzü ve deney sonu ekranı	61
Şekil 5.19. İndirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulan numuneler.....	62
Şekil 5.20. Saf bitümle “KS” hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları	62
Şekil 5.21. Saf bitümle “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	63
Şekil 5.22. Saf bitümle “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	63
Şekil 5.23. Saf bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	64
Şekil 5.24. %5 SBS modifiye bitümle “KS” hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	64
Şekil 5.25. %5 SBS modifiye bitümle “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	65
Şekil 5.26. %5 SBS modifiye bitümle “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	65
Şekil 5.27. %5 SBS modifiye bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	66
Şekil 5.28. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS” hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları.....	66
Şekil 5.29. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları	67
Şekil 5.30. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları	67
Şekil 5.31. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları	68
Şekil 5.32. Karışımların maksimum yük tekrar sayıları.....	70
Şekil 5.33. Karışımların maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri.....	71
Şekil 5.34. Karışımların yorulma ömürleri	72

Şekil 5.35. Karışımların yorulma ömürlerindeki deformasyon değerleri 73



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri	13
Tablo 2.2. İnce agreganın özellikleri	14
Tablo 2.3. Bitümlü sıcak karışım dizayn kriterleri.	16
Tablo 3.1. Katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri	25
Tablo 5.1. Superpave bağlayıcı deney sonuçları	44
Tablo 5.2. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları	47
Tablo 5.3. Kırmataş kalkerin özellikleri	48
Tablo 5.4. Çalışmada kullanılan karıştırma sıcaklıkları	49
Tablo 5.5. Karışımların 30°C'deki ITSM değerlerinin 40°C'deki ITSM değerlerine oran	60
Tablo 5.6. İndirekt çekme yorulma deney sonuçları	69

SEMBOLLER LİSTESİ

h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminden sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminden önce numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doygunluk derecesi
I	: Hava boşluğu hacmi
V	: Numune hacmi
Va	: Hava boşluğu yüzdesi
d	: Kalıbın çapı
t	: Ortalama numune yüksekliği
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
TS_{yaş}	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değeri
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değeri
Sm	: İndirekt çekme rijitlik modülü
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

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
G	: Amerika Gilsoniti
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
İÇYD	: İndirekt Çekme Yorulma Deneyi
ITSM	: Indirect Tensile Stiffness Modulus (İndirekt Çekme Rijitlik Modülü)
TS	: Çekme dayanımı
TSR	: Çekme dayanımı oranı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
MQ	: Marshall Quotient (Marshall Oranı)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
UTM	: Universal Material Testing Apparatus (Üniversal Malzeme Deney Aleti)

1. GİRİŞ

Bitüm doğada bulunan petrolün bileşenlerinden biridir. Ham petrol, çeşitli petrol ürünlerine ayrıldıktan sonra geriye bitümlü bağlayıcı kalmaktadır. Benzer süreçlerin doğada oluşması sonucunda doğal bitüm kaynakları oluşmaktadır. Doğal bitüm kaynakları bazen saf bitüm şeklinde bulunurken bazen ise farklı mineral malzemeler, su ve diğer malzemelerle birlikte bulunabilmektedir. Bitümlü malzemeler; güçlü bir yapıştırıcı, adeziv, yalıtkan ve durabil olduklarından inşaat malzemesi olarak mühendislerin dikkatini çekmiştir (Asphalt institute, 1996).

İlk olarak doğal bitümler 1802 yılında kullanılarak Fransa'da yol kaplaması yapılmıştır (Asphalt institute, 1996). İlerleyen dönemlerde karayolu sektöründeki gelişmeyle yol kaplamaları da gelişmiş ve en son trafik yüklerine karşı dayanımı en yüksek, aynı zamanda konforlu seyahat sağlayan bitümlü sıcak karışımlar (BSK) en fazla tercih edilen kaplama türü olmuştur. 2014 verilerine göre dünyada yıllık 1,5 milyar ton BSK üretilmekte olup bunun yaklaşık 300 milyon tonu Avrupa'da üretilmektedir (EAPA, 2014). Türkiye'de ilk asfalt uygulamaları Osmanlı döneminde başlamış, penetrasyon makadam kaplamaların yapımında Fransızlardan destek alınmıştır. Bitümlü sıcak karışım yapımına ise 1956-1957 yıllarında başlanmıştır (Türkiye Asfalt Endüstrisi, 2006). Türkiye, 2013 yılında 46 milyon tonluk BSK üretimi ile Avrupa'da ilk sırada yer almıştır (URL-1, 2017). 2017 verilerine göre ülkemizdeki devlet yolları üstyapılarının %31,15'i (20.801 km) BSK olup, %63,1'i (42.131 km) sathi kaplamalıdır (URL-2, 2017).

Yolların büyük bir kısmında mevcut iklim ve trafik şartları için bitümlü sıcak karışımlarda saf bağlayıcı kullanımı yeterli adezyona ve mekanik özelliklere sahiptir. Fakat yağışlardaki, sıcaklık değişimlerindeki, dingil yüklerindeki, lastik basınçlarındaki artış, kaplamalarda daha ince tabakaların yapılması talebi, finansın etkin kullanımı ve maliyetin azaltılması talebi, trafik akımının etkilenmesini minimize eden ve servis ömrünü uzatan bakım aralıklarının artması nedeniyle bitümlü sıcak karışımlarda katkı kullanımı ön plana çıkmaktadır (Whiteoak ve Read, 2003).

Modifiye bitümler, saf bağlayıcıya ilave edildiğinde saf bağlayıcının kimyasal yapısını, fiziksel ve/veya mekanik özelliklerini değiştiren kimyasal katkılar içeren özel bağlayıcılardır. Bitümlü bağlayıcılar, bitümlü sıcak karışımların visko-elastik özelliklerinden sorumlu olduklarından kalıcı deformasyon ve çatlak oluşumu başta olmak

üzere yol performansının birçok parametresi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uzun yıllardır araştırmacılar ve kimyagerler modifiye bitümler üzerine çalışmaktadır. Bu çalışmalar asbest, özel fillerler, mineral fiberler, plastomerler, elastomerler ve kauçukların bitüm modifikasyonunda endüstriyel kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır (Jiqing vd., 2014). En yaygın kullanılan katkı maddesi polimerlerdir. Polimerler, bünyesinde aynı grup atomların birçok kez tekrarlandığı makro moleküllerdir (Whiteoak ve Read, 2003). Bu tekrarlanan gruplar, bir veya birçok farklı moleküllerle (monomer) oluşabilmektedir. Bitümlü bağlayıcılara ilave edilen diğer bir grup katkı maddesi ise Gilsonit'lerdir (Ludfi vd., 2015). Bitüm kaynakları; petrol bitümleri ve doğal bitümler (Gilsonit) olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğal bitüm (Gilsonit), kayaların arasına giren petrolün uzun zaman sonucunda bünyesinde bulunan hafif ve buharlaşabilen maddeleri kaybetmesi sonucu oluşan petrol kalıntısıdır (Ergül, 2015). Karayolu üstyapılarında kullanılan rafineri bitümleri ile aynı kökene sahip olması nedeniyle yüksek uyum gösterdiğinden Gilsonit katkı maddesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların beklenen performansı sergilemeleri, uygun malzemelerin kullanılması, uygun şekilde tasarlanmalarının yanında uygun şartlarda ve uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Bitümlü sıcak karışımların performansını etkileyen parametrelerin biri de karıştırma sıcaklığıdır. Her ne kadar tasarım aşamasında agregayla bitümün karıştırma sıcaklığı belirlense de bazen personel bazen de ekipmandan kaynaklanan sebeplerle gerekli sıcaklığa ulaşılmayabilmektedir. Kontrol ve tecrübe nedeniyle Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğunda yapılan yollarda bu tür problemlere az rastlanırken, kontrolün zayıf olduğu il özel idareleri ve belediyelerde bu sorun daha fazla görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında son yıllarda sıklıkla kullanılan modifiye bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların performansına karıştırma sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla %5 stiren-butadien-stiren (SBS) ve %18 Amerika Gilsoniti (G) kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf bitüm ve bu modifiye bitümler için karıştırma sıcaklığı belirlenmiştir. Belirlenen karıştırma sıcaklığında, bu sıcaklıktan 10°C, 15°C ve 20°C daha düşük sıcaklıkta bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan BSK numuneleri üzerinde nem hasarına karşı dayanım, Marshall stabilite ve akma, indirekt çekme rijitlik modülü ve indirekt çekme yorulma deneyleri yapılmıştır. Böylece karıştırma sıcaklığının bitümlü sıcak karışımların performansına etkisi değerlendirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agreg, ince agreg ve mineral fillerin belirli sıcaklıkta homojen olarak karıştırılması ile elde edilen yol kaplama malzemesidir. Agreg–asfalt karışımlarının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlaması gerekir (Önal ve Kahramangil, 1993).

Esnek üstyapının performansını doğrudan etkilemesi sebebiyle yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından bağlayıcı ve agregaların özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

2.1. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregalar

Agreg; doğal, yapay veya her iki cins mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış ve/veya kırılmamış tanelerinin bir yığındır (TS 706, 2017). Asfalt karışımların performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, yol yapımında kullanılan ana malzemedir. Karışımın ağırlıkça %90 ile %95'ini, hacimce %75 ile %85'ini oluşturan mineral agregalar, yola etkileyen yüklerin oluşturduğu gerilmeleri karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynarlar (Kandhall ve Mallick, 1997; Roberts vd., 2002; Tunç, 2001). Bu bakımdan agregaların özellikleri üstyapı için çok önemli olup, kullanılacak agregaların özelliklerinin bilinmesi, yolların projelendirilmesi aşamasında gereklidir.

2.1.1. Agregalarda mineralojik sınıflandırma

Agregalar genel olarak; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Dere malzemesi, sahip olduğu olumsuz özelliklerinden dolayı alttemel hariç yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yapay taşlar, çoğunlukla yüksek fırın cürufurlarından elde edildiklerinden çok gevrek ve poroz olmaları ayrıca yeterince üretilmedikleri ve üretilen miktarların da çimento sanayinde kullanılmaları sebebiyle yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agreg, Püskürük, Tortul ve

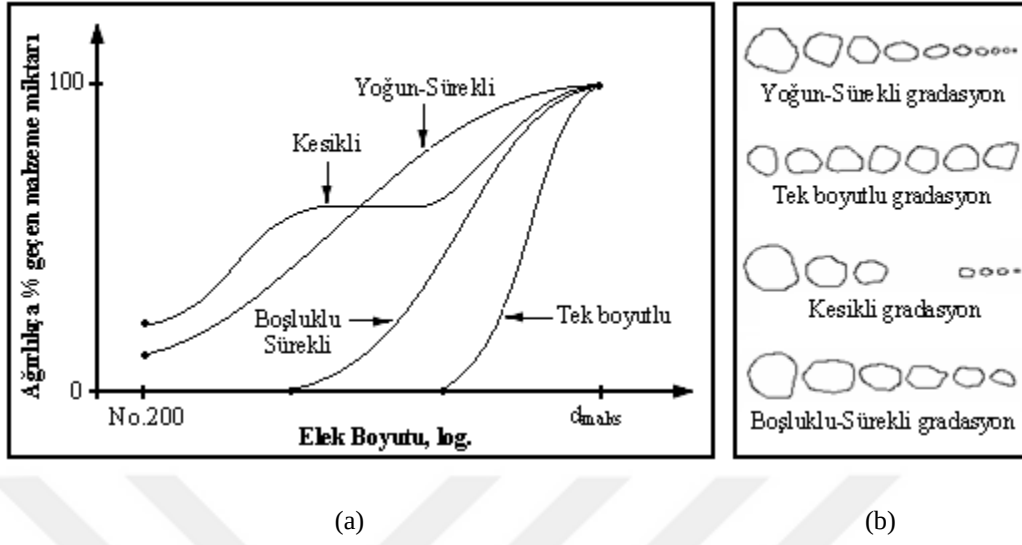
Metaformik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır (Lavin, 2003; Tunç, 2001; Geçkil, 2008).

2.1.2. Agregalarda boyut sınıflandırması

Agregalar kaba, ince ve filler olarak sınıflandırılmaktadır. Kaba agregası kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşmakta olup ve agregası karışımının 4,75 mm.'lik (No.4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemeden oluşmalıdır (KTŞ, 2013). İnce agregası; 4,75 mm.'lik (No.4) elekten geçip 0,075 mm.'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanır. 0,075 mm.'lik (No.200) elekten geçen malzeme ise filler olarak isimlendirilir. Bir karışımındaki ince agregası ve filler, kaba agregasının oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar (İlcalı vd., 2001; Umar ve Ağar, 1991).

2.1.3. Agregalarda gradasyon sınıflandırması

Gradasyon, agregası karışımını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, segregasyon artar, boşluk miktarı azalır, agregası danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar ve bağlayıcı ihtiyacı azalır. Agregalar gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılır. Bu gradasyon tipleri Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir (Tunç, 2001).



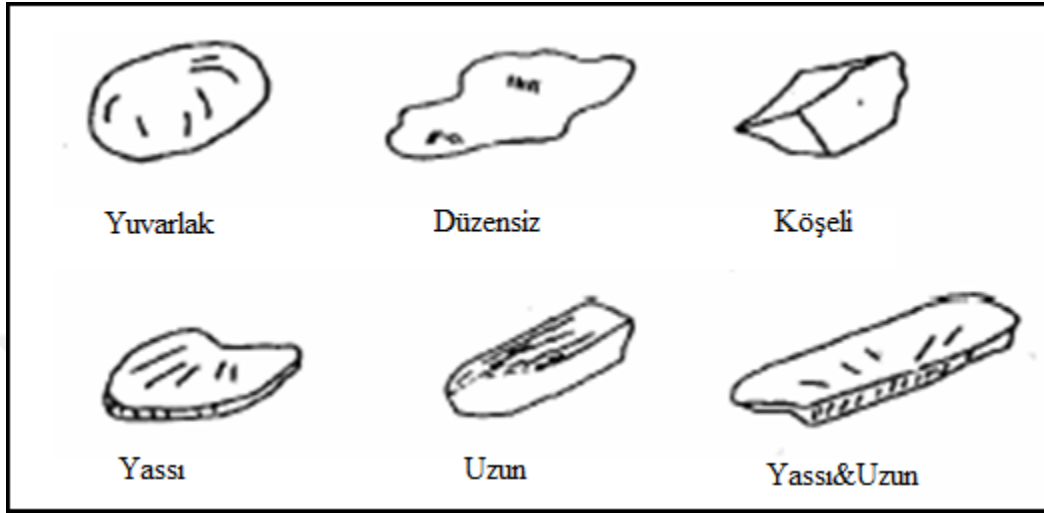
Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri (a) ve görsel dağılımı (b) (Tunç, 2001)

Kesikli gradasyona sahip agregalar, ara boyut agregaya hiç ya da çok az içerdiklerinden boşluk miktarlarının fazlalığından dolayı yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, filler ya da ince boyutta dane içermeyen ya da çok az içerdiklerinden dolayı boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Tek boyutlu gradasyonda da daneciklerin çoğu yaklaşık aynı boyutta olduklarından düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük, dolayısıyla yoğunluğu artmaktadır. Bu sebeple, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir (Tunç, 2001).

2.1.4. Agregalarda biçim ve yüzey yapısı

Agrega danelerinin biçimleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemetine etki ederler. Agregalar biçim bakımından; yuvarlak, köşeli, düzensiz, yassı, ince-uzun ve yassı-ince-uzun olarak sınıflandırılır. Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken içsel kilitleme özelliği

bakımından deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür (Tunç, 2001).



Şekil 2.2. Farklı agregatane şekilleri (Tunç, 2001)

Agregaların yüzey yapısı; agregatanelerinin pürüzlülük veya cilalılık durumunu ifade eder ve bağlayıcı ile iyi bağ kurabilmeleri için çok önemlidir. Agregatanelerinin yüzey pürüzlülüğü arttıkça karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve bitüm ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikler de artmaktadır (Tunç, 2001; Balta, 2004).

2.1.5. Agregalarda porozite, yüzey alanı ve boşluk

Agregatanelerinin asfaltın emilmesine olanak sağlayacak oranda poroziteye veya su emme yeteneğine sahip boşluklarının belli bir düzeyde olması istenir. Agregadaki gözeneklerin boyutu, sayısı ve süreklilikleri, agregaların dayanımını, aşınmaya karşı direncini, yüzey dokusunu, özgül ağırlığını, bağlayıcı ile adezyonunu ve donma ve çözölmeye karşı direncini etkilemektedir (Balta, 2004). Yeterli poroziteye sahip agregalar, bağlayıcı ile güçlü bir adezyon sağlayarak stabilitenin artmasına olanak sağlar. Ancak porozitenin fazla olması halinde adezyonu arttırmadığı gibi karışım için bitümlü bağlayıcı ihtiyacını arttırmaktadır.

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agregada daneleri arasındaki boşlukların toplamı karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi gradasyon, dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artacağından gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca boşluk miktarının artması ile karışımın yoğunluğu azalacaktır. Ancak, maksimum dane çapının artması ile işlenebilirlik problemi artsa da karışımın yoğunluğunda artış olacak, fakat buna karşın gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Bu sebeple kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir (Tunç, 2001).

2.2. Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bağlayıcılar

Bitümlü sıcak karışımlar, agregada ve genellikle bağlayıcı olarak asfalt çimentosu (AC) kullanılarak elde edilir. Karışımın ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturan bitümlü bağlayıcı, agregada danelerini birbirine yapıştırarak trafik yükleri altında bozulmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır (Geçkil, 2001).

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle oluşan) hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin birleşimi olup çoğunlukla bunların gaz, sıvı, yarı katı veya katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen eriyen madde olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcılar esas olarak iki kısma ayrılırlar: Asfaltlar ve katranlar. Katran, başlıca kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Katran, yapısındaki bitüm oranının düşük olması, sıcaklığa karşı duyarlılığının yüksek olması ve sağlık açısından tehlike yaratması nedenlerinden dolayı esnek kaplama yolların inşaatında doğrudan kullanılmaz. Asfaltlar da doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar diye iki gruba ayrılabilir. Doğal asfaltlar, mineral maddelerle karışmış halde bulunan kaya ve göl asfaltlarıdır. Yapay asfaltlar ise, ham petrolün arıtılmasından elde edilir. Asfalt malzemesi dayanıklılığı, agregaya güçlü yapışma özelliği ve kaplamada

oluşturduğu yüksek geçirimsizliği nedeniyle karayolu mühendisliğinde bağlayıcı madde olarak değer kazanmıştır.

Yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile katı veya yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu (AC) olarak isimlendirilen petrol asfaltlarıdır. Tabiatta doğal halde bulunan kaya ve göl asfaltları birtakım ayrıştırma işlemlerinden geçtikten sonra yol kaplamalarında kullanılabilirler ve genellikle bitümlü karışımlara modifiye amaçlı katılmaktadırlar (Kurtis, 2003).

2.3. Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler

Bitümlü sıcak karışımların, hizmet süresince istenen performansı sağlayabilmesi amacıyla uygun bir şekilde dizayn edilebilmesi için karışımların stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik (fleksibilite), kayma direnci, geçirgenlik (permeabilite) ve işlenebilirlik özelliklerine dikkat edilmelidir (Tunç, 2001; Tunç, 2004; Uluçaylı ve Yavuz, 2002). Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışımları elde etmek günümüz şartlarında mümkün olmayabilir ancak en uygun şartları sağlayan karışımların yapılabilmesi için bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir.

2.3.1. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesi

Stabilite, kaplamaların trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilmektedir. Stabilite yetersizliği olan kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Düşük stabiliteli kaplamalarda deformasyon fazla olmaktadır. Düşük stabilitenin istenmediği kadar yüksek stabilite de istenmez, çünkü, stabilitesi yüksek karışımların deformasyonu az olur ve rijit bir davranış sergilerler. Kaplamadan beklenen performans trafik yükleri altından esnek bir davranış sergilemesidir. Rijit davranan kaplamalarda karışım gevrek olacağından kırılma ve çatlak oluşumu görülür. Bu yüzden stabilitenin belirli bir optimum değerde olması istenmektedir. Karışımın stabilitesi agregalar arasındaki içsel sürtünmeye ve bağlayıcının kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arasındaki içsel sürtünme agregaların şekilleri ve yüzey dokuları ile ilgilidir. Kohezyon ise yükleme hızı (trafik hızı) ve asfalt bağlayıcının viskozitesi arttıkça

artar, kaplamanın sıcaklığı arttıkça azalır. (Asphalt Institute, 1996). Stabilite, laboratuarda Marshall stabilite deneyiyle tespit edilebilmektedir.

2.3.2. Bitümlü sıcak karışımların rijitliği

Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkidir. Yani rijitlik genel olarak yükleme süresi azaldıkça veya yükleme hızı arttıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça, bitümün viskozitesi arttıkça artacaktır (Tunç, 2004). Bitümlü sıcak karışımların rijitliğinin tespiti için laboratuvarında sünme deneyi ve indirekt çekme rijitlik modülü deneyi yapılmaktadır.

2.3.3. Bitümlü sıcak karışımların dayanıklılığı (Durabilitesi)

Bir asfalt kaplama karışımının, hava, su, sıcaklık ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koyma yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bitümlü sıcak karışımlardan; bağlayıcının özellik değiştirmesine (oksidasyon, v.s.), agreganın kırılmasına ve bitümün agregaya yüzeyinden soyulmasına karşı dayanıklı olması istenmektedir. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek bitüm içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agregaya gradasyonu, soyulma düzeyi yüksek agregaya kullanarak ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir. Karışımındaki bitüm miktarının artırılması ile agregaya danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın bitüm filmler yaşlanmaya (sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltarak karışıma hava ve su girişini zorlaştıracaktır. Ancak, daha kalın bitüm filmi tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kusma problemlerine neden olur. Karışımında yetersiz oranda bitüm kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, sıcak karıştırma işleminde bitümün aşırı derecede ısıtılması durumunda, yaşlanmanın etkisiyle ileriki aşamalarda bitümün kırılma olmasının sonucu olarak ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımında kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş olma şartı yanında, aşınmaya, soyulmaya

ve ufalanmaya karşı da dirençli olması istenir (Umar ve Ağar, 1991; Kurtis, 2003; Tunç, 2004; Uluçaylı ve Yavuz, 2002).

2.3.4. Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti

Yorulma, malzemenin çekme mukavemetinden daha düşük değere sahip tekrarlı gerilme altında meydana gelen kırılmadır. Yorulma mukavemeti ise, bitümlü sıcak kaplamanın tekerlek yüklerinin geçmesinden doğan tekrarlı gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına müsaade ederek veya esneyerek, kaplamada çatlamlar oluşmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma mukavemeti; gradasyon ve yoğunluk arttıkça, bitüm penetrasyonu arttıkça, bitüm yüzdesi arttıkça, rijitlik arttıkça, eğilme gerilmesi azaldıkça, yeterli sıkışma yapıldıkça artış göstermektedir (Geçkil, 2004).

2.3.5. Bitümlü sıcak karışımların esnekliği (Fleksibilitesi)

Esneklik, bitümlü sıcak karışım kaplamaların trafik ve çevre etkileriyle, çatlamadan hafifçe eğilebilme ve temel, alttemel tabakalarının geçici oturma ve hareketlere uyabilme yeteneğini ifade etmektedir.

Genel olarak bir asfalt kaplama karışımının esnekliği, yüksek bitüm içeriği ve nispeten açık gradasyonlu veya boşluklu agregalar ile geliştirilebilmektedir. İdeal esnek bir asfalt karışımı dizayn edebilmek için yaz aylarında kıvamını koruyabilecek, kış aylarında ise kırılğan olmayacak ve yorulmaya karşı dirençli bir bağlayıcıya gerek vardır. Ancak, kaplamanın esnekliğindeki artışın, stabilitesinin azalacağı anlamına geleceği de göz önünde tutulmalıdır (Tunç, 2004; Uluçaylı ve Yavuz, 2002).

2.3.6. Bitümlü sıcak karışımların geçirgenliği (Permeabilitesi)

Geçirgenlik, bitümlü sıcak karışım kaplamasının içine hava ve su girişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması ile bünyesine giren hava ve su etkisiyle asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın geçirimsizliği, karışımın bitüm miktarı, yoğunluğu ve sıkıştırması arttıkça boşlukları azalacağından

artacaktır. Ancak, kaplamadaki stabilite gerekliliği, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla bir miktar boşluk bırakmak gereklidir. Bunun yanında, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak bitümün yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır (Tunç, 2004; Uluçaylı ve Yavuz, 2002).

2.3.7. Bitümlü sıcak karışımların kayma direnci

Kayma direnci, bir asfalt kaplama üzerinden geçen araçların lastikleri ile asfalt kaplama arasındaki sürtünme direnimine denir. Oluşan sürtünme kuvveti araçların emniyetli olarak durmasını ve kurlarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmasını önlemelidir.

Kayma direnci genel olarak; düşük bitüm miktarı, sert ve pürüzlü agrega ve boşluklu gradasyon ile artmaktadır. Bitüm yüzdesi fazla ve yoğun gradasyonlu karışımlarda kayma direnci daha düşüktür.

2.3.8. Bitümlü sıcak karışımların işlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışımın hazırlanması ve serilmesi ve sıkıştırılması sırasındaki kolaylık olarak ifade edilebilir. İşlenebilirlik genel olarak;

- Kaba agrega miktarı ve agrega maksimum dane boyutu arttıkça,
- Kırmataş agrega kullanıldıkça ve agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- Karışımın ısısı düşkçe,
- Bitüm katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça,
- Mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır (Tunç, 2004).

İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırma zorlukları doğuracaklarından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir.

2.4. Karayolları Teknik Şartnamesine göre bitümlü sıcak karışımlarda aranan özellikler

Kırılmış ve elenmiş kaba agregâ, ince agregâ ve mineral fillerin belli gradasyon limitlerine uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak sıcak bir şekilde asfalt betonu kaplama yapılır.

Asfalt betonu karışımına giren kaba agregâ, ince agregâ ve mineral filler ile bitümlü malzemede aranan özellikler KGM Teknik Şartnamesinde belirtilen esaslara uygun olmalıdır.

2.4.1. Mineral agregâ ve genel özellikleri

Agregâ kırmataş, kırılmış çakıl veya bunların karışımından ibaret olmalıdır. Karışım içindeki kırmataş veya kırma çakıl temiz, sert, sağlam ve dayanıklı danelerden ibaret olmalı, bütün malzemede kil toprakları, bitkisel maddeler ve diğer zararlı maddele bulunmamalıdır. Agregâda karıştırma sırasında ve sonradan hava etkisiyle kırılmaya yatkın maddeler bulunmamalıdır.

Mineral agregâ; kaba agregâ, ince agregâ ve mineral fillerini içeren en az 3 dane grubunun düzgün bir derecelenme verecek şekilde belli oranlarda karıştırılmasıyla oluşmaktadır.

2.4.2. Kaba agregâ

Kaba agregâ; kırmataş, kırma çakıl ve bunların karışımından oluşmaktadır. Agregâ karışımının 4,75 mm'lik (No.4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı danelerden oluşmalıdır. Kaba agregâ yassılık indeksi, şartnamede verilen limitten fazla olamamalı taneler kübik ve keskin köşeli olmalıdır.

Kaba agregâda aranan fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.1'de verilmiştir (KTŞ, 2013).

Tablo 2.1. Kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney	Şartname Limitleri ^c		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 30 (LA_{30})	≤ 27 (LA_{27})	TSEN 1097-2 ^a (AASHTO T 96)
Aşınma Direnci (Micro-Deval) ^b , % Kayıp	≤ 25 ($M_{DE} 25$)	≤ 20 ($M_{DE} 20$)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, (MgSO ₄ ile kayıp), %	18 (MS_{18})	16 (MS_{16})	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)	$\geq 95 - \leq 0$ ($C_{95/0}$)	$\geq 95 - \leq 0$ ($C_{95/0}$)	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	≤ 25	BS 812
	≤ 25 (FI_{25})	≤ 20 (FI_{20})	TS EN 933-3 ^a
Cilalanma Değeri, %	≥ 35 (PSV ₃₅)	≥ 50 (PSV ₅₀)	TS EN 1097-8
Su Emme, %	$\leq 2,5$ (WA _{24,2,5})	$\leq 2,0$ (WA _{24,2,0})	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle Kaplı Yüzey (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	≥ 60	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A)
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	ASTM C 142 AASHTO T 112
^a Referans metot. ^b Gerek görüldüğünde yapılacaktır. ^c Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043 'deki sınıfını gösterir.			

2.4.3. İnce agreg

4,75 mm'lik (No.4) elekten geçip 0,075 mm'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanan ince agreg, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşabilmektedir.

İnce agreg; temiz sağlam ve dayanıklı ayrıca plastisite indeksi sonucu non-plastik olmalıdır.

Karışımında kullanılacak doğal kum, ince agreg özelliklerine sahip olmalı ve miktarı karışımından istenen stabilite, akma ve boşluk değerlerinin sağlanmasını sağlayacak oranları aşmamalıdır.

İnce agreg Tablo 2.2' de verilen şartları sağlamalı, ince agreganın üretildiği malzemenin Los Angeles parçalanma direnci ve hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerleri Tablo 2.1'e uygun olmalıdır (KTŞ, 2013).

Tablo 2.2. İnce agreganın özellikleri (KTS, 2013)

Deney		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		Binder	Aşınma	
Plastisite İndeksi %		NP	NP	TS 1900-1
Organik Madde, (% 3 NaOH ile)		Negatif	Negatif	TS EN 1744-1 Madde 15.1
Su Emme, %		≤ 2,5 (WA ₂₄ 2,5)	≤ 2,0 (WA ₂₄ 2,0)	TS EN 1097-6
Metilen Mavisi, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 1,5 (MB _{1,5}) ≤ 3,0 (MB _{3,0})*	≤ 1,5 (MB _{1,5}) ≤ 3,0 (MB _{3,0})*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 3,0 (MB _{3,0})*	≤ 3,0 (MB _{3,0})*	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.				

2.4.4. Mineral Fiiller

Tamamı 0,425 mm (No.40) elekten geçip, ağırlıkça %70'i 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzeme fiiller olarak tanımlanmaktadır. Kaba ve ince agreganın karışım gradasyonu 0,425 mm (No.40) elekten geçen malzeme miktarı yönünden yetersiz ise agrega karışımına mineral fiiller ilave edilebilir. Taş tozu, mermer tozu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerden oluşmalı; kil, toprak, organik ve zararlı madde içermemelidir. Kolayca akabilecek kadar kuru olmalı ve içerisinde özellikle topaklar bulunmamalıdır.

2.4.5. Bitümlü bağlayıcılar ve genel özellikleri

Asfalt betonu aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregaya ilave edilmek suretiyle hazırlanacak karışımda bitümlü bağlayıcı olarak KGM tarafından hazırlanan “Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamalar İçin Bitüm Sınıfı Seçim Haritası” kitapçığına göre uygun bitümlü bağlayıcı sınıfı kullanılmalıdır. TS EN 12591, “Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Kaplama Sınıfı Bitümler Özellikler” standardına uygun 40/60, 50/70 ve 70/100 penetrasyonlu bitüm; “Bitümlü Bağlayıcılar” limitlerine uygun polimer modifiye bitüm kullanılmalıdır.

Karışımda soyulmaya karşı mukavemeti düşük olan agregalar kullanılması halinde soyulma mukavemetini artırıcı katkı maddeleri kullanılmalı; katkı ilavesi servis tankında yapılmalıdır. Servis tankının ihtiva ettiği bitümlü bağlayıcının en az 3/4' ü, sirkülasyona veya karıştırma işlemine tabi tutulmadan kesinlikle kullanılmalıdır. Karıştırma işlemi karışım homojen oluncaya kadar devam etmelidir.

2.4.6. Bitümlü sıcak karışım dizaynı

KGM'ye göre bitümlü sıcak karışım dizaynı Marshall metodu kullanılarak yapılmaktadır. Asfalt betonunun karışım dizaynında; Tablo 2.3'de verilen dizayn kriterleri esas alınmaktadır (KTŞ, 2013).

Tablo 2.3. Bitümlü sıcak karışım dizayn kriterleri (KTŞ, 2013)

Özellikler	Binder		Aşınma TİP-1, TİP-2		Aşınma TİP-3		Deney Standartı
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilesi, kg	750	-	900	-	400	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12	TS EN 12697-8
Asfaltla Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	-	-	TS EN 12697-8
Akma, mm (10 ⁻² in)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5			
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0	TS EN 12697-1
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %	80		80		80		AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %	-		8		-		TS EN 12697-22
Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C'de 5 cm kalınlığında numune), maks. %					7		TS EN 12697-22
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilecektir.							

2.5. Bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi

Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen performansı sergilemeleri için uygun malzemelerin kullanılması, uygun şekilde tasarlanmalarının yanında yapımının da uygun şartlarda ve uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Bitümlü sıcak karışımların performansını etkileyen parametrelerin biri de karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarıdır. Bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sırasında doğru sıcaklığa sahip olmaları yapım kolaylığı ve kaplamaların ömrü açısından büyük öneme sahiptir. Bağlayıcı

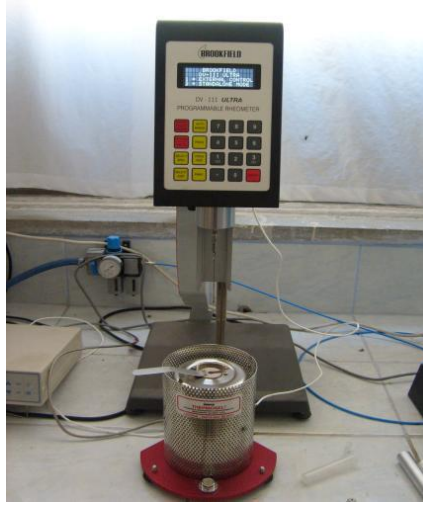
sıcaklıklarının düşük olması boşluk oranlarının fazla olmasına, yüksek olması ise bağlayıcının aşırı yaşlanmasına ve sıkışmanın fazla olmasına neden olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek amacıyla viskozite değerleri kullanılmaktadır. Viskozite değerlerinin tespitinde dönel viskozimetre deney sonuçlarından faydalanılır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

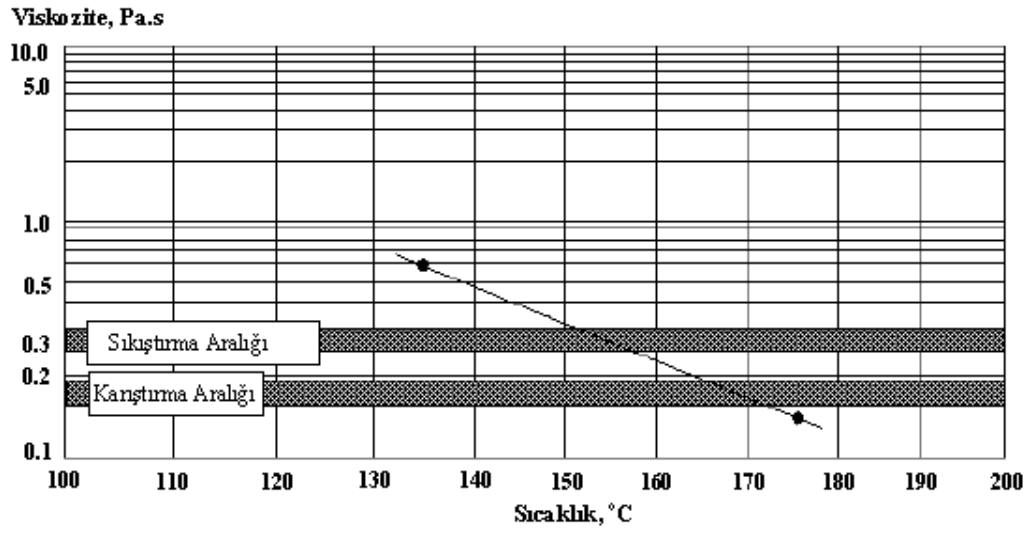
Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlıklarını belirlemek amacıyla dönel viskozimetre (RV) deneyi yapılmaktadır. Bu amaçla “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, karıştırma ve pompalama esnasında bağlayıcıların yeterince akışkanlıklarının tespiti amacıyla yapılan dönel viskozite deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Deneyde, bağlayıcı içerisinde silindirik mil 20 rpm hızla dönerken viskozite değerleri elde edilmektedir (Şekil 2.3). Orijinal bağlayıcıların 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerlerinin 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994).

Yaklaşık 30 gr. numune bağlayıcıdan alınarak 150°C’den daha düşük olan etüvde ısıtılarak akışkan hale getirilmektedir. Bu malzemedan ısıtılmış numune kabının içine yaklaşık 11 gr. doldurulur, numune kabı sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilmektedir. Sabit sıcaklıkta 15 dakika bekletildikten sonra deney yapılmaktadır. Yaklaşık viskozite değerlerine ulaşıldıktan sonra üç adet okuma yapıp ortalaması alınarak, bağlayıcının viskozitesi elde edilmektedir.

Viskozite değerleri kullanılarak bitümlü sıcak karışımların (BSK) karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilir. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıklarda uygulanan RV deneyi sonucunda sıcaklık–viskozite grafiğinde çizilir. Grafikte viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmektedir. Bu grafik örnek Şekil 2.4’te görülmektedir. BSK’ların karıştırılması için bitümlü bağlayıcının $0,170 \pm 0,002$ Pa.s, sıkıştırılması için ise $0,280 \pm 0,003$ Pa.s viskozite değerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; McGennis vd., 1994).



Şekil 2.3. Brookfield Viskozimetresi ve sıcaklık sistemi.



Şekil 2.4. Asfalt bağlayıcı için tipik viskozite eğrisi

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

İlk inşa edildiklerinde yüksek bir performansla hizmet veren bitümlü sıcak karışımlarda trafik, iklim ve çevre şartları altında zamanla kalıcı deformasyonlar, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve su etkisiyle soyulma gibi birçok bozulma meydana gelmektedir. Kaplama stabilitesini, ömrünü ve performansını, bakım-onarım maliyeti ve gereksinimini olumsuz yönde etkileyen bu bozulmalara karşı bitümlü bağlayıcıya veya karışıma çeşitli katkı maddeleri eklenerek bitümün veya karışımın modifiye edilmesi sağlanmaktadır (İlcalı vd., 2001; Eribol vd., 2002).

Ham petrol fiyatlarındaki artışlar, yüksek maliyetlerin daha ince kaplamaların tercih edilmesini doğurması, dolayısıyla kaplamaların hizmet ömürlerinin düşmesi, trafik yüklerinde meydana gelen önemli artışlar, klasik bağlayıcıların istenen düzeyde performans sağlayamaması, endüstriyel atıkların kullanılma düşüncesi, deformasyonların oluşması ve bakım onarım maliyetlerinin yüksek oluşu gibi problemlere karşı dayanımların artırılmasının gerekliliği bu sorunlardan dolayı bitümlü bağlayıcıların performanslarının iyileştirilmesi için bitüm modifiye edilerek performansları artırılmaya çalışılmaktadır.

Bağlayıcı malzemenin ve dolayısıyla karışımın performansını arttırmak amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir. Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak katkılı bitümün katkısız bitüme göre özelliklerindeki değişimlerin tespit edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesine ve değerlendirilmesine imkan sağlanabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi, özelliklerinin tespiti, taşınması ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi için ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi sorunlarla beraber karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır (İlcalı, 2001).

3.1. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilme nedenleri

Yol üst yapılarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe sahip olarak tekerlek izi gibi deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Kaplamanın trafik yükleri altında yorulma nedeniyle meydana gelen çatlamlar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen seviyede kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin sağlanması da yine bitümün modifiye edilmesinde amaçlanan hedefler arasındadır.

Genel olarak bitümün modifiye edilme sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ertekin, 2003);

1. Düşük sıcaklıklar için daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak,
2. Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
3. Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
4. Karışımların stabilitesini ve mukavemetini arttırmak,
5. Karışımların yorulma direncini arttırmak,
6. Yaşlanmış bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,
7. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,
8. Düşük kaliteli bağlayıcıların verimini arttırmak,
9. Agregaların üzerinde daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özelliğini artırarak, soyulmayı azaltmak,
10. Akmayı ya da kusmayı azaltmak,
11. Yakıt dökülmelerine karşı direnci sağlamak,
12. Kaplama tabakalarının kalınlıklarını azaltmak ve daha ince aşınma tabakalarının kullanımını sağlamak,
13. Çatlakları geciktirmek,
14. Uygulama alanlarını artırmak,
15. Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek,
16. Kaplamaların performansını yükseltmek,
17. Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak

Bağlayıcıya veya karışıma çeşitli katkı maddeleri ilave edilmesiyle bu özellikler tam olmasa da kısmen sağlanabilmektedir.

3.2. Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılacak olan katkı maddelerinin uygulamada etkili, pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulları sağlaması istenilmektedir (İlıcılı vd., 2001);

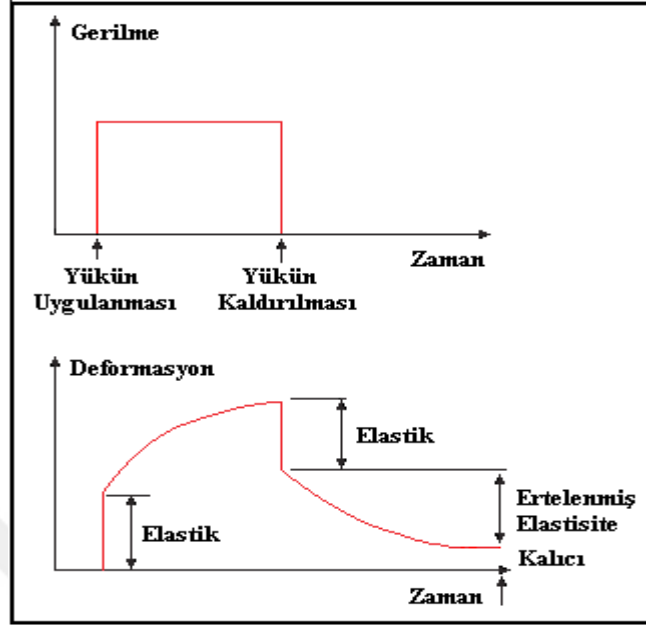
1. Kolay elde edilebilmelidir,
2. Bitümle uyuşmalıdır,
3. Bitüm karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,
4. Bitüm ile homojen olarak karışabilmelidir,
5. Bitümün yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale gelmeden akışkanlığa karşı direncinin artmasını sağlamalıdır,
6. Düşük sıcaklıklarda ise kaplamanın çok kırılğan veya sert olmasını önlemelidir,
7. Uygun maliyetle olmalıdır.

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin bitüm ile karıştırılmasından sonra, elde edilen modifiye bitümden beklenen özellikler ise şunlardır (İlıcılı vd., 2001);

1. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini kaybetmemelidir,
2. İşlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
3. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdır,
4. Uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.

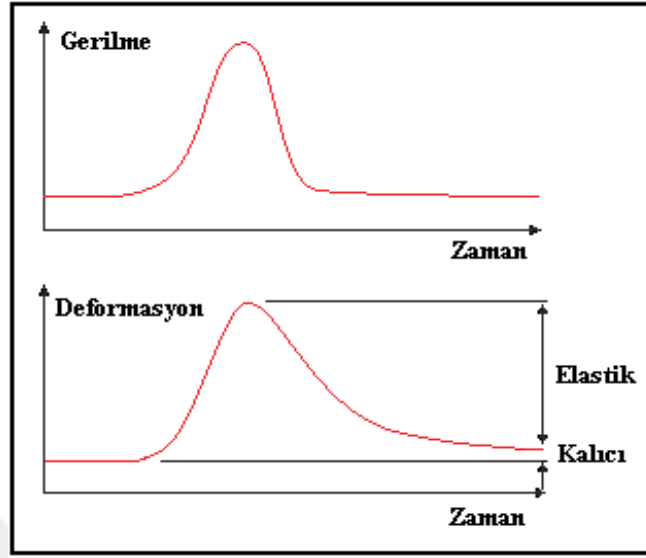
3.3. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü

Bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik gösterdiğinden dolayı, başta kalıcı deformasyon ve çatlamaya karşı gösterdiği direnç olmak üzere kaplama performansının birçok parametresinde büyük rol oynayarak asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Genel olarak, bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Lav ve Lav, 2004; Abbas, 2004). Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı (Lav ve Lav, 2004; Abbas, 2004)

Şekil 3.1’de yük uygulanmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve ardından yük kaldırılana kadar kademeli bir artış göstermektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin visko-elastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla birlikte elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma veya geri dönüşüm meydana gelmektedir. Bu durum “gecikmiş elastisite” olarak adlandırılmakta ve sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan malzemenin viskoz davranışının sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 3.2. Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı (Whiteoak ve Read, 2003)

Şekil 3.2’de; bitümlü bağlayıcıların hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon-zaman grafiğinde, yükün etkimesinden önceki ve sonraki değerlere bakıldığında büyük oranda elastik şekil değiştirme ile birlikte küçük miktarda kalıcı şekil değiştirme görülmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için gösterilen şekil değiştirme, aslında çok küçük olmasına rağmen, buna benzer milyonlarca dingil yükü uygulanması sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin toplamı büyük bir miktara ulaşarak kaplama yüzeyinde kalıcı deformasyon oluşturmaktadır. Yukarıdaki her iki durumda da deformasyonlar; yüksek sıcaklık, ağır veya hareketsiz trafik etkisiyle artış göstermektedir (Whiteoak ve Read, 2003).

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

yüksek olmasına neden olmaktadır. Bitüm modifikasyonu ile daha ince bir tabaka oluşturarak kaplamanın yapısal mukavemetini arttırmak mümkündür. Ayrıca bitümün elastik bileşeninin arttırılması, yüksek çekme deformasyonlarının bulunduğu durumlarda büyük önem taşıyan asfalt esnekliğini de geliştirecektir (Whiteoak ve Read, 2003).

3.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 3.1’te gösterilmiştir (Bahia vd., 2001).

Tablo 3.1. Katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri (Bahia vd., 2001)

Katkı türü	Sınıfı	Bozulma türlerine karşı faydaları				
		Kalıcı deformasyon	Yorulma çatlağı	Düşük ısı çatlağı	Nem hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Karbon siyahı	X				X
	Mineral: <i>Hidrate kireç</i>	X				X
	<i>Uçucu kül</i>	X				
	<i>Portlant çimentosu</i>	X				
Genleştiriciler	Sülfür	X	X	X		
	Ağaç lignini				X	
Polimerler-Elastomerler	Stiren butadien di-blok SB	X		X	X	
	Stiren butadien tri-blok/radyalblok(SBS)	X	X	X		
	Stiren butadien kauçuk lateks SBR	X		X		
	Polikloropiren lateks	X	X			
	Doğal kauçuk	X				
Polimerler-Plastomerler	Etilen vinil asetat (EVA)	X	X			
	Etilen akrilat (EA)	X				
	Poliisobütilen	X				
	Polietilen (düşük ve yüksek yoğunluklu)	X		X		
	Polipropilen	X				
Öğütülmüş lastik	Farklı boyutlar, işlemler ve aşamalar	X	X	X		
Oksidanlar	Manganez bileşenleri	X				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			X		
	Parafinikler/balmumu			X		
	Doğal Asfaltlar: <i>Trinidad</i>	X	X	X	X	
	<i>Gilsonit</i>	X			X	
Soyulma önleyiciler	Aminler: <i>Amidoaminler</i>				X	
	<i>Poliaminler</i>				X	
	Poliamidler				X	
	Hidrate kireç				X	
	Organo metalikler				X	
Fiberler	Polipropilen	X	X	X		
	Polyester	X		X		
	Fiberglas					
	Çelik	X	X	X		
	Güçlendirme	X	X	X		
	Doğal: <i>Selüloz</i>	X				
	<i>Mineral</i>	X				
Antioksidanlar	Karbamatlar: <i>Kurşun</i>			X		X
	<i>Çinko</i>			X		X
	Karbon siyahı	X				X
	Kalsiyum tuzları					X
	Hidrate kireç				X	X
	Fenoller					X
	Aminler				X	X

3.5. Bitüme Eklenen Katkı Maddeleri

Günümüzde asfalt karışımlarındaki bitümün ağırlığının çok düşük olmasına rağmen asfalt üzerindeki çalışmaların ve araştırmaların önemli bir kısmı bitüm üzerinde gerçekleştirilir (Ziaee vd., 2014). Fiziksel ve kimyasal özelliğinden dolayı asfalt bağlayıcı asfalt karışımların optimum performansı, dayanıklılığı ve stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Bahia vd., 2001). Bugün ağır taşıtlar ve trafik yüklerinin artışıındaki farklılıktan dolayı büyüyen asfalt bozuklukları miktarı artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda asfalt kaplaması trafik yükleri altında birçok çatlağa uğrar ve tersine ortam sıcaklığının artmasıyla deformasyon ve tekerlek izi görülür. Bitüm modifikasyonu asfaltın hizmet ömrü ve kalitesini artırır. Bu yüzden asfalt onarım ve bakım maliyetleri önemli ölçüde azaltılır. Son on yıllarda, daha uzun servis ömrüne sahip asfaltlar elde etmek ve geleneksel saf bitüm ve agregalara yeterli yapışmaya sahip olmayan asfaltların sorunlarının üstesinden gelmek için modifiyerler kullanılır (Khodaei vd., 2014).

Katkı maddeleri bitüm performansını artırabilmesine rağmen belirli bir katkı maddesinin uygun performansı onun seçilmesi için yeterli olmamalıdır. Bir katkı maddesi seçerken göz önüne alınması gereken ekonomik sorunlar, modifiyer üretimi ve çevresel uygunluk gibi bazı başka faktörler de vardır. Bu faktörler göz önüne alınarak endüstriyel olarak üretilen polimer kökenli SBS ve doğal asfalt katkı maddesi olan Gilsonit üzerinde birçok çalışma yapılmıştır.

Doğal asfaltlar, hidrokarbonlar ve aromatik moleküllere sahip parçacıklardan oluşan katı ya da yarı katı karışımlardır. Doğal asfaltlar, genel olarak karbon ve hidrojenle oluşmasına rağmen nitrojen, hidrojen, sülfürün yanı sıra az miktarda demir, nikel ve vanadyum gibi metaller de içermektedir. Hidrokarbonlar, hidrojen ve karbon atomlarından oluşan moleküller olup kömürden (en ağırı), ham petrole ve metana (en hafifi) kadar değişik şekillerde organik bileşik formundadırlar. Doğada, hidrokarbonlar hidrokarbon olmayan maddelerle kompleks karışım formunda olup bu karışımlar sahip oldukları atomik hidrojen-karbon (H/C) ve oksijen-karbon (O/C) oranlarına ve içerdikleri nitrojen, oksijen, sülfür ve metal miktarlarına göre ayrılmaktadırlar. Bu karışımlardan biri doğal bitümlerdir (Meyer ve Witt, 1990).

3.5.1. Gilsonit

Günümüzde, mineral, organik, doğal ve endüstriyel katkı maddelerinin büyük bir miktarı, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasıyla dolayısıyla rijitliğinin azalmasıyla yanı sıra termal ve büzülme çatlaklıklarına direnci, kalıcı deformasyon ve asfalt kusmasında azalma gibi bitümlü bağlayıcının bazı özelliklerinin değiştirilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Bahia vd., 2001). Ancak coğrafi koşullar ve çeşitli ülkelerdeki mevcut tesisler göz önüne alındığında uygun bir modifiyer seçimi bir ülkeden diğerine farklılık göstermektedir.

Asfaltum olarak adlandırılan doğal olarak meydana gelen bitüm yatakları, ticari olarak Uintaite veya Gilsonit olarak bilinmekte olup bitüm modifikasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bitümlü bağlayıcı katkılarının sınıflandırılmasında hidrokarbonlar grubundan olan Gilsonit (Bahia vd., 2001), çeşitli endüstriyel sorunlarda değerlendirilen ve kullanılan bir reçineli hidrokarbondur (Davis vd., 1989).

Genellikle doğal bitüm, yeraltı taş rezervuarından ayrılan ve zemin katmanlarının kırılmaları yoluyla zemin yüzeyine doğru yükselmiş olan ham petrol esaslı bir yan üründür. Doğal bitüm zemin yüzeyine ulaşırsa, bitümlü kaynaklar yapar ve eğer yeraltında kalırsa veya zemin yüzeyine yakınsa, aşamalı olarak katılaşıp oksitlenecek ve sonunda mineral bitüm olan katı ve sert bir madde olacaktır. Gilsonit mineral bitüm, siyah renkli olup toz haline kolayca gelebilmektedir (Şekil 3.3) (Ameri vd., 2011a).



Şekil 3.3. Gilsonit'in şematik şekli

Şu anda "Gilsonit" olarak bilinen mineral, ilk 1860'larda keşfedilmiştir. Fakat bu malzeme Samuel H. Gilson tarafından tahta hasırlar için su geçirmez bir kaplama ve tel kablo için izolasyon olarak tanıtılmaya başlandığı 1880'lerin ortasına kadar bilinmiyordu. 1888 yılında, Samuel H. Gilson bir ortağıyla birlikte ticari ölçekte Gilsonit maden ve pazarı ile ilgili ilk şirketi kurdu (Aflaki ve Tabatabaee, 2009; Ho ve Zanzotta, 2002). Bu malzeme kırılğan bir yapıya sahip olup kolayca koyu kahverengi bir toza dönüşebilir. Gilsonit parlak siyah obsidien maddeye benzemektedir. Rengi mikronize toz halinde koyu kahverengidir.

Bitümlü bağlayıcıya katkı maddesi olarak Gilsonit ilavesi viskoziteyi artırmakta ve penetrasyonunu azaltmaktadır. Bu ilavenin sonucunda yüksek sertlikte bir modifiye bitüm elde edilmektedir. Genellikle Gilsonit, iki şekilde asfalt yapımında kullanılmaktadır: bitümlü bağlayıcıya Gilsonit ilave edilmesi veya plentte karıştırma sırasında agregalara Gilsonit'in ilave edilmesi (Bardesi vd., 1999).

Bitüm modifikasyonunda Gilsonit kullanılması ile ilgili araştırmalar, Amerikan Gilsoniti'nin yüksek sıcaklıkta bitümlü bağlayıcıların performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda ise bitümlü bağlayıcının gevrekleşmesine neden olmakta ve asfaltta düşük sıcaklıkta çatlaması için uygun bir ortama neden olmaktadır (Anderson vd.,1999).

Gilsonit genellikle bağlayıcı rijitliğini arttırarak yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Fakat bağlayıcının orta ve düşük sıcaklık özelliklerini de olumlu etkileyebilmektedir (Aflaki ve Tabatabaee, 2009). Gilsonit ile modifiye edilmiş bağlayıcılar aynı zamanda bitümlü sıcak karışım tabakalarında çatlağın oluşmasını önleyen, agrega ve bitümlü bağlayıcı arasında orta bir tabaka olarak başarılı bir şekilde ara yüzey oluşturabilmektedir (Huang vd., 2006). Gilsonit bilhassa ağır trafiğin fazla olduğu sıcak iklimli bölgelerde diğer ticari ürünler olan polimerlere iyi bir alternatif olmaktadır (Suo ve Wong, 2009). İran Gilsoniti üzerine yapılan araştırmalar, bitüme Gilsonit ilavesinin yüksek sıcaklıklarda bitüm performansında iyileşme sağladığını göstermiştir (Ameri vd., 2011a).

1970'lerin başından beri Norveç, yoğun trafik ve soyulma gibi kaplama bozukluklarını arttıran soğuk ve ıslak hava koşullarına sahip alanlarda bitüm ve asfalt karışımlarının davranışsal özelliklerini iyileştirmek amacıyla Gilsonit'i kullanmaktadır. Başlangıçta

penetrasyon değeri 40-50 olan saf bitüm kullanılmış ve saf bitümün yetersizliği yüzünden Gilsonit, bir katkı maddesi olarak karışıma eklenmiştir. Gilsonit kullanımı ile kaplamanın servis ömrü iki katına yakın artmıştır (Afshari vd., 2006).

Avustralya'nın New South Wales bölgesinde Gilsonit, katkı maddesi olarak seçilmiş ve asfalt karışımının ağırlığının %0.25'i oranında karışıma ilave edilmiştir. 6, 12, 24 aylık dönemlerden sonra kaplama üzerinde yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda saf karışımla karşılaştırıldığında Gilsonit içeren karışımların tekerlek izi bozulmalarında önemli bir azalma sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlar Avustralya'da Asfalt Kaplama Derneği'nin bitümlü sıcak karışımlar için Gilsonit'i önermesine neden olmuştur (Afshari vd., 2006).

ABD'nin kuzeydoğusunda bulunan Seattle Limanı'nda, Gilsonit, bir katkı maddesi olarak kamyonların ağır trafiğine karşı kaplama performansını artırmak için 60-70 penetrasyonlu bitüme ağırlıkça %8 oranında ilave edilmiştir. Bir yıl sonra uygulanan asfalt kaplama, tekerlek izi ve soyulma açısından katkı içermeyen önceki kaplamaya göre daha yüksek dirence sahip olduğu belirlenmiştir.

2004 yılında Pretorius ve ekibi, Gilsonit'in asfalt karışımların özelliklerini iyileştirmedeki teknik faydalarına ek olarak asfalt kaplamanın optimum tasarımında birçok ekonomik avantajlara sahip olduğunu belirlemişlerdir (Pretorius vd., 2004).

1999'da Anderson ve ekibi tarafından Pennsylvania'da gerçekleştirilen araştırma projesinde modifiyeli ve saf bitüm üzerindeki deneylerin sonuçları Gilsonit'in, saf bitümün sadece yüksek çalışma sıcaklığında olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve tekerlek izi direncini arttırdığını göstermiştir. Ancak Gilsonit yorulma çatlağı ve düşük sıcaklığına karşı bitüm direncini artırmada başarısız olmuştur. Ayrıca, yapılan testler, Gilsonit'in asfalt karışımının esneklik modülü ve indirek çekme dayanımını artırdığını göstermiştir (Anderson,1999).

Amerikan Gilsonit Şirketi, dünyadaki en büyük Gilsonit üreticilerinden biridir. 1998 yılında yapılan çalışmalar asfalt karışımına Gilsonit ilavesinin Marshall stabilitesini büyük ölçüde artırdığını göstermiştir. Bitüm ağırlığınca %8 Gilsonit kullanılması, asfalt numunelerinin Marshall stabilite değerlerini %25-40 aralığında artırmıştır. Bu değişiklik standart kaplamanın yüksek performanslı kaplamaya dönüşmesini sağlamıştır. Asfalt karışımında Gilsonit kullanmanın bir diğer önemli avantajı, asfalt karışımının azalan nem hassasiyetidir. Sonuçlara göre Gilsonit katkı maddesiz numuneler yeterli nem direnci

seviyesine sahip değilken asfalt karışıma %4 Gilsonit ilavesi bile önemli derecede nem hasarı direncini artırmıştır. Dinamik modül testleri, Gilsonit'in asfalt numunelerin esneklik modülünü artırdığını göstermiştir.

İsveç Ulaştırma Araştırmaları Kurumu, Gilsonit ile geleneksel asfalt üzerine bir araştırma yapmıştır. Gilsonit kullanımı, yapı içinde daha fazla tekerlek izi dayanımı ve daha iyi yük dağılımı sağlamıştır. Ayrıca, Gilsonit kullanımının kaplama yapısında daha az gerilmeye neden olacak daha rijit bitümlü asfalt karışımların elde edilmesini sağlamıştır (Said ve Hakim, 2008).

Ameri ve ekibi, 2010 yılında yaptığı çalışmada Gilsonit ilavesi ile bitümün yüksek sıcaklık dayanımının arttırdığı sonucuna varmışlardır. Gilsonit içeriği arttıkça bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımları artmıştır. Bu arada kaplama ömrü, yorulma ömrü açısından Gilsonit içeriği arttıkça artmıştır (Ameri vd., 2010).

Bir araştırma projesi yoluyla 2012'de İran İslam Cumhuriyeti Ulaştırma Bakanlığı'nın Taşımacılık Araştırma Enstitüsü, Gilsonit'in, saf bitümün yüksek sıcaklık dayanımını arttırdığı sonucuna varmıştır. Bu nedenle, saf bitümün yüksek sıcaklık dayanımı özellikle asfalt karışımın tekerlek izi direncinin artması için bir faktör olan sıcak mevsimlerde saf bitümün kayma mukavemetini arttırabilir. Üstelik saf bitüme Gilsonit ilave ederek rijitlik artmış ve bitüm sertlik oranı düşmüştür. Modifiye bitümün yüksek sıcaklık dayanımı önemli oranda artmıştır.

Tropikal ülkeler (Güney Amerika), yüksek sıcaklık iklimlerine sahip olarak nitelendirilir. Bu ülkelerde esnek üstyapılı yollar, kalıcı deformasyona karşı direnci artırmak için yeterince rijit olan bitümlü sıcak karışımlar ile yapılmalıdır. Bu gereksinime rağmen Kolombiya gibi ülkede üretilen en sert asfalt çimentosu (AC) AC 60-70'dir (performans derecesi (PG) 58-18'dir). Bu bitüm, hava sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde tekerlek izi oluşumuna karşı koyacak kadar rijit değildir. Bitümü sertleştirmek için alternatif bir yöntem Gilsonit kullanarak bitümü modifiye etmektir.

Kolombiya'da çok sayıda Gilsonit tipi doğal asfalt yatakları mevcuttur. Gilsonit, yüksek saflıkta doğal asfaltlardan biridir ve düşük sabit karbon ve düşük kükürt içeriğine sahiptir. Rond'on ve Reyes (2012), bu malzemeyi bir asfalt beton karışımı üretmek için kullanmış ve özelliklerini statik ve dinamik yük altında değerlendirmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar, asfalt karışıma Gilsonit eklenmesiyle, sıcak iklimlerde uygulanacak daha rijit asfalt beton karışımları üretildiğini göstermiştir. Modifiye karışımların Marshall stabilitesi

ve rijitlik değerleri Gilsonit içermeyen karışımlarla kıyaslandığında daha yüksektir. Modifiye karışımların esneklik modüllerinin referans karışımları için elde edilenlerden daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Gilsonit'in bir asfalt modifiyer olarak BSK'ların rijitlik özelliklerini ve sıcak iklimlerde kullanılan karışımın kalıcı deformasyon oluşumuna karşı direncini iyileştirmek için kullanılabildiğini göstermiştir.

Esfah ve ekibi (2011), bitüme Gilsonit ilavesinin viskoziteyi arttırmaya, penetrasyonu azaltmaya ve bağlayıcıyı sertleştirmeye yardım ettiğini bildirmiştir. Ameri ve ekibi (2011a), reolojik karakterizasyon testleri sonucunda %4, %8 ve %12 oranlarında Gilsonit kullanılması ile iki farklı bitümün (PG 58-22 ve PG 64-22), yüksek servis sıcaklığındaki performans derecelerini artırdığını bildirmişlerdir. Fakat bu oranlarda katkı kullanılması bağlayıcıların düşük sıcaklık performans derecesini düşürmüştür. Çünkü Gilsonit ile modifiye edilmiş bitümler, çatlak oluşumuna neden olan düşük servis sıcaklıklarında gevrek davranış göstermektedir. Anderson ve ekibi (1999), yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Ameri ve ekibi (2011b), Feng ve ekibi (2010) ve Feng ve ekibi (2011), Gilsonit ile modifiye edilen bitümlerin yüksek ve orta servis sıcaklıklarında dayanımı artırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca, Ameri ve ekibi (2011b), Gilsonit modifiyeli sıcak karışımlı asfaltın kalıcı deformasyona ve yorulmaya karşı direncinde bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Feng ve ekibi 2010 ve 2011 yıllarında yapmış oldukları çalışmalarda nem hasarına karşı direncin Gilsonit kullanımı ile arttığını bildirmişlerdir. Yılmaz ve ekibi (2013), karışım ağırlığına göre %3 Gilsonit eklendiğinde sıcak karışım asfaltlarının tekrarlı yük altında rijitlikte, kalıcı deformasyona karşı dirençte ve yorulma direncinde önemli bir artış olduğunu bildirmiştir. Kök ve ekibi (2011), stiren-butadien-stiren (SBS) ile modifiye edilmiş bitümler üzerinde yapılan reolojik karakterizasyon testlerine dayanarak Gilsonit'in asfalt karışımlarının üretim maliyetini azaltmak için kullanılabileceğini bildirmiştir. Kök ve ark. (2012) Gilsonit kullanımı ile Marshall stabilite değerinin, dinamik modül değerlerinin, dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin arttığını belirlemişlerdir. İlâveten, bu araştırmacılar Gilsonit ile modifiye edilmiş karışımlarda %1 oranında optimum bitüm içeriğinin azaldığını bildirmiştir. Böylece asfalt karışımın üretim maliyeti azalmıştır. Cholewińska ve Iwański (2011), asfalt karışım ağırlığına göre %5, %10 ve %15 Gilsonit kullanarak 50-70 penetrasyona sahip bir bitümü modifiye etmiştir. Bu araştırmacılar, Gilsonit içeriği arttıkça penetrasyonda önemli bir azalma, viskozite ve yumuşama noktasında bir artış bildirmiştir. Wong ve Michael (1990), bitüm hacmine göre

%4, %6 ve %8 oranında saf bitüme eklenen iki farklı Gilsonit ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dirençte bir artış bildirmiştir. Fakat bu araştırmacılar, Gilsonit'in bir soyulma önleyici olarak düşünülmesi durumunda faydalı olmadığını bildirmişlerdir. Tia ve ekibi (1994), Gilsonit ve altı diğer farklı katkı maddeleri ile modifiye edilmiş asfalt AC 30 üzerinde yaptıkları çalışma sonucunda modifiye edilmiş bitümlerin yaşlanmaya karşı daha fazla direnç gösterdiğini bildirmişlerdir.

3.5.2. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)

Servis ömürleri boyunca, asfalt kaplamalar çeşitli yük ve iklim koşullarına maruz kalırlar. Asfalt karışımlar soğuk kış dönemlerinin yanı sıra sıcak yaz dönemlerinde trafik yüklerini taşıyabilmelidir. Bitümlü bağlayıcılar, asfalt karışımların ana bileşenlerinden biri olup zaman ve sıcaklığa bağlı davranış olarak viskoelastik malzemelerdir. Yani, düşük ve orta sıcaklıklarda, gevrek bir davranış, yüksek sıcaklıkta iken akışkan bir davranış sergilerler. Asfalt kaplamalarında gözlenen çeşitli sıkıntılar asfalt bağlayıcıların viskoelastik davranışıyla ilişkili olabilmektedir. Asfalt kaplama sıcaklığı soğuk mevsimlerde düştüğü için kaplama büzülür. Bu durum asfalt bağlayıcının rijitliğinin artması yüzünden çatlamaya yol açabilir. Sıkıntının bu tipi termal çatlama olarak adlandırılır ve merkez çizgisine enine yönlü çatlaklar ile sonuçlanır. Asfalt kaplamada görülen başka bir sıkıntı türü olan tekerlek izi, sıcak mevsimler boyunca daha yaygındır. Bitümlü bağlayıcının viskozitesi veya rijitliği yüksek sıcaklıklar nedeniyle azaldığında trafik yüklerinden kaynaklanan kaplamada kalıcı deformasyon olan tekerlek izi oluşur.

Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik davranışıyla ilgili olan asfalt karışımlarının sıkıntılarını gidermek veya hafifletmek için, mühendisler ve malzeme bilim insanları, bitümlü bağlayıcıların özellikleri ve modifiyerlerin farklı tiplerinin kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir (Dong vd., 2016; Modarres ve Hamed, 2014; Moreno vd., 2013; Kök ve Çolak, 2011; Moghadas vd., 2012, Moghadas vd., 2014a, Moghadas vd., 2014b). İdeal olarak, iyi bir modifiyer yüksek sıcaklıklarda kompleks modülünü arttırarak, düşük ve orta sıcaklıklarda azaltarak bir asfalt bağlayıcının özelliklerini iyileştirmektedir.

Viskoelastik davranış açısından bitümlü bağlayıcının performansı gerekli polimerlerin eklenmesiyle iyileştirilebilmektedir. Son yıllarda bitümlü bağlayıcıların ve karışımların performansını arttırmak için stiren-butadien-stiren (SBS) kopolimer gibi polimerlerin

kullanımı ön plana çıkmıştır. Geleneksel bitümlü bağlayıcıların performansı değiştirmek için sentetik polimerlerin kullanımı ilk 1970'lere dayanmaktadır. Polimerler bitüm ile uyumlu olmalı ve yüksek sıcaklıkta depolamada faz ayrılmasına neden olmamalıdır (Polacco vd., 2004; Airey, 2002; Airey, 2003; Whiteoak ve Read, 2003). Stiren-butadien-stiren (SBS) bitüm modifikasyonunda muhtemelen en sıkça kullanılan polimerdir (Polacco vd., 2004; Airey, 2004; Airey, 2003; Ruan vd., 2003) (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. SBS'in granül ve toz hali

SBS çapraz bağlı elastomer ağ davranışı gösterir (Lu ve Isacsson, 1997). Genellikle ağırlıkça %3-6 konsantrasyonda bitüme eklenir. Saf bitüm ile karıştırıldığında, SBS şişer, bitüm içerisinde dağılır ve çapraz bağlayıcı olarak davranır (Lu ve Isacsson, 1997; Kumar vd., 2009; Fu vd., 2007; Chen vd., 1999). Bu çapraz bağlantı, bitümün esnekliğini, kohezyonunu ve mukavemetini artırır. Bu parametreler modifiye bitümün reolojik özelliklerinde önemli rol oynar. SBS kopolimerleri, üç boyutlu bir ağ içinde fiziksel çapraz bağlama ve moleküllerinden güçlerini ve esnekliklerini elde eder (Polacco vd., 2004; Airey, 2002; Airey, 2003; Whiteoak ve Read, 2003; Lu ve Isacsson, 1997; Kumar vd., 2009; Fu vd., 2007). Polimer modifikasyonunun kalitesi saf bitümün yapısına ve daha sonra bitüm polimer sisteminin uyumluluğuna bağlıdır (Fu vd., 2007; Chen vd., 1999). SBS, malten bileşenleri ile yüksek etkileşim oluşturduğundan bitümün performansını değiştirmek için en yaygın olarak kullanılan polimerlerden biridir (Selvavathi vd., 2002).

Asfalt bağlayıcılara polimerlerin ilavesi adezyon ve kohezyonu artırır (Kanitpong ve Bahia, 2005), rijitlik ve viskoziteyi artırır (Kök ve Çolak, 2011; Liang, vd., 2015; Król vd., 2015; Kök vd., 2014) ve bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığını azaltır (Kök ve Çolak, 2011; Liang, vd., 2015). Ek olarak, polimer modifiyeli bağlayıcılar içeren asfalt karışımların

tekerlek izi direnci ve yorulma performansı artmaktadır (Kök ve Çolak, 2011; Kök vd., 2013). Fakat polimer modifiye bağlayıcılar önemli ölçüde modifiye edilmemiş bağlayıcılardan daha pahalıdır. Bu nedenle, farklı bakış açılarından bağlayıcının performansını iyileştirebilen modifiye bağlayıcılara, uygun maliyetli ve daha çevreci bir şekilde yollar bulma asfalt mühendisleri ve malzeme bilim insanları için önemli bir görevdir. Ekonomik ve çevre açısından, işlenmemiş materyallerin yerine geri dönüştürülmüş katkı maddelerinin kullanımı ile depolama sahalarındaki sorunu azaltmak gibi birkaç yarar sağlanabilir.

Önemli araştırma çalışmaları polimer modifiyeli asfalt bağlayıcılar üzerinde yapılmıştır. Çalışmaların sonuçları polimerlerin düşük, orta ve yüksek sıcaklıklardaki modifiyeli asfalt bağlayıcıların performansını arttırdığını göstermiştir (Khattak ve Baladi, 2001; Şengöz ve İşikyakar, 2008). Genellikle modifiyeli asfalt bağlayıcılarda çoğunlukla kullanılan polimerler stiren-butadien-stiren (SBS), stiren-butadien-kauçuk (SBR) ve etilen-vinil-asetat (EVA) içerir. Yapılan bir araştırmanın sonuçları, PG70-22 asfalt bağlayıcılarının üç numunesi arasında ikisi SBS ve SBR ile modifiye edildiği ve üçüncü orijinal PG70-22 asfalt bağlayıcısı olduğu, modifiyeli asfalt bağlayıcıların orijinal asfalt bağlayıcıdan hem yorulmaya hem de basınca karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir (Sargand ve Kim, 2001). Yapılan bir diğer çalışmada SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcının orijinal asfalt bağlayıcıdan daha yüksek elastik içeriği olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, EVA modifiye bitümlü bağlayıcısı SBS modifiye asfalt bağlayıcısıyla karşılaştırıldığında elastik düzelmesinde daha az derecede bir iyileşme olduğu ortaya çıkmıştır (Potgieter, 2004).

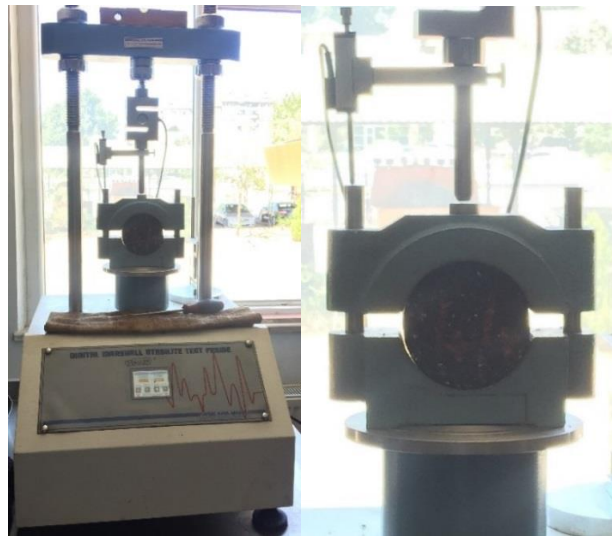
4. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEY YÖNTEMLERİ

Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak belirlenerek bilinmesine bağlıdır. Analitik üstyapı tasarımında, yapının analizi için gerekli olan yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve malzemelerin muhtemel bozulma şekillerini ortaya çıkaran performans özellikleri göz önüne alınır.

Arazideki gerilme şekilleri laboratuvarında güçlkle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır.

4.1. Marshall stabilitesi ve akma deneyi

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 BSK numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri deney öncesinde ölçülmektedir. Deneye başlamadan önce 40-60 dak arasında numuneler $60\pm1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Süre tamamlandıktan sonra numune sudan çıkarılarak kırma çenesine yerleştirilir ve numuneye 50 ± 2 mm/dak hızla yükleme yapılır. Marshall deney aleti Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yük sırasındaki deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu deneyde kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip olan numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258 \times h)} \quad (4.1)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Deneyde bulunan stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Stabilite değeri için stabilite ortalamasından %15 farklı ve akma değeri için akma ortalamasından %20 farklı numuneler dikkate alınmaz. Bunlar dışındaki numunelerin tekrar ortalaması alınır ve aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) sahip olan numuneler varsa bu numunelerde değerlendirmeden çıkarılarak yeni numuneler üzerinde deney tekrarlanır (TS EN 12697-34+A1, 2007).

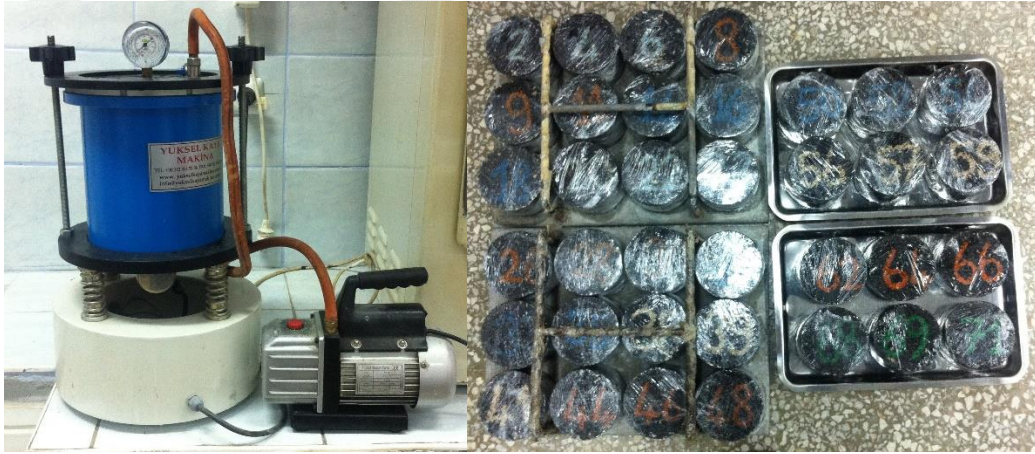
Marshall stabilitesi değerinin akma değerine bölünmesi ile Marshall oranı (MQ) belirlenmektedir. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir (Zoorob ve Suparma, 2000; Hınıslioğlu ve Ağar, 2004; Çolak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2009).

4.2. Nem hasarına karşı dayanım deneyi

Bitüm ile agrega arasındaki adezyon, uzun süreçte kaplamanın performansının yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biridir. Bitüm ile agrega arasına giren su adezyonun azalmasına dolayısıyla BSK kaplamalarda erken bozulmalara neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına agrega özellikleri, bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametre etki etmektedir (AASHTO T283, 2003).

Karışımın nem hasarına karşı dayanımını tespit etmede ve karışımda uygulanan katkı maddesinin etkisini belirlemede AASHTO T283 standardına göre nem hasarı deneyi kullanılmaktadır (AASHTO T283, 2003). %7±0.5 hava boşluğuna sahip olan numuneler yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Nem hasarı deneyi için numunelerin 16 saat süresince

60°C sıcaklıkta, daha sonra 2 saat süresince karıştırma sıcaklığındaki etüvde bekletilmesi gerekir. Daha sonra numuneler iki gruba ayrılmakta ve birinci grupta bulunan numuneler saf su içeren piknometre içerisine konulup 13-67 kPa vakum uygulanarak koşullandırılmaktadır. Numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar vakum işlemi devam etmektedir. Yaklaşık 5 dakikalık vakum işleminden sonra boşlukların %70'ten az su ile dolma oranı olması durumunda işlemine devam edilmeli, %80'den fazla olması durumunda ise tahribat olması nedeniyle bu numuneler deneylerde kullanılmamalıdır (AASHTO T 283, 2003). Piknometre ve vakum aleti Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmaktadır:

$$J = B' - B \quad (4.2)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (4.3)$$

$$S' = J / I * 100 \quad (4.4)$$

J : Absorbe su hacmi (cm³)

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

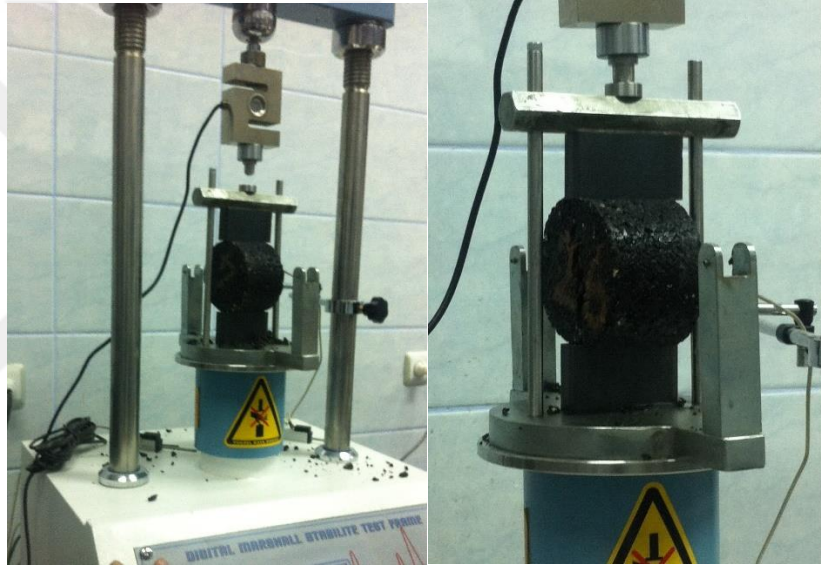
I : Hava boşluğu hacmi (cm³)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm³)

S' : Doygunluk derecesi (%)

Vakum işleminden sonra numuneler streç film ile sarılır. Öncelikle numuneler 16 saat - 18°C sıcaklıkta ardından 24 saat 60°C suda bekletilmektedir. Süre dolduktan sonra numuneler streç filmden çıkarılmaktadır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numuneler 2 saat 25°C'deki suda bekletilmekte ve ardından 50±2 mm/dak hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Çekme dayanımı deney düzeneği

Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmiştir. Formülde TS çekme dayanımı (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), d numune çapını (m), t ortalama numune yüksekliği (m), ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı (TSR) ise koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin (TS_{yaş}) koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerine (TS_{kuru}) oranlanması ile belirlenmektedir. Superpave şartnamesine göre bu değer en az %80 olması istenmektedir.

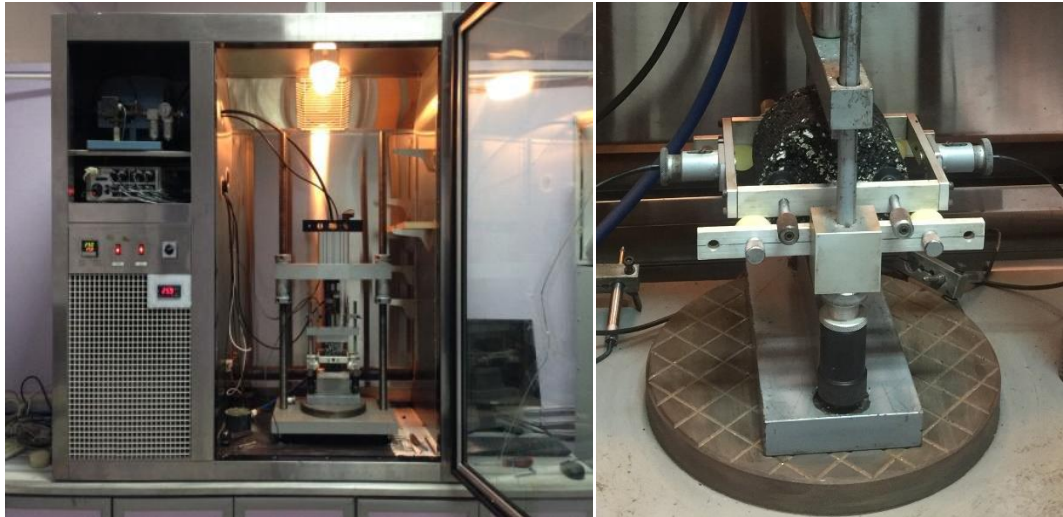
$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (4.5)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (4.6)$$

4.3 İndirek çekme rijitlik modülü deneyi

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların önemli performans karakteristiklerinden biridir (Zoorob ve Suparma, 2000). İndirek çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir.

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada meydana gelen ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Çalışmada Şekil 4.4' teki UTM (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılmıştır.



Şekil 4.4. UTM cihazı ve ITSM deney düzeneği

Yükleme çerçevesi, iklimlendirme kabini, yazılım ve bilgisayardan deney düzeneği oluşmaktadır. İklimlendirme kabini sayesinde normal deney sıcaklığı 20°C olmasına rağmen deney farklı sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Numuneler deney öncesinde en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Yazılıma önceden numune yüksekliği, çapı, tahmini poisson oranı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi ve yük artış süreleri, tahmini rijitlik modülü gibi değerler girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yüklemeye işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yüklemeye sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yüklemeye ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu aşağıdaki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = \frac{F(R + 0.27)}{LH} \quad (4.7)$$

Burada S_m , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), R poisson oranıdır (0,35), L ortalama numune yüksekliği (mm) ve H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyondur (mm).

Numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması halinde numune 90° bir kez daha döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Numunenin ITSM değeri, aralarında %10'dan az sapma olan iki değer ortalaması alınarak belirlenmektedir.

4.4. İndirekt çekme yorulma deneyi

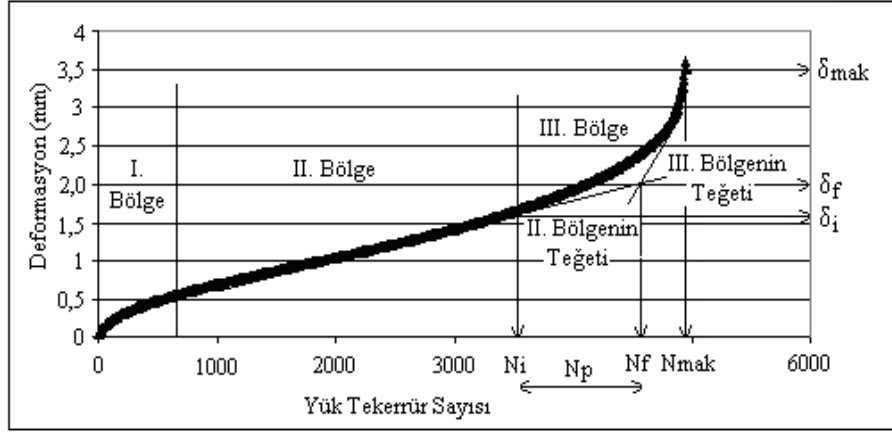
Bitümlü kaplamalar, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, kaplamanın rijitliğinin azalmasına neden olan küçük hasarlara yol açmaktadır. Bu küçük hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına sebep olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve trafik yüklerinden ve tekerrüründen kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunun ardından giderek artmaktadır

(Kök, 2007). Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı ya da araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. Düşey çapsal düzlemde silindir şeklindeki deney numunelerine tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UTM deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. ITSM deneyinde olduğu gibi yükleme çerçevesi, iklimlendirme kabini, yazılım ve bilgisayardan deney düzeneği oluşmaktadır. İklimlendirme kabini sayesinde normal deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen deney farklı sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Yazılıma numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmektedir.

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Sekil 4.5’de görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, deformasyon-yük tekerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır (Subagio vd., 2003; Aragao vd., 2010).



Şekil 4.5. Deformasyon-yük tekrür sayısı grafiği

I. bölgede numunedeki boşluklardan dolayı önce aşırı deformasyon değişimi meydana gelmekte ardından aksenal deformasyon oranı azalmaktadır. II. bölgede sabit oranda deformasyon söz konusu olup yaklaşık olarak lineer değişim meydana gelmektedir. III. Bölgede çatlak oluşumu başlamıştır. Bu bölgede deformasyon değişimi artmaktadır (Ghile, 2006).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışmasında, saf bitüm, stiren-butadien-stiren (SBS) ve Amerika Gilsoniti (G) modifiyeli bitümlü bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ların performansına karıştırma sıcaklığının etkisi incelenmektedir. Çalışmada TÜBİTAK 214M669 numaralı ve “Stiren-Butadien-Stiren ve Gilsonit'in Birlikte Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” isimli projede kullanılan malzemeler kullanılmıştır (Yılmaz vd., 2016).

Saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı bağlayıcı kullanılmıştır. Şanlıurfa İli'nin tasarım şehri olduğu kabul edilerek sıcaklık verilerine göre hedef performans seviyesi PG 76-10 olarak belirlenmiştir. Bu performans seviyesini elde edilebilmesi için SBS'ten %5 ve Gilsonit'ten %18 oranlarında kullanılması gerektiği belirlenmiştir (Yılmaz vd., 2016). Bağlayıcılara uygulanan Superpave deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Superpave bağlayıcı deney sonuçları (Yılmaz vd., 2016)

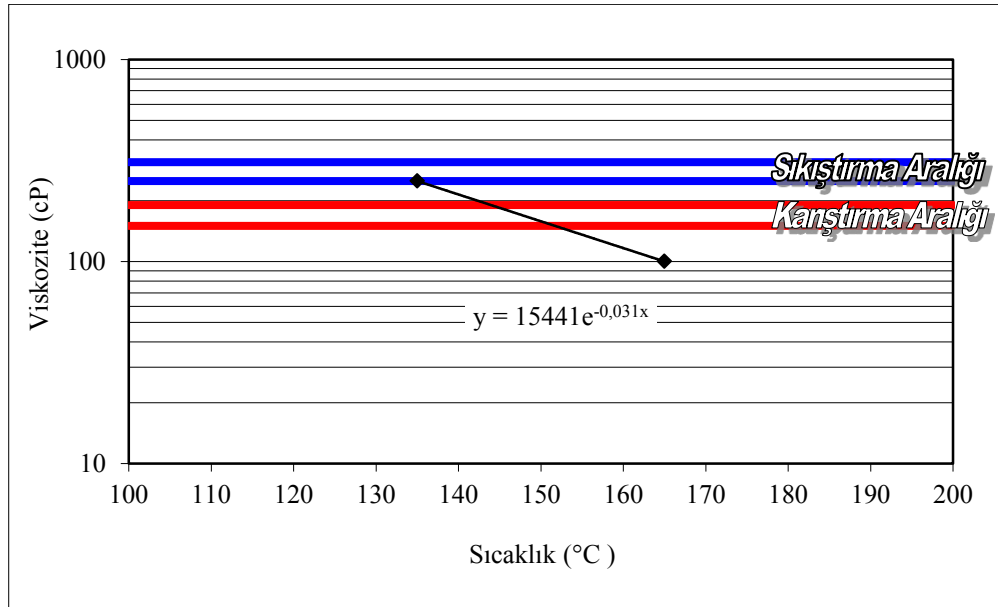
DSR deney sonuçları			
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)		
	B 160/220	%5 SBS	%18 Gilsonit
52	2.021	-	-
76	-	1.367	1.504
	G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (Şartname limiti min. 2.2 kPa)		
52	8.782	-	-
76	-	4.673	8.678
	G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (Şartname limiti maks. 5000 kPa)		
16	2023	-	-
25	-	739	4213
28	-	556	3186
31	-	398	2345
34	-	300	1761
37	-	227	1315
BBR deney sonuçları			
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)		
	PG 52-28	%5 SBS	%18 Gilsonit
-6		0.330	0.333
-12	-	0.291	0.294
-18	0.562		
-24	0.451		
	Sünme sertliği (Mpa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)		
-6	-	43.2918	151.0398
-12		76.790	283.9786
-18	165.7		
-24	325.4		
Performans seviyesi (PG)			
	52-28	76-16	76-16

Modifiye bitüm hazırlanmasında Şekil 5.1’de görülen modifiye bitüm mikseri kullanılmıştır. Saf bitüm ve katkı maddeleri; 180°C sıcaklıkta 1000 rpm dönme hızında 1 saat süresince karıştırılmıştır.

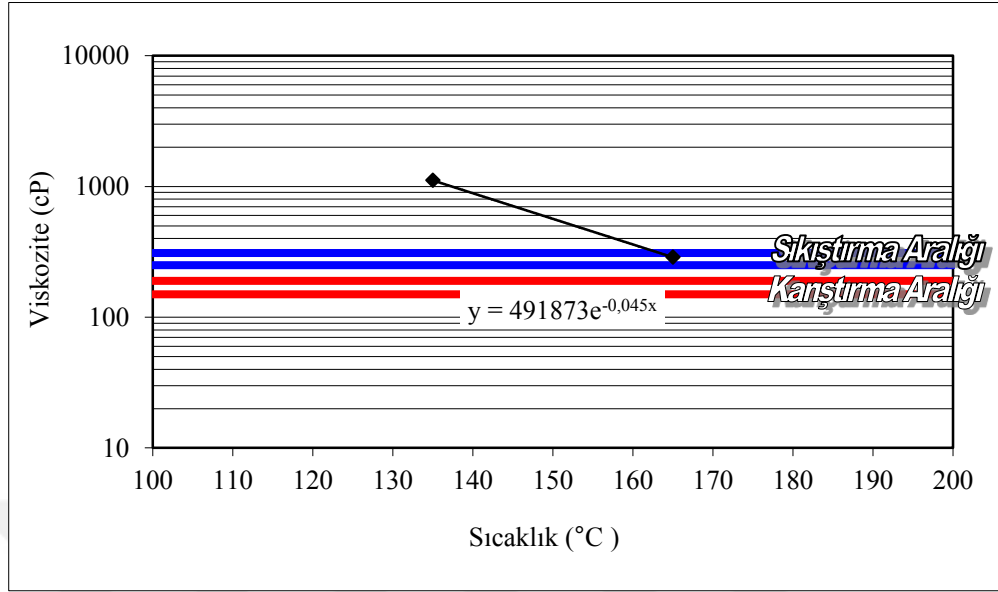


Şekil 5.1. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

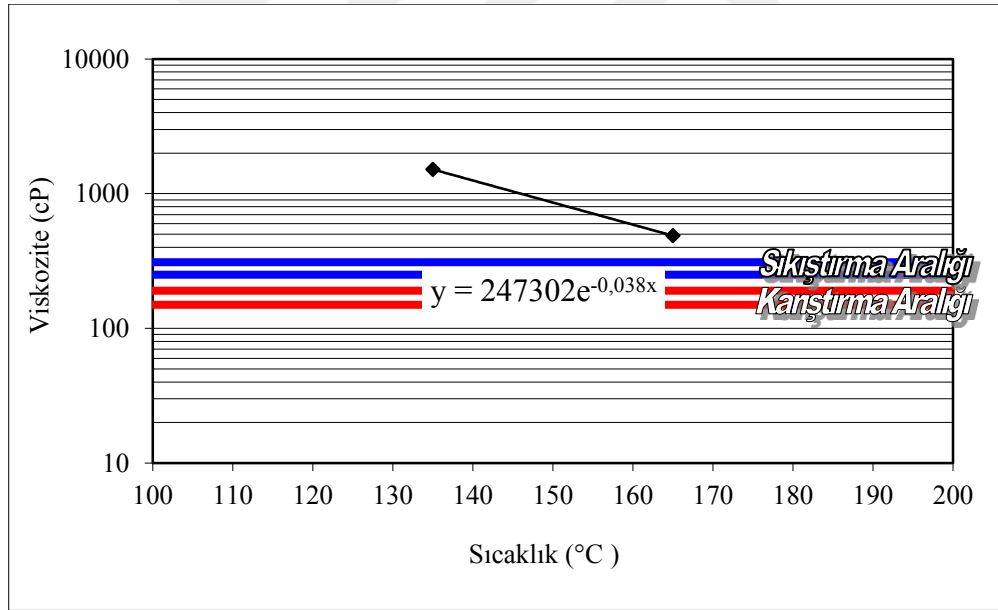
Çalışmada, saf bağlayıcı (B 160/220), %18 Gilsonit modifiyeli bitüm ve %5 SBS modifiyeli bitüm bağlayıcı üzerinde 135 ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozimetre deneyi uygulanmıştır. Saf bağlayıcı, %18 Gilsonit modifiyeli bitüm ve %5 SBS modifiyeli bitüme ait viskozite-sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 5.2-Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.2. Saf bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği



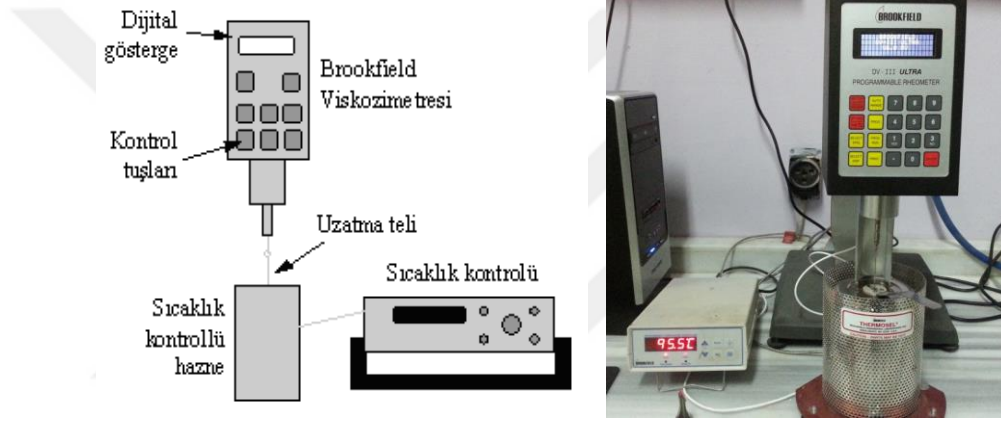
Şekil 5.3. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği



Şekil 5.4. %5 SBS modifiyeli bağlayıcıya ait viskozite-sıcaklık grafiği

Bitümlü bağlayıcılar oda sıcaklığında katı halde iken ısıtıldığında sıvı hale geçmekte ve işlenebilirlik kazanmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırılırken daneleri sarması ve boşlukları doldurarak adezyonu sağlayabilmesi için işlenebilirliğe ihtiyaç vardır. Ayrıca plentte agregayla bitüm karıştırıldıktan sonra uygulama bölgesine nakil edildiğinde yeterli sıkışmanın sağlanabilmesi için yeterli sıcaklığa dolayısıyla işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda bitümün

agregayla karıştırılması sırasında bitümün viskozitesinin $0,170 \pm 0,002$ Pa.s, sıkıştırılmasında ise $0,280 \pm 0,003$ Pa.s viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çalışmada kullanılan Dönel viskozimetre deneyi aleti Şekil 5.5’de görülmektedir. Dönel viskozimetre sistemi, 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 (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Mcgennis vd., 1994).



Şekil 5.5. Brookfield viskozimetresi ve termosel sistem

Saf, %5 SBS ve %18 Gilsonit katkılı modifiye bitümlerin istenen viskozite değerlerine karşılık gelen agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları Tablo 5.2’de verilmiştir.

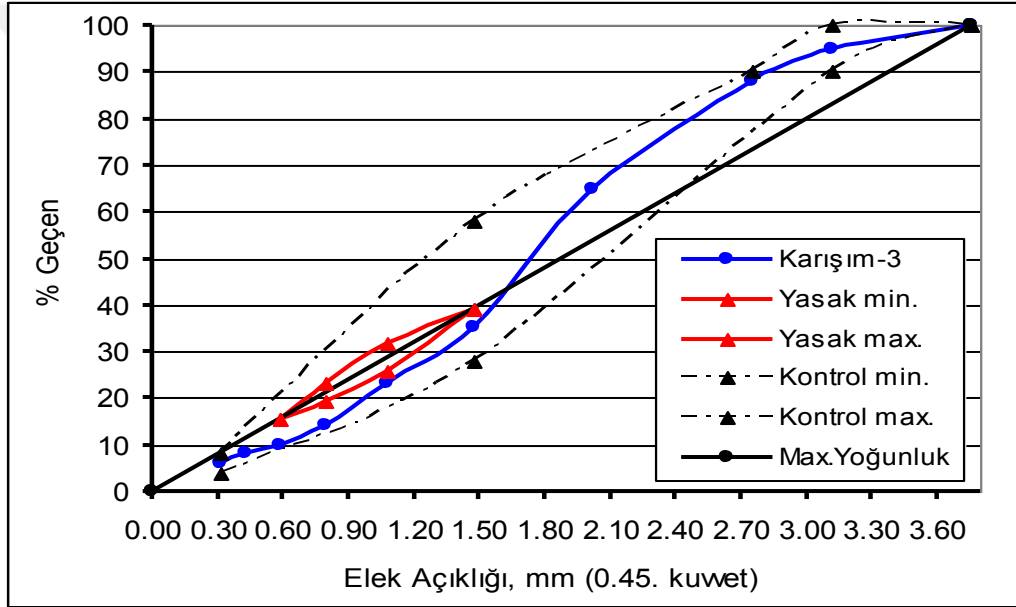
Tablo 5.2. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları (Yılmaz vd., 2016)

Bağlayıcı Türü	Viskozite (135°C)	Viskozite (165°C)	Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)
B 160/220	250	100	146,2 - 153,9	130,5 – 137,4
%5 SBS	1513	487,5	190,1 - 194,9	175,8 – 181,5
%18 G	1113	287,5	174,6 - 179,9	163,8 – 168,5

Bitümlü sıcak karışımların iskeletini oluşturan agrega malzemesi olarak kalker kırmataş kullanılmıştır. Agrega malzemesi Elazığ’ın Karayazı Bölgesi’nden bulunan Elkisan Şirketi’nden temin edilmiştir. Kullanılan agreganın özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir. Ayrıca kullanılan gradasyon Şekil 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.3. Kırmataş kalkerin özellikleri (Yılmaz vd., 2016)

Özellikler	Mineral Agrega			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 Dayamlılık (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



Şekil 5.6. Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu

Karışımların tasarım bitüm içerikleri Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Çalışmada, önceden yapılan proje çalışmasında kullanılan malzemeler ve katkıları kullanıldığından önceden belirlenen tasarım bitüm içerikleri kullanılmıştır. Belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda %4,61, %5 SBS modifiye bitüm kullanılan karışımlarda %5,05 ve %18 Gilsonit modifiye bitüm kullanılan karışımlarda %4,91 bitüm kullanılmıştır.

Çalışmada yukarıda belirtilen bitüm içeriklerinde ve 4 farklı karıştırma sıcaklığında karışım numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan karıştırma sıcaklıkları Tablo 5.4.'te verilmiştir.

Tablo 5.4. çalışmada kullanılan karıştırma sıcaklıkları

	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma sıcaklığı -10 (°C)	Karıştırma sıcaklığı -15 (°C)	Karıştırma sıcaklığı -20 (°C)
Kısaltma	KS	KS-10	KS-15	KS-20
Saf bağlayıcı	150	140	135	130
%5 SBS	193	183	178	172
%18 Gilsonit	177	167	162	157

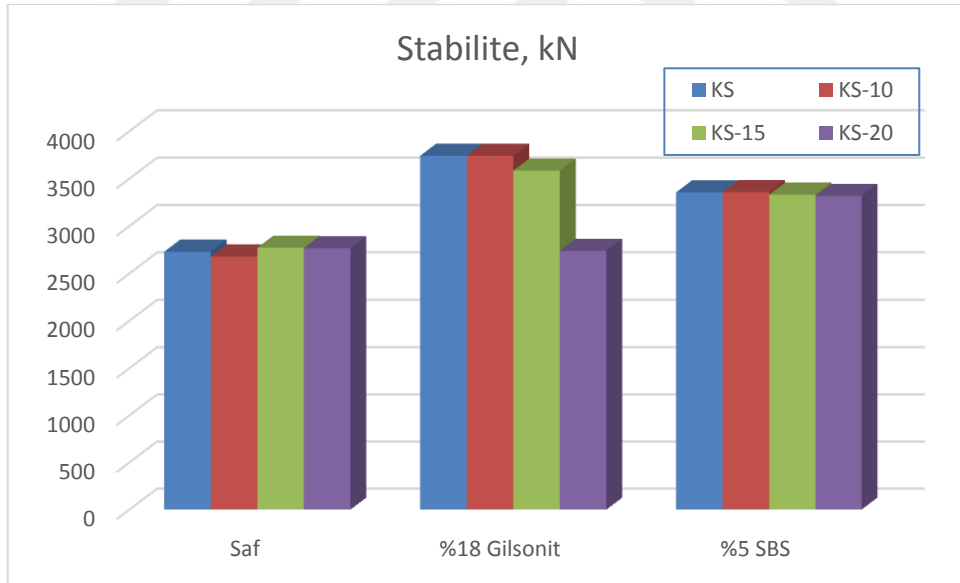
Çalışmada agrega ve bitüm önce viskozite değerleri sayesinde belirlenen karıştırma sıcaklığında bekletilmiş ve daha sonra karıştırılmıştır. Superpave yöntemine göre tepsilere konulmuş ve 135°C sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Ardından viskozite değerleri sayesinde belirlenen sıkıştırma sıcaklıklarında sıkıştırılmıştır. Böylece istenen boşluk hacminin sağlanması hedeflenmiştir. Ardından belirlenen karıştırma sıcaklığından 10°C, 15°C ve 20°C daha düşük sıcaklıklarda agrega ve bitüm karıştırılmış ve belirlenen sıkıştırılma sıcaklığında sıkıştırılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır.

5.1. Marshall stabilite ve akma deney sonuçları

Tez çalışmasında 3 çeşit bağlayıcı (saf bitüm, %5 SBS ve %18 Gilsonit modifiyeli bitümler) kullanılarak 4 farklı karıştırma sıcaklığında (K, K-10, K-15 ve K-20) toplam 36 numune hazırlanmış ve bu numuneler EN 12697-34 standardına uygun olarak Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler 60°C sıcaklığa sahip suda 40 dakika bekletildikten sonra 2 inç/dakika (50,8 mm/dak) hızda kırılmıştır. Deney, Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Makine tarafından stabilite ve akma değerleri otomatik olarak belirlenmiştir. Ardından numune yüksekliklerine bağlı olarak değişen düzeltme katsayısı ile stabilite değerleri çarpılarak nihai değerler elde edilmiştir. Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulan numuneler Şekil 5.7'de görülmektedir. Karışımların Marshall stabilitesi değerleri Şekil 5.8'de, akma değerleri Şekil 5.9'da ve Marshall oranı değerleri Şekil 5.10'da verilmiştir.



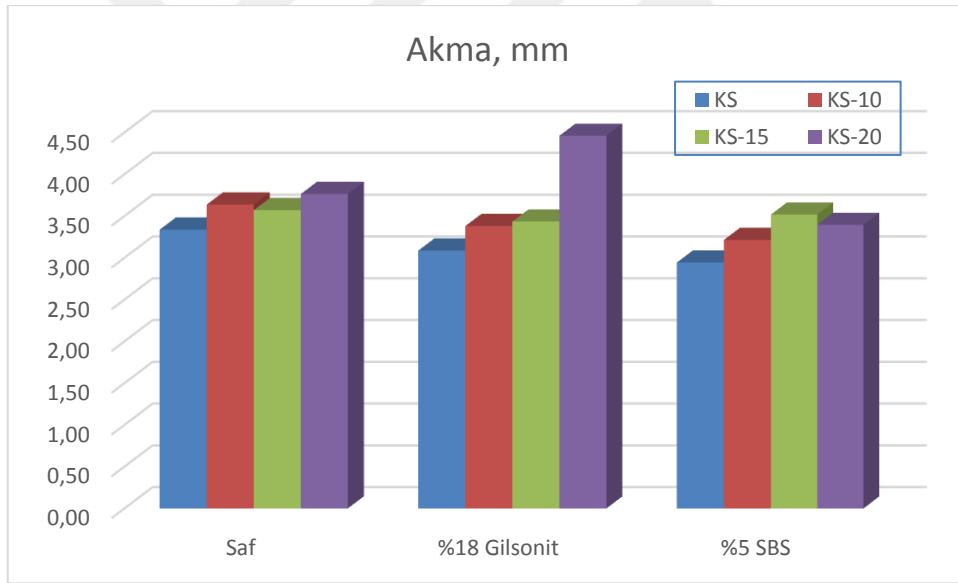
Şekil 5.7. Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulan numuneler



Şekil 5.8. Marshall stabilite deney sonuçları

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların stabilite değerleri saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Karıştırma sıcaklığının azalması ile saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların stabilite değerlerinde düzenli bir azalma meydana gelmemiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda değerler arasındaki farkın çok az olduğu, en yüksek ile en düşük stabilite

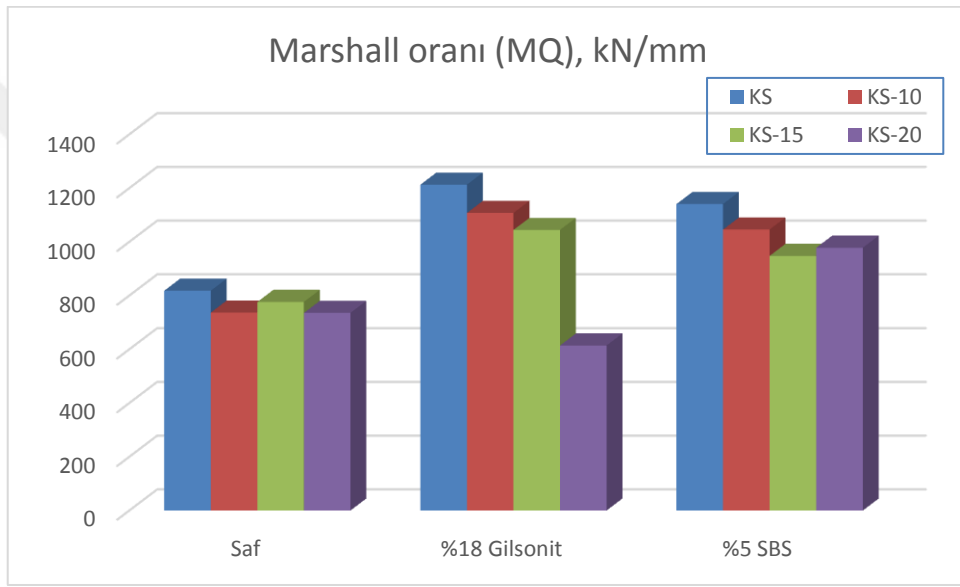
değerleri arasındaki farkın sadece %3,4 olduğu belirlenmiştir. %5 SBS ile hazırlanan karışımlarda da değerlerin birbirine yakın olduğu ve %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük stabilite değerleri arasındaki farkın sadece %1,2 olduğu tespit edilmiştir. Karıştırma sıcaklığının değişmesi ile stabilite değerinin en fazla %18 Amerika Gilsoniti modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda azaldığı belirlenmiştir. En yüksek stabilite değerine karıştırma sıcaklığında ve karıştırma sıcaklığından 10°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımlar sahip olmuştur. En düşük stabilite değerine ise karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. %18 Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük stabilite değerleri arasındaki farkın %36,6 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Akma deney sonuçları

Şekil 5.9’da görülen akma sonuçları incelendiğinde karıştırma sıcaklığının azalması ile akma değerlerinin genel olarak arttığı belirlenmiştir. %18 Gilsonit içeren, karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışım dışında bütün karışımların akma değerinin 2-4 mm arasında olduğu dolayısıyla Karayolları Genel Müdürlüğü şartname kriterlerini sağladığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ve %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlarda en düşük akma değerine karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımların en yüksek akma değerine ise karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan

karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük akma değerleri arasında %12,8 fark bulunduğu, %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlarda ise %44,5 fark olduğu tespit edilmiştir. %5 SBS ile hazırlanan karışımlarda en düşük akma değerine karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımın, en yüksek akma değerine ise karıştırma sıcaklığından 15°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. %5 SBS ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük karıştırma sıcaklığı arasındaki akma değeri farkının %19,5 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.10. Marshall oranı deney sonuçları

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerleri stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlanması ile bulunmuştur. Şekil 5.10'da görüldüğü üzere karıştırma sıcaklığının azalması ile MQ değerlerinin genel olarak azalmıştır. Bütün bağlayıcılarda en yüksek MQ değerine dolayısıyla en yüksek kalıcı deformasyona karşı dayanıma, karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük MQ değerlerine ise saf bağlayıcı ve %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımların sahip olduğu, %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda ise karıştırma sıcaklığından 15°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük MQ değerleri arasındaki farkın %11,3

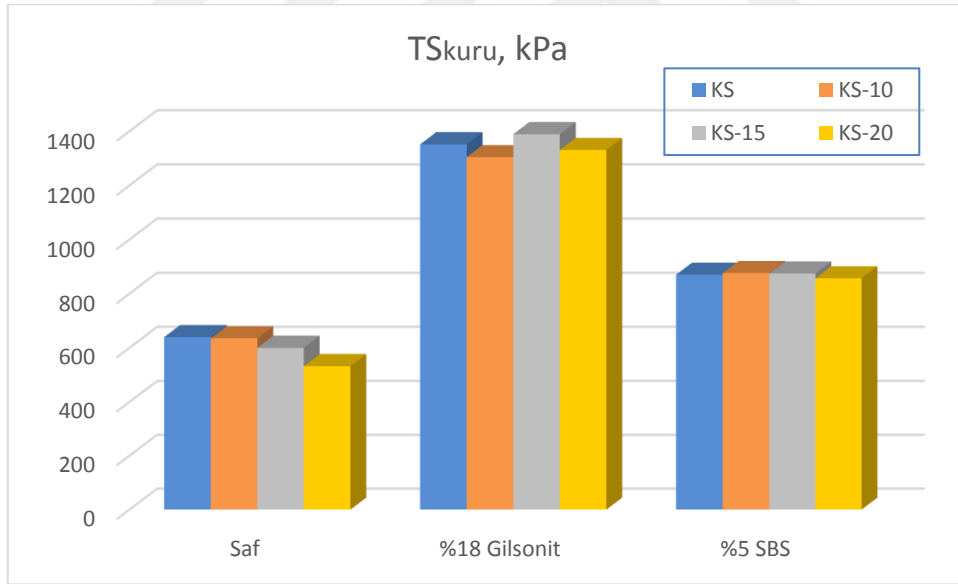
olduğu, %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlarda ise %97,4 olduğu, %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda ise bu farkın %20,4 olduğu tespit edilmiştir.

5.2. AASHTO T 283 nem hasarına karşı dayanım deney sonuçları

Çalışmada karışımların nem hasarına karşı dayanımını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 standardına uygun olarak numuneler hazırlanarak deneye tabi tutulmuştur. Çalışmada öncelikle üç farklı bağlayıcı (saf, %5 SBS ve %18 Gilsonit modifiyeli bitüm) kullanılarak karıştırma sıcaklığında, karıştırma sıcaklığından 10°C, 15°C ve 20°C daha düşük sıcaklıklarda karışım numuneleri hazırlanmıştır. Her bir bağlayıcı türü ve her bir karıştırma sıcaklığı için 6 olmak üzere bu deney için toplam 72 Superpave BSK numunesi hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin nem hasarına karşı dayanımlarının daha net bir şekilde belirlenebilmesi için numuneler $\pm 0,5$ hava boşluğunda hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler özgül ağırlıkları birbirine yakın olacak şekilde iki gruba ayrılmıştır. Ardından birinci grup boşlukları %80 oranında suyla dolacak şekilde vakuma tabi tutulmuştur. Bu numuneler -18°C sıcaklıkta 16 saat bekletilmiş ardından 60°C suda 24 saat süreyle bekletilmiştir. Normal deney prosedüründe 1 döngü uygulanması gerekirken bu çalışmada karıştırma sıcaklığının bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı etkisini değerlendirebilmek için 5 donma çözülme periyodu uygulanmıştır. 5. periyodun sonunda numuneler 25°C suda 2 saat bekletilerek 50,8 mm/dak hızla yükleme yapılarak kırılmıştır. İkinci grup numuneler ise 25°C suda 2 saat bekletilerek 50,8 mm/dak hızla yükleme yapılarak kırılmıştır. Çalışmada koşullandırılmamış numuneler TS_{kur} , koşullandırılmış numuneler $TS_{yaş}$ olarak isimlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca nem hasarına karşı dayanımın göstergesi olan koşullandırılmış numunelerin TS değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin TS değerine oranlanması ile belirlenen çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri değerlendirilmiştir. Nem hasarına karşı dayanım deneyine tabi tutulan numuneler Şekil 5.11’de görülmektedir. Karışımların TS_{kur} değerleri Şekil 5.12’de, $TS_{yaş}$ değerleri Şekil 5.13’de ve TSR değerleri Şekil 5.14’te verilmiştir.



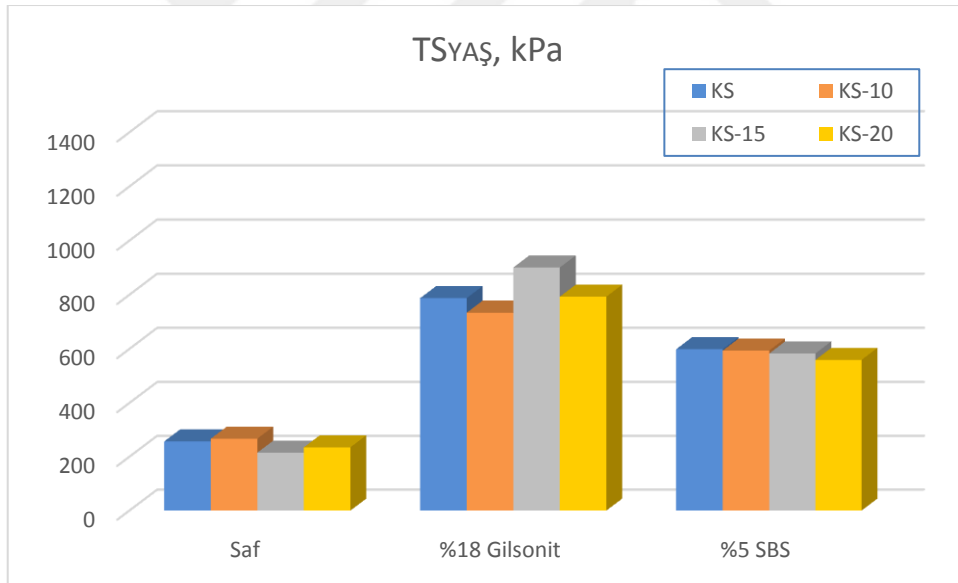
Şekil 5.11. Nem hasarına karşı dayanım deneyine tabi tutulan numuneler



Şekil 5.12. Koşullandırılmamış numunelerin TS değerleri

Koşullandırılmamış karışımların çekme dayanımı oranı değerleri incelendiğinde (Şekil 5.12), katkı kullanımı ile çekme dayanımının önemli oranda arttığı görülmektedir. Saf karışımda karıştırma sıcaklığının azalması ile TS değerlerinde düzenli bir azalma meydana gelmiştir. %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığının azalması ile TS değerlerinde düzenli bir değişim gözlenmemiştir. Saf karışımda en yüksek TS değerine karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımın, en

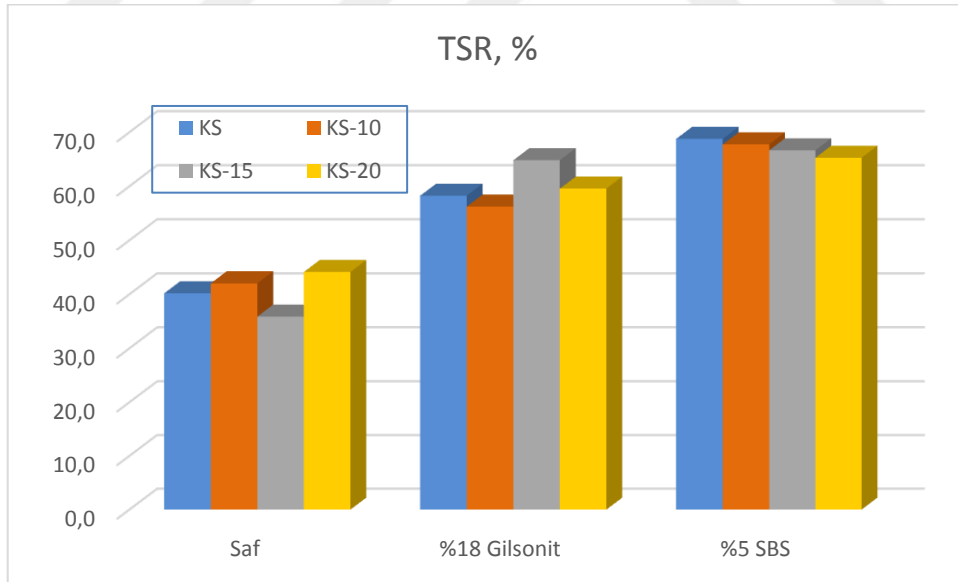
düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük TS değerleri arasındaki farkın %20,1 olduğu tespit edilmiştir. %18 Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlarda en yüksek değere karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. %18 Gilsonit içeren modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük TS değerleri arasındaki farkın %6,5 olduğu tespit edilmiştir. %5 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımda değerler birbirine çok yakın olmakla birlikte en yüksek değere karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük TS değerleri arasındaki farkın %2,3 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. Koşullandırılmış numunelerin TS değerleri

Koşullandırılmış karışımların çekme dayanımını gösteren Şekil 5.13 incelendiğinde katkı kullanılan karışımların çekme dayanımı değerlerinin saf karışıma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Koşullandırma sonrasında %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan BSK numunelerinin TS değerleri karıştırma sıcaklığındaki azalma ile düzenli bir şekilde azalırken diğer bağlayıcılarla (saf ve %18 Gilsonit modifiyeli bitümler) hazırlanan modifiye bitümlerin TS değerlerinin karıştırma sıcaklığındaki azalma ile

düzenli bir şekilde değişmediği belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda koşullandırma sonrası en yüksek değere karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma sonrası saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük TS değerleri arasındaki farkın %24,1 olduğu tespit edilmiştir. %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlarda koşullandırma sonrası en yüksek TS değerine karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük TS değerine ise karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu, en düşük ve en yüksek TS değerleri arasındaki farkın %22,7 olduğu tespit edilmiştir. %5 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlarda koşullandırma sonrası en yüksek çekme dayanımına karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımın, en düşük çekme dayanımına ise karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu, en yüksek ve en düşük TS değerleri arasındaki farkın %7,0 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.14. Karışımların çekme dayanımı oran (TSR) değerleri

Şekil 5.14'te görülen çekme dayanımı oranı değerleri incelendiğinde 5 kez üst üste koşullandırma yapıldığından hiçbir karışımın Superpave şartname limitini (min %80) karşılamadığı belirlenmiştir. Fakat en kötü TSR değerinin bile 5. donma çözülme döngüsü

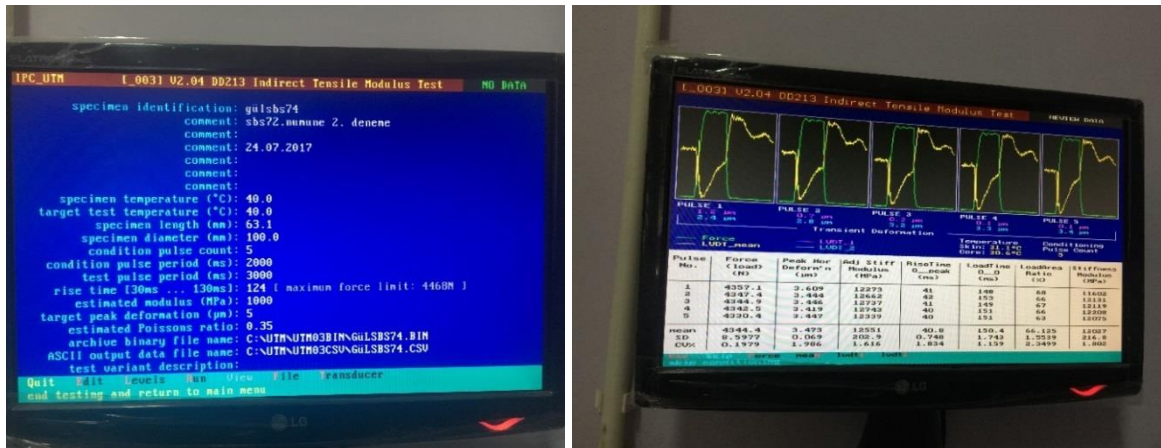
sonunda bile %40 mertebesinde olması karışımların tamamının şartname limitini sağlayacağı fikrini desteklemektedir.

Karışımlar değerlendirildiğinde en düşük TSR değerlerine saf karışımın en yüksek TSR değerlerine ise %5 SBS modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımı ile TSR değerleri artmıştır. SBS'in Gilsonit'e göre nem hasarına karşı dayanım açısından daha etkin olduğu belirlenmiştir.

%5 SBS modifiyeli bağlayıcıyla hazırlanan karışımda karıştırma sıcaklığı düştükçe TSR değerleri düzenli bir şekilde azalmış, diğer iki bağlayıcıyla hazırlanan karışımlarda bu değerlerin düzenli değişmediği belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en düşük TSR değerine karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en yüksek değere ise 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu, en düşük değerle en yüksek değer arasındaki farkın %23,0 olduğu belirlenmiştir. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek çekme dayanımı oranı değerine karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu, en düşük ve en yüksek değer arasındaki farkın %15,2 olduğu belirlenmiştir. %5 SBS modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek çekme dayanımı oranı değerine karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımın, en düşük değere ise karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu, en düşük ve en yüksek değer arasındaki farkın %5,3 olduğu belirlenmiştir.

5.3. İndirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçları

Tez çalışmasında Fırat Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı'nda bulunan Universal Test Cihazı (UTM-5) kullanılarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. Deneyde kullanılan ara yüz Şekil 5.15'de görülmektedir.

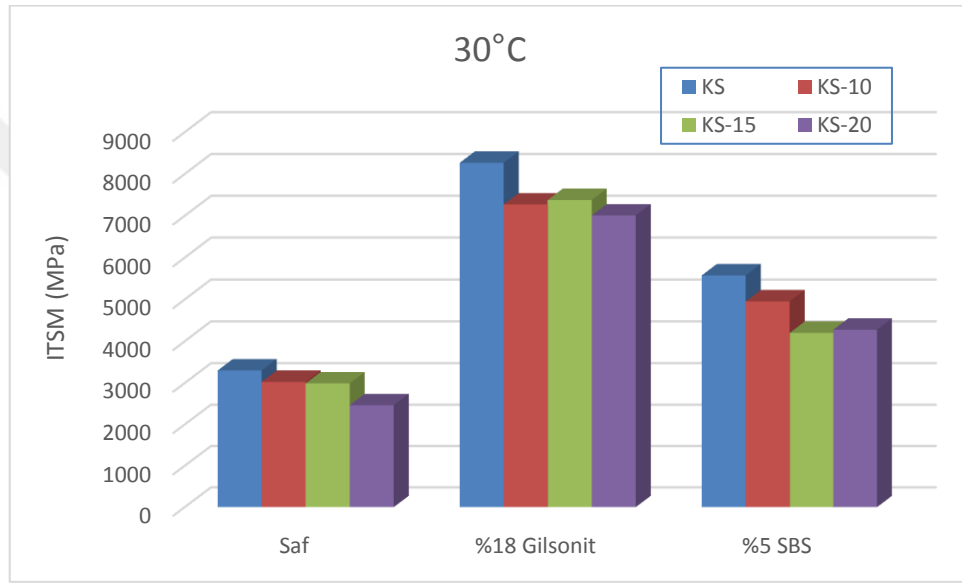


ITSM deneyi saf, %5 SBS ve %18 Gilsonit içeren modifiye bitümlerle karıştırma sıcaklıklarında, karıştırma sıcaklıklarından 10°C, 15°C ve 20°C daha düşük sıcaklıklarda karıştırılan karışım numuneleri üzerinde 30°C ve 40°C sıcaklıklarda uygulanmıştır. 30°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları Şekil 5.16’da, 40°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları ise Şekil 5.17’de görülmektedir.

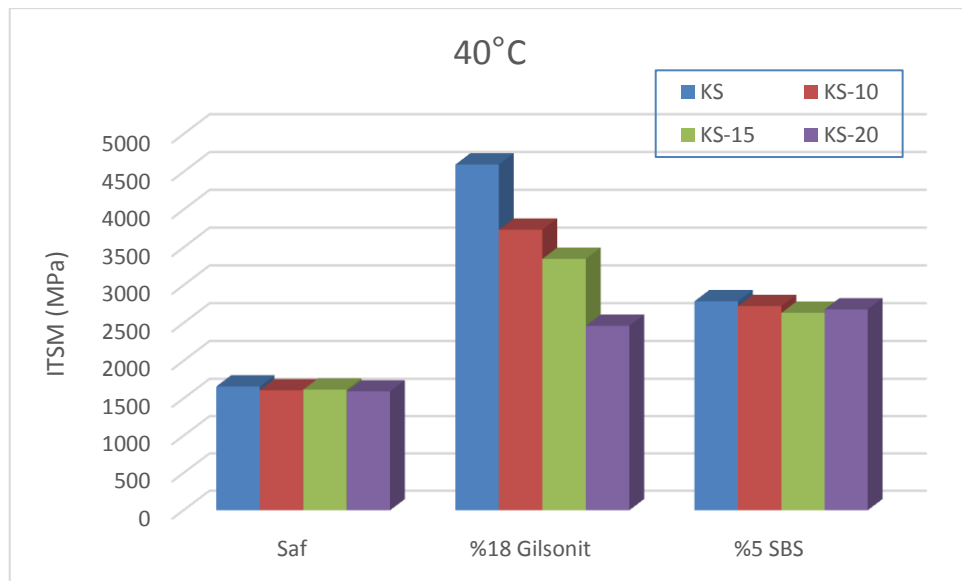
Bitümlü sıcak karışım numunelerine 30°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçlarının verildiği Şekil 5.13’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile ITSM değerleri önemli oranda artmıştır. En yüksek ITSM değerine %18 Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların en düşük ITSM değerlerine ise saf bağlayıcı ile hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin sahip olduğu belirlenmiştir.

Karıştırma sıcaklığındaki değişimin 30°C sıcaklıktaki ITSM değerleri üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde karıştırma sıcaklığındaki azalma ile ITSM değerlerinin genel olarak azaldığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığının 10°C azalması sonucun ITSM değeri %8,9 azalırken karıştırma sıcaklığının 15°C azalması sonucun ITSM değeri %10,3 ve 20°C azalması sonucun ITSM değeri %33,9 oranında azalmıştır. %18 Gilsonit içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların ITSM değerleri karşılaştırıldığında karıştırma sıcaklığının olması gereken değerden 10°C düşük olması durumunda ITSM değeri %13,7; 15°C düşük olması durumunda %12,1 ve 20°C düşük olması durumunda %18 daha düşük olduğu belirlenmiştir. %5 SBS içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların ITSM değerleri karşılaştırıldığında karıştırma sıcaklığının olması gereken değerden 10°C düşük olması durumunda ITSM değeri %12,5;

15°C düşük olması durumunda %32,7 ve 20°C düşük olması durumunda %30,4 daha az olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan karıştırma sıcaklığının 10°C daha düşük olması durumunda %18 Gilsonit modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların, 15°C daha düşük olması durumunda %5 SBS modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların daha fazla etkileneceği, 20°C azalması durumunda ise saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın daha fazla etkileneceği söylenebilmektedir.



Şekil 5.16. 30°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları



Şekil 5.17. 40°C sıcaklıkta uygulanan ITSM deney sonuçları

BSK numunelerine 40°C sıcaklıkta uygulanan indirekt çekme rijitlik modülü deney sonuçlarının görüldüğü Şekil 5.17 incelendiğinde 30°C sıcaklıkta olduğu gibi katkı kullanımı ile ITSM değerlerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. En yüksek ITSM değerlerine %18 Gilsonit içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların, en düşük ITSM değerine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karıştırma sıcaklığının azalması ile ITSM değerleri azalmasına rağmen özellikle saf bağlayıcı ve %5 SBS ile hazırlanan karışımların ITSM değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda en yüksek ve en düşük ITSM değerleri arasında %4,0 fark oluşurken %5 SBS modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlar arasında %5,9 fark oluşmuştur. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığının 10°C azalması sonucun ITSM değeri %23,1 azalırken karıştırma sıcaklığının 15°C azalması sonucun ITSM değeri %37,3 ve 20°C azalması sonucun ITSM değeri %86,6 oranında azalmıştır.

Karışımlarda 30°C'deki ITSM değerlerinin 40°C'deki ITSM değerlerine oranları Tablo 5.5'te görülmektedir.

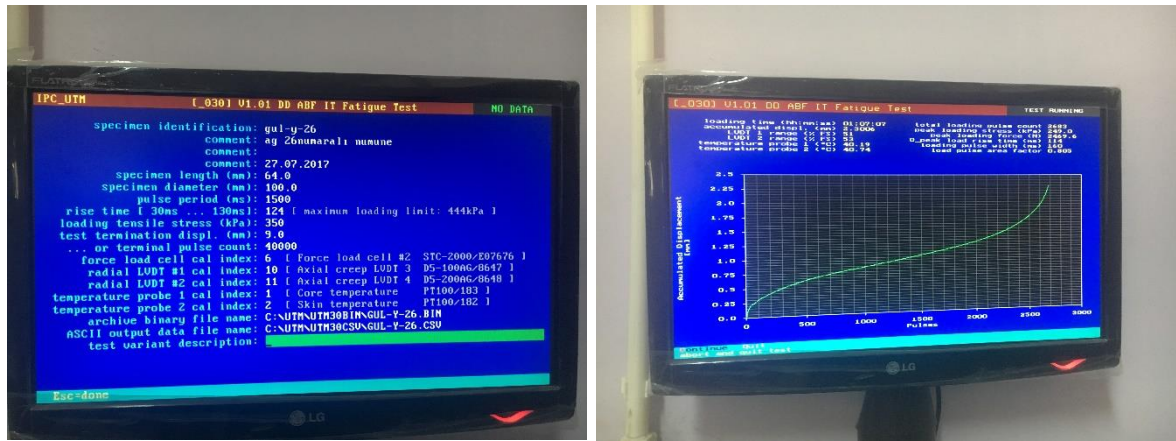
Tablo 5.5. Karışımların 30°C'deki ITSM değerlerinin 40°C'deki ITSM değerlerine oranı

Bağlayıcı Türü	KS	KS-10	KS-15	KS-20
Saf	1,991	1,884	1,852	1,547
%18 Gilsonit	1,799	1,948	2,204	2,845
%5 SBS	2,000	1,820	1,595	1,596

Tablo 5.5.'te görüldüğü üzere saf bağlayıcı ve %5 SBS modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığı azaldıkça ITSM değerleri üzerinde sıcaklığın etkisi azalmıştır. %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlarda ise karıştırma sıcaklığı azaldıkça farkın arttığı dolayısıyla sıcaklığın etkisinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca oranlar dikkate alındığında sıcaklıktaki değişimden en az etkilenen karışımın karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta saf bağlayıcı ile hazırlanan karışım olduğu, en fazla etkilenen karışımın ise %18 Gilsonit modifiyeli bitüm kullanılarak karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir.

5.4. İndirekt çekme yorulma deney sonuçları

Saf bağlayıcı, %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiye bitüm kullanılarak karıştırma sıcaklığında, karıştırma sıcaklığından 10°C, 15°C ve 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımlar üzerinde indirekt çekme yorulma deneyi uygulanmıştır. Her bir karışım türünden 3 olmak üzere toplam 36 numune bu deney için hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler 40°C sıcaklıkta 3 saat koşullandırılmıştır. Ardından Universal Test Cihazı (UTM) kullanılarak tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Çalışmanın ana amacı karıştırma sıcaklığının BSK'ların performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek olduğundan her bir bağlayıcı türü üzerinde farklı gerilmelerde yorulma deneyi uygulanmıştır. Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlara 200 kPa gerilme seviyesinde, %18 Gilsonit modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlara 350 kPa gerilme seviyesinde, %5 SBS modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlara ise 250 kPa gerilme seviyesinde yorulma deneyi uygulanmıştır. Deney ara yüzü ve deney sonu ekranı Şekil 5.18'de, deneye tabi tutulan numuneler ise Şekil 5.19'da görülmektedir.

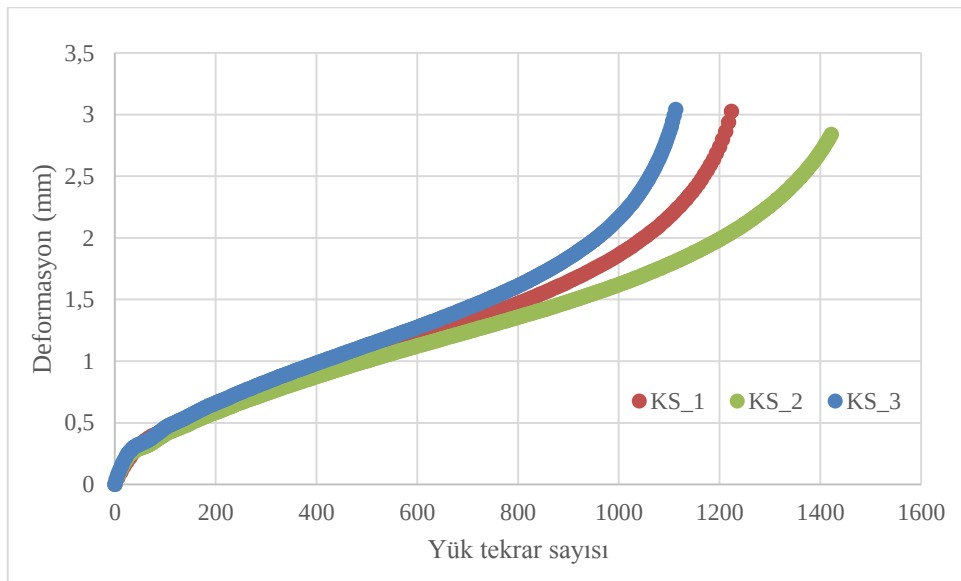


Şekil 5.18. İndirekt çekme yorulma deney ara yüzü ve deney sonu ekranı

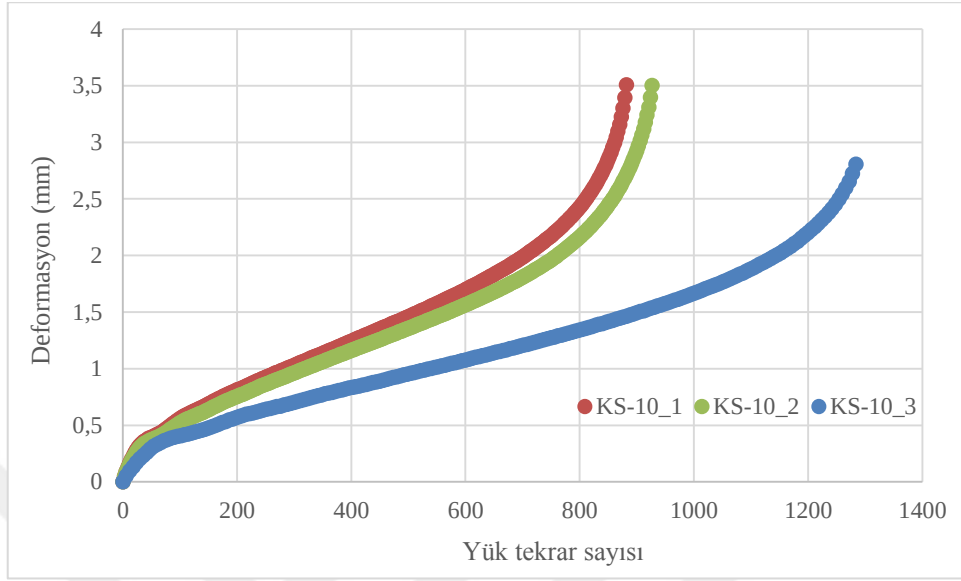


Şekil 5.19. İndirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulan numuneler

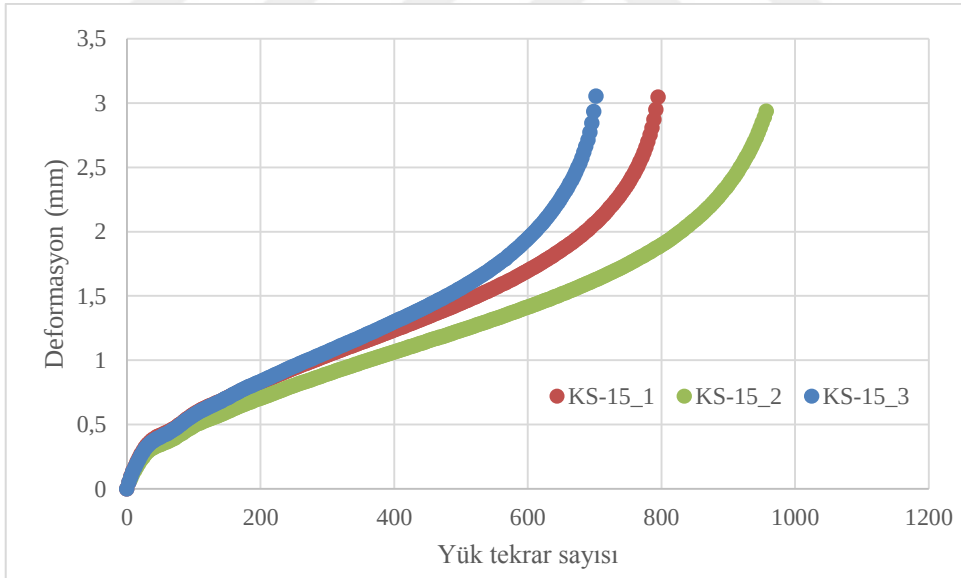
Saf bağlayıcılara uygulanan indirekt çekme yorulma deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.20-5.23’de, %5 SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımlara uygulanan indirekt çekme yorulma deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.24-5.27’de, %18 Gilsonit modifiye bitümle hazırlanan karışımlara uygulanan indirekt çekme yorulma deneyinden elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.28-5.31’de görülmektedir.



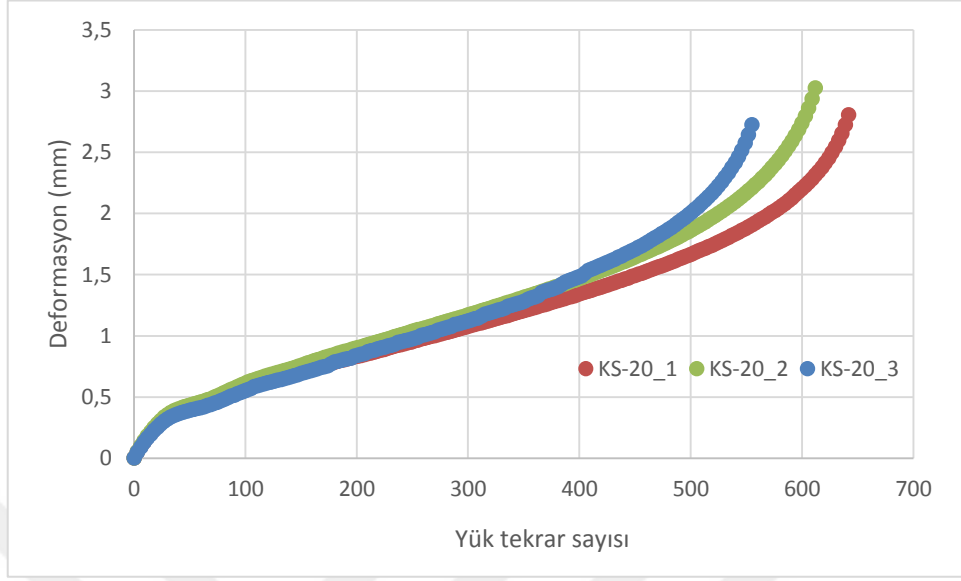
Şekil 5.20. Saf bitümle “KS” hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



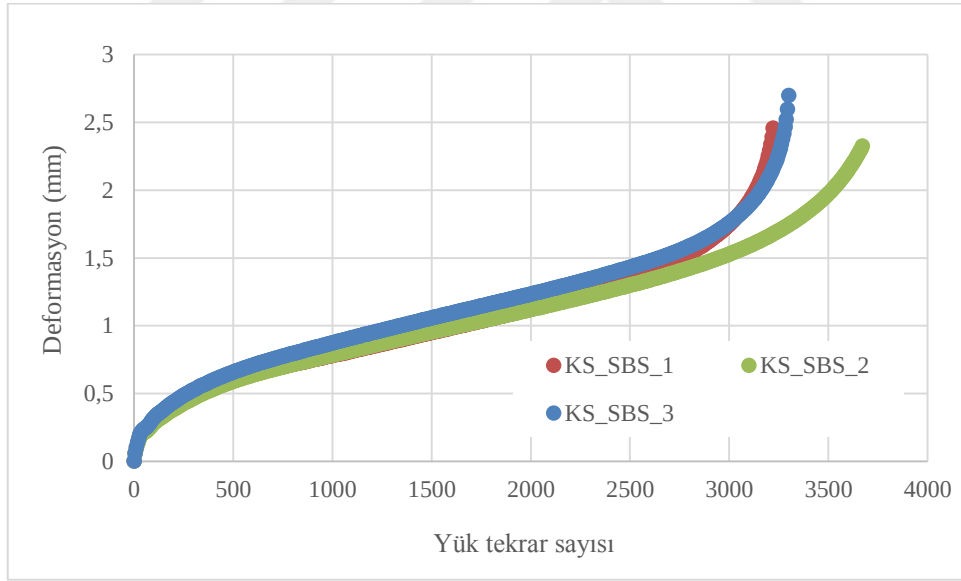
Şekil 5.21. Saf bitümlü “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



Şekil 5.22. Saf bitümlü “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



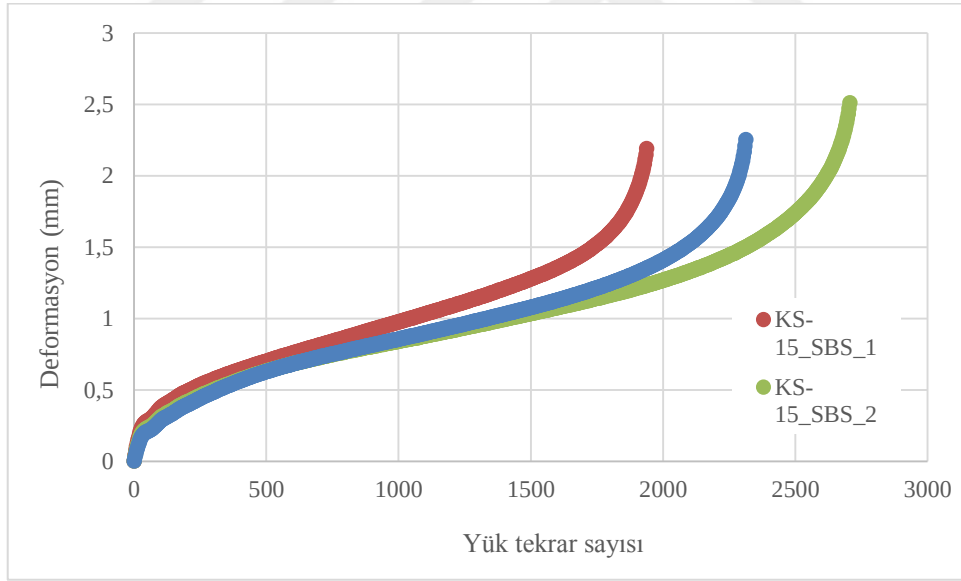
Şekil 5.23. Saf bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 200 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



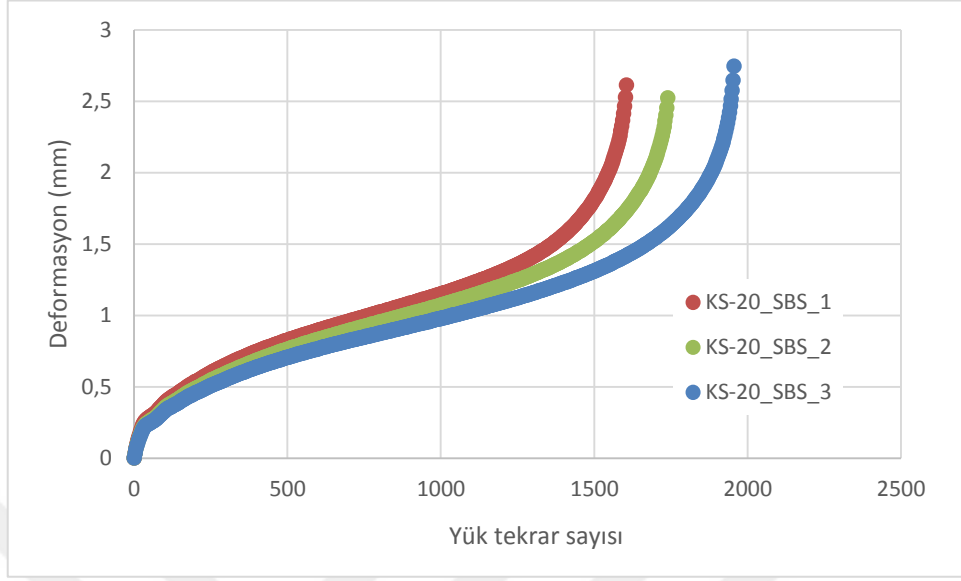
Şekil 5.24. %5 SBS modifiye bitümle “KS” hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



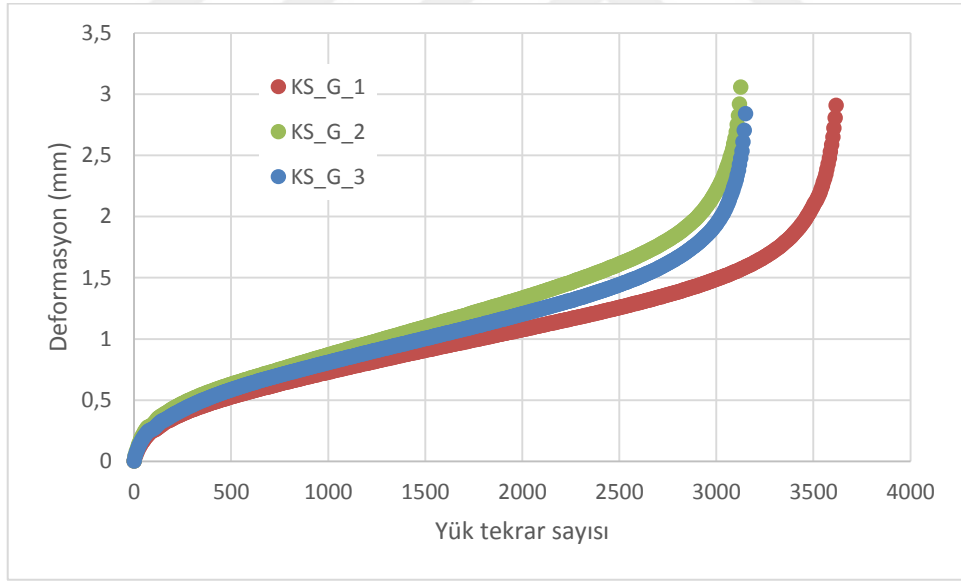
Şekil 5.25. %5 SBS modifiye bitümle “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



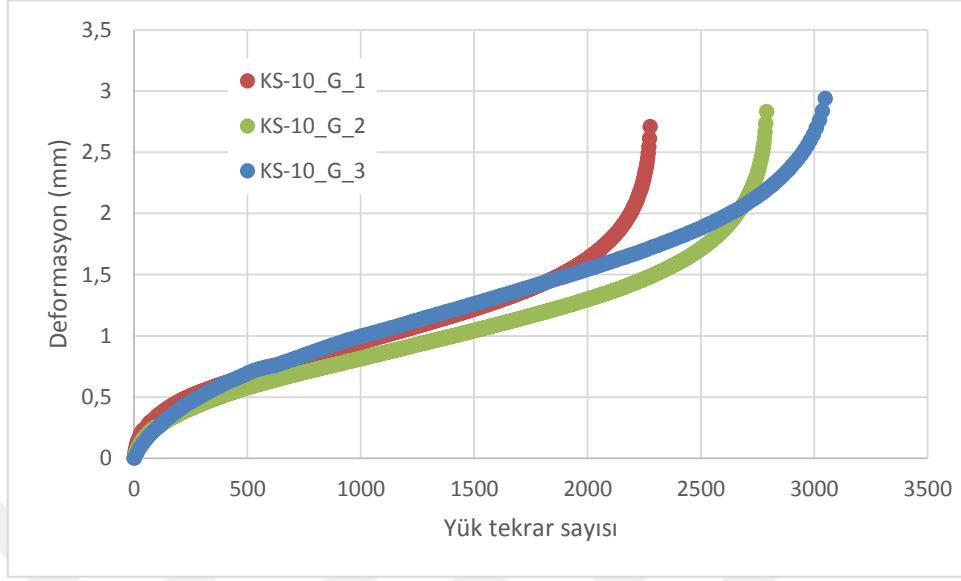
Şekil 5.26. %5 SBS modifiye bitümle “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



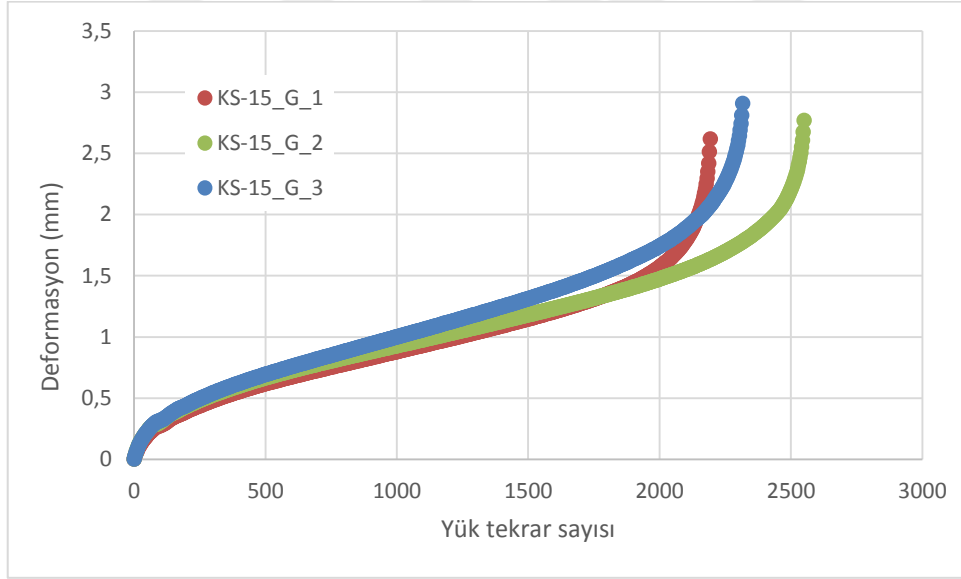
Şekil 5.27. %5 SBS modifiye bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 250 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



Şekil 5.28. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS” hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



Şekil 5.29. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-10” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları



Şekil 5.30. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-15” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları

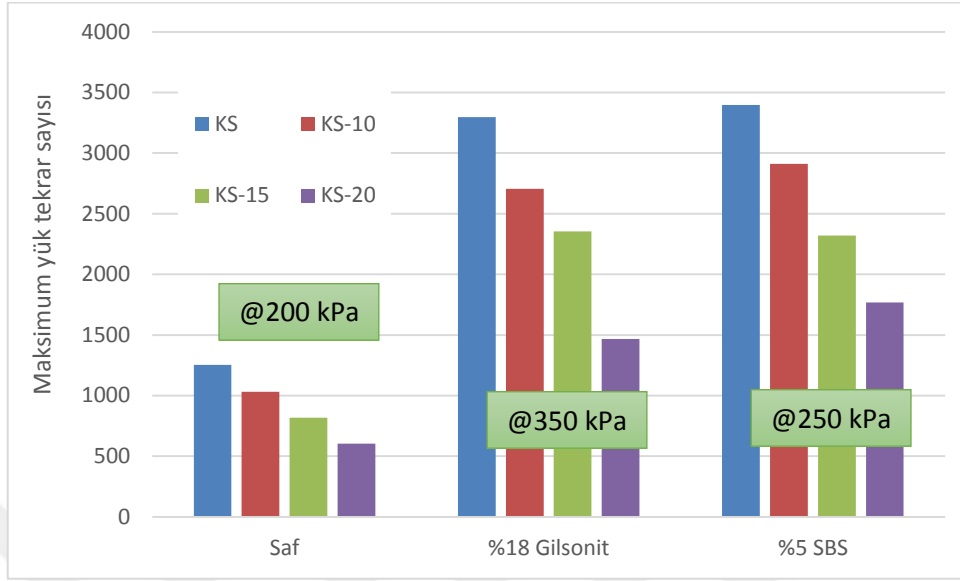


Şekil 5.31. %18 Gilsonit modifiye bitümle “KS-20” derecede hazırlanan numunelere 350 kPa gerilme seviyesinde uygulanan İÇY deney sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi numune kırılıncaya kadar devam ettirilmiştir. Böylece maksimum yük tekrar sayıları ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri yazılım sayesinde elde edilmiştir. Ardından deney sonuçları Excel ortamına aktarılarak 2. ve 3. bölgelerin kesişim noktalarından karışımların yorulma ömürleri belirlenmiştir. Böylece yorulma ömürlerine karşılık gelen deformasyon değerleri deney sonuçlarından elde edilmiştir. Karışımların maksimum yük tekrar sayıları, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri, yorulma ömürleri ve yorulma ömürlerindeki deformasyon değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Ayrıca karışımların maksimum yük tekrar sayıları Şekil 5.32’de, maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon değerleri Şekil 5.33’de, yorulma ömürleri Şekil 5.34’te ve yorulma ömürlerindeki deformasyon değerleri Şekil 5.35’de verilmiştir. Şekillerdeki değerleri tablodaki 3 değerın ortalamasından elde edilmiştir.

Tablo 5.6. İndirekt çekme yorulma deney sonuçları

	Numune No	Maksimum yük tekrar sayısı				Maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon (mm)			
		KS	KS-10	KS-15	KS-20	KS	KS-10	KS-15	KS-20
Saf	1	1224	882	795	642	3,025	3,508	3,045	2,806
	2	1422	927	957	612	2,838	3,5	2,936	3,025
	3	1113	1284	702	555	3,041	2,806	3,054	2,723
%18 Gilsonit	1	3618	2277	2193	1113	2,908	2,708	2,617	3,091
	2	3126	2790	2550	1713	3,055	2,83	2,769	2,898
	3	3150	3049	2316	1575	2,839	2,939	2,907	2,697
%5 SBS	1	3222	3084	1938	1605	2,456	2,296	2,189	2,612
	2	3672	2985	2706	1740	2,323	2,703	2,51	2,522
	3	3300	2664	2313	1956	2,697	2,463	2,252	2,745
	Numune No	Yorulma ömrü				Yorulma ömründeki deformasyon (mm)			
		KS	KS-10	KS-15	KS-20	KS	KS-10	KS-15	KS-20
Saf	1	1170	828	741	609	2,509	2,304	2,303	2,283
	2	1332	846	870	573	2,374	2,414	2,184	2,372
	3	1056	1200	657	516	2,455	2,2	2,32	2,135
%18 Gilsonit	1	3474	2178	2118	1077	2,014	1,963	1,851	2,462
	2	3048	2676	2448	1653	2,063	2,039	2,015	2,239
	3	3018	2930	2214	1464	1,979	2,45	2,139	1,723
%5 SBS	1	3018	2922	1854	1551	1,769	1,883	1,725	2,024
	2	3498	2856	2619	1665	1,969	1,996	2,002	1,923
	3	3156	2541	2238	1872	1,987	1,828	1,798	1,958

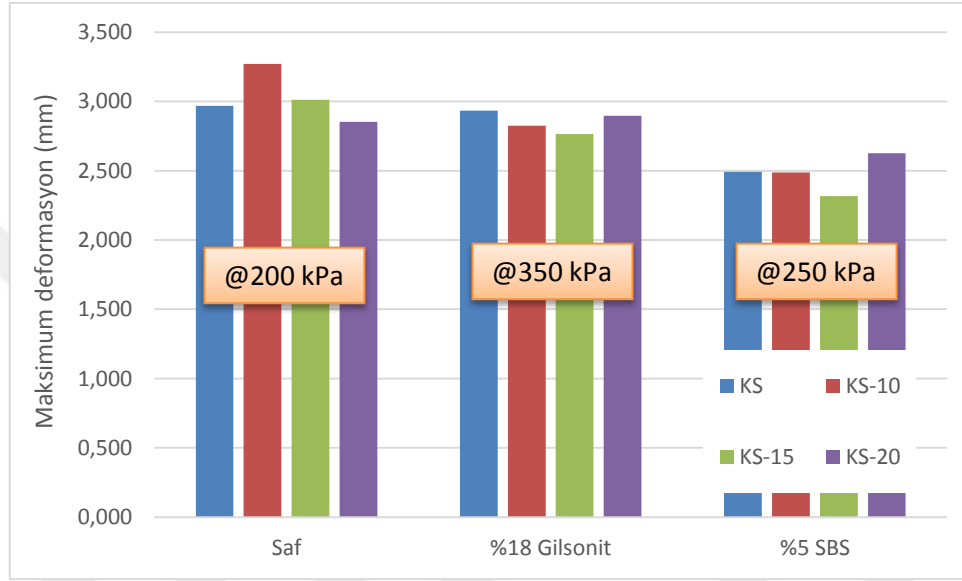


Şekil 5.32. Karışımların maksimum yük tekrar sayıları

Şekil 5.32’de görülen maksimum yük tekrar sayıları incelendiğinde modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlara daha yüksek gerilme uygulanmasına rağmen modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda maksimum yük tekrar sayılarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Katkı türleri karşılaştırıldığında ise %18 Gilsonit ile hazırlanan karışımlara daha yüksek gerilme uygulanmasına rağmen %5 SBS modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarla benzer maksimum yük tekrar sayısı değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle yorulma deneylerinden en iyi sonucu %18 Gilsonit modifiyeli bitümle hazırlanan karışımın sahip olduğu söylenebilmektedir. Bütün bağlayıcılarda karıştırma sıcaklığı azaldıkça maksimum yük tekrar sayısı değerlerinin düzenli olarak azaldığı belirlenmiştir.

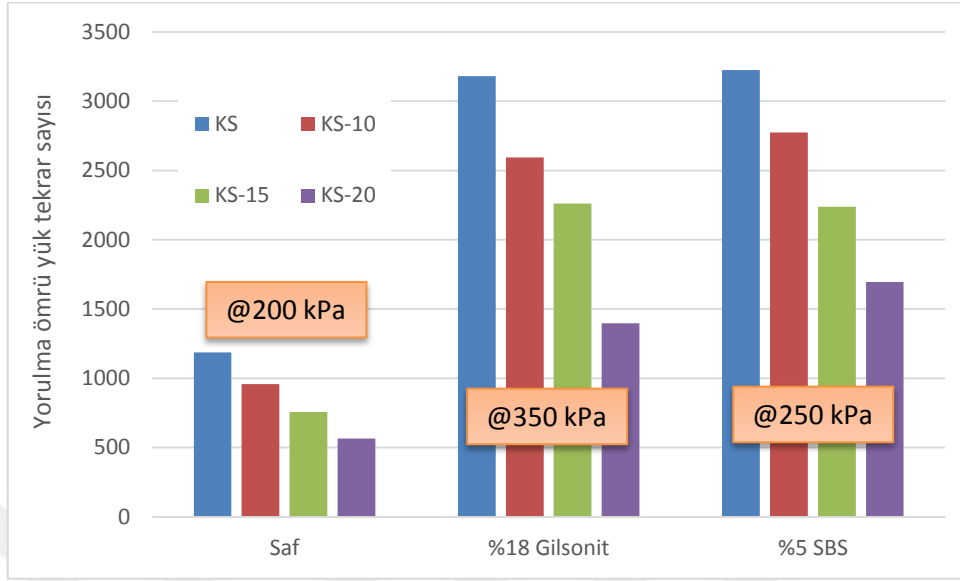
Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığının olması gerekenden 10°C azalması durumunda maksimum yük tekrar sayısı %17,7 azalırken karıştırma sıcaklığının 15°C azalması durumunda %34,7 ve 20°C azalması durumunda %51,9 oranında azalmıştır. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlar dikkate alındığında karıştırma sıcaklığının 10°C, 15°C ve 20°C azalması ile maksimum yük tekrar sayısı sırasıyla %18,0; %28,7 ve %55,5 oranında azalmıştır. %5 SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında ise karıştırma sıcaklığının 10°C, 15°C ve 20°C azalması ile maksimum yük tekrar sayısı sırasıyla %14,3; %31,8 ve %48,0 oranında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan karıştırma sıcaklığının 10°C ve 20°C azalması durumunda maksimum yük tekrar sayısında en fazla azalmanın %18 Gilsonit modifiye

bitümle hazırlanan karışımda, 15°C azalması durumunda ise en fazla azalmanın saf bitümle hazırlanan karışımda olduğu belirlenmiştir. Özellikle karıştırma sıcaklığının 20°C azalması durumunda maksimum yük tekrar sayısının yaklaşık %50 azalması tekrarlı yükleme durumunda karıştırma sıcaklığının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.



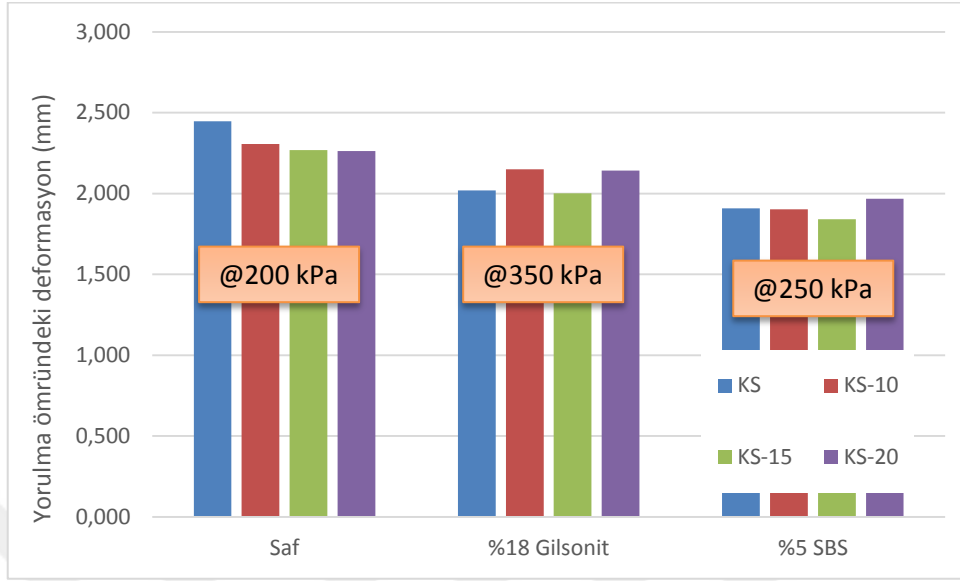
Şekil 5.33. Karışımların maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri

Karışımların maksimum yük tekrar sayısındaki deformasyon değerleri incelendiğinde (Şekil 5.33) saf bağlayıcıda en yüksek deformasyon değerine karıştırma sıcaklığından 10°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, en düşük deformasyon değerine ise karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında en düşük deformasyon değerlerine karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum saf bağlayıcı kullanılması durumunda karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta karışımların hazırlanmış olması, %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlarda ise karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta karışımların hazırlanması durumunda karışımlarda daha gevrek kırılmasının gözleneceğini göstermektedir.



Şekil 5.34. Karışımların yorulma ömürleri

Karışımların yorulma ömürleri değerleri incelendiğinde maksimum yük tekrar sayıları ile benzer değişimlerin meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 5.34). Saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığının olması gerekenden 10°C azalması durumunda yorulma ömrü yük tekrar sayısı %19,2 azalırken karıştırma sıcaklığının 15°C azalması durumunda %36,3 ve 20°C azalması durumunda %52,3 oranında azalmıştır. %18 Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımlar dikkate alındığında karıştırma sıcaklığının 10°C, 15°C ve 20°C azalması ile yorulma ömrü yük tekrar sayısı sırasıyla %18,4 ; %28,9 ve %56,0 oranında azalmıştır. %5 SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında ise karıştırma sıcaklığının 10°C, 15°C ve 20°C azalması ile yorulma ömrü yük tekrar sayısı sırasıyla %14,0 ; %30,6 ve %47,4 oranında azalmıştır. Elde edilen sonuçlardan karıştırma sıcaklığının 10°C ve 15°C azalması durumunda yorulma ömrü yük tekrar sayısında en fazla azalmanın saf bitümle hazırlanan karışımda, 20°C azalması durumunda ise en fazla azalmanın %18 Gilsonit modifiye bitümle hazırlanan karışımda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.35. Karışımların yorulma ömürlerindeki deformasyon değerleri

Karışımların yorulma ömürlerindeki deformasyon değerleri incelendiğinde (Şekil 5.35) saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda karıştırma sıcaklığından 20°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın, %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımın ise karıştırma sıcaklığından 15°C düşük sıcaklıkta hazırlanan karışımın en düşük deformasyona sahip olduğu bu durum bu karışımların daha gevrek kırılmaya neden olacağını göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Tez çalışmasında üç farklı bağlayıcı (saf bitüm, %18 Gilsonit ve %5 SBS modifiyeli bitüm) ve kalker türü kırmataş kullanılarak 4 farklı sıcaklıkta (karıştırma sıcaklığında, karıştırma sıcaklığından 10°C, 15°C ve 20°C düşük sıcaklıklarda) toplam 144 karışım numuneleri hazırlanmıştır. Karıştırma sıcaklığı değerleri viskozite değerleri kullanılarak (170 cP'e karşılık gelen değer) belirlenmiştir. Karışım numuneleri Superpave yoğurmalı presi kullanılarak hazırlanmıştır. Karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, AASHTO T283 nem hasarına karşı dayanım, İndirekt çekme rijitlik modülü ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanarak karıştırma sıcaklığının bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda katkı kullanımı ile stabilite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca karıştırma sıcaklığının azalması ile genel olarak karışımların stabilite ve MQ değerlerinin azaldığı ve akma değerlerinin arttığı söylenebilmektedir. Karıştırma sıcaklığındaki değişimden en fazla etkilenen karışımın %18 Gilsonit içeren karışım olduğu belirlenmiştir.

Nem hasarı deney sonuçları karşılaştırıldığında hem koşullandırmadan önce hem de koşullandırmadan sonra katkı kullanımı ile çekme dayanımı değerlerinin arttığı, çekme dayanımı değerleri üzerinde Gilsonit'in SBS'e göre daha etkin olduğu fakat nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı değerleri üzerinde ise SBS'in Gilsonit'e göre daha etkin olduğu belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığının çekme dayanımı ve çekme dayanımı oranı değerleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde düzenli bir değişim olmamakla birlikte genel olarak karıştırma sıcaklığının azalması ile çekme dayanımı değerlerinin azaldığı söylenebilmektedir.

ITSM deney sonuçları dikkate alındığında hem 30°C sıcaklıkta hem de 40°C sıcaklıkta katkı kullanımı ile ITSM değerlerinin arttığı, en etkin katkının Gilsonit olduğu belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığının azalması ile her iki sıcaklıkta ITSM değerleri de azalmıştır. Sıcaklığın 30°C'den 40°C'ye çıkması durumunda en fazla etkilenen karışımın bağlayıcı olarak %18 Gilsonit içeren modifiye bitümün kullanıldığı, karıştırma sıcaklığından 20°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir.

İndirekt çekme yorulma deneyleri incelendiğinde katkı kullanımı ile karışımların yorulma ömürlerinin arttığı, en etkin katkının Gilsonit olduğu belirlenmiştir. Karıştırma

sıcaklığı azaldıkça bütün karışımlarda yorulma ömrü değerleri azalmıştır. Bu durum karıştırma sıcaklığındaki azalmanın karışımın yorulma performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Deformasyon değerleri incelendiğinde ise karıştırma sıcaklığındaki azalma ile düzenli bir değişimin olmadığı söylenebilmektedir.

Bütün deney sonuçları dikkate alındığında katkı kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerinin olumlu etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca karıştırma sıcaklığının olması gerekenden düşük olması durumunda karışımların performansının olumsuz etkileneceği özellikle yorulma ömrünün büyük oranda olumsuz etkileneceği söylenebilmektedir. Karıştırma sıcaklığının etkisinin değerlendirilmesinde dinamik deney yöntemlerinin (ITSM ve indirekt çekme yorulma) statik deney yöntemlerine (Marshall stabilite ve akma, TS) göre daha hassas sonuç verdiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda üretilen bitümlü sıcak karışımlarda plentte agrega ve bitümün karıştırma sıcaklığına önem gösterilmesinin karışımın performansı açısından büyük önem arz ettiği söylenebilmektedir.

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. **Abbas, A.R.**, 2004. Simulation of the micromechanical behavior of asphalt mixtures using the discrete element method, *Doctor of Philosophy in Civil Engineering Washington State University*, 180p.
3. **Aflaki, S. and Tabatabaee, N.**, 2009. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran, *Construction and Building Materials*, **23**, 2141–2150.
4. **Afshari, G., Imami, H. and Gholipour, M.**, 2006. Bitumen modified by Gilsonite, furfural extract and polymers, *Journal of Polymer Science And Technology*, Iran.
5. **Airey, G.D.**, 2002. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, **16 (8)**, 473-487.
6. **Airey, G.D.**, 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, **82 (14)**, 1709-1719.
7. **Airey, G.D.**, 2004. Styrene-butadiene-styrene polymer modification of road bitumens, *Journal of Materials Science*, **39**, 951-959.
8. **Ameri, M., Mansourian, A., Salehi, S. and Yadollahi, G.**, 2010. Technical study on the Iranian Gilsonite as additive for modification of asphalt binders use in pavement construction, *Construction and Building Materials*, **25 (3)**, 1379-1387.
9. **Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S. and 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 (3)**, 1379–1387.
10. **Ameri, M., Mansourian, A. and Ziari, H.**, 2011b. Experimental investigation of the effect of Gilsonite on performance of hot-mix asphalt, *Transportation Research Journal*, **2 (1)**, 1–8.
11. **Anderson D.A., Maurer D., Ramirez T., Christensen D.W., Marasteanu M.O. and Mehta Y.**, 1999. Field performance of modified asphalt binders evaluated with superpave test methods: 1–80 test Project, *Transportation Research Record*, **1661**, 60–68.

12. **Aragao F.T.S., Lee J., Kim Y.R. and 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)**, 538-544.
13. **Asphalt Institute,** 1996. Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types, *Asphalt Institute*, Manual Series No.2 (MS-2), Kentucky.
14. **Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai H., Khatri M.A. and Anderson, R.M.,** 2001. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design, *NCHRP report*, 459.
15. **Balta, İ.,** 2004. Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
16. **Bardesi, A., Brule, B., Corte, J.F., Diani, E., Gerritsen, A., Lefevre, G., Watkins, S.,** 1999. Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications, *Technical Committee Flexible Roads (C8) World Road Association (PIARC)*, Paris, France.
17. **Chen, J.S. and Tsai, C.J.,** 1999. How good are linear viscoelastic properties of asphalt binder to predict rutting and fatigue cracking? *Journal of Materials Engineering and Performance*, **8**, 443–449.
18. **Cholewińska, M. and Iwański, M.,** 2011. Modification of petroleum road bitumen 50/70 with natural asphalt Gilsonite, *Structure & Environment*, **3 (2)**, 5–10.
19. **Çolak, K.M.,** 2006. Asfalt kaplamalarda sinerjetik fayda konusunun anlaşılmasında marshall oranı yaklaşımının kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
20. **Davis II, Neal, Tooman and Clyde E.,** 1989. New laboratory tests evaluate the effectiveness of gilsonite resin as a borehole stabilizer, *J SPE Drilling Engineering*, **4 (1)**, 47–56.
21. **Department of Transportation,** 2012. New methods of asphalt mix design based on performance and proposing appropriate methods across country, first ed., *Transportation Research Institute*, Iran.
22. **Dong, F., Liu, X., Yu, S. and Wei, J.,** 2016. Rheological behaviors and microstructure of SBS/CR composite modified hard asphalt, *Construction and Building Materials*, **115**, 285–293. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.057.

23. **EAPA**, 2014. Asphalt in figures, *European Asphalt Pavement Association*, Brussels.
24. **Ergül, Y.**, 2015. Obtaining of modified bitumen with optimum quality through mixing of natural bitumen (Gilsonite), bitumen and thinner oil, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, **1 (3-4)**, 103–107.
25. **Eribol, S., Orhan, F. ve Önal, M.A.**, 2002, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şube Müdürlüğü, 94s.
26. **Ertekin, S.B.**, 2003. Polyefin katkıların asfaltın kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 19-52.
27. **Esfeh, H.K., Ghanavati, B. and GhaleGolabi, T.**, 2011. Properties of modified bitumen obtained from natural bitumen by adding pyrolysis fuel oil, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, **2 (3)**, 168–172.
28. **Francken, L.**, 1998. Bituminous binders and mixes, Rilem Reports, E & FN Spon, 352 p. London and New York.
29. **Feng, X.J., Zha, X.D. and Hao, P.W.**, 2010. Research on design and pavement performance of TLA modified asphalt mixture, *Advanced Materials Research*, **146–147**, 217–220.
30. **Feng, X.J., Zha, X.D. and Hao, P.W.**, 2011. “Research on design and pavement performance of TLA modified asphalt mixture, *The Open Materials Science Journal*, **5 (1)**, 140–146.
31. **Fu, H., Xie, L., Dou, D., Li, L., Yu, M. and Yao, S.**, 2007. Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer, *Construction and Building Materials*, **21 (7)**, 1528-1533. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.03.008
32. **Geçkil, T.**, 2008. Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
33. **Ghile, D.B.**, 2006. Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures, *MSc Thesis*, Delfth University of Technology, Delfth
34. **Hınışhoğlu, S. and Açar, E.**, 2004. Use of the waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, **58**, 267-271.
35. **Ho, S.M.S. and Zanzotta, L.**, 2002. Impact of different types of modification on low temperature tensile strength at critical of asphalt binders, *Transportation Research Board*.

36. Huang, B., Li, G. and Shu, X., 2006. Investigation into three-layered HMA mixtures, *Composites*, **37**, 679–690.
37. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, *İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, **37-46**, 91-97.
38. Jiqing, Z., Bjoörn, B. and Niki, K., 2014. Polymer modification of bitumen: advances and challenges, *European Polymer Journal*, **54**, 18–38.
39. Kandhall, P.S. and Mallick, R.B., 1997. Aggregate tests for hot mix asphalt: State of Practice, NCAT Report No.97-6, Alabama, USA, pp. 10-15.236.
40. Kanitpong, K. and Bahia, H., 2005. Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, **1902**, 33–43. doi: 10.3141/1901-05.
41. Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 258-280s.
42. Khattak M.J. and Baladi GY., 2001. Fatigue and permanent deformation models for polymer-modified asphalt mixtures, *In: Proceeding of The 80th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington DC.
43. Khodaei, A., Tolabi, S. and Dehshiri, M.A., 2014. The effects of using soil RAP and Gilsonite on the safety of intracity and countryside roads, *In: The 14 th International Conference on Traffic and Transportation Engineering*, Tehran, Iran.
44. Kök, B.V. Çolak, H., 2011. Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, **25 (8)**, 3204–3212. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.005.
45. Kök, B.V., 2007. Bitümlü sıcak karışımların üretiminde yeni bir karıştırma yönteminin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
46. Kök, B.V., Yilmaz, M. and Geçkil, A., 2013. Evaluation of low-temperature and elastic properties of crumb rubber– and SBS-modified bitumen and mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**, 257–265, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000590](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000590).
47. Kök, B. V., Yilmaz, M. and Guler, M., 2011. Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel*, **90 (10)**, 3093–3099.

48. **Kök, B.V., Yılmaz, M. and Akpolat, M.**, 2014. Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS + Sasobit modified binder, *Construction and Building Materials*, **63**, 174–179. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.015.
49. **Kök, B.V., Yılmaz, M., Turgut, P. and Kuloğlu, N.**, 2012. Evaluation of the mechanical properties of natural asphalt-modified hot mixture, *International Journal of Materials Research*, **103 (4)**, 506–512.
50. **Król, J., Radziszewski, P. and Kowalski, K.J.**, 2015. Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen, *Procedia Engineering*, **111**, 478–484. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.119.
51. **Kumar, P., Mehndiratta, H.C. and Singh, K.L.**, 2009. Rheological properties of crumb rubber modified bitumen-A lab study, *Journal of Scientific and Industrial Research*, **68**, 812-816.
52. **Kurtis, K.**, 2003. Asphalt and Asphalt Concrete, *Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology*, Atlanta, Georgia, pp. 14–18.
53. **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
54. **Lavin, P.G.**, 2003. Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
55. **Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J. et al.**, 2015. Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene–butadiene structures in SBS copolymers, *Materials & Design*, **88**, 177–185. doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.002.
56. **Ludfi, D., Hendi B., Bangun, P. and Nugraha, T.**, 2015. Performance of recycled porous hot mix asphalt with Gilsonite additive, *Advances in Civil Engineering*, **2015**, Article ID 316719, 7 pages.
57. **Lu, X. and Isacson, U.**, 1997. Rheological characterization of styrene–butadiene–styrene copolymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, **11 (1)**, 23–32.
58. **Meyer, R.F. and Witt, W.**, 1990. Definition and world resources of natural bitumens, *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1-14.
59. **Mcgennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U.**, 1994. Background of superpave asphalt binder test methods, Report No: FHWA-SA-94-069, p:104.

60. **Modarres, A. and Hamed, H.**, 2014. Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes, *Materials Desing*, **61**, 8–15. doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.046.
61. **Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A.R., Hamed, G.H. and Azarhoosh, M.J.**, 2012. Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, **31**, 384–388. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.004.
62. **Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. and Hamed, G.H.**, 2014a. Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – laboratory study, *Road Materials and Pavement Desing*, **15 (3)**, 746–756, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.876443>.
63. **Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G.H. and Roshani, H.**, 2014b. Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Desing*, **15**, 207–219, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.868820>.
64. **Moreno, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M. and Rubio, M.C.**, 2013. The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation, *Materials Desing*, **47**, 274–280. doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.022.
65. **Önal, M.A. ve Kahramangil M.**, 1993. Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı, *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Ankara, 200s.
66. **Polacco, G., Stastna, J., Valchovcova, Z., Biondi, D. and Zanzotto, L.**, 2004. Temporary networks in polymer-modified asphalts, *Polymer Engineering And Science*, **44**, 2185.
67. **Potgieter C.J.**, 2004. Bitumen rubber asphalt, design and construction procedures in South Africa, In: *Proceedings of the 8th conference on asphalt pavements for Southern Africa (CAPSA 04)*, Sun City, South Africa.
68. **Pretorius, F., Grobler, J. and Onreat, J.**, 2004. Development of a fit-for-propose product performance specification system for asphalt mixes, *Journal Association Asphalt Paving Technologists*.
69. **Roberts F.L., Mohammad L.N. and Wang L.B.**, 2002. History of hot mix asphalt mixture design in the united states, American Society of Civil Engineers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14 (4)**, 279-293.

70. **Rondón, H.A. and Reyes, F.A.**, 2012. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita, *Rev. Ingeniería*, **36**, 12–19.
71. **Ruan, Y., Davison, R.R. and Glover, C.J.**, 2003. The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts, *Fuel*, **82 (14)**, 1763–1773.
72. **Said, S.F. and Hakim H.**, 2008. Performance evaluation of fatigue cracking in flexible pavement, *Swedish National Road and Transport Research Institute Highway Engineering*.
73. **Sargand S.M. and Kim S.S.**, 2001. Performance evaluation of polymer modified and unmodified superpave mixes. In: *Second International symposium on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control*, Auburn, AL.
74. **Selvavathi, V., Sekar, V.A., Sriram, V. and Sairam, B.**, 2002. Modifications of bitumen by elastomer and reactive polymer—a comparative study, *Petroleum Science Technology*, **20 (5-6)**, 535–547.
75. **Şengöz B. and Işikyakar G.**, 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construct Build Mater*, **22 (9)**, 1897–905.
76. **Scientific & Applied Research Journal of Asphalt institute of Iran**, 2005. Required bitumen for Iran according to performance grading (PG) system, p. 62–66.
77. **Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I. and 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**, 436–449.
78. **Suo, Z. And Wong, W.G.**, 2009. Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete material in wearing course, *Construction and Building Materials*, **23**, 462–468.
79. **Tia, M., Ruth, B.E., Huang, S.C., Chiu, C.T. and Richardson, D.**, 1994. Development of criteria for durability of modified asphalt, Final Report No. FL/DOT/RMC/0516-3532, Department of Civil Engineering College of Engineering, University of Florida, Gainesville, FL.
80. **TS 706**, 2017. Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-2s.
81. **TS EN 12697-34+A1**, 2007. Bitümlü Karışımlar - Sıcak Asfalt Karışımları için Deney Yöntemleri - Bölüm 34: Marshall deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
82. **Tunç, A.**, 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları, *Atlas Yayınevi*, İstanbul, 840s.

83. **Tunç, A.**, 2004. Esnek kaplama malzemeleri elkitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 352s.
84. **Türkiye Asfalt Endüstrisi**, 2006. ASMÜD yayınları, www.asmud.org.tr/docs/TurkiyeAsfaltEndustrisi.doc.
85. **Uluçaylı, M. ve Yavuz, A.**, 2002. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
86. **Umar, F. ve Ağar, E.**, 1991. Yol Üstyapısı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, İstanbul, 339s.
87. **URL-1**, 2017. <https://www.dunya.com/gundem/turkiye-asfalt-uretiminde-avrupa039nin-zirvesinde-haberi-256999>. 12 Mayıs 2017.
88. **URL-2**, 2017, <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/D devletliYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf>. 10 Mayıs 2017.
89. **Whiteoak, D. and Read, J.**, 2003. The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Lti., London, 464p.
90. **Wong, C. and Michael, K.**, 1990. *The effect of Gilsonite-modified asphalt on hot mix asphaltic concrete mixes used in District 12, Houston, TX*, Departmental Information Exchange, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Austin, TX.
91. **Valkering C.P. and Vonk W.**, 1990. Thermoplastic rubbers for the modification of bitumens: improved elastic recovery for high deformation resistance of asphalt mixes. *In: Proceedings of 15th Australian road research board conference*, Vermont South, Australia, p. 119.
92. **Yılmaz, M. ve Kök, B.V.**, 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **23 (41)**, 811-819.
93. **Yılmaz, M., Kök, B.V. and Kuloğlu, N.**, 2013. Investigating the resistance of asphaltite containing hot mix asphalts against fatigue and permanent deformation by cyclic tests, *Canadian Journal Civil Engineering*, **40 (1)**, 27–34.

- 94. Yılmaz, M., Kök, B.V. ve Erdoğan Yamaç, Ö.,** 2016. Stiren-butadien-stiren ve gilsonit'in birlikte kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, TÜBİTAK 1002 Projesi, Proje No: 214M669.
- 95. Zaniwski, J.P. and Pumphrey, M.E.,** 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, *Asphalt Technology Program*, p. 107, Morgantown, West Virginia.
- 96. Ziaee, S.A., Ghazizadeh, M.J., Kavooosi, A. and Moghaddam, A.M.,** 2014. Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag, *In: The Eighth National Congress of Civil Engineering*, University of Babol, Iran.
- 97. Zoorob, S.E. and 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**, 233-242.

ÖZGEÇMİŞ

Gül BALIK, 1989 yılında Elazığ'da doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır. 2009 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun olmuştur. 2015 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen aynı Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

