

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI DOĞAL ASFALTLARIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU
112115107

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ

OCAK-2014




T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI DOĞAL ASFALTLARIN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU
112115107

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06 Aralık 2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 03 Ocak 2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ 
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Baha Vural KÖK 
Yrd. Doç. Dr. Nilüfer NACAR KOÇER 

OCAK-2014

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmasının hem ders döneminde hem de tez döneminde beni bilgisiyle ve emeğiyle hiç yalnız bırakmayan, bildiğim her şeyi kendisine borçlu olduğum sadece hocalığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım değerli danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ' a öncelikle gönülden teşekkür ederim.

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

Tezimin özellikle laboratuvar çalışmaları sırasında yardıma her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve yardımına koşan yüksek lisans dönemi arkadaşlarım İnş.Müh. Mustafa AKPOLAT ve İnş.Müh. Erkut YALÇIN' a emeklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi yönden tezimizi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi (FÜBAP)' a teşekkür ederim.

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

Elazığ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
TABLolar LİSTESİ	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR	XIV
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI	3
2.1. Modifiye Bitüm Üretiminde Doğal Asfaltların ve SBS'in Katkı Maddesi Olarak Kullanılması.....	9
2.1.1. Trinidad Göl Asfaltı (TLA)	10
2.1.2. Gilsonit	13
2.1.3. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)	14
2.2. Doğal Asfaltlar ve SBS'in Katkı Maddesi Olarak Kullanılması İle İlgili Literatür Araştırması.....	16
3. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ	20
3.1. Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) Tasarım Yöntemi	20
3.1.1. Superpave Bağlayıcı Deneyleri	20
3.1.2. Tasarım Agregası Gradasyonu Seçimi	22
3.1.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi	24
3.2. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	25
3.4. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi.....	30
3.5. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi.....	31
3.6. Merdaneli Sıkıştırıcı ile Plak Şeklinde Numune Hazırlanması	34
3.7. Tekerlek İzi (Kalıcı Deformasyon) Deneyi	36
3.7.1. Prosedür A'ya Göre Deneyin Uygulanması	38
3.7.2. Prosedür B'ye Göre Deneyin Uygulanması	38

4.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	39
4.1.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler	43
4.2.	Agregaların Fiziksel Özellikleri	52
4.3.	Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi.....	52
4.3.1.	PG 58-34 Bitümü ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi	55
4.3.2.	Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi	71
4.4	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler	74
4.4.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları	75
4.4.2.	Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları	81
4.4.3.	İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları.....	85
4.4.4.	İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları	91
4.4.5.	Tekerlek İzi Deney Sonuçları	102
5.	SONUÇLAR.....	110
	KAYNAKLAR.....	111
	ÖZGEÇMİŞ	115

ÖZET

Bu tez çalışmasında farklı doğal asfaltların ve stiren-butadien-stirenin (SBS) bitüm modifikasyonunda kullanımının etkileri incelenmiştir. Üç farklı doğal asfalt (Trinidad göl asfaltı (TLA), İran Gilsoniti ve Amerika Gilsoniti) ve SBS katkı maddesi olarak bitüm modifikasyonunda kullanılmıştır. Bağlayıcı karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcılar dönel ince film halinde ısıtma deney (RTFOT) yöntemine göre kısa dönem ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yöntemine göre uzun dönem yaşlandırılmıştır. Çalışmada bitümlü bağlayıcılar üzerinde dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirek çekme rijitlik modülü, indirek çekme yorulma ve tekerlek izine karşı dayanım deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcı deneyleri sonucunda PG 58–34 saf bitümüne %10,0 Amerika Gilsoniti ($MB_{10\%AG}$), %9,5 İran Gilsoniti ($MB_{9.5\%IG}$), %60 Trinidad göl asfaltı ($MB_{60\%TLA}$) ve %3.8 SBS ($MB_{3.8\%SBS}$) ilave edilmesi ile istenen performans seviyesinin (PG 70-34) sağlandığı belirlenmiştir. Tasarım bitüm içeriğinde hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda $MB_{60\%TLA}$ ile hazırlanan karışımların en yüksek rijitliğe, stabiliteye, çekme dayanımına, yorulma ve kalıcı deformasyona karşı dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. $MB_{9.5\%IG}$ ve $MB_{3.8\%SBS}$ ile hazırlanan karışımların ise en yüksek nem hasarına karşı dayanıma sahip oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitümlü Sıcak Karışım, Modifikasyon, Doğal asfalt, Stiren-butadien-stiren.

SUMMARY

Effects of SBS and Different Natural Asphalts on the Properties of Bituminous Binders and Mixtures

In this dissertation study, the effects of using different natural asphalts and styrene-butadiene-styrene (SBS) as a binder modifier were investigated. Three different natural asphalts (Trinidad Lake Asphalt (TLA), Iranian Gilsonite and American Gilsonite) and SBS were used as additive in bitumen modification. Binder and mixture design were done according to Superpave method. Bituminous binders were short- and long-term aged in accordance with rolling thin film oven test (RTFOT) and pressure ageing vessel (PAV) procedures. Rotational viscosimeter (RV), dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) tests were done on bituminous binders. Marshall stability and flow, moisture-induced damage, indirect tensile stiffness modulus, indirect tensile fatigue and wheel tracking tests were done on the hot mix asphalt samples. Results of binder tests showed that addition of 10.0% American Gilsonite ($MB_{10\%AG}$), 9.5% Iranian Gilsonite ($MB_{9.5\%IG}$), 60% Trinidad lake asphalt ($MB_{60\%TLA}$) and 3.8% SBS ($MB_{3.8\%SBS}$) to pure bitumen (PG 58-34) achieved the desired performance level (PG 70-34). Experiments conducted on mixtures showed that mixtures prepared with $MB_{60\%TLA}$ had the highest stiffness, stability, tensile strength and resistance to fatigue and permanent deformation. On the other hand, mixtures prepared with $MB_{9.5\%IG}$ and $MB_{3.8\%SBS}$ were observed to have highest resistance to moisture induced damage.

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

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Modifiye bitüm şartname limitleri.....	5
Tablo 2.2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması.	7
Tablo 2.3. Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar	8
Tablo 2.4. Trinidad göl asfaltının tipik fiziksel özellikleri.....	11
Tablo 3.2. Superpave karışım gradasyon limitleri.....	24
Tablo 4.1. Saf bağlayıcı deney sonuçları.....	39
Tablo 4.2. Elazığ'ın 26 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri.....	40
Tablo4.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları.....	41
Tablo 4.4. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları	42
Tablo 4.5. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları.....	45
Tablo 4.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları.....	46
Tablo 4.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları (Devamı)	47
Tablo 4.7. PG 58-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi.....	48
Tablo 4.8. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları.....	49
Tablo 4.9. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri	52
Tablo 4.10. Agreganın özgül ağırlıkları.....	54
Tablo 4.11. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları.....	57
Tablo 4.12. Taşıtların sayısına göre sıkıştırma parametreleri	58
Tablo 4.13. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları	59
Tablo 4.14. Numunelerin %4,89 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri	60
Tablo 4.15. Karışımın Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri	63
Tablo 4.16. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti.....	64
Tablo 4.17. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri.....	66
Tablo 4.18. Farklı bitüm içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri.....	67
Tablo 4.19. Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri.....	67
Tablo 4.20. Karışımların %4,72 tasarım bitüm bağlayıcı içeriğindeki özellikleri.....	69
Tablo 4.21. Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri	69
Tablo 4.22. Numunelerin Nmaks.'da %4,72 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri.....	70

Tablo 4.23. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,72 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri	70
Tablo 4.24. Karışımların %4,72 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri	70
Tablo 4.25. TLA içerisindeki filler ve bitüm oranları	71
Tablo 4.26. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri	71
Tablo 4.27. Farklı oranlarda TLA içeren bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri	72
Tablo 4.28. Koşullandırılmamış numunelerin Marshall deney sonuçları.....	76
Tablo 4.29. Koşullandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları.....	77
Tablo 4.30. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	82
Tablo 4.31. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları	83
Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları	87
Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı).....	88
Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı).....	89
Tablo 4.33. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	93
Tablo 4.34. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	94
Tablo 4.35. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları.....	95
Tablo 4.36. Yorulma deneyinden elde edilen değerler	101
Tablo 4.37. Tekerlek izi numunelerinin ağırlıkları.....	102
Tablo 4.38. Tekerlek izi numuneleri için gerekli agrega ve bitüm miktarları	103
Tablo 4.39. Karışımlar için her bir elek üzerinde kalan agrega miktarları	104
Tablo 4.40. Tekerlek izi deney sonuçları.....	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı.....	3
Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı).....	4
Şekil 2.3. Doğal bitümler, yer yağı ve kömürlerin sınıflandırılması.....	10
Şekil 2.4. Trinidad göl asfaltının çıkarıldığı bölge ve gölün görünümü	11
Şekil 2.5. TLA içeren ve içermeyen karışımlarda zamanla oluşan bozulmalar arasındaki fark	12
Şekil 2.6. Gilsonit'in işlenmeden önceki görünümü.....	13
Şekil 2.7. SBS'in granül ve toz halindeki çeşitleri.....	14
Şekil 3.1. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi	20
Şekil 3.2. PAV deney aleti	20
Şekil 3.3. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi	21
Şekil 3.4. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi.....	21
Şekil 3.5. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması.....	21
Şekil 3.6. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu	22
Şekil 3.7. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri	23
Şekil 3.8. Marshall stabilite ve akma aleti.....	26
Şekil 3.9. Pknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması	28
Şekil 3.10. Çekme dayanımı deney düzeneği.....	29
Şekil 3.11. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği.....	30
Şekil 3.12. Yorulma deney düzeneği.....	33
Şekil 3.13. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi.....	33
Şekil 3.14. Merdaneli sıkıştırıcı ve numune hazırlanması	36
Şekil 3.15. Tekerlek izi deney aleti	36
Şekil 4.1. Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı.....	41
Şekil 4.2. Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi	43
Şekil 4.3. Ekstraksiyon deneyi sonrasında Trinidad Göl Asfaltı'nın bitüm ve mineral kısmı..	44
Şekil 4.4. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı.....	44
Şekil 4.5. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi	49
Şekil 4.6. Modifikasyon indeksi değerlerinin sıcaklıkla değişimi	50

Şekil 4.7. Saf bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları	51
Şekil 4.8. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	51
Şekil 4.9. Kullanılan agrega gradasyonu.....	54
Şekil 4.10. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı.....	59
Şekil 4.11. Sıkıştırılan numunelerin yoğunluk eğrileri ve ortalaması	60
Şekil 4.12. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri.....	67
Şekil 4.13. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimi.....	68
Şekil 4.14. Karışımların hacimsel özellikleri	73
Şekil 4.16. K ve KŞ karışımlarının stabilite değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi	78
Şekil 4.17. K ve KŞ karışımlarının akma değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi	79
Şekil 4.18. K ve KŞ karışımlarının Marshall oranı değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi..	79
Şekil 4.19. Karışımların RMS değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi.....	80
Şekil 4.20. Karışımların çekme dayanımı değerleri	84
Şekil 4.21. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi	85
Şekil 4.22. Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla (a) ve katkı türü ile (b) değişimi	90
Şekil 4.23. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü.....	91
Şekil 4.24. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	96
Şekil 4.25. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	96
Şekil 4.26. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi	96
Şekil 4.27. Yorulma ömrü (N_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi	97
Şekil 4.28. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi.....	98
Şekil 4.29. N_f (a) ve N_{mak} (b) yük tekrarlarındaki deformasyon değerlerinin katkı türü ile değişimi.....	99
Şekil 4.30. $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı – katkı türü ilişkisi	100
Şekil 4.31. Karışımların yorulma ömür diyagramları	101
Şekil 4.32. Tekerlek izi oluşumu ve deneye tabi tutulan numuneler	105
Şekil 4.33. Tekerlek izi deney sonu ekranı	106
Şekil 4.34. 50°C sıcaklıkta tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi.....	106
Şekil 4.35. 60°C sıcaklıkta tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi.....	107
Şekil 4.36. Modifiye bitümler ile hazırlanan karışımların tekerlek izi derinliği – tekerlek geçiş sayısı grafiği.....	107

Şekil 4.37. 50°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen farklı tekerlek geçişlerindeki tekerlek izi derinlikleri.....	108
Şekil 4.38. 60°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen farklı tekerlek geçişlerindeki tekerlek izi derinlikleri.....	109

SEMBOLLER LİSTESİ

s	: Standart sapma
T_{20mm}	: Yüzeyden 20 mm derinlikteki kaplama tasarım yüksek sıcaklığı
T_{havamaks}	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı
E	: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi
T_{min}	: Kaplama yüzeyindeki tasarım düşük sıcaklığı
T_{havamin}	: En düşük 1 günlük ortalama hava sıcaklığı
G*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
P₁, P₂, P_N	: Her bir agregada grubunun ağırlıkça yüzdesi
G₁, G₂, G_N	: Her bir agregada grubunun hacim ve zahiri özgül ağırlığı
V_{ba}	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
P_b	: Bağlayıcı yüzdesi
P_s	: Agregada yüzdesi
G_b	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
V_a	: Hava boşluğu hacmi
V_{be}	: Efektif bağlayıcı hacmi
S_n	: Agregada karışımındaki nominal maksimum elek boyutu
P_{bi}	: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi
W_s	: Agreganın ağırlığı
W_b	: Toplam agregada ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı
G_{mm}	: Asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı
G_{mb}	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
P_{0,075}	: Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agregada karışımındaki ağırlıkça yüzdesi
G_b	: Asfaltın özgül ağırlığı
G_{se}	: Agregada karışımının efektif özgül ağırlığı
VMA	: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi
VFA	: Asfaltla dolu mineral agregadaki boşluk yüzdesi
W_m	: Numunenin ağırlığı
γ_{su}	: Suyun yoğunluğu
V_{mx}	: Numunenin hesapla bulunan hacmi
d	: Kalıbın çapı
h_x	: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği
C	: Düzeltme faktörü
G_{mb}(ölçülen)	: Sıkıştırılmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı
G_{mb}(tahmini)	: Sıkıştırılmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı
G_{mb}(düz.)	: Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı
DP	: Filler oranı

h	: Numune yüksekliği
J	: Absorbe su hacmi
B'	: Vakum işleminde sonra numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
B	: Vakum işleminde önce numunenin doygun kuru yüzey ağırlığı
S'	: Doygunluk derecesi
I	: Hava boşluğu hacmi
V	: Numune hacmi
TS	: Çekme dayanımı
P_{mak}	: Kırılmaya neden olan maksimum yük
TS_{yaş}	: Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değer
TS_{kuru}	: Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değer
ITSM	: 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
N_f	: Yorulma ömrü
k₁ ve k₂	: Malzeme karakteristikleri
r_f	: Çatlak ilerleme oranı
N_p	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
δ_f	: Bozulma anında toplam deformasyon
δ_i	: Çatlak başladığı andaki toplam deformasyonu
K	: Kısa dönem yaşlandırılmış numune
KŞ	: Kısa dönem yaşlandırılmış ve koşullandırılmış numune
N_i, N_f, N_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayıları
δ_i, δ_f, δ_{mak}	: Çatlak başlangıcı, yorulma ömrü ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarları
R²	: Belirtme katsayısı

KISALTMALAR

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

1. GİRİŞ

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

Bitümlü sıcak karışımlarda trafik ve çevre koşulları nedeniyle tekerlek izi, nem hasarı, düşük ısı ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar meydana gelmektedir (Janoo ve Korhonen, 1999). Bu kusurlar üstyapının beklenen servis ömründen önce bozulmasına sebep olmaktadır. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını artırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır (Roque vd., 2005).

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir. Modifiye bitüm üretilmesinde elastomer ve plastomer polimerlerin yanı sıra polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri yaygın olarak kullanılabilirdiği gibi göl asfaltları, kaya asfaltları ve Gilsonitler de doğal katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır.

Bir polimer çeşidi olan stiren-butadien-stiren (SBS) en sık kullanılan katkı malzemesidir (Şengöz ve Işıkyakar, 2008). Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona (Kumar vd., 2006; Tayfur vd., 2007), nem hasarına (Kök ve Yılmaz, 2009; Görkem ve Şengöz, 2009) ve yorulma çatlaklarına (Aglan vd., 1993) karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir.

Doğal asfaltlar metamorfoz (başkalaşım) derecelerine göre sınıflandırılmakta ve metamorfoz derecesi arttıkça bitümün yapısı değişmekte, akıcı halden katı hale dönüşmektedir. Dünyada metamorfozun ilk aşamalarını göl asfaltları temsil ederken en son derecesini ise pirobitümler oluşturmaktadır. Trinidad Göl Asfaltı (TLA) ve Gilsonit, en sık

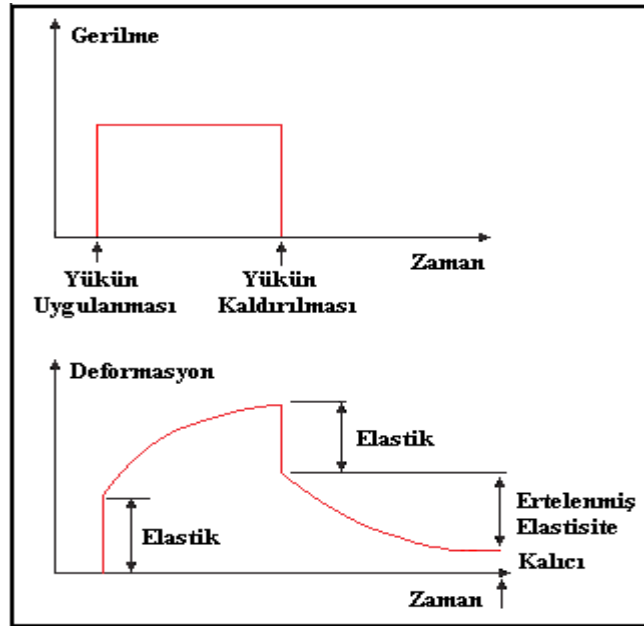
kullanılan doğal asfalt katkı maddeleridir. Yapılan çeşitli çalışmalarda TLA ve Gilsonit kullanımının bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabaee, 2009; Sönmez vd., 2005). 1876 yılında yapılan ilk bitümlü sıcak karışım uygulamasında bağlayıcı olarak kullanılan TLA (Huang, 2004), Trinidad ve Tobago’da bulunan La Brea bölgesinden çıkarılmaktadır. Genel olarak TLA bitüm ve mineral maddeden oluşmaktadır. TLA’nın bitüm kısmı maltenlerden (%63–66) ve asfaltenlerden (%34–37) oluşmaktadır. Tipik olarak, rafine TLA’nın yumuşama noktası 93-99°C arasında ve 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değeri 2 mm⁻¹ dir (Widyatmoko ve Elliott, 2008).

Gilsonit, bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip, doğal olarak oluşan bir katı hidrokarbon mineralidir (Hamidi, 1998). Gilsonit, kolay kullanımı ve asfaltla iyi uyumuyla bilinmektedir. Gilsonit, doğada bulunan bir tür asfalt bağlayıcı olması dolayısıyla bitüm içinde hızlı bir şekilde çözülebilmektedir (Liu ve Li, 2008). Amerika’nın Utah eyaletinde ve İran’ın çeşitli bölgelerinde önemli Gilsonit kaynakları bulunmaktadır.

Doğal asfaltların bitüm modifikasyonunda kullanımı üzerine birçok sayıda çalışma olmasına rağmen dünyanın çeşitli yerlerinden temin edilen doğal asfaltların bitümlü bağlayıcı ve BSK’ların performansları üzerine etkilerinin kıyaslanması üzerine çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında SBS, TLA, İran ve Amerika Gilsonit’i kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Modifiye bağlayıcıların Superpave yöntemine göre performans seviyeleri belirlenmiştir. Bu modifiye bağlayıcılarla hazırlanan sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarı, yorulma, tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Böylece dört farklı katkı türünün en etkin olanı belirlenmeye çalışılmıştır.

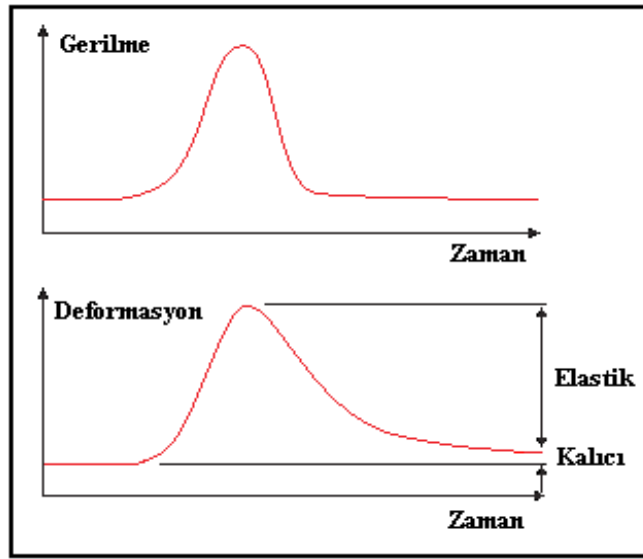
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yüklemelerde elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler (Kuloğlu, 2001). Başta çatlama ve kalıcı deformasyon dayanımı olmak üzere, yol performansının birçok parametresinde büyük rol oynayan bitüm, asfalt karışımların da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır (Lav ve Lav, 2004). Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2, esnek kaplamalara uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir (Whiteoak ve Read, 2003).



Şekil 2.1. Bitümün statik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

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



Şekil 2.2. Bitümün dinamik yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak ve Read, 2003).

Şekil 2.2’de, bitümlü bağlayıcıların hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon - zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek yükü tekerrürü sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), bitümlü sıcak karışım kaplama tabakalarında yaygın olarak görülen tekerlek izi ve çatlak şeklindeki bozulmaları geciktirmek ve kaymaya karşı direnci artırarak trafik güvenliğini sağlamak amacıyla, 'Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi'ni hazırlamıştır. KGM tarafından belirtilen Modifiye Bitüm Teknik Şartname Limitleri Tablo 2.1’te verilmiştir.

Tablo 2.1. Modifiye bitüm şartname limitleri (KGM, 2011).

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

^a Bu koşul gerekli olduğunda aranacaktır.

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

^c Yüksek viskoziteli modifiye bitümlerde RTFO deneyi 163° C'den daha yüksek (180° C geçmeyen) sıcaklıkta yapılabilecektir.

TFO deneyi İdarenin izni ile RTFO yerine kullanılabilir.

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

Kaplamaların farklı performans parametrelerine herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan oluşabilecek bozulmaları engellemek yada geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddesinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir.

Bitümün modifiye edilmesinde, modifiye bitüm üzerinde çeşitli standart test yöntemleri uygulayarak bağlayıcı özelliklerindeki değişikliklerin tespit edilmesi mümkündür. Bu sayede, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması ve taşınması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (İlıcılı, 2001).

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

Bilindiği gibi, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standart deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede yapılabilmektedir. Karışıma yönelik deneylerde, daha uzun sürelere, daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı deney ekipmanlarına gereksinim duyulmaktadır (İlıcılı, 2001).

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 2.2'de verilmiştir (İlıcılı, 2001).

Kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve karışımlar konusundaki çalışmalarda son yıllarda polimerler temel alınarak; polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. BSK katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (Ihıcalı, 2001).

Tip	Özellikler	Modifiyerin Bağlayıcı Kıvamına Etkisi	
1. Filler	<ul style="list-style-type: none">• Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül• Karbon Siyahı• Sülfür	Sertleştirme	
2. Genleştirici (Ekstender)	<ul style="list-style-type: none">• Sülfür• Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme	
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. Blok Kopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER <ul style="list-style-type: none">• Doğal Kauçuk• SBR• SBS• Dönüştürülmüş Kauçuk	-	
4. Plastik		<ul style="list-style-type: none">• Polietilen• Polipropilen• EVA• PVC	Sertleştirme
5. Bileşim		<ul style="list-style-type: none">• 3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	-
6. Fiber	<ul style="list-style-type: none">• Doğal: Asbest Taş Yünü• Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme	
7. Oksidan	<ul style="list-style-type: none">• Manganez Tuzu	Sertleştirme	
8. Antioksidan	<ul style="list-style-type: none">• Kurşun Karışımları• Karbon• Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma	
9. Hidrokarbon	<ul style="list-style-type: none">• Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları• Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme	
10. Soyulma Önleyici	<ul style="list-style-type: none">• Aminler• Kireç	Yumuşatma	

Tablo 2.3. Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar (Bahia vd., 2001).

Katkı türü	Sınıfı	Bozulma türlerine karşı faydaları				
		Kalıcı deformasyon	Yorulma çatlaklığı	Düşük ısı çatlaklığı	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> <i>Gilsonit</i>	X	X	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> <i>Çinko</i>			X		X
				X		X
	Karbon siyahı	X				X
	Kalsiyum tuzları					X
	Hidrate kireç				X	X
	Fenoller					X
	Aminler				X	X

2.1. Modifiye Bitüm Üretiminde Doğal Asfaltların ve SBS'in Katkı Maddesi Olarak Kullanılması

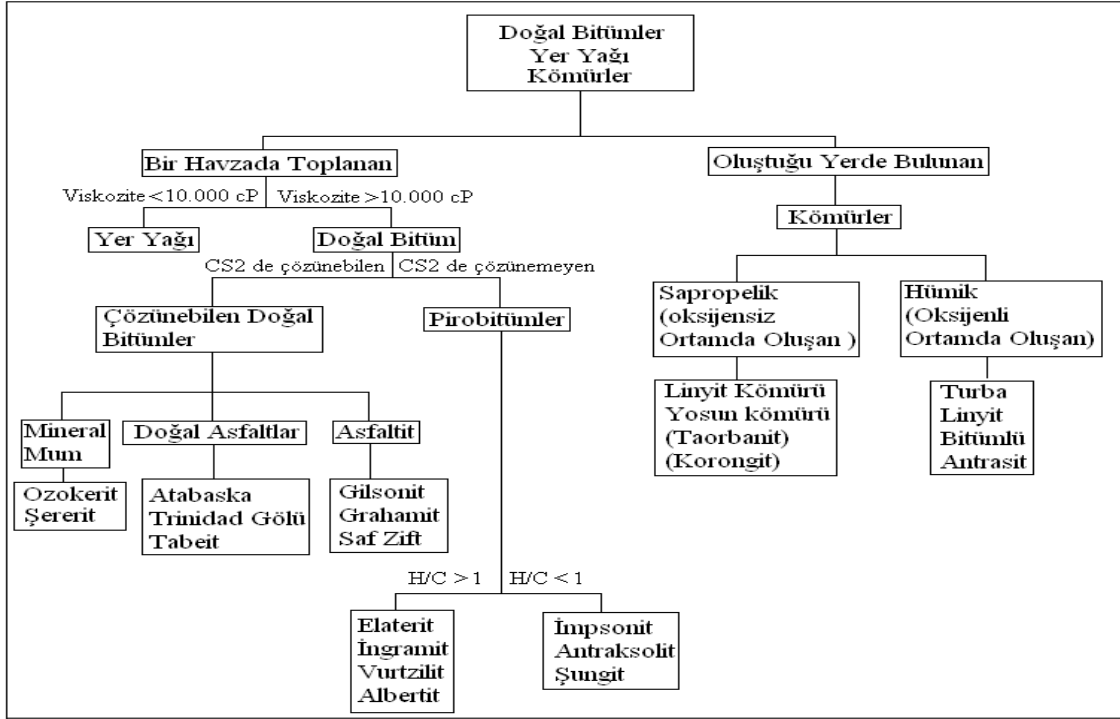
Günümüzde bitümün ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral, organik, doğal ve endüstriyel kökenli katkıları yaygın olarak kullanılmaktadır (Bardesi ve Brule, 1999).

Kullanılacak en uygun katkı maddesinin seçiminde aranan tek kriter katkının bitüme veya karışıma sağlayacağı performans değildir. Bunun yanında katkı maddesinin üretiminde çevresel uyumu ve ekonomik olması gibi faktörler de katkının seçiminde gözönünde bulundurulmak zorundadır. Bu gibi nedenlerden dolayı SBS gibi endüstriyel olarak üretilen polimer kökenli katkı maddelerinin yanında doğal asfaltlar da BSK'larda katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılmış ve kullanıma uygunluğu açısından üzerlerinde birçok çalışma yapılmıştır.

Doğal asfaltlar, hidrokarbonlar ve aromatik moleküllere sahip parçacıklardan oluşan katı yada yarı katı karışımlardır. Doğal asfaltlar, genel olarak karbon ve hidrojenden 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).

Bu kompleks karışımlar fiziki olarak karbon disülfür (CS_2) benzeri organik solventlerde çözünebilirliklerine, erime veya yumuşama noktalarına göre ayrılmaktadır. Doğal bitüm, yer yağı ve kömürlerin genel bir sınıflandırılması Şekil 2.3'de verilmiştir (Sah, 2007).

Amerika'nın Utah eyaletinden, İran'ın çeşitli bölgelerinden çıkarılan Gilsonit, Trinidad ve Tobago'da bulunan göl asfaltı, Kanada'nın Atabaska Bölgesinden temin edilen katranlı kum, Suriye'de El-Beşiri bölgesinde ve Endonezya'da Buton adasında bulunan katranlı kum BSK'larda çeşitli şekillerde kullanılmış ve olumlu sonuçlar vermiş doğal asfaltlardır.



Şekil 2.3. Doğal bitümler, yer yağı ve kömürlerin sınıflandırılması (Sah, 2007).

2.1.1. Trinidad Göl Asfaltı (TLA)

Trinidad Göl Asfaltı (TLA) doğal asfaltın bilinen en ünlü kaynaklarından olmuştur. TLA; çözünür bitüm, mineral madde ve diğer bileşenlerden oluşan yarı katı emülsiyon şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu asfalt batı Hint adalarında Trinidad ve Tobago'nun güney batısında La Brea bölgesinde dünyaca ünlü 'Pitch Lake' (Asfalt Gölü) den 100 yılı aşkın süredir çıkarılmaktadır. TLA'nın çıkarıldığı bölgenin haritası ve gölün genel bir görünümü Şekil 2.4'te verilmiştir. TLA'dan basit bir rafine süreciyle %53 ile 55 arasında çözülebilir bitüm elde edilmekte içindeki mineral madde miktarı ise %36-37 civarındadır.

Trinidad göl asfaltı içerisinde bulunan agrega çok incedir. Trinidad göl asfaltında bulunan bitümün yumuşama noktası 93-99°C arasında olup bitümün adezyon özelliği çok yüksektir ve 25°C'de 2 mm⁻¹ penetrasyon değerine sahiptir (Widyatmoko ve Elliott, 2008).



Şekil 2.4. Trinidad göl asfaltının çıkarıldığı bölge ve gölün görünümü

TLA'nın bünyesindeki mineral bileşenler bitümlü olarak karışırlar. TLA'nın katkı maddesi olarak kullanılması durabiliteyi artırır, karışımın stabilitesini artırır, tekerlek izi oluşumuna karşı performansta iyileşme sağlar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini artırır, kaplamanın servis ömrü maliyetinde azalma sağlar, daha açık renkli ve daha güvenli yüzey sağlar, kayma direncini artırır, asfalt karışımlarının işlenebilirliğini artırır, yorulma performansını geliştirir, düşük ısı çatlama karakteristiklerini iyileştirir, yüksek ısıda deformasyona karşı direnci geliştirir, diğer katkıları ve bitümlerle efektif karıştırılabilirliği sağlar (URL-1, 2013). TLA'nın tipik fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Trinidad göl asfaltının tipik fiziksel özellikleri (URL-1, 2013).

Yumuşama Noktası, (°C)	93-99
Kül (mineral madde), (%)	35-39
Penetrasyon (25°C, 100g,5 sn.)	0-4
Çözünabilir bitüm (trikloretilen), (%)	52-55
Özgül Ağırlık	1.39-1.44
Maltenler (bitümün % si olarak)	%63- 66
Asfaltlar (bitümün % si olarak)	%33-37

TLA içeren modifiye bitüm, yüksek kaliteli agrega ile uygun karışım dizayn gradasyonuna sahip olarak üretilirse sıcak iklim bölgelerinde yüksek gerilme altında (özellikle havaalanlarında ağır servis yükleri ve yüksek tekerlek basıncına maruz kalan kaplamalar için) iyi performans göstermektedir (Şekil 2.5). TLA modifiyeli asfalt bağlayıcı bir polimer modifiye asfalt bağlayıcı ile sağlanabilecek performans seviyelerini karşılayabilmektedir (URL-1, 2013).



TLA İçermeyen Karışım

TLA İçeren Karışım

Şekil 2.5. TLA içeren ve içermeyen karışımlarda zamanla oluşan bozulmalar arasındaki fark (URL-1, 2013).

TLA'nın asfalt karışım modifikasyonundaki olumlu etkisi dünyanın dört bir yanında kapsamlı olarak yapılan testlerle desteklenmiştir. TLA ile hazırlanan karışımların özellikle yarış pistleri, otoyollar, köprüler, havaalanları ve konteyner sevk tesisleri gibi ağır yükler altında yüksek performans sergilediği ve diğer katkı maddelerine göre daha ekonomik olduğu belirlenmiştir (URL-1, 2013).

Son yıllarda TLA'nın modern ince yüzey sistemlerinde kullanmak için uygun olduğu belirlenmiştir. Taş mastik asfalt, asfalt betonu, ve mastik asfalt malzemelerinde rutin olarak kullanılmaktadır. TLA, Akashi-Kaikyo Köprüsü (Japonya), Tsing Ma Köprüsü (Hong Kong), Lincoln ve Hollanda tünelleri (USA), Nurburing yarış pisti (Almanya), Seagirt deniz terminali (USA), Piarco hava limanı (Trinidad), Grantley Adams hava limanı (Barbados) ve Kopenag hava limanı (Danimarka), JFK havalimanlarında (USA) ve bunun dışında Japonya, Avrupa, Amerika gibi ülkelerin büyük otoyollarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (URL-2, 2013).

Türkiye'de ise Boğaziçi ve Fatih Sultan Mehmet köprülerinin büyük onarım ve takviye projesi kapsamında köprülerin üzerlerindeki asfalt kaplamanın yenilenmesi çalışmalarında TLA kullanılacağı bilinmektedir. Bu asfalt ile normal yollarda kullanılan rafineri bitümü karıştırılarak sert, yüksek mukavemetli ve 4 santimetre kalındığında mastik asfalt uygulaması yapılması ve çalışmalara 2014 yılı yazına kadar malzeme tedarikinin ve ihalesinin bitirilerek başlanması planlanmaktadır (URL-3, 2013).

2.1.2. Gilsonit

Gilsonit, genellikle birbirine paralel dikey damarlar halinde yerin derinliklerinde bulunmaktadır. Kütle halindeki Gilsonit obsidiyen mineraline benzer görünümde, oldukça parlak, siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyine sahip ve çizgisi kahverengi olan bir bitümlü maddedir (Şekil 2.6). Kırılgan bir yapıya sahip olmasından dolayı kolaylıkla ezilebilir ve koyu kahverengi toz halini alır (URL-4, 2013).



Şekil 2.6. Gilsonit'in işlenmeden önceki görünümü (URL-4, 2013).

Gilsonit'in özgül ağırlığı 1,03 ile 1,10 arasında değişmektedir ve Mohs skalasına göre sertliği 2'dir. % 10–20 sabit C, % 0 - 2 O₂ ve eser halde mineral madde içerir. 120°C ile 175°C arasında erir. Karbon sülfürde çözünürlük derecesi % 98-100'dür. Penetrasyonu 0'dır. Gilsoniti diğer doğal asfaltlardan ayıran özellikleri yüksek asfaltten içermesi, organik çözücülerde yüksek çözünürlüğe sahip olması, yüksek saflık derecesine sahip olması, molekül ağırlığı yüksek olması ve yüksek nitrojen içeriğine sahip olmasıdır.

Sert bir doğal asfalt olan Gilsonit, asfaltum yada uintaite olarak ta isimlendirilir ancak genellikle ticari olarak Gilsonit ismiyle bilinir. Gilsonit aromatik ve alifatik çözücülerde çözünebilir. Petrol ürünleriyle çok iyi uyum sağlamasından dolayı genellikle daha yumuşak petrol asfaltlarının sertleştirilmesinde kullanılır. Gilsonit'in asfalt karışımlarına kolaylıkla karıştırılması ve uyumlu olması gibi özellikleriyle diğer modifiyerlerden farklı avantajlar sağlamaktadır (URL-4, 2013).

Gilsonit'in bitüme ilave edilmesiyle bitümün penetrasyonunu azaltmakta, viskozitesi artmakta ve bunun sonucunda daha sert modifiye bitüm üretilmektedir. Gilsonit genel olarak

iki yolla kaplama inşaatında kullanılabilir. Bitüme önceden ilave edilebildiği gibi fabrikada önkariştirme esnasında agregalarla karıştırılarak da kullanılabilir (Bardesi ve Brule, 1999).

Gilsonit BSK modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri arasında hidrokarbonlar sınıfına giren bir reçinedir (NCHRP, 2001). Katkı maddesi olarak kullanılmasının yanında çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda da değerlendirilmektedir. Bitüm modifiyesinde sıklıkla kullanılan SBS polimeriyle kısmen yada tamamen yerdeğıştirerek karışımlar için önemli bir maliyet düşüşü getirmektedir (Davis ve Clyde, 1989). Gilsonit modifiyeli asfaltlar modifiye edilmemiş asfalta göre daha yüksek stabiliteye, daha düşük deformasyona ve sıcaklık hassasiyetine bunun yanında suyun sebep olduğu soyulmaya karşı daha yüksek dirence sahip olmaktadır (URL-5, 2013).

Dünyada bulunan Gilsonit yataklarına örnek olarak Utah (A.B.D.), Oregon (A.B.D.), Talaxa (Vera Cruz, Meksika) ve Ukhta (Archangel, Rusya) zuhurları verilebilir (Nakoman, 1977). İran'da dünyada çok sayıda ve zengin Gilsonit yataklarına sahip bir yer olup başlıca Zagros dağlarında bulunan Kermansah, Luristan ve İlam eyaletlerinde Gilsonit madenleri bulunmaktadır (Ameri vd., 2011).

2.1.3. Stiren-Butadien-Stiren (SBS)

Stiren-butadien-stiren (SBS), bitümlü bağlayıcıların ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan granül veya toz halinde bulunabilen polimer bir katkı türüdür (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. SBS'in granül ve toz halindeki çeşitleri

Bitümlü bağlayıcı ve karışımı deformasyon ve mekanik yüklere karşı daha dayanıklı hale getiren bu maddeler ağır taşıt trafiğinin ve ağır statik yüklerin bulunduğu, yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere ihtiyaç duyulan kaplamalar için kullanılmaktadır.

Bitümün SBS ile homojen bir şekilde karışması için SBS'i öğütürerek bitümle karıştıran, değirmen denen bir yüksek devirli öğütücü (high shear mixer) tesisi gerekmektedir. Bitüm ve SBS değirmenden geçirilmeden tamamen homojen bir şekilde karışmamaktadır. SBS'in bitüme önceden ilave edilerek karıştırılması, özel modifiye bitüm değirmeni tesislerinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir.

Karayolu uygulamalarında SBS bitüme, bitümün ağırlıkça yüzdesi olarak, %2 ila %6 arasında karıştırılabilir (Lu ve Isacson, 1997). Bu karışım esasen fiziksel bir karışım olup SBS ve bitüm arasında kimyasal bağ oluşmaz, yani depolama stabilitesi düşüktür. SBS'in bitümle karışımı temel olarak bir çözünme olayıdır. Bu çözünme olayı 180-190°C de oluşmaktadır. Polimer, sıcak bitümle temas eder etmez bitümün belirli bir kısmını absorbe ederek çözeltinin içine karışmaktadır. Çözünme zamanı, polimerin partikül büyüklüğüne ve kullanılan ekipmana göre değişiklik göstermektedir. Düşük devirli bir karıştırıcıda bu çözünme olayı 5-8 saat gibi bir zaman almaktadır. Bu nedenle hızlı polimer modifiye bitüm (PMB) üretimi için 50 dakikada 10 ton PMB üretecek tesislerde bu üretim gerçekleştirilmektedir. SBS gibi katkı malzemelerinin özellikle büyük çaptaki projelerde kullanılması önemli ölçüde ilk maliyette artışa neden olmaktadır (Ilıcalı vd., 2001).

SBS sıcak bölgelerde gerekli servis kabiliyetini ve şartname gereksinimlerini karşılamak amacıyla geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. SBS modifiyeli bitümlerde modifikasyonun etkili şekilde oluşabilmesi; SBS konsantrasyonu, bitümün kimyasal yapısı ve karıştırma süresi gibi birçok faktöre bağlıdır. Yapılan bir çok çalışma sonucunda SBS'in karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir (Cortizo vd., 2004; Tayfur vd., 2007; Vlachovicova vd., 2007; Isacson ve Zeng, 1997; Shuler ve Douglas, 1990; Won ve Ho, 1994).

2.2. Doğal Asfaltlar ve SBS'in Katkı Maddesi Olarak Kullanılması İle İlgili Literatür Araştırması

Trinidad göl asfaltı ve Gilsonit içeren sekiz farklı katkı maddesinin BSK'larda denendiği bir çalışmada Trinidad göl asfaltı, bitüm oranının %24'ü kadar kullanılırken Gilsonit bitüm oranının %10'u oranında kullanılmıştır. İçerisinde polimerlerde bulunan sekiz farklı katkı maddesinin incelendiği çalışmada BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite deneyi, indirekt çekme dayanımı, indirekt çekme rijitlik modülü, statik ve tekrarlı sünme deneyi ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan en fazla fayda sağlayan katkıların Gilsonit, Elvaloy ve Olexobitin olduğu belirlenmiştir. Trinidad göl asfaltı ise kullanılan katkıları içerisinde orta sıralarda yer almıştır (Sönmez vd., 2005).

Trinidad göl asfaltı ile polimer çeşitlerinin bitüm modifikasyonunda birlikte kullanıldığı bir çalışmada hazırlanan modifiye bağlayıcıların penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca saf bitüm Gilsonit ile modifiye edilerek diğer bağlayıcılara uygulanan deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan polimer modifiye bitümlere Trinidad göl asfaltı ilave edilmesi ile bağlayıcının özelliklerinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada Gilsonit kullanımının bitümlü bağlayıcının yumuşama noktasını ve kompleks modülünü arttırdığı, penetrasyonunu ve faz açısını azalttığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008).

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

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

1970'lerin başında Norveç'in Oslo kentinde esnek üstyapılı yollarda sudan kaynaklanan bozulmaların olduğu tespit edilmiş ve bu kentte bulunan ağır taşıt trafiğinin fazla olduğu bölgelerde Gilsonit BSK'larda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Gilsonit eklenmesi ile daha rijit bir karışım elde edilmiştir. Gilsonit içeren karışımların beklenen kaplama ömrünü iki kat arttırdığı ayrıca nem hasarını önemli oranda azalttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda Gilsonit kullanımının karışımı sertleştirmesine rağmen düşük ısı çatlaklarına neden olmadığı belirlenmiştir (Widyatmoko ve Elliott, 2008; Dokken ve Evensen, 2010).

Avustralya'nın New South Wales bölgesinde yoğun trafiğin olduğu bölgelerde kalıcı deformasyonu azaltmak amacıyla Gilsonit kullanılmıştır. Gilsonit toplam karışımın %0,25'i oranında kullanılmıştır. Yapımı takip eden 6, 12 ve 24 ay sonra yapılan kontrollerde Gilsonit'in kalıcı deformasyonu önemli oranda azalttığı belirlenmiştir. Avustralya Asfalt Kaplama Birliği tarafından Gilsonit BSK'larda kullanılacak katkıları arasında gösterilmektedir (URL-6, 2013).

Gilsonit'in katkı malzemesi olarak kullanıldığı Amerika'nın New Jersey ve Washington eyaletlerinde yapılan uygulamalarda Gilsonit sırasıyla bitüme ağırlıkça %8 ve %10 oranlarında ilave edilmiştir. Yapılan incelemelerde kaplamanın servis ömrünün iki yıl arttığı belirlenmiştir (URL-6, 2013).

Kaba agregaların önce Gilsonitle kaplandığı daha sonra bu malzemeye BSK numunelerinin hazırlanarak performanslarının değerlendirildiği çalışmada hazırlanan BSK numuneleri üzerinde dinamik modül, tekerlek izi, indirekt çekme dayanımı, yorulma ve nem hasarına karşı dayanım deneyleri uygulanmıştır. Kaba agreganın öncelikle Gilsonit ile kaplanmasının BSK'ların performansını önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir (Huang vd., 2006).

Farklı İran bitümlerinin Gilsonit'in de içinde bulunduğu farklı katkıları ile modifiye edildiği çalışmada Gilsonit ağırlıkça %2, %4, %7, %10 ve %13 oranlarında bitüme ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Gilsonit oranı arttıkça bağlayıcıların viskozitesinin, yumuşama noktasının ve kompleks modülünün arttığı, faz açısı ve penetrasyonun azaldığı belirlenmiştir (Aflaki ve Tabatabaee, 2009).

BSK'larda aşınma tabakalarında meydana gelen yorulma çatlaklarının ilerleyişinin incelendiği diğer bir çalışmada ise Gilsonit modifiyeli bitüm ile hazırlanan BSK, normal BSK ve taş mastik asfalt numuneleri indirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulmuşlardır. Elde

edilen sonuçlardan Gilsonit modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan BSK numunelerinin en yüksek yorulma dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Fakat çatlak oluştuktan sonra karışımların dayanımları incelendiğinde kontrol karışımlarının Gilsonit modifiyeli karışımlardan daha yüksek dayanım sergilediği belirlenmiştir (Suo ve Wong, 2009).

Amerika Gilsonit'inin endüstriyel bir katkı maddesi olan SBS'in yerine kısmen veya tamamen kullanılabilirliği bir çalışmada değerlendirilmiştir. Gilsonit ve SBS'in tek başına kullanıldığı numuneler ve Gilsonit ile SBS'in farklı oranlarda bir arada kullanılmasıyla elde edilen numuneler üzerine aynı reolojik testler (DSR ve RV) uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları bitüm modifikasyonunda Gilsonit ve SBS kullanımının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ($G^*/\sin\delta$) artırdığını fakat SBS'in daha etkin olduğunu göstermiştir. İki katkı maddesi aynı bağlayıcıda karıştırıldığında Gilsonit/SBS oranına göre %1 SBS'in yerine yaklaşık %3-4 Gilsonit'in gerektiği ortaya çıkmıştır (Kök vd., 2011).

İran Gilsonit'inin ve öğütülmüş atık araç lastiğinin (CR) katkı maddesi olarak kullanıldığı bir çalışmada, elde edilen modifiye bitümlerin düşük sıcaklıktaki performansları ve reolojik özellikleri BBR deney yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Gilsonit bitüme ağırlıkça %2, %7, %13 oranlarında, öğütülmüş araç lastiğinin ise ağırlıkça %10, %14, %16 oranlarında ilave edilerek 6 farklı numune elde edilmiştir. BBR deneyleri 5 farklı sıcaklıkta (-6, -12, -18, -24, -30°C) gerçekleştirilmiştir. Çalışma Superpave performans derecelendirme şartnamesine göre yapılmıştır. Deney sonuçları düşük sıcaklıklarda öğütülmüş araç lastiğinin Gilsonit'e göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir (Hajikarimi vd., 2013).

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

Bitümlü sıcak karışımların yorulma ve tekerlek izi dirençleri üzerine İran Gilsonit'inin etkisinin incelendiği çalışmada İran'ın Kermanshah bölgesinden temin edilen Gilsonit, PG 64-22 performans dereceli saf bitüme bitüm ağırlığınca %12 oranında ilave edilerek modifiye bitüm elde edilmiştir. Bu bitümle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda modifiye bitümün yaşlandırma öncesinde ve sonrasında daha yüksek $G^*/\sin\delta$ ve $G^*.\sin\delta$ değerlerine sahip olduğu, modifiye bitümle üretilen BSK numunelerinin elastik modülünde iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan BSK'ların yorulma ömrü, tekerlek izi dirençleri ve yüksek sıcaklık performansları üzerinde Gilsonit kullanımının olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Ameri vd., 2011-b).

SBS ve düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği diğer bir çalışmada her iki katkı maddesinin kalıcı deformasyona karşı dayanımı önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Kumar vd., 2008).

Bitüm modifikasyonunda SBS'in katkı maddesi olarak kullanıldığı çalışmada katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve işlenebilirliğine etkisi incelenmiştir. Çalışmada üç farklı oranda (%2, %4 ve %6) SBS, 100/150 penetrasyonlu bitüme ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Modifiye bağlayıcılar üzerinde dönel viskozimetre (RV) ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmıştır. Dönel viskozimetre (RV) deney sonuçlarından, SBS oranı arttıkça bağlayıcı rijitliklerinin arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. DSR sonuçlarından artan SBS içeriği ile tekerlek izine karşı dayanım parametresini arttığı belirlenmiştir (Yılmaz ve Kök, 2008).

SBS'in 50/70 penetrasyonlu saf bitümle beş farklı oranda (%2, %3, %4, %5, %6) karıştırılarak modifiye bitümün elde edildiği çalışmada modifiye bitümlerin temel karakteristikleri geleneksel yöntemlerle tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle elde edilen BSK karışımlarının saf bitümle hazırlanan BSK ile mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar modifikasyonun saf bitümün özelliklerini (penetrasyon, yumuşama noktası, PI) ve karışımın mekanik özelliklerini (Marshall ve ITS) iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmada SBS'in bitüm içerisindeki dağılım yüzdesi ve numunelerin morfolojisi floresan mikroskopuyla görüntülenmiştir. Düşük SBS içerikli polimer modifiye bitümlerde sürekli bir bitüm faz gözlenirken, yüksek SBS içerikli polimer modifiye bitümlerde sürekli bir polimer faz gözlenmiştir. Ayrıca SBS katkısının BSK'ların kısa ve uzun dönem yaşlanmalarını azalttığı sonucuna varılmıştır (Şengöz ve Işıkyakar, 2008).

3. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

3.1. Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) Tasarım Yöntemi

3.1.1. Superpave Bağlayıcı Deneyleeri

Çalışmada bağlayıcı ve karışım dizaynı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde EN 12607-1 standardına, Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT) (Şekil 3.1), AASHTO PP1 standardına uygun olarak Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) (Şekil 3.2), AASHTO TP48 standardına uygun olarak Dönel Viskozimetre (RV) (Şekil 3.3), AASHTO TP5 standardına uygun olarak Dinamik Kesme Reometrisi (DSR) (Şekil 3.4), AASHTO TP1 standardına uygun olarak Kiriş Eğme Reometrisi (BBR) (Şekil 3.5) deneyleeri uygulanmıştır.



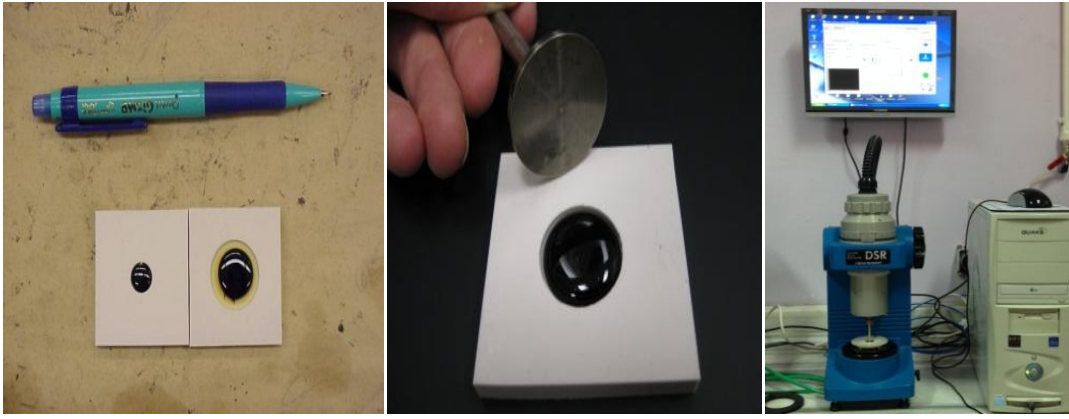
Şekil 3.1. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi



Şekil 3.2. PAV deney aleti



Şekil 3.3. Brookfield viskozimetresi ve sıcaklık sistemi



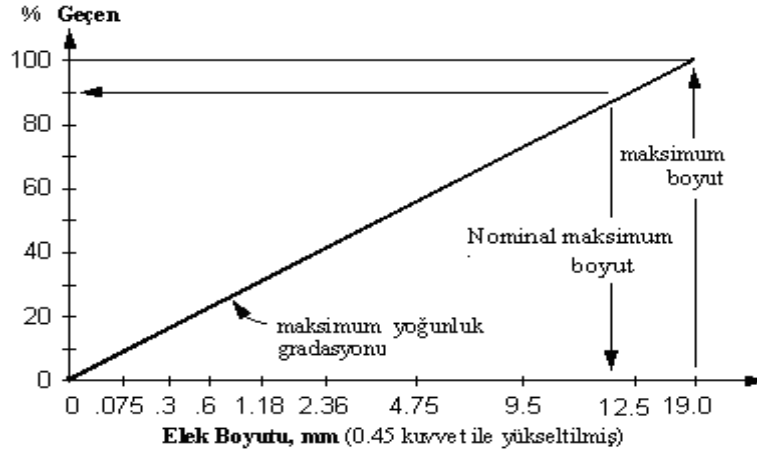
Şekil 3.4. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi



Şekil 3.5. BBR deneyi için numune hazırlanması ve deneyin yapılması

3.1.2. Tasarım Agrega Gradasyonu Seçimi

Geleneksel yöntemlerde agrega gradasyon limitleri verilirken yatay ekseninde logaritmik ölçekte elek boyutu, dikey ekseninde ise aritmetik ölçekte % geçen değeri verilerek kümülatif dane dağılımı belirlenmektedir. Superpave yönteminde farklı olarak 0,45 kuvvet grafiği kullanılmaktadır. Bu yöntemde dikey ekseninde aritmetik olarak % geçen değeri verilirken yatay ekseninde elek açıklığının 0,45. kuvveti alınarak değerler işaretlenmektedir. Burada, 0,45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmek içindir (Şekil 3.6). Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininin yani (0,0) noktasından maksimum agrega boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir (Tunç, 2004).



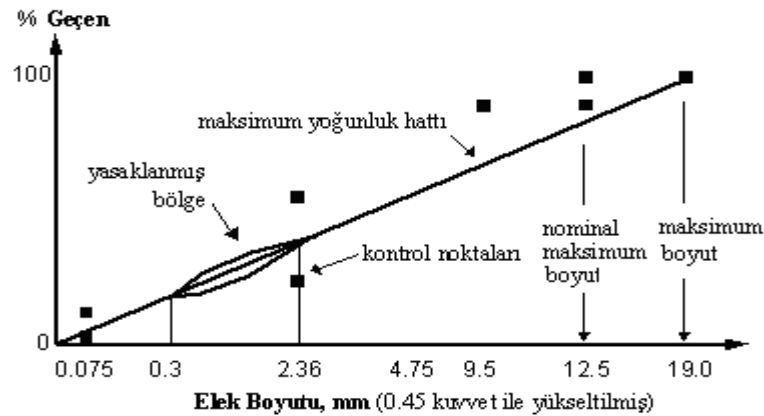
Şekil 3.6. 19 mm maksimum boyut için maksimum yoğunluk gradasyonu (Tunç, 2004).

Superpave yönteminde ayrıca maksimum boyut, nominal maksimum boyut, yasaklanmış bölge ve kontrol noktaları ifadeleri yer almaktadır. Nominal maksimum boyut, agrega malzemesinin %10'dan fazlasının üstte kaldığı (veya %90'ının geçtiği) ilk eleğin bir üst elek boyutudur. Maksimum boyut, nominal maksimum boyuttan bir büyük elek boyutudur. Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu (0,075 mm) eleklerin bulunduğu yerlerde belirlenmiştir. Yasaklanmış bölge ise, band şeklindeki bir bölgeyi temsil eder ve gradasyon eğrisinin geçmemesi gereken bir bölge olarak tanımlanır.

Yasaklanmış bölge, maksimum yoğunluk hattı üzerinde ve maksimum boyuta bağlı olarak 4,75 mm veya 2,36 mm ile 0,3 mm elekler arasında bir band şeklindeki bölgedir (Şekil 3.7).

Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemelerin içerisinde yeterli kalınlıkta bitüm film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğun bulunması sebebiyle, bu tür gradasyona sahip agrega karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır.

Bu tip gradasyon, bünyesinde çok fazla kum veya ince malzeme ihtiva ettiğinden yapım sırasında sıkıştırma zorluğuna ve sonrasında kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Yasaklanmış bölge, ince agrega boyutunda gradasyon eğrisinin maksimum yoğunluk hattına yakın ve paralel geçmesini engeller ve bu hattan uzaklaşmayı gerektirir. Çünkü maksimum yoğunluk gradasyonu, genellikle yetersiz agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda bitümlü bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesi azalacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar bitüm içeriğine çok duyarlı olup bitüm içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Superpave yöntemi, agrega gradasyonunun yasaklanmış bölgenin altından geçmesini önermekle birlikte herhangi bir mecburiyet getirmemektedir. Ancak, karışımın iyi bir performans göstermesi için gradasyonun özellikle yasaklanmış bölgenin altından geçmesi tavsiye edilmektedir (Tunç, 2004).



Şekil 3.7. 19 mm maksimum boyut için Superpave gradasyon limitleri (Tunç, 2004).

Superpave yönteminde, Tablo 3.1'de görüldüğü gibi nominal maksimum agrega boyutuna göre tanımlanan beş çeşit agrega karışımı kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Superpave karışım gradasyonları (Tunç, 2004).

Nominal Maksimum Boyut, mm	Maksimum Boyut, mm
37,5	50
25	37,5
19	25
12,5	19
9,5	12,5

Bu beş Superpave karışımı için kullanılan sayısal gradasyon limitleri Tablo 3.2’de görülmektedir.

Tablo 3.2. Superpave karışım gradasyon limitleri (Tunç, 2004).

Standart Elek (mm)	Yüzde Geçen Kriteri (Kontrol Noktaları)				
	Nominal Maksimum Elek Boyutu				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50,0					100
37,5				100	90–100
25,0			100	90–100	
19,0		100	90–100		
12,5	100	90–100			
9,5	90–100				
2,36	32–67	28–58	23–49	19–45	15–41
0,075	2,0–10,0	2,0–10,0	2,0–8,0	1,0–7,0	0,0–6,0
Elek	Tavsiye Edilen Yasaklanmış Bölge				
4,75				39,5	34,7
2,36	47,2	39,1	34,6	26,8–30,8	23,3–27,3
1,18	31,6–37,6	25,6–31,6	22,3–28,3	18,1–24,1	15,5–21,5
0,6	23,5–27,5	19,1–23,1	16,7–20,7	13,6–17,6	11,7–15,7
0,3	18,7	15,5	13,7	11,4	10,0

3.1.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agregası karışımlarından tasarım agregası gradasyonu seçildikten sonra, bitüm içeriğinde, tahmini bitüm içeriğinin %0,5 ve %1,0 üstündeki yüzdelerde ayrıca tahmini bitüm içeriğinin %0,5 altında olmak üzere en az dört ayrı bitüm içeriğinde, her bitüm içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmaktadır. Bu dört bitüm içeriği, Superpave karışım tasarımı yöntemi için minimum gereksinimdir. Hazırlanan BSK numuneleri kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulduktan sonra önceden belirtilen şekilde sıkıştırma sıcaklıklarında yoğurmalı pres ile tasarım yoğurma sayısında

(Ndes) sıkıştırılmaktadır. Yukarıda belirtilen şekilde hava boşluğu yüzdesi (Va), agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), bitümlü dolu boşluk yüzdesi (VFA), filler oranı (DP), $%G_{mm}@N_{ini.}$, $%G_{mm}@N_{des.}$ değerleri belirlenmekte ve bu değerler ile bitüm içeriği grafikleri çizilmektedir. Hava boşluğu yüzdesi (Va) – Bitüm içeriği grafiğinden %4 boşluğa tekabül eden bitüm içeriği tasarım bitüm içeriği olarak seçilmektedir. Diğer grafiklerde bu bitüm içeriğine karşı gelen değerler alınarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmakta ve uygunluğu tespit edilmektedir. Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmakta ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmaktadır.

Superpave yöntemine göre bitümlü sıcak karışım hacimsel tasarımı Bölüm 4.3'te detaylı şekilde verilmiştir.

3.2. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

BSK numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi TS EN 12697-34, 2007 standardına göre uygulanmıştır. Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanım olarak, akma ise maksimum yüke ulaşıldığı anda numunede meydana gelen düşey deformasyon olarak standartta tanımlanmaktadır. Standarda göre öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilmektedir. Daha sonra numuneler $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 40 ile 60 dakika arasında bekletilmektedir. Kıрма çenesi ise $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda 30 dakika veya $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde 1 saat bekletilmelidir. Bu sürenin sonunda numune sudan çıkarılarak kırma çenesine ortalanacak biçimde yerleştirilmekte ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılmaktadır. Marshall deney düzeneği Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Marshall stabilite ve akma aleti

Deneyde, maksimum yük ve maksimum yüke ulaşıldığı anda deformasyon değerleri kaydedilmektedir. Numunenin sudan çıkmasından itibaren 40 sn içerisinde deney bitirilmelidir. Deneyde standart numune yüksekliğinin 63,5 mm. olduğu kabul edilmektedir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için stabilite düzeltme katsayıları aşağıdaki bağıntı yardımıyla tespit edilmektedir.

$$c = 5,24 \times e^{(-0,0258 \times h)} \quad (3.1)$$

Burada c, düzeltme katsayısı, h ise mm olarak numune yüksekliğidir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Bu sayede stabilite ve akma değerleri belirlenmektedir. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip numuneler değerlendirmeden çıkarılmaktadır. Daha sonra geri kalan numunelerin ortalaması alınarak numunelerin stabilite ve akma değerlerinin ortalamadan sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma (stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune serisi iptal edilmekte ve yeni bir seri numune üzerinde deney tekrarlanmaktadır.

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 Ađar, 2004; olak, 2006; Yılmaz ve Kök, 2008).

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemlerinden biri Kalıcı Marshall Stabilitesi yöntemidir. Kalıcı Marshall Stabilitesi yönteminde numuneler $60 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra Marshall deneyine tabi tutulmaktadır (Aksoy vd., 2005; URL-7, 2013). 24 saat 60°C suda bekletilen numunelerin Marshall değerinin normal Marshall değerine oranlanması ile Kalıcı Marshall Stabilitesi belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değerinin yüksek olması bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olacağını göstermektedir.

3.3. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deneyi

Kaplamaların performansının uzun vadede yüksek olmasını sağlayan en önemli parametrelerden biri bitüm ile agrega arasındaki adezyondur. Su, bitüm ile agrega arasına girerek adezyonun azalmasına neden olmakta ve bunun sonucunda BSK kaplamalarda erken bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımına; agrega özellikleri, bitüm özellikleri, çevresel etkenler, trafik, drenaj ve yapım aşamasındaki özen gibi birçok parametre etki etmektedir.

Superpave yönteminde bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla AASHTO T 283 standardında yer alan prosedür uygulanmaktadır. Bu deney bir performans deneyi olmamakla birlikte karışımın nem hasarına karşı dayanımını belirlemede ayrıca kullanılan katkının etkisini incelemeye kullanılmaktadır. Bu deney prosedüründe $7 \pm 0,5$ hava boşluğuna sahip olacak şekilde en az 6 adet numune yoğurmalı pres ile sıkıştırılmaktadır. Standart Superpave numune hazırlama yöntemine göre tek fark kısa dönem yaşlandırma sırasında numunelerin 16 saat süresince 60°C sıcaklıkta ardından 2 saat süresince karıştırma sıcaklığına sahip etüvde bekletilmesidir. Hazırlanan numuneler eşit hava boşluğuna sahip olacak şekilde iki gruba ayrılmakta, birinci grupta bulunan numuneler koşullandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Koşullandırma işlemi uygulanacak numuneler saf su içeren piknometre içerisine konularak 10-26 in.Hg. (13-67 kPa) vakum uygulanmaktadır. Vakum işlemi numunelerdeki hava boşluklarının %70-80'i su ile doluncaya kadar devam

etmektedir. Yaklaşık 5 dakikalık vakum işleminden sonra boşlukların su ile dolma oranı %70'ten az olması durumunda vakum 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 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Piknometre ve vakum cihazı, numunelerin koşullandırma işlemi için hazırlanması

Numunelerin doygunluk derecesi aşağıdaki formüller yardımıyla belirlenmektedir.

$$J = B' - B \quad (3.2)$$

J: Absorbe su hacmi (cm³)

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

B : Vakum işleminden önce numunenin kuru ağırlığı (gr)

$$S' = J / I * 100 \quad (3.3)$$

$$I = V_a * V / 100 \quad (3.4)$$

S' : Doygunluk derecesi (%)

I : Hava boşluğu hacmi (cm³)

V_a : Hava boşluğu yüzdesi

V : Numune hacmi (cm³)

Vakum işleminden sonra numuneler plastik film (streç film) ile kaplanmakta ve ağzı kapanabilen ve uygun hacimdeki plastik torbalara (buzdolabı poşeti gibi) konularak torbanın içine 10 ml su konularak torbanın ağzı kapatılmaktadır (Şekil 3.9). Standarda göre numunelerin öncelikle -18°C sıcaklıkta 16 saat ardından 60°C suda 24 saat bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürenin ardından numuneler poşet ve plastik filmden çıkarılmaktadır. Hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış numuneler 25°C’deki suda 2 saat bekletilmekte ve 50 ± 2 mm/dakika hızla çapsal düzlemde yükleme yapılarak kırılmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Çekme dayanımı deney düzeneği

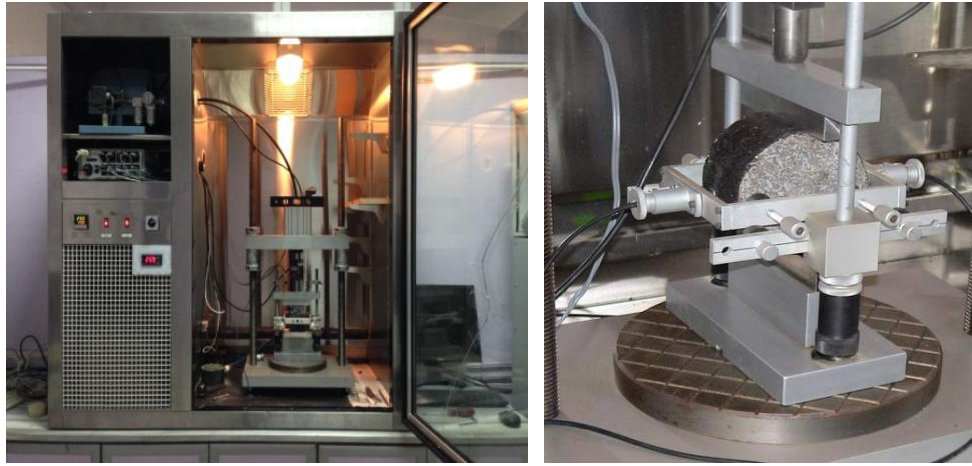
Deneyden elde edilen maksimum yük değerleri kullanılarak çekme dayanımı değerleri aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmiştir. Formülde TS çekme dayanımı (kPa), P_{mak} kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir. Çekme dayanımı oranı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

$$TS = \left(\frac{2P_{mak}}{\pi dt} \right) \quad (3.5)$$

$$TSR = \left(\frac{TS_{yaş}}{TS_{kuru}} \right) * 100 \quad (3.6)$$

3.4. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir (Zoorob ve Suparma, 2000). BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği

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

$$S_m = \frac{F(R+0,27)}{LH} \quad (3.7)$$

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

Deney sonrasında numuneler 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. İki değer arasında %10'dan fazla sapma olması durumunda numune bir kez daha 90° döndürülerek deney tekrarlanmaktadır. Aralarında %10'dan az sapma olan iki değer in ortalaması alınarak numunenin ITSM değeri belirlenmektedir.

3.5. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlakları olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır (Francken, 1998). Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve yükten kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır (Kök, 2007). Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

İndirekt çekme yorulma deneyinde (İÇYD), numune kırılıncaya kadar etki eden yük tekrarı sayısı belirlenmektedir. Her bir numune türü değişik gerilme seviyelerinde yorulma deneyine tabi tutularak farklı gerilme seviyelerindeki kırılmaya neden olan yük tekrarı sayıları belirlenmektedir. Böylece yorulma ömrü (N_f) ile gerilme (σ) arasındaki klasik yorulma ilişkisi logaritmik ölçekte çizilen grafikten veya aşağıdaki Wöhler formülünden yararlanılarak belirlenmektedir.

$$N_f = k_1 * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (3.8)$$

Burada; N_f , yorulma ömrünü ifade eden yük tekrür sayısını, k_1 ve k_2 malzeme karakteristiklerini, σ uygulanan gerilmeyi (kPa) ifade etmektedir (Molenaar ve Medani, 2000). Yorulma denklemlerinden elde edilen k_1 ve k_2 katsayıları, karışımların yorulma karakteristikleri üzerinde katkı maddelerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Üssel katsayı olan k_2 'nin büyük olması yorulma çizgisi eğiminin daha az yatık olduğunu göstermektedir. Karşılaştırılan iki karışımın k_1 değerlerinin aynı olması durumunda k_2 katsayısı yüksek olan karışımın yorulma ömrü daha uzun olmaktadır. Diğer taraftan k_2 değerlerinin eşit olması, karışımların yorulma ömrü eğrilerinin birbirine paralel olduğunu göstermekte olup daha düşük k_1 değerine sahip karışımın yorulma ömrü daha düşük olacaktır (Simms, 1998).

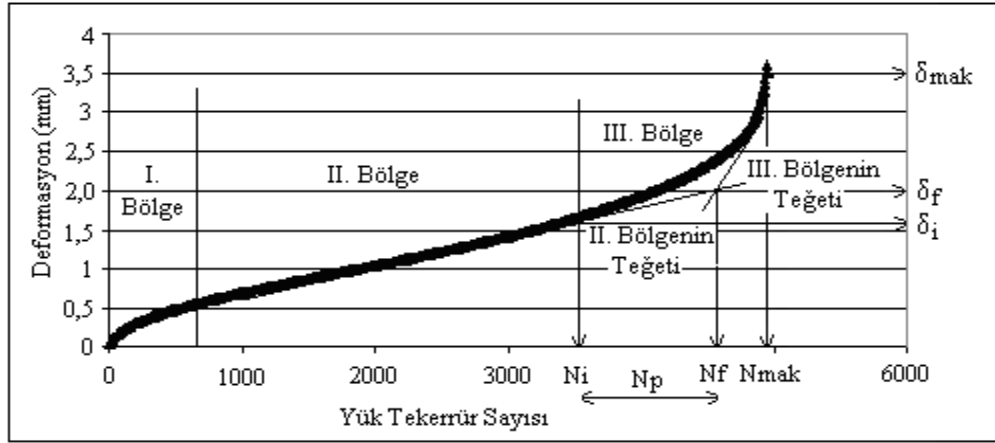
İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı yada araziden rahatlıkla temin edilebilmesi bu deney yöntemini en fazla tercih edilen deneylerden biri haline getirmiştir. Silindirik şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

Gerilme kontrollü İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 3.12'de deney düzeneği görülmektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma 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.



Şekil 3.12. Yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 3.13'te temsili olarak görüldüğü gibi yük tekerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından 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 3.13. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir (Subagio vd., 2003). Çatlak ilerleme oranı,

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

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{f \max} - \delta_f} \quad (3.9)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f \max}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

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

3.6. Merdaneli Sıkıştırıcı ile Plak Şeklinde Numune Hazırlanması

Bu standart (EN 12697-33), direk deneye tutulmak veya deney numunesinin keserek elde edilmesi amacıyla hazırlanan plak şeklindeki bitümlü sıcak karışımların sıkıştırılmasında kullanılan deney yöntemlerini açıklamaktadır.

Belirli bir ağırlıktaki bitümlü karışım numunesi, kontrollü sıkıştırma enerjisi uygulayarak veya belirlenen hacim ve dolayısıyla boşluk oranına ulaşıncaya kadar sıkıştırılmaktadır. Bu standart pnömatik lastik metodu, çelik silindir metodu ve parça plak metodu (sliding plate) olmak üzere üç farklı yöntemi açıklamaktadır.

Numunenin kalıpta sıkıştırılmasını sağlayan cihaz; ileri geri kontrollü kendi kendine ilerleyebilen statik olarak sıkıştıran dönen tekerlek veya elle kontrol edilen silindir veya silindirin etkisini simüle eden ve numuneye statik yük uygulayan silindir parçasından oluşmaktadır. Belirli bir hacimde veya hava boşluğunda numuneler hazırlanacaksa titreşimli sıkıştırıcı veya tabla kullanılabilir. Cihaz, aşağıda belirtilen F statik yükünü uygulayabilmelidir:

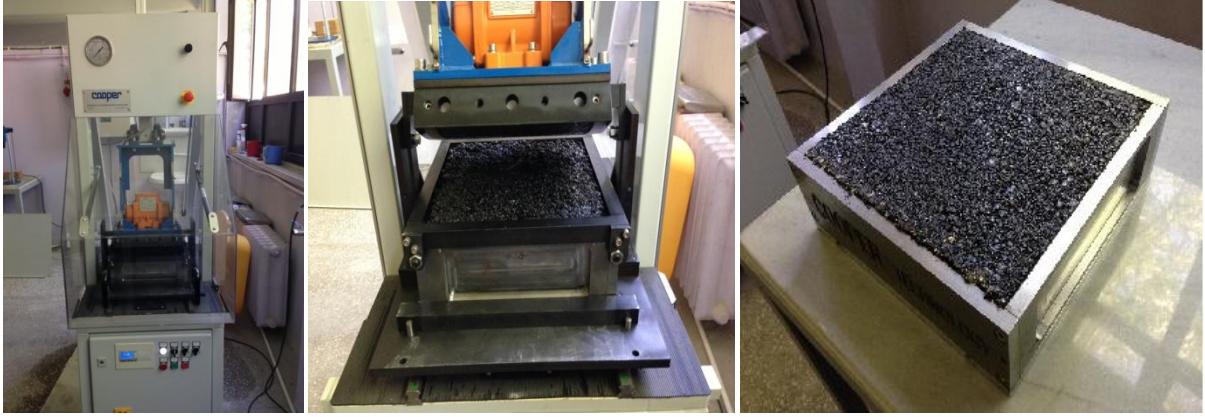
$$\frac{F}{l * 2D} \geq 10^{-5} \quad (3.10)$$

Burada, F teker veya silindire uygulanan statik yük (kN) l, kalıbın iç genişliği (mm), D, silindir veya tekerleğin çapıdır (mm). Çelik silindirin çapı 400 ile 1100 mm aralığında olmalıdır. Çelik silindirin 10-50 aralığında bir geçiş sayısı sonucu istenen yoğunluğa veya hava boşluğuna ulaşılmaktadır. Eğer slablar kontrollü sıkıştırma enerjisi ile çelik silindir ile hazırlanıyorsa silindirin genişliği, kalıbın iç genişliğinden (10±5 mm) daha küçük olmalıdır. Kullanılacak malzeme miktarı bitümlü karışımın maksimum özgül ağırlığı (ρ_m), kalıbın iç boyutları (L ve l), numunenin kalınlığı (e), boşluk içeriği (v) yardımıyla aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \left(\frac{100 - v}{100}\right) \quad (3.11)$$

Burada, M numune ağırlığı (kg), L kalıbın iç uzunluğu (mm), l kalıbın iç genişliği (mm), e numunenin son yüksekliği (mm), ρ_m bitümlü karışımın maksimum yoğunluğu (gr/cm^3), v numunenin boşluk oranıdır (%). Kalıba $M \pm \% 0,1$ gr malzeme konulur. Eğer imkan varsa kalıbın içinde malzeme kürekle dağıtılır ve böylece segregasyon engellenmiş olur. Köşelerdeki malzemeye sıkıştırmaya başlamadan bastırılarak tesviyesi yapılmalıdır.

Sabunlu solüsyon hafifçe silindire sıkılır veya malzeme ile silindir arasına bir film tabakası yerleştirilir. Sıkıştırma işlemine harekete ara verilmeksizin düzgün bir yüzey elde edilinceye kadar devam edilir. Sıkıştırma belirli bir enerjiyle yapılacaksa ve F 2 kN'dan büyük ise $F \pm \% 5$ kN luk sabit bir yük kullanılarak sıkıştırma yapılabilir. Gerekli sayıdaki geçiş tamamlanıncaya kadar sıkıştırmaya devam edilir. Plak şeklinde hazırlanan numuneler ve merdaneli sıkıştırıcı Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Merdaneli sıkıştırıcı ve numune hazırlanması

3.7. Tekerlek İzi (Kalıcı Deformasyon) Deneyi

EN 12697-22 standardında tanımlanan bu deney hem laboratuarda üretilen hem de arazide kaplamadan alınan numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Tekerlek izi deneyi sabit sıcaklıkta belli bir yük uygulanmış tekerleğin numune üzerinde tekrarlı geçişler yapmasıyla gerçekleştirilmektedir. Deney sonucunda oluşan tekerlek izi derinliği BSK'ların deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarını göstermektedir. Tez çalışmasında kullandığımız tekerlek izi deney aleti standartta belirtilen küçük boy tipteki cihaz sınıfına girmektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Tekerlek izi deney aleti

Standarta göre tekerleğin dış çapı 200-205 mm arasında olmalıdır. Tekerlek desenli olmamalı ve genişliği 50 ± 5 mm olmalıdır. Tekerleğin üzerindeki kauçuk lastik kalınlığı 20 ± 2 mm olmalıdır. Lastik katı kauçuktan yapılmış olmalı ve sertlik numarası ISO 7619 ve ISO

48'e göre ölçüldüğünde 80 ± 5 IRHD birim olmalıdır. Normal deney şartlarında numunenin yüzeyinden ölçülen tekerleğe uygulanacak yük (P) Newton biriminde aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir:

$$P = \left[\left(700 \frac{w}{50} \right) \pm 10 \right]$$

(3.12)

Tekerleğin hareket mesafesi 230 ± 10 mm ve her 60 sn deki yük tekrar frekansı $26,5 \pm 1$ olmalıdır. Cihaz ayarlanan sıcaklığı $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetle sağlayabilmelidir. Deney numuneleri, kendi kalıbında EN 12697-32 veya EN 12697-33 standardına göre hazırlanmalıdır. Deneylerde kullanılacak aynı seriye ait iki numunenin hacim özgül ağırlığı arasındaki fark ortalama hacim özgül ağırlıktan %1'den fazla farklı olmamalıdır.

Küçük cihazlarda kullanılacak numunelerin yüksekliği arazide uygulanacak kalınlıkta hazırlanmalı ya da agrega boyutuna göre yaklaşık olarak aşağıda belirtilen kalınlıklarda olmalıdır.

- En büyük dane boyutu 8 mm den küçük karışımlar için 25 mm
- Dane boyutu 8-16 mm arasında olan karışımlar için 40 mm
- Dane boyutu 16-22 mm arasında olan karışımlar için 60 mm
- Dane boyutu 22-32 mm arasında olan karışımlar için 80 mm

Hazırlanan numunelerin her bir kenarının ortasından yükseklikleri ölçülmelidir. Nominal kalınlık 50 mm veya daha az ise dört ölçüm arasındaki fark 2,5 mm den fazla, nominal kalınlık 50 mm den fazla ise dört ölçüm arasındaki fark %5'ten fazla olmamalıdır. Tekerleğin hareket edeceği bölgeye master tutulmalı ve yükseklik farkı 2 mm den fazla olan numune varsa deneylerde kullanılmamalıdır.

Hazırlanan numuneler deney sıcaklığında nominal numune kalınlığı 60 mm den az ise 4 saatten, 60 mm den fazla ise 6 saatten az olmayacak ve 24 saati geçmeyecek şekilde koşullandırılmalıdır.

3.7.1. Prosedür A'ya Göre Deneyin Uygulanması

Otomatik deplasman ölçüm cihazı ile deformasyonlar belirlenecek ise; hareket halinde iken başlangıçtaki düşey deplasman ölçülür ardından her 25 ± 1 devir teker geçişinde tekerleğin traversin orta noktasında yük uygulanan alanın orta noktasından 10 mm içerden ölçüm yapılmaktadır. Deney 1000 devir tekerlek geçişine kadar yada tekerlek izi 15 mm ye ulaşıncaya kadar devam ettirilmektedir.

3.7.2. Prosedür B'ye Göre Deneyin Uygulanması

Başlangıçtaki düşey deplasman tespit edildikten sonra ilk bir saatte en az 6-7 defa, sonra en fazla 500 devirde bir ölçüm yapılır. Tekerleğin düşey pozisyonu numune profilinin ortalama değeri olarak tanımlanır. Düşey pozisyon, traversin orta noktasındaki yükleme alanının merkezindeki yaklaşık ± 50 mm lik numune kısmında yaklaşık olarak eşit aralıklı en az 25 noktadan ölçülmektedir. Tekerleğin düşey pozisyonu deneyi durdurmadan ölçülebilmektedir. Deney, 10.000 devir tekerlek geçişine veya tekerlek izi derinliği 20 mm oluncaya kadar devam etmektedir. Tekerlek izi artış eğimi ($\text{mm}/10^3$ devir) aşağıdaki formül yardımıyla belirlenmektedir.

$$\boxed{WTS = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}} \quad (3.13)$$

Burada;

WTS ; Tekerlek izi artış eğimi ($\text{mm}/10^3$ devir)

$d_{10.000}$ ve $d_{5.000}$; 5.000 ve 10.000 yük tekrarı sonrasındaki tekerlek izi derinliği (mm).

Ortalama tekerlek izi artış eğimi iki numuneden elde edilen değerlerin ortalamasından elde edilmektedir. Eğer deney 10.000 yük tekrarıdan önce bitmişse, ortalama tekerlek izi artış eğimi tekerlek izi derinliği eğrisinin en az 2.000 yük tekrarı sonundaki lineer kısımdan hesaplanmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada ana bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bu bağlayıcı üzerinde uygulanan deneylerin sonuçları ve EN 12591 standardına göre şartname limitleri Tablo 4.1.'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Saf bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Standart	Sonuç	Şartname limiti
Yaşlandırılmamış			
Penetrasyon (0,1 mm, 100 g, 5 s)	EN 1426	168	160–220
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	42,4	35 – 43
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,1879	-
Fraas Kırılma Noktası, (°C)	EN 12593	-19,2	< - 10
Düktilite, (cm)	TS 119	> 100	> 100
RTFOT Sonrası			
Kütle Değişimi, en fazla, (%)	EN 12607-1	0.97	1,0
Penetrasyon, (25°C, 0,1mm)	EN 12607-1	73	-
Kalıcı Penetrasyon, en az, (%)	EN 12607-1	43.3	37
Yumuşama Noktası, en az, (°C)	EN 1427	53.2	37
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	0,5502	-
Yumuşama Noktasındaki Artış, en fazla, (°C)	EN 1427	10.8	11

Uygulama bölgesi olarak Elazığ ili seçilmiştir. Coğrafi konum olarak 38°17' ile 39°11' enlemleri arasında bulunan Elazığ'ın, Meteoroloji 9.Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen son 26 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. 2011 yılı yüksek sıcaklık verileri cihazlardan kaynaklanan problem nedeniyle Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden temin edilememiştir. Bu nedenle 2011 yılı yüksek sıcaklık değerleri hava sıcaklık tahminleri kullanılarak belirlenmiştir (URL-8, 2013).

Buna göre, son 26 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (182 değer) alınarak ortalama yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık

değerlerinin aritmetik ortalaması (26 değer) alınarak ortalama düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması hesaplanmıştır. Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değerleri ve standart sapmaları Tablo 4.3'te verilmiştir.

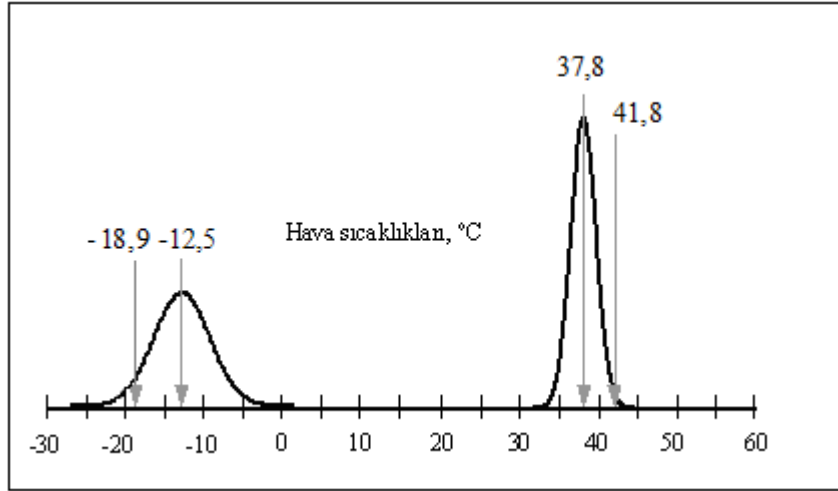
Tablo 4.2. Elazığ'ın 26 yıllık en yüksek ve en düşük hava sıcaklık değerleri

Tarih	Yüksek Sıcaklık (°C)							Tarih	Düşük Sıcaklık (°C)
	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün		
03.08.1987– 09.08. 1987	36,0	35,5	37,6	38,1	40,1	40,0	39,0	27.01.1987	-10,8
21.08.1988–27.08. 1988	35,0	36,3	36,3	35,5	36,5	36,6	34,7	22.01.1988	-8,7
25.07.1989–31.07. 1989	35,0	35,4	36,0	36,7	37,5	38,0	36,2	04.01.1989	-11,2
16.07.1990–22.07. 1990	37,7	35,0	37,2	37,6	40,4	40,4	36,0	11.01.1990	-15,8
30.07.1991–05.08.1991	38,2	38,0	36,0	36,4	39,8	39,0	39,2	07.02.1991	-14,6
11.08.1992–17.08. 1992	33,0	34,2	34,2	36,8	37,0	35,2	34,4	10.02.1992	-19,1
18.07.1994–24.07. 1993	34,5	36,8	39,4	40,2	40,2	40,0	38,0	16.02.1993	-18,6
10.07.1994–16.07. 1994	37,0	37,4	37,8	38,8	38,4	37,4	35,4	06.12.1994	-15,3
01.08.1995–07.08. 1995	36,0	36,2	37,0	37,6	37,0	35,4	35,6	23.01.1995	-10,4
10.07.1996–16.07. 1996	37,0	37,8	37,8	38,4	38,8	37,4	36,2	03.02.1996	-10,4
29.07.1997–04.08.1997	35,0	33,2	36,0	35,8	35,4	36,6	36,6	06.02.1997	-13,0
15.07.1998–22.07. 1998	39,0	39,6	39,8	37,9	38,5	40,1	39,7	19.01.1998	-10,3
30.07.1999–05.08.1999	35,0	35,2	35,8	37,3	38,8	38,8	37,3	21.02.1999	-8,0
26.07.2000–01.08.2000	38,3	39,4	39,8	40,7	42,2	41,8	40,0	22.01.2000	-16,5
25.07.2001–31.07. 2001	40,0	41,4	40,5	39,6	39,3	38,0	40,1	22.02.2001	-11,4
28.07.2002–03.08.2002	35,4	36,0	36,2	36,3	36,5	36,8	35,2	26.12.2002	-17,7
05.08.2003–11.08. 2003	35,5	33,2	35,0	39,2	35,6	37,0	37,2	23.02.2003	-14,4
27.07.2004–02.08.2004	36,0	36,0	36,6	37,3	38,3	39,0	38,5	09.01.2004	-12,4
25.07.2005–31.07. 2005	37,6	37,3	37,3	39,6	38,6	38,8	37,8	27.01.2005	-10,0
11.08.2006–17.08. 2006	39,2	40,6	41,2	40,6	40,2	40,2	38,7	22.01.2006	-13,0
25.07.2007–31.07. 2007	39,6	39,2	37,2	37,7	37,4	38,0	37,8	01.02.2007	-11,6
20.07.2008–26.07. 2008	38,8	39,0	38,4	39,2	40,0	39,4	37,6	03.02.2008	-13,2
14.08.2009–20.08. 2009	33,4	34,2	35,4	37,0	37,2	35,6	33,8	02.01.2009	-10,6
27.07.2010–02.08. 2010	39,0	40,0	39,4	39,6	40,0	39,6	39,8	27.01.2010	-9,0
27.07.2011–02.08. 2011	38,0	38,0	40,0	39,0	39,0	39,0	40,0	13.02.2011	-7,3
23.07.2012–29.07. 2012	40,5	41,1	40,3	39,6	40,1	39,9	39,3	03.02.2012	-12,3

Tablo4.3. Sıcaklık ortalamaları ve standart sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	37,8	-12,5
Standart Sapma (°C)	2,0	3,2

26 yıllık süre içerisindeki ardı ardına 7 günlük maksimum hava sıcaklıklarının ortalaması ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin ortalamasından %50 güvenilirlikte sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık değerlerinin standart sapmaları (s) kullanılarak %98 güvenilirlikte sıcaklık değerleri (ortalama+2s) belirlenmiştir. Şekil 4.1’de, uygulama bölgesine ait Tablo 4.3’de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak bir frekans dağılım eğrisi temsili olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.1. Elazığ için en düşük ve en yüksek hava sıcaklıklarının dağılımı

Buna göre, ardı ardına gelen 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 37,8°C ve standart sapması 2,0°C olan Elazığ için ortalama sıcaklığa standart sapmanın iki katının ilavesiyle elde edilen 41,8°C'lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2'dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir. Benzer şekilde, ortalama en düşük sıcaklığı -12,5°C ve standart sapması 3,2°C olan Elazığ'da, çok soğuk bir kış

mevsiminde sıcaklığın $-18,9^{\circ}\text{C}$ olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik derecesi %98 olacaktır.

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

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{havamaks}} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (4.1)$$

$$T_{20\text{mm}} = (37,8 - 0,00618 \times 38,44^2 + 0,2289 \times 38,44 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 58,2^{\circ}\text{C},$$

$$T_{\text{min}} = T_{\text{havamin}} = -12,5^{\circ}\text{C}'\text{dir.}$$

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

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} = 58,2 + 2 \times 2,0 = 62,2^{\circ}\text{C}, \quad (4.2)$$

$$T_{\text{min}\%98} = T_{\text{min}\%50} + 2S_{\text{min}} = -12,5 + 2 \times (-3,2) = -18,9^{\circ}\text{C}$$

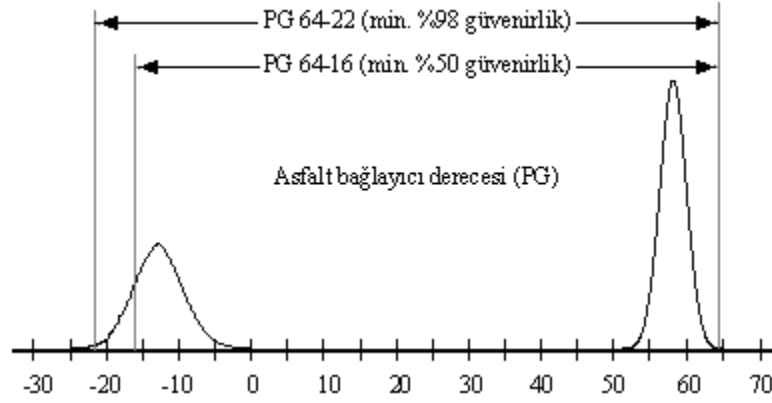
Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan tasarım sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenilirlik değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Farklı güvenlik seviyeleri için hesaplanan kaplama tasarım sıcaklıkları

Yöntem	% 50 Güvenirlik ($^{\circ}\text{C}$)				% 98 Güvenirlik ($^{\circ}\text{C}$)			
	T_{havamaks}	$T_{20\text{mm}}$	T_{havamin}	T_{min}	T_{havamaks}	$T_{20\text{mm}}$	T_{havamin}	T_{min}
SHRP	37,8	58,2	-12,5	-12,5	41,8	62,2	-18,9	-18,9

Tablo 4.4'te, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için %50 güvenilirlikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri $58,2^{\circ}\text{C}$, düşük sıcaklık değeri $-12,5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu güvenilirlik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64–16 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenilirlik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri $62,2^{\circ}\text{C}$, düşük sıcaklık değeri $-18,9^{\circ}\text{C}$ olduğundan

uygulama bölgesi için bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak seçilmiştir. Elazığ için seçilen bu bağlayıcı sınıfının güvenilirlik derecesine göre sıcaklık dağılım grafiği Şekil 4.2’te verilmiştir.



Şekil 4.2. Elazığ için bağlayıcı sınıfı seçimi

Elazığ ili için 20 yıllık tasarım trafiği tahmininin 3 – 10 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü aralığında olduğu kabul edilmiş ve trafiğin ağır hızda (<50 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, tasarım trafiğinin 3 – 10 milyon eşdeğer standart tek dingil yükü aralığında ve trafiğin ağır hızda olması durumunda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin 1 derece artırılması gerektiğinden Elazığ için belirlenen tasarım kriterlerindeki bağlayıcı sınıfı PG 70–22 olarak seçilmiştir.

4.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Çalışmada, üç farklı doğal asfalt (Trinidad Göl Asfaltı, Amerika Gilsoniti, İran Gilsoniti) ve bir çeşit polimerin (SBS) bitümlü bağlayıcı ve karışımların mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Kullanılacak katkı oranını belirlemek amacıyla bitüm ağırlığının farklı oranlarında bu katkı maddeleri saf bitüme ilave edilerek karıştırılmıştır. Trinidad Göl Asfaltı, bitüm ve boyutu 0.075 mm’den küçük olan mineral maddeden oluşmaktadır. Trinidad Göl Asfaltı, Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü’nde ekstraksiyon deneyine tabi tutularak hem bitüm içeriği hem de bağlayıcı deneylerinde kullanılacak agregadan ayrıştırılmış bitüm elde edilmiştir (Şekil 4.3). Ekstraksiyon deneyi sonucunda TLA’nın %75 bitüm ve %25 mineral maddeden oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Ekstraksiyon deneyi sonrasında Trinidad Göl Asfaltı'nın bitüm ve mineral kısmı

Karıştırma işlemi Şekil 4.4' te görülen karıştırıcı ile 180°C sıcaklıkta 1000 rpm dönme hızında 1 saat süresince gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

Çalışmada öncelikle Amerikan Gilsonit'inden %6, %8, %10 ve %12 oranlarında kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış ve dinamik kayma reometresi deneyine tabi tutulmuştur. Katkı oranları içerisinde uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ'a uygun performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri olan PG 70-Y elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen değerler Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Katkı türü	Katkı içeriği (%)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)					Performans Seviyesi
		Sıcaklık (°C)					
		52	58	64	70	76	
AG	6	6.880	3.212	1.563	0.747	-	PG 64
	8	8.591	4.062	1.914	0.943	-	PG 64
	10	12.754	5.882	2.712	1.360	0.689	PG 70
	12	16.788	7.927	3.722	1.795	0.919	PG 70
IG	8	8.724	4.218	2.092	0.982	-	PG 64
	9	10.625	5.016	2.524	1.260	0.673	PG 70
	9.5	12.540	6.002	2.612	1.325	0.710	PG 70
	10	13.662	6.183	3.042	1.532	0.782	PG 70
TLA	40	8.035	3.662	1.715	0.850	-	PG 64
	50	9.110	4.235	1.977	0.994	-	PG 64
	60	13.126	6.042	2.810	1.383	0.731	PG 70
	70	15.872	7.863	3.741	1.667	0.823	PG 70
SBS	3	8.347	3.939	1.949	0.997	-	PG 64
	3.5	10.471	4.933	2.477	1.236	0.594	PG 70
	3.8	11.280	5.207	2.552	1.318	0.700	PG 70
	4	13.895	6.273	3.007	1.541	0.820	PG 70

AG kullanılarak hazırlanan bağlayıcılar incelendiğinde %6 ve %8 AG içeren bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 64-Y, %10 ve %12 AG içeren bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 70-Y olduğu belirlenmiştir. Uygulama bölgesi gereksinimini sağlayan minimum oran olan %10, AG katkı oranı olarak belirlenmiştir. %10 oranında AG içeren modifiye bağlayıcının 70°C sıcaklıktaki tekerlek izi parametresi (G*/sin δ) baz alınarak diğer katkı türlerinin kullanım oranları belirlenmiştir.

Tablo 4.5'te görüldüğü üzere İran Gilsonit'inden %9.5, Trinidad Göl Asfaltı'ndan % 60 ve SBS'den %3.8 kullanılması ile bütün modifiye bitümlerin benzer G*/sin δ değerine (1360 ±50 Pa) sahip oldukları belirlenmiştir. Bu nedenle saf bitüm ağırlığınca AG'den %10.0 (MB_{10%AG}), IG'den %9.5 (MB_{9.5%IG}), TLA'dan %60 (MB_{60%TLA}) ve SBS'ten %3.8 (MB_{3.8%SBS}) oranlarında kullanılmasına karar verilmiştir.

Katkı oranları belirlendikten sonra saf ve belirlenen oranlarda katkı içeren modifiye bitümler dönel ince film halinde ısıtma deneyine (RTFOT) tabi tutularak kısa dönem yaşlandırılmışlardır. TS EN 12607-1'e uygun olarak yapılan RTFOT deneyinde, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe yatay eksen etrafında 75 dakika süresince dakikada 15 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. PAV deneyinde RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılara 100°C sıcaklıkta 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmıştır. Basınçlı yaşlandırma deney aleti bölümümüzde bulunmadığından PAV deneyi İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yapılmıştır. Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde DSR, uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde BBR deneyleri uygulanarak saf ve modifiye bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan DSR ve BBR deneylerinden elde edilen değerler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları

DSR deney sonuçları					
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)				
	PG 58-34	MB _{10%} AG	MB _{9.5%} IG	MB _{60%} TLA	MB _{3.8%} SBS
58	1.053	-	-	-	-
70	-	1.360	1.325	1.383	1.318
G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (Şartname limiti min. 2.2 kPa)					
58	2.430	-	-	-	-
70	-	5.776	6.005	5.658	6.245
G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (Şartname limiti maks. 5000 kPa)					
16	1247		-	-	-
19	950	3704	3140	1735	2978
22	-	2847	2392	1360	2305
25	-	2158	1768	1043	1742

Tablo 4.6.'da görüldüğü üzere RTFOT kalıntılarında uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının 58°C sıcaklıkta ve modifiye bitümlerin 70°C sıcaklıkta şartname limiti değeri olan 2200 Pa değerini sağladıkları belirlenmiştir. Orijinal ve RTFOT kalıntısı

numuneler üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 58-Y, modifiye bitümlerin ise PG 70-Y olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4.6. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları (Devamı)

BBR deney sonuçları					
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)				
	PG 58-34	MB _{10%AG}	MB _{9.5%1G}	MB _{60%TLA}	MB _{3.8%SBS}
-18	0.363	0.339	0.338	0.329	0.345
-24	0.321	0.307	0.311	0.305	0.319
-30	0.292	0.283	0.288	0.258	0.285
Sünme sertliği (Mpa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)					
-18	106.8	124.5	122.1	152.5	111.4
-24	197.7	236.4	214.5	278.9	207.5
-30	390.2	448.7	432.9	521.6	418.6
Performans seviyesi (PG)					
	58-34	70-34	70-34	70-34	70-34

Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini belirlemek amacıyla saf bağlayıcının RTFOT kalıntısı üzerinde 16 ve 19°C sıcaklıklarda, modifiye bitümlerin PAV kalıntıları üzerinde ise 19, 22 ve 25°C sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca -18, -24 ve -30°C sıcaklıklarda PAV kalıntıları üzerinde BBR deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucunda PAV kalıntılarının hepsinin $G^* \cdot \sin \delta$ şartname limitini (maks. 5000 kPa) şartını sağlamıştır.

BBR deneyleri sonucunda bütün bağlayıcıların -18 ve -24°C sıcaklıklarda m-değeri ve sünme sertliği şartname limitlerini sağladığı fakat -30°C'de her iki parametrenin şartname limitini sağlayamadıkları belirlenmiştir. Tablo 4.7'de verilen PG 58-Y ve PG 70-Y bağlayıcılarına ait Superpave şartname kriterleri dikkate alındığında saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 58-34, modifiye bağlayıcıların performans seviyelerinin ise PG 70-34 olduğu belirlenmiştir.

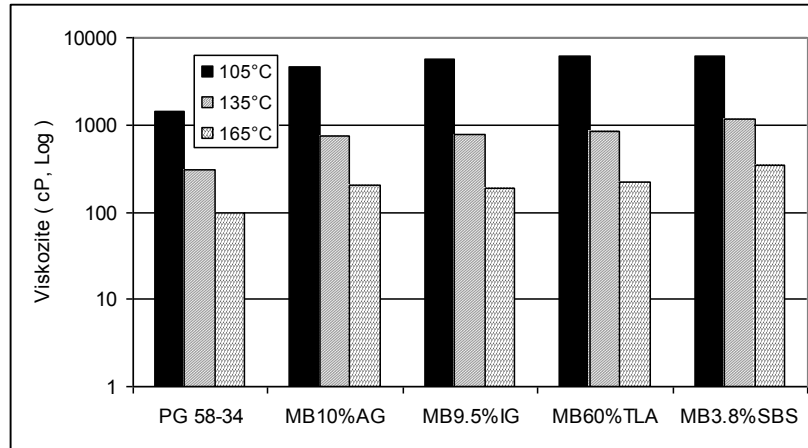
Tablo 4.7. PG 58-Y ve PG 70-Y Superpave bağlayıcı şartnamesi (McGennis vd., 1994).

PERFORMANS SINIFI	PG 58-					PG 70-					
	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	< 58					< 70					
Minimum Kaplama Tasarım Sıcaklığı, °C	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORJİNAL BAĞLAYICI											
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230										
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	58					70					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI											
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	58					70					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI											
PAV Deney Sıcaklığı, °C	100										
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	25	22	19	16	13	34	31	28	25	22	19
Fiziksel Sertleşme,	Rapor										
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Saf ve modifiye bitümlere ayrıca, 105°C, 135°C ve 165°C sıcaklıkta dönel viskozizetre deneyleri uygulanmıştır. Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.8’de verilmiştir. 105°C, 135°C ve 165°C sıcaklıktaki bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Bağlayıcıların viskozite deney sonuçları

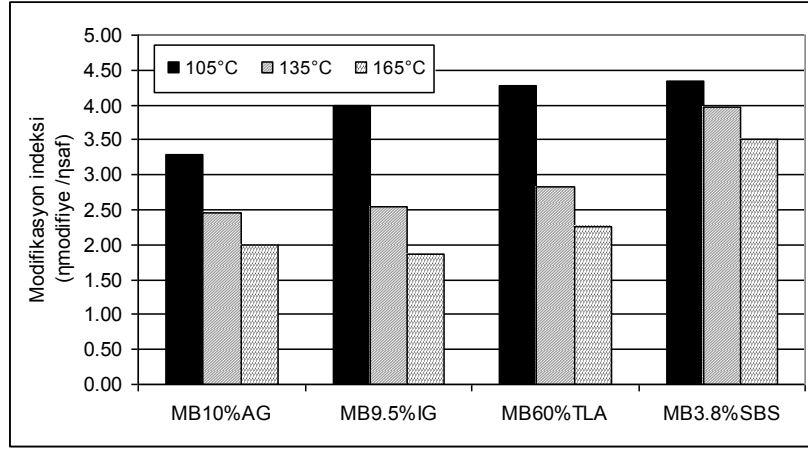
Özellik	Standart	PG 58-34	MB _{10%} AG	MB _{9.5%} IG	MB _{60%} TLA	MB _{3.8%} SBS
Viskozite (cP, 105°C)	ASTM D4402	1413	4663	5625	6038	6150
Viskozite (cP, 135°C)		300	737.5	762.5	850	1188
Viskozite (cP, 165°C)		100	200	187.5	225	350
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$, 105°C)	-	1.00	3.30	3.98	4.27	4.35
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$, 135°C)	-	1.00	2.46	2.54	2.83	3.96
Modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$, 165°C)	-	1.00	2.00	1.88	2.25	3.50
Karıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	-	152–158	166–168	165–167	167–169	171–172
Sıkıştırma sıcaklığı aralığı (°C)	-	134–143	159–162	159–162	161–164	166–169



Şekil 4.5. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite değerleri Superpave şartname limiti olan maks. 3000 cP değerini sağlamıştır. Katkı kullanımı ile bütün

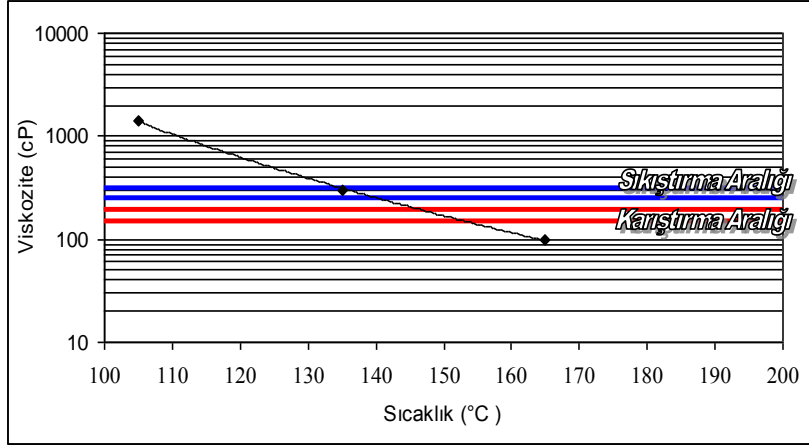
sıcaklıklarda viskozite değerleri artmıştır. Modifiye bitümlerin viskozite değerlerinin saf bağlayıcının viskozite değerine oranlanması ile belirlenen modifikasyon indeksi ($\eta_{\text{modifiye}}/\eta_{\text{saf}}$) değerleri Şekil 4.6.'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Modifikasyon indeksi değerlerinin sıcaklıkla değişimi

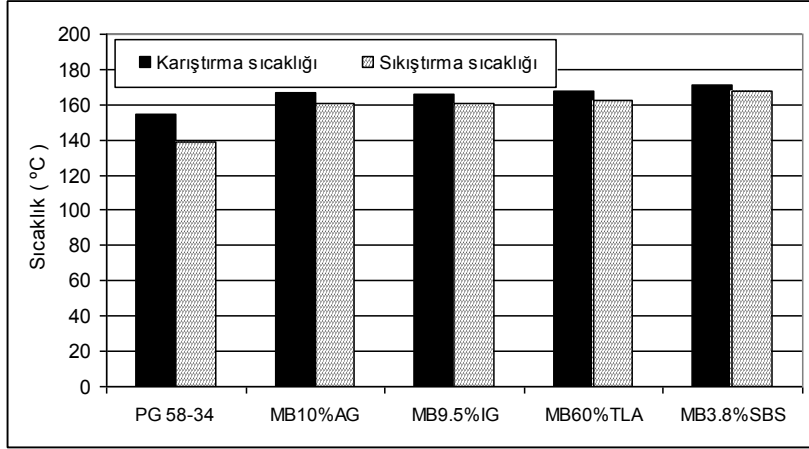
Modifikasyon indeksi değerleri incelendiğinde bütün sıcaklıklarda viskozite değerini en fazla arttıran katkının SBS olduğu, en az oranda arttıran katkının ise AG olduğu tespit edilmiştir. 105°C sıcaklıkta TLA ve SBS'in, 135°C sıcaklıkta AG ve IG'nin viskozite değerleri üzerinde benzer etkiye sahip oldukları belirlenmiştir.

Bitümlü bağlayıcıların agregayla karıştırılırken ve arazide bitümlü sıcak karışım arazide sıkıştırılırken yeterli işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. BSK'ların karıştırılmasında bitümlü bağlayıcının 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). Çizilen sıcaklık-viskozite grafiğinde viskozite değerleri işaretlenerek bu değerler bir doğru ile birleştirilmiştir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak alınmaktadır. Örnek olarak saf bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını gösteren viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 4.7'te verilmiştir.



Şekil 4.7. Saf bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Tablo 4.7’de verilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere katkı kullanımı ile daha yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı gerekmiştir. Bu durum katkı kullanımı ile bağlayıcının performansı artmasına rağmen agregayla karıştırma ve BSK’nın sıkıştırılması sırasında daha yüksek sıcaklık gerekeceği dolayısıyla plentte hazırlama sırasında daha fazla enerji gerekeceği söylenebilmektedir.

4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada agregaya olarak Elazığ Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Deneylede agregaya karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış olarak kullanılmıştır. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave agregaya gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregaya yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (3-10 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agregaya			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)	ASTM C-131	27.8	-	-	Maks. 35
Aşınma kaybı (Mikro deval), (%)	ASTM D 6928	13.6			Maks. 15
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile Donma kaybı), (%)	ASTM C-88	5.8	-	-	Maks. 10
Kaba Agregaya Köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	98/96	-	-	Min. 95/90
İnce Agregaya Köşeliliği, (%)	AASHTO T304	-	54	-	Min. 45
Yassı ve Uzun Daneleler, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)	AASHTO T176	-	60		Min. 45
Zararlı Maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 2

4.3. Karışımların Tasarım Bitüm İçeriklerinin Belirlenmesi

Superpave tasarım yöntemi, dikkate alınan trafik değerine göre Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olmak üzere üç farklı prosedürde uygulanmaktadır. En düşük kriterlere sahip olan Seviye 1 tasarım yönteminde nem hasarına karşı dayanıklılık deneyi ve hacimsel karışım tasarımı yer almaktadır. Hacimsel karışım tasarımı aynı zamanda diğer iki seviyeye göre tasarımda temel prosedür olarak yer almaktadır (Geçkil, 2008). Hacimsel tasarımda agregaya ve bitümün özgül ağırlıklarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.

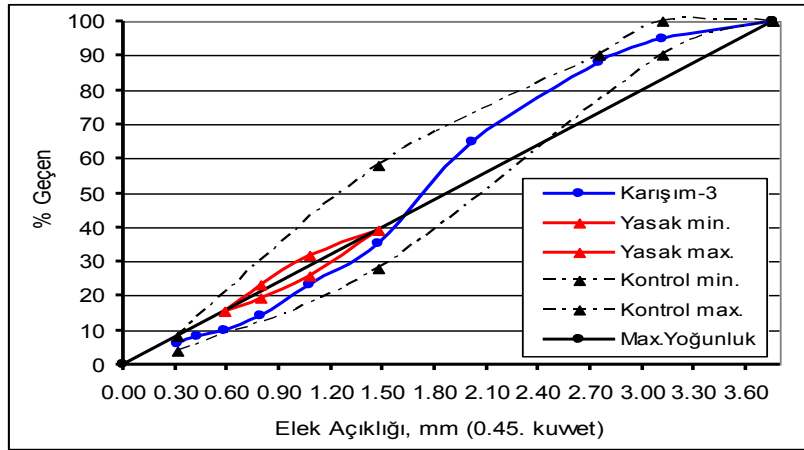
Agrega özgül ağırlıkları; hacim (Gsb), efektif (Gse) ve zahiri özgül ağırlık (Gsa) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Hacim özgül ağırlık; standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bütün boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Efektif özgül ağırlık; standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (bitümlü bağlayıcının giremediği fakat suyun nüfus edebildiği boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Zahiri özgül ağırlık ise standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki malzemenin (boşluk içermeyen) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlıkların değişiminde dikkate alınan boşluklar etkili olmaktadır. Dolayısıyla hacim değerleri arttıkça özgül ağırlık değerleri azalmaktadır. Özgül ağırlık değerleri arasında dikkate alınan hacim değerlerine bağlı olarak $Gsa > Gse > Gsb$ şeklinde bir ilişki bulunmaktadır.

Superpave yöntemi hacimsel BSK tasarımında iki farklı bitümlü sıcak karışım özgül ağırlık değeri kullanılmaktadır. Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (Gmm); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki bitüm ve agregadan oluşan karışımın (boşluksuz) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Maksimum teorik özgül ağırlık AASHTO T209 ile belirlenmekte olup asfalt betonu karışımındaki hava boşluğu miktarının ve yapım süresince kaplama sıkıştırması için hedef yoğunluk değerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Hacim Özgül Ağırlık (Gmb); Standart bir sıcaklıkta, sıkışmış bitüm ve agregası karışımının (boşluklu) birim hacminin standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır.

Tez çalışmasında Superpave yöntemine uygun olarak maksimum dane boyutu 19 mm ve nominal maksimum dane boyutu 12,5 mm olan agregalar için tavsiye edilen kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge noktaları baz alınarak agrega gradasyonu seçilmiştir. Bu gradasyona uygun olarak kaba ve ince agrega numuneleri hazırlanarak hacim ve zahiri özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca fillerin zahiri özül ağırlığı belirlenmiştir. Kullanılan gradasyon Şekil 4.9'da verilmiştir. Agregaların özgül ağırlıkları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Agrega özgül ağırlıkları

	Agrega karışımındaki oran (%)	Hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	Zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)
Kaba	35	2,544	2,610
İnce	59	2,571	2,617
Filler	6	-	2,675



Şekil 4.9. Kullanılan agrega gradasyonu

Tabloda görülen kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri ve özgül ağırlıkları kullanılarak her bir deneme agrega karışımının hacim (G_{sb}) ve zahiri (G_{sa}) özgül ağırlığı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, fillerin hacim özgül ağırlığını tespit edilemediğinden zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

$$G_{sb}, G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (4.3)$$

P_1, P_2, P_N : Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi,

G_1, G_2, G_N : Her bir agreganın hacim ve zahiri özgül ağırlığı.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{35}{2,544} + \frac{59}{2,571} + \frac{6}{2,675}} = 2,568 \text{ gr/cm}^3 \quad G_{sa} = \frac{100}{\frac{35}{2,610} + \frac{59}{2,617} + \frac{6}{2,675}} = 2,618 \text{ gr/cm}^3$$

4.3.1. PG 58-34 Bitümü ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi

Çalışmada bütün bağlayıcılar için tasarım bitüm içeriği belirlenmiştir. Bu kısımda örnek olarak sadece PG 58-34 ile hazırlanan karışımların tasarım bitüm içeriklerinin belirlenmesi detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Agregaların özgül ağırlıkları belirlendikten sonraki adım başlangıç bitüm içeriğinin (Pbi) belirlenmesidir. Başlangıç bitüm içeriği (Pbi), agrega karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile birlikte aşağıdaki işlem sırasına göre belirlenmiştir. Agreganın efektif özgül ağırlığı karışımın efektif özgül ağırlığından faydalanarak belirlenebilmektedir. Fakat tasarım aşamasında öncelikle aşağıdaki formülle yakın bir değer belirlenmekte ve kullanılmaktadır. Bu bağtıda, su absorpsiyonuna bağlı olarak değişen katsayı değeri 0,5 olarak alınmıştır. Absorpsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir.

$$\boxed{Gse = Gsb + 0,5 \times (Gsa - Gsb)} \quad (4.4)$$

$$Gse = 2,568 + 0,5 \times (2,618 - 2,568) = 2,593 \text{ gr/cm}^3$$

Agrega tarafından absorbe edilecek olan bitümlü bağlayıcı hacmi (Vba) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır. Hesaplarda hava boşluğunun %4 olduğu kabul edilmektedir.

$$\boxed{Vba = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \times \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse}\right)} \quad (4.5)$$

Vba: Absorbe edilen bitümlü bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3)

Pb: Bağlayıcı yüzdesi

Ps: Agregaya yüzdesi

Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı

Va: Hava boşluğu hacmi.

$$V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,024} + \frac{0,95}{2,593}\right)} \times \left(\frac{1}{2,568} - \frac{1}{2,593}\right) = 0,0083 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki formül ile belirlenmiştir.

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(S_n) \quad (4.6)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm^3/cm^3),

S_n: Agrega karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(12,5) = 0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Son olarak, başlangıç deneme bitümlü bağlayıcı içeriği (P_{bi}) aşağıdaki formüller kullanılarak belirlenmiştir.

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \quad (4.7)$$

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{(G_b \times (V_{be} + V_{ba})) + W_s} \times 100 \quad (4.8)$$

P_{bi}: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

W_s: Agreganın ağırlığı (gr).

$$W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,024} + \frac{0,95}{2,593}\right)} = 2,196 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,024 \times (0,102 + 0,0083)}{(1,024 \times (0,102 + 0,0083)) + 2,196} \times 100 = \% 4,89$$

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (P_{bi}) yardımıyla, toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (W_b) aşağıdaki formülle hesaplanmıştır. Karışımların hazırlanmasında 100 mm çapında silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agrega ağırlığı 1100 gr olarak alınmıştır.

$$W_b = \frac{W_s \times Pbi}{100 - Pbi} \quad (4.9)$$

$$W_b = \frac{1100 \times 4,89}{100 - 4,89} = 56,6 \text{ gr}$$

Belirlenen bitüm içeriğinde 4 adet bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerden 2 tanesi sıkıştırılmış 2 tanesi ise maksimum teorik özgül ağırlık değerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bitümlü sıcak karışım numunelerinin hazırlanmasında PG 58-34 bağlayıcısı 2 saat, gradasyona göre hazırlanmış agregaya ise 3 saat karıştırma sıcaklığındaki (155°C) etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış bitümlü bağlayıcı ısıtılmış agregaya üzerine önceden belirlenen miktarda dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla agregaya taneleri bitümlü bağlayıcı ile iyice kaplanana kadar 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135°C’deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur.

Karışımların maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla 2 adet asfalt karışımı daha hazırlanmıştır. Yukarıda ifade edildiği gibi hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları AASHTO T209 standardına göre aşağıdaki bağıntı ile tespit edilerek sonuçları Tablo 4.11’de verilmiştir.

$$Gmm = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (4.10)$$

Tablo 4.11. Deneme karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıkları

Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	Numune No	
	1	2
Piknometre, A (gr)	482,5	482,5
Piknometre +Su, B (gr)	1515,9	1515,9
Piknometre +Numune, C (gr)	1635,2	1633,8
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	2188,8	2187,1
$Gmm = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$	2,402	2,398
Ortalama, Gmm	2,400	

Belirlenen Gmm değerlerinden faydalanılarak hesapla Gse değerleri belirlenmiştir. Çalışmanın geri kalan kısmında hesapla belirlenen bu Gse değerleri kullanılmıştır.

$$G_{se} \text{ (hesap)} = \frac{100 - P_{bi}}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_{bi}}{G_b}\right)} \quad (4.11)$$

$$G_{se} \text{ (hesap)} = \frac{100 - 4,89}{\left(\frac{100}{2,400} - \frac{4,89}{1,024}\right)} = 2,575 \text{ gr/cm}^3$$

İki adet karışım numunesi ise yaşlandırma işleminden sonra sıkıştırma sıcaklığında (135°C) 30 dakika etüvde bekletilmiş ve sıkıştırılmıştır. İlk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konulmuş ve yoğurmalı sıkıştırıcı ve yazılımı hazırlanmıştır. Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yoğurma sayısı; uygulanan yoldan geçmesi planlanan eşdeğer standart dingil yükü (ESDY) sayısı ve yolun sınıfına bağlı olarak AASHTO TP4 standardına göre Tablo 4.12’de görülmektedir. Çalışmada, kabul edilen 3-10 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; Nini = 8, Ndes = 100 ve Nmaks =160 olarak alınmıştır.

Tablo 4.12. Taşıt sayısına göre sıkıştırma parametreleri (URL-9, 2013; Anderson ve McGennis, 1994).

Tasarım Trafik (ETDY), milyon	Sıkıştırma Parametreleri			Tipik Karayolu Uygulamaları
	Nini	Ndes	Nmaks	
< 0,3	6	50	75	Çok az trafik kapasiteli yollar
0,3–3	7	75	115	Orta trafikli şehir yolları
3–30	8	100	160	Yüksek trafikli şehir yolları ile çift yönlü, çok şeritli yollar
> 30	9	125	205	Ağır kamyon trafiğine maruz kalan çok şeritli, ağır trafik yoğunluklu yollar

Çalışmada, 1,25° yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 30 devir/dakika, yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilen ve 100 mm ile 150 mm’lik numune dökmeye elverişli olarak imal edilmiş olan Cooper marka yoğurmalı pres kullanılarak numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.10). Cihazda yoğurma sayısı otomatik olarak yazılım kullanılarak girilmektedir. Yoğurma süresince sıkışma miktarı sensörler yardımıyla ölçülüp otomatik olarak bilgisayara

aktarılmaktadır. Yoğurma işlemi sonunda cihaz üzerinde monte edilmiş olan kriko yardımıyla numune kalıptan çıkarılmaktadır.



Şekil 4.10. Cooper yoğurmalı sıkıştırıcı

Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanmıştır. Sıkıştırma işlemi esnasında, istenen yoğurma sayısı ($N_{des}=100$) tamamlanmaya kadar numuneler sıkıştırılmıştır. Karışımların yoğurma sayılarındaki yükseklikleri cihazda bulunan sensörler sayesinde ölçülmüş ve yazılım sayesinde kaydedilmiştir. Sıkışan numuneler zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmış ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı ($G_{mb}(\text{ölçülen})$), AASHTO T166 standardına göre tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 4.13’de verilmiştir.

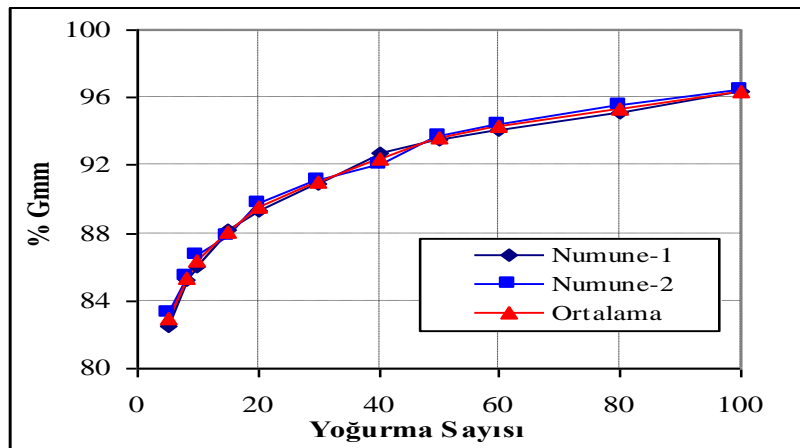
Tablo 4.13. Deneme karışımlarının ölçülen hacim özgül ağırlıkları

Hacim Özgül Ağırlık, $G_{mb}(\text{ölçülen})$	Numune No	
	1	2
Kuru ağırlık, A (gr)	1152,4	1152,2
Sudaki ağırlık, C (gr)	656,2	656,7
Doygun yüzey kuru ağırlık, B (gr)	1154,5	1154,3
$G_{mb}(\text{ölçülen}) = A/(B-C)$	2,313	2,316

Her bir karışım numunesinin elde edilen sıkıştırma verileri (h_x , Gmb(ölçülen), W_m , Gmm) kullanılarak, tasarım yoğurma sayısındaki (N_{des}) tahmini hacim özgül ağırlık (Gmb(tahmini)), düzeltme faktörü (C), düzeltilmiş hacim özgül ağırlık (Gmb(düzeltilmiş)) ve son olarak maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (%Gmm) hesaplanarak sonuçları analiz edilmiştir. Tablo 4.14’da PG 58–34 ana bağlayıcısı ile %4,89 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri verilmiştir. Sıkıştırılan numunelerin farklı yoğurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.14. Numunelerin %4,89 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Numunelerin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		$W_m = 1152,4$ gr		Numune-2		$W_m = 1152,2$ gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
$N_{ini} = 8$	74,8	1,963	2,047	85,27	75,2	1,952	2,051	85,44	85,36
20	71,4	2,056	2,144	89,33	71,6	2,050	2,154	89,73	89,53
40	68,8	2,134	2,225	92,71	69,8	2,103	2,209	92,05	92,38
60	67,8	2,165	2,258	94,08	68,0	2,158	2,268	94,48	94,28
80	67,1	2,188	2,282	95,06	67,2	2,184	2,295	95,61	95,33
$N_{des} = 100$	66,2	2,218	2,313	96,35	66,6	2,204	2,316	96,47	96,41
Gmb(ölçülen)	2,313			2,316					
Düz. Faktörü. (C)	1,043			1,051					
Gmm(ölçülen)	2,400								



Şekil 4.11. Sıkıştırılan numunelerin yoğunluk eğrileri ve ortalaması

Yoğurmalı pres ile yapılan sıkıştırma sırasında her dönüş sonrası numune yüksekliği cihazda bulunan sensörler yardımıyla ölçülerek yazılım tarafından kaydedilmektedir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) numune yüksekliğinden yola çıkılarak belirlenebilmektedir. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir. Tablo 4.14'te tasarım yoğurma sayısında (Ndes) 1. numune için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$W_m = 1152,4 \text{ gr}$$

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h x}{4} \times 0,001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (4.12)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

hx: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm),

$$V_{mx} = \frac{3,14 \times 100^2 \times 66,2}{4} \times 0,001 = 519,67 \text{ cm}^3$$

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = \frac{(W_m / V_{mx})}{\gamma_{su}} \quad (4.13)$$

Gmb(tahmini) : Numunenin sıkışma sırasındaki hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı,

Wm: Numunenin ağırlığı (gr),

γ_{su} : Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³),

Vmx: Numunenin hesapla bulunan hacmi (cm³).

Hesaplamalarda silindir geometriye sahip sıkıştırılmış numunelerin kenarlarının tam olarak düzgün ve boşluksuz olduğu kabul edilmekte ancak gerçekte boşluklar nedeniyle daha düşük hacimli bir numune elde edilmektedir. Bu nedenle hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı (Gmb(tahmini)) bir düzeltme faktörüyle (C) çarpılarak düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı (Gmb(düzeltilmiş)) elde edilmektedir.

$$C = \frac{Gmb(\text{ölçülen})}{Gmb(\text{tahmini})} \quad (4.14)$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş}) = C \times Gmb(\text{tahmini}) \quad (4.15)$$

C: Düzeltme faktörü,

Gmb(ölçülen) : Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı,

Gmb(tahmini) : Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı.

Gmb(düzeltilmiş): Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı.

$$\gamma_{su} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb(\text{tahmini}) = (1152,4/519,67)/1 = 2,218 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb(\text{ölçülen}) = 2,313 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm(\text{ölçülen}) = 2,400 \text{ gr/cm}^3$$

$$C = \frac{Gmb(\text{ölçülen})}{Gmb(\text{tahmini})} = 2,313/2,218 = 1,043$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş}) = C \times Gmb(\text{tahmini})$$

$$Gmb(\text{düzeltilmiş}) = 1,043 \times 2,218 = 2,313 \text{ gr/cm}^3$$

Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi (% Gmm) değeri, düzeltilmiş hacim özgül ağırlığın (Gmb(düzeltilmiş)), ölçülen teorik maksimum özgül ağırlığına (Gmm(ölçülen)) oranlanması ile bulunur.

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times Gmb(\text{düzeltilmiş}) / Gmm(\text{ölçülen})$$

$$\% \text{ Gmm} = 100 \times 2,313 / 2,400 = \%96,35$$

$$\text{Ortalama } \% \text{ Gmm} = (96,35 + 96,47) / 2 = \%96,41$$

Karışımlarının özelliklerinin tayin edilebilmesi ve şartname limitleri ile karşılaştırılabilmesi için, hesaplamalar için gerekli olan ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini değerleri Tablo 4.14'den alınarak aşağıda Tablo 4.15'de verilmiştir. Bu yoğunluklar esas alınarak, her

karışımın tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmiş ve Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.15. Karışımın Nini ve Ndes'deki %Gmm değerleri

%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
85,36	96,41

Superpave hacimsel tasarım kriterleri olan VMA, VFA ve filler oranı, tasarım yoğurma sayısı olan Ndes'de karışımın % 4'lük hava boşluğu içeriğine sahip olması esasına dayanmaktadır. Superpave karışım tasarım yöntemi ayrıca Nmaks, Ndes ve Nini yoğurma sayılarında da karışım yoğunluğu için kriterler içermektedir. Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (Va) ve mineral agregadaki boşluk yüzdesi (% VMA) aşağıdaki bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$\boxed{Va = 100 - \%Gmm@Ndes} \quad (4.16)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes'deki hava boşluğu,
%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

$$Va = 100 - 96,41 = \%3,59$$

$$\boxed{\%VMA = 100 - \left(\frac{\%Gmm @ Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right)} \quad (4.17)$$

%VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

%Gmm@Ndes: Ndes'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi,

Gmm: Maksimum teorik özgül ağırlık,

Gsb: Toplam agreganın hacim özgül ağırlığı,

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregada içeriği (cm³/cm³).

$$VMA = 100 - \left(\frac{96,41 \times 2,400 \times 0,9511}{2,568} \right) = \%14,28$$

Tablo 4.16. Deneme karışımlarının sıkıştırma hesap özeti

% AC	% Gmm@Nini	% Gmm@Ndes	% Va	% VMA
4,89	85,4	96,4	3,59	14,28

Bu kısma kadar deneme bitüm içeriğinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri değerlendirilmektedir. Hacimsel tasarımda hava boşluğunun %4 olması istenmektedir. Deneme (başlangıç) bitüm içeriğinde genellikle %4 boşluk oranı yakalanamamaktadır. Bu nedenle hesaplamayla tasarım yoğurma sayısında (Ndes) %4 boşluk oranını verecek tahmini bitüm içeriği aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir.

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (4.18)$$

Pb(tahmini) : Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini bitüm içeriği,

Pbi: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak deneme (başlangıç) bitüm içeriği,

Va: Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes) hava boşluğu yüzdesi (deneme).

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes) bulunan hava boşluğu yüzdesi % 4'den farklı çıktığından, tasarım yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir bitüm içeriği hesaplanmış ve hesaplanan tahmini tasarım bitüm içeriğindeki tahmini tasarım özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Tasarım yoğurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini bitüm içeriği;

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va))$$

$$Pb(\text{tahmini}) = 4,89 - (0,4 \times (4 - 3,59)) = \%4,73$$

Deneme bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerin hacimsel özelliklerinden yola çıkarak karışımların tasarım yoğurma sayısında (Ndes) ve %4 hava boşluğuna sahip olması durumundaki hacimsel özellikleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$\%VMA(\text{tahmini}) = \%VMA(\text{başlangıç}) + C \times (4 - Va) \quad (4.19)$$

%VMA(başlangıç) : Deneme bitüm içeriğindeki karışımın agrega boşlukları yüzdesi,

C: Sabit katsayı, hava boşluğu yüzdesi % 4'den az ise 0,1; yüksek ise 0,2 alınır.

Tasarım yoğurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (Nini) karışım yoğunlukları, bu tahmini bitüm içerikleri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Deneme karışımlarında boşluk oranı %4'ten küçük olduğundan C katsayısı 0,1 olarak alınmıştır.

$$\%VMA(\text{tahmini}) = \%VMA(\text{başlangıç}) + C \times (4 - Va)$$

$$\%VMA(\text{tahmini}) = 14,28 + 0,1 \times (4 - 3,59) = \%14,32$$

$$\%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{(\%VMA(\text{tahmini}) - 4,0)}{\%VMA(\text{tahmini})} \quad (4.20)$$

$$\%VFA(\text{tahmini}) = \frac{14,32 - 4,0}{14,32} \times 100 = \%72,1$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nini = \%Gmm(\text{deneme})@Nini - (4,0 - Va) \quad (4.21)$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nini = 85,4 - (4,0 - 3,59) = \%84,9$$

Karışımında kullanılan 0,075 mm'lik (No. 200) elekten geçen filler malzemesinin agrega karışımındaki ağırlıkça yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif bitüm içeriğine ($P_{be}(\text{tahmini})$) oranlanması ile filler oranı (DP) hesaplanmaktadır. Bir karışımındaki efektif bitüm bağlayıcı içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır. Filler oranı ise Formül 4.23 ile belirlenmektedir.

$$P_{be}(\text{tahmini}) = P_b(\text{tahmini}) - (P_s \times G_b) \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) \quad (4.22)$$

Pbe: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif bitüm içeriği,

Pb(tahmini) : Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini bitüm içeriği,

Ps: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak agrega içeriği,

Gb: Bitümün özgül ağırlığı,

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı.

$$P_{be}(\text{tahmini}) = 4,73 - (95,11 \times 1,024) \times \left(\frac{2,575 - 2,568}{2,575 \times 2,568} \right) = \%4,61$$

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}(\text{tahmini})} \quad (4.23)$$

$$DP = 6,0/4,61 = 1,30$$

Sonuç olarak, başlangıç bitüm içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 4.17’de gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, karışımın bütün şartname kriterlerini karşıladığı belirlenmiştir.

Tablo 4.17. Deneme karışımlarının sıkıştırma sonuçları ve şartname kriterleri

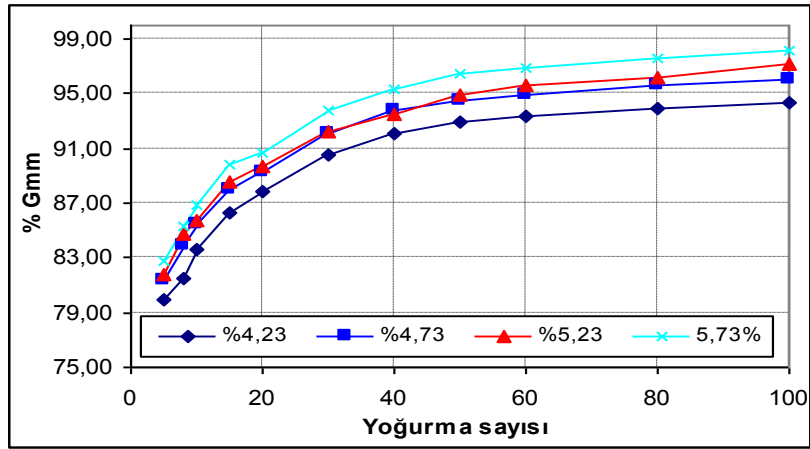
Deneme Karışımı	P _{bi} (%)	P _b (%)	V _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%G _{mm} @N _{ini}	%G _{mm} @N _{des}
	4.89	4.73	4.00	14.3	72.1	1.3	84,9	96.00
Şartname Kriterleri			4.00	14.0 (min.)	65-75 (min.)	0.8-1.6	≤89,0	96.00

Tahmini bitüm içeriği belirlendikten sonra karışımın tahmini bitüm içeriğinde, ±%0,5 ve +%1,0 olmak üzere dört ayrı bitüm içeriğinde ve her bitüm içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 bitümlü sıcak karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu dört bitüm içeriği, Superpave karışım tasarım yöntemi için minimum gereksinimdir. PG 58-34 bağlayıcısı kullanılarak %4,23; %4,73; %5,23 ve %5,73 bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri tasarım agrega gradasyonu seçiminde olduğu gibi hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Ayrıca, agrega karışımının her bir bitüm içeriğindeki karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık (G_{mm}) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (G_{mb}) değerleri belirlenerek Tablo 4.18’de gösterilmiştir.

Tablo 4.18. Farklı bitüm içeriklerinde sıkıştırılan karışım numunelerinin fiziksel özellikleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
4.23	48.54	1147,9	1151,3	648,8	2,284	1148,2	1152,5	649,1	2,281	2,283
4.73	54.57	1150,3	1152,5	653,6	2,306	1149,9	1151,4	653,5	2,309	2,308
5.23	60.66	1156,3	1157,9	658,2	2,314	1155,5	1157,1	659,5	2,322	2,318
5.73	66.81	1163,7	1165,1	664,5	2,325	1164,0	1165,4	665,1	2,327	2,326

%4,23; %4,73; %5,23 ve %5,73 bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri, Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



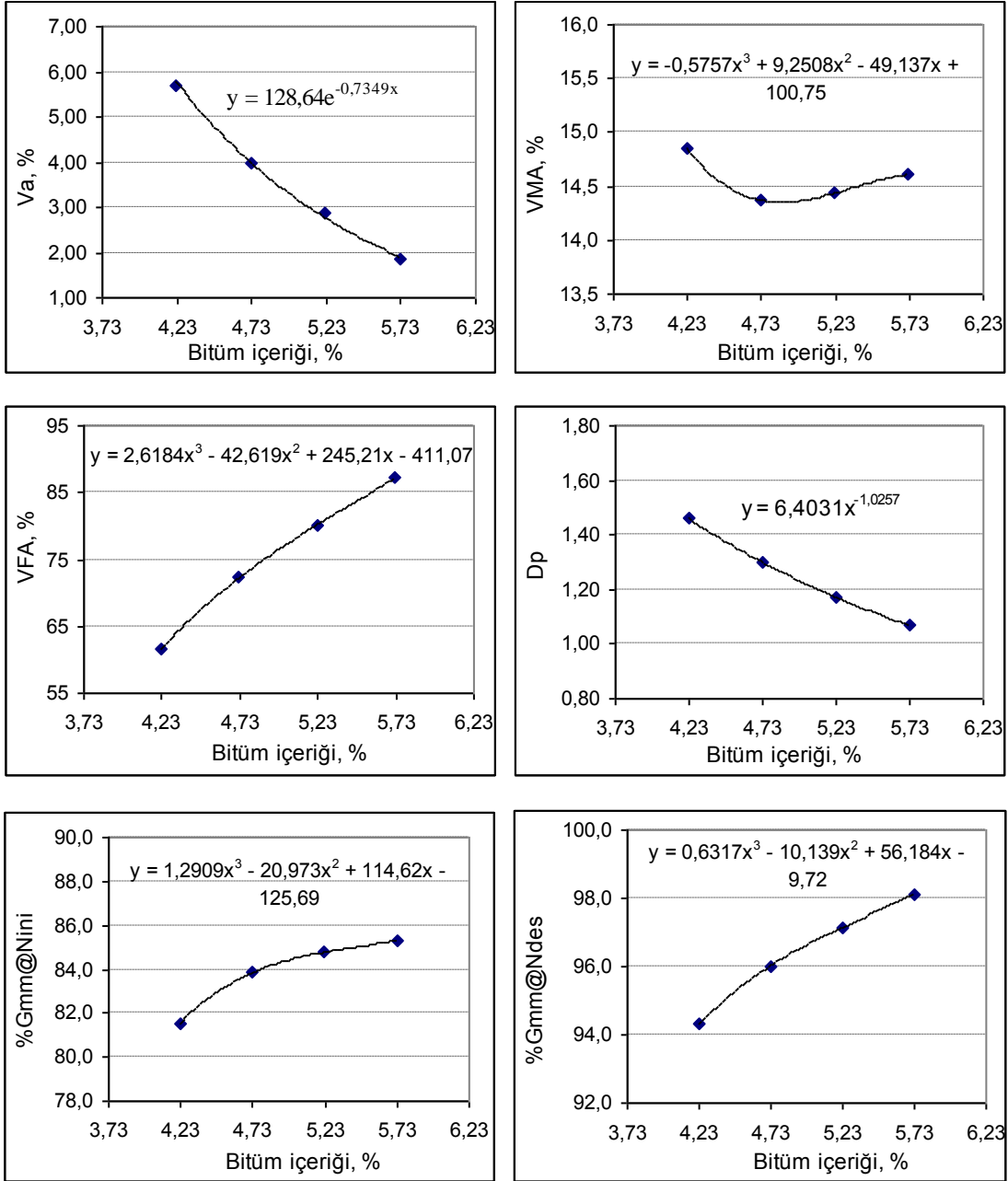
Şekil 4.12. Karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri

Tasarım yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı bitüm içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 4.19’de verilmiştir.

Tablo 4.19. Karışım numunelerinin hacim özellikleri ve yoğunluk değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.
4,23	5,69	14,9	61,7	1,5	81,6	94,3
4,73	3,99	14,4	72,3	1,3	83,8	96,0
5,23	2,87	14,4	80,1	1,2	84,8	97,1
5,73	1,87	14,6	87,2	1,1	85,3	98,1

Tasarım yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, bitüm yüzdelere bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Karışımların hacimsel ve yoğunluk özelliklerinin bitüm içeriği ile değişimi

PG 58-34 bağlayıcısı için tasarım bitüm içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi- bitüm yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %4,72 olarak tespit edilmiştir. Bulunan bu tasarım bitüm yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer tasarım değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 4.20’de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.20. Karışımların %4,72 tasarım bitüm bağlayıcı içeriğindeki özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va, %)	4,0	4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA, %)	14,4	Min. 14,0
Bitümle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA, %)	72,2	65–75
Filler Oranı (DP)	1,3	0,8–1,6
%Gmm@Nini. = 8 (%)	83,8	Maks. 89
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96,0	96

Ayrıca son olarak, tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve yoğunluk değerleri şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla hazırlanan ve maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri Tablo 4.21’de, sıkıştırma karakteristikleri Tablo 4.22’de ve bu numunelerden elde edilen değerler de Tablo 4.23’de verilmiştir.

Tablo 4.21. Kontrol karışım numunelerinin Gmb ve Gmm değerleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doygun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
4.72	54.5	1150,2	1151,2	661,9	2,351	1150,6	1151,8	662,0	2,349	2,404

Tablo 4.22. Numunelerin Nmaks.'da %4,72 bitüm içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1150,2 gr		Numune-2		Wm = 1150,6 gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
Nini= 8	76,0	1,928	2,060	85,7	76,1	1,926	2,047	85,1	85,4
20	72,9	2,010	2,148	89,3	72,6	2,019	2,145	89,3	89,3
40	69,5	2,108	2,253	93,7	68,8	2,130	2,264	94,2	94,0
60	68,4	2,142	2,289	95,2	68,0	2,155	2,290	95,3	95,3
80	68,1	2,152	2,299	95,6	67,7	2,165	2,301	95,7	95,7
Ndes= 100	67,8	2,161	2,309	96,1	67,5	2,171	2,307	96,0	96,0
120	67,5	2,171	2,319	96,5	67,1	2,184	2,321	96,6	96,5
140	67,2	2,180	2,330	96,9	66,8	2,194	2,332	97,0	97,0
Nmaks= 160	66,6	2,200	2,351	97,8	66,3	2,211	2,349	97,7	97,8
Gmb(ölçülen)	2,351			2,349					
Düz. Faktörü. (C)	1,068			1,063					
Gmm(hesaplanan)	2,404								

Tablo 4.23. Karışım numunelerinin Nmaks.'da %4,72 bitüm içeriğindeki yoğunluk değerleri

Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	85,4	96,0	97,8
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

Tablo 4.24. Karışımların %4,72 tasarım bitüm içeriğindeki özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va, %)	4,0	4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA, %)	14,3	Min. 14,0
Bitümle Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA, %)	72,3	65–75
Filler Oranı (DP)	1,3	0,8–1,6
%Gmm@Nini. = 8 (%)	85,4	Maks. 89
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96,0	96
%Gmm@Nmaks. = 160 (%)	97,8	Maks. 98

Tablo 4.24 incelendiğinde, belirlenmiş olan tasarım agrega gradasyonu ile PG 58-34 kullanılarak tespit edilen tasarım bitüm içeriğinde (%4,72) hazırlanan ve Nmaks'da sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk yüzdesi değerlerini Nini, Ndes ve Nmaks yoğurma sayılarında sağladığı görülmektedir.

4.3.2. Modifiye Bağlayıcılar ile Hazırlanan Karışımların Tasarım Bitüm İçeriğinin Tespit Edilmesi

Amerikan Gilsoniti, İran Gilsoniti ve SBS kullanılan modifiye bağlayıcılarla hazırlanan bitümlü sıcak karışımların dizayn bitüm içerikleri, saf bağlayıcı kullanılarak belirlendiği gibi belirlenmiştir. Fakat TLA içerisinde %25 filler bulundurduğundan TLA ile hazırlanan karışımların tasarım bitüm içeriği deneme yanılma yolu ile belirlenmiştir. Kullanılan TLA oranları, filler içerikleri ve bitüm içerikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 4.25).

Tablo 4.25. TLA içerisindeki filler ve bitüm oranları

TLA Modifiyeli bitüm %'si	TLA içerisindeki filler, %	TLA içerisindeki bitüm, %
5	0,75	4,25
5,5	0,825	4,675
6	0,9	5,1
5,8	0,87	4,93

Çalışmada öncelikle %5, %5,5 ve %6 oranlarında TLA modifiyeli bitüm kullanılarak 2'şer adet BSK numuneleri hazırlanmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan %5,8 oranında TLA (%4,93 oranında bitüm) kullanılması durumunda istenen hacimsel özelliklerin sağlandığı belirlenmiştir. Farklı oranlarda TLA ile hazırlanan karışım numunelerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.27'da verilmiştir. Dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri ise Tablo 4.26'de verilmiştir.

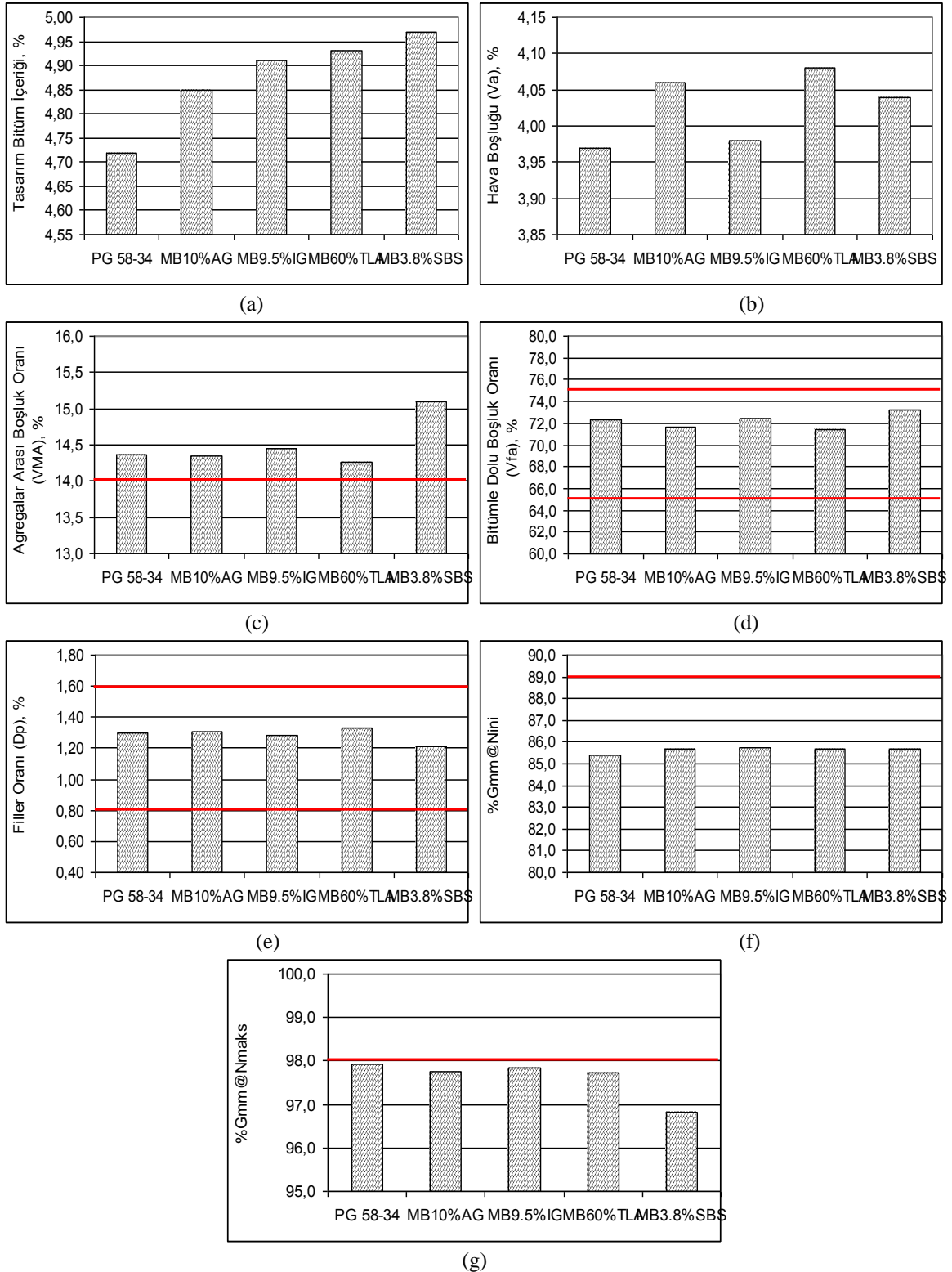
Tablo 4.26. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü				
		PG 58-34	MB _{10%} AG	MB _{9.5%} IG	MB _{60%} TLA	MB _{3.8%} SBS
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4,72	4,85	4,91	4,93	4,97
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	3,97	4,06	3,98	4,08	4,04
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14,36	14,34	14,45	14,26	15,10
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	72,37	71,66	72,43	71,38	73,23
Toz oranı (Dp)	0.8–1.6	1,30	1,31	1,28	1,33	1,21
%Gmm@Nini. = 8 (%)	max. 89	85,41	85,69	85,76	85,67	85,66
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	96,03	95,94	96,02	95,92	95,96
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	max. 98	97,92	97,75	97,83	97,73	96,81

Tablo 4.27. Farklı oranlarda TLA içeren bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri

Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %
	% TLA	% filler	% bitüm	1	2	3	Ort									
1	5,00	0,75	4,25	66,5	66,7	66,7	66,6	1140,6	646,3	1143,5	497,2	2,294	2,438	5,97	13,29	55,08
2				67,3	67,5	67,2	67,3	1139,6	645,8	1143,2	497,4	2,291				
ORTALAMALAR												2,293				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %
	% TLA	% filler	% bitüm	1	2	3	Ort									
3	5,50	0,83	4,68	66,4	66,0	66,0	66,1	1148,5	652,5	1150,3	497,8	2,307	2,423	4,66	12,69	63,27
4				65,6	66,0	65,7	65,8	1147,6	653,8	1149,9	496,10	2,313				
ORTALAMALAR												2,310				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %
	% TLA	% filler	% bitüm	1	2	3	Ort									
5	6,00	0,90	5,10	65,7	65,5	65,5	65,6	1151,4	657,3	1152,5	495,2	2,325	2,409	3,64	12,35	70,50
6				65,9	66,1	66,1	66,0	1150,9	655,6	1152,4	496,8	2,317				
ORTALAMALAR												2,321				
Briket No:	Bitüm			Briket Yüksekliği				A gr	C gr	B gr	V cm ³	Dp gr/cm ³	D _t gr/cm ³	V _h %	V.M.A %	V _f %
	% TLA	% filler	% bitüm	1	2	3	Ort									
7	5,80	0,87	4,93	66,2	65,8	65,9	66,0	1148,9	654,4	1150,5	496,1	2,316	2,414	4,07	14,26	71,38
8				66,3	66,6	66,5	66,5	1149,2	654,8	1151,1	496,3	2,316				
ORTALAMALAR												2,316				

Bitümlü sıcak karışımların hacimsel özellikleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Karışımların hacimsel özellikleri

Şekil 4.14(a)'da görüldüğü üzere en düşük tasarım bitüm içeriğine saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde ise en düşük tasarım bitüm içeriğine MB_{%10AG} modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların, en yüksek tasarım bitüm içeriğine ise MB_{%3,8SBS} modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.14(b) incelendiğinde karışımların hava boşluğu oranlarının tasarıma uygun olarak %4'e yakın olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.14(c)'de görüldüğü üzere bütün karışımların tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerlerinin Superpave şartname kriterini sağladığı, 14'ten büyük olduğu belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde en düşük tasarım bitüm içeriğindeki agregalar arası boşluk oranı değerine MB_{%60TLA} ile hazırlanan karışımın, en yüksek VMA değerine ise MB_{%3,8SBS} modifiyeli bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.14(d)'de bütün karışımların VFA değerlerinin şartname sınırları arasında (%65-75) olduğu görülmektedir. Karışımlar incelendiğinde en düşük VFA değerine VMA değerleri ile bağlantılı olarak MB_{%60TLA} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımın, en yüksek VFA değerine ise MB_{%3,8SBS} modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.14(e)'de görüldüğü üzere karışımların filler oranı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Karışımların filler oranı değerlerinin 0.8 ile 1.6 arasında olduğu dolayısıyla Superpave şartname kriterini sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 4.14(f)'de görüldüğü üzere bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nini değerlerinin %89'dan az olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.14(g)'de bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, %Gmm@Nmaks değerlerinin %98'den az olduğu görülmektedir.

4.4 Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

Çalışmada tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü, indirekt çekme yorulma ve tekerlek izi deneyleri uygulanmıştır.

4.4.1. Marshall Stabilite ve Akma Deney Sonuçları

PG 58-34 saf bitümü ve MB₁₀AG, MB_{9,5}IG, MB₆₀TLA ve MB_{3,8}SBS modifiye bitümleri kullanılarak tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi ile nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan kalıcı Marshall Stabilitesi deneyi uygulanmıştır. Bütün karışımlar tasarım bitüm içeriklerinde ve %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler ayrıca koşullandırma işlemine tabi tutulmuştur. Normal Marshall stabilite ve akma deneyinde numuneler TS EN 12697-34 standardına göre 60°C suda 40 dakikada bekletilmiştir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall stabilitesi (RMS) değerini belirlemek amacıyla numuneler 60°C suda 24 saat bekletilmiş daha sonra Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada 60°C suda 24 saat bekletilen numuneler “koşullandırılmış” olarak adlandırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelere uygulanan Marshall Stabilite ve akma deney sonuçları Tablo 4.28’de, koşullandırılmış bağlayıcıların deney sonuçları ise Tablo 4.29’da verilmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmı Şekil 4.15’te görülmektedir. Ayrıca koşullandırma işleminden önce ve sonra Marshall stabilite değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi Şekil 4.16’da verilmiştir.



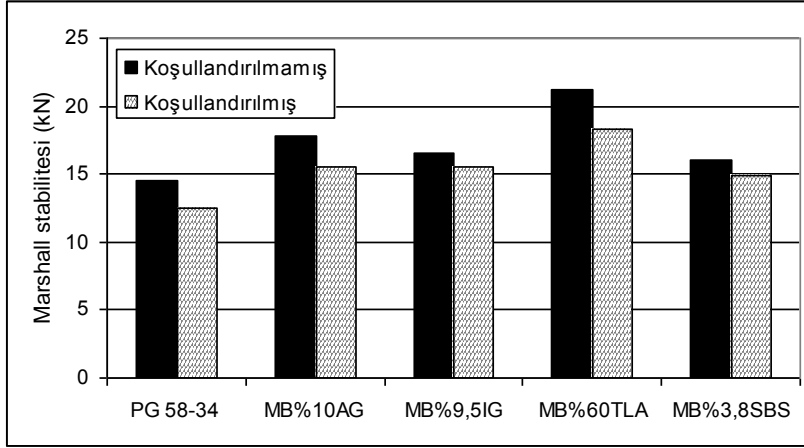
Şekil 4.15. Deneye tabi tutulan numunelerin bir kısmının görünüşü

Tablo 4.28. Koşullandırılmamış numunelerin Marshall deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	G_{mb}	G_{mm}	V_a (%)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
PG 58-34	1	63,5	2,313	2.403	3,9	14,43	3,81	1,019	14,71	3,83
	2	63,9	2,309		4,1	13,76	3,86	1,009	13,88	
	3	63,7	2,306		4,2	14,89	3,72	1,013	15,08	
	Ortalama						3,80		14,56	
MB _{%10AG}	4	63,7	2,315	2.409	4,1	16,18	4,24	1,014	16,40	4,77
	5	63,7	2,315		4,1	17,31	3,40	1,012	17,52	
	6	63,5	2,319		3,9	19,15	3,68	1,017	19,48	
	Ortalama						3,77		17,80	
MB _{%9,5IG}	7	63,7	2,319	2.406	3,8	16,89	3,53	1,014	17,13	4,28
	8	63,9	2,318		3,8	15,91	3,86	1,009	16,05	
	9	64,0	2,313		4,0	16,31	4,28	1,005	16,39	
	Ortalama						3,89		16,52	
MB _{%60TLA}	10	63,4	2,328	2.426	4,2	22,30	2,97	1,020	22,74	6,93
	11	63,1	2,335		3,9	20,36	2,99	1,028	20,92	
	12	63,3	2,330		4,1	19,47	3,24	1,023	19,91	
	Ortalama						3,07		21,19	
MB _{%3,8SBS}	7	63,5	2,296	2.390	4,1	15,42	3,63	1,019	15,72	4,20
	8	63,3	2,300		3,9	15,28	3,65	1,023	15,62	
	9	63,6	2,300		3,9	16,33	4,15	1,016	16,59	
	Ortalama						3,81		15,98	

Tablo 4.29. Koşullandırılmış numunelerin Marshall deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	G_{mb}	G_{mm}	V_a (%)	Stabilite, (kN)	Akma, (mm)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite, (kN)	MQ, (kN/mm)
PG 58-34	1	63,5	2,313	2.403	3,9	12,25	3,94	1,019	12,48	3,19
	2	63,1	2,305		4,2	10,99	3,86	1,030	11,32	
	3	63,2	2,310		4,0	13,24	3,92	1,026	13,59	
	Ortalama						3,90		12,46	
MB _{%10AG}	4	63,4	2,314	2.409	4,1	14,38	4,49	1,021	14,68	3,76
	5	63,8	2,317		4,0	17,17	4,11	1,011	17,36	
	6	63,9	2,314		4,1	14,52	3,86	1,009	14,65	
	Ortalama						4,15		15,56	
MB _{%9,5IG}	7	63,8	2,310	2.406	4,1	14,84	3,91	1,009	14,98	3,92
	8	64,1	2,315		3,9	15,84	3,88	1,003	15,88	
	9	64,0	2,319		3,7	15,49	4,06	1,006	15,58	
	Ortalama						3,95		15,48	
MB _{%60TLA}	10	63,6	2,325	2.426	4,3	18,14	3,97	1,015	18,41	4,67
	11	63,3	2,330		4,1	17,67	3,83	1,023	18,07	
	12	63,3	2,332		4,0	17,96	3,96	1,023	18,38	
	Ortalama						3,92		18,29	
MB _{%3,8SBS}	10	63,5	2,298	2.390	4,0	14,01	3,72	1,019	14,28	4,00
	11	63,8	2,301		3,8	14,80	3,66	1,010	14,96	
	12	63,6	2,297		4,0	15,19	3,80	1,016	15,44	
	Ortalama						3,73		14,89	

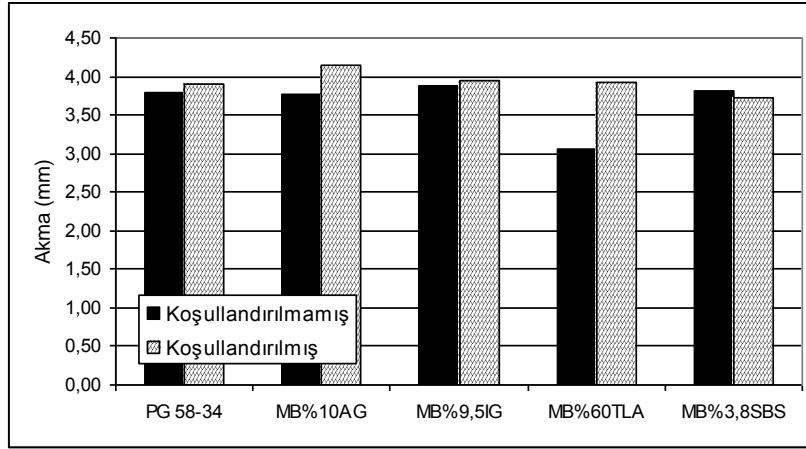


Şekil 4.16. K ve KŞ karışımlarının stabilite değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

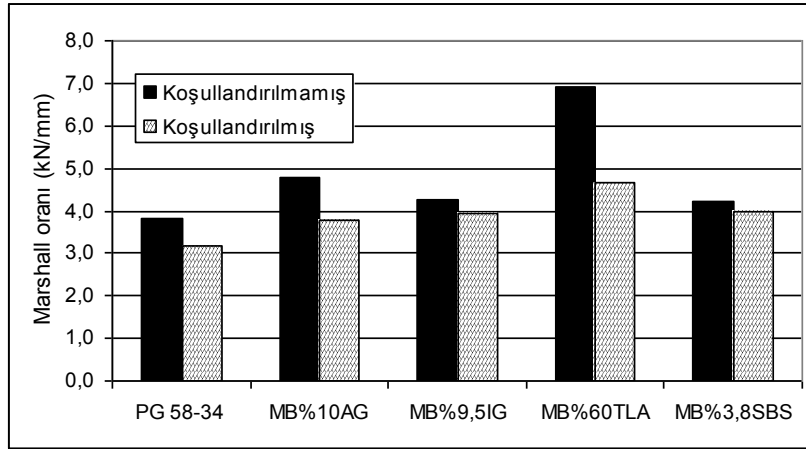
Şekil 4.16’da görüldüğü üzere koşullandırma işleminden önce ve sonra en yüksek stabilite değerlerine MB%60TLA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük stabilite değerine ise PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma nedeniyle karışımların stabilite değeri azalmıştır. Koşullandırma işleminden önce MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların stabilite değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %22.3, %13.5, %45.6 ve %9.8 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden sonra ise MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların stabilite değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %24.9, %24.2, %46.8 ve %19.5 oranlarında yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma nedeniyle modifiye bitümlerin etkilerinin arttığı tespit edilmiştir. Koşullandırma dolayısıyla etkinliği en fazla artan katkı maddesinin SBS olduğu, etkinliği en az olan katkının ise TLA olduğu belirlenmiştir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların akma değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir.

Şekil 4.17 incelendiğinde koşullandırma öncesinde en yüksek akma değerlerine MB%9,5IG kullanılarak hazırlanan karışımların, koşullandırma sonrasında ise MB%10AG modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük akma değerlerine ise koşullandırma öncesinde MB%60TLA ile hazırlanan karışımların, koşullandırma sonrasında ise MB%3,8SBS kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma nedeniyle stabilite değerleri azalmasına rağmen akma değerlerinin genel olarak

arttığı belirlenmiştir. Marshall stabilite değerinin akma değerine bölümünden elde edilen Marshall oranı (MQ) değerlerinin değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. K ve KŞ karışımlarının akma değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

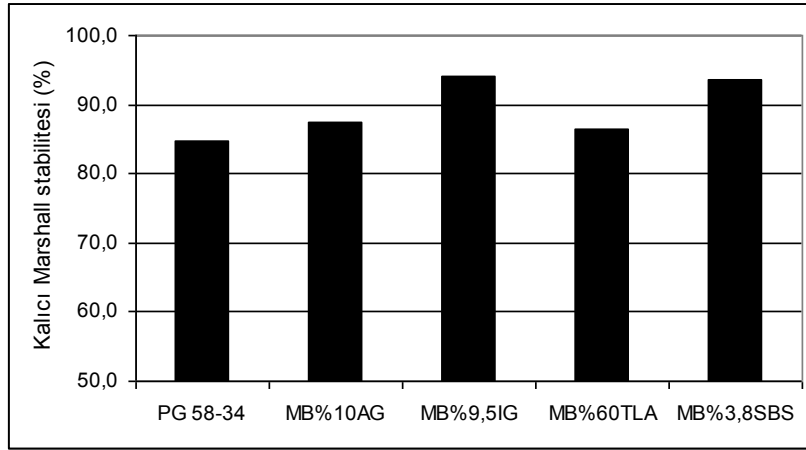


Şekil 4.18. K ve KŞ karışımlarının Marshall oranı değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 4.18 incelendiğinde en yüksek Marshall oranı (MQ) değerine koşullandırma işleminden önce ve sonra MB%60TLA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma işleminden önce ve sonra en düşük MQ değerlerine PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Koşullandırma nedeniyle karışımların MQ değerleri azalmıştır.

Koşullandırma öncesinde MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların MQ değerleri PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların MQ

değerlerine göre sırasıyla %24.4, %11.6, %80,7 ve %9.6 oranlarında artmıştır. Koşullandırma işlemi sonrasında ise MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların MQ değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların MQ değerlerine göre sırasıyla %18.0, %22,9, %46,2 ve %25.3 oranlarında arttığı belirlenmiştir. MQ değerleri sonucunda koşullandırma önce ve sonrasında TLA içeren bağlayıcılarla hazırlanan karışımların rijitliğinin daha yüksek olacağı söylenebilmektedir. Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan Kalıcı Marshall Stabilite değerlerinin katkı türü ile değişimi ise Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19. Karışımların RMS değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Şekil 4.19’de görülen kalıcı Marshall stabilitesi değerleri incelendiğinde karışımlar içerisinde en düşük RMS değerine PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların, en yüksek RMS değerine ise MB%9,5IG ve MB%3,8SBS bitümleri ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların RMS değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımın RMS değerlerine göre sırasıyla %3.4, %11.0, %2.2 ve %10.5 oranlarında artmıştır. Bu durum katkı türleri içerisinde nem hasarına karşı dayanımı en yüksek olan katkıların IG ve SBS olduğunu, en düşük etkiye ise TLA katkı maddesinin sahip olduğunu göstermektedir.

Marshall deneyleri sonucunda stabilite açısından en üstün katkının TLA, akma açısından koşullandırma öncesinde TLA, koşullandırma sonrasında ise SBS, MQ açısından TLA ve nem hasarına karşı dayanım bakımından IG ve SBS olduğu söylenebilmektedir.

4.4.2. Nem Hasarına Karşı Dayanım Deney Sonuçları

PG 58-34 bitümü ve dört farklı modifiye bitüm ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde AASHTO T 283 standardına uygun olarak çekme dayanımı oranı deneyi uygulanarak karışımların nem hasarına karşı dayanımları belirlenmiştir. Her bir karışım için $7 \pm 0,5$ boşluk oranına sahip olacak şekilde 6 adet numune hazırlanmıştır. AASHTO T 283 standardına uygun olarak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tespitinde kullanılacak numuneler hazırlanırken 40 devirlik sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımların kısa dönem yaşlandırılmasında numuneler 16 saat süresince 60°C sıcaklığa sahip etüvde, ardından sıkıştırma sıcaklığında iki saat bekletilmiştir. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ardından numunelerin hacimsel özellikleri belirlenerek boşluk oranları birbirine yakın olacak şekilde gruplandırılmıştır. Karışım numunelerinden üçer tanesine vakum uygulanarak boşluklarının %70-80 oranında suyla dolması sağlanmıştır. Bu doygunluk oranını sağlamak amacıyla koşullandırmaya maruz bırakılacak numunelerin hepsine 10 dakika süresince vakum uygulanmıştır. Doygunluk derecesi sağlanmayan numunelere yeniden vakum uygulanmıştır. Doygunluk seviyesi %80'in üzerinde olan numuneler deney dışında bırakılmış bu numunelerin yerine yeni numuneler hazırlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler streç film ile kaplanmış, içerisinde 10 ml. su bulunan poşetlere konularak poşetlerin ağzı iyice kapatılmıştır. Numuneler -18°C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiş ardından 60°C 'deki suda 24 saat bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda numuneler poşetten ve streç filmden çıkarılmış ve 25°C 'deki suda 2 saat bekletilerek kırılmıştır. Koşullandırılmamış numunelerde 25°C 'deki suda 2 saat bekletilerek Marshall deney aletinde indirekt çekme dayanımı çenesinde kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 2 inç/dakika'lık (50,8 mm/dk) sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Maksimum yük değerleri yardımıyla çekme dayanımı değerleri Formül 3.5 kullanılarak, çekme dayanımı oranları ise Formül 3.6 kullanılarak belirlenmiştir.

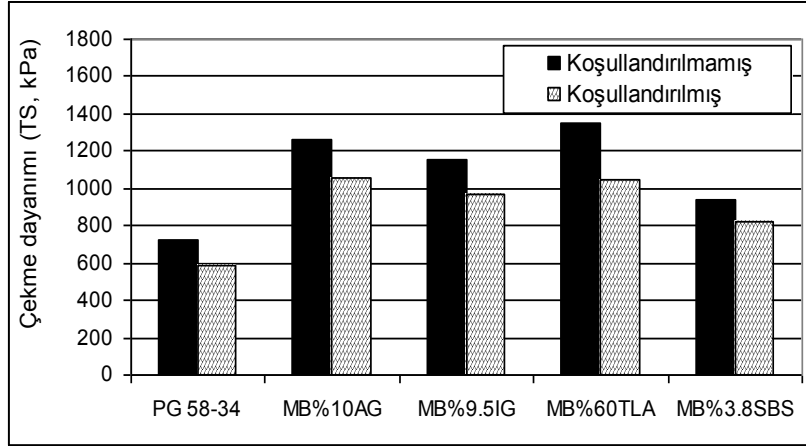
Koşullandırılmamış numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.30'da, koşullandırılmış numunelerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.31'de verilmiştir. Karışımların çekme dayanımı değerleri Şekil 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4.30. Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doygun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
PG 58-34	1	66,7	1147,3	639,7	1153,3	2,234	2.403	7,03	7,511	717,3
	2	66,7	1146,4	640,2	1152,7	2,237		6,93	7,700	734,9
	3	66,6	1146,3	639,8	1152,3	2,236		6,93	7,433	710,5
	Ortalama									720,9
MB _{%10AG}	4	66,8	1149,8	642,1	1155,8	2,238	2.409	7,09	12,729	1214,3
	5	66,7	1149,4	643,6	1155,9	2,243		6,88	13,025	1244,4
	6	66,5	1150,0	643,7	1155,6	2,246		6,75	13,978	1339,5
	Ortalama									1266,1
MB _{%9,5IG}	7	66,8	1148,3	641,9	1154,7	2,239	2.406	6,94	12,025	1146,6
	8	66,7	1148,1	641,0	1154,2	2,237		7,02	12,099	1156,0
	9	66,8	1148,8	640,7	1154,9	2,234		7,15	12,037	1148,3
	Ortalama									1150,3
MB _{%60TLA}	10	66,6	1138,0	640,1	1144,4	2,257	2.426	6,98	13,766	1317,2
	11	66,6	1139,9	640,3	1146,5	2,252		7,18	14,785	1414,0
	12	66,8	1139,5	641,8	1146,7	2,257		6,98	13,828	1317,9
	Ortalama									1349,7
MB _{%3,8SBS}	10	66,8	1152,7	640,1	1158,8	2,222	2.390	7,02	9,755	930,6
	11	66,6	1152,1	639,6	1157,7	2,224		6,95	9,543	913,1
	12	67,0	1152,1	639,2	1158,4	2,219		7,15	10,275	976,3
	Ortalama									940,0

Tablo 4.31. Koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı oranı deney sonuçları

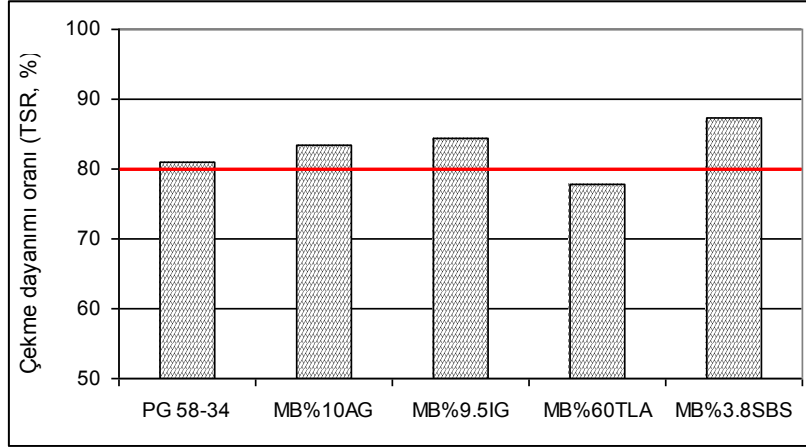
Bağlayıcı Türü	Numune No	h_{ort} (mm)	Havadaki Ağırlık, (gr)	Sudaki Ağırlık, (gr)	Doymun Ku. Yüz. Ağ., (gr)	Gmb	Gmm	Boşluk, (%)	Maksimum Yük, (kN)	Çekme Dayanımı, (kPa)
PG 58-34	1	66,8	1147,4	640,2	1153,4	2,236	2.403	6,96	6,02	574,0
	2	66,9	1146,8	639,5	1153,2	2,233		7,09	6,05	576,3
	3	66,5	1146,6	640,1	1152,6	2,237		6,90	6,28	601,9
	Ortalama									584,1
MB _{%10AG}	4	66,6	1150,4	643,2	1156,7	2,240	2.409	7,01	10,86	1038,7
	5	66,9	1150,1	643,5	1156,4	2,242		6,93	10,91	1038,6
	6	66,3	1150,1	642,1	1155,4	2,240		7,00	11,32	1087,0
	Ortalama									1054,7
MB _{%9,5IG}	7	66,7	1148,0	641,6	1154,1	2,240	2.406	6,89	10,05	959,6
	8	66,8	1149,3	642,0	1155,8	2,237		7,04	9,93	947,0
	9	66,8	1149,2	641,3	1154,6	2,239		6,94	10,51	1002,2
	Ortalama									969,6
MB _{%60TLA}	7	66,6	1140,01	639,1	1143,9	2,258	2.426	6,91	11,51	1101,3
	8	66,9	1140,13	639,1	1145,2	2,253		7,15	10,82	1029,9
	9	66,7	1139,09	639,6	1144,1	2,258		6,93	10,70	1021,3
	Ortalama									1050,8
MB _{%3,8SBS}	7	66,6	1151,58	636,7	1155,1	2,221	2.390	7,05	8,92	853,1
	8	66,8	1152,24	637,6	1155,8	2,223		6,97	8,51	811,7
	9	67,0	1151,73	637,4	1155,9	2,221		7,06	8,39	797,2
	Ortalama									820,6



Şekil 4.20. Karışımların çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere en yüksek çekme dayanımı değerine MB_{%60TLA} bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların, en düşük çekme dayanımı değerine PG 58-34 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı türleri içerisinde en etkin olanının TLA olduğu, etkinliği en az olan katkı türünün ise SBS olduğu tespit edilmiştir. Koşullandırma öncesinde MB_{%10AG}, MB_{%9,5IG}, MB_{%60TLA} ve MB_{%3,8SBS} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların TS değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların TS değerlerine göre sırasıyla %75.6, %59.6, %87.2 ve %30.4 oranlarında artmıştır. Koşullandırma sonrasında ise MB_{%10AG}, MB_{%9,5IG}, MB_{%60TLA} ve MB_{%3,8SBS} modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların TS değerlerinin PG 58-34 bitümü ile hazırlanan karışımların TS değerlerine göre sırasıyla %80.6, %66.0, %79.9 ve %40.5 oranlarında yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan koşullandırma nedeniyle AG, IG ve SBS’in etkinliğinin saf karışıma göre arttığı TLA’nın etkinliğinin ise azaldığı belirlenmiştir. Koşullandırma önce ve sonrasında bütün doğal bitüm ile hazırlanan karışımların ITS değerlerinin MB_{3,8SBS} kullanılarak hazırlanan karışımlardan yüksek olduğu belirlenmiştir.

Koşullandırılmamış numunelerin çekme dayanımı değerlerinin koşullandırılmış numunelerin çekme dayanımı değerlerine oranlanması ile nem hasarına karşı bitümlü sıcak karışımların dayanımının bir göstergesi olan çekme dayanımı oranı (TSR) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen TSR değerleri Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Karışımlarının çekme dayanımı oranlarının katkı kullanımı ile değişimi

Nem hasarına karşı dayanımın bir göstergesi olan çekme dayanımı oranları incelendiğinde (Şekil 4.21) en yüksek değere MB_{3,8SBS} bitümü ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise MB_{60TLA} bitümü ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. TSR sonuçları değerlendirildiğinde MB_{60TLA} ile hazırlanan karışımın dışında bütün karışımların TSR değerlerinin Superpave şartname limiti olan %80'den büyük olduğu belirlenmiştir. MB_{10%AG}, MB_{9.5%IG} ve MB_{3.8%SBS} kullanılarak hazırlanan karışımların TSR değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 2.8%, 4.0% ve 7.8% daha yüksek olduğu belirlenmiştir. MB_{10%AG} ve MB_{9.5%IG} ile hazırlanan karışımların TSR değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. TSR değerlerinden MB_{3.8%SBS} kullanılarak hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımının en fazla olacağı, MB_{60TLA} ile hazırlanan karışımların ise en az olacağı, MB_{10%AG} ve MB_{9.5%IG} ile hazırlanan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının benzer olduğu söylenebilmektedir.

4.4.3. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

PG 58-34 ve MB_{10%AG}, MB_{9.5%IG}, MB_{60TLA} ve MB_{3.8%SBS} ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımlar üzerinde BS DD 213 standardına uygun olarak indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanarak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. ITSM deneyi tahribatsız bir deney olduğundan ITSM deneylerinde kullanılan numuneler Marshall stabilite deneylerinde de kullanılmıştır. Deneylerde her bir karışım türü için üç adet numune denenmiştir. Deneyde 5 adet ön yükleme, ardından 5 defa deney yükleme yapılarak dinamik

yükler karşısında bitümlü sıcak karışımların rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms., yük artış süresi ise 124 ms. olarak seçilmiştir. Deformasyon kontrollü bir deney olan ITSM deneyinde hedef deformasyon 5 µm. olarak seçilmiştir. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde 5 µm. deformasyon meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye uygulanan 5 darbe sonucu Formül 3.7 kullanılarak belirlenen ITSM değerlerinin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Deneyde poisson oranı 0,35 olarak alınmıştır. Ayrıca sıcaklığın ITSM değerleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deneyler 20°C, 25°C, 30°C ve 35°C sıcaklıklarda yapılmıştır.

PG 58-34 ve MB_{10AG}, MB_{9,5IG}, MB_{60TLA} ve MB_{3,8SBS} ile dizayn bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numunelerine uygulanan ITSM deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.32'de verilmiştir.

Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları

Katkı Türü	Numune No	$h_{ort.}$ (mm)	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort.} (MPa)	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort.} (MPa)
PG 58-34	1	63,7	1	20	3161	3286	25	2269	2251
			2		3410			2232	
	2	63,9	1		3733	3840		2309	2290
			2		3946			2271	
	3	64,0	1		3896	4027		2267	2246
			2		4157			2224	
	Ortalama				3717		2262		
	1	63,7	1	30	1731	1737	35	1310	1307
			2		1742			1304	
	2	63,9	1		1745	1782		1380	1350
			2		1819			1319	
	3	64,0	1		1866	1855		1402	1405
			2		1844			1408	
	Ortalama				1791		1354		
MB _{%10AG}	1	63,7	1	20	5380	5341	25	4304	4275
			2		5302			4245	
	2	63,7	1		5017	5092		4230	4241
			2		5166			4251	
	3	63,5	1		5152	5045		4043	4080
			2		4938			4116	
	Ortalama				5159		4198		
	1	63,7	1	30	3104	3183	35	2207	2167
			2		3262			2127	
	2	63,7	1		3014	3036		2008	2087
			2		3058			2166	
	3	63,5	1		3014	3023		1889	1945
			2		3032			2000	
	Ortalama				3081		2066		

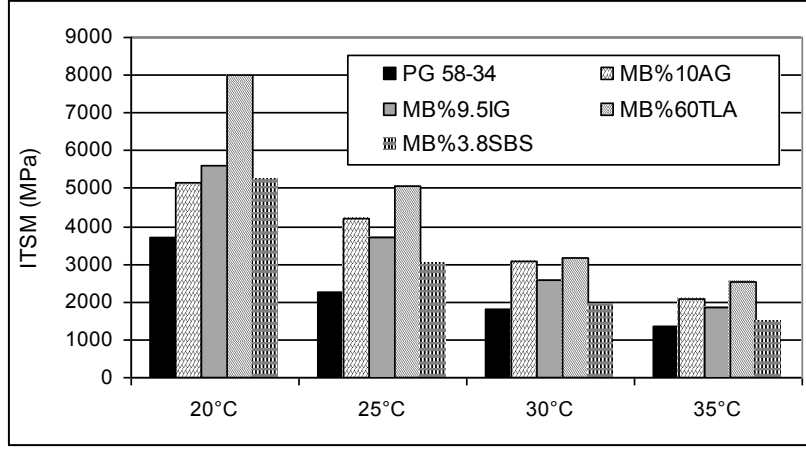
Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)

Katkı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	ITSM _{ort} , (MPa)
MB _{%9,5IG}	1	63,5	1	20	5466	5525	25	3778	3787
			2		5583			3796	
	2	63,9	1		5261	5396		3465	3514
			2		5531			3562	
	3	63,7	1		6093	5905		3785	3874
			2		5717			3962	
	Ortalama				5609		3725		
	1	63,5	1	30	2500	2542	35	1878	1860
			2		2583			1841	
	2	63,9	1		2581	2472		1799	1787
			2		2362			1775	
	3	63,7	1		2540	2656		1996	1927
2			2772		1857				
Ortalama				2556		1858			
MB _{%60TLA}	1	63,4	1	20	7954	8045	25	5077	5028
			2		8135			4979	
	2	63,1	1		8134	8197		5246	5144
			2		8259			5041	
	3	63,3	1		7852	7725		4833	4965
			2		7598			5096	
	Ortalama				7989		5045		
	1	63,4	1	30	3087	3185	35	2313	2360
			2		3282			2406	
	2	63,1	1		3291	3274		2567	2639
			2		3256			2710	
	3	63,3	1		2893	2992		2456	2548
2			3091		2639				
Ortalama				3150		2515			

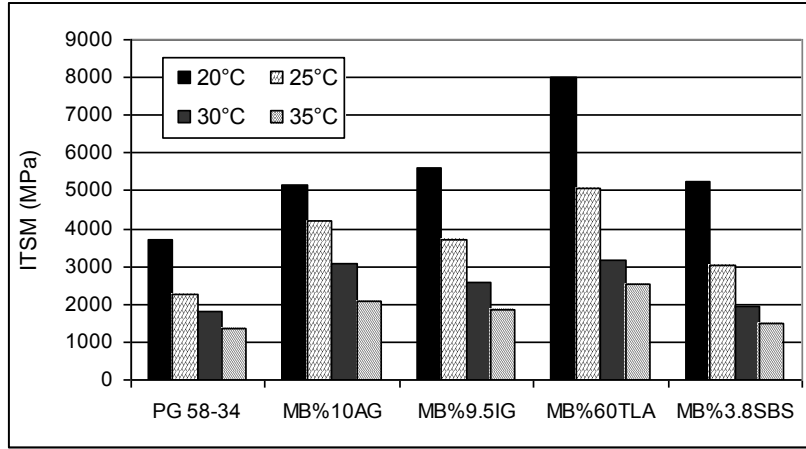
Tablo 4.32. Karışım numunelerin ITSM deney sonuçları (Devamı)

Katkı Türü	Numune No	h_{ort} , (mm)	Deneme No	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	$ITSM_{ort}$, (MPa)	Sıcaklık, (°C)	ITSM, (MPa)	$ITSM_{ort}$, (MPa)
MB _{%3,8SBS}	1	63,5	1	20	5199	5325	25	3226	3182
			2		5450			3138	
	2	63,3	1		5307	5252		2833	2896
			2		5197			2959	
	3	63,6	1		5227	5155		2926	2983
			2		5083			3039	
	Ortalama				5244			3020	
	1	63,5	1	30	2055	2008	35	1498	1514
			2		1961			1529	
	2	63,3	1		1977	1930		1442	1453
			2		1882			1464	
	3	63,6	1		1863	1883		1459	1480
			2		1903			1501	
	Ortalama				1940			1482	

Katkı türü ve sıcaklıkla ITSM değerlerinin değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.22. Karışımların ITSM değerlerinin sıcaklıkla (a) ve katkı türü ile (b) değişimi

Şekil 4.22(a)'da görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça ITSM değerleri azalmıştır. Modifiye bitüm kullanımı ile bütün sıcaklıklarda ITSM değerleri artmıştır (Şekil 4.22(b)). Bütün sıcaklıklarda en yüksek ITSM değerine MB_{60%TLA} ile hazırlanan, en düşük ITSM değerine ise PG 58-34 ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. 20°C sıcaklıkta MB_{10%AG}, MB_{9.5%IG}, MB_{60%TLA} ve MB_{3.8%SBS} ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.4, 1.5, 2.2 ve 1.4 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. 35°C sıcaklıkta ise MB_{10%AG}, MB_{9.5%IG}, MB_{60%TLA} ve MB_{3.8%SBS} ile hazırlanan karışımların ITSM değerinin saf karışıma göre sırasıyla 1.5, 1.4, 1.9 ve 1.1 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak bütün sıcaklıklarda katkı maddelerinin benzer etkiye sahip olduğu

söylenmektedir. Sıcaklığın 20°C sıcaklıktan 35°C sıcaklığa yükselmesi ile B_{160/220}, MB_{10%AG}, MB_{9,5%IG}, MB_{60%TLA} ve MB_{3,8%SBS} ile hazırlanan karışımların ITSM değerleri sırasıyla 2.8, 2.5, 3.0, 3.2 ve 3.5 kat azalmıştır. Bu sonuçlardan sıcaklıktan en fazla ve en az etkilenen karışımların sırasıyla MB_{3,8%SBS} ve MB_{10%AG} ile hazırlanan karışımlar olduğu belirlenmiştir.

4.4.4. İndirekt Çekme Yorulma Deney Sonuçları

İndirekt çekme yorulma deneyi, PG 58-34 saf bitümü ile hazırlanan karışım ve MB_{10%AG}, MB_{9,5%IG}, MB_{60%TLA} ve MB_{3,8%SBS} kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneyde 300 kPa, 350 kPa ve 400 kPa olmak üzere üç farklı gerilme seviyesi uygulanmıştır.

Deney, 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasına yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1,5 sn olarak alınmış bu sürenin 0,124 saniyesi ITSM deneyinde olduğu gibi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1,376 saniye olmuştur. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 4.23'te görülmektedir.



Şekil 4.23. Yorulma deneyi sonrasında numunelerin görünüşü

İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edilmiştir. Böylece maksimum yük tekerrür sayısı (N_{mak}) ve maksimum yük tekerrür sayısındaki deformasyon miktarları (δ_{mak}) belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. kısımda teğet, eğrinin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel formatında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir. Formül 3.9 kullanılarak III. bölgede, N_f ile N_{mak} arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_f) belirlenmiştir. Numunelere 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde uygulanan indirekt çekme yorulma deneylerinden elde edilen N_f , N_{mak} , δ_f , δ_{mak} ve r_f değerleri Tablo 4.33–4.35’te verilmiştir. Ayrıca 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon–yük tekerrür sayısı ilişkisine birer örnek Şekil 4.24–4.26’da çizilmiştir.

Tablo 4.33. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

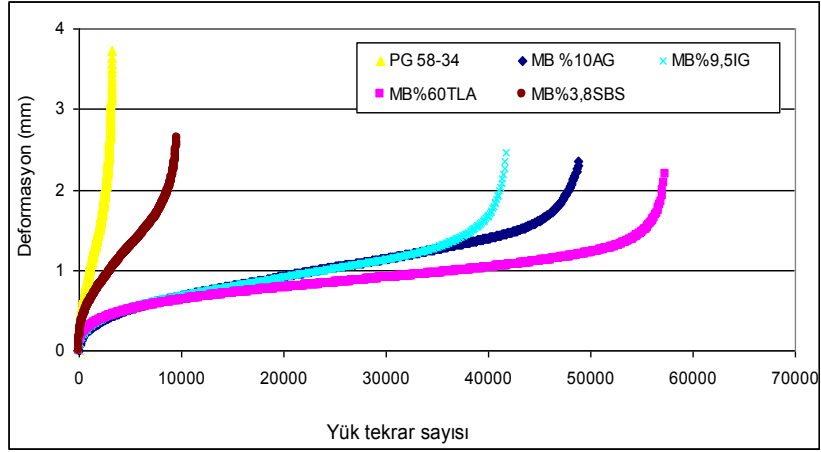
Katkı Türü	Num. No	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f	Katkı Türü	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f
PG 58-34	1	2502	2,188	2673	2,586	1515	MB%10AG	45936	1,698	48816	2,353	35037
	2	3390	2,457	3720	3,201	1674		38928	1,896	40800	2,628	26019
	3	2957	2,543	3197	3,737	1323		52800	1,413	55872	2,316	45260
	Ort.	2950	2,396	3197	3,175	1504		45888	1,669	48496	2,432	35438
MB%9,5IG	1	38880	1,743	41616	2,5844	27984	MB%60TLA	54278	1,397	57341	2,1868	57235
	2	39168	1,571	41760	2,4704	32909		46426	1,235	50112	2,0072	51256
	3	36936	1,490	39096	2,343	36202		57130	1,290	62621	2,1585	82311
	Ort.	38328	1,601	40824	2,466	32365		52611	1,307	56691	2,118	63601
MB%3,8SBS	1	8064	1,772	8417	2,417	5877						
	2	9084	2,131	9600	2,649	5257						
	3	9036	1,910	9576	3,076	6082						
	Ort.	8728	1,938	9198	2,714	5739						

Tablo 4.34. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

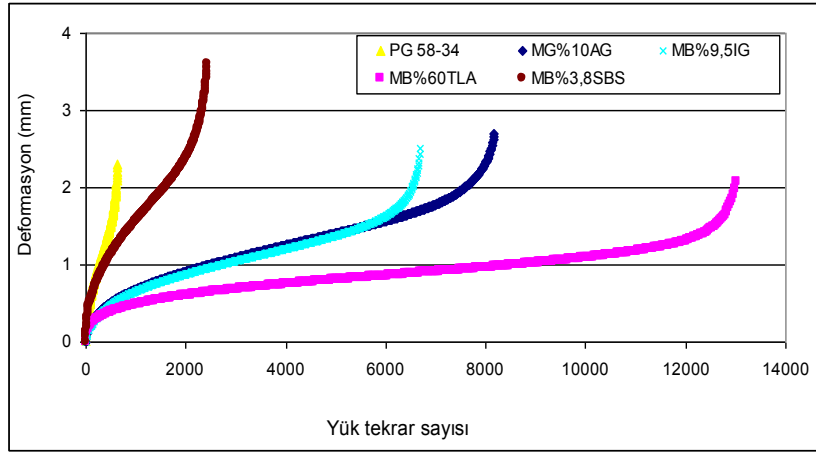
Katkı Türü	Num. No	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f	Katkı Türü	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f
PG 58-34	1	582	1,847	630	2,309	393	MB%10AG	8436	2,399	8832	2,985	4866
	2	468	1,945	513	2,518	295		7788	2,130	8172	2,707	4719
	3	837	1,756	882	2,211	566		8800	2,120	9280	3,177	5133
	Ort.	629	1,849	675	2,346	418		8341	2,216	8761	2,956	4906
MB%9,5IG	1	7752	1,545	7968	1,970	6437	MB%60TLA	10824	1,455	11328	2,008	9341
	2	4254	1,819	4602	2,661	3182		12258	1,604	12834	2,316	11006
	3	6381	1,840	6687	2,501	4574		12384	1,414	13008	2,0804	12865
	Ort.	6129	1,735	6419	2,377	4731		11822	1,491	12390	2,135	11071
MB%3,8SBS	1	2439	2,571	2595	3,049	1160						
	2	2304	2,907	2442	3,608	1014						
	3	1890	2,979	2037	4,03	707						
	Ort.	2211	2,819	2358	3,562	960						

Tablo 4.35. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deney sonuçları

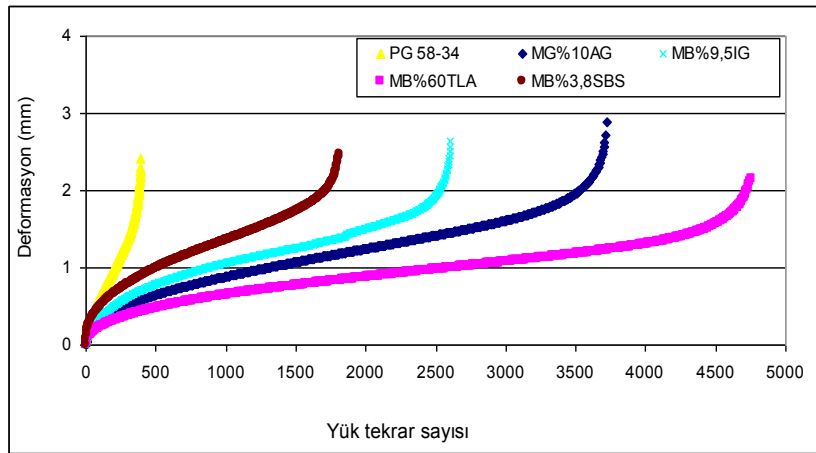
Katkı Türü	Num. No	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f	Katkı Türü	N_f	δ_f	N_{mak}	δ_{mak}	r_f
PG 58-34	1	285	1,859	303	2,218	170	MB%10AG	3414	2,109	3528	2,750	1938
	2	374	1,915	392	2,418	212		3570	2,074	3720	2,879	2142
	3	346	1,844	360	2,476	226		3642	2,040	3816	2,782	2318
	Ort.	335	1,873	352	2,371	203		3542	2,074	3688	2,804	2133
MB%9,5IG	1	2268	1,781	2388	2,476	1563	MB%60TLA	4524	1,588	4752	2,153	3742
	2	2751	1,965	2898	2,351	1793		4014	1,670	4206	2,289	3140
	3	2499	1,935	2607	2,6408	1758		4374	1,934	4446	2,086	2911
	Ort.	2506	1,894	2631	2,489	1704		4304	1,731	4468	2,176	3264
MB%3,8SBS	1	1248	1,771	1302	2,222	816						
	2	1035	1,894	1086	2,326	664						
	3	1749	2,0776	1812	2,4794	1146						
	Ort.	1344	1,914	1400	2,343	875						



Şekil 4.24. Karışımların 300 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



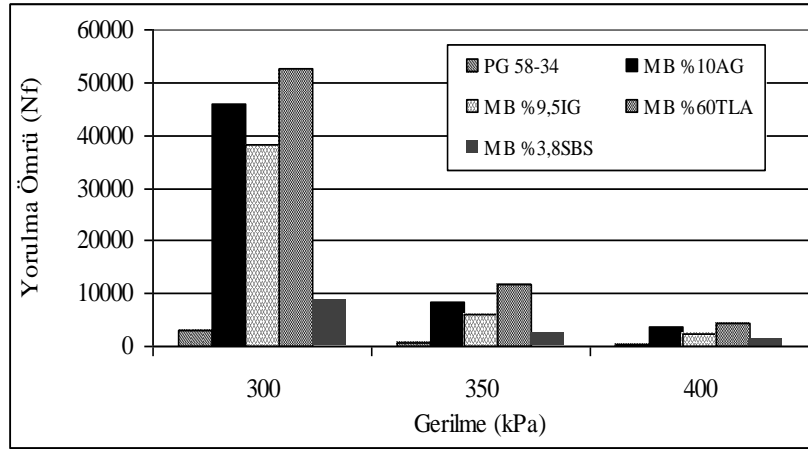
Şekil 4.25. Karışımların 350 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 4.26. Karışımların 400 kPa gerilme seviyesinde deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi

Şekil 4.24-4.26’da görüldüğü üzere numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük gerekli yük tekrar sayısına PG 58-34 saf karışımı ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise MB%60TLA modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Bütün gerilme seviyelerinde MB%60TLA modifiye bağlayıcısı ile hazırlanan karışımların yorulma ömürlerinin diğer karışımlara göre önemli oranda yüksek olduğu belirlenmiştir. Deformasyonlar incelendiğinde her gerilme seviyesinde farklı sonuçlar olduğu gerilme seviyesine bağlı olarak düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir.

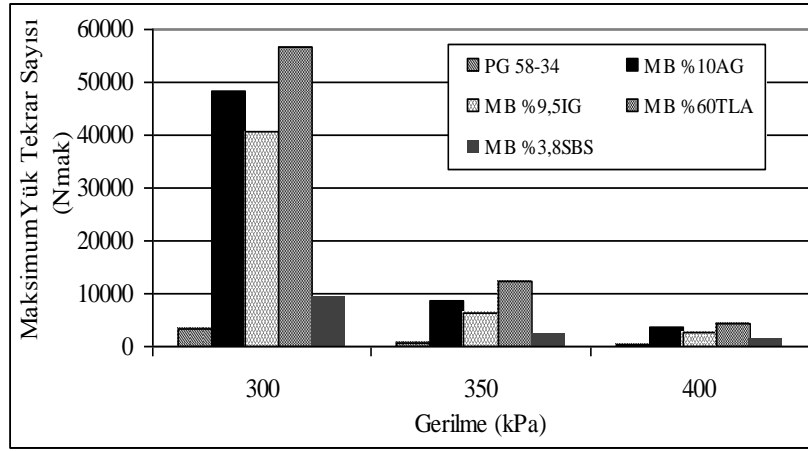
300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde üç numuneden elde edilen yorulma ömrü (N_f) değerlerinin ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 4.27’de, maksimum yük tekrar sayılarının (N_{mak}) ortalamasının katkı türü ile değişimi Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.27. Yorulma ömrü (N_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilen yorulma ömrü değerlerine göre çizilen grafiklerden, katkı kullanımı ile yorulma ömrü (N_f) değerlerinin arttığı, gerilme seviyesi arttıkça ise N_f değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS kullanılan karışımların N_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 15.6, 13.0, 17.8 ve 3.0 kat yüksek olduğu belirlenmiştir. 350 kPa gerilme seviyesinde MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS kullanılan karışımların N_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 13.3, 9.7, 18.8 ve 3.5 kat yüksek olduğu belirlenmiştir. 400 kPa gerilme seviyesinde de diğer gerilme seviyelerinde olduğu gibi en etkin katkı türü değişmemiştir. MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve

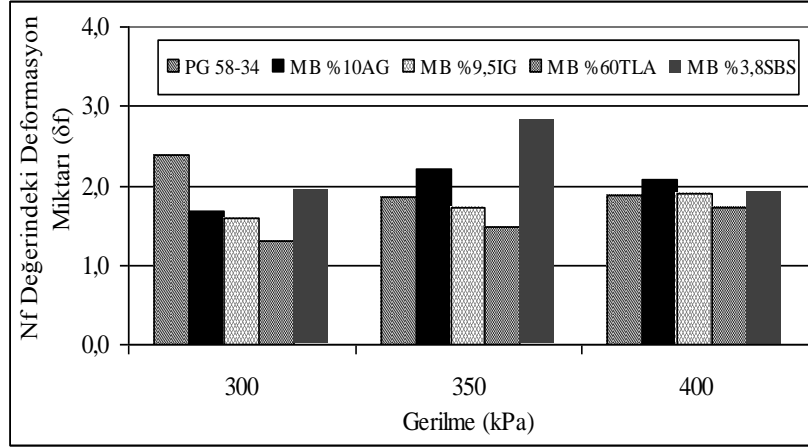
MB_{3,8SBS} kullanılan karışımların N_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 10.6, 7.5, 12.8 ve 4.0 kat yüksek olduğu belirlenmiştir. MB_{10AG} ve MB_{9,5IG} ile hazırlanan karışımlarda gerilme seviyesi arttıkça N_f değeri düzenli olarak azalmıştır. MB_{3,8SBS} ile hazırlanan karışımlarda ise gerilme seviyesi arttıkça bu değerler düzenli olarak artmıştır. Bu durum SBS modifiyeli bağlayıcılarla hazırlanan karışımların yüksek gerilmelerde daha etkin olacağını göstermektedir.



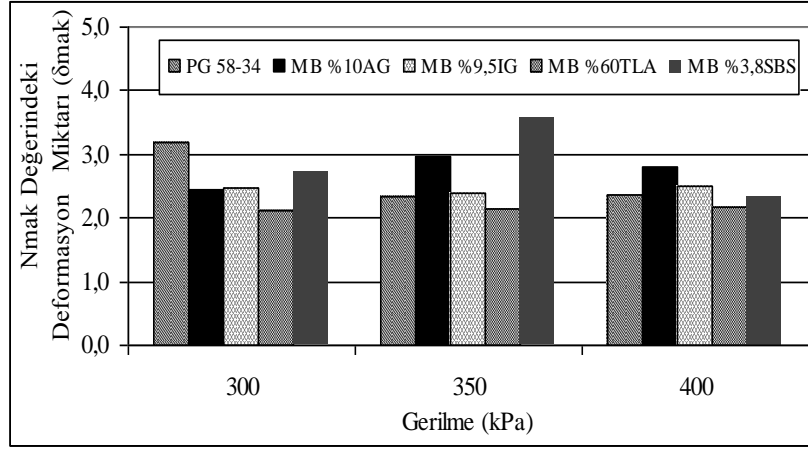
Şekil 4.28. Maksimum yük tekrar sayısı – katkı türü ilişkisi

Şekil 4.28’de görüldüğü üzere, bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. N_{mak} değerleri N_f değerleri ile benzerlik göstermiş ve bütün gerilme seviyelerinde katkı maddelerinin etkinliğinin en fazla olandan en az olana doğru sıralamasının TLA, AG, IG ve SBS olduğu tespit edilmiştir. Gerilmenin 300 kPa’dan 400 kPa’a yükselmesi ile PG 58-34, MB_{10AG}, MB_{9,5IG}, MB_{60TLA} ve MB_{3,8SBS} kullanılan karışımların N_{mak} değerlerinin sırasıyla 9.1, 13.1, 15.5, 12.7 ve 6.6 kat azaldığı belirlenmiştir. Bu durum gerilmenin artmasından en fazla IG modifiyeli bitümle hazırlanan karışımların en az ise SBS modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların etkilendiği belirlenmiştir.

Yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 4.29(a)’da, maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi ise Şekil 4.29(b)’de verilmiştir.



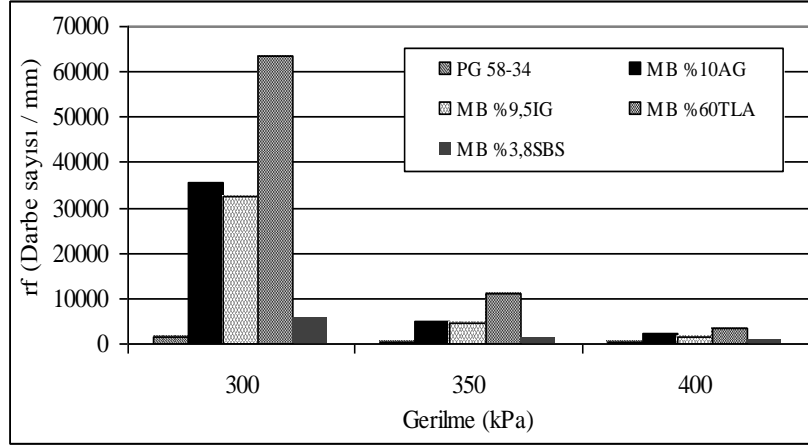
(a)



(b)

Şekil 4.29. N_f (a) ve N_{mak} (b) yük tekrarlarındaki deformasyon değerlerinin katkı türü ile değişimi

Şekil 4.29’da görülen N_f ve N_{mak} yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerlerinin katkı kullanımı ile benzer şekilde değiştiği belirlenmiştir. Gerilme değişimi ile deformasyon değerlerinde düzenli bir değişimin olmadığı, 300, 350 ve 400 kPa gerilme seviyelerinde sırasıyla PG 58-34, MB%3,8SBS ve MB%10AG bitümleri ile hazırlanan karışımların en yüksek deformasyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük deformasyon değerlerine ise bütün gerilme seviyelerinde MB%60TLA ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum TLA modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların daha gevrek davranış sergileyeceğini göstermektedir. Çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) katkı kullanımı ile değişimi Şekil 4.30’da verilmiştir.

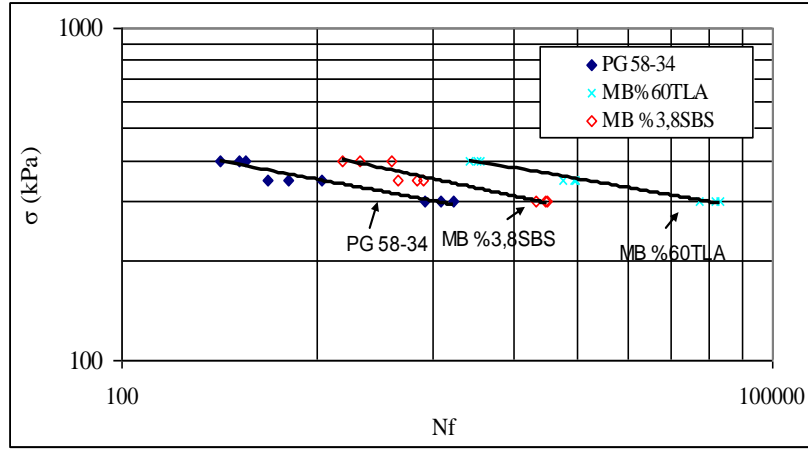


Şekil 4.30. $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı – katkı türü ilişkisi

Şekil 4.30’da görülen $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde bütün gerilme seviyelerinde katkı kullanımı ile r_f değerlerinin arttığı, uygulanan gerilmenin artması ile ise bu değer azaldığı belirlenmiştir. 300 kPa gerilme seviyesinde MB%10AG içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre 23.6 kat, MB%9,5IG içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre 21.5 kat, MB%60TLA içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre 42.3 kat ve MB%3,8SBS içeren karışımların r_f değerinin saf karışımın bu değerine göre 3.8 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 350 kPa gerilme seviyesinde MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS kullanılan karışımların r_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 11.7, 11.3, 26.5 ve 2.3 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 400 kPa gerilme seviyesinde ise MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS kullanılan karışımların r_f değerlerinin saf karışıma göre sırasıyla 10.5, 8.4, 16.1 ve 4.3 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum SBS dışındaki katkıli bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda gerilme seviyesi arttıkça katkı türlerinin etkinliğinin azaldığını göstermektedir. Çatlak ilerleme oranı değerleri (r_f) göz önünde bulundurulduğunda katkı kullanımı ile karışımların yük tekrarına karşı dayanımlarının artacağı, dolayısıyla BSK’ların yorulma çatlaklarından kaynaklanan yeniden yapım veya rehabilitasyon ihtiyaçlarının geciktirilebileceği söylenebilmektedir.

Yorulma ömrü değerleri kullanılarak ve Formül 3.8’de verilen Wöhler ilişkisinden faydalanılarak çizilen yorulma ömrü eğrileri Şekil 4.31’de verilmiştir. Şekil 4.31’teki grafiklerden elde edilen katsayılar Tablo 4.36’da verilmiştir. TLA, AG ve IG modifiyeli

bitümlerle hazırlanan karışımların eğrileri birbirine yakın olduğundan grafikte sadece PG 58-34, MB%3,8SBS ve MB%60TLA ile hazırlanan karışımların eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.31. Karışımların yorulma ömür diyagramları

Tablo 4.36. Yorulma deneyinden elde edilen değerler

Bağlayıcı türü	Yorulma ömrü, N_f	k_1	k_2	R^2
PG 58-34	$N_f = 1,98E+22x \sigma^{-7,62}$	1,98E+22	7,62	0,9257
MB%10AG	$N_f = 5,53E+26x \sigma^{-8,93}$	5,53E+26	8,93	0,9732
MB%9,5IG	$N_f = 1,60E+28x \sigma^{-9,56}$	1,60E+28	9,56	0,9556
MB%60TLA	$N_f = 1,97E+26x \sigma^{-8,72}$	1,97E+26	8,72	0,9908
MB%3,8SBS	$N_f = 2,21E+20x \sigma^{-6,64}$	2,21E+20	6,64	0,9243

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere en düşük yorulma ömrüne saf karışım, en yüksek yorulma ömrüne ise MB%60TLA modifiye bitümü kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı kullanımı ile yorulma ömürlerinin saf karışıma göre arttığı belirlenmiştir. MB%10AG ve MB%9,5IG modifiye bitümleri ile hazırlanan karışımların yorulma ömürlerinin çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömür bağıntılarından elde edilen Tablo 4.36’da ki veriler incelendiğinde ise karışımlardan elde edilen yük tekrür sayılarının yüksek uyumlulukta olduğu, bütün karışımların belirtme katsayısının (R^2) 0,9’un üzerinde olduğu belirlenmiştir. Molenaar ve Medani, yorulma çizgisinin eğimini ifade eden k_2 değerinin yüksek olmasının karışımın daha kırılğan davranış sergilemesine, düşük olmasının ise

karışımın daha esnek davranış göstermesine işaret ettiğini belirtmektedir (Molenaar ve Medani, 2000). Saf karışıma göre sadece MB_{3,8%SBS} ile hazırlanan karışımların k_2 değerinin saf karışımın k_2 değerinden küçük olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla sadece MB_{3,8%SBS} ile hazırlanan karışımların saf karışıma göre daha elastik davranış sergileyeceği söylenebilmektedir.

4.4.5. Tekerlek İzi Deney Sonuçları

Çalışmada karışım numunelerinin tekerlek izi dirençlerini incelemek amacıyla EN 12697-22 standardının B prosedürüne göre deneyler yapılmıştır. Karışımların arazideki sıkışmayı temsil etmesi amacıyla numuneler %4 boşluk oranına sahip olacak şekilde sıkıştırılmıştır. EN 12697-22 standardına göre agrega maksimum dane boyutu 16-22 mm arasında olan karışımlar için numune yüksekliğinin 60 mm olması gerekmektedir. Kullanılan agrega gradasyonunda maksimum dane boyutu 19 mm olduğundan numune yükseklikleri 60 mm olarak seçilmiştir. Öncelikle numunelerin hacimleri belirlenmiştir.

Kullanılacak malzeme miktarı bitümlü karışımın maksimum özgül ağırlığı (G_{mm}), kalıbın iç boyutları (L ve l), numunenin kalınlığı (e), boşluk içeriğine (v) göre Formül 3.11 yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmada 30,5 x 30,5 cm boyutlarında kalıp kullanılmıştır. %4 boşluk oranı için kullanılacak karışım ağırlıkları aşağıdaki Tablo 4.37’de verilmiştir.

Tablo 4.37. Tekerlek izi numunelerinin ağırlıkları.

Katkı Türü	Boşluk oranı, %	Numune yüksekliği, mm	Kalıp boyutu, cm	Karışım hacmi, cm ³	G_{mm} , gr/cm ³	$M_{kar.}$, Kg
PG 58-34	4	60	30,5 x 30,5	5581.5	2.388	12.79548
MB _{%10AG}					2.390	12.80619
MB _{%9,5IG}					2.390	12.80619
MB _{%60TLA}					2.364	12.66688
MB _{%3,8SBS}					2.386	12.78486

Karışım ağırlıkları belirlendikten sonra optimum bitüm içeriklerine uygun olarak agrega ve bitüm ağırlıkları belirlenmiştir. Agrega ve bitüm ağırlıkları Formül 4.24 ve 4.25 yardımıyla belirlenmiştir.

$$M_{ag.} + \frac{M_{ag.} * TBİ}{P_{ag.}} = M_{kar.} \quad (4.24)$$

$$M_{bitüm} = M_{kar.} - M_{ag.} \quad (4.25)$$

Formülde $M_{ag.}$ agrega ağırlığını (kg), TBİ, tasarım bitüm içeriğini (%), P_{ag} karışımdaki agrega yüzdesini, M_{kar} ise karışım ağırlığını (kg), $M_{bitüm}$ ise bitüm ağırlığını (kg) göstermektedir. Yukarıda verilen bağıntılar yardımıyla belirlenen, karışımlar için gerekli agrega ve bitüm miktarları Tablo 4.38'de verilmiştir.

Tablo 4.38. Tekerlek izi numuneleri için gerekli agrega ve bitüm miktarları

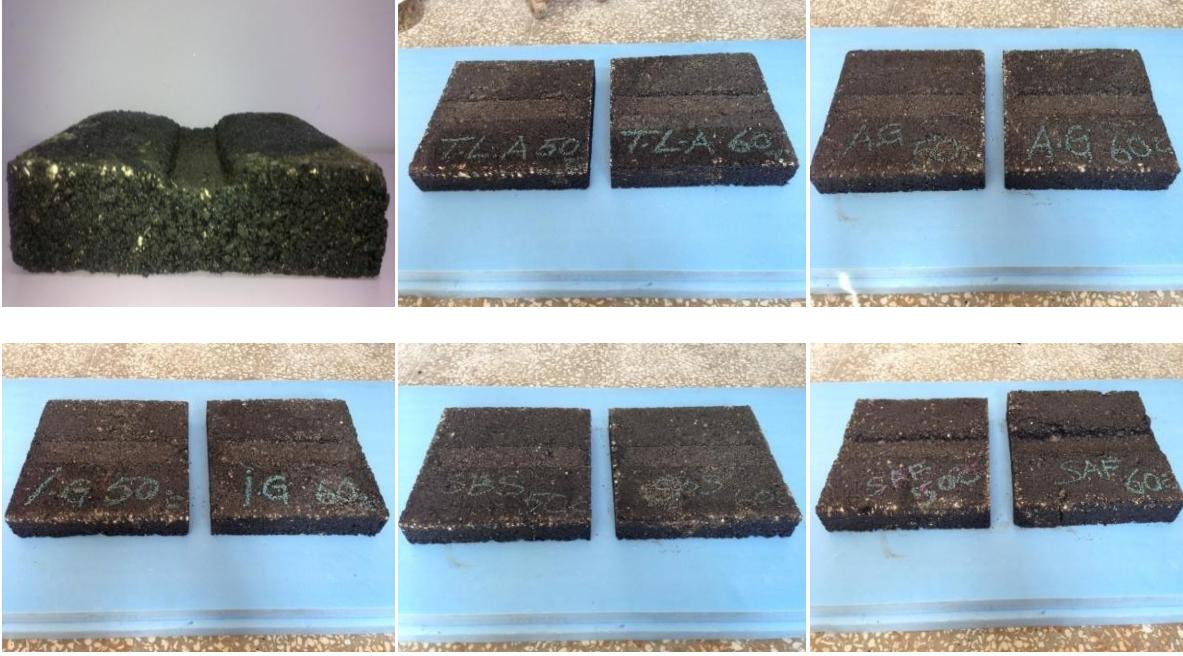
Katkı Türü	TBİ %	$P_{ag.}$ %	$M_{kar.}$ Gr	$M_{ag.}$ gr	$M_{bitüm}$ Gr
PG 58-34	4,72	95,28	12795,48	12191,5	603,9
MB _{%10AG}	4,85	95,15	12806,19	12185,1	621,1
MB _{%9,5IG}	4,91	95,09	12806,19	12177,4	628,8
MB _{%60TLA}	4,93	95,07	12666,88	12042,4	624,5
MB _{%3,8SBS}	4,97	95,03	12784,76	12149,4	635,4

Agrega miktarları belirlendikten sonra gradasyona uygun olarak her bir elek üzerinde kalan agregadan kullanım miktarları tespit edilmiştir (Tablo 4.39). Gradasyona uygun olarak hazırlanan agrega karışımları 3 saat, bitüm ise 2 saat karıştırma sıcaklığında bekletilmiştir. Ardından agrega yüzeyi tam olarak bitümle kaplanıncaya kadar mikser yardımıyla agrega ve bitüm karıştırılmıştır. 30,5x30,5x6 cm boyutlarındaki kalıba ilave yaka takılmış, karışım kalıba doldurulmuştur. Kalıp ve karışım merdaneli sıkıştırıcıya konulmuş ve pas sayısı cihaza girilmiştir. Sıkıştırma esnasında kalıbın önce öne doğru sonrasında arkaya doğru gidişi bir pas olarak isimlendirilmektedir. Çalışmada 40 pas sayısı kullanılmıştır. Basınç yavaşça artırılmış ve 300 PSI yük seviyesine ayarlanmıştır. Pas sayısı arttıkça yük değeri azalmıştır. Yükün sıfır olması karışımın istenen yüksekliğe geldiğini ifade etmektedir. Numunenin sıkıştırma işlemi bittikten sonra numune merdaneli sıkıştırıcıdan çıkarılmış ve soğumaya bırakılmıştır. Numune tamamen soğuduktan sonra tekerlek izi test cihazına konulmuş ve sabitlenmiştir. İklimlendirme kabini kapatılarak deney sıcaklığına ayarlanmıştır.

Tablo 4.39. Karışımlar için her bir elek üzerinde kalan agrega miktarları

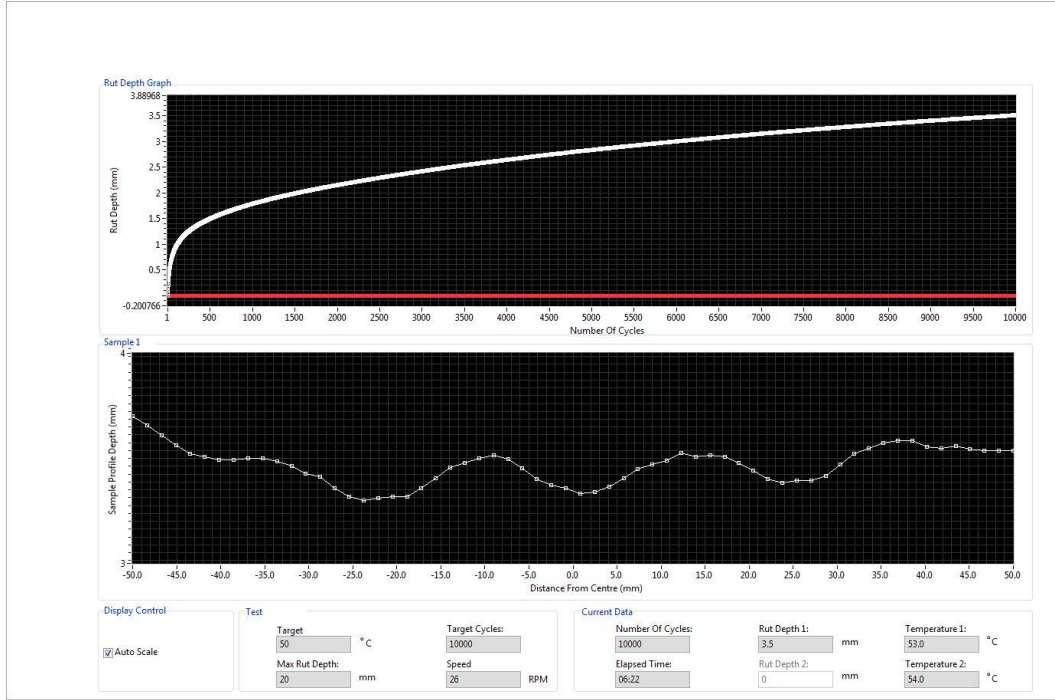
Elek No.	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	No.200	Filler	TLA'dan gelen filler	Toplam agrega, gr
% Geçen	100	95	88	65	35	23	14	10	8	6	-	-	-
% Kalan	0	5	12	35	65	77	86	90	92	94	100	-	-
Kullanılan, %	0	5	7	23	30	12	9	4	2	2	6	-	-
PG 58-34	0	609,6	853,4	2804,1	3657,5	1463,0	1097,2	487,7	243,8	243,8	731,5	-	12191,5
MB%10AG	0	609,3	853,0	2802,6	3655,5	1462,2	1096,7	487,4	243,7	243,7	731,1	-	12185,1
MB%9,5IG	0	608,9	852,4	2800,8	3653,2	1461,3	1096,0	487,1	243,5	243,5	730,6	-	12177,4
MB%60TLA	0	602,1	843,0	2769,8	3612,7	1445,1	1083,8	481,7	240,8	240,8	604,4	118,2	12042,4
MB%3,8SBS	0	607,5	850,5	2794,4	3644,8	1457,9	1093,4	486,0	243,0	243,0	729,0	-	12149,4

Tekerlek izi deneyinde numuneler 50 ve 60°C sıcaklıkta deneye tabi tutulmuşlardır. Her bir bağlayıcı türünden iki adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Çalışmada kullanılan numunelerin bazıları ve oluşan tekerlek izi Şekil 4.32.'de görülmektedir.



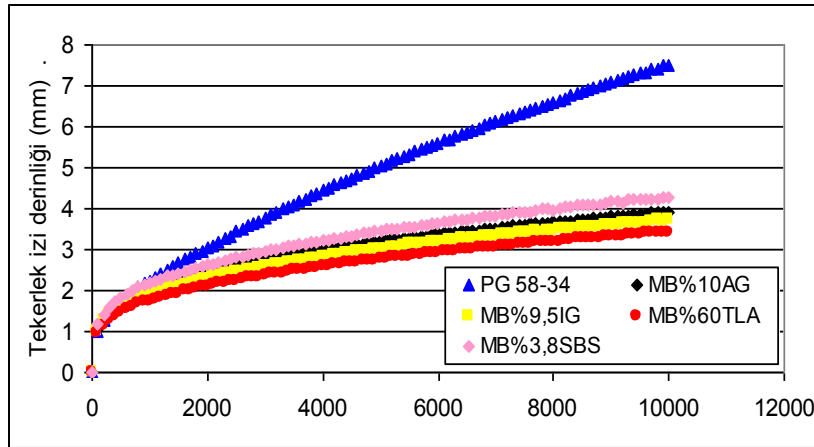
Şekil 4.32. Tekerlek izi oluşumu ve deneye tabi tutulan numuneler

Deney sırasında cihaz, numunenin ortasından bir, ortanın solundan ve sağından 13 olmak üzere toplam 27 deformasyon ölçümü yapmıştır. Bu 27 değerın ortalaması tekerlek iz derinliği olarak kaydedilmiştir. Ayrıca yazılım ekranından oluşan tekerlek izi takip edilmiştir. Örnek bir tekerlek izi deney sonu yazılım ekranı Şekil 4.33'te görülmektedir.

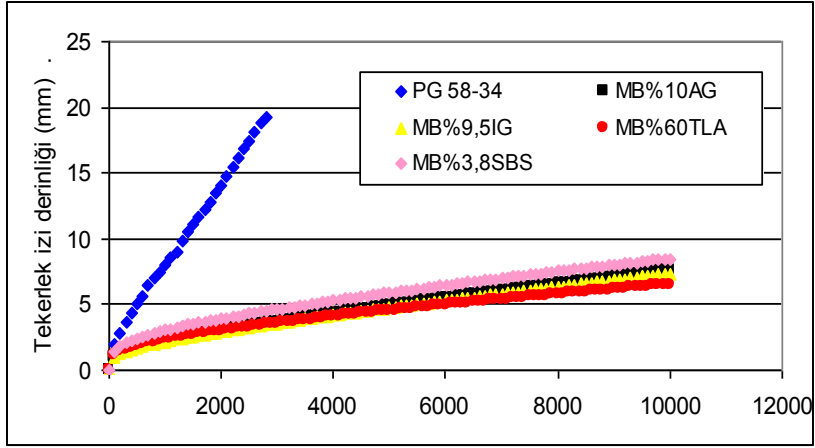


Şekil 4.33. Tekerlek izi deney sonu ekranı

Çalışmada standarda uygun olarak deneye tabi tutulan iki numunenin sonuçlarının ortalamasından faydalanılarak değerlendirme yapılmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımlara 50°C sıcaklıkta uygulanan tekerlek izi deneylerinden elde edilen kalıcı deformasyon – tekerlek geçiş sayısı grafiği Şekil 4.34’te ve 60°C sıcaklıkta uygulanan tekerlek izi deneylerinden elde edilen kalıcı deformasyon – tekerlek geçiş sayısı grafiği Şekil 4.35’te verilmiştir.

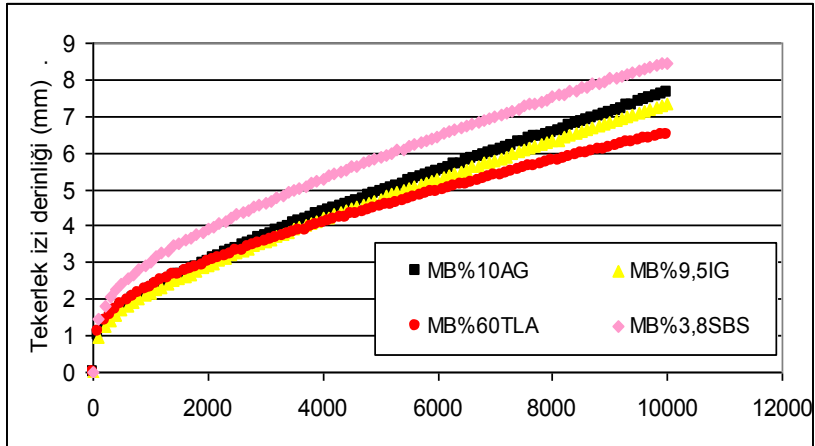


Şekil 4.34. 50°C sıcaklıkta tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi



Şekil 4.35. 60°C sıcaklıkta tekerlek geçişi ile tekerlek izi derinliğinin değişimi

Çalışmada 60°C sıcaklıkta PG 58-34 bağlayıcıyla hazırlanan karışımlarda 2800 tekerlek geçişinde 20 mm tekerlek izi derinliği olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle 50°C sıcaklıkta uygulanan deney sonuçlarından 2800 tekerlek geçişi ve 10000 tekerlek geçişi sonucundaki kalıcı deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. 60°C sıcaklıkta ise 2800 tekerlek geçiş sayısındaki deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Bu sıcaklıkta katkı türlerini daha rahat değerlendirebilmek için saf karışımı içermeyen tekerlek izi derinliği – tekerlek geçiş sayısı grafiği Şekil 4.36’da verilmiştir.



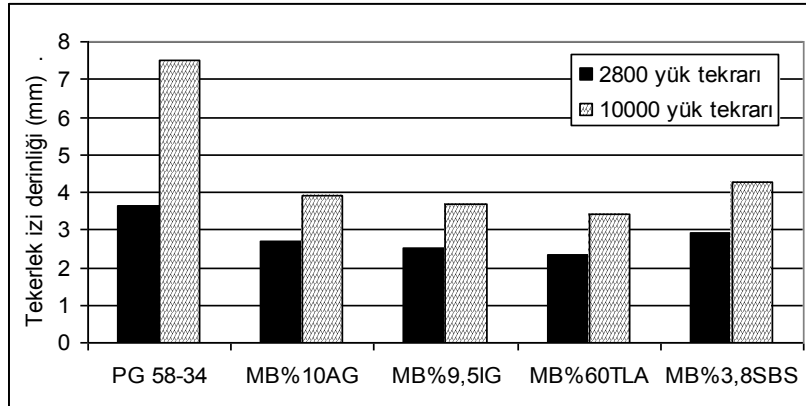
Şekil 4.36. Modifiye bitümler ile hazırlanan karışımların tekerlek izi derinliği – tekerlek geçiş sayısı grafiği

Şekillerde görüldüğü üzere her iki sıcaklıkta en yüksek tekerlek izi derinliğine PG 58-34 bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan karışımların, en az deformasyonun ise MB_{%60TLA} kullanılarak hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Karışımlar içerisinde deformasyon miktarları azdan çoğa doğru MB_{%60TLA}, MB_{%9,5IG}, MB_{%10AG}, MB_{%3,8SBS} ve PG 58-34 ile hazırlanan karışımlarda gözlenmiştir. Karışımların farklı sıcaklık ve tekerlek izi geçişlerindeki deformasyon değerleri Tablo 4.40.'da görülmektedir.

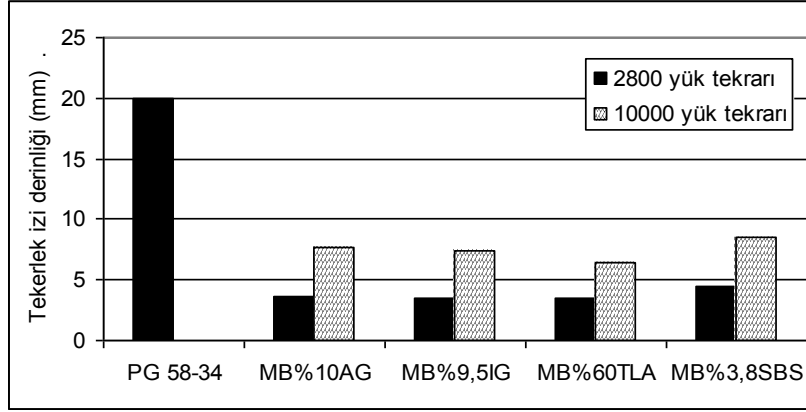
Tablo 4.40. Tekerlek izi deney sonuçları

Sıcaklık (°C)	Yük tekrar sayısı	Tekerlek izi derinliği (mm)				
		PG 58-34	MB _{%10AG}	MB _{%9,5IG}	MB _{%60TLA}	MB _{%3,8SBS}
50	2800	3,64	2,71	2,52	2,32	2,90
	10000	7,5	3,91	3,71	3,43	4,29
60	2800	20	3,59	3,46	3,45	4,50
	10000	-	7,63	7,35	6,49	8,47

Tablo 4.40.'da görülen karışımların 50°C sıcaklıktaki deformasyon değerleri Şekil 4.37'de, 60°C sıcaklıktaki deformasyon değerleri ile Şekil 4.38'de görülmektedir.



Şekil 4.37. 50°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen farklı tekerlek geçişlerindeki tekerlek izi derinlikleri



Şekil 4.38. 60°C sıcaklıkta uygulanan deneylerden elde edilen farklı tekerlek geçişlerindeki tekerlek izi derinlikleri

50°C sıcaklıkta 2800 tekerlek geçişi sonucunda MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS ile hazırlanan karışımlarda PG 58-34 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %25.5, %30.8, %36.3 ve %20.3 daha az deformasyon meydana gelmiştir. 10000 yük tekrarı sonucunda ise %47.9, %50.6, %54.3 ve %42.8 daha az deformasyon meydana gelmiştir. Bu durum tekerlek geçiş sayısı arttıkça katkı maddelerinin daha etkin olduğunu göstermektedir.

60°C sıcaklıkta ise 2800 tekerlek geçişi sonucunda MB%10AG, MB%9,5IG, MB%60TLA ve MB%3,8SBS ile hazırlanan karışımlarda PG 58-34 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %82.1, %82.7, %82.8 ve %77.5 daha az deformasyon meydana gelmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde ise en fazla deformasyon MB%3,8SBS kullanılarak hazırlanan karışımlarda gözlenmiştir. 10000 tekerlek geçişi sonunda MB%10AG, MB%9,5IG ve MB%60TLA kullanılarak hazırlanan karışımlarda MB%3,8SBS kullanılarak hazırlanan karışımlara göre sırasıyla %9.9, %13.2 ve %23,4 daha az deformasyon meydana gelmiştir. Bu durum doğal asfalt kullanımının SBS kullanımına göre tekerlek izi oluşumu açısından daha etkin olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı doğal asfalt (Amerikan Gilsoniti, İran Gilsoniti ve Trinidad göl asfaltı) ve bir çeşit polimer (SBS) katkı maddesinin bitümlü bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışımların performansına etkileri karşılaştırılmıştır. Yapılan çeşitli deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- AG, IG, TLA ve SBS kullanımının bitümlü bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ ve viskozite değerini arttırdığı belirlenmiştir. $MB_{10\%AG}$, $MB_{9.5\%IG}$, $MB_{60\%TLA}$ ve $MB_{3.8\%SBS}$ modifiye bitümlerinin aynı performans seviyesine (PG 70-34) sahip oldukları belirlenmiştir.
- $MB_{60\%TLA}$ ile hazırlanan karışımların en yüksek stabilite ve ITS değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. RMS değerlerinden $MB_{9.5\%IG}$ ve $MB_{3.8\%SBS}$ içeren karışımların, TSR değerlerinden ise $MB_{3.8\%SBS}$ içeren karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının yüksek olduğu belirlenmiştir.
- ITSM ve İÇYD deney sonuçlarından $MB_{60\%TLA}$ ile hazırlanan karışımların bütün sıcaklıklarda rijitliklerinin ve yorulma ömürlerinin diğer karışımlara göre yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Tekerlek izi deney sonuçlarından $MB_{60\%TLA}$ ile hazırlanan karışımların en yüksek kalıcı deformasyona karşı dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir.
- $MB_{10\%AG}$ ile hazırlanan karışımların $MB_{9.5\%IG}$ ile hazırlanan karışımlara göre genellikle daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir.
- $MB_{3.8\%SBS}$ ile hazırlanan karışımların saf bağlayıcıya göre BSK'ların performansını önemli oranda iyileştirmesine rağmen doğal asfalt katkı maddeleri kadar etkin olmadığı belirlenmiştir. Fakat katkı maddelerinden birim oranda (%1) kullanım dikkate alındığında en etkin katkı maddesinin SBS olduğu belirlenmiştir.

Bütün sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda katkı kullanımı ile bitümlü bağlayıcı ve karışımların performansının önemli oranda artacağı, farklı katkıların BSK'ların farklı özellikleri üzerinde değişik performans sergileyebileceği, doğal asfaltların endüstriyel katkı maddelerine önemli bir alternatif olabileceği söylenebilmektedir.

KAYNAKLAR

1. **Aflaki, S., ve Tabatabaee, N.**, 2009. Proposals for Modification of Iranian Bitumen to Meet the Climatic Requirements of Iran, *Construction and Building Materials*, **23**, 2141–2150.
2. **Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L., Rollings, R.**, 1993. Effect of styrene-butadiene-styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, 178-86.
3. **Airey, GD.**, 2004. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal of Materials Science*, 39, 951-9.
4. **Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S., Yadollahi, G.**, 2010. Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction, *Construction and Building Materials*, **25**, 1379-1387.
5. **Ameri, M., Mansourian, A., Ziari, H.**, 2011. Experimental Investigation of the Effect of Gilsonite on Performance of Hot-Mix Asphalt, *Transportation Research Journal 1* (2011) 1-8.
6. **Anderson, R.M. ve McGennis, R.B.**, 1994. Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods, *National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, FHWA-SA-95-004*, 80 p., Asphalt Institute, Lexington, KY.
7. **Bahia, HU., Hanson, DI., Zeng, M., Zhai H., Khatri M.A., Anderson, R.M.**, 2001. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design. *NCHRP report 459*.
8. **Bardesi, A., Brule, B.**, 1999. Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements, *World Road Association (PIARC)*, pp. 118-120.
9. **Cortizo, M.S., Larsen, D.O., Bianchetto, H., Alessandrini, J.L.**, 2004. Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts, *Polymer Degradation and Stability.*, **86**, 275-282.
10. **Görkem, Ç., ve Şengöz, B.**, 2009. Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Construction and Building Materials*,; **23**, 2227-2236.

11. **Hajikarimi, P., Aflaki, S., Hoseini, A.S.**, 2013. Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, **49**, 682-687.
12. **Hamidi, H.**, 1998. Stiffness Modulus and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mix Containing Gilsonite, *Ms Thesis*, Bandung Technology Institute, Bandung, Indonesian.
13. **Huang, YH.**, 2004. *Pavement analysis and design. (2.Baskı)*.
14. **Huang, B., Li, G. ve Shu, X.**, 2006. Investigation into Three-Layered HMA Mixtures, *Composites: Part B*, **37**, 679–690.
15. **Ilıcalı, M.**, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s., İstanbul.
16. **Isacsson, U., Zeng, H.Y.**, 1997. Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt, *Construction and Building Materials*, **11**, 83–91.
17. **Janoo, VC., Korhonen, C.**, 1999. Performance testing of hot-mix asphalt aggregates. *US Army Corps of Engineering Project* , Number: 99-20.
18. **Karayolları Genel Müdürlüğü**, 2011. Karayolları Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü
19. **Kuloğlu, N.**, 2001. Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, *TÜBİTAK, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, **25**, 61-67.
20. **Kumar, P., Chandra, S., Bose, S.**, 2006. Strength characteristics of polymer modified mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, 7(1): 63–71.
21. **Kök, B.V., ve Yılmaz, M.**, 2009. The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, **23**, 1999-2006.
22. **Kök, B.V., Yılmaz, M., Güler, M.**, 2011. Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder, *Fuel*, **90**, 3093-3099.
23. **Lav, A.H. ve Lav, M.A.**, 2004. Shell Bitüm El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayınları, No:3, 334 s., İstanbul.
24. **Liu, J., Li, P.**, 2008. Experimental study on gilsonite-modified asphalt. *Proceeding of the 2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, Washington*, 222-8.

25. **Lu, X., Isacsson, U.**, 1997. Rheological characterization of styrene-butadienestyrene copolymer modified bitumens, *Journal of Construction and Building Materials*, **11**(1), 23–32.
26. **Meyer, R.F. ve Witt, W.**, Definition and World Resources of Natural Bitumens, *U.S. Geological Survey Bulletin*, **1990**, 1-14
27. **Nakoman, E.**, 1977. Güneydoğu Anadolu Asfaltik Madde Zuhurları, *Madencilik Dergisi*, **16** (6), 41-51.
28. **Prapaitrakul, N., Freeman, T. ve Glover C.J.**, 2005. Analyze Existing Fog Seal Asphalts and Additives: Literature Review, *Texas Department of Transportation*, FHWA/TX-06/0-5091-1, 21 p., USA.
29. **Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., Sholar G.**, 2005. Guidelines for use of modified binders. *Florida Department of Transportation Project*, Number: 4910-4504-964-12.
30. **Sah, S.L.**, 2007. Encyclopaedia of Petroleum Science and Engineering, Kalpaz Publication, Delhi, India.
31. **Shuler, S., Douglas, I.**, 1990. Improving durability of open-graded friction courses, *Transportation Research Record*, 1259, 35–41.
32. **Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A. ve Eren, B.K.**, 2005. Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi ve Performans Üstünlükleri, *6. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 23-25 Mayıs, 334-348.
33. **Suo, Z. ve Wong, W.G.**, 2009. Analysis of Fatigue Crack Growth Behavior in Asphalt Concrete Material in Wearing Course, *Construction and Building Materials*, **23**, 462–468.
34. **Şengöz, B., Işıkyakar, G.**, 2008. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, *Construction and Building Materials*, **22**(9), 1897-905.
35. **Tayfur, S., Özen, H. ve Aksoy, A.**, 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, *Construction and Building Materials*, **21** (2), 328-337.
36. URL-1, <http://www.airporttech.tc.faa.gov/ATT2010/Pavements/Session4a/Frederick-Night%20Paving%20in%20Trinidad.pdf>, 03.10.2013.

37. URL-2, <http://www.asphaltassociates.com/html/products/tla.html>, 05.09.2013.
38. URL-3, <http://www.yolteknolojileri.com.tr/NewsDetail.asp?ID=1800>, 11.09.2013.
39. URL-4, <http://www.asiagilsonite.com/?page=home>, 20.08.2013.
40. URL-5, <http://www.gilsonite.org/index.htm>, 15.08.2013.
41. URL-6, www.americangilsonite.com/ AMG, Gilsonite in Paving Applications American Gilsonite Company, resmi internet sitesi, 22.08.2013.
42. URL-7, http://www.mod.uk/NR/rdonlyres/2AED7CD6-ADE1-46A9-A290-9069A89F32CA/0/spec_13.pdf, Marshall Asphalt for Airfields, Ministry of Defence, Construction Support Team, England, Specification 13, 73 p., 22.06.2013.
43. URL-8, <http://www.havadurumu15gunluk.net/gecmisbilgi/2011-08-15-elazig-havadurumu.html>, 29.11.2013.
44. URL-9, <http://www.cshrp.org/products/brief-17.pdf> Superpave 2000 – Improved Standards for a New Millennium, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p., 2013.
45. **Vlachovicova, Z., Wkumbura, C., Stastana, J., Zanzotto, L.,** 2007. Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene-butadiene-styrene copolymer, *Construction and Building Materials*, **21**, 567-577.
46. **Whiteoak, D. ve Read, J.,** 2003. **The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd., 464 p.**
47. **Widyatmoko, I. ve Elliott, R.,** 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts, *Construction and Building Materials*, **22**, 239–249.
48. **Won, M.C., Ho, M.K.,** 1994. Effect of antistrip additives on the properties of polymer-modified asphalt binders and mixtures, *Transportation Research Record*, 1436, 108–114.
49. **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.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU, 1982 yılında Pertek'te doğmuştur. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Elazığ'da tamamlamıştır.

2005 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı'nda Araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başlamış ve daha sonra 35. Maddeye göre geçici görevle Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevlendirilmiştir.

2012 yılından itibaren aynı bölümde görev yapmaya devam etmektedir.