

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİYAH KARBONUN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tacettin GEÇKİL

Tez Yöneticisi

Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ

Yrd.Doç.Dr. Perviz AHMEDZADE

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİYAH KARBONUN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Tacettin GEÇKİL

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 09/10/2008 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı /başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Taner ALATAŞ

Üye: Prof.Dr. Necati KULOĞLU

Üye: Doç.Dr. Yetiş Şazi MURAT

Üye: Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye: Yrd.Doç.Dr. Levent TAŞÇI

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/.../2008 tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın planlanması ve yürütülmesinde benden destek ve ilgilerini esirgemeyen, bilgi ve önerilerinden yararlandığım danışman hocalarım sayın Yard.Doç.Dr. Taner ALATAŞ ve Yard.Doç.Dr. Perviz AHMEDZADE'ye saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, çalışmada tecrübe ve önerilerinden yararlandığım Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı sayın Prof.Dr. Necati KULOĞLU'na; Laboratuar teknisyeni sayın Seyfettin ÇİÇEK'e; maddi ve manevi her türlü desteklerini benden esirgemeyen değerli arkadaşlarım Araş.Gör. Mehmet YILMAZ ve Araş.Gör.Dr. Baha V. KÖK ve kardeşim Alaaddin GEÇKİL'e; malzeme ve bilgi temininde yardımlarını esirgemeyen Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü ve TÜPRAŞ personeline; Elazığ meteorolojik hava verilerini almam ve işlememde yardımlarını esirgemeyen Elazığ Meteoroloji Bölge Müdürlüğü personelinden Şube Müdürü sayın Yaşar DEMİRKIRAN ve teknisyen sayın Mehmet ERMİŞTEKİN'e ve ayrıca çalışmaya maddi destek sağlayan FÜBAP'a teşekkür ederim.

Özellikle, çalışma süresince yıllarca ihmal etmek zorunda kaldığım ancak hep desteklerini gördüğüm sevgili eşim ve oğluma, annem ve babama sonsuz sevgilerimi sunarım.

Tacettin GEÇKİL

Elazığ, 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	VI
TABLOLARIN LİSTESİ.....	XII
SİMGELER.....	XVII
KISALTMALAR.....	XXI
ÖZET.....	XXII
ABSTRACT.....	XXIII
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Araştırmanın Önemi ve Konusu.....	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	6
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	8
2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	9
2.1.1. Agregalarda Mineralojik Sınıflandırma.....	9
2.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması.....	9
2.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması.....	11
2.1.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı.....	12
2.1.5. Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk.....	12
2.1.6. Agregalarda Özgül Ağırlık.....	13
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar.....	13
2.2.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı.....	14
2.2.2. Asfaltın Davranışı.....	16
2.2.2.1. Yüksek Sıcaklık Davranışı.....	17
2.2.2.2. Düşük Sıcaklık Davranışı.....	18
2.2.2.3. Orta Sıcaklık Davranışı.....	18
2.2.2.4. Yaşlanma (Sertleşme) Davranışı.....	19
2.2.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Test Yöntemleri.....	21
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	22
2.3.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi.....	22
2.3.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği.....	23
2.3.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi).....	23

2.3.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti.....	24
2.3.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi).....	25
2.3.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)	25
2.3.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci.....	26
2.3.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği.....	26
2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar.....	28
2.4.1. Deformasyonlar.....	29
2.4.1.1. Tekerlek izi oluşumu.....	29
2.4.1.2. Oturmalar ve Çökmeler.....	31
2.4.1.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar.....	31
2.4.2. Çatlaklar.....	31
2.4.2.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)	32
2.4.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	33
2.4.2.3. Diğer Çatlaklar.....	34
2.4.3. Ayrışmalar.....	35
2.4.3.1. Soyulmalar.....	35
2.4.3.2. Sökülmeler.....	35
2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri.....	36
2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	36
2.6.1. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi.....	37
2.6.2. Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi.....	38
2.6.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi.....	39
2.6.4. AASHTO T-283 Deneyi (Modifiye Lottman Deneyi)	40
 3. BİTÜM MODİFİKASYONU.....	 42
3.1. Modifikasyonun Amacı.....	42
3.2. Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler.....	43
3.3. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü.....	44
3.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması.....	46
3.5. Modifiyerlerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımı.....	50
3.6. Siyah Karbon, Üretimi ve Kullanım Alanları.....	52
3.6.1. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Modifikasyonunda Kullanımı.....	57
 4. ÜSTÜN PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA (SUPERPAVE) YÖNTEMİ.....	 64
4.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi.....	66

4.1.1. Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri.....	71
4.1.1.1. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT).....	71
4.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)	72
4.1.2. Bağlayıcı Performans Deneyleri.....	74
4.1.2.1. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5).....	74
4.1.2.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1).....	81
4.1.2.3. Doğrudan Çekme (DTT) Deneyi (AASHTO TP3).....	87
4.1.2.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	91
4.1.3. Süperpave Bağlayıcı Şartnamesinde Üstyapı Performansı Değerlendirmesi.....	95
4.1.3.1. Güvenlik (Parlama Noktası) (AASHTO T248).....	97
4.1.3.2. İşlenebilme ve Pompalanabilme.....	97
4.1.3.3. Yaşlanma ve Fiziksel Sertleşme.....	97
4.1.3.4. Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi).....	97
4.1.3.5. Yorulma Çatlakları.....	98
4.1.3.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	98
4.1.4. Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi.....	99
4.1.4.1. Meteorolojik Veri Tabanı.....	100
4.1.4.2. Güvenirlik.....	100
4.1.4.3. Hava Sıcaklığı Seçimi.....	101
4.1.4.4. Hava Sıcaklıklarının Kaplama Sıcaklıklarına Dönüştürülmesi.....	102
4.1.4.5. Kaplama Sıcaklıklarına Göre Bağlayıcı Seçimi.....	104
4.1.4.6. Trafik hızına ve sayısına göre seçim.....	105
4.2. Superpave Agregası Şartnamesi.....	106
4.2.1. Agregası Mutabakat Özellikleri.....	106
4.2.1.1. Kaba Agregası Köşeliliği.....	106
4.2.1.2. İnce Agregası Köşeliliği (İnce Agreganın Sıkışmamış Boşluk İçeriği)	107
4.2.1.3. Yassı ve Uzun Daneler.....	108
4.2.1.4. Kil İçeriği.....	109
4.2.2. Agregası Kaynak Özellikleri.....	110
4.2.3. Gradasyon.....	111
4.3. Karışımların Hacimsel Özellikleri.....	114
4.3.1. Özgül Ağırlıklar.....	116
4.3.1.1. Agregası Özgül Ağırlıkları.....	116
4.3.1.2. Karışım Özgül Ağırlıkları.....	117
4.3.2. Asfalt Karışımların Analizi ve Şartname Gereksinimleri.....	118

4.3.2.1. Agrega Karışımının Hacim Özgöl Ağırlığı (Gsb).....	119
4.3.2.2. Agrega Karışımının Efektif Özgöl Ağırlığı (Gse).....	119
4.3.2.3. Farklı Asfalt İçeriğindeki Karışımların Maksimum Özgöl Ağırlığı (Gmm).....	120
4.3.2.4. Agreganın Asfalt Absorpsiyonu (Pba).....	120
4.3.2.5. Asfalt Karışımın Efektif Asfalt İçeriği (Pbe).....	121
4.3.2.6. Sıkıştırılmış Asfalt Karışımındaki Mineral Agregadaki Boşluk(VMA)Yüzdesi.....	121
4.3.2.7. Sıkıştırılmış Karışımındaki Hava Boşlukları (Va) Yüzdesi.....	122
4.3.2.8. Sıkıştırılmış Karışımındaki Asfaltla Dolu Boşluk (VFA) Yüzdesi.....	122
4.4. Superpave Karışım Tasarımı.....	123
4.4.1. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı.....	123
4.4.2. Dizayn Agrega Gradasyonu Seçimi.....	128
4.4.3. Karışımın Hazırlanması ve Sıkıştırılması.....	129
4.4.4. Verilerin Değerlendirilmesi.....	130
4.4.5. Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriği.....	133
4.4.6. Nem Hassasiyeti.....	134
 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	 135
5.1. Malzeme Seçilmesi.....	135
5.1.1. Asfalt Bağlayıcı Seçilmesi.....	136
5.1.1.1. Hava Veri Tabanı Kullanılarak Proje Hava Şartlarının Tespit Edilmesi.....	136
5.1.1.2. Güvenirliğin Seçilmesi.....	137
5.1.1.3. Hava Sıcaklığının Seçilmesi.....	137
5.1.1.4. Hava Sıcaklıklarının Kaplama Sıcaklıklarına Dönüştürülmesi.....	138
5.1.1.5. Kaplama Sıcaklıklarına Göre Bağlayıcı Seçilmesi.....	139
5.1.1.6. Trafik Hızı ve Sayısına Göre Bağlayıcı Seçilmesi.....	140
5.1.2. Agrega Seçilmesi.....	141
5.1.3. Katkı Maddesinin Seçilmesi.....	142
5.2. Siyah Karbon ile Bitüm Modifikasyonu Yapılması.....	142
5.2.1. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların RTFOT Deneyi ile Yaşlandırılması.....	143
5.2.2. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Performans Deneyleri.....	145
5.2.2.1. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5).....	145
5.2.2.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1).....	156
5.2.2.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	160
5.2.3. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Başlangıç Bozulma Sıcaklıklarının Belirlenmesi.....	165
5.3. Dizayn Agrega Gradasyonu Seçimi.....	168

5.3.1. Deneme Agrega Karışımlarının Oluşturulması.....	169
5.3.2. Deneme Karışımlarının Hazırlanması ve Sıkıştırılması.....	171
5.3.3. Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi.....	176
5.4. Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi.....	182
5.5. Siyah Karbon Modifiyeli Bağlayıcılarla Karışım Modifikasyonu Yapılması.....	188
5.5.1. PG 58–28 Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması.....	190
5.5.2. PG 58–28+%5 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması.....	196
5.5.3. PG 58–28+%10 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması.....	202
5.5.4. PG 58–28+%15 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması.....	208
5.5.5. Bitümlü Karışımların %7 Boşluk Oranındaki Sıkıştırma Sayısının Bulunması.....	214
5.5.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	216
5.6. Karışımların Performans Deneyleri.....	217
5.6.1. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Nem Hassasiyeti (AASHTO T-283) Deneyleri ve Sonuçları.....	217
5.6.2. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi.....	222
5.6.3. Statik Yükleme Sünme Modülü Deneyi.....	228
5.7. Karışımların Maliyet Hesabı.....	232
6. SONUÇLAR.....	233
KAYNAKLAR.....	235
ÖZGEÇMİŞ.....	247

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Agrega Gradasyon Tipleri (a) ve Görsel Dağılımı (b).....	11
Şekil 2.2. Agreganın Özgül Ağırlık Hesaplamalarında Dikkate Alınan Hacimleri.....	13
Şekil 2.3. Asfaltın Yapısı (a) ve Bileşenleri (b).....	16
Şekil 2.4. Asfaltın Farklı Sıcaklık ve Zamanlara Göre Davranışı.....	16
Şekil 2.5. Asfaltın Sıcaklık Hassasiyeti.....	17
Şekil 2.6. Asfaltın Moleküler Düzeyde Akışı	17
Şekil 2.7. Viskoelastik Davranış ve Yay-Amortisör Modeli.....	19
Şekil 2.8. Asfalttaki Bileşenlerin Yaşlanma Sonucunda Değişimi.....	20
Şekil 2.9. Asfaltın Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması.....	21
Şekil 2.10. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği.....	23
Şekil 2.11. Karışımların Sıcaklık, Gerilme ve Yorulma Ömrü İlişkisi	25
Şekil 2.12. Kaplama Pürüzlülüğü.....	26
Şekil 2.13. Farklı Dingil Yüklerinin Kaplamada Oluşturduğu Deformasyon.....	28
Şekil 2.14. Üstyapı Performans Eğrisi ve Rehabilitasyon Gösterimi.....	29
Şekil 2.15. Zayıf Bitümlü Tabakada Tekerlek İzi Oluşumu.....	30
Şekil 2.16. Zayıf Alt Tabakalarda Tekerlek İzi Oluşumu.....	30
Şekil 2.17. Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b).....	32
Şekil 2.18. Yorulma Çatlaklarının Dereceleri.....	32
Şekil 2.19. Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	33
Şekil 2.20. Düşük Sıcaklık Çatlağının Büyümesi.....	34
Şekil 2.21. Dolaylı Çekme Deneyi (a) ve Şematik Görünüşü (b).....	37
Şekil 2.22. ITS Deneyi Yükleme Durumu (a) ve Kırılma Düzlemi (b).....	39
Şekil 3.1. Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı.....	44
Şekil 3.2. Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı.....	45
Şekil 3.3. Siyah Karbon Fabrikası Proses Akım Şeması.....	53
Şekil 3.4. Siyah Karbonun Fiziksel Yapısı.....	53
Şekil 3.5. Siyah Karbon İlavesiyle Malzeme Özelliklerinin Değişimi.....	55
Şekil 3.6. Piroлиз (a) ve Ticari (b) Siyah Karbonun TEM Mikrografları.....	56
Şekil 4.1. Superpave Karışım Dizayn Sisteminin Yapısı.....	65
Şekil 4.2. Üç Viskozite Dereceli Asfaltın Farklılıkları.....	66
Şekil 4.3. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) Aleti Şematik Görünüşü.....	71

Şekil 4.4. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) ve Parçaları.....	73
Şekil 4.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Çalışma Şekli.....	75
Şekil 4.6. Viskoelastik Davranış.....	76
Şekil 4.7. DSR Asfalt Numunesi.....	77
Şekil 4.8. Viskoz ve Elastik Malzemelerde Gerilme- Deformasyon İlişkisi.....	78
Şekil 4.9. Viskoelastik Malzemelerde Gerilme-Deformasyon İlişkisi.....	79
Şekil 4.10. Kayma Modülünün Bileşenleri.....	79
Şekil 4.11. DSR Asfalt Numunesinin Taşmış(a), Düzeltilmiş(b) ve Deneye Hazır(c) Şekli...	81
Şekil 4.12. Kiriş Eğme Reometresinin (BBR) Şematik Görünüşü.....	82
Şekil 4.13. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Numunesinin Şematik Görünüşü.....	83
Şekil 4.14. Defleksiyonun (δ) Grafikle Belirlenmesi.....	84
Şekil 4.15. Sünme Oranı (m-değer) Değerinin Grafikle Belirlenmesi.....	85
Şekil 4.16. BBR Deneyinde Kullanılan Kalıplar ve Numune.....	85
Şekil 4.17. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	87
Şekil 4.18. Doğrudan Çekme Deneyi Şematik Görünüşü.....	88
Şekil 4.19. Gerilme-Uzama Oranı Diyağramı.....	88
Şekil 4.20. Asfaltın Kopma Uzamasında Sıcaklığın Etkisi.....	89
Şekil 4.21. Numune Kalıpları.....	89
Şekil 4.22. DTT Deneyi Numune Ölçüleri.....	90
Şekil 4.23. DTT Deneyi Numune Bağlantısı Şematik Görünüşü.....	90
Şekil 4.24. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Şeması.....	91
Şekil 4.25. Asfalt Bağlayıcı İçin Tipik Viskozite Eğrisi.....	92
Şekil 4.26. Brookfield Viskozimetresi ve Termosel Sistem.....	92
Şekil 4.27. Viskozimetre ve Mil Bağlantısı.....	94
Şekil 4.28. Dönel Viskozimetre (RV) Göstergesi.....	95
Şekil 4.29. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi Örneği.....	96
Şekil 4.30. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi Gereklileri.....	96
Şekil 4.31. Yıllık En Yüksek 7-Günlük Hava Sıcaklığı Dağılımı.....	100
Şekil 4.32. Düşük ve Yüksek Hava Sıcaklığı Normal Dağılımı ve Güvenirlilik Kabulleri.....	101
Şekil 4.33. En Düşük ve En Yüksek Hava Sıcaklıklarının Dağılımı.....	102
Şekil 4.34. En Düşük ve En Yüksek Kaplama Sıcaklıklarının Dağılımı.....	103
Şekil 4.35. Superpave Asfalt Bağlayıcı Seçimi.....	104
Şekil 4.36. İnce Agrega Köşeliliği Deney Aparatları.....	107
Şekil 4.37. Yassı ve Uzun Daneleri Ölçme Test Aparatı.....	108
Şekil 4.38. Kum Eşdeğerlik Deneyi.....	109

Şekil 4.39. 0,45 Üstel Kuvvet Grafik Çizim Esası.....	111
Şekil 4.40. 19 mm Maksimum Boyut için Maksimum Yoğunluk Gradasyonu.....	112
Şekil 4.41. Superpave Gradasyon Limitleri.....	113
Şekil 4.42. Superpave Dizayn Agregada Gradasyonu.....	113
Şekil 4.43. Sıkışmış BSK Numunesinin Bileşen Diyagramı.....	115
Şekil 4.44. Agreganın Hacim (a), Zahiri (b) ve Efektif (c) Özgül Ağırlık Hacimleri.....	116
Şekil 4.45. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı (a) ve Kalıp Konfigürasyonu (b)....	124
Şekil 4.46. SGC’de Karışım Sıkıştırma Karakteristikleri.....	124
Şekil 4.47. Numunenin Dönme (a) ve Sıkıştırma Boyunca Kesme (b) Hareketi	125
Şekil 4.48. Bir Yoğurmalı Sıkıştırıcının Şematik Görünüşü.....	125
Şekil 4.49. Numuneye Etki Eden Kuvvetler.....	125
Şekil 4.50. Hacimsel Özelliklerin (Gmm, Va, VMA, VFA, Pba, Pbe) Asfalt İçeriği ile Değişimi.....	134
Şekil 5.1. Elazığ için En Düşük ve En Yüksek Hava Sıcaklıklarının Dağılımı.....	138
Şekil 5.2. Elazığ için En Düşük ve En Yüksek Kaplama Sıcaklıklarının Dağılımı.....	139
Şekil 5.3. Elazığ için Bağlayıcı Sınıfı Seçimi.....	140
Şekil 5.4. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) Aleti (a) ve Şişelerin Yerleştirilmesi (b).....	143
Şekil 5.5. RTFOT Deneyi Yapılışı (a) ve Şişelerin Deneyden Önceki ve Sonraki Görünüşü (b)	144
Şekil 5.6. Yaşlanmanın Etkisiyle Bağlayıcılarda Meydana Gelen Kütle Kaybı.....	144
Şekil 5.7. Bohlin DSR II Dinamik Kayma Reometresi.....	145
Şekil 5.8. Numunenin Silikon Kalıba Doldurulması (a) ve Üst Plakaya Yerleştirilmesi (b)....	146
Şekil 5.9. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin $G^*/\sin \delta$ -Sıcaklık İlişkisi.....	147
Şekil 5.10. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin $G^*/\sin \delta$ -Sıcaklık İlişkisi...	148
Şekil 5.11. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%5SK Numunelerinin $G^*/\sin \delta$ -Sıcaklık İlişkisi.....	149
Şekil 5.12. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%10SK Numunelerinin $G^*/\sin \delta$ -Sıcaklık İlişkisi.....	150
Şekil 5.13. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%15SK Numunelerinin $G^*/\sin \delta$ -Sıcaklık İlişkisi.....	151
Şekil 5.14. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği- G^* Değişimi.....	153
Şekil 5.15. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği- δ Değişimi	153
Şekil 5.16. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği- $G^*/\sin \delta$ Değişimi.....	153

Şekil 5.17. Orijinal ve Yaşlandırılmış Modifiye Bağlayıcıların 64 °C'deki SK İçeriği- G*/sin δ İlişkisi.....	154
Şekil 5.18. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti.....	157
Şekil 5.19. BBR Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	157
Şekil 5.20. Kiriş Eğme Reometresi Deneyinden Elde Edilen Sünme Sertliği (S) Değerleri....	158
Şekil 5.21. Kiriş Eğme Reometresi Deneyinden Elde Edilen m-Değerleri.....	159
Şekil 5.22. Brookfield DV-III Ultra Dönel Viskozimetresi.....	160
Şekil 5.23. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların 135 ve 165 °C Sıcaklıktaki Viskozite İlişkisi.....	161
Şekil 5.24. PG 64–22 Ana Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	162
Şekil 5.25. PG 58–28 Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	162
Şekil 5.26. PG 58–28+%5SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	163
Şekil 5.27. PG 58–28+%10SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	163
Şekil 5.28. PG 58–28+%15SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	163
Şekil 5.29. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları İlişkisi.....	164
Şekil 5.30. FEF N-550 Siyah Karbonun (SK) TGA Eğrisi.....	166
Şekil 5.31. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Bağlayıcısının TGA Eğrisi.....	166
Şekil 5.32. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Bağlayıcısının TGA Eğrisi.....	166
Şekil 5.33. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%5SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi.....	167
Şekil 5.34. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%10SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi.....	167
Şekil 5.35. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%15SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi.....	167
Şekil 5.36. Karışım-1 Agrega Gradasyon Eğrisi.....	169
Şekil 5.37. Karışım-2 Agrega Gradasyon Eğrisi.....	170
Şekil 5.38. Karışım-3 Agrega Gradasyon Eğrisi.....	170
Şekil 5.39. Gyropac Yoğurmalı Sıkıştırıcı.....	175
Şekil 5.40. Karışım-1 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	177
Şekil 5.41. Karışım-2 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması1.....	178
Şekil 5.42. Karışım-3 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	179
Şekil 5.43. Karışım Numunelerinin %4,3 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	183
Şekil 5.44. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	183
Şekil 5.45. Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	184
Şekil 5.46. Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	185
Şekil 5.47. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri.....	185
Şekil 5.48. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi....	186

Şekil 5.49. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	188
Şekil 5.50. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	190
Şekil 5.51. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri.....	193
Şekil 5.52. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi....	194
Şekil 5.53. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	195
Şekil 5.54. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	196
Şekil 5.55. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri.....	199
Şekil 5.56. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi....	200
Şekil 5.57. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	201
Şekil 5.58. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	202
Şekil 5.59. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri.....	205
Şekil 5.60. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi....	206
Şekil 5.61. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	207
Şekil 5.62. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması.....	208
Şekil 5.63. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri.....	211
Şekil 5.64. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi....	212
Şekil 5.65. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri.....	213
Şekil 5.66. Yoğurma Sayısı – Boşluk oranı ilişkisi.....	215
Şekil 5.67. Deney Numuneleri.....	216
Şekil 5.68. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Düzeneği.....	217
Şekil 5.69. Numunelerin Manometre ile Doygun Hale Getirilmesi.....	219
Şekil 5.70. Kuru ve Şartlandırılmış Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Değişimi.....	221
Şekil 5.71. Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı (ITSR) Değişimi.....	221
Şekil 5.72. UMATTA Deney Cihazı.....	223
Şekil 5.73. Esneklik Modülü Deney Düzeneği.....	225
Şekil 5.74. Saf Numunelerin Birim Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi.....	226
Şekil 5.75. %5SK ve %10SK Katkılı Numunelerin Birim Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi.....	226
Şekil 5.76. %15SK Katkılı Numunelerin Birim Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi.....	226
Şekil 5.77. Numunelerin Esneklik Modülü (Es) Değişimi.....	227

Şekil 5.78. Sünme Modülü Deney Düzenegi.....	229
Şekil 5.79. Karışım Numunelerinin 40 °C Sıcaklıktaki Birim Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi.....	229
Şekil 5.80. Karışım Numunelerinin 60 °C Sıcaklıktaki Birim Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi.....	230
Şekil 5.81. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (R) Değişimi.....	231

TABLULARIN LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Bazı Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Uzunluğu ve km ² Alana Düşen Yol Uzunluğu	1
Tablo 2.1. Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri.....	10
Tablo 2.2. Dört Farklı Asfaltın Kimyasal Kompozisyonu.....	15
Tablo 2.3. Geleneksel Bağlayıcı Test Yöntemleri.....	21
Tablo 2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Temel Özelliklerine Etki Eden Parametreler.....	27
Tablo 3.1. Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması.....	46
Tablo 3.2. Bitüm Modifikasyon Tipleri.....	47
Tablo 3.3. Yaygın Olarak Kullanılan Modifiyerlerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi.....	48
Tablo 3.4. Bitümlü Karışımlarda Kimyasal Katkıların Olumlu Etkileri.....	48
Tablo 3.5. Yaygın Olarak Kullanılan Asfalt Modifiyerlerin Muhtemel Olumlu Etkileri.....	49
Tablo 3.6. Siyah Karbon Türlerinin Özellikleri.....	54
Tablo 3.7. Siyah Karbonun Partikül Büyüklüğüne Göre Sınıflandırılması.....	54
Tablo 3.8. Siyah Karbon Türleri ve Ürün Özellikleri.....	56
Tablo 4.1. Karışım Dizayn Seviyeleri İçin Önerilen Trafik Dizayn Değerleri.....	65
Tablo 4.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları.....	67
Tablo 4.3. Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO MP1)	69
Tablo 4.4. Bağlayıcı Sınıfına Göre Uygulanacak PAV Deney Sıcaklıkları.....	73
Tablo 4.5. Superpave Bağlayıcı Performans Deneyleri ve Kullanılacak Numuneler.....	74
Tablo 4.6. Hedeflenen Kayma Gerilmesi ve Deformasyon Değerleri.....	80
Tablo 4.7. Kaplama Dizayn Sıcaklıkları ve Bağlayıcı Sınıfı.....	99
Tablo 4.8. Trafik Hızı ve Sayısı Esas Alınarak Bağlayıcı Seçilmesi.....	105
Tablo 4.9. Kaba Agrega Köşelilik Kriterleri (%).....	107
Tablo 4.10. İnce Agrega Köşelilik Kriterleri (%).....	108
Tablo 4.11. Yassı ve Uzun Daneler Kriteri.....	109
Tablo 4.12. Kil İçeriği Kriterleri.....	110
Tablo 4.13. Önerilen Los Angeles Aşınma Limitleri.....	110
Tablo 4.14. Superpave Karışım Gradasyonları.....	114
Tablo 4.15. Superpave Karışım Gradasyon Limitleri.....	114
Tablo 4.16. Superpave VMA Gereksinimleri.....	122
Tablo 4.17. Superpave VFA Gereksinimleri.....	122
Tablo 4.18. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırma Enerjisi.....	127
Tablo 4.19. Superpave Sıkıştırma Kriterleri.....	128

Tablo 4.20. Superpave Hacimsel Karışım Dizayn Kriterleri.....	134
Tablo 5.1. Elazığ İli 20 Yıllık En Yüksek ve En Düşük Sıcaklık Değerleri.....	136
Tablo 5.2. Sıcaklık Ortalamaları ve Standart Sapmaları.....	137
Tablo 5.3. Farklı Yöntemlere Göre Hesaplanan Kaplama Dizayn Sıcaklıkları.....	139
Tablo 5.4. Asfalt Çimentolarının Fiziksel Özellikleri.....	141
Tablo 5.5. Kalker Agregasının Fiziksel Özellikleri.....	141
Tablo 5.6. Siyah Karbonun Fiziksel Özellikleri.....	142
Tablo 5.7. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri.....	143
Tablo 5.8. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların RTFOT Kütle Kaybı.....	144
Tablo 5.9. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları.....	147
Tablo 5.10. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları.....	148
Tablo 5.11. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%5SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları.....	149
Tablo 5.12. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%10SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları.....	150
Tablo 5.13. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%15SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları.....	151
Tablo 5.14. SK Katkılı Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların 64°C Sıcaklıktaki DSR Deney Sonuçları.....	152
Tablo 5.15. Saf ve Modifiye Karışımların Farklı Sıcaklıklardaki BBR Deney Sonuçları.....	158
Tablo 5.16. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Viskozite Değerleri.....	161
Tablo 5.17. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları.....	164
Tablo 5.18. Saf ve SK Katkılı Bağlayıcıların Yaşlanma Öncesi ve Sonrası Bozulma Sıcaklıkları.....	168
Tablo 5.19. Superpave 12,5 mm Nominal Karışım için Gradasyon Kriterleri.....	168
Tablo 5.20. Başlangıç Deneme Karışımları.....	169
Tablo 5.21. Deneme Karışımlarının Özgül Ağırlıkları.....	171
Tablo 5.22. Trafik Seviyesine Göre Sıkıştırma Parametreleri.....	174
Tablo 5.23. Deneme Karışımlarının Ölçülen Hacim Özgül Ağırlıkları.....	175
Tablo 5.24. Deneme Karışımlarının Maksimum Teorik Özgül Ağırlıkları.....	176
Tablo 5.25. Karışım-1 Numunelerinin %4,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri.....	176
Tablo 5.26. Karışım-2 Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri.....	178

Tablo 5.27. Karışım-3 Numunelerinin %4,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma	
Karakteristikleri.....	178
Tablo 5.28. Deneme Karışımlarının Nini ve Ndes'deki %Gmm Değerleri.....	179
Tablo 5.29. Deneme Karışımlarının Sıkıştırma Hesap Özeti.....	180
Tablo 5.30. Deneme Karışımlarının Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri.....	181
Tablo 5.31. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerinin Fiziksel	
Özellikleri.....	182
Tablo 5.32. Karışım Numunelerinin %4,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	182
Tablo 5.33. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	183
Tablo 5.34. Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	184
Tablo 5.35. Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	184
Tablo 5.36. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri.....	185
Tablo 5.37. Karışımların %4,85 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri.....	187
Tablo 5.38. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma	
Karakteristikleri.....	187
Tablo 5.39. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk	
Değerleri.....	188
Tablo 5.40. Saf ve Katkılı Bağlayıcıların Başlangıç Bitüm Oranları.....	189
Tablo 5.41. Saf ve Katkılı Karışımların Ölçülen Hacim Özgül Ağırlıkları.....	189
Tablo 5.42. Saf ve Katkılı Karışımların Maksimum Teorik Özgül Ağırlıkları.....	189
Tablo 5.43. Karışım Numunelerinin %4,78 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri..	190
Tablo 5.44. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti.....	190
Tablo 5.45. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri.....	191
Tablo 5.46. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerinin Fiziksel	
Özellikleri.....	191
Tablo 5.47. Karışım Numunelerinin %4,2 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	191
Tablo 5.48. Karışım Numunelerinin %4,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	192
Tablo 5.49. Karışım Numunelerinin %5,2 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	192
Tablo 5.50. Karışım Numunelerinin %5,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	192
Tablo 5.51. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri.....	193
Tablo 5.52. Karışımların %4,75 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri.....	194
Tablo 5.53. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma	
Karakteristikleri.....	195
Tablo 5.54. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk	
Değerleri.....	195

Tablo 5.55. Karışım Numunelerinin %4,85 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri..	196
Tablo 5.56. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti.....	196
Tablo 5.57. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri.....	197
Tablo 5.58. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	197
Tablo 5.59. Karışım Numunelerinin %4,4 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	197
Tablo 5.60. Karışım Numunelerinin %4,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	198
Tablo 5.61. Karışım Numunelerinin %5,4 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	198
Tablo 5.62. Karışım Numunelerinin %5,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	198
Tablo 5.63. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri.....	199
Tablo 5.64. Karışım Numunelerinin %4,90 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri.....	200
Tablo 5.65. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri.....	201
Tablo 5.66. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri.....	201
Tablo 5.67. Karışım Numunelerinin %4,92 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri..	202
Tablo 5.68. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti.....	202
Tablo 5.69. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri.....	203
Tablo 5.70. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerinin Fiziksel Özellikleri.....	203
Tablo 5.71. Karışım Numunelerinin %4,6 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	203
Tablo 5.72. Karışım Numunelerinin %5,1 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	204
Tablo 5.73. Karışım Numunelerinin %5,6 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	204
Tablo 5.74. Karışım Numunelerinin %6,1 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	204
Tablo 5.75. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri.....	205
Tablo 5.76. Karışım Numunelerinin %5,10 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri.....	206
Tablo 5.77. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri.....	207
Tablo 5.78. Karışım Numunelerin Nmaks.'da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri.....	207
Tablo 5.79. Karışım Numunelerinin %4,98 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri..	208
Tablo 5.80. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti.....	208
Tablo 5.81. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri.....	209

Tablo 5.82. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	209
Tablo 5.83. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	209
Tablo 5.84. Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	210
Tablo 5.85. Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	210
Tablo 5.86. Karışım Numunelerinin %6,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri....	210
Tablo 5.87. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri.....	211
Tablo 5.88. Karışım Numunelerinin %5,25 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri.....	212
Tablo 5.89. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri.....	213
Tablo 5.90. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri.....	213
Tablo 5.91. Saf ve Modifiye Karışımların Optimum Asfalt İçerikleri.....	214
Tablo 5.92. Farklı Yoğurma Sayısı Uygulanarak Hazırlanmış Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	215
Tablo 5.93. Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayısı.....	216
Tablo 5.94. Şartlandırılmamış (Kuru) Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	218
Tablo 5.95. Şartlandırılmış (Yaş) Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	218
Tablo 5.96. Şartlandırılan Karışım Numunelerin Doygunluk Dereceleri.....	219
Tablo 5.97. Kuru ve Şartlandırılmış Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Oranları (ITSR).....	220
Tablo 5.98. 0 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulacak Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	223
Tablo 5.99. 20 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulacak Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	224
Tablo 5.100. 40 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulacak Numunelerin Fiziksel Özellikleri.....	224
Tablo 5.101. Numunelerin Esneklik Modülü (Es) Değerleri.....	227
Tablo 5.102. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (R) Değerleri.....	230

SİMGELER

τ	: Kayma mukavemeti
μ	: Bitümün viskozite katsayısı
τ_o	: Bitümün kesme gerilmesi oranı
θ	: Agregada daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı
c	: Bitümün Kohezyonu
σ	: Normal gerilme
R_m	: Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ε	: Eksenel şekil değiştirme (deformasyon)
l	: Isı
t	: Yükleme süresi
N_f	: Yorulma çatlağı meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı
K ve k	: Bitümlü sıcak karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar
$E.F.$	: Taşıt eşdeğerlik faktörü
L_i	: Dingil yükü
i	: Taşıt dingil sayısı
α	: Yol üstyapısının servis yeteneğine göre değişen bir katsayı (Türkiye koşulları için 4,4)
E_m	: Bitümlü sıcak karışımın esneklik modülü
P	: Bitümlü sıcak karışıma uygulanan yük
H_y	: Bitümlü sıcak karışımın yatay deformasyonu
h	: Numunenin yüksekliği (kalınlığı)
ν	: Poisson oranı
V_d	: Bitümlü sıcak karışımın düşey deformasyonu
ITS	: Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme mukavemeti
P_{maks}	: Numuneye uygulanan maximum yük (kuvvet)
d	: Numune çapı
$ITSR$	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
$ITS_{yaş}$	: Şartlandırılmış (yaş) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti
ITS_{kuru}	: Şartlandırılmamış (kuru) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti
G^*	: Bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (kayma sertliği)
δ	: Bitümlü bağlayıcının faz açısı
f	: Frekans (radyan)
ω	: Frekans (Hz)

τ_{maks}	: Maksimum kayma gerilmesi
τ_{min}	: Minimum kayma gerilmesi
γ_{maks}	: Maksimum Kayma deformasyonu
γ_{min}	: Minimum Kayma deformasyonu
γ	: Kayma deformasyonu
T	: Uygulanan tork
r	: Numune yarıçapı
θ	: Dönme açısı
Δt	: Gecikme zamanı
G''	: Bitümlü bağlayıcının kayıp modülü
G'	: Bitümlü bağlayıcının depolama modülü
L	: Mesnetler arası açıklık
E_s	: Elastisite modülü
I	: Asfalt kirişin kesit atalet momenti
$S_{(t)}$	: Bitümlü bağlayıcının t anındaki sünme sertliği
b	: Asfalt kiriş uzunluğu
$\delta_{(t)}$	: Asfalt kirişte t anında oluşan defleksiyon
S	: Bitümlü bağlayıcının sünme sertliği
ϵ_f	: Kopma uzaması oranı
ΔL	: Boy değişimi
L_e	: İlk boy
σ_f	: Kopma gerilmesi
A_o	: Kesit alanı
$\dot{\gamma}$	: Asfalt numunenin kayma oranı
R_c	: Viskozite numune kabının çapı
R_s	: Viskozite milinin çapı
M	: Burulma
L	: Viskozite milinin efektif uzunluğu
X	: Yüksek kaplama dizayn sıcaklığı
Y	: Düşük kaplama dizayn sıcaklığı
T_{20mm}	: Yüzeyden 20 mm derinlikteki yüksek kaplama dizayn sıcaklığı
$T_{havamaks}$	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı
E	: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemidir.
T_{min}	: En düşük kaplama dizayn sıcaklığı
$T_{havamin}$	: En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı

H	: Yüzeye olan derinlik
S_{maks}	: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması
S_{min}	: En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması
z	: Güvenirlik katsayısı
W	: Ağırlık
VMA	: Mineral agregadaki boşluk hacmi
Vmb	: Sıkışmış karışımın hacmi
Vmm	: Asfalt karışımın boşluksuz hacmi
Vfa	: Asfalt ile dolu boşluk hacmi
Va	: Hava boşluk hacmi
Vb	: Asfalt bağlayıcının hacmi
Vba	: Absorbe (emilen) asfalt bağlayıcı hacmi
Vsb	: Mineral agreganın hacmi
Vse	: Mineral agreganın hacmi
Mb	: Asfalt bağlayıcının kütlesi
Mbe	: Asfalt bağlayıcının efektif kütlesi
Magrega	: Agreganın kütlesi
Mhava	: Havanın kütlesi
Mkarışım	: Asfalt karışımın toplam kütlesi
Gsb	: Agreganın Hacim Hacim Özgöl Ağırlık
Gsa	: Agreganın Hacim Zahiri Özgöl Ağırlık
Gse	: Agreganın Hacim Efektif Özgöl Ağırlık
P_1, P_2, P_N	: Karışımdaki agregaların ağırlıkça yüzdesi
G_1, G_2, G_N	: Karışımdaki agregaların (hacim veya zahiri) özgül ağırlığı
Gmm	: Asfalt karışımın maksimum özgül ağırlığı
Gmb	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
Gb	: Asfaltın özgül ağırlığı
Pmm	: Toplam gevşek karışımın ağırlıkça yüzdesi = 100
Pb	: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği
Ps	: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agrega içeriği
Pba	: Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak absorbe edilen asfalt
Pbe	: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği
S_r	: Sıkıştırma esnasında numunenin kesme gerilmesi
F	: Kalıba açmak için gereken kuvvet
d_1	: Kalıba açmak için gereken kuvvetin eksenel kuvvete mesafesi

V	: Numune Hacmi
P_b	: Numuneye etki eden basınç kuvveti
R	: Numuneye etki eden eksenel kuvvet
N_{ini}	: Başlangıç yoğurma sayısı
N_{des}	: Dizayn yoğurma sayısı
N_{maks}	: Maksimum yoğurma sayısı
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_m	: Numunenin ağırlığı
γ_{su}	: Suyun yoğunluğu
V_{mx}	: Numunenin bulunan hacmi
h_x	: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği
C	: Düzeltme faktörü
$G_{mb}(\text{ölçülen})$	: Sıkışmış numunenin ölçülen hacim özgül ağırlığı
$G_{mb}(\text{tahmini})$	: Sıkışmış numunenin hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı
$G_{mb}(\text{düzeltilmiş})$	: Herhangi bir yoğurma için düzeltilmiş hacim özgül ağırlığı
$\% G_{mm}$	: Düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi
$G_{mm}(\text{ölçülen})$	: Ölçülen maksimum teorik özgül ağırlık
$\% G_{mm}@N_{ini}$	: N_{ini} 'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi
$\% G_{mm}@N_{des}$	: N_{des} 'deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi
$\% G_{mm}@N_{maks}$	: N_{maks} 'daki maksimum teorik ağırlık yüzdesi
$P_b(\text{tahmini})$	: Karışım ağırlığının yüzdesi olarak tahmini asfalt içeriği
$\% VMA(\text{başlangıç})$	: Deneme asfalt içeriğindeki karışımın agregada boşlukları yüzdesi
DP	: Asfalt karışımının filler veya toz oranı
$P_{0,075}$	: Filler malzemesinin agregada karışım ağırlığının yüzdesi
S	: Standart sapma
n	: Bir örnekteki toplam gözlem sayısını
x_{ort}	: Bir örnekteki toplam gözlem sayısının aritmetik ortalaması

KISALTMALAR

KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
Superpave	: Superior Performing Asphalt Pavement (Üstün Performanslı Asfalt Kaplama)
SHRP	: Strategic Highway Research Program (Stratejik Karayolu Araştırma Programı)
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test (Dönel İnce Film Fırını Testi)
PAV	: Pressure Aging Vessel (Basınçlı Yaşlandırma Kabı)
RV	: Rotational Viscometer (Dönel Vizkozimetre)
DSR	: Dynamic Shear Rheometer (Dinamik Kesme (kayma) Reometresi)
BBR	: Bending Beam Rheometer (Kiriş Eğme Reometresi)
DDT	: Direct Tensile Tester (Doğrudan Çekme Deneyi)
PG	: Performance Grade (Performans Sınıfı)
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
SK	: Siyah Karbon
CB	: Carbon Black
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme ve Test Birliği)
AC	: Asphalt Concrete (Asfalt Çimentosu)
ITSM	: Indirect Tensile Strength Modulus (Dolaylı Çekme Esneklik Modülü)
ITS	: Indirect Tensile Strength (Dolaylı Çekme Mukavemeti)
ITSR	: Dolaylı çekme mukavemeti oranı
PSK	: Piroliz Siyah Karbon
FHWA	: Federal Highway Administration (Federal Karayolu İdaresi)
SMA	: Taş mastik asfalt
Pa.s	: Pascal-saniye
cP	: Santipois
ETDY	: Eşdeğer Tek Dingil Yüğü
LTPP	: Long Term Pavement Performance (Uzun Dönem Kaplama Performansı)
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği)
TGA	: Termogravimetrik Analiz

ÖZET

Doktora Tezi

SIYAH KARBONUN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Tacettin GEÇKİL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2008, Sayfa: 247

Bu tez çalışmasında, siyah karbonun (SK) bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansı üzerinde sağladığı iyileştirmeler, Superpave bağlayıcı şartnamesi ve karışım dizaynı çerçevesinde incelenerek kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu amaçla, Elazığ için son 20 yılın hava sıcaklıkları alınarak, SHRP yöntemine göre bağlayıcı performans sınıfı PG 64–22 olarak belirlenmiştir. PG 64–22 (B 70/100) ana bağlayıcısı esas alınarak, bu bağlayıcı derecesinde bir modifiye bağlayıcı elde edebilmek amacıyla PG 58–28 (B 160/220) bağlayıcısına %5, %10 ve %15 SK ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların özellikleri; dinamik kayma reometresi (DSR), giriş eğme reometresi (BBR), dönel viskozimetre (RV) ve termogravimetrik analiz (TGA) deneyleri ile incelenmiştir. Daha sonra Elazığ için bir dizayn agrega gradasyonu oluşturularak saf ve SK modifiyeli bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanmış ve SK'un bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkileri; dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve nem hassasiyeti, dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) ve sünme sertliği deneyleri ile incelenmiştir. Bağlayıcıların DSR, BBR, RV ve TGA deneyleri sonucunda; saf B 160/220 (PG 58–28) bağlayıcısına göre, SK ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının yükseldiği, viskozite değerlerinde ve bozulma sıcaklıklarında önemli artışlar olduğu görülmüştür. Ayrıca, genel olarak uygulama bölgesi performans derecesine eşit modifiye bağlayıcının, %10 SK ilavesiyle elde edildiği ve bu oranın bağlayıcı rijitliğinin artmasında etkili olduğu görülmüştür. Karışım deneyleri sonucunda, dolaylı çekme mukavemeti oranındaki en büyük artış miktarı %10 SK katkılı, dolaylı çekme mukavemetleri bakımından ana bağlayıcı karışıma eşdeğer kabul edilebilecek karışım %10 SK katkılı, esneklik modülü değeri bakımından ana bağlayıcı karışıma eşdeğer kabul edilebilecek karışım, %15 SK katkılı modifiye karışımlardan elde edilmiştir. Sünme sertliği değeri bakımından ana bağlayıcı karışıma eşdeğer kabul edilebilecek karışım, 40 °C sıcaklık için yaklaşık %2 SK katkılı; 60 °C sıcaklık için %10 SK katkılı modifiye karışımlarından elde edilebileceği görülmüştür.

Çalışma sonucunda, bağlayıcıların SK ilavesiyle sertleştiği ve sıcaklık hassasiyetlerinin düştüğü; bu bağlayıcılarla hazırlanan karışımların yorulma direnci, kohezyon ve durabilitesinin iyileşerek deformasyonlara ve su tesirlerine karşı mukavemetinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Siyah karbon, Asfalt, Bitümlü sıcak karışım, Superpave yöntemi, Performans sınıfı, Modifiye bitüm, Modifiye karışım.

ABSTRACT

PhD Thesis

RESEARCH ON THE EFFECT OF CARBON BLACK ON THE FEATURES OF HOT MIX ASPHALT

Tacettin GEÇKİL

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2008, Page: 247

In this thesis, the improvements made by carbon black (CB) as an additive in the performance of bitumen and hot mix asphalt (HMA) and its employability were analyzed by researching within the terms of Superpave binder specification and the mixture design.

To this end, getting air temperatures of past twenty years in Elazığ, binder performance grade was determined as PG 64-22 according to SHRP method. Based on PG 64-22 main binding, modified binders were obtained by adding 5%, 10% and 15% SK to PG 58-28 (B 160/220) binder in order to get a modified binder on the level of this binder. The features of pure and modified binders were analyzed by dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR), rotational viscometer (RV) and thermogravimetric analysis (TGA) experiments. Afterwards, forming a design aggregate gradation for Elazığ, mixture samples were prepared with pure and SK-modified binders, and the effects of SK on the performance of bituminous hot mixtures with indirect tensile strength (ITS) and moisture susceptibility, indirect tensile stiffness modulus (ITSM) and creep stiffness experiments. As a result of DSR, BBR, RV and TGA experiments of binders, according to pure B 160/220 (PG 58-28) binder, it was observed that high-temperature performance grade of the binder increased with SK addition, and there were significant increases in viscosity value and degradation temperatures. In addition, it was found that the modified binder generally equal to application area performance level was obtained by 10% SK addition and this rate was effective in the rise of binder stiffness. As a result of mixture experiments, maximum increase in indirect tensile strength rate was obtained from modified mixtures with 10% SK, the mixture that could be accepted as equal to the mixture with main binding in terms of indirect tensile strength was obtained from modified mixtures with 10% SK and the mixture that could be accepted as equal to the mixture with main binders in terms of stiffness modulus was obtained from modified mixtures with 15% SK. It was observed that the mixture which could be accepted as equal to the mixture with main binder in terms of creep stiffness could be obtained from modified mixtures with 2% SK at 40°C and modified mixtures with 10% SK at 60°C.

At the end of the study, it was found that binders hardened and temperature sensitivity decreased; the fatigue resistance, cohesion and durability of the mixtures prepared with these binders improved and their strength against permanent deformations and water effects increased.

Keywords: Carbon black, Asphalt, Hot mix asphalt, Superpave method, Performance grade, Modified bitumen, Modified mixture.

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Önemi ve Konusu

Tarihin ilk dönemlerinde tekerleğin icadıyla başlayıp günümüze ulaşan süreçte, canlıların ve eşyaların herhangi bir yerden başka bir yere taşınmasında ulaşım, insanların en önemli temel ihtiyaçlarından biri olmuştur. İnsanların ve eşyaların bir yerden başka bir yere hareketi olarak tanımlanan ve sosyo-ekonomik gelişmenin temel itici güçlerinden olan ulaşım, günümüz dünyasında karayolları, demiryolları, denizyolları, havayolları ve boru hatları gibi çeşitli sistemlerle sağlanmaktadır. Ulaşım faaliyetlerinin tarihsel sürecine bakıldığında, 18.yüzyıla kadar denizyolu ve içsu yolu taşımacılığı ön planda iken 18. ve 19. yüzyılda Avrupa'daki sanayi devrimi ve buharlı motorların icat edilmesi ile demiryolu taşımacılığının hâkim bir sistem olduğu görülmektedir. Karayolu taşımacılığı ise petrolün işlenmesi ve motorlu tekerlekli araçlarda kullanılmasıyla birlikte, 20. yüzyılda ön plana çıkmış ve ikinci dünya savaşı sonrası hızlı bir şekilde artarak diğer ulaşım sistemleriyle rekabet edecek duruma gelmiştir. Petrol krizinin yaşandığı 1970'li yıllardan sonra, 1980'li yıllardan itibaren karayolu taşımacılığı artan eğilimini sürdürerek günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde hâkim ulaşım sistemi haline gelmiştir [1] (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Bazı Gelişmiş Ülkelerin Karayolu Uzunluğu ve km² Alana Düşen Yol Uzunluğu –2004 [1,2]

Ülke	İngiltere	Fransa	Almanya	İtalya
Karayolu Uzunluğu (Km)	164900	398300	231400	172600
m/km ²	679	722	648	573

Osmanlı İmparatorluğundan 18000 km uzunluğunda bakıma muhtaç bir yol ağı devralan Türkiye Cumhuriyeti, 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) teşkilatını kurarak ülkenin karayolu hamlesini daha dinamik bir hale getirmiş ve bu sayede 1950 yılında toplam 47080 km olan ülkemizdeki karayolu ağı bugün 64000 km'ye ulaşmıştır. Süreç içerisinde meydana gelen bu artışlara rağmen, ülkemiz karayolu ağına bakıldığında km² alana düşen yol uzunluğunun 82 m ile gelişmiş ülkelerdeki uzunluklardan oldukça düşük bir seviyede olduğu görülmektedir [3]

Ekonomik kalkınmanın ve toplum refahının gelişmesinde büyük önemi olan karayolu taşımacılığının, Türkiye'deki ulaştırma sektörleri içindeki payı giderek artış gösteren bir eğilim göstermektedir. Ülkemizde yolcu taşımacılığında %95, yük taşımacılığında %92 olan karayolunun payı, karayolu ile taşımacılığın diğer ulaşım sektörlerinden daha çok talebi

karşıladığını göstermektedir [1]. Türkiye'deki araç sayısı incelendiğinde, 1950 yılında trafiğe çıkan motorlu kara taşıtı sayısı toplam 36028 iken, bu değer günümüzde 12,5 milyona ulaşmış, ancak buna karşılık genel bütçeden KGM bütçesi için ayrılan pay %4 seviyelerinden %2 seviyelerine düşmüştür [1,3]. Ayrıca, ülkelerin sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilecek bir değer olarak, 1000 kişiye düşen otomobil sayısı ülkemizde 84 iken gelişmiş ülkelerde bu değer 500'ün üzerindedir [1].

Ülkemizdeki durum, km² alana düşen yol uzunluğu ve otomobil sahipliği bakımından gelişmiş ülkelerle kıyaslandığında karayolu ağımızın geometrik ve fiziki standartlarının bir program dâhilinde mevcut ve gelecekteki trafiğin gerektirdiği niteliklere yükseltilmesi zorunluluk arz etmektedir. Bu zorunluluğa rağmen ülkemizdeki karayolları için genel bütçeden ayrılan paylara bakıldığında, yollarımızın çok kısıtlı imkânlarla yapılmaya çalışıldığı görülmektedir.

Ülkemizdeki karayolları, üstyapısında kullanılan malzemelerin kolay temin edilebilmesi ve yolun kısa bir süre sonra trafiğe açılabilmesi sebebiyle gelişmiş ülkelerde olduğu gibi esnek kaplamalı olarak inşa edilmektedir. Araç tekerleklerinin direkt olarak temas ettiği dolayısıyla en büyük gerilmelere maruz kalan, güvenli ve konforlu bir sürüşten birinci dereceden sorumlu olan esnek kaplama tabakası, üstyapının en önemli kısmını teşkil etmektedir. Kaplama tabakası, üzerine etki eden yüklere karşı bozulmadan direnç gösterebilecek ve yükü alt tabakalara iletebilecek, suların altyapıya sızmasına engel teşkil edecek, bölgenin olumsuz iklim koşullarında kararlılığını yitirmeyecek, pürüzsüz ve konforlu bir sürüş temin edecek nitelikte olmalıdır.

Türkiye ekonomisinin istenen düzeyde olmaması ve karayollarına bütçeden ayrılan payın yetersiz olması sebebiyle daha düşük maliyete sahip olduğu düşünülen sathi kaplamaların uzun yıllardır ülkemizde tercih edildiği görülmektedir. Ancak, 20 yıllık bir periyottaki hizmet ömrü içerisinde yapılan bakım-onarım harcamaları dikkate alındığında sathi kaplamalı bir yolun asfalt betonu kaplamalı bir yoldan daha yüksek maliyete sahip olduğu görülmektedir [4]. Ülkemizin toplam 59350 km olan kaplamalı yol ağı içerisindeki sathi kaplamalı yol uzunluğu 50159 km olmasına karşın, 7204 km devlet ve il yolu ile 1987 km otoyol olmak üzere 9191 km Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) yol uzunluğu bulunmaktadır [3].

Daha konforlu ve dayanıklı olması sebebiyle özellikle gelişmiş ülkeler tarafından yaygın olarak kullanılan BSK'lar, son yıllarda ülkemiz ekonomisindeki gelişmelere bağlı olarak karayollarımızda daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye'de, 2006 yılı verilerine göre kent içi ve kırsal yollarda yapım ve bakım dâhil olmak üzere toplam 18,9 milyon ton bitümlü sıcak karışım kullanılmıştır. Almanya, Fransa, İtalya gibi gelişmiş ülkelerdeki yıllık BSK üretimi 40 milyon tonun üzerinde iken bu değer sadece Amerika'da 500 milyon ton civarındadır [2].

Yüksek maliyeti nedeniyle BSK'yı oluşturan bitüm ve agreganın özellikleri, yolun öngörülen ömür ve konfor seviyesinin sağlanması bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu karışımlarda ağırlıkça, agrega %94–96, bitüm %4–6 oranlarında yer almasına rağmen, kaplamanın maliyeti ve performansı üzerinde bağlayıcının büyük önemi bulunmaktadır. Viskoelastik davranış gösteren ve termoplastik bir malzeme olan bitüm, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. Bu reolojik özelliğinden dolayı bitümün yapısal ve fiziksel özellikleri ile bağlayıcı olarak içerisinde önemli bir rol oynadığı bitümlü karışımın davranışları arasındaki ilişkinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Esnek üstyapı kaplamalarında, artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak meydana gelen tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını arttırmak amacıyla birçok ülkede, bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir [5,6].

Üstyapı kaplamasından beklenen, ancak klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan özelliklerin sağlanabilmesi, günümüz teknolojik imkânlarının kullanılmasıyla bağlayıcının ya da karışımın katkı maddeleriyle özelliklerinin iyileştirilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir. Modifikasyonda kullanılan katkı maddeleri, fiziksel ve kimyasal yapılarına, modifikasyon tipine, bağlayıcı ya da karışım üzerindeki etkilerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda polimer esaslı katkı maddelerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı, katkı maddelerinin polimer olanlar ve olmayanlar olmak üzere iki guruba ayrıldığı görülmektedir. Karayollarımızda iklim ve trafik şartları altında meydana gelen bozulmaları geciktirerek, bakım ve yenileme ihtiyacını daha seyrek aralıklarla yapılabilecek hale getirilmesinde çözüm oluşturabileceği düşünülen “Modifiye Bitüm” konusu, petrolde dışa bağımlı olan ülkemiz için çok önemli bir hale gelmektedir. Bu amaçla ülkemizde birçok çalışmalar yapılmaya başlanmış ve KGM tarafından “Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi” hazırlanarak yayınlanmıştır [7].

Bitümlü bağlayıcıların ve karışımların yol malzemesi olarak özelliklerinin belirlenmesinde, alışlagelmiş geleneksel yöntemlerle birlikte, teknolojinin sağladığı imkânlarla yeni yöntemler de kullanılmaktadır. Günümüzde birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de karışımlarda ana bağlayıcı görevini üstlenen asfalt çimentolarının kullanılabilirliği, TS 1081 EN 12591 standardına göre tespit edilmektedir. Bu standartta penetrasyon veya vizkozite değerlerine göre bağlayıcı kıvamları ve sınıfları belirlenerek, uygulanan diğer standart bağlayıcı deneyleri ile de kullanılabilirlikleri tespit edilmektedir.

Türkiye’de KGM tarafından kıvamı yüksek olan bitümlerin sıcak iklimli bölgelerde, kıvamı düşük bitümlerin ise soğuk iklimli bölgelerde kullanılması tavsiye edilmektedir [8].

Karayollarında, öngörülen hizmet seviyesinden önce meydana gelen bozulmalar, farklı hava ve iklim şartları altında kaplamanın gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını tam olarak yansıtamaması, analiz ve uygulama sırasındaki sıkıştırma tekniklerinin farklı olması nedeniyle, gelişmiş birçok ülkeyi yeni tasarım yöntemleri geliştirmeye sevk etmiştir. Bu tasarım yöntemlerinden en önemlisi Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave) olarak isimlendirilen “Üstün Performanslı Asfalt Kaplama” yöntemidir. Superpave yöntemi, Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) faaliyet gösteren Strategic Highway Research Program (SHRP) “Stratejik Karayolu Araştırma Programı” çerçevesinde geliştirilmiştir. SHRP, 1987 yılında Birleşik Devletler kongresi tarafından ABD’deki yolların performansı ile durabilitesini arttırmak ve yol kullanıcıları için daha güvenli hale getirmek amacıyla, beş yıllık bir süre için 150 milyon dolarlık bir fonla kurulmuştur. Bu araştırma fonunun 50 milyon doları, laboratuvar analizi ve arazi performansı ile ilgili performans esaslı asfalt şartnamesi çalışmaları için kullanılmıştır. Diğer 100 milyon doları ile de bir deneme yolu yapılarak kaplamanın davranışı incelenmiştir. Araştırma programı sonucunda, hem modifiye ve hem de modifiye olmayan asfaltların doğrudan arazi koşullarındaki performanslarıyla ilgili fiziksel özelliklerini ölçen Superpave bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir [9,10].

Geleneksel bağlayıcı şartnameleri penetrasyon, vizkozite ve duktilite gibi standart deney sıcaklıklarında yapılan ve çoğu ampirik olan fiziksel özellik deneyleri çerçevesinde geliştirilmiştir. Superpave bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği, deneylerin standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesidir. Asfalt kaplamalarda yapım öncesi ve sonrası olmak üzere, karışımdaki asfalt malzemesi kısa ve uzun süreli yaşlanmalara uğramaktadır. Superpave şartnamesinde olmasına rağmen, geleneksel şartnamelerde asfaltın yapım sonrası hizmet aşamasında yaşlanmasını temsil etmek üzere bir deney kullanılmamaktadır. Geleneksel şartnameler, bağlayıcının kıvamını 25 °C sabit sıcaklıkta yapılan penetrasyon deneyi ile belirler ve bağlayıcının orta sıcaklık davranışı ile ilgili fikir verir. Ancak, standart sıcaklıklarda aynı penetrasyona sahip birçok bitümlü bağlayıcı farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar gösterebilir. Aynı penetrasyona sahip oldukları için, farklı bağlayıcılar aynıymış gibi sınıflandırılabilirler ve bu bağlayıcıların her şartta aynı performansı göstereceği hatasına düşülebilmektedir. Bu sebeple, geleneksel yöntemler bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki davranışını belirlemek için yumuşama noktası deneyini kullanır. Superpave ise bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özelliklerini tespit eden ve böylece bağlayıcının vizkoelastik davranışını yansıtan dinamik kesme deneyini kullanarak bağlayıcının

orta ve yüksek sıcaklıklardaki özelliklerini tespit eder. Ayrıca, asfaltın 135 °C'deki vizkozitesini ve böylece başka bir sıcaklık davranışını belirleyerek, pompalanabilirlik ve işlenebilirliğini tespit etmek için bağlayıcının akış karakteristiklerini belirleyen dönel vizkozimetre deneyini kullanır. Geleneksel bağlayıcı şartnameleri, bağlayıcının standart sıcaklıktaki (25 °C) uzama ve çekilebilme yeteneğini belirlemek için düktilite deneyini kullanır. Superpave ise bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki sünme sertliği, sünme ve uzama oranlarını tespit eden kiriş eğme reometresi ve doğrudan çekme deneylerini kullanır [11].

Superpave şartnamesi, BSK'larda meydana gelen yorulma çatlaklarına, kalıcı deformasyonlara ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bağlayıcı özelliklerini sınırlayarak kaplamanın performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, işlenebilirlik ve akıcılığı belirleyen Dönel Vizkozimetre (RV), kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı bağlayıcı performansını belirleyen Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı bağlayıcı performansını belirleyen Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme Deneyi (DDT) kullanılmaktadır.

Dizayn yöntemleri bakımından, bitümlü sıcak karışımlar incelendiğinde; Superpave yönteminin Marshall yöntemine göre saha performansını daha iyi ve gerçekçi olarak yansıttığı görülmektedir. Marshall yönteminde sıkıştırma, numunenin her iki yüzeyine sıkıştırma tokmağı ile belirli sayıda darbeleri olarak yapılmakta ve hazırlanan numune Marshall aletinde deneye tabi tutularak karışımın stabilitesi ve yük altındaki plastik akması tespit edilmektedir. Superpave yönteminde ise, hazırlanan karışım belirli şartlarda kısa dönem yaşlandırma işlemine tabi tutulduktan sonra, belirli basınç, yoğurma açısı ve devir sayısı gibi şartlar altında yoğurma yaparak numuneyi arazi şartlarına en yakın şekilde sıkıştıran ve sıkıştırma sırasında karışımın sıkışabilirliği ile ilgili bilgi veren yoğurmalı sıkıştırıcılar ile yapılmaktadır. Marshall yönteminde darbeleri tokmaktama ile yapılan sıkıştırma, arazide çelik silindirlerle yapılan sıkıştırmaları temsil etmemektedir. Darbe ile sıkıştırmadan dolayı agrega danelerinin kırılması, boşluk oranı ve optimum bağlayıcı oranının doğru olarak saptanamamasına yol açmaktadır ve dolayısıyla bu şekilde dizayn edilen kaplamalarda zamanla çeşitli bozulmalar meydana gelmektedir. Ayrıca, Marshall stabilitesi de bitümlü sıcak karışımın kayma mukavemetini tam olarak karşılayamamaktadır. Superpave yönteminde, kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı kaplama direncinin belirlenmesi amacıyla kayma ve dolaylı çekme deneyi gibi performans deneylerinden ayrıntılı veriler elde edilerek kaplama performansı tahmin edilmektedir. Böylece Superpave yöntemi, belirli iklim ve yükleme koşulları altında sıkışmayı iyi temsil etmesi ve sıkıştırılmış karışımın performans testleri ile performansını tahmin etmesi sebebiyle Marshall yöntemine göre daha üstündür [11].

Bu çalışmada, ülkemiz için oldukça yeni bir konu olarak sayılabilecek modifiye bitüm ve karışımlar konusunda dünyada bugüne kadar yapılan çalışmalar doğrultusunda, Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAŞ) tarafından üretilen Siyah Karbonun (SK), bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü karışımların performansı üzerinde sağladığı iyileştirmeler, Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi ve Superpave karışım dizaynı çerçevesinde incelenerek, bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği araştırılmış, geniş ve güncel literatür bilgileri ülkemize kazandırılmaya çalışılmıştır.

1.2. Araştırmanın Amacı ve İzlenen Yol

Siyah karbonun BSK'ların özelliklerine etkisinin Superpave dizayn yöntemi çerçevesinde araştırıldığı bu çalışmada, siyah karbon modifikasyonu ile kaplamalarda; sıcak iklim koşullarının hüküm sürdüğü yerlerde çok ağır trafik yüklerinin altında tekerlek izinde oturmaya karşı yeterli direnç sağlamak, soğuk hava koşullarında termal çatlak oluşumu riskini azaltmak, iyi bir adezyon ve kohezyon temin ederek mekanik özellikleri iyileştirmek, su tesirlerine karşı direnci arttırmak ve üstün bir performans sağlayacak daha düşük kalınlıkta tabakaların inşa edilmesi amaçlanmıştır.

Üstün performanslı kaplama elde etmek için kullanılan BSK'lar, agrega ve bağlayıcının belirli oranlarda bir araya gelmesi ile oluşan kompozit malzemelerdir. Bu özelliği dolayısıyla kaplama performansı ile doğrudan ilgisi bulunan ve BSK'yı teşkil eden agrega ve bitümlü bağlayıcının ve bunlardan oluşan BSK'nın özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla çalışmanın ikinci bölümünde; BSK'yı oluşturan malzemeler hakkında gerekli bilgiler verilerek, tasarlanan bir kaplamadan beklenen performans özellikleri, kaplamada oluşmuş veya oluşması muhtemel bozulmalar, kaplamayı teşkil etmede kullanılan tasarım yöntemleri ve bu tasarım yöntemleri ile teşkil edilmiş kaplamaların performans tayini için kullanılan karışım deney yöntemleri hakkında bilgiler verilerek bir bütünlük halinde BSK'ların önemi vurgulanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; bitüm ve bitümlü karışımların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleri hakkında genel bilgiler verilerek, bu çalışmanın esas konusunu teşkil eden Siyah Karbon (SK) ve Siyah Karbon ile modifiye edilmiş bitüm ve bitümlü karışımlar hakkında yapılmış olan araştırmalar incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; bitümlü sıcak karışımların tasarlanması amacıyla geliştirilmiş yeni bir tasarım yöntemi olan Superpave “Üstün Performanslı Kaplama” yöntemi hakkında geniş bir çalışma yapılarak ve güncel veriler kullanılarak, bağlayıcı ve agrega seçimi ve karışım tasarımı konusunda detaylı bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde; Superpave dizayn yöntemi çerçevesinde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Burada ilk olarak Superpave bağlayıcı şartnamesi göz önüne alınarak, uygulama bölgesi olan Elazığ için iklim ve trafik verileri ışığı altında yapılan deneylerin sonuçları gösterilmiş ve bağlayıcı sınıfı belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan mineral agreganın uygunluğu da tespit edilmiştir. Daha sonra, Siyah Karbon katkı maddesi kullanılarak modifiye bitümlü bağlayıcılar elde edilmiş ve bu bağlayıcılar üzerinde bağlayıcı şartnamesinde öngörülen performans deneyleri uygulanarak deney sonuçları yorumlanmıştır. İkinci olarak, karışımlarda kullanılacak dizayn agrega gradasyonu seçildikten sonra, saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılarla Superpave dizayn yöntemine göre karışım numuneleri hazırlanmış ve bu karışımların dizayn asfalt içerikleri belirlenmiştir. Son olarak dizayn bağlayıcı içeriğinde saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanmış olan saf ve modifiye karışım numuneleri, dolaylı çekme mukavemeti, esneklik modülü, sünme sertliği gibi performans deneylerine tabi tutularak sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın altıncı bölümünde; bağlayıcı seçimi, modifiye bitüm, dizayn agrega gradasyonu seçimi ile karışımların performans deneyleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Karayolu yapısı, altyapı ve üstyapı olmak üzere; önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen kotlara getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tarif edilmektedir. Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin arasında kalan bölgeye altyapı adı verilir ve başlıca görevleri, istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az da olsa yolu dış etkilere korumaktır [12,13]. Üstyapının oturduğu altyapı ve taban zemininin durumu, yolun inşa maliyeti ve bakım masrafları açısından büyük önem taşımaktadır [14]. Karayolu üstyapısı, trafik yüklerini altyapıya ileten ve altyapıyı koruyarak düzgün bir yuvarlanma yüzeyi temin etmek amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplamalardan oluşan, tabakalı yol yapısıdır. Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek üstyapı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır [12]. Gelişmiş birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de karayolu üstyapıları esnek kaplama olarak projelendirilmekte ve yapılmaktadır. Esnek üstyapıyı teşkil eden temel ve alttemel tabakaları, yük taşıma kabiliyetini arttırmak, deformasyonlara karşı direnç göstermek ve drenajı sağlamak gibi nedenlerden dolayı inşa edilmektedir. Agregaya ile bitümlü malzeme bileşiminden meydana gelen ve trafik yüklerine doğrudan maruz kalan kaplama tabakası ise; trafiğin aşındırma ve iklimin ayrıştırma etkilerine karşı direnç göstermek, yol yapısını sudan korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak konforlu bir sürüş sağlamak amacıyla, sathi kaplama veya bitümlü sıcak karışım kaplama olarak inşa edilmektedir [15].

Bitümlü sıcak karışımlar, proje ömrü içinde toplam standart dingil yükü sayısı 3×10^6 'dan fazla olan yüksek standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agregaya, ince agregaya ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerine uygun olarak uygun bir bitümlü bağlayıcı oranı ile bir plentte belirli sıcaklıkta homojen olarak karıştırılması ile elde edilir ve yola taşındıktan sonra belirli sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşaatı gerçekleştirilir. Agregaya-asfalt karışımlarının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn esnasında stabilite, durabilite, esneklik, yorulma ve kayma direnci, geçirimsizlik ve işlenebilirlik gibi özellikleri sağlanması gerekir [16].

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

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Agrega; doğal, yapay veya her iki cins mineral malzemenin çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış ve/veya kırılmamış tanelerinin bir yığınıdır [17]. Asfalt karışımların performansı üzerinde önemli bir rolü olan agregalar, bitümlü sıcak karışımlarda en önemli ikinci malzemedir. Karışımın ağırlıkça %90 ile %95'ini, hacimce %75 ile %85'ini oluşturan mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynarlar [18,19,20].

Mineral agreg a malzemesi, kaba agreg a, ince agreg a ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir [21]. Esnek üstyapılarda kullanılacak agreg aların, trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine karşı koyabilmesi, bitümle iyi bir aderans sağlaması ve farklı hava şartlarına karşı koyabilme özelliğine sahip olması gerekir. Bitümlü sıcak kaplamalar aşırı yüklemelere maruz kaldığı zaman, karışım daki agreg a tanelerinin birbiri üzerinden kayması sonucu kaplamada bir kayma (kesme) düzlemi oluşur. Trafik yüklerine karşı kaplamanın gösterdiği kayma direnci büyük ölçüde agreg a tarafından sağlanan içsel sürtünmeye bağlıdır. Agreg anın şekli ve dokusu içsel sürtünme için gerekli kenetlenmeyi sağlar ve kübik-pürüzlü dokuya sahip olan agreg alar, yuvarlak-pürüzsüz dokulu agreg alardan daha fazla kayma direnci gösterirler [22]

2.1.1. Agregalarda Mineralojik Sınıflandırma

Agreg alar genel olarak; dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Kum-çakıl karışımından meydana gelen dere malzemesi, sahip olduğu olumsuz özelliklerinden dolayı ancak konkasörlerde kırılarak elde edilen kırma çakıl ve kırma kum olarak kaplama yapımında kullanılabilir. Yapay taşlar, çoğunlukla yüksek fırın cüruflarından elde edildiklerinden genellikle çok gevrek ve poroz olmaları ayrıca yeterince üretilmedikleri ve üretilen miktarların da çimento sanayinde kullanılmaları sebebiyle yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agreg a, Püskürük, Tortul ve Metaformik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agreg alardır [10,20].

2.1.2. Agregalarda Boyut Sınıflandırması

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agreg alar aşağıda belirtilen boyutlara göre sınıflandırılmaktadır.

a) Kaba Agregâ: Kaba agregâ; kırılmış ve elenmiş, taş, çakıl veya bunların karışımından oluşan ve agregâ karışımının 4,75 mm.'lik (No: 4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı malzemeden oluşmalıdır [21].

Bitümlü karışımındaki iri agregâ yüzdesi %40-50'ye çıkarılırsa, iri agregâ karışımın mekanik direncini arttıran bir iskelet oluşturur ve karışımın akma direncinde önemli bir artış görülmeye başlanır [23,15]. Bu tip bir iskeletin sağlanması için gerekli iri agregâ oranı, kullanılacak agregânın dane şekli ve dokusu ile ilgilidir. Beton asfalt kaplamalarda %55 oranında iri agregâ içeren karışımların, %25 oranında iri agregâ içeren karışımlardan daha az deformasyona uğradığı görülmüştür [15].

b) İnce Agregâ: İnce agregâ, 4,75 mm.'lik (No.4) elekten geçip 0,075 mm.'lik (No.200) elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanır. Kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşan ince agregâ, temiz, sağlam ve dayanıklı olmalı, plastisite indeksi %2'den fazla bulunmamalıdır [21]. Bir karışımındaki ince agregâ, iri agregânın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar [23,15]. Agregâ karışımında kullanılan pürüzsüz bir çakıl kumu, kırma malzeme veya cürufa nazaran daha düşük bir deformasyon direnci sağlar [15].

c) Mineral filler: Mineral filler, genel anlamı ile tamamı 0,600 mm (No.30) elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Mineral filler; taş tozu, sönmüş kireç, mermer tozu, çimento, uçucu kül veya benzeri mineral maddelerden meydana gelebilir ve içerisinde kil, toprak, organik ve zararlı maddeler ihtiva etmemelidir. Tablo 2.1'de mineral fillerin gradasyon limitleri verilmiştir [21,24].

Tablo 2.1. Mineral Fillerin Gradasyon Limitleri [21,24]

Elek Boyutu	Ağırlıkça % Geçen
0,600 mm (No.30)	100
0,300 mm (No.50)	95–100
0,075 mm (No.200)	70–100

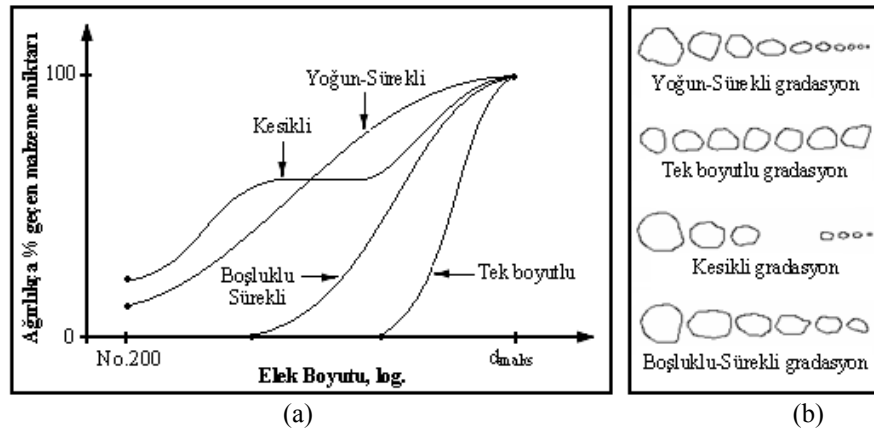
Mineral filler, toplam agregânın çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler genellikle bitümlü karışımın içinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belli bir orana kadar filler malzemesi karışımındaki boşlukları doldurmaya yardımcı olarak agregâ tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlar ve daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar [25]. Karışımlarda kullanılacak filler malzemesi düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı, kimyasal bakımdan atıl olmalı, yani bitümlü

malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Ayrıca, bitümlü karışımın yapıldığı sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıyla iyi bir yüzey adezyonu sağlamalıdır [15]. Kandhal ve arkadaşları tarafından asfalt karışımlar üzerinde yapılan çalışmalarda, filler malzemesinin; kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve nem hasarına karşı dayanım bakımından bitümlü yol karışımlarının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [26].

2.1.3. Agregalarda Gradasyon Sınıflandırması

Gradasyon, agregalar harmanını oluşturan danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder ve karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Belirli bir karışım için maksimum dane boyutu ve belirli boyuttaki danelerin ağırlıkça miktarlarının belirli limitler dâhilinde olması şartnameler ile öngörülür. Ancak maksimum dane boyutu 1 inç (25,4 mm)'den büyük oldukça işlenebilirlik ve sıkışma zorlaşır, segregasyon artar, boşluk miktarı azalır, agregalar danelerinin toplam yüzeyi azalır, yoğunluk ve stabilite artar ve bağlayıcı ihtiyacı azalır [20].

Agregalar gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılır. Bu gradasyon tipleri Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir.



Şekil 2.1. Agregalar Gradasyon Tipleri (a) ve Görsel Dağılımı (b) [20]

Kesikli gradasyona sahip agregalar, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediklerinden boşluk miktarlarının fazlalığından dolayı yol inşaatında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden dolayı boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Yine tek boyutlu gradasyonda da hemen hemen aynı boyuttaki agregalar ihtiva ettiklerinden düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemeden en ince malzemeye kadar olan agregalar

boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük, dolayısıyla yoğunluğu artmaktadır. Bu sebeple, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir [20].

2.1.4. Agregalarda Biçim ve Yüzey Yapısı

Agrega danelerinin biçimleri, yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti özelliklerine etki ederler. Yuvarlak biçimli agregaların açısız (köşeli) biçimli agregalara nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür [20].

Agregaların yüzey yapısı; agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğünü ifade eden bir desendir ve bağlayıcı ile iyi bağ kurabilmeleri için çok önemlidir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, bağlayıcı ile iyi bir kenetlenme meydana getirerek güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilirler. Eğer agrega danelerinin yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın işlenebilirliği azalmakta ancak içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikler de artmaktadır [20,27].

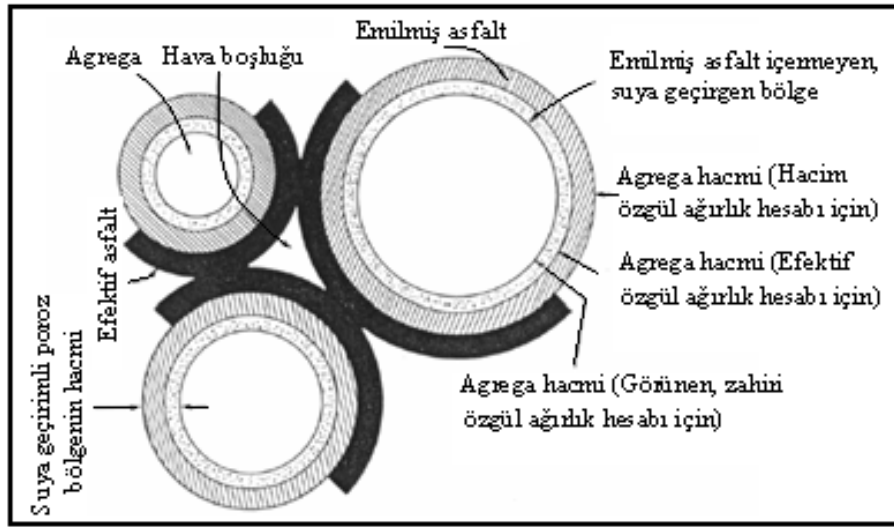
2.1.5. Agregalarda Porozite, Yüzey Alanı ve Boşluk

Agrega danelerinin porozitesinin veya su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı belli bir düzeyde olması istenir. Agregadaki gözeneklerin boyutu, sayısı ve süreklilikleri, agregaların dayanımını, aşınmaya karşı direncini, yüzey dokusunu, özgül ağırlığını, bağlayıcı ile adezyonunu ve donma ve çözölmeye karşı direncini etkilemektedir [27].

Agrega danelerinin sahip oldukları yüzey alanlarının toplamı ile agrega daneleri arasındaki boşlukların toplamı, bağlayıcısız veya bağlayıcı karışımların tüm özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Toplam yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi gradasyon, dane çapı, dane biçimi gibi özelliklere bağlıdır. Agregada dane çapı küçüldükçe toplam yüzey alanı ve boşluk hacmi önemli ölçüde artacağından gerekli bağlayıcı ihtiyacı artacak, ayrıca boşluk miktarının artması ile karışımın yoğunluğu azalacaktır. Ancak, maksimum dane çapının artması ile işlenebilirlik problemi artsa da karışımın yoğunluğunda artış olacak, fakat buna karşın gerekli bağlayıcı miktarı azalarak karışımın kohezyonu, stabilitesi ve durabilitesi azalacaktır. Bu sebeple kaplamalarda kullanılacak agregaların maksimum dane, çapı karışımın bu özelliklerini optimize edecek şekilde seçilmelidir [20].

2.1.6. Agregalarda Özgöl Ağırlık

Özgöl ağırlık, bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25 °C'deki suyun ağırlığına oranı olarak tarif edilir. Agregada danesinin hacim tanımlamasına bağlı olarak zahiri, hacim ve efektif olmak üzere üç tane özgöl ağırlık türü vardır [16]. Agreganın özgöl ağırlığı, bitümlü sıcak karışımda kullanılacak bağlayıcı oranını belirlemede yardımcı olmaktadır. Asfalt karışım hesaplarında kullanılan agregada için seçilecek olan özgöl ağırlık, sıkıştırılmış kaplamada hesaplanan hava boşlukları miktarını en doğru olarak veren özgöl ağırlık olmalıdır. Şekil 2.2'de özgöl ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan agregada hacim tanımlamaları görülmektedir.



Şekil 2.2. Agreganın Özgöl Ağırlık Hesaplamalarında Dikkate Alınan Hacimleri [27].

Hesaplamalarda zahiri özgöl ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli tüm boşluklar tarafından absorbe edildiği kabul edilir. Hacim özgöl ağırlık kullanıldığında, asfaltın su geçirimli boşluklar tarafından absorbe edilmediği kabul edilir. Efektif özgöl ağırlık, agregada tarafından absorbe edilen asfalt miktarını dikkate aldığından, sıkıştırılmış asfalt kaplama karışımındaki boşluk hesabı için en doğru sonucu vermektedir [16].

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bitümlü Bağlayıcılar

Sıcak karışımların performansı üzerinde önemli bir rolü olan bitümlü bağlayıcılar, sıcak karışımlarda en önemli malzemedir. Karışımın ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturan bitümlü bağlayıcı, agregada danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdıkları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta,

kohezyonu ile karışımın stabilitesini arttırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır [20].

Bitüm, “American Society for Testing and Materials” (ASTM) Amerika Malzeme ve Test Birliği tarafından, esas olarak asfaltlar, katranlar, ziftler ve asfaltitler gibi yüksek moleküllü ağır hidrokarbonlardan oluşan, doğal ya da üretilmiş, siyah veya koyu renkli, katı, yarıkatı veya viskoz bağlayıcı madde olarak tanımlanır. Bitümler katran ve asfalt olmak üzere iki ana guruba ayrılmaktadır [10]. Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile ham katran olarak elde edilirler ve yol inşaatında kullanılabilmeleri için ikinci bir damıtma işleminden geçirilirler [15]. Asfalt ise ASTM tarafından rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, ana maddesi bitüm olan, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilmektedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri asfalt kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılabilmektedir [10]. Asfalt malzemesi dayanıklılığı, agregaya güçlü yapışma özelliği ve kaplamada oluşturduğu yüksek geçirimsizliği nedeniyle karayolu mühendisliğinde bağlayıcı madde olarak değer kazanmıştır. Asfalt bağlayıcı, yol kaplamasına belirli bir esneklik kazandırmasının yanında çeşitli asit, alkali ve tuz reaksiyonlarına karşı önemli ölçüde direnç göstermektedir. Normal şartlar altında katı veya yarı katı bir malzeme olmasına rağmen, ısıtılarak, solvent (çözücü) katılarak veya su ile emülsiyona tabi tutularak sıvı hale getirilebilir [11].

Yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile katı veya yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu (AC) olarak isimlendirilen petrol asfaltlarıdır. Tabiatla doğal halde bulunan kaya ve göl asfaltları birtakım ayrıştırma işlemlerinden geçtikten sonra yol kaplamalarında kullanılabılırler ve genellikle bitümlü karışımlara modifiye amaçlı katılmaktadırlar [28].

2.2.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

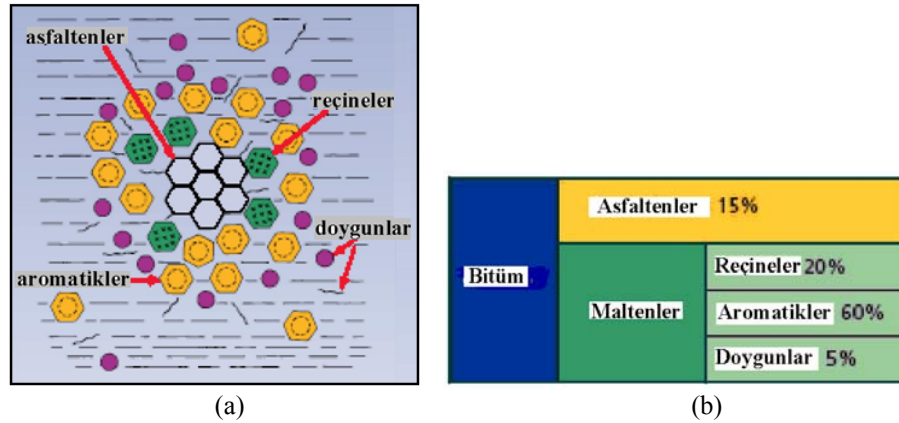
Asfaltların kimyasal yapıları, karmaşık olmaları sebebiyle az bilinmektedir ve kimyasal özellikleri orijinal kaynağı olan ham petrolün özelliklerine çok sıkı bağlıdır. Asfaltik bitümler, prensip itibariyle hidrokarbon bileşimlerinden meydana gelmiş iseler de, bu hidrokarbonların molekül ağırlıkları ve kimyasal karakteristikleri itibariyle birbirinden farklı gruplara ayrılabilirler [23]. Bir bitümün içyapısının şekli geniş oranda, mevcut moleküler türlerin kimyasal bileşimi ile belirlenmektedir. Bitüm; hâkim durumdaki hidrokarbon moleküller (karbon, hidrojen) ile az miktarda yapısal olarak benzer heterosiklik türler (azot, kükürt) ve sülfür, nitrojen ve oksijen atomları içeren fonksiyonel grupların karmaşık bir kimyasal karışımıdır. Bitüm aynı zamanda az miktarda, inorganik tuzlar ve oksitler ya da porpirin yapıları

şeklinde ortaya çıkan kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metaller de içerir [29]. Çeşitli ham petrollerden imal edilen bitümlerin element analizi sonuçlarına göre kompozisyonları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Dört Farklı Asfaltın Kimyasal Kompozisyonu [11].

Element Adı	Asfalt Numunesi			
	A	B	C	D
Karbon (%)	83,77	85,78	82,09	86,77
Hidrojen (%)	9,91	10,19	10,45	10,93
Azot (%)	0,28	0,26	0,78	1,10
Kükürt (%)	5,25	3,41	5,43	0,99
Oksijen (%)	0,77	0,36	0,29	0,20
Vanadyum (milyonda)	180	7	1380	4
Nikel (milyonda)	22	0,40	109	6

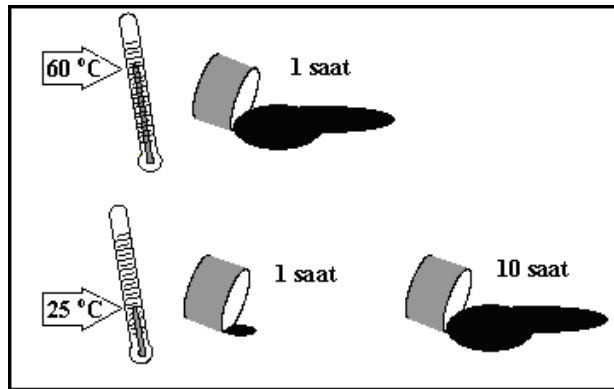
Kimyasal kompozisyonu oldukça karmaşık olan asfaltın n-heptan’da çözünen kısmına, maltenler, çözünmeyen kısmına asfaltenler adı verilen iki geniş kimyasal gurubu mevcuttur. Maltenler de ayrıca, doygunlar, aromatikler ve reçineler olarak alt guruplara ayrılır [29]. Asfaltenler, esasen karbon ve hidrojenden oluşan, n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılar olup asfaltın %5 ile %25’ini oluştururlar. Asfalten miktarının artırılması ile daha katı, daha yüksek yumuşama noktasına sahip ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bir bitüm elde edilmektedir. Reçineler, koyu kahverengi rengine, katı veya yarı katı kıvamda ve doğal elektriksel yüklere sahip (polar) olması nedeniyle asfaltlara yüksek adezyon özelliği kazandırmaktadır. Aromatikler, asfaltın %40 ile %60’ını oluşturan, asfaltenlerin yayılımı için gereken ortamı teşkil eden, koyu kahve renkli viskoz yağ şeklindeki sıvılardır. Doygunlar veya doygun hidrokarbonlar ise asfaltın %5 ile %20’sini oluşturan, saman rengi veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır [23,29,30]. Asfalt kimyaca, asfalten çekirdeği etrafında Malten adı verilen reçine ve yağ üçlüsünden oluşan kolloidal süspansiyon halindedir. Bu yapının oluşum tarzındaki kimyasal değişiklik asfaltın reolojik özelliği olan viskozitesini etkilemektedir. Bu oluşum özelliği bakımından asfaltlar, sol ve jel olmak üzere iki tipte değerlendirilmektedir. Sol tipi asfaltlarda asfaltenler, malten içinde çok iyi bir biçimde yayılıp dağılmışlardır (penetrasyon asfaltları). Jel tipi asfaltlarda asfaltenler, malten içinde çok az yayılmış, bir bakıma kümelenmiş bir yapı göstermektedir (okside asfaltlar) [23,27]. Asfaltın kimyasal yapısı ve bileşenleri Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3. Asfaltın Yapısı (a) ve Bileşenleri (b) [27]

2.2.2. Asfaltın Davranışı

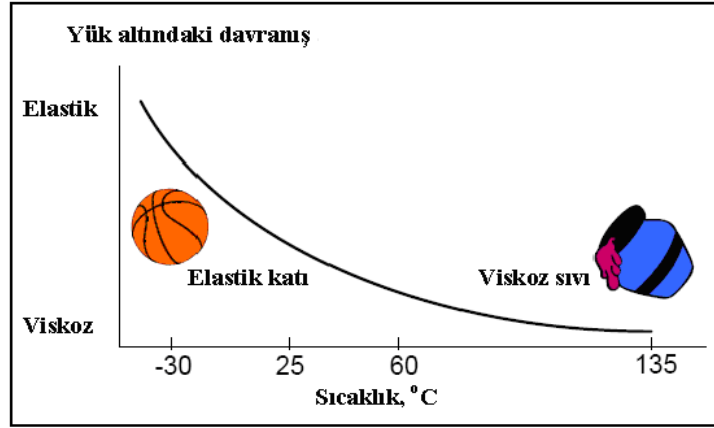
Esnek yol kaplamasının ana malzemelerinden biri olan bitüm, mühendislik davranışı bakımından visko-elastik davranış gösteren termo-plastik bir malzeme olup, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. Asfaltın davranışı sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olduğu için, aynı yük farklı sürelerde uygulandığında asfalt farklı özellikler sergileyecektir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi asfaltın 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış miktarı ile 25 °C’de 10 saatte gösterdiği akış miktarı aynı olmaktadır. Bu davranış, sıcaklık ve yükleme süresinin asfalt üzerindeki etkilerinin benzer olduğunu ifade eder. Yani, asfaltın yüksek sıcaklıkta ve kısa sürede yaptığı davranış, düşük sıcaklıkta ve daha uzun sürede yaptığı davranış ile eşdeğerdir.



Şekil 2.4. Asfaltın Farklı Sıcaklık ve Zamanlara Göre Davranışı [11,31]

Bu tür malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet,

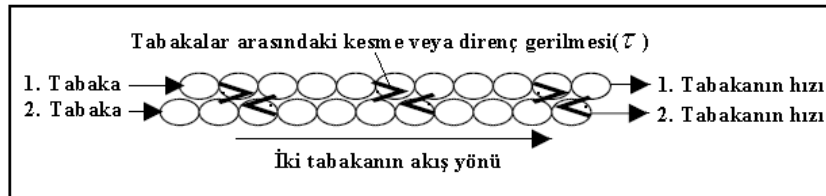
yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Şekil 2.5). Bitümün bu reolojik özelliği asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [32,33].



Şekil 2.5. Asfaltın Sıcaklık Hassasiyeti [31,34]

2.2.2.1. Yüksek Sıcaklık Davranışı

Çöl iklimi gibi sıcak koşullarda ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır araçların sebep olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda, asfalt çimentosu viskoz davranır. Bu koşullarda sıcak asfalt karışımının yük taşıyan bileşeni sadece agregadır. Viskozite, sıvının akmaya karşı dayanımını ifade eden malzemenin fiziksel özelliğidir. Eğer sıcak asfalt çimentosunun yavaş akış hareketi güçlü bir mikroskop altında incelenirse, molekül tabakalarının birbiri üzerindeki kaymaları görülebilir (Şekil 2.6). Tabakalar arasındaki kayma direnci kuvveti ya da sürtünme, birbirleri üzerinde kayan tabakaların bağlı hızı ile ilgilidir. Üstteki tabaka alttaki tabakayı ileri doğru çekmeye çalışırken alttaki tabaka üsttekini yerinde tutmaya çalışır. Direnç kuvveti ve bağlı hız arasındaki ilişki değişik sıvılar için oldukça farklılık göstermektedir [11,35].



Şekil 2.6. Asfaltın Moleküler Düzeyde Akışı [36,37]

Tabakalar arasındaki kesme (kayma) dayanımı (τ), aşağıdaki (2.1) bağıntısı ile tanımlanır [36].

$$\tau = \mu \times \tau_0 \quad (2.1)$$

μ : Viskozite katsayısı,

τ_0 : Kesme gerilmesi oranı (1.tabakanın 2.tabaka üzerinde kaydığı bağıl hız).

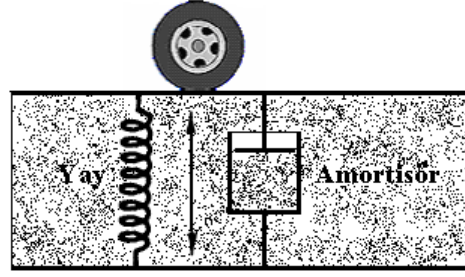
Sıcak asfalt gibi viskoz sıvılar, akmaya başladıklarında, soğuma olsa bile hiçbir zaman eski (orijinal) durumlarına gelmedikleri için plastik olarak nitelendirilirler. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda, bitümlü sıcak karışımların daha düşük stabiliteye sahip olduğunu açıklar ve tekrar eden tekerlek yükleri nedeniyle düşük stabiliteye sahip olan sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izleri oluşur. Bununla birlikte, üstyapıda oluşan tekerlek izi, bünyesindeki agrega özellikleri ile de yakından ilgilidir.

2.2.2.2. Düşük Sıcaklık Davranışı

Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, asfalt çimentosu elastik bir katı gibi davranış gösterir. Kauçuk ve benzeri elastik katılar yüklendiklerinde şekil değiştirirler, ancak üzerindeki yük kaldırıldığında önceki (orijinal) hallerine geri dönme yeteneğine sahiptirler. Bu malzemelere taşıma kapasitesinden daha fazla yükleme yapıldığında, malzeme bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Asfalt çimentosu düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı ise de aşırı yüklendiğinde kırılabilir ve çatlayabilir. Bu yüzden asfalt kaplamalarda soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Bu duruma, düşük sıcaklık nedeniyle kaplama yüzeyinin büzülme çalışmasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur [11,35].

2.2.2.3. Orta Sıcaklık Davranışı

İklim ve çevre koşulları genellikle aşırı sıcak ile aşırı soğuk arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde asfalt bağlayıcı, hem kıvamlı sıvı ve hem de elastik katı özelliklerini sergiler. Bu davranış aralığı nedeniyle asfalt, üstyapı kaplamalarında kullanmak için mükemmel bir yapışkan malzeme, ancak bir o kadar da anlaşılması ve açıklanması zor bir malzemedir. Asfalt ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin asfaltla kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkân tanıyan bir bağlayıcı veya kayganlaştırıcı gibi davranır. Soğuduğunda ise agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Asfaltın bu davranışı, yani sıcaklık ve yüke bağlı olarak hem elastik hem de viskoz özellik göstermesi, onun viskoelastik bir malzeme olması ile ilgilidir [11,35]. Asfaltın yük etkilerine karşı gösterdiği bu davranış kavramsal olarak Şekil 2.7’de gösterildiği gibi “yay-amortisör” modeliyle açıklanabilir.



Şekil 2.7. Viskoelastik Davranış ve Yay-Amortisör Modeli [11,35]

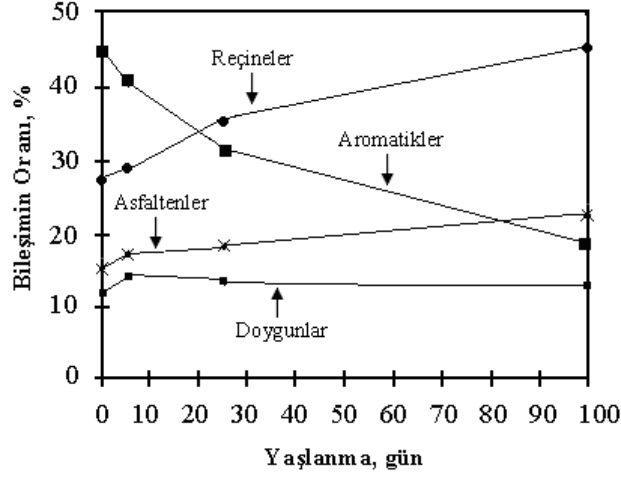
Asfalta uygulanan herhangi bir kuvvet yay ve amortisörde paralel bir tepkiye neden olur. Yük etkileyen bir bitümlü sıcak karışımda yay, asfaltın ilk elastik tepkisini, amortisör ise asfaltın özellikle daha sıcak havalardaki daha yavaş viskoz tepkisini sembolize eder. Asfalt bazı durumlarda plastik davranış gösterse de çoğu durumda yüklemelere elastik veya viskoelastik olarak tepki verir. Yani deformasyonlar, etkileyen yüklerin şiddetine göre zamanla eski durumuna gelir veya kısmen kaybolur [11,35,38].

2.2.2.4. Yaşlanma (Sertleşme) Davranışı

Bitümlü kaplama tabakalarının hizmet ömrünü bozulmadan tamamlamaları için depolama, üretim ve hizmet ömrü boyunca bitümün aşırı derecede sertleşmemesi gerekir. Organik bir malzeme olan bitüm, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışıklardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek şekilde sertleşme eğilimi göstermektedir. Birçok organik maddede olduğu gibi bitüm de hava ile temas ettiğinde yavaşça oksidasyona uğrar. Bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha az esnek yapan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağlıdır. 100°C'nin üzerindeki her 10 °C'lik artış oksitlenme veya oksidasyon oranını iki katına çıkarmaktadır. En önemli yaşlanma nedeni olan oksidasyon, asfalt çimentosunun daha kırılgan olmasını sağlar ve yaşlanma sertleşmesi sürecini başlatır. Bu sertleşme nedeniyle eski asfalt kaplamalar çatlamaya karşı daha hassas olurlar [23,29,35, 38].

Asfalt bağlayıcıdaki uçucu bileşenlerin, sıcaklık etkisi ve havayla temas ederek buharlaşması ile içindeki bileşenlerin oranları da değişmektedir. Asfalt çimentosunun 85 °C sıcaklıkta 100 günlük süre içerisinde yaşlandırılması esnasında, farklı sürelerde alınan numunelerdeki bileşenlerinin % olarak miktarları Şekil 2.8'de verilmiştir. Yaşlanma süresince, asfaltın bünyesindeki asfaltten ve reçinelerin yüzdeleri artarken, aromatikler azalmakta ve doymunlar ise yaşlanma süresince fazla etkilenmemektedir. Ayrıca bitüm, ortam sıcaklığında kaldığında fiziksel serleşme oluşur ve bu sertleşme genellikle bünyesindeki moleküllerin yeniden yerleşmelerine ve petrol mumlarının yavaş kristalleşmesine bağlıdır. Ancak, bitüm

yeniden ısıtıldığında orijinal viskozitesini tekrar kazanır. Fiziksel sertleşme daha çok 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda telaffuz edilir ve asfalt çimentolarını düşük sıcaklıklarda teste tabi tutarken dikkate alınmalıdır.



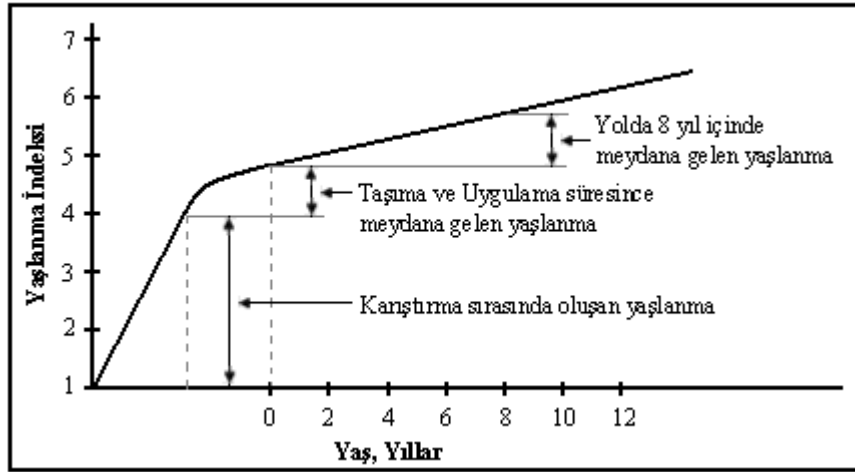
Şekil 2.8. Asfalttaki Bileşenlerin Yaşlanma Sonucunda Değişimi [39]

Uygulamada, bitüm sertleşmesinin büyük bir kısmı karıştırma sırasında ve daha az bir kısmı da sıcak depolama depolama/taşıma sırasında yani sıcak karışım yola serilmeden önce meydana gelir. Sıcak karışım tesisinde, asfalt çimentosu agregaya katılarak belirli bir süre yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Karıştırma sırasında, asfalt çimentosu agregayı 5 mikron ile 15 mikron kalınlığında ince bir tabaka halinde sarar. Bu durumda yüksek sıcaklık ve bol hava ile karşılaşan ince asfalt tabakası, oksitlenme ve uçucu bileşen kaybı için oldukça elverişlidir. Karıştırma işlemi süresince asfalt yaklaşık bir Penetrasyon sınıfı sertleşmektedir [23,29,35,38].

Bitümün sertleşmesi, aynı zamanda olumsuz koşullar altında yol üzerinde de meydana gelebilir ve bunun ana nedeni karışımın boşluk oranıdır. Hatalı veya yetersiz sıkıştırma işlemi, uygulanan kaplamalar içerisinde birbiriyle bağlantılı hava boşlukları kalmasına sebep olur ve havanın karışım içine daha fazla nüfuz etmesine izin verir. Yapılan çalışmalarda, %5'in altındaki boşluk oranlarında, hizmet aşamasında çok küçük miktarlarda sertleşme meydana geldiği ancak %9'dan yüksek boşluk oranlarında ise, asfaltın Penetrasyon değerinin 70 düzeyinden 25'in altına düştüğü tespit edilmiştir [23,29].

Kısa süreli yaşlanma olarak kabul edilen süreçte (karıştırma, depolama, taşıma ve uygulama süresinde yaşlanma) meydana gelen yaşlanma, toplam yaşlanmanın yaklaşık %70 düzeyindedir ve bu süreçte yaşlanmış asfaltın viskozitesi orijinal viskozitesine göre yaklaşık beş kat yüksektir. Ancak, uzun süreli yaşlanma olarak adlandırılan süreçte, 8 yıllık hizmet süresinden sonra oluşan yaşlanma, toplam yaşlanmanın %30'u kadardır [27,40]. Asfaltın

karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresindeki yaşlanması Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. Asfaltın Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması [23,29]

2.2.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Geleneksel Test Yöntemleri

Esnek üstyapı kaplamalarında kullanılan asfalt bağlayıcıların özelliklerini belirlemek amacıyla dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan çok sayıda geleneksel standart test yöntemleri bulunmaktadır (Tablo 2.3). Ancak, bağlayıcı ile üstyapı karışımının performansı arasındaki ilişkiyi daha doğru bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla, Amerika’da SHRP tarafından, üstün performanslı bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır.

Tablo 2.3. Geleneksel Bağlayıcı Test Yöntemleri

Test Tipi	Standart Koşullar	Referans
Penetrasyon, 0,1 mm	25 °C, 5sn, 100 gr	ASTM D5-AASHTO T49-EN 1426-TS 118
Yumuşama Noktası, °C	-	ASTM D36-EN 1427-TS 120
Fraas Kırılma Noktası, °C	-	IP 80- EN 12593
Düktilite, cm	25 °C, 5cm/dak.	ASTM D113- AASHTO T5- TS 119
Parlama Noktası, °C	-	ASTM D92-AASHTO T48-TS 123
Çözünürlük	-	ASTM D2042- AASHTO T44- TS 1090
Kinematik Viskozite, mm ² /sn	135 °C	ASTM D2170- AASHTO T201-EN 12595
Dinamik Viskozite, Pas	60 °C	ASTM D2171- AASHTO T202
Isıtma Kaybı, TFOT, ağırlıkça %	163 °C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma Kaybı, RTFOT, ağırlıkça %	163 °C, 75 dak.	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık	25 °C	TS 1087- ASTM D70

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

Yoğun gradasyonlu bir asfalt kaplama karışımının, hizmet süresince istenen performansı sağlayabilmesi amacıyla uygun bir şekilde dizayn edilebilmesi için karışımların stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma direnci, esneklik (fleksibilite), kayma direci, geçirgenlik (permeabilite) ve işlenebilirlik özelliklerine dikkat edilmelidir [20,30,41]. Bu fiziksel ve mekanik özellikleri tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışımları elde etmek günümüz şartlarında mümkün olmayabilir ancak, en uygun şartları sağlayan karışımların yapılabilmesi için bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir.

2.3.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Stabilitesi

Stabilite, asfalt kaplama karışımının, etkiyen yüklerden dolayı bünyesinde meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyma yeteneğidir. Stabilite yetersizliği olan kaplamalarda çökme, tekerlek izi ve ondülasyon gibi bozulmalar meydana gelir. Ancak, düşük stabilite kadar çok yüksek stabiliteye sahip kaplamalar da yük altında esnek davranış göstermeyerek çatlayacaklarından istenmezler. Kaplamanın stabilitesi, sıcak karışımın içsel sürtünme direncine ve kohezyonuna bağlıdır. Sıcak asfalt karışımların stabilitesine etki eden hususlar karışımın kayma mukavemeti, ısı ve karışımdaki danelerin yer değiştirmeye karşı direnci olan eylemsizlik (atalet) direnci olarak göz önüne alınır [15,28,30,41]. Sıcak asfalt karışımların kayma mukavemeti (τ) aşağıdaki (2.2) bağıntısı ile tanımlanır [30].

$$\tau = c + \sigma \tan \theta \quad (2.2)$$

Burada θ , agrega daneleri arasındaki içsel sürtünme açısı, c kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki bağ (adezyon) kuvvetini, σ ise normal gerilmeyi ifade etmektedir. İçsel sürtünme açısı agreganın yüzey dokusuna, gradasyonuna, dane şekline, karışımın yoğunluğuna ve asfalt miktarı ile tipine bağlıdır. Kohezyon ise yükleme hızı, yüklenen alan ve sıcaklıkla ters orantılı olan asfalt viskozitesinin etkisi ile doğrudan değişiklik göstermekte olup, agreganın porozluğuna, karışımdaki asfalt miktarına, asfaltın viskozluğuna ve ısisına, yükleme hızına ve filler/asfalt oranına bağlıdır [30,41]. Sonuç olarak;

- Agrega pürüzlülüğü, köşeliliği ve yoğunluğu arttıkça,
- Karışımın boşluk oranı azaldıkça ve yoğunluğu arttıkça,
- Asfaltın viskozitesi arttıkça veya katılaştıkça,
- Isı azaldıkça ve yükleme hızı arttıkça,
- Asfalt tabakası kalınlığı arttıkça, sıcak asfalt karışımların stabilitesi de artmaktadır [30].

2.3.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliği

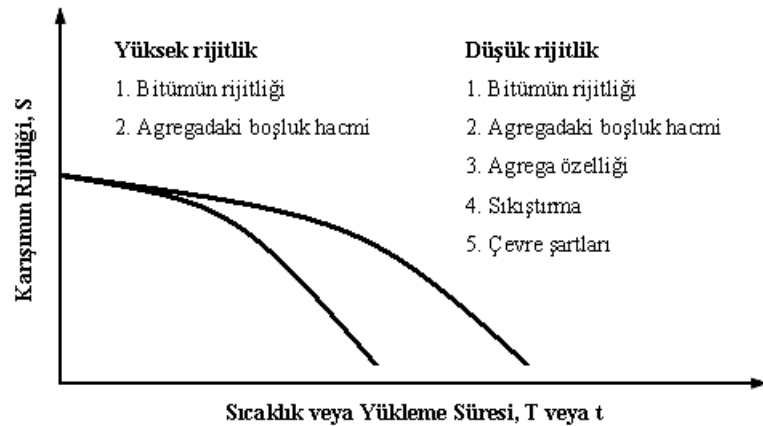
Bitümlü sıcak karışımlar, viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan dolayı mekanik özelliklerini belirlemek için “Rijitlik Modülü” kullanılmaktadır. Rijitlik modülü (R_m), elastik malzemelerin elastikiyet modülüne benzetmekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak aşağıda belirtilen (2.3) bağıntısı ile saptanır.

$$R_{m(t,i)} = \sigma / \epsilon \quad (2.3)$$

σ : Gerilme,

ϵ : Şekil değiştirme (deformasyon).

Burada i , ısı, t yükleme süresi veya hızı olup karışıma giren malzemelerin temel özellikleri ikinci derecede rol oynamaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi veya hızı ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak yükleme süresi azaldıkça veya yükleme hızı arttıkça, ısı azaldıkça, karışımın yoğunluğu arttıkça, asfaltın viskozitesi arttıkça artacaktır [30]. Bitümlü sıcak karışımın rijitliğinin sıcaklık veya yükleme süresi ile değişimi ve rijitliği etkileyen faktörler Şekil 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10. Sıcaklık veya Yükleme Süresinin bir Fonksiyonu Olarak Karışım Rijitliği [29]

2.3.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dayanıklılığı (Durabilitesi)

Bir asfalt kaplama karışımının, hava, su, sıcaklık ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koyma yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bu etkiler arasında, asfalt bünyesindeki oksidasyon ve buharlaşma gibi değişiklikler ile suyun donma çözülme etkisi dolayısıyla kaplama ve agregada üzerinde meydana gelen değişiklikler de eklenebilir. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agregada gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış geçirimsiz karışımlar sayesinde iyileşmektedir. Karışımındaki asfalt miktarının artırılması ile agregada danelerini saran ince film tabakası kalınlaşacak ve daha kalın asfalt filmler yaşanmaya

(sertleşmeye) karşı direncin artmasını sağlayacak ayrıca boşluk miktarını azaltarak karışıma hava ve su girişini zorlaştıracaktır. Ancak, daha kalın asfalt filmi tekerlek izi, deformasyon ve sıcak havalarda kuma oluşumuna yatkın olduğuna dikkat edilmelidir.

Su etkisine karşı koymak için de aynı koşullar yanında daha yoğun bir karışım kullanmak, asfaltın agregadan soyulmasına karşı daha yüksek dirence sahip olacaktır. Karışımında yetersiz oranda asfalt kullanmak, trafiğin aşındırma etkisi ile agreganın yüzeyden kopmasına sebep olacaktır. Ayrıca, sıcak karıştırma işleminde asfaltın aşırı derecede ısıtılması durumunda, yaşlanmanın etkisiyle ileriki aşamalarda asfaltın kırılğan olmasının sonucu olarak ayrışmalar ortaya çıkacaktır. Karışımın aşınması doğal olarak agreganın aşınma özelliğine de bağlı olduğundan sıcak karışımda kullanılan agreganın kırılmış, elenmiş şartı yanında, aşınmaya, soyulmaya ve ufalanmaya karşı da dirençli olması istenir [15,28,30,41].

2.3.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Mukavemeti

Yorulma, malzemenin çekme mukavemetinden daha düşük değere sahip tekrarlı gerilme altında meydana gelen kırılmadır. Yorulma mukavemeti ise, bitümlü sıcak kaplamanın tekerlek yüklerinin geçmesinden doğan tekrarlı gerilmelere karşı, kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına müsaade ederek veya esneyerek, kaplamada çatlamlar oluşmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yapılan çalışmalar bir kaplama karışımının yorulma direnci üzerinde asfalt içeriğinin çok büyük önem taşıdığını göstermiştir. Ayrıca yapılan deneyler, yoğun gradasyonlu asfalt karışımların, açık gradasyonlu karışımlara göre daha yüksek yorulma mukavemetine sahip olduklarını göstermiştir. Karışım içine, sıkıştırılmış bir kaplamada kismaya sebep olmaksızın daha yüksek asfalt içeriğine izin veren iyi derecelenmiş agregalar katılmalıdır [29,41]. Yorulma mukavemeti; kaplamanın rijitliği, yoğunluğu ile kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça, asfalt yumuşadıkça ve miktarı arttıkça artış göstermektedir [30].

Bir kaplamanın yorulma ömrünü tanımlayan genel bağıntı aşağıdaki (2.4) bağıntısı ile ifade edilmektedir [29,30].

$$N_f = K(1/\epsilon)^k \quad (2.4)$$

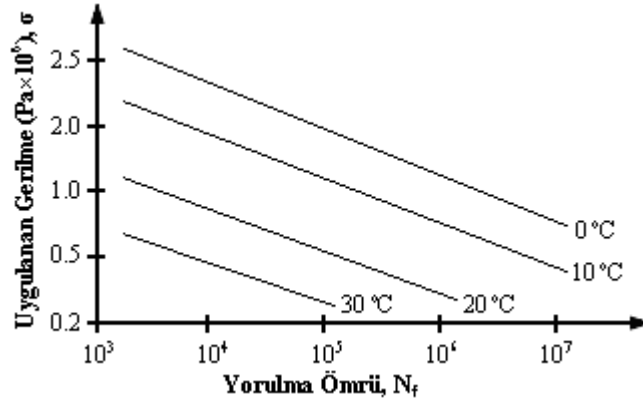
N_f : Yorulma çatlağı meydana gelmesi için gereken tekrarlı yük uygulama sayısı (yorulma ömrü)

ϵ : Uygulanan şekil değiştirmenin maksimum değeri,

K ve k : Bitümlü karışımın özelliklerine ve kompozisyonuna bağlı katsayılar.

Yorulma ömrü, genel olarak karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ve kalınlığı arttıkça ve asfalt miktarı ve yumuşaklığı arttıkça artış göstermektedir [30]. Aynı özelliklere sahip karışımların farklı sıcaklıklarda ve sabit gerilme altındaki yorulma ömürleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Çizgiler esas olarak paralel olup düşük sıcaklıklarda daha uzun yorulma ömrü

olduğunu göstermektedir. Deneylerin farklı frekanslarda gerçekleştirilmesi durumunda sonuç yine benzer çıkacaktır yani, yüksek frekanslarda yorulma ömrü artmaktadır [29].



Şekil 2.11. Karışımların Sıcaklık, Gerilme ve Yorulma Ömrü İlişkisi [29]

2.3.5. Bitümlü Sıcak Karışımların Esnekliği (Fleksibilitesi)

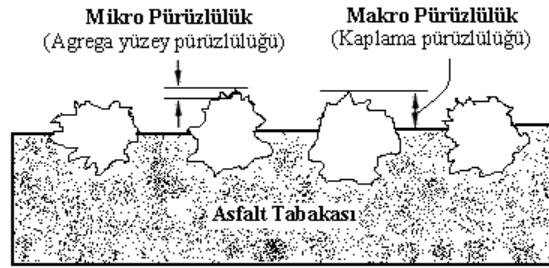
Esneklik, bitümlü sıcak karışım kaplamaların trafik ve çevre etkileriyle, çatlamadan hafifçe eğilebilme ve temel ve alttemel tabakalarının tedrici oturmalarına uyabilme yeteneğini ifade etmektedir. Genel olarak bir asfalt kaplama karışımının esnekliği, yüksek asfalt içeriği ve nispeten açık gradasyonlu veya boşluklu agregalar ile geliştirilebilmektedir. Ancak, kaplamanın esnekliğindeki artışın, stabilitesinin azalacağı anlamına geleceği de göz önünde tutulmalıdır [30,41].

2.3.6. Bitümlü Sıcak Karışımların Geçirgenliği (Permeabilitesi)

Geçirgenlik, bitümlü sıcak karışım kaplamasının içine doğru veya içinden hava ve su geçişine karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların birbiri ile bağlantısı, kaplama yüzeyindeki su, hava ve gazların geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Kaplamadaki geçirimsizliğin artması ile bünyesine giren hava ve su etkisiyle asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürleri ile kaplamada bozulmalar oluşur. Bir kaplamanın geçirimsizliği, karışımın asfalt miktarı, yoğunluğu ve sıkıştırması arttıkça boşlukları azalacağından artacaktır. Ancak, kaplamadaki stabilite gerekliliği, sıcak havalarda kuma ve trafik altında sıkışmaya müsaade etmek amacıyla bir miktar boşluk bırakmak gereklidir. Bunun yanında, karışımın içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve kaplamanın geçirgenliğini azaltarak asfaltın yaşlanmasını geciktirmek için boşluk miktarı sınırlandırılmaktadır [30,41].

2.3.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Kayma Direnci

Kayma direnci, bir asfalt kaplamasının üzerinde geçen araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurbalarda merkezkaç kuvvetinden dolayı savrulmaması için teker ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme direncini ifade eder. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agregaya ile açık ve kaba gradasyonlu karışım kullanılmasıyla artmaktadır. Asfalt kaplamaların kayma direnci Şekil 2.12’de görüldüğü gibi makro ve mikro pürüzlülüğüne bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir [30].



Şekil 2.12. Kaplama Pürüzlülüğü [30]

2.3.8. Bitümlü Sıcak Karışımların İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, karışımın serilmesi ve sıkıştırılması esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik, karışım dizayn parametrelerinde, agreganın kökeni veya gradasyonunda yapılacak değişikliklerle yükseltilebilir [28].

İşlenebilirlik genel olarak;

- Kaba agreganın miktarı ve agreganın maksimum dane boyutu arttıkça,
- Kırmataş agregası kullanıldıkça ve agreganın kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- Karışımın ısısı düştükçe,
- Asfalt katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça,
- Mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır [30].

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

Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler Tablo 2.4’de toplu halde verilmiştir.

Tablo 2.4. Bitümlü Sıcak Karışımların Temel Özelliklerine Etki Eden Parametreler [30]

Karışım Özelliği	Bağlayıcı				Agrega				Yoğunluk (Sıkışma)		Isı		Yükleme Hızı		Kaplama Kalınlığı	
	Miktar		Katılık		Yoğunluk		Agrega Tipi		Çok	Az	Çok	Az	Yüksek	Düşük	Çok	Az
	Fazla	Az	Katı	Yumuşak	Çok Yoğun	Az Yoğun	Köşeli Pürüzlü Poroz	Yuvarlak Cilalı Az poroz								
Stabilite	Opt.(1)		x		x		x		x			x	x		x	
Rijitlik	(2)		x		x		x		x			x	x		x	
Dayanıklılık	x		x		x		x		x			(4)	x		x	
Yorulma Mukavemeti	x			x	x		x		x		(6)		x		x	
Esneklik	x			x		x		x		x	x		-	-		x
Geçirgenlik	x		x		x			(5)	x			(7)	-	-	x	
Kayma Direnci		x	x			x	x		x			x	-	-	-	-
İşlenebilirlik		(3)		x		x		x	-	-	x		-	-		x

Notlar:

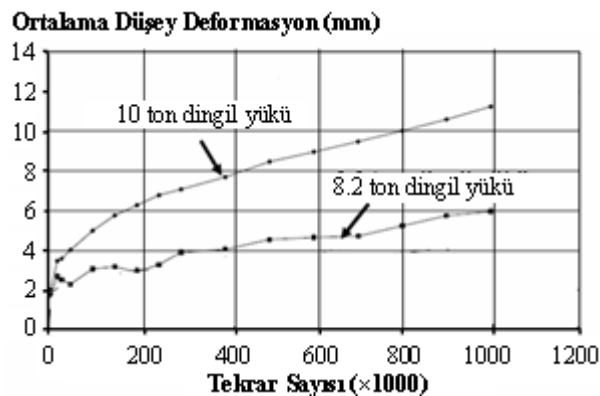
1. Asfalt yüzdesi optimum civarında ancak, optimumdan daha az ise yüksek stabilite, aksi taktirde düşük stabilite elde edilir.
2. Asfalt katı ve ısı düşük ise fazla asfalt yüzdesinde, aksi halde az asfalt yüzdesinde oluşur.
3. Genel olarak az asfalt yüzdesinde olur.
4. Isının dayanıklılık üzerindeki etkisi; Isı çok yüksek ise soyulma, ısı çok düşük ise büzülme çatlakları artar.
5. Genel olarak geçirimsizlik yoğunluk ile artar.
6. Isının yorulma mukavemeti üzerinde direkt etkisi yoktur.
7. Düşük ısıda karışımın boşluk oranı, tasarım boşluk oranı civarındadır.

2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Oluşan Bozulmalar

Bitümlü sıcak karışım kaplamalar, ilk inşa edildiklerinde çok iyi dizayn edilmiş olsalar bile trafiğe açıldıktan sonra iklim, çevre ve trafik koşulları altında belirli bir süre sonra bozulmaya başlarlar. Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenlerinin tasarım, yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçimi, iklim koşullarının ağırlığı ve denetimsiz seyreden aşırı yüklü kamyonlar olduğu gözlenmiştir. Yapılan bir araştırmada Türkiye’de kamyonların Avrupa standartlarından yarı yarıya düşük motor gücüne sahip oldukları halde, standartlarının iki katı kadar yükü trafiğe çıktıkları belirtilmektedir [42]. Çoğunlukla 8,2 ton tek dingil yüküne göre tasarlanmış ve inşa edilmiş olan yollarımızda hiçbir iyileştirme yapılmadan yasal dingil yükü 1997 tarihinde yürürlüğe giren Karayolları Trafik Yönetmeliğine göre tahriksiz tek dingilde 10 ton, tahrikli tek dingilde 11,5 tona çıkarılmıştır. Dolayısıyla karayollarımızda oluşan bozulmaların büyük bir kısmını aşırı yüklenmiş dingil yükleri oluşturmaktadır [43,44]. Farklı dingil yükleri standart dingil yüküne oranla yol esnek üstyapısına önemli zararlar verir ve bu zarar “araç zarar faktörü” veya “eşdeğerlik faktörü” olarak adlandırılır. Taşıt eşdeğerlik faktörü aşağıdaki (2.5) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [44].

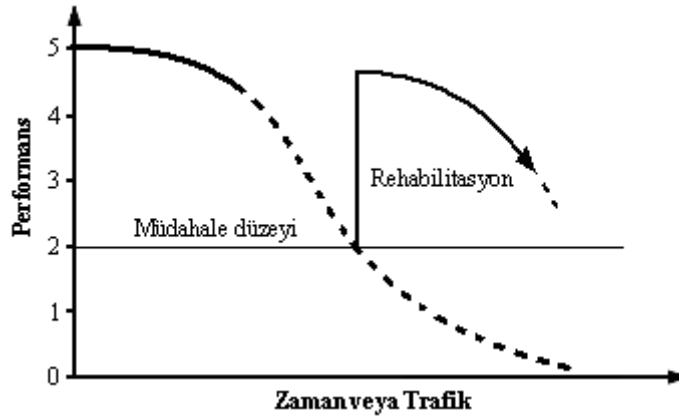
$$E.F. = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Li}{8.2} \right|^{\alpha} \quad (2.5)$$

Burada $E.F.$, taşıtın eşdeğerlik faktörü, Li dingil yükü, i taşıtın dingil sayısı ve α yol üstyapısının servis yeteneğine göre değişen bir katsayı olup ülkemiz koşulları için 4,4 olarak alınmaktadır. Bu bağıntıya göre, yoldan geçen 10 tonluk dingil yüküne sahip bir kamyonun yola verdiği zarar, $E.F. = (10/8,2)^{4,4} = 2,4$ kat daha fazla olacaktır. Buna göre, belirli sayıdaki 8,2 tonluk dingil yükü geçeceği kabulüne göre 20 yıl olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş bir yolda, aynı sayıda 10 tonluk dingil yükü geçerse yolun ömrü $20/2,4 = 8,3$ yıla düşecektir. Aşağıda Şekil 2.13’de, 8,2 tonluk dingil yükü ile 10 tonluk bir dingil yükünün bitümlü kaplama üzerinde oluşturdukları deformasyonlar görülmektedir.



Şekil 2.13. Farklı Dingil Yüklerinin Kaplamada Oluşturduğu Deformasyon [45]

Kaplamalar iklim, çevre ve trafik koşulları altında zamanla bozulmaya başlayarak periyodik bakıma ihtiyaç duyarlar ve bakım yapılmazsa hizmet veremeyecek duruma gelirler. Kaplamanın performansı, yolun yüksek hız ve hacimdeki trafiğe hizmet etme kabiliyeti olan servis yeteneği indeksi olarak da bilinir ve genellikle iyiden kötüye doğru 5 ile 0 arasında değişen bir ölçek ile belirlenir. Bir karayolunun son servis yeteneği indeksi, o üstyapının daha fazla hizmet veremeyeceği anlamına gelir ve yolun önemine göre 2 ile 3 arasında değişir. Bir yolun hizmet ömrünü uzatmanın veya ekonomik ömrü içerisinde ondan ekonomik bir şekilde faydalanmanın yolu, gerekli periyotlarla bakım yapmaktır [44]. Şekil 2.14’de bir üstyapının gelecekteki bozulma durumuna göre bakım zamanını tahmin etmek için kullanılacak performans eğrisi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.14. Üstyapı Performans Eğrisi ve Rehabilitasyon Gösterimi [44,46,47]

Asfalt kaplamalarda meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar, çatlamlar ve ayrışmalar olmak üzere, en fazla karşılaşılan bozulmalar tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklanan bozulmalardır [30,48].

2.4.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar, genel olarak stabilite yetersizliğinden kaynaklanan yapısal veya kalıcı şekil değiştirmeler olup sürüş konforu ve emniyeti bakımından önemli sakıncaları olan bozulmalardır.

2.4.1.1. Tekerlek İzi Oluşumu

Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir ve aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır [30,41,49].

- Ağır trafik yükü ve tekrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı,
- Yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt,
- Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi,
- Yuvarlak dere malzemesi,
- Yetersiz sıkıştırma.

Bitümlü sıcak karışım tabakaları, tekrarlı ağır yüklere maruz kaldıklarında bünyelerinde iki şekilde tekerlek izi oluşmaktadır. Birinci durumda tekerlek izi, Şekil 2.15’de gösterildiği gibi kaplama tabakasında meydana gelmiş ise sıcak karışımın, trafik yüklerine karşı koyacak kayma mukavemetine sahip olmaması veya plastik akma nedeniyle oluşur. Zayıf bir asfalt tabakasında, her ağır kamyon geçişiyle küçük ama kalıcı deformasyonlar oluşur ve bu deformasyonlar da karışımın aşağı ve kenarlara plastik yer değiştirmesini sağlayarak tekerlek izi oluşumuna neden olur. Plastik akma, karışımın yük altında yanıl hareketidir ve karışımında aşırı asfalt ve yuvarlak agrega bulunması ve yetersiz sıkıştırma sonucu oluşmaktadır [11,48,22].



Şekil 2.15. Zayıf Bitümlü Tabakada Tekerlek İzi Oluşumu [27,11, 22]

Tekerlek izi Şekil 2.16.’da belirtildiği gibi sadece asfalt kaplama tabakasında değil aynı zamanda kaplama altındaki tabakalarda da meydana gelmiş ise bu olay yapısal bir bozulma olarak değerlendirilir. Bu tür bozulmaların nedeni, asfalt kaplama tabakası ve alt tabakaların yetersiz kalınlıkları, temel ve alttemel tabakalarının stabilitelerinin düşüklüğü, zemin tabakasının sağladığı desteğin azlığı ve kaplamanın maruz kaldığı yüklerin büyüklükleri ve şiddetidir [27,11, 22].



Şekil 2.16. Zayıf Alt Tabakalarda Tekerlek İzi Oluşumu [27,11, 22]

Bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen tekerlek izi bozulmalarına karşı, karışımın kayma mukavemetini artırmanın yolu, karışımda yüksek içsel sürtünme direncine sahip agrega ile yüksek kaplama sıcaklıklarda daha çok elastik bir katı gibi davranan bir asfalt kullanmaktır.

2.4.1.2. Oturmalar ve Çökmeler

Oturmalar, kaplama altındaki alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların satha yansımaları olup bitümlü kaplamaya bağlı değildir. Bunlar 0,5–2 m yarıçaplı dairesel veya daireye yakın boyutta oluşur ve bitümlü tabakalar esneklikleri sayesinde genellikle çatlamadan alt tabakaların yeni kotuna intibak ederler ancak, kırılğan asfalt kaplamalarda çatlamalar görülür. Oturmaların oluşum sebepleri; yetersiz tabaka kalınlıkları, sıkıştırma hataları, yetersiz drenaj, zemin oturmaları ve imalat sorunlarıdır [23, 33, 41].

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama sathına göre alçakta kalmış, 0,5–1,5 m dairesel çapta ve derinlikleri 2–5 cm ya da daha fazla olabilen ve içlerinde su biriken küçük çukurlardır. Genel nedenleri oturma bozulmaları ile aynıdır [23,41].

2.4.1.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar) ve Kabarmalar

Ondülasyonlar, yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve belirli biçimde dalgaya benzeyen, plastik bir hareket sonucu oluşan kaplama deformasyonlarıdır. Bu tip deformasyonlar kavşaklar, otobüs durakları, tırmanma şeritleri gibi kesimlerde ondülasyon şeklinde görülür. Genel olarak düşük stabiliteli karışım, yetersiz tabaka kalınlığı, düşük viskoziteli asfalt, aşırı asfalt miktarı, rutubet miktarı, zayıf yapıştırma tabakası ve ağır taşıtların yoğun durma-kalkma hareketi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır [23, 30, 41].

Kabarmalar, genel olarak doğal zeminin veya üst tabakaların şişmesiyle kaplama tabakasının lokal olarak yukarıya doğru deplasmanıdır. Doğal zemindeki suyun donma çözülmesinden ve zeminin şişme karakterine sahip olmasından meydana gelir ve genel nedenleri ondülasyonlarla aynıdır [23,30].

2.4.2. Çatlaklar

Çatlamalar, kaplama yüzeyinde trafik, çevre ve iklimin etkisi ile çok çeşitli şekilde, genişlikte ve derinlikte oluşan kusurlardır. Çatlaklar genel olarak stabilite, yorulma ve yansıma çatlakları olarak sınıflandırılır. Stabilite çatlakları trafik yüklerinin etkisi ile kaplamanın altında oluşan çekme gerilmelerinin kaplamanın çekme mukavemetini aşması halinde tabakanın alt

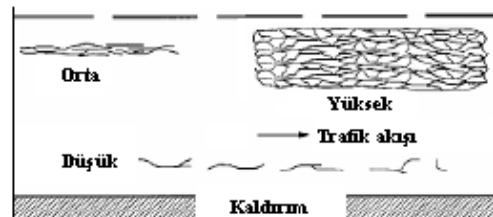
tarafında başlamakta ve zamanla kaplama yüzeyine çıkması sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.17). Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekerrürü ile kaplamanın yorulma mukavemetini aşması sonucu oluşmaktadır. Yansıma çatlakları ise bozulmuş bir kaplamanın üzerine yeniden bir kaplama yapıldığında, alttaki tabakada oluşmuş çatlakların üstteki tabakaya kadar ilerlemesidir. Stabilité, yorulma ve yansıma çatlakları genellikle trafik etkisi ile oluşurken, çevre ve iklim etkisiyle oluşan büzülme veya düşük ısı çatlakları ise trafiğin etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır [30].



Şekil 2.17. Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b) [45]

2.4.2.1. Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar)

Yorulma çatlağı, asfalt kaplamalara uygulanan tekrarlı ağır tekerlek yüklerden dolayı, çatlak oluşumuna sebebiyet verecek şekilde kaplamanın çekme gerilme dayanımının aşılması ile oluşur. Yorulma çatlağı oluşumunun ilk belirtisi, trafik yönünde aralıklı olarak boyuna tekerlek izi çatlaklarının meydana gelmesidir. Oluşan aralıklı boyuna çatlaklar zamanla birleşerek, ardından bu çatlaklar enine çatlakların oluşmasına neden olarak haliyle daha fazla çatlağın oluşumuna sebep olması nedeniyle, kaplamada artan bir bozulma türüdür. Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde ve değişik boyutta bloklar halinde kaplamanın tüm kesiminde veya belirli kesiminde oluşurlar (Şekil 2.18). Oluşan çatlaklı yapı, bünyesine su alarak trafik ve suyun hidrostatik basıncının etkisiyle sökülme ve parçalanmalar sonucu kaplama yüzeyinde yerel çukurlar oluşmaktadır [11, 30, 41, 48, 22].



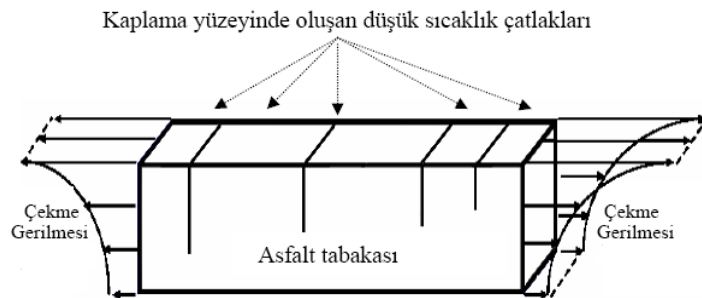
Şekil 2.18. Yorulma Çatlaklarının Dereceleri [27]

Yorulma çatlakları genellikle ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle oluşmaktadır. Ayrıca asfalt tabaka, trafik yükü altında yeterli derecede deformasyona uyabilecek biçimde değilse yani sertse, yük tekrarı ile çatlamlar oluşur. Karışımın sertliği asfaltın sertliğine bağlı olduğundan, asfaltın oksidasyon ile yaşlanması kohezyonu, bu da karışımın rijitliğini arttırarak yorulma çatlaklarının oluşmasını sağlayacaktır. Genellikle kaplamada oluşan yorulma çatlakları, kaplamanın tasarım ömrünü tamamladığının bir göstergesidir ve dolayısıyla kaplamada planlı bir iyileştirme yapılmalıdır. Çatlamlar, tasarım ömründen önce meydana gelmişse kaplamanın beklenenden daha fazla trafiğe maruz kaldığının göstergesi olabilir.

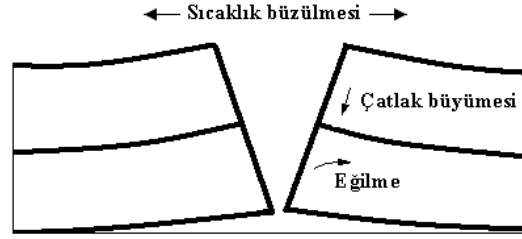
Sonuç olarak, yorulma çatlaklarını önlemek için, tasarım aşamasında ağır taşıt trafiğini doğru hesaplamak, kaplama altı tabakaları kuru tutmak, kaplama kalınlıklarını arttırmak, nemden etkilenmeyen uygun agrega kullanmak, yeterli esneklikte malzeme kullanmak ve özellikle sıcak karışımın elastik davranışı asfalta bağlı olduğundan sertliği sınırlandırılmış, yüksek elastisiteye sahip yumuşak asfalt kullanmak gerekir [11,30,48,22,50].

2.4.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, trafiğin etkilerinden çok, soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Kaplamanın enine büzülmesi boyuna büzülmesinden daha kolay olduğu için genellikle 6–9 metre aralıklarla enine oluşmaktadır. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.19’da görüldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu düşük sıcaklık çatlakları, ağır dingil yükleri nedeniyle ortaya çıkan gerilmelerle birlikte Şekil 2.20’de olduğu gibi yüzeyden başlayıp alta doğru derinleşerek inen yapısal bozulmalara yol açar [27,29,30].



Şekil 2.19. Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları [27]



Şekil 2.20. Düşük Sıcaklık Çatlağının Büyümesi [29,30]

Bu çatlakların en önemli nedeni asfaltın kıvamı ve sıcaklığa olan duyarlılığıdır. Düşük sıcaklıklarda rijit bir davranış gösteren asfalt, çekme gerilmesi altında deformasyon göstermeden kırılma gösterir. Bu sebeple soğuk bölgelerde yumuşak ve sıcaklığa az duyarlı asfalt kullanmak bu tür çatlakların azalmasını sağlar. Ayrıca, karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetlerini de dikkate almak gerekir [27,29,30].

2.4.2.3. Diğer Çatlaklar

Büzülme çatlakları; timsah sırtı çatlaklara benzemektedir ancak onlardan ayıran husus, blokların büyük, keskin açılı ve genellikle dik açılı olmalarıdır. Asfalt karışımından ya da temel veya zeminde görülen hacim değişikliklerinden kaynaklanır. Trafiğin az oluşu bu tip çatlakların oluşumunu hızlandırmaktadır [23,30,41].

Kenar çatlakları; yol eksenine paralel ve genellikle kaplama kenarından 30–50 cm içeride oluşur. Genel olarak banketin yanal desteğinin azlığı, bankette oturma, yetersiz drenaj ve don etkisi, kaplamaya yakın bitki örtüsü ve nem gibi nedenlerden oluşur [23,30].

Derz çatlakları; kaplamanın serme ve sıkıştırma esnasında ek yerlerinin sıkıştırma tekniğine uygun olmayan işçilik ve sıkıştırma yapılması halinde zamanla oluşmaktadır [30].

Kayma çatlakları; ağır taşıt tekerlerinin kaplamaya yaptıkları yatay kuvvetlerin etkisiyle tabakaların birbirine göre yanal hareketlerinden yani kaplama tabakasının temel tabakası üzerinde kayması ile oluşur. Genel olarak yetersiz yapışma tabakası, yetersiz kaplama kalınlığı, aşırı ağır taşıtlar ve karışımın kum içermesi gibi nedenlerden oluşur [23,30].

Enine çatlaklar; yol eksenine dik oluşan ve nadiren görülen çatlaklardır. Genellikle yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj, sericinin uzun süreli duraklaması, düşük sıcaklık ve alt tabakadaki çatlağın yansması gibi nedenlerle de oluşmaktadır [30].

Yansıma çatlakları; genellikle kaplama altındaki rijit ya da yarı rijit tabakalarda meydana gelmiş çatlak ve açılmaların kaplamaya yansımasıdır [23].

2.4.3. Ayırışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agregada danelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayırışmalar genel olarak yapım hataları, düşük kaliteli malzeme kullanımı, kirli ve ıslak agregada kullanımı, hatalı serim ve sıkıştırma ve yetersiz asfalt veya yetersiz adezyon gibi nedenlerden oluşur [30].

2.4.3.1. Soyulmalar

Soyulma, agregada ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon bağının zayıflamasından dolayı bitümlü sıcak karışımların zamanla yapısının bozulması olarak tarif edilir. Soyulma genellikle asfalt kaplamanın alt tabakalarından başlayıp yukarı doğru hareket eder ve agregada danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisiyle agregadan ayrılması ve dolayısıyla agregada danelerinin çıplak kalması olayıdır. Soyulmada rol alan önemli faktörler, agregada ve bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, aralarındaki etkileşimi, üstyapı tasarımı, karışım tasarımı, serim ve sıkıştırma, yüzey ve alt tabakalardaki drenaj ve trafik olarak sıralanabilir. Bu tür bozulmalarda en önemli faktör, agregada ve asfalt ara yüzeyinde su ve nemin olmasıdır. Kuru ve temiz agregada kullanımı, iyi bağlayıcılık karakteri olan asfalt, yüksek asfalt oranı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı soyulmayı azaltır.

2.4.3.2. Sökülmeler

Asfalt ve agregada arasındaki bağ eksikliğinden dolayı agregaların zamanla satıhtan koparak ayrılmasıdır. Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının parça veya tabaka halinde soyulması şeklinde meydana gelir. Sökülme, agregada danelerinin yavaş yavaş yüzeyden aşağıya doğru kopması ile oluşur. Önce ince malzemelerin kopması ile çok küçük çukurlar oluşur ve daha sonra aşındırma ile daha büyük parçalar koparak sökülmeler meydana gelir. Sökülmeler genel olarak yetersiz sıkıştırma, kirli agregada, yetersiz drenaj, soğuk ve nemli havada imalat, asfalt miktarı azlığı, ince tabaka kalınlığı ve asfaltın aşırı ısıtılması gibi nedenlerden meydana gelir. Sökülmenin üst düzeydeki göstergesi, çanak şeklinde, çapları 25 cm ile 75 cm arasında değişen ve farklı derinlikteki çukurlar şeklinde görülür [30].

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

Yol üstyapılarının tasarımından amaç, üstyapının yapım maliyeti ve hizmet süresi boyunca yapılacak bakım masraflarını minimize ederken, trafik yüklerini etkin bir şekilde dağıtabilen bir mühendislik yapısı inşa etmektir. [29].

Üstyapı tasarımında, bitümlü sıcak karışımlar için tasarım yöntemini ve tasarım koşullarını genellikle kaplama yapımından sorumlu olan kuruluşlar belirlemektedir. Bitümlü sıcak karışımların tasarımında kullanılan birçok yöntem olmasına karşın, kabul görmüş ve geliştirildikleri 1930'lu yıllardan beri günümüze kadar kullanılmış ve hala kullanılmaya devam eden Marshall ve Hveem olmak üzere iki karışım tasarım yöntemi bulunmaktadır. Karayollarında özellikle yetmişli yıllardan başlayarak artan taşıt miktarı ve dingil ağırlıkları, o ana kadar uzun ve tatminkâr performans sağlayan bitümlü karışımların, ağır dingil yükleri altında deformasyona uğraması dolayısıyla geleneksel Marshall ve Hveem tasarım yöntemlerinin günümüz gelişmiş teknolojisi paralelinde gelişen ağır trafik yüklerine maruz yollarda kullanılamayacağı görülmüştür.

Bu yüzden, günümüz trafiğinin gereksinimlerini geniş çapta yerine getirmeye çalışan, her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini sağlayan Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir.

2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

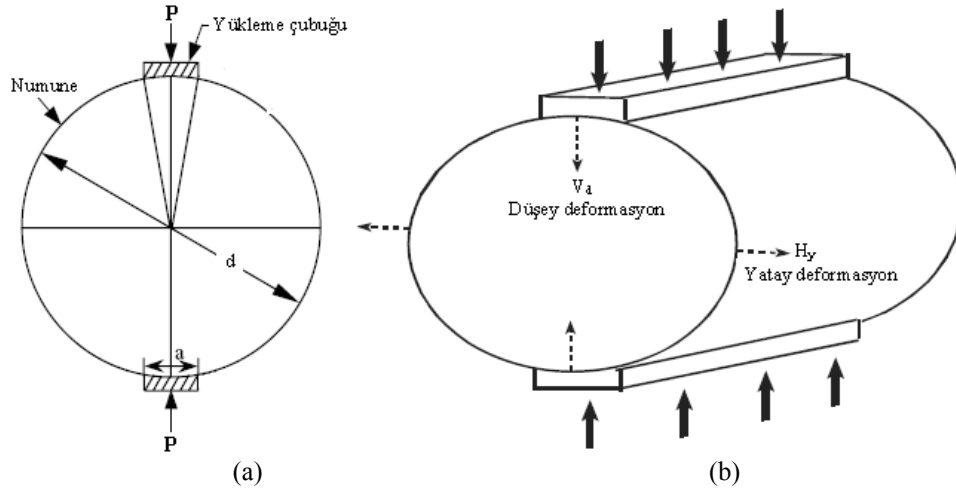
Yol üstyapısının analitik olarak tasarlanabilmesi, üstyapı tabakalarında kullanılan malzemelerin ve karışımların özelliklerinin tam olarak belirlenerek bilinmesine bağlıdır. Analitik üstyapı tasarımında, yapının analizi için gerekli olan yük-deformasyon veya gerilme-şekil değiştirme özellikleri ve malzemelerin muhtemel bozulma şekillerini ortaya çıkaran performans özellikleri olmak üzere iki grupta malzeme özelliği göz önüne alınır. En önemli performans özellikleri, bitümlü tabakalarda oluşan yorulma çatlağı ile üstyapıdaki her türlü tabakada görülen kalıcı deformasyondur [29].

Bitümün özelliğinden dolayı bitümlü karışımlar visko-elastik ve termo-plastik özellik gösterdiklerinden, laboratuvar deneylerindeki sıcaklık, yükleme süresi, gerilme durumları, sıkıştırma gibi koşullar mümkün olduğunca arazi şartlarına benzer hale getirilmelidir. Arazideki gerilme şekilleri laboratuvarda güçlkle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır.

2.6.1. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi

Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi, dinamik yükler altındaki bitümlü karışımların esnekliğini tespit etmek amacıyla kullanılan bir deneydir. Esneklik modülü, bitümlü kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve bitümlü kaplamaların en önemli performans özelliği olarak kabul edilir. Ayrıca, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonları kontrol eder [51,52]. Tek eksenli yükleme altında elde edilen esneklik modülü, genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır [23, 51].

Bu yöntemin amacı, tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuarda hazırlanmış ya da araziden alınan karot numunelerinin esneklik modülü değerini saptamaktır. Deney farklı sıcaklıklarda ve yükleme süreleri altında yapılmakta ve her bir sıcaklık ve yükleme süresi için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenmektedir [23, 52, 53]. ITSM deneyi ile esneklik modülü değerinin belirlenmesinde, numunelere yarı sinüzoidal bir formda, Şekil 2.21’de görüldüğü gibi düşey yönde basınç yükü, tekrarlı darbeler şeklinde uygulanmaktadır [23].



Şekil 2.21. Dolaylı Çekme Deneyi (a) [29,48] ve Şematik Görünüşü (b) [54]

Deney sonucunda, numuneye uygulanan dinamik yük ve bu yükün neden olduğu toplam yatay deformasyonu ölçülür ve karışım için bir poisson oranı alınarak numunenin esneklik modülü (E_m) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [55,23,48].

$$E_m = \frac{P \times (\nu + 0,2734)}{H_y \times h} \quad (2.6)$$

E_m : Esneklik modülü (Mpa),

P: Maksimum yük (N),

H_y: Toplam yatay deformasyon (mm),

h: Numune kalınlığı (mm),

v : Poisson oranı.

Karışımın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörler sıcaklık, yükleme frekansı veya hızı ve karışımın hava boşluğudur. Düşük sıcaklıklar, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli asfalt kullanımı karışımın esneklik modülünü arttırmaktadır [56].

Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm’lik numunelerin poisson oranları aşağıdaki (2.7) ve (2.8) bağıntıları ile bulunabilir [52, 57].

$$v = 3,59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \text{ (100 mm’lik numuneler için)} \quad (2.7)$$

$$v = 4,09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \text{ (150 mm’lik numuneler için)} \quad (2.8)$$

H_y: Yatay deformasyon (mm),

V_d: Düşey deformasyon (mm).

Yapılan çalışmalarda, poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5 °C için 0,25; 25 °C için 0,35; 40 °C için 0,40 değiştiği görülmüştür [52,54]. Ancak, çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde 0,35 oranının alınması tavsiye edilmektedir [56]. BS DD213 ve ASTM D4123 standartları ile belirlenen ITSM deneyi numuneye zarar vermeyen tahribatsız bir deney olması nedeniyle, bir numune ile birden fazla deney yapma imkânı vardır. Bu nedenle, numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yüklerle başlanmalıdır [23,51].

2.6.2. Statik Yükleme Sünme Modülü Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla, numune üzerine bir yük uygulayıp yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanmaktadır [29,51,58]. Sünme modülü deneyi, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerinin belirlenmesini içermekte ve karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli ya da tekerlek izinin hesaplanması ve sertliğinin tahmininde kullanılmaktadır. Bu değer ayrıca numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde

kullanılabilir. Deney, sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı içeriğinin ve sünme yükleme zamanının etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir. Sünme modülü, karışımın fiziksel özellikleriyle birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir ve ayrıca verilen bir trafik ve çevre koşulları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir [23,54,58].

Standart deney sıcaklığı 40 °C olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da deney yapılabilir [58,59]. Deney esnasında 1 saatlik bir süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel gerilme (σ) uygulanarak, deney esnasında zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Böylece numunenin ilk yüksekliği belli olduğuna göre eksenel şekil değiştirme, ϵ ve uygulanan gerilmenin bilinmesi dolayısıyla, sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olarak sertlik modülü (R_m), aşağıdaki (2.9) bağıntısı ile saptanır [23,30,59].

$$R_m = \sigma / \epsilon \quad (2.9)$$

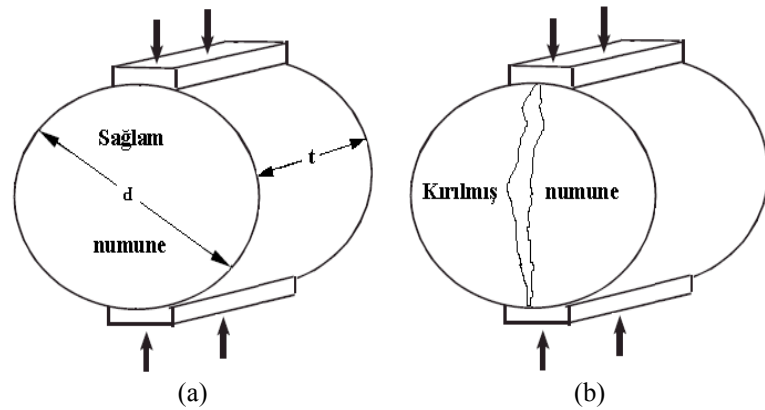
R_m : Sünme sertliği modülü (MPa),

σ : Uygulanan gerilme (MPa),

ϵ : Toplam kalıcı eksenel deformasyon (mm).

2.6.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi

Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi, Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak, silindirik asfalt numunesinin çap düzlemi doğrultusuna paralel olarak 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak AASHTO T245 veya ASTM D4123'e göre yapılır ve numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilerek numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [23,34,54,60]. Şekil 2.22'de numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu görülmektedir.



Şekil 2.22. ITS Deneyi Yükleme Durumu (a) ve Kırılma Düzlemi (b) [61]

Dolaylı çekme mukavemeti aşağıdaki (2.10) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [34,54,60,61].

$$ITS = \frac{2P_{maks}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (2.10)$$

ITS: Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

P_{maks}: Maximum yük (kN),

h: Numune yüksekliği (mm),

d: Numune çapı (mm).

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerinin saptanmasını içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Bununla birlikte, bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir [23].

ITS deneyi, yaygın olarak asfalt karışımların kohezyon kuvvetini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılabilir. Deney, karmaşık test ekipmanlarını gerekli kılmaz ve laboratuarda Marshall veya Yoğurmalı pres cihazlarıyla üretilmiş biriketlere uygulanabilmektedir. Asfalt karışımın ITS değeri, asfalt karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olarak artar ve bu yüzden bağlayıcının özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Karışım kohezyonunun bir göstergesi olan ITS değeri, karışımın orta sıcaklıklardaki stabilitesini sağlar ve durabilite ve soyulma potansiyelinde olduğu kadar tekerlek izi direnciyle ilişkili olabilir [34,54].

2.6.4. AASHTO T-283 Deneyi (Modifiye Lottman Deneyi)

Bitümlü sıcak karışımların yol kaplamasında kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla yapılan en önemli çalışmalardan birisi karışımın suya karşı hassasiyetinin ölçülmesidir. AASHTO T-283 deneyi, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi amacı ile yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Lottman tarafından 1970'li yıllarda geliştirilen deney şartları üzerinde bazı değişiklikler yapılarak modifiye edilmiş ve AASHTO tarafından standart hale getirilmiştir. Deneyle, karışımda sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybı tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, sıcak karışımların yol üzerindeki uzun dönem servis süreçlerinde, soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [62,63,64].

Sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki guruba ayrılmakta ve bu iki grup numune dolaylı çekme deneyine tabi tutularak karışımın dayanım kaybı belirlenmektedir. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının sebebi, sıcak karışım aşınma tabakaların sürekliliği için en önemli parametrelerden birinin, sıcak karışımın çekme dayanımı olmasıdır. Bu dayanımın düşük olması halinde karışım, trafik ve çevre etkileri ile oluşan çekme gerilmelerine karşı koyamayarak bozulmaktadır [27].

Deneye tabi tutulacak her test gurubu için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet numune hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri tepsilere konarak oda sıcaklığında 2 saat soğutulduktan sonra 60 °C'deki fırına yerleştirilerek 16 saat bekletilir. Sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletilen karışım numuneleri %6–8 hava boşluklarında sıkıştırılır ve 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutularak kırılır. Şartlandırılacak numunelere ise 13–67 kPa emme basıncı altında 5–10 dakika süreyle bir manometre ile vakum uygulanarak %70–80 oranında su ile doymun hale gelmesi sağlanır. Doymun hale getirilen numuneler 16 saat süreyle -18 °C'deki buzluğa yerleştirilir. Buzluktan çıkarılan numuneler 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak 25 °C'deki su banyosuna yerleştirilir ve 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur [10,64]. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin ($ITS_{yaş}$), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı aşağıdaki (2.11) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [10,59,64].

$$ITSR = \frac{ITS_{yaş}}{ITS_{kuru}} \times 100 \quad (2.11)$$

ITSR: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

$ITS_{yaş}$: Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

ITS_{kuru} : Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa).

Bitümlü sıcak karışımın su etkilerine karşı yeterli dayanımda kabul edilebilmesi için Superpave karışım dizayn metoduna göre ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir [10,22]. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması yeterli görülmektedir. Deneyde %80'den daha düşük ITSR değerine sahip sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dirence sahip olmadığı kabul edilerek karışımın suya karşı direncinin artırılması istenmektedir. Karışımın su etkilerine karşı direncinin artırılması için genellikle soyulma önleyici katkı maddeleri ilave edilmekte ve katkı kullanılarak modifiye edilen karışımlarda ise ITSR değerinin %85 değerinden az olmaması istenmektedir [10,64].

3. BİTÜM MODİFİKASYONU

İlk inşa edildiklerinde yüksek bir performansla hizmet veren bitümlü sıcak karışımlarda trafik, iklim ve çevre şartları altında zamanla kalıcı deformasyonlar, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve su etkisiyle soyulma gibi birçok bozulma meydana gelmektedir. Kaplama stabilitesini, ömrünü ve performansını, bakım-onarım maliyeti ve gereksinimini olumsuz yönde etkileyen bu bozulmalara karşı, bitümlü bağlayıcıya veya karışıma çeşitli katkı maddeleri eklenerek bitümün veya karışımın modifiye edilmesi konusundaki çalışmalar özellikle son yıllarda yoğunlaşmış olarak birçok gelişmiş ülkede sürdürülmektedir. Özellikle, 1973 yılındaki petrol krizinde olduğu gibi petrol fiyatlarındaki artış tehlikesi, trafik yüklerinde önemli artışların olması, klasik bağlayıcıların istenen düzeyde performans sağlayamaması, endüstriyel atıkların kullanılma düşüncesi ve katkı kullanma imkanı sağlayan ekipman gelişimi gibi sebepler modifikasyona duyulan ilginin artmasında etkili olmuştur [23,65]. Dünyada modifiye bitüme olan ilginin artmasına paralel olarak, farklı iklim ve coğrafya koşullarının bulunduğu bölgelere sahip olan ülkemizde de bu konuda birçok çalışma yapılmaktadır.

Bağlayıcı malzemenin ve dolayısıyla karışımın performansını arttırmak amacıyla yapılan modifikasyon işlemi, modifiye edici katkıların belirli oranlarda ve şartlarda ya doğrudan bitüm içerisine ya da karışım plentinde bitümlü karışım içerisine katılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde elde edilen bitüme “modifiye bitüm”, bitümlü sıcak karışıma ise “modifiye karışım” denilmektedir. Bitüm modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli testler uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişim veya iyileşme belirlenerek değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ancak bitümün modifiye edilmesi, özelliklerinin tespiti, taşınması ve depolanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışım modifikasyonunda ise, katkı maddesi için ek karıştırma ekipmanı, taşıma ve depolama gibi sorunlarla beraber karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin tayin edilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bağlayıcı özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha sağlıklı yapılabildiğinden, bağlayıcının modifiye edilmesi yöntemi değerlendirme ve kullanım bakımından ön plana çıkmaktadır [23].

3.1. Modifikasyonun Amacı

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile genel anlamda, yol kaplamalarının yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük hava sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve

kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca kaplamanın, yüksek trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlamlar ile su etkisiyle meydana gelen soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenen düzeyde kayma direncinin elde edilerek sürüş emniyetinin artırılması da amaçlanmaktadır. Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir [66]:

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları azaltmak,
2. Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerini azaltmak,
3. Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek,
4. Karışımların stabilitesini, mukavemetini ve yorulma direncini arttırmak,
5. Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışmasını geliştirmek,
6. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirebilmek,
7. Düşük kaliteli bağlayıcıların verimini arttırmak,
8. Agregası ve bağlayıcı arasındaki adezyon kuvvetini artırarak soyulmayı azaltmak,
9. Kusmayı ya da terlemeyi azaltmak,
10. Yaşlanmaya karşı bağlayıcının direncini arttırmak,
11. Daha ince kaplama tabakası yapılmasını mümkün kılmak,
12. Yansıma çatlaklarını geciktirmek,
13. Kaplamanın her bakımdan performansını yükseltmek,
14. Kaplamanın uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak.

3.2. Bitüm Katkı Maddeleri ve Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler

Modifikasyonda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin uygulamada etkili, uygun ve ekonomik olması bakımından sağlaması gereken koşullar aşağıda verilmiştir.

1. Kolay elde edilebilmelidirler,
2. Asfalt karışım sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidir,
3. Asfaltla homojen olarak karışabilmelidir,
4. Asfaltın yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden, yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı dirençlerini arttırmalıdır,
5. Düşük sıcaklıklarda asfaltın çok kırılğan ya da sert olmamasını sağlamalıdır,
6. Maliyetleri ekonomik olmalıdır.

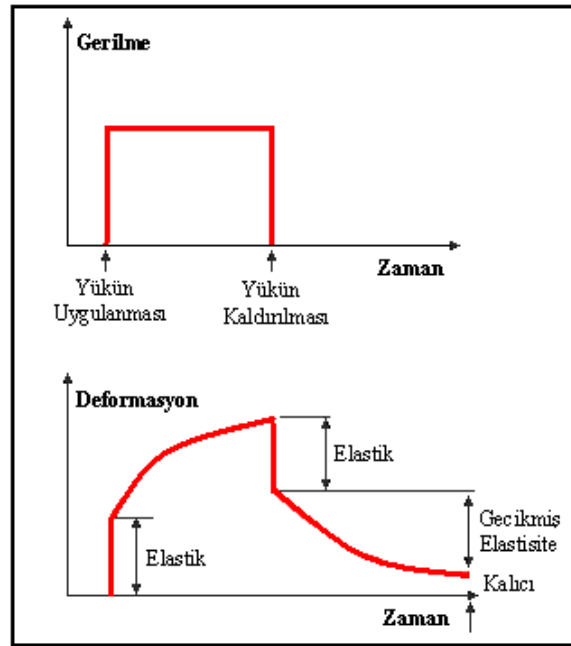
Katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenmektedir:

1. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip oldukları özellikleri korumalıdır,
2. Uygun ekipmanla işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdırlar,

3. Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalıdırlar,
4. Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidirler [20,23,29,66].

3.3. Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü

Bitüm, reolojik yapı olarak visko-elastik özellik gösterdiğinden dolayı, başta kalıcı deformasyon ve çatlamaya karşı gösterdiği direnç olmak üzere kaplama performansının birçok parametresinde büyük rol oynayarak asfalt karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Genel olarak, bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir [40,67]. Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir.

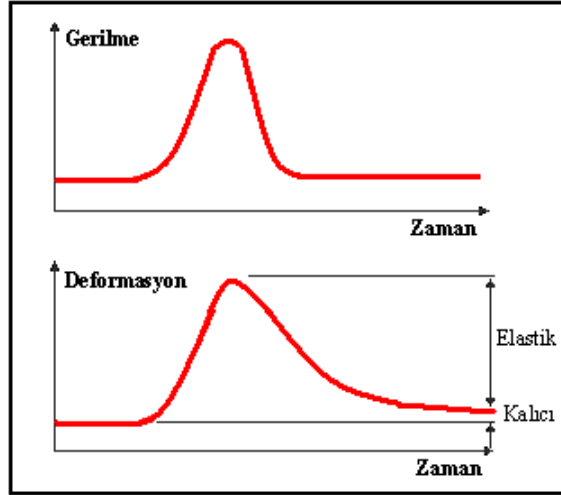


Şekil 3.1. Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı [40,67]

Şekil 3.1, bitümlü bir malzemenin statik yüklere karşı tepkisini göstermektedir. Yük uygulanmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirme, anlık bir elastik tepki şeklinde olmakta ve ardından yük ortadan kaldırılana kadar kademeli bir artış göstermektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoz özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla birlikte elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma veya geri dönüşüm meydana gelmektedir. Bu durum “gecikmiş elastisite” olarak adlandırılmakta ve sonuçta, geri

kazanılmayan ve doğrudan malzemenin viskoz davranışının sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.

Bitümlü bir malzemenin hareketli araç tekerleklerinden oluşan bir dinamik yüklemeye karşı gösterdiği tepki Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı [40]

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

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

Ayrıca bitümün elastik bileşeninin artırılması, yüksek çekme deformasyonlarının bulunduğu durumlarda büyük önem taşıyan asfalt esnekliğini de geliştirecektir [40].

3.4. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması [23]

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

Ancak, son yıllarda kullanımı oldukça artan modifiye bitümler ve modifiye karışımlar konusundaki çalışmalar ve yayınlar da, farklı tip katkı maddelerinin karşılaştırmasından katkı maddesi olarak polimerlere ilginin arttığı ve bitüm katkı maddeleri sınıflandırılırken polimerler temel alınarak, polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu biçimdeki bir sınıflandırmaya göre bitüm modifikasyon tipleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Bitüm Modifikasyon Tipleri [23,68,69]

Modifikasyon Tipleri	Örnekler
I. Polimer Olmayan Katkıyla Modifikasyon 1. Fillerler 2. Soyulma Önleyici Katkılar 3. Genleştiriciler (Ekstendenler) 4. Antioksidanlar 5. Organo-metal Bileşimleri 6. Diğerleri	Kil, Siyah Karbon, Uçucu Kül Organik Aminler ve Amidler Ligrin, Sülfür Çinko ve Kurşun Antioksidanları, Fenolikler, Aminler Organo Mangan ve Organo Kobalt Bileşimleri Organo Karbon Bileşimleri, Gilsonit, Silikon, İnorganik fiberler
II. Polimer Katkıyla Modifikasyon 1. Plastikler a. Termoplastikler b. Termosetler 2. Elastomerler a. Doğal Kauçuklar b. Yapay Elastomerler 3. İşlenmiş Kauçuklar 4. Fiberler	Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorid (PVC), Polistiren (PS), Etilen Vinil Asetat (EVA) Epoksi Reçineler Sentetik Butadien kopolimer (SBR), Stiren Butadien Stiren Kopolimer (SBS), Etilen Propilendiene Harmolimer (EPDM), İzobüten İzopren Kopolimer (IIR) Polyester, Fiberler, Polipropen Fiberler
III. Kimyasal Reaksiyon Modifikasyonu	Katkı Reaksiyonu (bitüm + monomer) Volkanizasyon (bitüm + sülfür) Nitrosyon Reaksiyonu (bitüm + nitrik asit)

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi Tablo 3.3’de, bundan ayrı olarak bitümlü karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri Tablo 3.4’de verilmektedir.

Tablo 3.3. Yaygın Olarak Kullanılan Modifiyerlerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi [23]

Modifiyer	Etkilenmiş Özellik
Yağ	Bitümün yapısı, Bağlayıcılık, Viskozite Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası
Filler Tozu	Yumuşama noktası, Viskozite, Sertlik Yoğunluk, Maliyet, Mekanik sağlamlık
Fiberler	Tiksotropik, Çatlak direnci, Viskozite
Balmumu	Viskozite (sıcak), Sertlik (soğuk) Bağlayıcılık, Adezyon
APP (Ataktik Polipropilen) EVA (Etilen Vinil Asetat)	Sertlik, Penetrasyon değeri Frass kırılma noktası, Yumuşama noktası
SBS (Stren-Butodien-Stren)	Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası Elastik geri dönüş, Düşük sıcaklık kırılabilirliği
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Islatma Ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon

Tablo 3.4. Bitümlü Karışımlarda Kimyasal Katkıların Olumlu Etkileri [23]

Kimyasal Katkıların Rolü	Kimyasal Katkıları					
	Hidrate Kil	Portland Çimentosu	Manganez Modifiyesi	Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	Sülfür	Organik Polimerler
Yaşlanma	x			x		
Nem zararını	x			x		
Agrega bağlayıcı değişikliği			x			
İşlenebilirlik	x	x	x	x	x	x
Adezyon	x	x	x	x		
Stabilite	x	x		x	x	x
Tekerlek izi	x	x	x		x	x
Soyulmaya	x		x			
Sertlik	x		x		x	

x: Olumlu etki

Günümüz asfalt endüstrisinde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş modifiyer çeşitleri ve bunların bitümlü karışımlarda kullanılması ile oluşması muhtemel ana kusurları azalttığı ispatlanan, ifade edilen veya iddia edilen sınıflandırması ve muhtemel faydaları Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Yaygın Olarak Kullanılan Asfalt Modifiyerlerin Muhtemel Olumlu Etkileri [70]

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSÇ ³	NH ⁴	Y ⁵
Fillerler	Siyah karbon	x				x
	Mineral: Sönmüş kireç	x				x
	Uçucu kül	x				
	Portland çimentosu	x				
	Kiremit tozu	x				
Genleştiriciler (Ekstendenler)	Sülfür	x	x	x		
	Odun lignini				x	
Polimerler-Elastomerler	Styrene butadiene di-block SB	x		x	x	
	Styrene butadiene triblock/radial block (SBS)	x	x	x		
	Styrene isoprene (SIS)	x				
	Styrene ethylbutylene (SEBS)					
	Styrene butadiene rubber latex SBR	x		x		
	Polychloroprene latex	x	x			
	Doğal kauçuk	x				
	Acrylonite butadiene styrene (ABS)	x				
Polimerler-Plastomerler	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polyisobutylene	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
	Polypropylene	x				
Ufalanmış kauçuk	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltenler: yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltenler	x				
	Asfaltenler: DEMEX Asfaltenler	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
	Gilsonit	x			x	
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Polyaminler				x	
	Polyamidler				x	
	Sönmüş kireç				x	
	Organo-metallikler				x	
Fiberler	Polipropilen	x	x	x		
	Polyester	x		x		
	Fiberglass					
	Çelik	x	x	x		
	Güçlendiriciler	x	x	x		
	Doğal: selüloz	x				
	Mineral	x				
Antioksidanlar	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Sönmüş kireç				x	x
	Fenollar					x
	Aminler				x	x
¹ : Kalıcı Deformasyon		⁴ : Nem Hasarı				
² : Yorulma Çatlağı		⁵ : Yaşlanma				
³ : Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

3.5. Modifiyerlerin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanımı

Günümüzde bitümlü bağlayıcı veya karışımların modifikasyonu için çok çeşitli katkı maddeleri üretilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle 1970’li yıllardan sonra yapılan birçok araştırma bitüme, bitümle uyumlu bazı katkı maddelerinin eklenmesinin bitümün reolojik davranışını etkilediğini, özelliklerini iyileştirdiğini ve bitüme üstün özellikler kazandırdığını, dolayısıyla bitümlü karışımların performans özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur.

Bitümlü sıcak karışımların bünyesinde trafik ve iklim etkileriyle oluşan tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlağı, yorulma çatlağı, yaşlanma ve nem hasarı gibi kusurlar en yaygın olarak görülen bozulmalardır [71,72,73,74]. Bu bozulmaları engellemek veya geciktirmek amacıyla asfalt modifikasyonunda daha iyi performans göstermeleri sebebiyle çok yaygın olarak polimer gurubu malzemeler kullanılmaktadır [68,75]. Birçok farklı katkı maddesi olmasına rağmen modifikasyon için en ümit veren polimer modifiyerlerdir ancak asfalt modifikasyonu için polimerlerin yalnızca bir kısmı uygundur [76]. Polimerler kendi aralarında plastikler, elastomerler, işlenmiş kauçuk ve fiberler olmak üzere dört ana guruba ayrılırken plastikler; termoplastikler ve termosetler, elastomerler ise doğal ve yapay kauçuk olmak üzere iki alt guruba ayrılmaktadır [68,5]. Termoset malzemeler; epoksi reçineler, üre formaldehit, melamin formaldehit, fenol formaldehit ve doymamış polyester reçineler olmak üzere sınıflandırılmaktadır [77]. Yapılan çeşitli çalışmalarda polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) gibi termoplastik malzemeler bitüm modifikasyonunda denenmiş ve normal servis sıcaklığında bitümün sertliğini ve viskozitesini arttırdıkları belirlenmiştir [40,78,79,80]. Charrier, elastomer bir malzeme olan styrene-butadiene-rubber (SBR) üzerinde yaptığı çalışmalarda bu malzemenin düşük servis sıcaklıklarında bağlayıcının rijitliğini veya sertliğini arttırmadan elastik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca SBR ile yapılan birçok bitüm modifikasyon çalışmasında, düşük servis sıcaklıklarında karışımın tekerlek izi ve kırılma direncinde artış olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, atık tekerlekten elde edilen kauçuk kullanılarak yapılan modifikasyon çalışmalarında, karışımın yüksek servis sıcaklıklarında plastik deformasyona karşı direncinin ve düşük servis sıcaklıklarında ise kaplamanın kırılma direncinin arttığı görülmüştür [69]. Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimerleri kullanılarak yapılan birçok çalışma sonucunda SBS’nin bitümün rijitliğini arttırmasına rağmen düşük servis sıcaklıklarında çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımını arttırdığı belirlenmiştir [81,82,83]. Oregon Üniversitesinde yapılan bir çalışmada, bitüm içerisine EVA, SB ve SBR polimerleri katılarak asfalt bağlayıcının dayanımı ve maliyete etkisi araştırılmış, araştırmanın sonucunda bağlayıcı özelliklerinin iyileşerek performansının arttığı, dolayısıyla

performansı artmış bir bağlayıcı ile ekonomik kazancın sağlanacağı belirtilmiştir [84]. Murphy ve arkadaşları tarafından polietilen (PE), polipropilen (PP) ve kauçuk gibi geri kazanılmış polimerler ile bağlayıcı ve karışım modifikasyonu yapılmış ve bu katkıların bağlayıcının reolojisini olumlu etkilediğini, karışımın ise tekerlek izi direncini arttırdığını tespit etmişlerdir [85]. Larry, geri kazanılmış polietilen kullanılarak yapılan modifikasyonlarda, asfalt karışım kaplamada daha az kalıcı deformasyon ve düşük sıcaklık çatlağı oluştuğunu belirtmektedir [86]. İqbal tarafından düşük yoğunluklu polietilen (PE), etil-vinil-asetat (EVA) ve akrilat polimerler kullanılarak yapılan bir çalışmanın sonucunda, asfaltın reolojik özelliklerinin iyileştiği, EVA ve akrilat polimerler kullanıldığında sıcaklık hassasiyetinde azalma olduğu, özellikle EVA'nın asfaltı sertleştirdiği ve akrilat polimerlerin yüksek sıcaklıklarda PE'den daha sert olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu maddeler özellikle PE, asfalt modifikasyonunda kullanıldıkları zaman iyi depolama stabilitesine sahip oldukları tespit edilmiştir. Aynı maddelerin karışımda kullanılması durumunda PE'nin tekerlek izi direncinin düşük olduğu, en iyi tekerlek izi direncine sahip karışımın ise akrilat polimer kullanılan karışımlar olduğu görülmüştür [75]. Panda ve arkadaşları, EVA kullanılarak yaptıkları bir çalışmada karışımın akma değerinde azalma ancak stabilitesinde ise bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca geri kazanılmış polietilen ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların katkısız olanlara göre yorulma ömrünün 2-3 kat arttığı görülmüştür [87]. Brule ve arkadaşları, SBS, SEBS, SBR ve elvaloy ile birlikte kullandıkları polimer maddelerinin asfalt betonu karışımın yorulma ve düşük sıcaklık çatlağı ile soyulma direncini arttırdığını belirtmişlerdir [88]. Kuloğlu ve ekibi tarafından yapılan bir çalışmada, atık plastik poşet ve plastik şişe malzemeleri küçük boyutlarda kesilerek agrega karışımına ilave edilmiş ve karışımlar hazırlanarak Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Modifiye karışımın akma değerinde azalma olduğu ancak stabilite değerinin yükseldiği, ayrıca atık malzemelerin kullanılması ile bağlayıcıdan tasarruf sağlandığı görülmüştür [89]. Salab ve arkadaşları, polietilen (PE) ve düşük yoğunluklu polipropilen (PP) içeren geri kazanılmış plastiklerin asfalt karışımlarda kullanılabileceğini ve bu karışımların modifiye edilmemiş karışımlardan daha iyi durabiliteye ve yorulma ömrüne sahip olduklarını belirtmektedir [90]. Zoorob ve Suparma, geri kazanılmış plastikleri karışımdaki agrega yerine kullanarak yaptıkları çalışmada, taşıma maliyeti bakımından önemli olan karışım yoğunluğunun azalmasına rağmen stabilitesinde %250 oranında artış meydana gelmiştir [51].

Bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla polimer esaslı malzemelerle birlikte, modifikasyonda farklı özelliklerdeki doğal ve yapay malzemeler de kullanılmaktadır. Kerh, sıcak karışımda mineral filler malzemesi olarak kaya tozu ile farklı oranlarda kireç ve çimento kullanarak oluşturduğu karışımların mekanik özelliklerini incelemiş, sonuç olarak filler malzemesi olan kaya tozuna belirli miktarda kireç

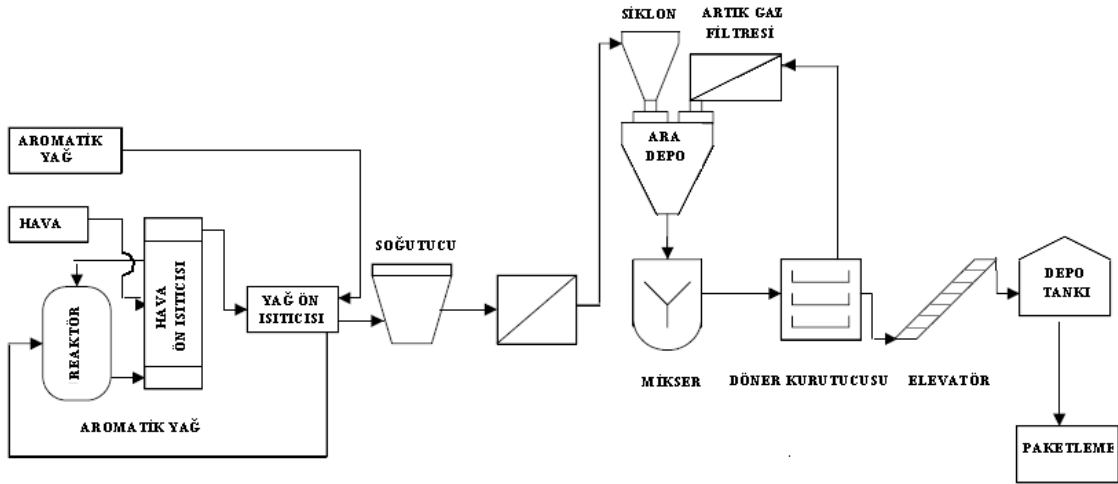
ilavesinin karışımın soyulma direncini ve stabilitesini arttırdığını, tekerlek izi oluşumunu azalttığını tespit etmiştir [91]. Mineral filler olarak uçucu kül, kaya tozu ve çimento kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar Marshall deneyine tabi tutulmuş ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan karışımların stabilite değeri daha yüksek elde edilmiştir [92]. Tyson, bitümlü sıcak karışımlarda kömür tozunun mineral filler malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir [93]. Kuloğlu, asfalt çimentosuna belirli oranlarda Astragalus (kitre zambkı) ilave ederek sıcak karışımlar hazırlamış ve hazırladığı karışımları Marshall deneyine tabi tutarak özelliklerini incelemiştir. Çalışmada %2 astragalus ilavesinin katkısız numunelere göre stabilite değerini %59 oranında arttırdığı görülmüştür [94]. Yapılan bir çalışmada, lastik atıkları kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışımlardan elde edilen serbest basınç değerleri, lastik ilave edilerek hazırlanan asfalt betonu karışımların tokluk ve elastiklik özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir [95]. Serfass ve Samanos, çeşitli fiber maddeleri kullanarak fiber modifiyeli asfaltın etkilerini incelemiş ve sonuç olarak modifiye edilmiş karışımların katkısız karışımlara göre yorulma, yaşlanma, nem hasarına karşı dayanım ve kırılma direncinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [96]. Simpson ve arkadaşları, polipropilen fiber içeren karışımların dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve çatlak direncinin daha yüksek çıktığını bulmuşlardır [97].

3.6. Siyah Karbon, Üretimi ve Kullanım Alanları

Siyah karbon (SK), gaz veya sıvı haldeki karbonlu hidrojenlerden kısmi yanma veya termik parçalanma veya her iki türlü elde edilen ince dağılmış, yapısal olarak grafit benzeyen karbon tanelerine denilmektedir. Halk dilinde “is karası” olarak da bilinmektedir [98]. İs karası, karbonlu katılar veya sıvıların tam olmayan yanmaları suretiyle oluşan “kurum” veya “is”ten ibarettir. Pigment ticaretinde is karası, yerini birçok ülkede üstün renk özelliği ve boyama kalitesi olan siyah karbona bırakmıştır. Hidrokarbonların tam olmayan yakımları suretiyle üretilen siyah karbon ve is karası kimyasal bakımdan benzerdir ve %98–99 veya daha fazla karbon içerirler, ancak fiziksel şekilleri bakımından büyük farklılıklar gösterirler. Siyah karbon genel olarak çok ince taneli, gözenekli olmayan tipteki karbonlu materyalden ibarettir ve tam kontrollü pirolitik bir petrokimyasal proses ile üretilir [99].

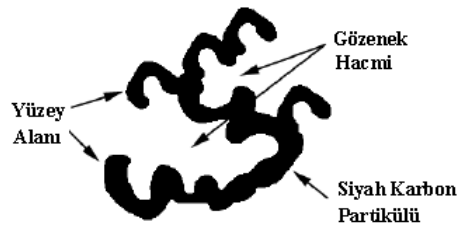
Siyah karbon üretiminde petrol yağları, doğal gaz, sıvılaştırılmış petrol gazları, doğal benzin, fuel-oil veya kalıntı petrol yağları kullanılmaktadır. Üretim, bu hammaddelerin sınırlı miktardaki hava (tam yanması için gerekenin yarısı) ile farklı yöntemler kullanılarak yakımları suretiyle yapılmaktadır. Siyah karbon üretimi için, üç tanesi kısmi yanma tipi (kanal prosesi, yağ fırın veya gaz fırın prosesleri) ve biri de parçalanma tipi (termik prosesi) olmak üzere başlıca dört siyah karbon prosesi bulunmaktadır [99]. Dünyada siyah karbon üretiminde

%85 oranında fırın yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde hammadde olarak aromatik yağ kullanılmakta olup, proseste ana sistemler olarak sırasıyla reaktörler, filtrasyon, pelletleme, kurutma, depolama ve paketleme yer alır. Reaktörler (fırınlr), aromatik yağın kısıtlı miktarda hava ile yakılması sonucu siyah karbon üretiminin gerçekleştirildiği prosesin en önemli ekipmanlarıdır. Bu prosese ait akım şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Siyah Karbon Fabrikası Proses Akım Şeması [98]

Reaktörlerdeki yakma bölümü 1100–1650 °C gibi yüksek bir sıcaklık, 0,07–0,2 kg/cm² gibi düşük bir basınç ve mikro saniyelerle ifade edilebilecek kısa bir reaksiyon süresi ile karakterize edilir. Reaktörlerden çıkan siyah karbon ve sıcak yanma gazları ısı değiştiricilerden geçerek filtrasyon sistemine girer. Filtrasyon sisteminde sıcak yanma gazlarından ayrılan siyah karbon çok ince toz halindedir ve prosesin bundan sonraki kısımları ürünü uygun bir şekilde depolama, paketleme ve kullanma işlemlerine yardımcı kısımlardır. Gevşek ve hafif siyah karbon, tozlanma durumunun azaltılması ve taşıma kolaylığı için pelletleme adı verilen büyük tanecikler haline getirilir. Pelletleme, toz halindeki siyah karbonun pelletizör ekipmanında bağlayıcı bir madde olan melas ve su ile yuvarlak taneler (pelletler) haline getirmektir [98,99]. Yuvarlak tane şekline getirilmiş siyah karbonun mikroskop altındaki görünümü Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Siyah Karbonun Fiziksel Yapısı [100,101]

Siyah karbon parçacıkları çoğunlukla küresel biçimlidir ve grafitten daha az düzenli bir kristal yapısına sahiptir ve çok ince taneli maddeler arasında, elde edildikleri işleme bağlı olarak tane boyutları en çok çeşitlilik gösteren maddelerdir [102]. Tanecik büyüklüğü ve yapısı, çok hassas bir şekilde, püskürtücü dizaynı, reaksiyon odasının geometrisi, sıcaklık, kalış süresi ve gaz çevrintisinin şiddeti ile ilişkili olarak kontrol edilir [99].

Siyah karbonlar, yapılarına göre sert türler (HAF, ISAF) ve yumuşak türler (FEF, GPF) olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Türler göre genel özellikler Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Siyah Karbon Türlerinin Özellikleri [98]

Tür	Özellik
HAF (High Abrasion Furnace) (Yüksek Aşınma Fırın)	1. Aşınmaya dayanıklı bir fırın siyahı türüdür, 2. Tane yapısı normal ve küçüktür, 3. Bükülme ve deformasyona karşı çok iyi mukavemet vermekle kauçuğun gerilimi ve kopma direncini artırır, 4. Lastik içerisinde ısı birikmemesine yardımcı olur.
ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace) (Orta Seviye Süper Aşınma Fırın)	1. Aşınmaya karşı çok dayanıklıdır, 2. Normal yapılı ve tanecikleri çok küçüktür, 3. Kauçuğun gerilim ve kopma direncini artırır.
FEF (Fast Extrusion Furnace) (Hızlı Gönderme Fırın)	1. Aşınmaya dayanıklı olup süratli ekstrüzyon sağlar, 2. Yapı bakımından normal ve taneleri orta büyüklüktedir.
GPF (General Purpose Furnace) (Genel Amaçlı Fırın)	1. Genel maksatlar için kullanılan bir türdür, 2. Normal tane büyüklüğüne sahiptir, 3. İşlenmesi kolaydır.

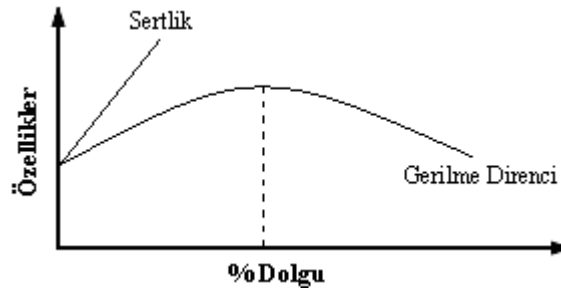
Siyah karbonlar partikül büyüklüklerine ve yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. Partikül büyüklüklerine sınıflandırma aynı zamanda aktivite değişimini de karakterize eder. ASTM’nin partikül büyüklüğüne göre siyah karbon sınıflandırması Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Siyah Karbonun Partikül Büyüklüğüne Göre Sınıflandırılması [102]

Siyah Karbon Tipi	Partikül Büyüklüğü (n _μ)	Numaralandırma
SAF	11–19	110
ISAF	20–25	220
HAF	26–30	330
FEF	40–48	550
GPF	49–60	660
SRF	61–100	770

Siyah karbon, başta araç lastiği olmak üzere, kauçuk eşya, konveyör bandı, taşıyıcı bant, hortum, plastik boru, boya, paspas, oto yedek parça, plastik, topuk ve taban lastiği, mürekkep, daktilo şeridi, toner, siyah kağıt, karbon kağıdı gibi değişik sanayi kollarında hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [98,99,102,103,104,105,106]. Ayrıca, yarı iletken bir

malzeme olan siyah karbon, elektrik ve özellikle elektronik endüstrisinde elektrik kablosu, pil, elektronik malzeme, telefon ve iletken polimer malzeme üretiminde de kullanılmaktadır [106,107,108,109]. Güçlendirici dolgu maddesi olarak kullanıldıkları malzemelerin korozyon ve aşınmaya karşı direncini çok arttırmaktadır [102]. Dünyadaki yıllık toplam üretimi 7×10^6 tonu geçen siyah karbonun yaklaşık %90 kadarı kauçuk ürünlerinde özellikle taşıt lastiklerinde, ayakkabı kauçuğu, ökçesi ve tabanlarında ve ayrıca mekanikte kullanılan kauçuk eşyalarda aşınmaya karşı dayanıklılık vermek amacıyla kullanılır. Üretimin kalan %10'luk kısmı diğer endüstri dallarında kullanılmaktadır [99,106]. Modern oto lastiklerinde kullanılan kauçuk maddelerinde ağırlıkça %35 kadar siyah karbon bulunmaktadır [99]. Standart bir otomobil lastiğinin ağırlığının yaklaşık dörtte biri siyah karbondur [102]. Siyah karbon kullanılmadan üretilen bir otomobil lastiği yaklaşık 1000 mil yol alabiliyorken, üretiminde siyah karbon kullanılması ile günümüzde bu değer 40 katlık bir artış göstermiştir [106]. Araç lastiklerinde kullanılan kauçuk miktarı ağırlık olarak yaklaşık %80 olduğundan siyah karbonun en büyük kullanım alanının kauçuk endüstrisi olduğu görülmektedir [110]. Siyah karbonun kauçukla karıştırılmasının nedeni, kullanma ömrünü uzatmak, özellikle eskime ve aşınmaya karşı mukavemet sağlamak, aynı zamanda güneş ışığının bozulmayı arttıran etkisine karşı koruyuculuk sağlamaktır. Siyah karbon, gerçekte bütün kauçukların kopma dayanıklılığında görülebilir bir kayıp olmaksızın sertliği artırır. Siyah karbon katılan bileşimlerin sertliğinin artması sebebiyle ilave miktarının belirli bir limiti aşmaması gerekir [102]. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi malzeme sertliği siyah karbon ilavesiyle lineer olarak artmaktadır. Diğer yandan gerilme direnci belirli bir miktardan sonra azalmaktadır.



Şekil 3.5. Siyah Karbon İlavesiyle Malzeme Özelliklerinin Değişimi [102]

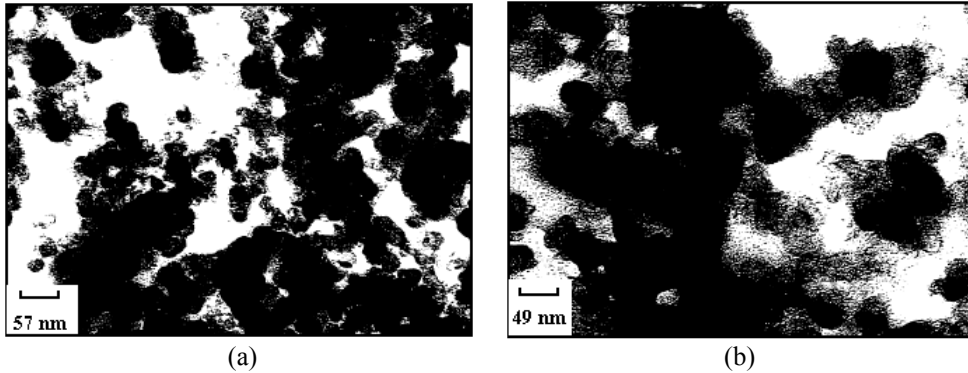
Siyah karbon, Türkiye’de bu sektörün tek üreticisi olan PETKİM Petrokimya Holding A.Ş.’nin yıllık 40000 ton üretim kapasitesine sahip Yarımca Petrokimya Kompleksi Karbon Siyahı Fabrikası tarafından üretilmektedir. Yarımca Petrokimya Kompleksi tarafından fırın proses yöntemi ile üretilen ticari siyah karbon ürün özellikleri aşağıdaki Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Siyah Karbon Türleri ve Ürün Özellikleri [98]

Özellik	Ürün Türü				Test Metodu
	HAF	ISAF	FEF	GPF	
İyod Miktarı (mg/g)	77–87	116–126	38–48	31–41	ASTM D-1510
DBP Absorpsiyonu (ml/100g)	96–108	109–119	114–126	85–95	ASTM D-1514
Toz (maks. % Ağırlık)	9	9	12	12	ASTM D-1508
Nem (maks. % Ağırlık)	1.5	1.5	1	1	ASTM D-1509
Optik Geçirgenlik (min. %)	85	80	85	80	ASTM D-1618
% 300 Modülüs (kg/cm ²)	(-5)-(+25)	(+4)-(+30)	(+4)-(+30)	(-13)-(+11)	ASTM D-3192

Siyah karbonun kalitesi, onun mikro yapısına, yüzey alanı ve partikül büyüklüğüne bağlıdır ve genellikle küçük partikül ve geniş yüzey alanına sahip siyah karbonlar yüksek kaliteli olarak bilinir. Benzer şekilde siyah karbonun yağ emme gücü olan DBP (Di Butil Phatalete) değeri arttıkça kalitesi yükselir [102,105].

Dünyada üretimi yapılan ve kullanılan 40 farklı tipteki ticari siyah karbonun yanında ayrıca gelişmiş birçok ülkede atık (hurda) araç lastiklerinin “Piroliz İşlemi” denilen çeşitli ısı işlemlere (600-900°C) tabi tutulması ile elde edilen “Piroliz Siyah Karbon (PSK)” adı verilen siyah karbon’da kullanılmaktadır [105,106]. Her iki maddenin TEM mikrografı ile çekilmiş resimleri incelendiğinde piroliz siyah karbonun şeklinin ticari siyah karbona benzediği görülmektedir (Şekil 3.6).

**Şekil 3.6.** Piroliz (a) ve Ticari (b) Siyah Karbonun TEM Mikrografı [106]

Gelişmiş ülkelerde oluşan yıllık atık lastik hacminin ülke nüfusu kadar olduğu kabul edilmektedir. Örneğin 70 milyon nüfuslu bir ülkede yıllık oluşan atık araba lastiği hacmi, 70 milyon binek araba lastiği kadardır. Bir lastiğin yaklaşık 10 kg geldiği varsayılırsa, atık lastik hacmi yıllık 700000 ton olacaktır [111]. Birçok ülkede atık lastikler yeniden kaplama, granüle hale getirilerek geri kazanma ve kömürden daha fazla ısı değere sahip olmaları sebebiyle enerji elde etme gibi şekillerde ekonomiye kazandırılmaktadır [112,113]. Son yıllarda atık lastiklerin

geri kazanımı piroliz işlemi ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Piroliz işleminde hiçbir kimyasal katkı maddesi kullanılmaz ve geriye hiçbir atık bırakılmadan %100 lastik geri dönüşümü sağlanır, ayrıca elde edilen ürünlerin tamamı piyasa değeri olan sanayi hammaddeleridir. Piroliz işlemi ile geri kazanılan temel madde siyah karbondur. Geri kazanım işlemi sonucunda işleme giren lastiğin cinsine göre lastik miktarının %35–42 kadarı siyah karbon olarak geri kazanılır [103]. Roy ve arkadaşları, hurda lastik geri dönüşümü için lastik üzerinde gerçekleştirdikleri piroliz işleminin sonucunda kazanım olarak yaklaşık %25 siyah karbon, %55 yağ, %9 çelik, %6 gaz ve %5 fiber elde etmişlerdir [114]. Genel olarak tipik bir piroliz işlemi sonucunda ağırlıkça %33–38 piroliz siyah karbon, %38–55 yağ ve %10–30 gaz elde edilmektedir. Tipik piroliz işleminde ürün elde edilmesi sıcaklık ve ısıtma hızına bağlı olarak değişiklik gösterir [106]. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen piroliz siyah karbon, minimum %75 siyah karbon, minimum %12 butadin kopolimer (nitril kauçuk), % 4 sülfür ve maksimum % 9 oranında kül içermektedir [105].

3.6.1. Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Modifikasyonunda Kullanımı

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan mineral filler malzemesinin özellikleri, onun asfalt betonunun performansını geliştirmedeki potansiyelini tespit etmek, özelliklede sıcak karışımın stabilitesini ve durabilitesini arttırarak, ötelenme ve tekerlek izi oluşumu ile ilgili sorunları azaltmak için sürekli araştırılmıştır. Bitümlü sıcak karışımlarda belirli mineral filler malzemesinin kullanımı, asfalt betonundaki rijitlik ve gerilme artışı için uygun bir değer artışı sağlar [115]. Sıcak karışımlarda filler malzemesi olarak genellikle taş tozu, Portland çimentosu, sönmüş kireç, uçucu kül ve siyah karbon gibi ince daneli malzemeler kullanılmaktadır. Bu maddelerin, özellikle de siyah karbon kullanılması karışımın durabilitesi, aşınma direnci ve sıcaklık hassasiyeti için faydalı olduğu belirtilmektedir [116,69].

Siyah karbonun bitümlü kaplama karışımların performansını geliştirmek amacıyla bir katkı maddesi olarak kullanılması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda siyah karbonun, yapısı itibarıyla tekerlek izi direncini geliştireceği, sıcaklık hassasiyetini azaltacağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını düşüreceği planlanmıştır.

Siyah karbonun asfalt için bir güçlendirici eleman olarak kullanılması fikri ilk kez, siyah karbonun özelliklerini ve bir asfalt ilavesi olarak potansiyel avantajlarını tanımlayan Allioti tarafından 1962 yılında dile getirilmiştir [105]. Siyah karbonun asfalt karışımlar için güçlendirici bir eleman olabileceği düşüncesiyle ilk laboratuvar çalışması Martin tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Martin, asfalt ağırlığına göre %3 oranında siyah karbon kullanarak deneysel çalışmalar yapmıştır. Martin'in test sonuçları, uygun viskozite elde etmek için siyah

karbona ilave edilen akıcı yağın asfaltla uyumsuzluğu, düşük siyah karbon konsantrasyonu ve asfalt içerisindeki kötü dağılımından dolayı asfaltın performansı üzerinde herhangi bir gelişme göstermemiştir [117].

Siyah karbonun bir asfalt güçlendirici katkı malzemesi olarak kullanımını sağlamak amacıyla, Amerika Federal Karayolu İdaresi (FHWA), 1968 den 1972 yılına kadar çalışmalara destek vermiştir. Bu amaçla Oakland ve California’da yürütülen malzeme ve laboratuvar çalışmalarının sonuçlarına göre asfalt çimentosunda ağırlıkça %11–16 siyah karbon kullanılmasının, karışımın durabilitesinde, kayma direncinde, düşük sıcaklık çatlaklarında, yüksek sıcaklık bozulmalarında ve asfaltın sıcaklık-viskozite özelliklerinde önemli iyileşmelerin meydana geldiği görülmüştür. Bu iyileşmeler, siyah karbon katılan asfaltın dayanıklılığının artması ve sertleşmesinden kaynaklanmaktadır. Siyah karbon, pellet haline getirilmesinden dolayı asfalt içerisinde kolayca dağılmakta ve karıştırma esnasında agrega taneleri arasında iyice ufalanarak homojen bir hale gelmektedir. Siyah karbonun ilave edilmesiyle asfaltın temel kimyasal özelliklerinde bir değişim olmamaktadır [37].

Siyah karbon kullanılarak yapılan bir diğer laboratuvar çalışması Rostler ve ekibi tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmanın esas amacı, siyah karbonun eşsiz özellikleri ile asfalt çimentoları için güçlendirici bir madde olarak kullanımını asfalt teknolojisi ile uğraşanları alıştırmaktır. Çalışmada, geleneksel asfalt ve siyah karbon modifiyeli asfaltlar arasındaki temel farklar rapor edilmiş ve siyah karbonun asfalt kaplamalar üzerindeki etkileri ve faydaları tanımlanmıştır. Araştırmacılar, siyah karbonun pellet haline getirilmesini, siyah karbonun karışımda tam anlamıyla dağılması amacıyla zorunlu bir prosedür olarak vurgulamaktadır. Ayrıca uygun viskozite ve iyi bir dağılım elde etmek amacıyla pratik uygulamalar için %75 siyah karbon ve %25 akıcı yağın kullanılmasının karışım için iyi bir uyuma gösterdiğini bulmuşlardır. Bu şekilde gevşek haldeki siyah karbonun akıcı yağ ilave edilerek pelletleştirilmesi sağlanır ve siyah karbonun asfalt içerisindeki uygun dağılımı elde edilir. Bu çalışmada bağlayıcı ağırlığına göre %11–15 oranında siyah karbon kullanılmasının asfaltın yaşlanma sertleşmesi ve sıcaklık hassasiyetini azaltarak özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür. Rostler, Martin’in test sonuçlarındaki siyah karbonun zayıf performansının, siyah karbonun asfalt içindeki kötü dağılımı, siyah karbon konsantrasyonunun düşüklüğü ve uygun viskoziteyi elde etmek için ilave edilen yağdan kaynaklandığı yorumunda bulunmuşlardır. Ayrıca asfalt içindeki siyah karbon dağılımının fotomikrografi yapılmış ve siyah karbon parçacıklarının asfalt çimentosuna entegre olması için 70×10^{-3} mikrondan daha az ortalama bir parçacık çapına sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca, üretilen birçok siyah karbon çeşidi içerisinde asfalt çimentolarının güçlendirilmesi için en çok fayda sağlayan siyah karbon çeşidinin yüksek aşınma fırını (HAF) siyah karbonu olduğu bulunmuştur [118].

Terrel ve Rimstrington, bir güçlendirme elemanı olarak siyah karbonun asfalt modifikasyonunda kullanımı ile ilgili Washington Üniversitesinde araştırma yaparak sonucunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada siyah karbon olarak Microfil 8 kullanılmıştır. Genel olarak asfalt karışımlarına bir miktar siyah karbon ilavesinin, karışımın stabilitesini önemli derecede düzelttiğini, karışımın rijitlik modülünü artırdığını ve çekme direncini geliştirdiğini bulmuşlardır. Bu çalışmanın sonucu, siyah karbon ile fiziksel ve kimyasal özellikleri daha uygun hale gelen asfalt çimentosunun, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini geliştirebildiğini ve karışımların nem direncini arttırabildiğini göstermiştir [119].

Vallerga ve Gridley tarafından iki çeşit siyah karbon modifiye amaçlı kullanarak asfalt ve asfalt betonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, siyah karbon olarak Microfil 25 ve Microfil 8, bağlayıcı olarak da 85–100, 150–200 ve 300–400 penetrasyon dereceli asfalt çimentoları kullanılmıştır. Modifiye asfaltların sıcaklık-viskozite hassasiyetlerinin tespit edilmesi için asfalt ağırlığının %21,2 kadar Microfil 25 katılmıştır. Test sonucunda düşük sıcaklıklarda (0–39,2 °F) 85–100 ve 150–200 dereceli asfaltların viskozitesinde azalma, 300–400 dereceli asfaltta ise çok az değişim gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (95–140 °F) ise viskozite değerleri 10 kat kadar artmıştır. Benzer şekilde 300–400 dereceli asfalt çimentosuna %21,2 Mikrofil 8 katılmış ve deney sonunda düşük sıcaklıklarda değişim olmamış ancak yüksek sıcaklıklarda viskozitede 50 kat artış meydana gelmiştir. Çalışmada ayrıca siyah karbonun asfalt betonunun özellikleri üzerindeki etkileri de Hveem Kohezyonometresi ve Marshall yükleme testi uygulanarak araştırılmıştır. Bu çalışmanın laboratuvar test sonuçları ve saha gözlemleri, modifikasyonunda asfalt ağırlığının %11–16 kadar siyah karbon kullanılmasının karışımın durabilite, aşınma direnci ve sıcaklık-viskozite hassasiyeti üzerinde olumlu etki yaptığını ortaya koymuştur. Siyah karbonla güçlendirilmiş karışımların Marshall stabilite değerlerinde %40 oranında bir artış meydana gelmiştir. Modifiye asfaltların düşük sıcaklıklarda sertlik özellikleri fazla değişmezken yüksek sıcaklıklarda asfaltın sertliği büyük değişiklik göstermektedir. Çalışma sonucunda ayrıca, siyah karbonun asfalt üzerindeki etkisinin asfaltın ve siyah karbonun özelliklerine bağlı olarak değiştiği, modifiye karışımdan iyi sonuç alınabilmesi için siyah karbonun asfalt içerisinde iyi bir dağılıma sahip olması gerektiği vurgulanmıştır [120].

Yao ve Monismith tarafından siyah karbonun asfalt betonunun özellikleri üzerindeki etkilerini test etmek amacıyla AR–2000, AR–4000 ve AR–8000 asfaltlarına belirli oranlarda Microfil 8 siyah karbonu ilave edilerek bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada Hveem yöntemi ile karışımlar hazırlanmış ve hazırlanan numunelere sünme, yorulma ve dolaylı çekme testleri uygulanmıştır. Araştırmacılar sonuç olarak, karışımlara asfalt ağırlığının %15–20 kadar Microfil ilavesinin, yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izi direncini arttırdığını, katkısız karışımlara göre sünme modülü değerinin zamanla daha az değiştiğini ve ayrıca siyah karbonla işlem

görmüş yumuşak asfaltların bir dereceye kadar düşük sıcaklık çatlaklarını ve sıcak havalarda da tekerlek izi oluşumunu engellemek amacıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir [121].

Button ve ekibi, AC-5 asfalt çimentosuna, SBR, SBS, EVA, polietilen ve Microfil 8 (siyah karbon) katkılarını ilave ederek bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada katkı maddeleri AC-5 asfaltına belirli oranlarda katılarak modifiye bağlayıcı ve karışım numuneleri hazırlanmış ve hazırlanan bu numuneler deneylere tabi tutularak katkısız AC-5 ve AC-20 kontrol numuneleri sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, siyah karbonlu karışımların AC-5 ve AC-20 kontrol karışımlarına göre düşük sıcaklık çatlakları ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumlarına karşı direnci yüksek bulunmuştur. Button ve ekibi sonuç olarak, AC-5 asfaltına %15 Microfil 8 ilavesinin, daha sert olan AC-20'ye kıyasla kalıcı deformasyonlara karşı direncini önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir [122].

Jennings ve arkadaşları, AC 200/300 penetrasyonlu asfalt çimentosuna Microfil 8 ilave ederek hazırladıkları karışımların tekerlek izi ve enine çatlak oluşumuna karşı direncini saha çalışması yaparak tayin etmişler. Sonuç olarak, kontrol karışımlarına göre enine çatlaklarda 2/3 oranında, tekerlek izi derinliğinde ise 1/2 oranında bir azalma olduğunu belirtmişlerdir [123].

Khosla, AC-5, AC-10 ve AC-20 viskozite dereceli asfalt çimentoları ile polimer ve siyah karbon içeren çeşitli katkı maddeleri kullanarak, Marshall karışım dizayn yöntemi ile karışımlar hazırlamış ve bu katkılarla modifiye edilmiş karışımların özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan katkısız ve katkılı karışımlar sünme, yorulma ve esneklik modülü deneylerine tabi tutularak performansları değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda, siyah karbon modifiyeli asfaltın katkısız asfalta göre sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, yüksek sıcaklıklarda esneklik modülü değerinin arttığı ve tekerlek izi direncinde artış olduğu bulunmuştur [124].

Ali ve arkadaşları, siyah karbon, latex ve polimer ile modifiye edilmiş AC-5, AC-10 ve AC-20 bağlayıcılarını kullanarak karışımların performansı üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Hazırlanan karışımlar farklı sıcaklıklarda test edilerek sonuçları değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre, başta polimer olmak üzere bütün katkı maddeleri karışımların elastisite modülünü arttırmıştır. Ayrıca asfalt bağlayıcıya siyah karbon veya polimer katıldığında üstyapının tahmini hizmet ömrünün katkısız karışımlara göre önemli derecede arttığı, latex katkı maddesinin daha az bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [125].

Yamaguchi ve ekibi, güçlendirici bir katkı maddesi olarak siyah karbonu, asfalt ağırlığının %20'si oranında 80/100 penetrasyonlu asfalt bağlayıcıya ilave etmişlerdir. Modifiye asfaltın, özellikle oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda katkısız asfalta göre viskozitesinin düştüğü ve elastisite modülünün artış gösterdiği belirtilmiştir. Siyah karbon ilavesinin, performans dereceli bağlayıcının yüksek sıcaklık değerini yükselttiği, diğer taraftan düşük sıcaklık değerini de düşürdüğü, ayrıca, asfaltın termal genleşme katsayısını agregaya

yakın olacak şekilde azaltarak agrega ile asfalt arasındaki termal genişlemenin farklı olmasından dolayı oluşan gerilmenin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, siyah karbonun asfalt kaplamalarda katkı maddesi olarak kullanılması ile yüksek sıcaklıklarda deformasyon direncinde, düşük sıcaklıklarda ise çatlak direncinde artış olduğu ve siyah karbonun kaplamanın durabilitesini arttırmada etkili bir filler olduğu belirtilmiştir [126].

Ahmedzade ve Geçkil, AC-5 ve AC-10 asfalt çimentoları kullanarak hazırladıkları karışımlara HAF N-326 siyah karbonu ilave ederek, siyah karbonun karışımların performansı üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Marshall dizayn yöntemi kullanılmış ve karışım hazırlanırken agrega karışımındaki filler malzemesi yerine doğrudan siyah karbon ilave edilmiştir. Hazırlanan katkılı ve katkısız karışım numuneleri esneklik modülü, sünme rijitliği, dolaylı çekme mukavemeti ve Marshall stabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda, siyah karbon fillerli karışımların stabilite, esneklik modülü ve sünme rijitliği değerlerinin katkısız karışımlara göre arttığı, ayrıca katkılı karışımların tekerlek izi ve nem hasarı zararına karşı direncinde önemli ölçüde artış gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak asfalt betonu karışımlarda siyah karbonun filler olarak kullanılmasının, karışımların mekanik özelliklerini geliştirdiği ve bitümlü sıcak karışımlarda siyah karbonun kullanılabilirliği tespit edilmiştir [127].

Park ve Lovell, siyah karbonun asfalt betonunun durabilitesini ve yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi direncini arttırdığı ve düşük sıcaklıklarda kırılmasını azalttığı bilgisinden yola çıkarak, aynı şekilde atık lastiklerden piroliz yoluyla elde edilen Piroliz Siyah Karbonun (PCB) asfalt kaplamalarda bir modifiyer olarak kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada ticari siyah karbon ve piroliz siyah karbon, AC-10 ve AC-20 asfalt çimentolarına %5-10-15-20 oranlarında katılarak modifiye karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım numuneleri çeşitli testlere tabi tutularak sonuçları irdelenmiş ve genel olarak PCB'nin asfalt karışımlarda güçlendirici bir eleman olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Kullanılan her iki siyah karbon da karışımların optimum bitüm içeriğini arttırmıştır. Çalışmada, PCB kullanılacak asfaltın cinsinin ve katkı oranının karışımın performansı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Katkılı karışımların esneklik modülünün katkısız karışımlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine katkısız karışımlara göre özellikle siyah karbonlu karışımların soyulma direncinde büyük artış görülmüştür. Ayrıca her iki katkılı karışımın tekerlek izi direnci katkısız karışımlara göre yüksek, sıcaklık hassasiyeti ise daha düşük elde edilmiştir. Genel olarak, %10-15 siyah karbon kullanımının asfalt karışımların performans özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir [105, 128]. Lesueur ve arkadaşları, atık lastik kırıntılarından piroliz yoluyla elde ettikleri siyah karbonu asfalt modifikasyonunda kullanmış ve sonuç olarak

özellikle düşük sıcaklıklarda siyah karbon katkılı karışımların katkısız karışımlara göre, polimer modifiye karışımlar gibi iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [129].

Chebil ve arkadaşları, siyah karbon ve odundan pirolitik yoluyla elde ettikleri mangal kömürünün (WCp) bağlayıcının özellikle yüksek sıcaklıklardaki viskoelastik özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, WCp modifiyeli bağlayıcının sıcaklık hassasiyeti ticari siyah karbon katkılı bağlayıcılardan daha düşük elde edilmiştir. Ayrıca WCp modifiyeli bağlayıcının tekerlek izi direncinde artış görülmüştür [130].

Ayrıca Button ve arkadaşları karbon esaslı bir malzeme olan ve Xerox fotokopi makinelerinden atık olarak elde edilen atık tonerin asfalt modifikasyonunda kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, asfalt ağırlığının %2–10 oranında toner ilave edildiğinde modifiye bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ve toner miktarının artması ile karışımların Hveem stabilitesinde de artış olduğunu bulmuşlardır [131]. Atık tonerle yapılan bir başka çalışma da Solaimanian ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, atık toner ile modifiye edilen bağlayıcı ve karışımların performans özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, karışımdaki atık toner miktarının artması ile modifiye bağlayıcının sertlik ve viskozitenin arttığı, ayrıca toner katılarak hazırlanan modifiye karışımların katkısız karışımlara göre daha yüksek stabilite gösterdiği belirtilmiştir [132].

Yapılan araştırmalar sonucunda siyah karbon kullanılarak yapılacak çalışmalarda göz, cilt ve solunum rahatsızlıklarını engellemek amacıyla koruyucu giysi ve ekipmanların kullanılması tavsiye edilmektedir. Minnesota ulaştırma bölümünden Raven, sülfür ilave edilen siyah karbonun bu tür rahatsızlıkları en aza indirdiğini rapor etmektedir. Ayrıca Raven, siyah karbonun ilave maliyeti ve onun kaplama yapımında kullanılma işleminin yapım maliyetini arttırdığını belirtmiştir. Pennsylvania ulaştırma bölümünden Hare, maliyetinden dolayı siyah karbon kullanılmasını, kaplamaya sağladığı faydaları dengeleyemediği gerekçesiyle tavsiye etmemektedir. Aynı şekilde Maine ulaştırma bölümünden Foster, siyah karbonun kaplama performansı üzerinde önemli bir iyileştirme yapmadığını rapor etmiştir [105].

Ayrıca Lohrey, siyah karbon kullanarak modifiye ettiği kaplamanın performansını ve maliyetini incelemek amacıyla beş yıllık bir alan çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada bağlayıcı olarak AC–20 viskozite dereceli asfalt çimentosu ile Microfil 8 siyah karbon kullanılmıştır. Çalışmada asfalt ağırlığının %15'i kadar siyah karbon kullanılarak üç ton modifiyeli karışım elde edilmiş ve aynı şekilde geleneksel bitümlü karışım da elde edilerek yol yapımında kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda yapılan incelemelerde, siyah karbon kullanılan kaplamada enine ve boyuna çatlakların azaldığı, ancak kaplamadaki tekerlek izi, kayma direnci ve defleksiyon ölçümlerinde önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Ayrıca, siyah karbon

kullanılmasının proje maliyetini %47'ye kadar arttırması sebebiyle bitümlü sıcak kaplamalarda kullanılmasının ekonomik olmayacağı belirtilmiştir [133].

Siyah karbon kullanılarak yapılan laboratuvar çalışmalarının sonuçlarına bakıldığı zaman, yapılmış olan bazı alan çalışmaları sonuçlarından farklı olduğu görülmektedir. Bu farkların, farklı çalışma şartları, farklı malzeme kullanımı, hava sıcaklığı ve çalışmayı yapanların vasfı ve becerisi gibi sebeplerden kaynaklandığı bir gerçektir. Yapılan az sayıdaki alan çalışmaları sonuçlarına göre kaplama performansının iyileşmesi durumu ile yapım maliyeti dengelendiği zaman yapım maliyetinin %40 ile %60 arasında bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum asfalt kaplamalarda bir sorun teşkil ettiğinden, laboratuvar testleri tamamlandıktan sonra laboratuvar test sonuçlarını doğrulamak amacıyla alan çalışmalarında bulunmayı gerekli kılmaktadır [105].

4. ÜSTÜN PERFORMANSLI ASFALT KAPLAMA (SUPERPAVE) YÖNTEMİ

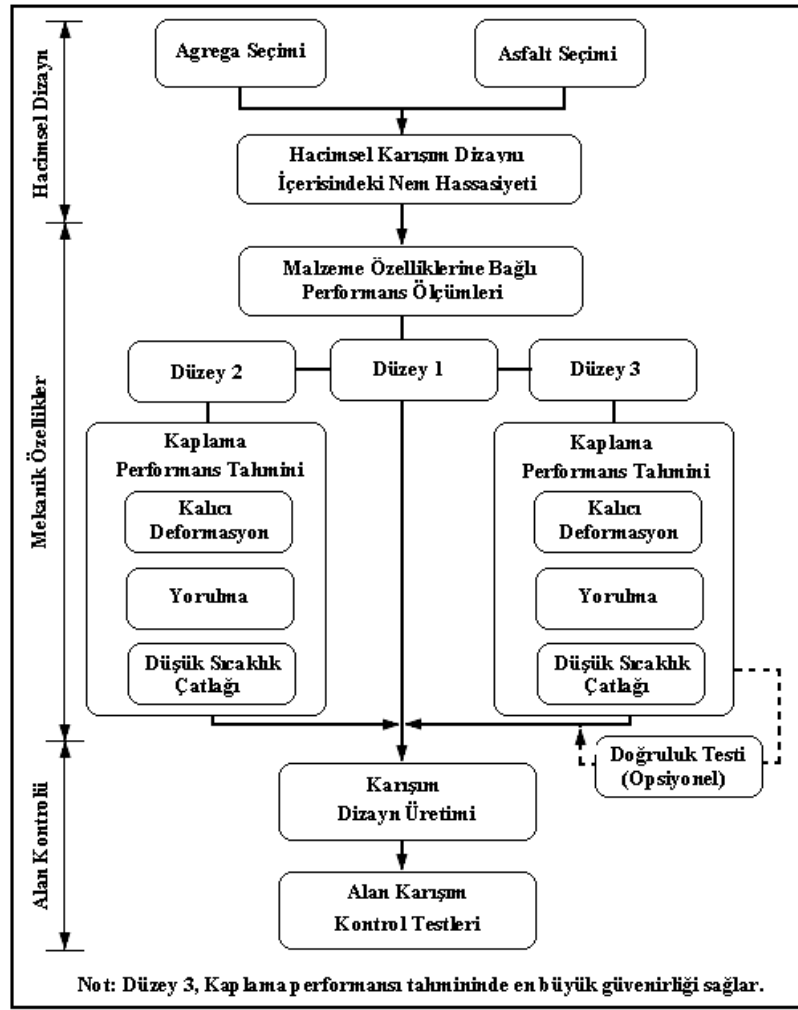
Amerika’da SHRP asfalt araştırma gurubu tarafından 1988 ile 1993 yılları arasında yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilen Superpave karışım dizayn yöntemi, trafik yükü ve iklim koşulları altında meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını kontrol ederek, dizayn çevre koşullarında kaplama performansını arttırmak için performans esaslı bağlayıcı malzemelerinin geliştirilmesini içermektedir.

Superpave yöntemi; ham, geri dönüşümlü, yoğun gradasyonlu, katkılı veya katkısız sıcak karışım asfaltlar ile mevcut tabakaların üzerine inşa edilen taş mastik asfalt (SMA) gibi çeşitli özel kaplama karışımlarına da uygulanabilir. Sistem, malzeme seçimi ve karışım dizaynı yoluyla kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlağı gibi bozulmaları doğrudan kontrol eder ve bağlayıcının uzun ve kısa dönem yaşlanması ile karışımın nem hassasiyetini açık bir şekilde dikkate almaktadır. Superpave karışım dizayn yönteminin amacı, servis ömrü boyunca tatmin edici performans özellikleri gösteren bir kaplama tabakasını oluşturan ekonomik bağlayıcı ve agrega karışımlarını elde etmektir [134].

Superpave yönteminin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansıyla doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesi ve genel olarak saha performansının daha iyi ve gerçekçi olarak yansıtılmasıdır. Superpave karışım dizayn prosesine göre üretilen kaplama performansı ve kalitesinin kabul edilebilmesi için yapım sonunda aşağıda belirtilen temel özelliklerin sağlanması gerekir [135].

- Kalıcı deformasyon direnci; kaplama, trafik etkisiyle bozulmamalıdır.
- Yorulma direnci; kaplama, tekrarlı yükler altında kırılmamalıdır.
- Düşük sıcaklık çatlağı direnci; uygun bağlayıcı seçimi ile kaplama oluşturulmalıdır.
- Durabilite; sıcak karışımda agrega tanelerini saracak olan asfalt çimentosu, servis ömrü süresince yaşlanması da göz önüne alınarak yeterli miktarda kullanılmalıdır.
- Nem hasarı direnci; asfalt bağlayıcı ve agrega yüzeyi arasındaki adezyon kaybını önleyecek agregalar kullanılmalıdır.
- Kayma direnci; karışım, normal dönme ve kırılma hareketleri süresince kaymaya karşı uygun direnç gösterecek şekilde dizayn edilmelidir.
- İşlenebilirlik; karışım, kabul edilebilir düzeyde yerleştirme ve sıkıştırma yeteneğine sahip olmalıdır.

Superpave karışım dizayn sisteminin; asfalt bağlayıcı şartnamesi, karışım dizaynı ile analiz sistemi ve bilgisayar yazılım sistemi olmak üzere üç ana bileşeni bulunmaktadır [38]. Superpave karışım dizayn yönteminin genel akış karakteristiği aşağıda Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Superpave Karışım Dizayn Yönteminin Yapısı [134, 136]

Superpave karışım dizayn yöntemi düzy 1, 2 ve 3 olmak üzere üç farklı dizayn seviyesi içermektedir. Bu dizayn seviyeleri, kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı 80 kN’luk eşdeğer tek dingil yüklerinin toplamı esas alınarak belirlenmektedir. Bunun için önerilen trafik hacim değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Karışım Dizayn Seviyeleri İçin Önerilen Trafik Dizayn Değerleri [136]

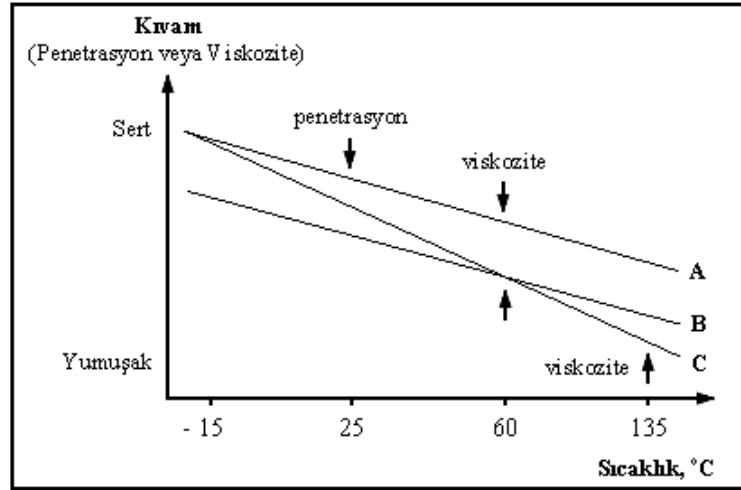
Dizayn Seviyesi	Dizayn Trafığı (80 kN)
1 (düşük)	$\leq 10^6$
2 (orta)	$\leq 10^7$
3 (yüksek)	$> 10^7$

1993 yılında SHRP araştırmasının tamamlanmasının ardından, asfalt endüstrisi ve birçok karayolu kuruluşu Superpave sistemini kurmak için çalışmalara devam etmektedir. Superpave şartnamesi, bölge iklim durumu baz alınarak hazırlandığından mevcut şartlara göre uygun olmasına rağmen, iklim şartlarına bağlı olarak zamanla değişiklik gösterebilmektedir.

4.1. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi

Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de sıcak karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcılar, karmaşık kimyasal yapıları nedeniyle geleneksel yöntemlere göre sınıflandırılmaktadır. Geleneksel bağlayıcı şartnameleri penetrasyon, viskozite ve duktilite gibi çoğu ampirik olan fiziksel özellik deneyleri çerçevesinde geliştirilmiştir. Bu fiziksel özellik deneyleri standart deney sıcaklıklarında yapılır ve deney sonuçları bağlayıcının şartname kriterlerine uygun olup olmadığının tespitinde kullanılmaktadır. Geleneksel şartnameler, bağlayıcının kıvamını 25 °C sabit sıcaklıkta yapılan Penetrasyon deneyi ile belirler ve bağlayıcının orta sıcaklık davranışı ile ilgili fikir verir. Ayrıca, standart deney sıcaklığı 60 °C ve 135 °C olan ve bağlayıcının esas akış ölçüsünü belirten Viskozite değeri bağlayıcının sadece yüksek ısılardaki davranışı ile ilgili bilgi vermektedir. Bu değerler, bağlayıcının düşük sıcaklıklardaki elastik davranışını gerçekçi olarak belirlemede kullanılamaz [22].

Geleneksel şartnameler, farklı asfaltları, farklı sıcaklık ve performans özelliklerine sahip olsalar bile aynıymış gibi sınıflandırabilmektedir. Şekil 4.2’de 60 °C’de tanımlanmış viskozite limitleri arasında olan, 25 °C’de minimum penetrasyona sahip ve 135 °C’de minimum viskoziteye ulaşan aynı viskozite sınıfına sahip üç farklı asfalt görülmektedir [22,31].



Şekil 4.2. Üç Viskozite Dereceli Asfaltın Farklılıkları [22, 31,35,137,138]

Değişen sıcaklık şartları altında, A ve B asfaltlarının sıcaklıkla değişen kıvam özellikleri benzer bir farklılık gösterirken, C asfaltının düşük ve yüksek sıcaklık davranışının daha farklı olduğu ve A ve B asfaltlarına oranla daha hızlı yumuşama gösterdiği görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda aynı kıvama sahip olan A ve C asfaltları yüksek sıcaklıklarda çok farklı kıvalara sahip olmaktadır. 60 °C sıcaklıkta aynı kıvama sahip olan B ve C asfaltlarının

kıvamları, farklı sıcaklıklarda birbirlerinden önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. C asfaltı 60 °C'den daha düşük sıcaklıklarda B'den daha sert iken, yüksek sıcaklıklarda daha yumuşak hale gelmektedir [22,31,35,137,138,139]. Dolayısıyla bu üç asfalt, kaplamanın hizmet vereceği bölgedeki farklı sıcak ve soğuk iklim koşullarında farklı performanslar sergileyecektir. Standart sıcaklıklarda aynı penetrasyona veya viskoziteye sahip birçok bitümlü bağlayıcı farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar gösterebilir. Aynı penetrasyona sahip oldukları için farklı bağlayıcılar aynıymış gibi sınıflandırılabilirler ve bu bağlayıcıların her şartta aynı performansı göstereceği hatasına düşülebilmektedir.

Geleneksel yöntemlerle dizayn edilen sıcak karışımların gerçek performansını koruyamaması, laboratuvar şartlarının arazi şartlarını yansıtamaması ve yukarıda bahsedilen eksikliklerin ortaya çıkması sonucu SHRP tarafından asfalt üstyapı şartnamelerinin hazırlanması amacıyla geniş kapsamlı bir araştırma programı hazırlanmıştır. Bu araştırma programının 150 milyon dolarlık fonunun 50 milyon doları, laboratuvar analizi ve arazi performans esaslı asfalt şartnamesi çalışmaları için kullanılmıştır. Araştırma programı sonucunda, hem modifiye ve hem de modifiye olmayan asfaltların doğrudan arazi koşullarındaki performanslarıyla ilgili fiziksel özelliklerini ölçen Superpave bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir [9,10,31].

Superpave sistemindeki performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını azaltarak bağlayıcının performansını en üst düzeye çıkarmak ve ölçmek için tasarlanmıştır [136]. Superpave bağlayıcı şartnamesinin en önemli özelliği, deneylerin, standart deney sıcaklıklarında değil, kaplamanın hizmet vereceği bölgede maruz kalacağı sıcaklıklarda yapılarak asfaltın saha performansı ile doğrudan ilgili fiziksel ve reolojik özelliklerinin analitik deneylerle tespit edilmesidir. Tablo 4.2'de Superpave yönteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları görülmektedir.

Tablo 4.2. Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları [22,137,140,141]

Deney Adı	Kullanım Amacı	Performans Parametresi
Dönel İnce Film Fırını (RTFOT)	BSK üretimi ve yapımı süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Yapım süresince yaşlanma direnci
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV)	BSK hizmet ömrü süresince bağlayıcı yaşlanmasını belirlemek	Hizmet ömrü süresince yaşlanma direnci
Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR)	Bağlayıcının yüksek ve orta sıcaklık özelliklerini belirlemek	Kalıcı deformasyon ve yorulma çatlağı direnci
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerini belirlemek	Aktarma ve pompalama
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek	Termal çatlak direnci

Superpave bağlayıcı şartnamesinin ana teması, bağlayıcının ömrü boyunca maruz kalacağı üç kritik durumun deneylerle simüle edilmesidir. Orijinal bağlayıcılar ile yapılan deneyler; taşıma, depolama ve işlemeyi kapsayan ilk aşamayı temsil eder. İkinci aşama, sıcak karışım hazırlama ve serme sırasındaki bağlayıcıyı temsil etmektedir. Bağlayıcı, dönel ince film etüvünde, sıcaklık ve havaya maruz bırakılarak oksidasyonu sağlanır ve serme sırasındaki yaşlanma tahmin edilir. Üçüncü aşama ise, bağlayıcının servis ömrü boyunca uzun süreli yaşlanmasıdır. Bu durum da basınçlı oksidasyon deneyi ile temsil edilir.

Superpave yönteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılır ve bu tür bağlayıcılara “Performance Grade” Performans Sınıfı veya Performans Dereceli asfalt adı verilir ve PG simgesi ile tanımlanmaktadır. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 64–22 gibi bir terminoloji kullanılarak ifade edilirler. Burada ilk sayı olan 64, “yüksek sıcaklık derecesi” olarak isimlendirilir ve bu bağlayıcının gerekli fiziksel özelliklerini hizmet etmesi beklenen iklim koşullarındaki en yüksek kaplama sıcaklığı olan 64 °C’lik yüksek sıcaklığa kadar taşıdığı anlamına gelir. Benzer şekilde ikinci sayı (-22), “düşük sıcaklık derecesi” olarak isimlendirilir ve bağlayıcının gerekli fiziksel özellikleri -22 °C’lik düşük sıcaklığa kadar koruduğu anlamına gelir [31].

Aşağıda Tablo 4.3’de gösterilen Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi, modifiye edilmiş ve edilmemiş asfalt bağlayıcıların her ikisine de uygulanmaktadır.

Tablo 4.3. Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO MP1) [134,136,137]

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

Tablo 4.3. Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (Devamı) [134,136,137]

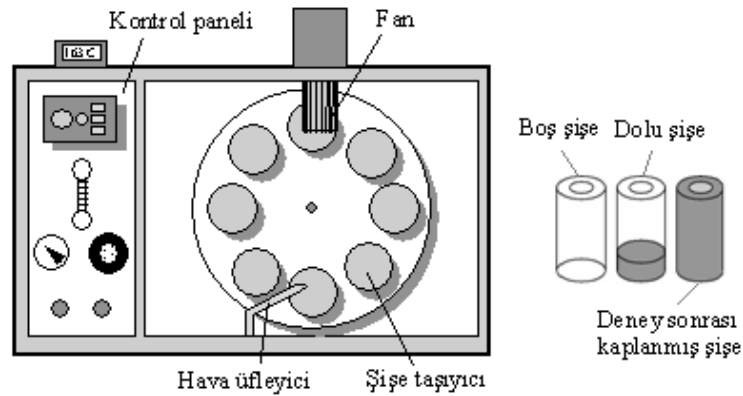
PERFORMANS SINIFI	PG 70-						PG 76-					PG 82-				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 70						< 76					< 82				
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -10	> -16	>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

4.1.1. Bağlayıcı Yaşlandırma Yöntemleri

Organik bir malzeme olan asfalt, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışınlardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek yaşlanma (sertleşme) eğilimi göstermektedir. Asfaltın yaşlanması, yapım boyunca meydana gelen “kısa süreli yaşlanma” ve servis hizmet ömrünün ilk 5–10 yılı boyunca meydana gelen “uzun süreli yaşlanma” olmak üzere iki düzeyde gerçekleşmektedir. Superpave bağlayıcı şartnamesi, asfaltın kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT) ile uzun süreli yaşlanmasını temsil eden Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) deneyini gerekli görmektedir [134,139].

4.1.1.1. Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT)

Asfalt bağlayıcının karıştırma ve yapım sırasındaki kısa süreli yaşlanmasını temsil eden Dönel İnce Film Etüvü Deneyi (RTFOT), AASHTO T240 veya ASTM D2872 şartnamelerine göre yapılmaktadır. Deneyde, ince bir film halinde hareket eden asfalt bağlayıcıda, sıcaklık ve havanın etkisiyle uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve deneyden sonra yaşlanmış olarak elde edilen asfalt bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır [20,134,137,142]. Deney aleti Şekil 4.3’de şematik olarak gösterilen elektrikle beslenen bir ısı iletim sistemi bulunan 163 °C’lik ısıya sahip bir etüv, etüvün içerisine silindirik cam şişeleri yerleştirmek için monte edilmiş dönen tablası bulunan bir taşıyıcı ve şişelere hava püskürtmeye yarayan bir hava üfleyici parçaya sahiptir.



Şekil 4.3. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) Aleti Şematik Görünüşü [11,35,142,143]

Deneyde kullanılacak 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış $35 \pm 0,5$ gram asfalt bağlayıcı numunesi doldurularak dönen tabla üzerine yerleştirilir ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika (TS EN 12607-1’e göre 75 dakika) süreyle döndürülür. Dönme esnasında etüvün en alt konumunda bulunan bir hava üfleyici yardımıyla

şişelere akışı 4000±200 ml/dakika olacak şekilde hava püskürtülür. Sıcaklık, dönme hareketi ve hava üfleme etkisiyle asfalt bağlayıcı şişe içerisini tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede bağlayıcının yaşlanması sağlanmaktadır [11,35,137,142,144].

RTFOT etüvü kullanılmadan önce 16 saat uygulama sıcaklığı olan 163 °C'ye kadar ısıtılır ve termostat, asfalt numuneleri yerleştirilip kapak kapatıldıktan sonra 10 dakika içerisinde bu sıcaklığa çıkacak şekilde ayarlanır. Numuneleri deneye hazırlamak için asfalt bağlayıcı akışkan hale gelinceye kadar 150 °C'yi geçmeyecek şekilde ısıtılır ve 8 adet şişe yukarıda ifade edildiği gibi doldurularak deney aletine yerleştirilir ve deney başlatılır. Deneyden sonra, bu şişelerden 6 tanesi başka bir kaba boşaltılır ve daha sonra basınçlı yaşlandırma kabı ve dinamik kesme reometresi deneylerinde kullanılmak üzere saklanır. Geriye kalan iki adet şişe de oda sıcaklığında soğutulur, bağlayıcıda oluşan kütle kaybının tespit edilmesi amacıyla 0,001 gram hassasiyetle tartılır ve numuneler atılır. Kütle kaybı, RTFOT deneyinden sonra iki numunenin kütlelerinde yüzde olarak oluşan kayıp olarak açıklanır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [11,20,35,137,144].

$$\text{Kütle Kaybı, \%} = [(\text{İlk Kütle}-\text{Son Kütle})/\text{İlk Kütle}]\times 100 \quad (4.1)$$

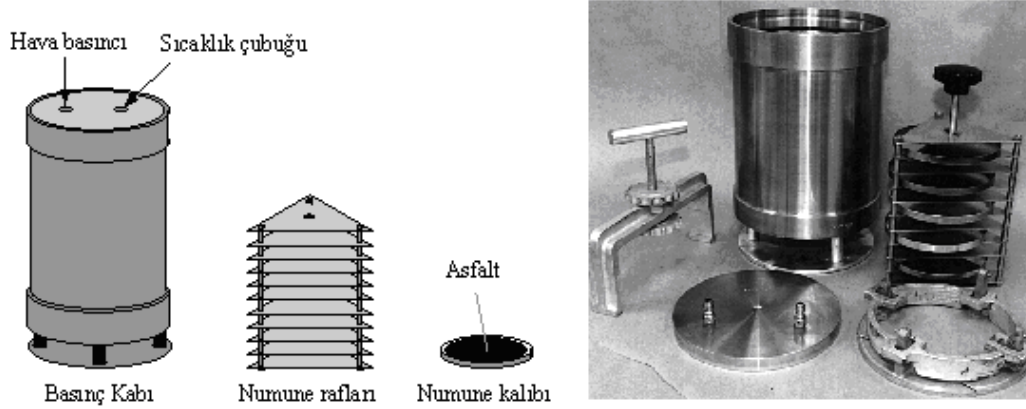
Kütle kaybı; asfalt bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybindan ibaret olup asfaltın taşıma, depolama, ısıtılma, kaplamanın inşası ve kullanımı esnasında sertleşmesinin bir göstergesidir [20].

4.1.1.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1)

Arazide servis sırasında bitümde meydana gelen oksidasyon yaşlanmasını (uzun süreli yaşlanma) laboratuara yansıtabilmek amacıyla SHRP-A-002A araştırma ekibi tarafından Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) yöntemi geliştirilmiştir [145]. PAV deneyi, kaplama servis ömrünün ilk 5-10 yılı boyunca asfalt bağlayıcıda meydana gelen uzun süreli yaşlanmayı temsil etmektedir [134,137]. Deneyde, uzun süreli yaşlanmayı temsil etmek üzere, asfalt numunesi bir basınç kabına konularak etüvde 20 saat süreyle standart sıcaklık ve basınç etkisinde bırakılır. Deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcı, karıştırma ve yapım aşamasındaki yaşlanmayı temsil eden RTFOT deneyinden elde edilen yaşlandırılmış numunelerden alınmaktadır. Böylece kaplamanın karıştırma, yapım ve hizmet sırasında karşılaşacağı çevresel koşullar deneylere yansıtılmış olmaktadır [11,20,139].

Basınçlı yaşlandırma aparatı, içerisinde rafları bulunan basınçlı yaşlandırma kabı ve etüvden meydana gelir. Hava basıncı, basınç düzenleyici boşaltma ve tedrici boşaltma valfli basınçlı kuru hava silindiri tarafından sağlanır. Bu deneyin yapılabileceği birkaç tür basınç kabı bulunmaktadır. Bunların bir kısmında basınç kabı ile sıcaklık ve basınç düzeneğinin aynı bölme

içinde bulunduğu etüv tek parçadır. Bir kısmında ise Şekil 4.4’de görüleceği gibi numune raflarını taşıyan ayrı bir bölme vardır ve bu bölmeler sıcaklık çubuğu ve basınç hortumu ile birlikte etüvün içerisine yerleştirilir [11,35].



Şekil 4.4. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) ve Parçaları [141,144,146]

Basınç kabı, $2,1 \pm 0,1$ MPa (305 ± 15 psi) sabit hava basıncı ile iklim ve kullanılacak bağlayıcı sınıfına bağlı olarak 90°C , 100°C ve 110°C gibi test sıcaklığı şartlarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve içerisine 10 adet numune kalıbı alabilir. Yaşlanma süresi boyunca basınç kabının iç sıcaklığını $\pm 0,5^\circ\text{C}$ hassasiyetle kontrol edecek bir dijital göstergeye gereksinim vardır [137,138,144,146]. Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları, Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Bağlayıcı Sınıfına Göre Uygulanacak PAV Deney Sıcaklıkları [137,141]

Bağlayıcı Sınıfları	PAV Deney Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100–110
PG 76-Y	100–110
PG 82-Y	100–110

Deneyden önce RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt numune akıcı bir hale gelinceye kadar ısıtılır (yaklaşık 135°C) ve homojen bir hale gelinceye kadar karıştırılır. Hazır durumdaki numune kaplarının (135°C sıcaklıktaki) her birine 0,1 gram hassasiyetli bir terazide $50 \pm 0,5$ gram asfalt malzeme $3,2 \pm 0,1$ mm film kalınlığı oluşturacak şekilde dökülür ve bu kaplar numune raflarına yerleştirilir. Basınç kabı, basınç uygulanmadan önce, asfalt derecesine bağlı olarak istenilen test sıcaklığına ($90, 100$ veya 110°C) kadar ısıtılır. Isıtmadan sonra raflı taşıyıcı, basınç kabına yerleştirilerek sıcaklık kaybına sebep olmadan kapak kapatılır. Kabin sıcaklığı

gerekli test sıcaklığına ± 2 °C duyarlılıkla yaklaştığında kaba $2,1 \pm 0,1$ MPa'lık basınç, 20 saat ± 10 dakika süreyle verilerek yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir. Deney sonrasında kaptaki basınç boşaltma işlemi, asfaltta köpürmeye neden olmaması için 9 ± 1 dakika sürecek şekilde boşaltılır. Bu işlemden sonra asfalt numuneler kaptan çıkartılır ve 163 °C'de 30 dakika etüvde tutularak içerisinde sıkışan havanın uzaklaştırılması sağlanır. Etüvden çıkartılan asfalt numuneler dinamik kesme, eğilme kırışi ve direkt çekme testlerinde kullanılmak üzere başka bir kaba boşaltılarak saklanır [137,138,144,146].

4.1.2. Bağlayıcı Performans Deneyleri

Superpave bağlayıcı deneyleri, asfaltın performansını orijinal durum, karıştırma ve yapım aşaması ve servis ömrü aşaması olmak üzere üç etapta ele almaktadır. Asfalt bağlayıcının kullanım ömrü boyunca karşılaşacağı yaşlanma ile ilgili şartlar RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak sağlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalt numunelere aşağıda Tablo 4.5'de belirtilen testler uygulanarak fiziksel özellikleri saptanmakta ve böylece gerçek şartlara benzeşim sağlanarak bağlayıcının performansı gerçekçi yaklaşımlarla saptanmaya çalışılmaktadır.

Tablo 4.5. Superpave Bağlayıcı Performans Deneyleri ve Kullanılacak Numuneler [11,38,35]

Deney Adı	Performans Özellikleri	Kullanılacak Asfalt
Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	Kalıcı Deformasyon Yorulma Çatlağı	Orijinal Asfalt
		RTFOT Uygulanmış Asfalt
		PAV Uygulanmış Asfalt
Dönel Viskozimetre (RV)	Aktarma, Pompalama	Orijinal Asfalt
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Termal Çatlak	PAV Uygulanmış Asfalt
Doğrudan Çekme (DTT)	Termal Çatlak	PAV Uygulanmış Asfalt

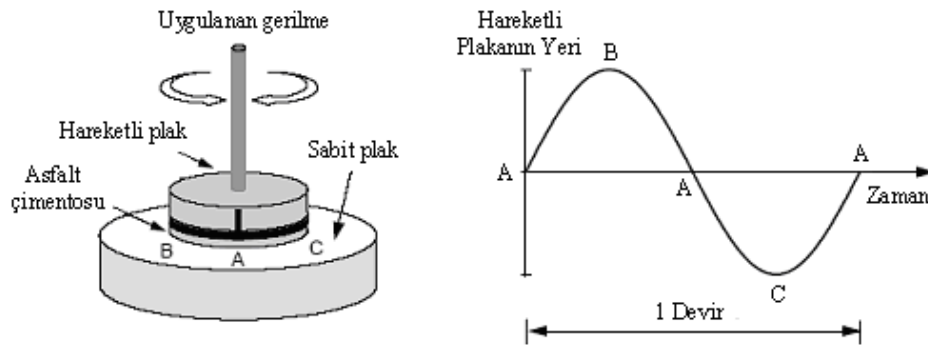
4.1.2.1. Dinamik Kayma (Kesme) Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)

Geleneksel deney yöntemlerinde bağlayıcı özelliklerini belirlemek için farklı deney yöntemleri bulunmasına rağmen, bağlayıcının viskoelastik ve termoplastik davranışının bir arada dikkate alındığı herhangi bir deney bulunmamaktadır. DSR aleti, bağlayıcı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla bu iki faktör göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bağlayıcının davranışı yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olduğundan, SHRP tarafından

geliştirilen DSR deneyi ile bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıklardaki reolojik özellikleri (kompleks kayma modülü, faz açısı vb.) karakterize edilmektedir [137,141].

DSR deneyi, bitümlü bağlayıcının yapımından hemen sonra tekerlek izine karşı dayanımının belirlenmesini sağlamakta ve ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna karşı direnci değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında kaplamanın yorulma çatlağı oluşumuna karşı dayanımının belirlenmesini de sağlamaktadır [137]. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (sinüsoidal) yüklemelere karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Ölçümler, farklı sıcaklık, farklı gerilme ve deformasyon düzeyleri ve farklı test frekanslarında elde edilebilmektedir [137,146]. DSR deneyinde, asfalt numunesinin sinüsoidal gerilmelere veya deformasyonlara karşı davranışı belirlenerek bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (kayma sertliği) (G^*) ve faz açısı (δ) hesaplanmaktadır. Viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı dayanımının göstergeleri olan kompleks kayma modülü ve faz açıları, bitümlü sıcak kaplamaların tekerlek izi oluşumu ve yorulma ömrü potansiyelini belirlemeye yardımcı olmaktadır [137].

DSR deneyinde asfalt numunesi Şekil 4.5’de görüldüğü gibi, sabit bir plaka ile sola ve sağa küçük dönme hareketleri (salınım) yapabilen bir plaka arasına sabit kalınlıkta yerleştirilerek belirli bir ısı altında ve belirli bir hızda döndürülmeye çalışılır. Döner tablaya uygulanan gerilme veya deformasyon ile tabla A noktasından B noktasına kadar hareket ettirilir. Daha sonra döner tabla B noktasından A noktasına ve C noktasına kadar döndürülür. Daha sonra C noktasından tekrar A noktasına kadar döndürülür. Döner tablanın bu hareketine bir devir denilir ve bu salınım deney süresince aynı şekilde tekrar edilir [137,141].



Şekil 4.5. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Çalışma Şekli [137,141]

Bu deney, saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılarak gerçekleştirilmektedir. Burada, 10 rad/sn frekans değeri 100 km/saat trafik hızına

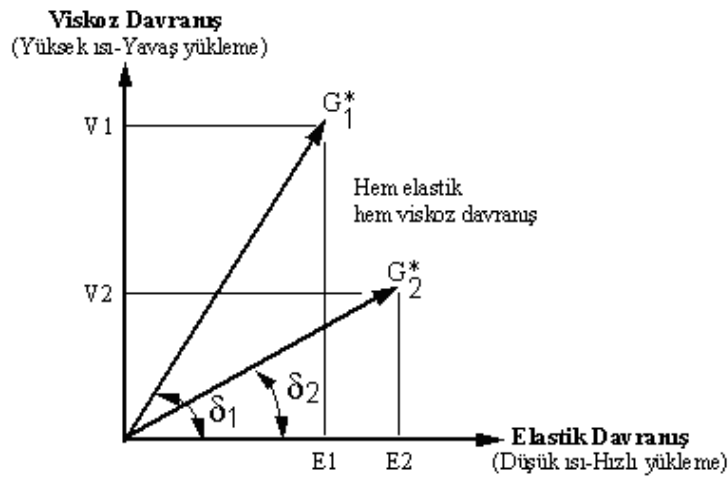
eşdeğer olarak kabul edilmektedir. Şehir içi yollarda 50 km/saat trafik hızı için frekans 5 rad/sn, duran trafik için 1 rad/sn olarak alınmaktadır [134]. 10 rad/sn'lik sabit frekans (4.2) bağıntısı kullanıldığında yaklaşık 1,59 Hz (devir/sn) sabit frekansa (f) ve (4.3) bağıntısı kullanıldığında 0,1 sn yükleme süresine (t) eşit olmaktadır. Yükleme süresi, kaplama üzerinden 50 mph. hızla hareket eden bir kamyon tekerleğinin geçmesinden kaynaklanan yükleme zamanını ifade etmektedir [137].

$$\omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

$$t = (2\pi f)^{-1} \quad (4.3)$$

Gerilme ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki tip dinamik kayma reometresi bulunmaktadır. Gerilme kontrollü reometreler, sinüsoidal gerilmeler uygulayarak oluşan deformasyonları belirlemektedir. Deformasyon kontrollü reometreler ise sinüsoidal deformasyonlar uygulayarak oluşan gerilmeleri belirlemektedir. Superpave bağlayıcı deneyleri gerilme kontrolü ile teste tabi tutulur [11,137,141].

Dinamik kesme reometresi, asfalt bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) ölçmek suretiyle hem viskoz ve hem de elastik davranışını tanımlamak üzere kullanılmaktadır. Kayma modülü (G^*), malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği toplam direncin bir ölçüsüdür ve elastik ve viskoz olmak üzere Şekil 4.6' da görüldüğü gibi iki bileşeni bulunmaktadır.



Şekil 4.6. Viskoelastik Davranış [11,20, 41]

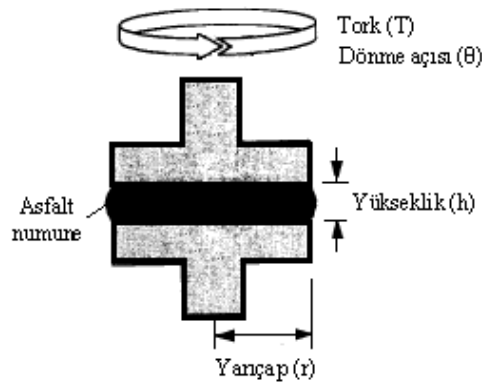
Faz açısı (δ) ise viskoz ve elastik deformasyonun bağıl miktarlarının göstergesidir. Kesme modülü ve faz açısı yükleme frekansı ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Asfalt bağlayıcı, yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranır ve bu durum Şekil 4.6'da düşey eksenle temsil edilmektedir. Yani faz açısı $\delta = 90^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülü (G^*) elastik bir özellik göstermez. Çok düşük sıcaklıklarda ise asfalt bağlayıcı, oluşan deformasyonların

tamamen geri döndüğü elastik katılar gibi davranmaktadır. Bu durumu ise aynı grafikteki yatay eksen temsil eder ve bu da faz açısı $\delta = 0^\circ$ iken malzemenin kompleks kayma modülünün (G^*) viskoz bir özellik taşımadığı anlamına gelir [11,20,137,141].

Normal kaplama sıcaklıkları ve trafik yükleri altında asfalt bağlayıcı viskoz sıvı ve elastik katı özelliklerini bir arada taşır. Kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerinin ölçülmesi suretiyle DSR deneyi asfalt üstyapının hizmet sıcaklığındaki özelliklerinin tahminini mümkün kılmaktadır. Grafikte belirtilen G_1^* ve G_2^* vektörleri iki farklı asfalt bağlayıcının kompleks kayma modülünü temsil etmektedir. Bu bağlayıcıların yük altındaki deformasyonları hem elastik (E) hem de viskoz (V) davranış gösterdiğinden viskoelastik malzeme olarak değerlendirilir. Ancak her iki asfalt da viskoelastik olmasına rağmen, asfalt 2 daha küçük faz açısına sahip olmasından dolayı asfalt 1'e göre daha elastik bir malzemedir. Elastik davranış bileşeninin daha büyük olması nedeniyle asfalt 2'nin yük altındaki deformasyonları yük kaldırıldıktan sonra daha fazla miktarda geri dönecektir. Bu örnek, kayma modülü (G^*) değerinin tek başına asfaltın davranışını açıklayamayacağını, faz açısı (δ) değerinin de gerekli olduğunu açıkça göstermektedir [11,20,141]. Kompleks kayma modülü (G^*), toplam kayma gerilmesinin ($\tau_{maks} - \tau_{min}$), toplam deformasyona ($\gamma_{maks} - \gamma_{min}$) oranı olarak (4.4) bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$G^* = \frac{|\tau_{maks} - \tau_{min}|}{|\gamma_{maks} - \gamma_{min}|} \quad (4.4)$$

DSR yazılımı tarafından kayma gerilmesi (τ) ve kayma deformasyonu (γ) değerlerinin hesaplanması, asfalt numunesinin DSR aletinde yerleşimini temsil eden Şekil 4.7'de belirtilen parametreler kullanılarak (4.5) ve (4.6) bağıntıları ile yapılmaktadır.



Şekil 4.7. DSR Asfalt Numunesi [11,134,146]

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (4.5)$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \quad (4.6)$$

Burada;

τ : Kayma gerilmesi (Pa),

γ : Kayma deformasyonu (%),

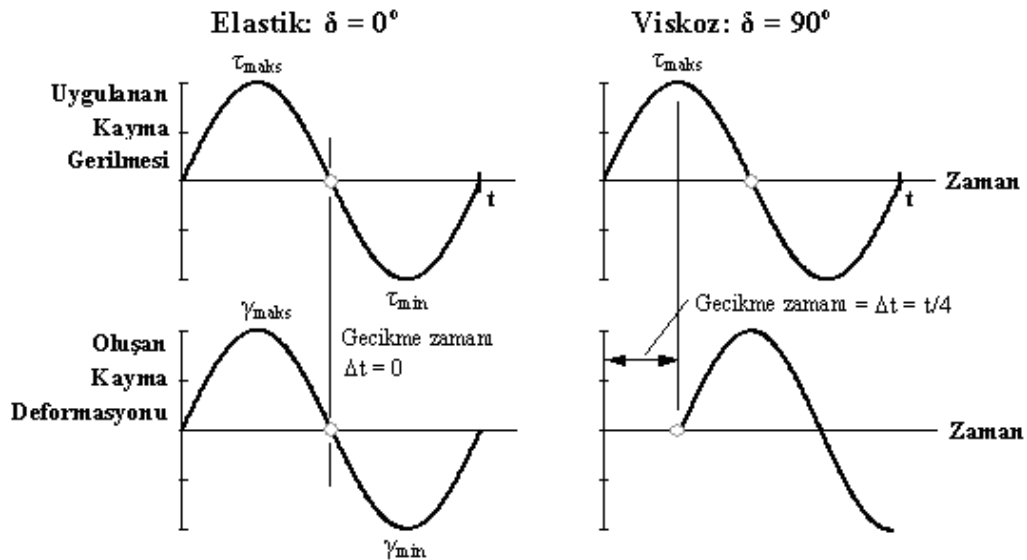
T: Uygulanan tork (N.m),

r: Numunenin yarıçapı (12,5 mm veya 4 mm),

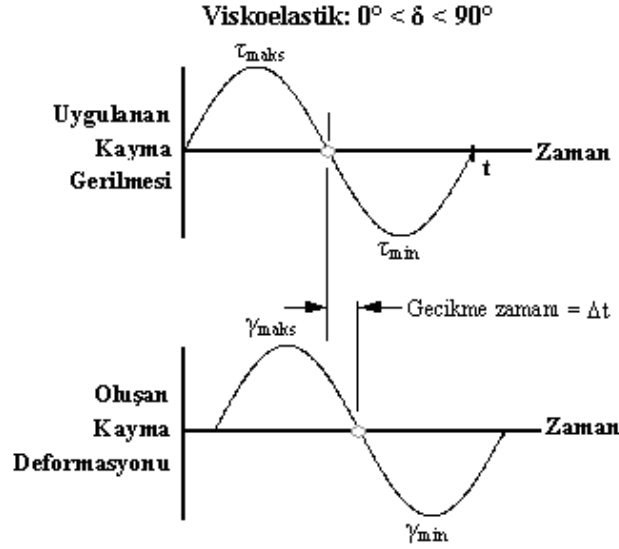
θ : Dönme açısı (rad),

h: Numunenin yüksekliği (1mm veya 2 mm)'dir.

Faz açısı (δ) ise uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır. Asfalt çimentosunun viskoelastik yapısından dolayı numuneye uygulanan gerilmeler ilk etapta numune tarafından karşılanmakta ancak belirli bir süre sonra kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, oluşan kayma deformasyonu ve faz açısı kullanılarak bağlayıcıların viskoelastik yapısı değerlendirilmektedir. Faz açısının 0° olması numunenin tam elastik davranış gösterdiğini, 90° olması ise tam viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir (Şekil 4.8). Bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle, normal sıcaklıklarda faz açısı 0° ile 90° arasında değişecektir (Şekil 4.9). Faz açısının düşük olması bağlayıcının daha fazla elastik özellik gösterdiğini ifade etmektedir [134,141].



Şekil 4.8. Viskoz ve Elastik Malzemelerde Gerilme- Deformasyon İlişkisi [134,141]



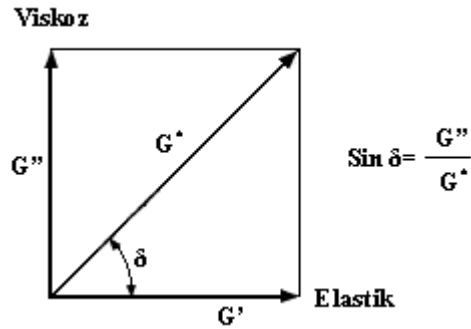
Şekil 4.9. Viskoelastik Malzemelerde Gerilme-Deformasyon İlişkisi [134,141]

Gerilme kontrollü testlerde faz açısı (δ), uygulanan kayma gerilmesi ve oluşan kayma deformasyonu arasındaki gecikme zamanından tespit edilmektedir. Faz açısı (δ), gecikme zamanı (Δt) ve devir süresine (t) bağlı olarak aşağıda belirtilen (4.7) veya (4.8) bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır [134].

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 360^\circ, \text{ (derece)} \quad (4.7)$$

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \times 2\pi, \text{ (radyan)} \quad (4.8)$$

Kayma modülüne bağlı olarak faz açısının değişimi grafiksel olarak Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kayma Modülünün Bileşenleri [134,137]

Kompleks kayma modülü; kayıp modül (G'') ve depolama modülü (G') bileşenlerinden oluşmaktadır. Elastik bileşeni ifade eden depolama modülü her bir yükleme devri boyunca numunede saklanan enerji miktarını göstermektedir. Viskoz bileşeni ifade eden kayıp modül ise

her bir yükleme devri boyunca numunedeki kayıp enerji miktarını göstermektedir. Faz açısı 0° olduğunda numune tamamen elastik davranış göstereceğinden kompleks kayma modülü depolanan modüle, faz açısı 90° olduğunda ise viskoz davranıştan dolayı kompleks kayma modülü kayıp modüle eşit olacaktır. Bu sebeple, şekilde görüldüğü gibi viskoelastik özellik G^* ve δ 'a bağlı olduğundan, bitümün viskoelastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir [134,137].

DSR deneyinde, sabit ve çıkarılıp takılabilen hareketli plaka ile disk şeklindeki asfalt bağlayıcı numuneye gereksinim vardır. Deneye tabi tutulacak numunenin kalınlığı iki plaka arasındaki aralığın ayarlanmasıyla elde edilir. Bu aralık, plakalar reometre üzerinde iken deney sıcaklığında ve asfalt numunesi yerleştirilmeden önce, reometre üzerindeki mikrometre tekerleği kullanılarak ayarlanmalıdır. Deneylerde, plakalar arasındaki aralık yüksekliğine göre iki farklı çapta plaka kullanılmaktadır. Plaka çapları ve aralık yükseklikleri deneyde kullanılacak asfalt bağlayıcının yaşlanma durumuna göre seçilir. Buna göre orijinal veya işlem görmemiş ve RTFOT ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılarda 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar, PAV ile yaşlandırılmış numunelerde ise 2000 mikron (2 mm) aralık ve 8 mm çaplı plakalar kullanılmaktadır. Asfalt numune yerleştirilmeden önce plakalar arasındaki aralık gerekli değerden 50 mikron (0,05 mm) büyük olacak şekilde ayarlanır [137,141,144,146].

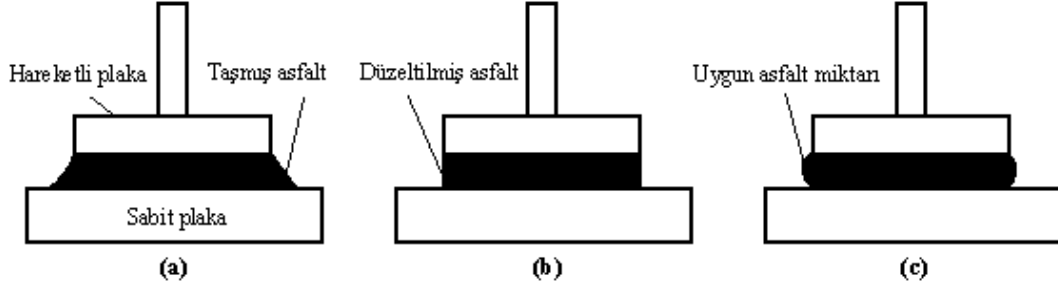
DSR deneyinde deney sıcaklık aralığı, asfalt bağlayıcının performans seviyesine bağlı olarak 46 ile 82 °C arasında değişmektedir. Yorulma ömrünü değerlendirmek amacıyla PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcılar için bu sıcaklık aralığı 4 ile 40 °C arasında değişmektedir. Deneyin gerilme veya deformasyon kontrollü yapılmasına bağlı olarak kayma gerilmesi veya kayma deformasyonu değeri hedef verisi olarak bilgisayara girilmelidir [137,141,144,146]. Bağlayıcının yaşlanma durumuna göre bilgisayara girilen bu değerler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Hedeflenen Kayma Gerilmesi ve Deformasyon Değerleri [141,144,146]

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

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

deney öncesi 50 mikron fazla bırakılan aralık indirilerek gerekli deney aralığına getirilir (Şekil 4.11) [141,144,146].



Şekil 4.11. DSR Asfalt Numunesinin Taşmış (a), Düzeltilmiş (b) ve Deneye Hazır (c) Şekli [141,146]

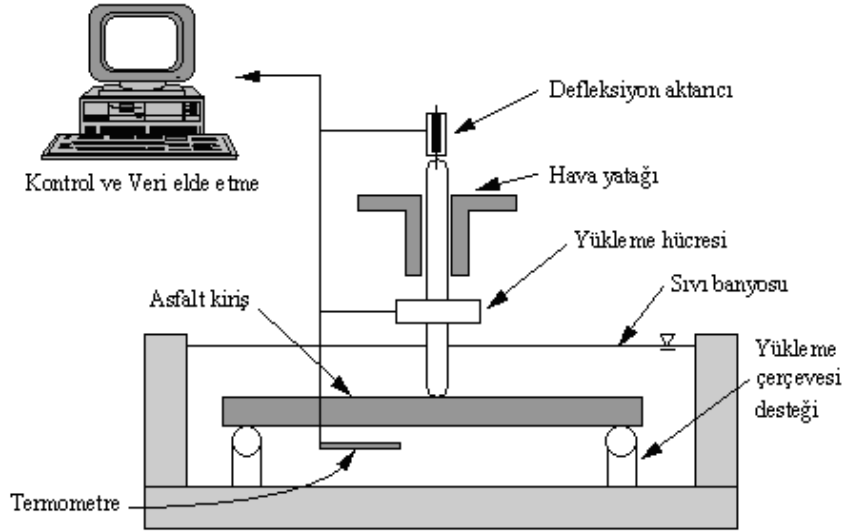
Deneye hazır hale getirilen numune hava fırını veya su banyosu yardımıyla 0,1 °C hassasiyetle deney sıcaklığına getirildiğinde bu sıcaklıkta ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilir. On dakikalık denge periyodunun sonunda Superpave şartnamesine göre salınım hızı 10 rad/san frekansta gerekli gerilme veya deformasyon uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmaktadır. 10 devirlik hazırlıktan sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilir. Reometre yazılımı tarafından otomatik olarak uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri hesaplanır [137,141,144,146].

4.1.2.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1)

Soğuk iklimli bölgelerde inşa edilen esnek kaplamalarda, yüke bağlı olmayan ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan ve termal çatlak olarak da isimlendirilen düşük sıcaklık çatlakları oluşmaktadır. Bilindiği gibi, asfalt bağlayıcılar düşük sıcaklıklarda rijit davranış gösterdiğinden kaplamanın da rijit davranmasına sebep olurlar ve bu davranış, kaplamanın termal çatlak riskini arttırmaktadır. Bu sebeple SHRP tarafından, asfaltın düşük sıcaklıklardaki davranışının gözlenmesi amacıyla kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi geliştirilmiştir. Bu deney, belirli ısıda ve sabit bir yük altında asfalt bağlayıcının ne kadar sünme veya defleksiyon yapacağını ölçmekten ibarettir ve bu nedenle asfalt kaplamanın karşılaşılabileceği en düşük sıcaklıklarda sahip olabileceği elastik davranışını belirlemeye çalışır [137,138,141]. Ayrıca RTFOT ve PAV testleri ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde de deney yapılabildiğinden, asfalt bağlayıcının zaman içindeki değişimi de saptanabilmektedir. Bununla birlikte, asfaltın yüksek ve düşük sıcaklıklarda nasıl bir sertlik davranışı gösterdiği, DSR ve BBR deney sonuçları birlikte ele alınarak geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilmektedir [20].

BBR deneyi sonucunda asfalt bağlayıcının sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerleri elde edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmektedir [20,137,138,141,144].

Kiriş eğme reometresi deneyi, adını numunenin geometrisinden ve deney süresince uygulanan yükün şeklinden almıştır. BBR deney aletinin şematik görünüşü Şekil 4.12’de verilmiştir.



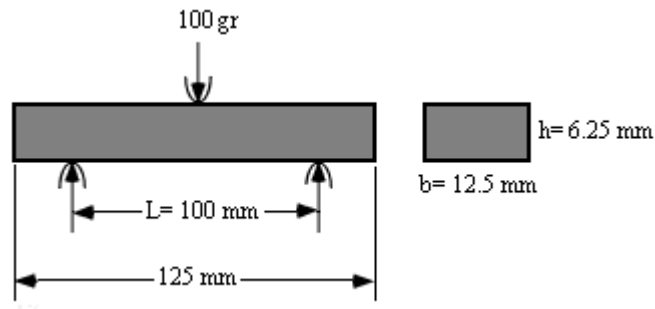
Şekil 4.12. Kiriş Eğme Reometresinin (BBR) Şematik Görünüşü [134,138,141,143]

BBR sistemi yüklem başlığı, sıcaklık kontrollü sıvı yatağı ile kontrol ve veri elde etme ünitelerinden oluşmaktadır. Üzerine ağırlık takılan küt uçlu bir mil ile basit destekli asfalt kirişe ortasından yük uygulanmaktadır. Yükleme sırasındaki sürtünmeyi ortadan kaldırmak için mil etrafına bir hava yatağı yerleştirilmiştir. Mil üzerindeki defleksiyon aktarıcı, oluşan hareketleri bilgisayara aktararak gözlenmesini sağlar. Pnömatik basınç ile yük uygulanırken bir regülatör yardımıyla bu basıncın sabit tutulması sağlanmaktadır. Sıvı yatağında kullanılacak sıvı, -36 °C’ye varan düşük sıcaklıklarda donmayan bir sıvı olmalı ve numunenin içerisinde yüzmesini sağlayacak şekilde özgül ağırlığı 1,05 kg/m³’ü aşmamalıdır. AASHTO PP1 standardında gerekli özgül ağırlığın sağlanması için soğutma sıvısı karışımında %60 glikol, %15 metanol ve %25 su kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Sıvı, sıvı yatağında bulunan bir karıştırıcı ile sıcaklığın homojen bir şekilde dağılması sağlanmaktadır. Ayrıca, sıvının sıcaklığını sirkülasyon sırasında 0,1 °C duyarlılıkta kontrol eden bir termometre bulunmaktadır [137].

BBR deneyinde, asfalt numunenin yük altındaki sertliğinin tespit edilmesinde kiriş teorisi kullanılmaktadır. Standart ölçülerdeki kiriş şeklindeki asfalt çubuğa sabit bir tekil kuvvet

100 ± 5 gr (980 ± 5 mN) uygulanır ve 240 saniyelik deney süresi boyunca çubuğun ortasında oluşan defleksiyon farklı sürelerde (8, 15, 30, 60, 120, 240 sn) sistem tarafından ölçülerek sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) hesaplanır. Deney sırasındaki yükleme, çok düşük sıcaklıklarda kaplamanın yavaş yavaş maruz kaldığı termal gerilmeleri temsil etmektedir. Sünme sertliği (S), asfaltın sünme gerilmelerine karşı gösterdiği direnç ve sünme oranı (m-değer) ise yükleme süresince asfaltın sertliğindeki değişim olarak değerlendirilmektedir.

Asfalt bağlayıcının sünme sertliğinin belirlenmesi amacıyla, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi standart ölçüleri 12,5x125x6,25 mm (0,50x5x0,25 inç) olan asfalt kiriş esas alınarak, klasik kiriş analiz teorisi kullanılmaktadır [137,146].



Şekil 4.13. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Numunesinin Şematik Görünüşü [134]

Asfalt kiriş boyutları, temel Bernoulli-Euler prizmatik kirişlerin eğilmesi teorisinin deney sonuçlarına uygulanabileceği şekilde seçilmiştir. Teoriye göre en büyük defleksiyon, üç noktalı yüklemede elastik kirişin tam orta noktasında oluşmakta ve (4.9) bağıntısı ile belirlenmektedir [137,146].

$$\delta = \frac{PL^3}{48E_s I} \quad (4.9)$$

Burada;

P: Uygulanan yükü (N),

L: Mesnet Açıklığını (mm),

E_s : Elastisite modülünü (Pa),

I: Kesitin atalet momentini ($bh^3/12$, mm⁴) göstermektedir.

Viskoelastik bir malzeme olan asfalt numunede, zamana bağlı olarak oluşan deformasyonlar, elastik malzemelerin temel eğilme teorisinden elastisite modülü (E_s) yerine sünme sertliğinin $S_{(t)}$ kullanılmasıyla aşağıda verilen (4.10) bağıntısı ile elde edilmektedir [134,137,146].

$$\delta_{(t)} = \frac{PL^3}{48S_{(t)}I} \quad (4.10)$$

Deney süresince, sistem tarafından numunenin sabit yük altındaki defleksiyonu belirlenir ve sünme sertliği hesaplanırken (4.11) bağıntısı kullanılır [134,137,141,146].

$$S_{(t)} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta_{(t)}} \quad (4.11)$$

Burada;

$S_{(t)}$: t anındaki (60 saniye) sünme sertliği (MPa),

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

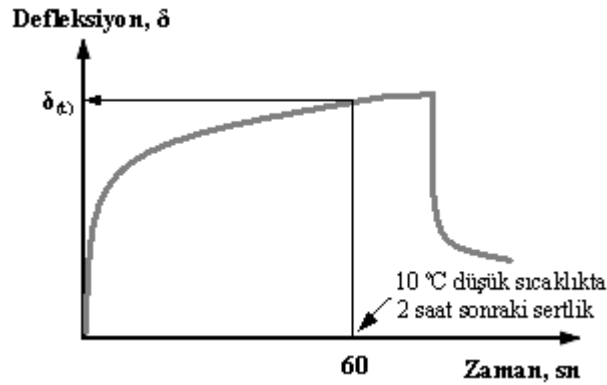
L: Mesnetler arası uzaklık, 100 mm (4 inç),

b: Kiriş uzunluğu, 12,5 mm (0,50 inç),

h: Kiriş kalınlığı, 6,25 mm (0,25 inç),

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

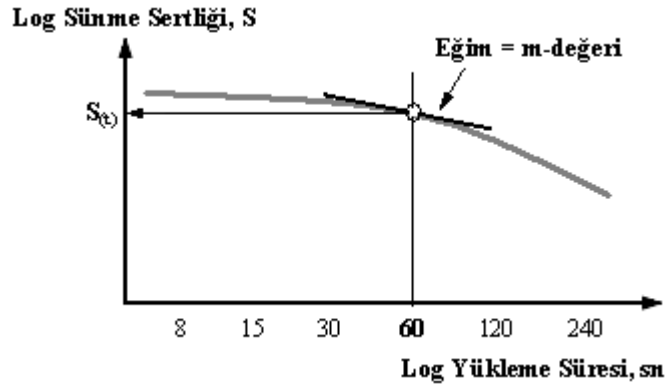
Bu deneyde, geliştirilmiş cihazın bilgisayar programı, Şekil 4.14'de görüldüğü gibi defleksiyon-zaman grafiğini vermektedir. Farklı zaman süreleri için aranan sünme sertliği değerleri bu grafik yardımıyla ve (4.11) bağıntısı kullanılarak bulunabilir [137,141].



Şekil 4.14. Defleksiyonun (δ) Grafikle Belirlenmesi [20,141]

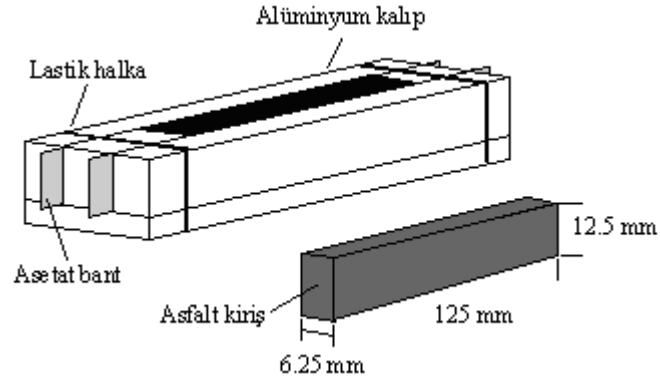
Minimum kaplama dizayn sıcaklığındaki sünme sertliği değerine iki saatlik yükleme sonucu ulaşılmaktadır. Fakat SHRP araştırmacıları, deney sıcaklığının 10°C arttırılması sonucu aynı sünme değerinin 60 saniye sonra elde edildiğini belirlemişlerdir. Bu sayede deney sonucu daha erken bir sürede alınabilmektedir. Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme sertliği değerinin en fazla 300 MPa olması istenmektedir [134,137,141,146]. Ancak bu değer 300–600 MPa arasında ise doğrudan çekme deneyi kopma deformasyon değeri şartnamede öngörülen şartı sağlamalıdır [20].

Deney sonucunda elde edilen ikinci parametre olan sünme oranı (m-değer), zamana bağlı olarak $S_{(t)}$ değerinin değişimini ifade etmektedir. Bu değer bilgisayar yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanır. Bu değeri elde etmek için, farklı yükleme zamanlarındaki sertlik ölçülerek elde edilen sertlik-zaman eğrisinde belirli bir andaki teğetin eğimi sünme oranı (m-değer) olarak alınmaktadır (Şekil 4.15). Superpave şartnamesine göre 60 sn yükleme süresi için sünme oranı değerinin en az 300 MPa olması istenmektedir [134,137,141,146].



Şekil 4.15. Sünme Oranı (m-değer) Değerinin Grafikle Belirlenmesi [20,134,137,141].

Deneyde kullanılacak asfalt kiriş numuneleri, Şekil 4.16'da görülen dikdörtgen kesitli alüminyum kalıplar kullanılarak hazırlanmaktadır.

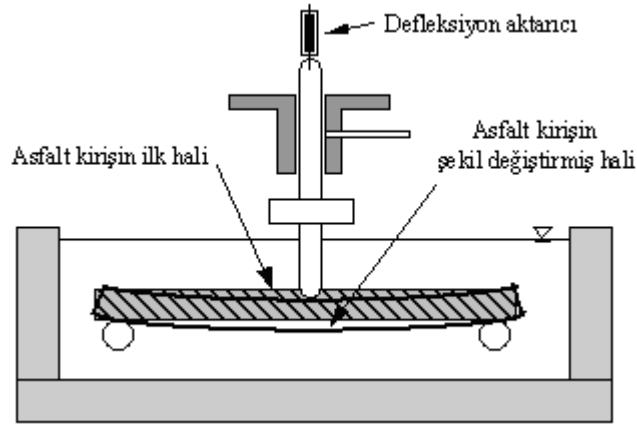


Şekil 4.16. BBR Deneyinde Kullanılan Kalıplar ve Numune [134,141]

Alüminyum kalıp, alt ve yanlar olmak üzere beş parçadan oluşmaktadır. Ayrıca, asfaltın kalıba yapışmasını önlemek için kullanılan üç asetat bant ve parçaların sabitlenmesini sağlayan iki lastik kullanılmaktadır. Kalıp kurulmadan önce iki uzun kenar parçası ve alt parçanın iç yüzeyleri madeni bir yağla hafifçe yağlanır. Üç asetat bant yağlanan yüzeylere yerleştirilir. Uçlardaki küçük parçalara bitümün yapışmasını engelleyen gliserin veya talktan oluşan bir ayırıcı malzeme uygulanarak kalıp kurulur ve parçaların ayrılmaması için iki uçtan birer lastik

halka ile sıkıştırılır. Yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcı, 163°C'yi aşmayacak şekilde ve genellikle 135–140°C arasında ısıtılarak sıvı hale getirilir ve bir uçtan diğerine doğru kalıbın içerisine kalıbın yüzeyini taşıyacak şekilde dökülür. Asfalt malzemenin 45–60 dakikalık bir soğutma işleminden sonra kalıptan taşan kısımları sıcak bir spatula ile temizlenir. Bu şekilde numune kalıpta oda sıcaklığında iki saati geçmeyecek şekilde bekletilir ve deney koşulları hazır olduğunda kalıptan çıkarılır. Numuneyi çıkarmak için kalıp 30–45 saniye kadar buz banyosunda veya 5–10 dakika kadar dondurucuda bekletilir. Deney aletinin sıvı yatağı, deney esnasında dalgalanmalara neden olacağından soğutma işlemi sırasında kullanılmamalıdır. Alüminyum kalıp parçaları ve asetat bantlar kaldırıldıktan sonra asfalt kiriş deney sıcaklığında koşullandırma için hazır duruma gelmektedir. Deney için son hazırlık olarak numunelerin deney sıcaklığındaki sıvı banyosunda 60 ± 5 dakika bekletilerek koşullandırılması ve daha sonra deneye başlanmasıdır [137,141,144,146]. Daha önce deney sıcaklığına ayarlanan sıvı banyosu bu sıcaklığa ulaştığında sıcaklığın dengelenmesi için en az yarım saat kadar beklenir. Koşullandırma için soğutma sıvı banyosuna yerleştirilen numuneler burada beklerken, donanım sisteminin kalibrasyonu ve uyum işlemleri gerçekleştirilmelidir. Paslanmaz çelik bir referans çubuğu kullanılarak defleksiyon aktarıcı ve ağırlık haznesinin kalibrasyonu yapılmalıdır. Kalibrasyonu yapılmış bir termometre yardımıyla sıcaklık aktarıcı kontrol edilmelidir. Bütün sistem performansının periyodik olarak kontrol edilmesi amacıyla ayrıca bir referans çubuğu bulunmaktadır. Sistem kalibrasyonunun önemli bir kısmı bilgisayar yazılımı ile monitör yardımıyla uygulanabilmektedir. Bu işlemin bir parçası olarak ince referans çubuğunun kullanılmasıyla ön yükleme ve yükleme düzeyleri ayarlanır [137,141,144,146].

Sıcaklık koşullarının oluşması için 60 dakikalık beklemeden sonra asfalt kiriş mesnetler üzerine oturtulur. Bu işlemi takiben kiriş bir seri yükleme hazırlığı adımına tabi tutulur. 30 milinewton'luk (mN) bir ön yük, kirişin mesnetler üzerinde tamamen oturmasını sağlamak için uygulanır. Daha sonra bir saniye içinde 980 mN (100 ± 5 gr) bir yerleştirme yükü yazılım tarafından otomatik olarak uygulanır. Bu yerleştirme işinden sonra yük 20 saniyede ön yükleme düzeyine kadar geri indirilir. Bu 20 saniyelik geri dönüş periyodundan sonra esas deney başlar ve toplam 240 saniye süreyle kirişe 980 ± 5 mN yük uygulanır. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi uygulanan yük süresince kirişte oluşan defleksiyon sistem tarafından kaydedilir. Deney esnasında uygulanan 980 mN'luk yükün etkisiyle kirişte meydana gelen defleksiyon, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik halinde çizilir. Deney süresi olan 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kalkar ve yazılım tarafından sünme sertliği ve sünme oranı hesaplanır [137,141,144,146].



Şekil 4.17. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi [141,146]

4.1.2.3. Doğrudan Çekme (DTT) Deneyi (AASHTO TP3)

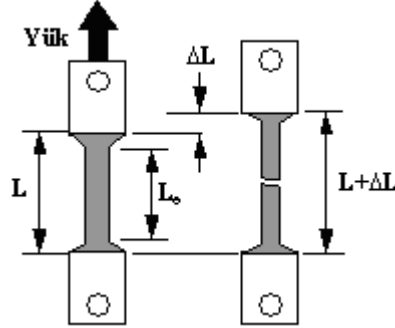
Yapılan araştırmalarda, asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda sertlik (rijitlik) ile kopma anındaki sünme miktarı arasında çok güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Asfalt bağlayıcı, çekme gerilmesine tabi tutulduğunda yeterince sünme gösterirse düktil (sünek) ancak hiç sünme göstermeden koparsa gevrek (kırılgan) olarak isimlendirilir. Sonuç olarak; asfalt bağlayıcı ne kadar rijit (sert) ise o kadar gevrek ama ne kadar yumuşak ise o kadar düktil davranış gösterir. İdeal bir asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda da bir miktar sünek davranış göstermesi gerekir. Aksi durumlarda, düşük sıcaklıklarda trafik yüklerinin de etkisiyle kaplamada düşük sıcaklık çatlakları meydana gelmektedir.

Doğrudan Çekme Deneyi (DTT) ile tespit edilen sünme sertliği, asfaltın kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak yansıtmada yetersiz kalmaktadır. Çünkü, bazı asfalt bağlayıcılar yüksek sünme sertliği gösterebilirler de kopmadan önce bir miktar sünme veya uzama gösterebilmektedir. Bu sebeple, sert ancak düktil özellik gösteren asfalt bağlayıcıların eğilme kırışı (BBR) deney sonucunda elde edilen sünme sertliği değeri 300–600 MPa arasında ise asfalt bağlayıcılara ilave bir gereklilik olarak DTT deneyi uygulanmalıdır. Ancak sünme sertliği değeri 300 MPa'dan daha az ise veya daha az rijitlik gösterirse DTT deneyinin yapılmasına gerek kalmamaktadır [11,20].

DTT deneyi, orijinal bağlayıcılara uygulandığı gibi RTFOT ve PAV deneyleri ile yaşlandırılmış asfalt bağlayıcılara da uygulanmaktadır. Deney, 0 °C ile -36 °C arasındaki düşük sıcaklıklarda kırılgan davranış gösteren asfalt bağlayıcıların performansının tespit edilmesinde önemli bir göstergedir [11,20,141].

DTT deneyinde, esnek bir silikon lastik içinde kemik şeklinde hazırlanan asfalt numunesi 400–500 N yük uygulanarak iki ucundan 1,0 mm/dakika (0,04 inç/dak) hızla yavaş

yavaş kopma anına kadar çekilir [141,146]. Kopmanın meydana geldiği andaki uzunluk, kopma uzaması oranının hesaplanmasında kullanılır (Şekil 4.18).

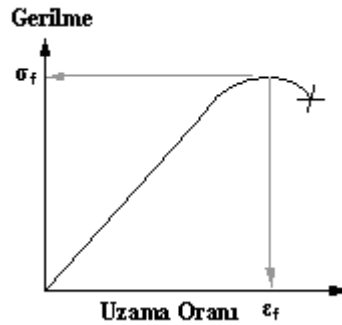


Şekil 4.18. Doğrudan Çekme Deneyi Şematik Görünüşü [141]

Kopma uzaması oranı (ϵ_f), boydaki değişimin (ΔL) ilk boyu ($L_0=27$ mm) bölünmesiyle aşağıdaki (4.12) bağıntısı ile elde edilmektedir [146].

$$\epsilon_f = \Delta L / L_0 \quad (4.12)$$

Numuneye uygulanan yük etkisiyle oluşan gerilme ve şekil değiştirme grafiği Şekil 4.19’da görülmektedir.

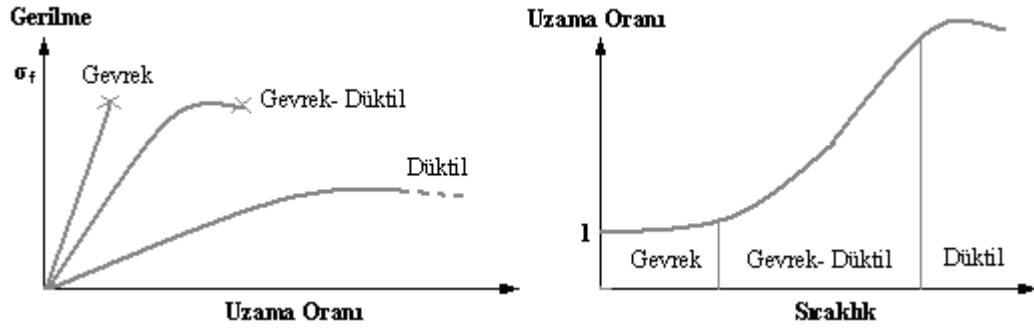


Şekil 4.19. Gerilme-Uzama Oranı Diyagramı [141]

Numunedeki kopma, gerilmenin en yüksek değerinde meydana gelmekte ancak en yüksek gerilme değerinden sonra da oluşabilmektedir. Kopma anındaki gerilme (σ_f , MPa), kopma anındaki yükün (P, N) orijinal numune kesitine ($A_0=36$ mm² = 36×10^{-6} m²) bölünmesiyle aşağıdaki (4.13) bağıntısı ile elde edilmektedir [141,146].

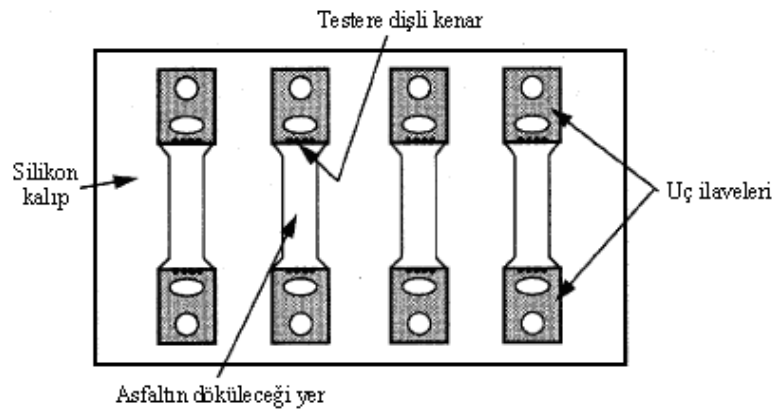
$$\sigma_f = P / A_0 \quad (4.13)$$

Şartnameye göre düşük sıcaklıklarda elde edilen kopma uzaması, kopma anında en az %1 olmalıdır. Asfalt bağlayıcı birçok farklı sıcaklıklarda deneye tabi tutulduğunda sıcaklığa bağlı olarak Şekil 4.20’de görüldüğü gibi üç farklı davranış (gevrek, gevrek-düktil ve duktıl) sergilemektedir [141].

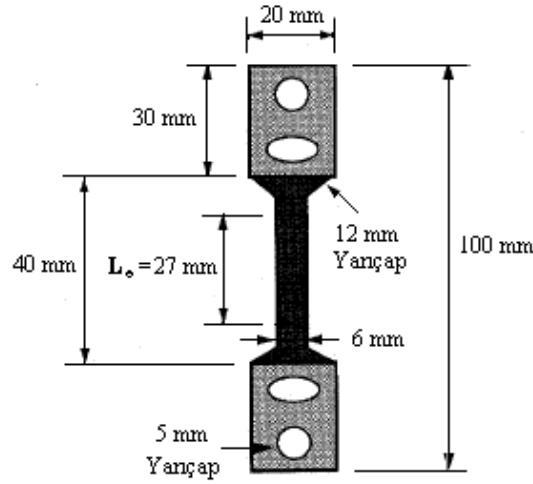


Şekil 4.20. Asfaltın Kopma Uzamasında Sıcaklığın Etkisi [141]

DTT deneyinde kullanılacak asfalt numuneler Şekil 4.21’de görülen ve aynı anda dört numune elde etmeye elverişli esnek silikon kalıplarla hazırlanmaktadır. Bu dört numuneden bir deney yapılmaktadır. Montajı yapılan kalıplar 135 °C’de 30 dakikalık bir ön ısıtmaya tabi tutularak içerisine ısıtılmış asfalt bağlayıcı (135 °C) dökülür. Deney numunelerinin boyu uç ilaveler ile birlikte toplam 100 mm ve numune ağırlığı ise 3 gr gelmektedir. Deney numunesine ait ölçüler Şekil 4.22’de verilmiştir. Numune, 6x6 mm kare kesitli olup, deney için esas alınan numune ilk boyu 27 mm’dir. Asfalt numunenin bağlı olduğu uç ilavelerinin genleşme katsayısı (0,00006 mm/mm/°C) olan polimetilmetakrilat (PMMA) veya benzeri bir malzemeden üretilir. Genleşmesi asfaltla benzer olduğundan başka herhangi bir maddeye gereksinim duyulmadan asfalt kendiliğinden yapışır. Numuneler döküldükten sonra soğuyan asfaltın taşan kısımları temizlenir ve kalıptan çıkartılarak deneyden önce 60 dakika süreyle deney koşullarına getirileceği kap içinde bekletilir [11,141,144,146].

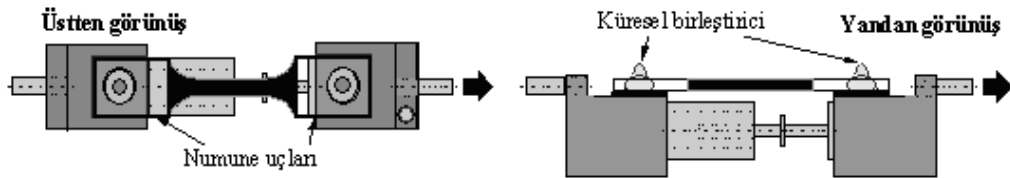


Şekil 4.21. Numune Kalıpları [11,141,146]



Şekil 4.22. DTT Deneyi Numune Ölçüleri [11,141]

Asfalt numunenin deneye tabi tutulacağı deney aleti elektromekanik yükleme birimi, uzama ölçme sistemi ve sıcaklık kontrollü sıvı banyosu olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır. Yükleme birimi; 1,0 mm/dakika hızında 400–500 N yük uygulayabilen ve $\pm 0,1$ N hassasiyete sahip elektronik bir yükleme sistemine sahiptir. Deneyde önemli olan bir diğer husus numunenin takıldığı bağlantı sistemidir ve bu amaçla bağlantıda asfalt numunede eğilme oluşmaması için Şekil 4.23’de görülen birleştiriciler kullanılmaktadır. Deney sırasında numunede oluşan uzama miktarları lazerli bir hareket aktarıcı tarafından ölçülmektedir [141,144].



Şekil 4.23. DTT Deneyi Numune Bağlantısı Şematik Görünüşü [141]

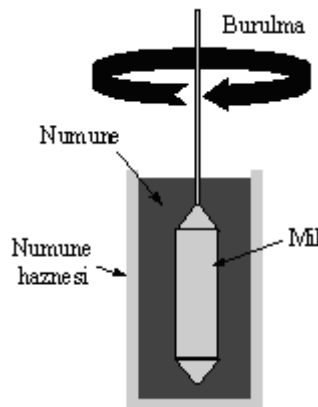
Deney aletinde numunelerin yerleştirildiği sıvı banyosunda kullanılacak sıvı etanol, metanol veya glikol etilen gibi -40 °C’ye kadar donmayacak veya sirkülasyonu zorlaştıracak derecede katılaşmayacak bir sıvı olmalıdır. Deney sırasında her bir numune ayrı ayrı deneye tabi tutulmaktadır. Deney başlatılmadan önce yük ve uzama göstergeleri ayarlanarak sıfırlanır. Elektronik sistem hazır hale getirildikten sonra dakikada 1 mm hızla numuneye bir ucundan 400–500 N’luk bir kuvvet uygulanarak kopuncaya kadar çekilir. Numune çekildiği esnada, sabit kesitin ortasında çatlama olduğu andaki gerilme ve şekil değiştirme değerleri geçerli deney sonuçları olarak kabul edilmektedir. Deney sonucunda, dört numunenin %0,01 hassasiyetle ölçülen ortalama uzunluk değişimi ve gerilme değerleri kullanılmaktadır [141,146].

4.1.2.4. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

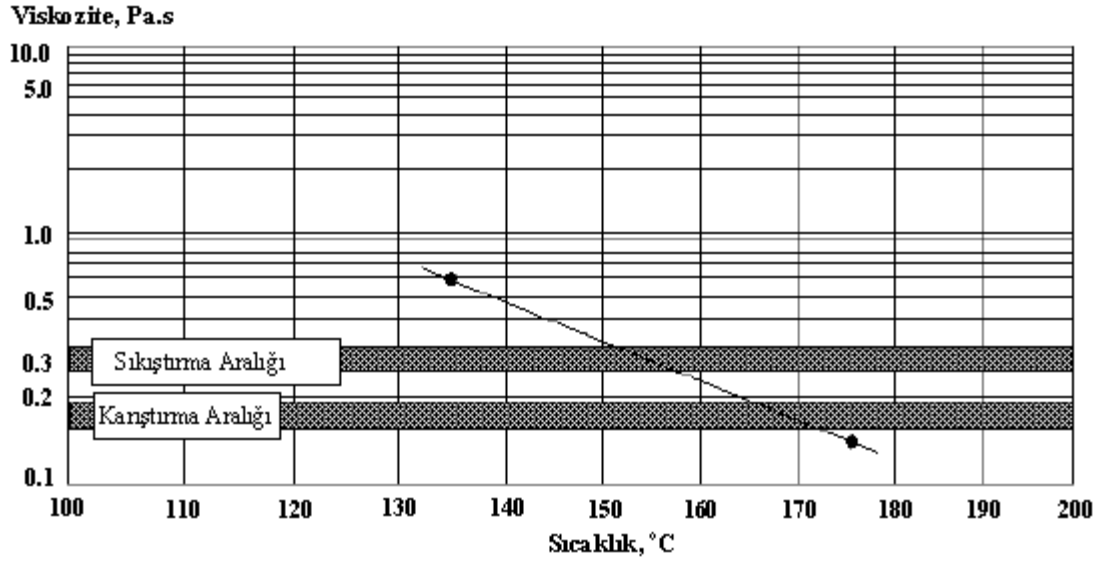
Dönel viskozimetre deneyi, asfalt bağlayıcının sıcak karışım tesisinde ne derece işlenebilirlik ve pompalanabilirliğe sahip olduğunun tespiti için yüksek sıcaklıklardaki akıcılığının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Brookfield aparatı gibi dönel silindir mil viskozimetreleri kapiler viskozimetrelere göre daha sık kullanılmaktadır. Bazı asfalt birimleri bu ölçüme “Brookfield viskozitesi” demektedir. Brookfield termosel aleti kullanılarak bitümlü bağlayıcıların Brookfield viskozitesinin ölçüm yöntemi, ASTM D 4402 standardında açıklanmış ve detaylandırılmıştır [11,137,141,146].

Viskozite değeri, bitümlü bağlayıcının pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadığını tespit etmek amacıyla belirlendiğinden, dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre bağlayıcı sınıflandırmasında, Pascal-saniye (Pa.s) birimi kullanılmakta ve bağlayıcının 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s’yi (3000 cP) aşmaması istenmektedir [11,137,141]. Dönel viskozite değeri, silindirik bir milin sabit bir sıcaklıkta asfalt bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir (Şekil 4.24). Bu burulma kuvveti, viskozimetre tarafından belirlenen bağlayıcı viskozitesi ile doğrudan ilişkilidir [141].

Viskozimetre ayrıca, karışım tasarımında kullanılacak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılan sıcaklık-viskozite grafiğinin hazırlanmasında yardımcı olmaktadır. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, Şekil 4.25’de tipik bir örneği verilen bu grafikler yardımıyla tespit edilmektedir. Dönel viskozimetre deneyi ile asfalt bağlayıcıların viskozitesi 0,01 Pa.s ile 200 Pa.s arasında ölçülebilmektedir [137,146].

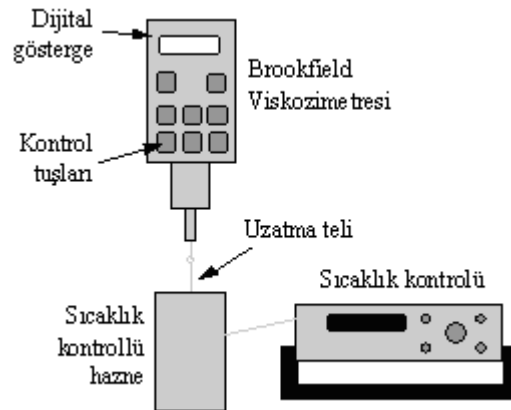


Şekil 4.24. Dönel Viskozimetre (RV) Deney Şeması [31,138,141]



Şekil 4.25. Asfalt Bağlayıcı İçin Tipik Viskozite Eğrisi [137]

Dönel viskozimetre, Şekil 4.26’da şematik olarak gösterildiği gibi Brookfield viskozimetre aleti ve termosel sistem olmak üzere başlıca iki ana ünitelerden oluşmaktadır. Viskozimetre; motor, mil, kontrol paneli ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Motor, milin kendi etrafında dönmelerini sağlayan burulma kuvvetini üretmektedir. Silindirik mil 20 devir/dakika (20 rpm.) hızla döndürülürken, viskozite değeri sistem tarafından otomatik olarak saptanmaktadır. Şakule topuzuna benzeyen silindirik mil, viskoz haldeki bağlayıcı içerisinde dönerken dirençle karşılaşmaktadır. Asfalt bağlayıcıların viskozite değeri tayininde No. 21 ve No. 27 olarak numaralandırılan iki çeşit mil kullanılmakla birlikte yaygın olarak No. 27 mili tercih edilmektedir [137,141,146].



Şekil 4.26. Brookfield Viskozimetresi ve Termosel Sistem [141]

Termosel sistemi; sıcaklık kontrollü bölme, numune kabı ve sıcaklık kontrol panelinden oluşmaktadır. Numune kabı, paslanmaz çelik veya alüminyumdan yapılmıştır. Numune kabını çıkarmak veya yerleştirmek amacıyla özel bir pense kullanılmaktadır. Sıcaklık kontrollü bölme ise numune kabını içine almaktadır. Sıcaklık kontrol paneli deney için gerekli olan sıcaklıkların (135 ve 165 °C) teminini sağlamaktadır. Sistemde uygulanan burulma ve dönme hızı dijital göstergeden ya da bilgisayardan okunabilmektedir. Kontrol paneli mil numarası, dönme hızı gibi parametrelerin girilmesinde ayrıca deneyin başlatılıp sonlandırılmasında kullanılmaktadır. Aletin bilgisayara bağlı olması durumunda bu işlemler yazılım üzerinden de yapılabilmektedir. Sonuçların doğru bir şekilde elde edilebilmesi için viskozimetre aleti ve termosel sistem, terazi kullanılarak ayar vidaları ile düzeçlenmelidir.

Bitümlü bağlayıcıların çoğu 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Newton sıvısı şeklinde davranış göstermektedir [147]. Newton sıvısı, viskozitenin kayma deformasyonu oranından bağımsız olduğunu, tamamen viskoz davranışla karakterize edilmektedir. Bitümlü bağlayıcılar yüksek sıcaklıklarda tamamen viskoz davranış sergilediklerinden karıştırma ve sıkıştırma sırasında bağlayıcının işlenebilirliğinin karakterize edilmesinde viskozite ölçümü yeterli gelmektedir [137].

RV deneyinde, kayma gerilmesi (τ) ile burulma (M) ve kayma oranı ($\dot{\gamma}$) ile açısal hız (ω) arasındaki ilişkiler aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmiştir [137,146].

$$\text{Kayma oranı (s}^{-1}\text{); } \dot{\gamma} = \omega \left[\frac{2R_c^2}{(R_c^2 - R_s^2)} \right] \quad (4.14)$$

$$\text{Kayma Gerilmesi (din/cm}^2\text{); } \tau = \frac{M}{2\pi R_s^2 L} \quad (4.15)$$

Burada;

ω : Sabit mil hızı (rad/s),

R_c : Numune kabının çapı (0,9525 cm),

R_s : Milin çapı (No:27 için 1,176 cm),

M: Uygulanan burulma (din.cm),

L: Milin efektif uzunluğu (No:27 için 3,302 cm)'dur.

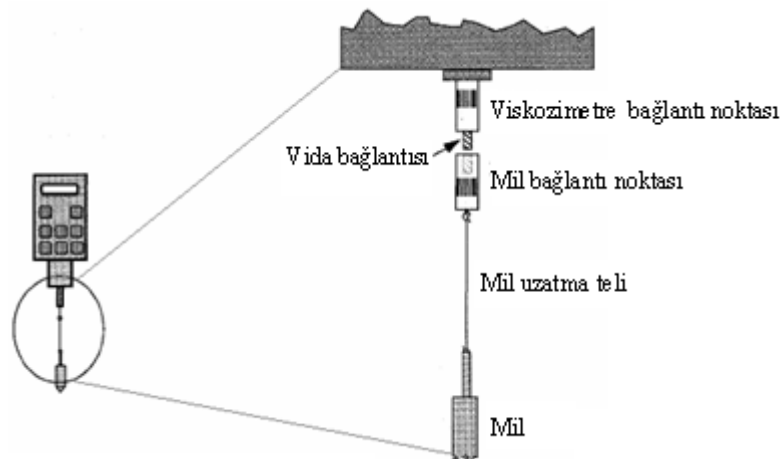
Asfaltın viskozite değeri santipois (cP) olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmektedir [137,146,148].

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.16)$$

RV deneyinde sistem tarafından hesaplanan viskozite değeri santipois (cP) biriminde iken, performans esaslı bağlayıcı sınıflamasında paskal.saniye (Pa.s) birimi kullanılmaktadır.

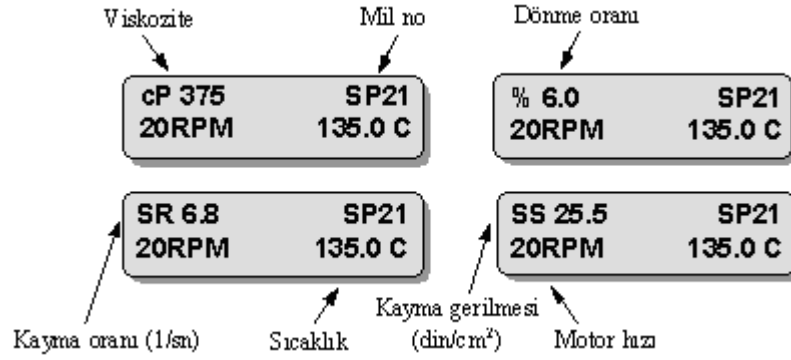
Bu amaçla, dönüştürme için “1000 cP = 1 Pa.s” eşitliği esas alınmaktadır. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre 135 °C sıcaklıkta elde edilen viskozite değeri 3 Pa.s’yi aşmamalıdır [141]. Superpave sistemini oluşturan SHRP çalışmaları sırasında karıştırma ve sıkıştırma için yeni bir viskozite şartnamesi oluşturulmamıştır. Yirmi seneyi aşkın bir süredir kullanılan karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması şartnamede aynen yer almıştır. Sadece kullanılan birim sistemi değiştirilmiş, paskal.saniye birimine göre karıştırma için $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, sıkıştırma için ise $0,28 \pm 0,03$ Pa.s viskozite aralıkları tavsiye edilmiştir [137,148].

Deneye tabi tutulacak 30 gr kadar asfalt numunesi etüvde 150 °C’nin altındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Isıtılan asfalt, daha önceden belirli bir sıcaklıkta ısıtılmış olan numune kabının içerisine, deneyde kullanılacak silindirik milin boyutuna göre 8–11 gr arasında dökülür. İçerisinde asfalt bulunan numune kabı önceden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış olan sıcaklık kontrollü bir taşıyıcıya yerleştirilir [137,146]. Deney parametreleri sisteme girildikten sonra, öncelikli olarak viskozimetrenin bağlantı noktasında bulunan vida ile silindirik mil uzatma teli montajı yapılarak viskozimetre sıfırlanır (Şekil 4.27). Daha sonra, önceden ısıtılmış olan silindirik mil viskozimetreye takılarak numune kabındaki asfalt içerisine daldırılır [144]. Deney için, 135 °C’lik sabit bir numune sıcaklığına ulaşıncaya kadar yaklaşık 30 dakika kadar beklenir. Bekleme periyodu boyunca silindirik milin dönme hızı 20 rpm olarak ayarlanır ve motor çalıştırılarak viskozite ve dönme (tork) oranı gözlemlenir. Şayet dönme oranı %2 ile %98 arasında bir değerde değilse farklı boyutlu bir silindirik mil gerekebilir. Numune sıcaklığı dengeli bir duruma geldikçe, viskozite okumaları da sabitleşmeye başlar ve birer dakika aralıklarla üç okuma yapılarak deney sonuçları kaydedilir [11,144].



Şekil 4.27. Viskozimetre ve Mil Bağlantısı [141]

Deney boyunca viskozimetre dijital ekranında Şekil 4.28’de görülen deney bilgileri verilmektedir. Burada sadece dijital göstergenin sol üst köşesindeki değerler deney esnasında değişmektedir.



Şekil 4.28. Dönel Viskozimetre (RV) Göstergesi [11,141]

Karıştırma ve sıkıştırma sırasında, işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerini sağlayan sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Asfalt enstitüsü, bu amaçla ilk deneyin 135°C’de ikincisinin ise 165°C sıcaklıkta yapılması gerektiğini belirtmiştir. Başlangıçta düşük sıcaklıkta deney yapılmasının tercih edilmesinin sebebi sıcaklık kontrollü numune bölmesinde soğumaya nazaran ısınmanın daha hızlı meydana gelmesidir. Böylece deneyler daha kısa bir sürede bitirilebilmektedir. Farklı iki sıcaklıkta belirlenen viskozite değerleri viskozite-sıcaklık grafiğinde işaretlenerek karıştırma ve sıkıştırma için tavsiye edilen viskozite değerlerini sağlayacak sıcaklık aralıkları belirlenmektedir [137,146,148].

4.1.3. Süperpave Bağlayıcı Şartnamesinde Üstyapı Performansı Değerlendirmesi

Superpave bağlayıcı şartnamesi, sıcak karışımlarda oluşması muhtemel olan yorulma ile düşük sıcaklık çatlaklarına ve kalıcı deformasyonlara karşı bitümlü bağlayıcının özelliklerini yukarıda ifade edilen deneyler yardımıyla sınırlayarak performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Mevcut şartnamelere göre önemli bir farkı ise, bütün performans dereceli asfaltlarda (PG) fiziksel özelliklerin sabit kalması, ancak bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıkların asfaltın kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık göstermesidir. Örnek olarak aşağıda Şekil 4.29’da Superpave bağlayıcı şartnamesinin bir bölümü görülmektedir. Burada, bağlayıcı şartnamesine göre PG 52–40 olarak tanımlanan performans dereceli asfaltının, en yüksek kaplama sıcaklığının 52 °C ve en düşük kaplama sıcaklığının ise -40 °C olacağı iklim şartlarına uygun olacağını göstermektedir [11,141].

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-						
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52						
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	-22	> -28	> -34	> -40	> -46
ORJİNAL BAĞLAYICI										
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230									
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s (3000cP), Test Sıcaklığı, °C	135									
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1,00 kPa, 10 rad/s'de Test sıcaklığı, °C	46			52						

Şartname gerekleri sabit kalır
Deney sıcaklıkları değişir

Şekil 4.29. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi Örneği [141]

Superpave bağlayıcı şartnamesinde gerekli görülen şartname kriterleri, Şekil 4.30'da görülmektedir. Belirtilen her bir özellik başlıklar halinde aşağıda değerlendirilmiştir.

PERFORMANS SINIFI	
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	
ORJİNAL BAĞLAYICI	
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	Güvenlik
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s, Test Sıcaklığı, °C	İşlenebilirlik ve Pompalanabilirlik
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1,00 kPa, 10 rad/s'de, Test sıcaklığı, °C	Yaşlanma (Sertleşme)
RTFOT KALINTISI	
Ağırlık Kaybı, Maksimum, % 1.00	Tekerlek İzi Şartname Gereklere
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2,20 kPa, 10 rad/s'de, Test sıcaklığı, °C	
PAV KALINTISI	
PAV Deney Sıcaklığı, °C	
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s'de, Test sıcaklığı, °C	Yorulma Çatlağı Şartname Gereklere
Fiziksel Sertleşme, (Rapor)	
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	Düşük Sıcaklık Şartname Gereklere
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0, Test sıcaklığı, °C	

Şekil 4.30. Superpave Bağlayıcı Şartnamesi Gereklere

4.1.3.1. Güvenlik (Parlama Noktası) (AASHTO T248)

Parlama noktası deneyi, yaşlandırılmamış bağlayıcıya uygulanan güvenlikle ilgili bir deneydir. Parlama noktası, ısınan asfalt buharının alev temasında geçici olarak parladığı ancak yanmaya başlamadığı en düşük sıcaklıktır ve en az 230 °C olmalıdır. Deneyin amacı, şantiyede asfaltın yanmadan hangi sıcaklığa kadar emniyetle ısıtılabilceğinin tespit edilmesidir [11,20,141].

4.1.3.2. İşlenebilme ve Pompalanabilme

Sıcak karışım tesisinde bağlayıcının işlenebilme ve pompalanabilme özellikleri viskozite deneyi ile tayin edilir. Şartnameye göre, bütün bağlayıcı sınıfları için bu değer 135 °C için en fazla 3 Pa.s (3000 cP) olmalıdır [11,137,141].

4.1.3.3. Yaşlanma ve Fiziksel Sertleşme

Şartnamede, asfaltın karıştırma ve serme sırasındaki yaşlanmasından dolayı kütesinde oluşacak kayıp sınırlandırılmış ve AASHTO T240'a göre yapılan RTFOT deney sonucundaki bu kayıp en fazla % 1 tutulmuştur [141].

Ayrıca şartname, özellikle düşük sıcaklıklarda depolama ve diğer bekletme süreçlerinde asfaltta meydana gelen fiziksel sertleşme miktarının belirlenmesini ve rapor edilmesini tavsiye eder. Bunun için gerekli deney sıcaklığında 24 saat şartlandırılmış ve PAV'da yaşlandırılmış bağlayıcı üzerinde BBR deneyi yapılır. Sünme sertliği (S) ve m-değerini bulmak için iki takım asfalt numune hazırlanır ve numunelerden biri gerekli deney sıcaklığına ulaşıldıktan bir saat sonra, diğeri ise 24 saat şartlandırıldıktan sonra deneye tabi tutulur. Her iki numunenin sünme sertliği ve m-değer sonuçları değerlendirilmek üzere rapor haline getirilir [141].

4.1.3.4. Kalıcı Deformasyon (Tekerlek İzi)

Yüksek sıcaklıklarda ve sürekli tekrar eden yükler altında kaplamada oluşan kalıcı deformasyonlar asfaltın viskoz davranışının bir sonucudur. Superpave şartnamesi, kalıcı deformasyona karşı direnç ve yüksek sıcaklıklardaki bağlayıcı kıvamının ölçüsünü temsil eden "G*/sin δ " tekerlek izi faktörünü gerekli bir değer olarak kabul etmiştir. Burada kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) olarak tanımlanan ifadeler DSR deneyi ile belirlenmektedir. Şekil 4.30'da görüldüğü üzere yüksek tekerlek izi direnci için G*/sin δ değeri orijinal asfaltlar

için en az 1,00 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış asfaltlar için ise en az 2,20 kPa olmalıdır. Yüksek kayma modülü ve düşük faz açısı değerleri tekerlek izi direncine karşı artışı ifade eder [141].

4.1.3.5. Yorulma Çatlakları

Bağlayıcı şartnamesinde, asfalt kaplamalarda oluşan yorulma çatlaklarının değerlendirilmesinde kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) kullanılmaktadır. Yolun hizmete açılmasından sonra normal ve düşük sıcaklıklarda yorulma çatlaklarının oluşması sebebiyle şartname, deneylerde RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış asfalt numunelerin kullanılmasını gerekli görür. Yorulma çatlaklarını temsil eden “ $G^*\sin \delta$ ” faktörü, gerekli bir değer olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.30’da görüldüğü üzere bu değer en fazla 5000 kPa olmalıdır. Bu değer PAV bakiyesi asfalt bağlayıcının elastik olmasını yani yorulma direncinin yüksek olacağını ifade etmektedir. Yorulma çatlaklarına karşı büyük direnç bakımından düşük G^* ve δ değerleri tercih edilmektedir [141].

4.1.3.6. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklıklardan dolayı kaplama bünyesinde oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlakları temsil etmek amacıyla, asfaltın sünme sertliğinin ölçüldüğü BBR eğilme deneyi kullanılmaktadır. Şartnamede, Şekil 4.30’da görüldüğü üzere bu çatlakların oluşmaması için sünme sertliğinin (S) en fazla 300 Mpa olası istenmektedir. Bu değer yüksek ise bağlayıcı gevrek davranış göstereceğinden daha çok çatlama oluşacaktır. Bu çatlamlar, kaplamanın hizmete açılmasından bir süre sonra düşük sıcaklıklarda oluştuğundan, deneylerde RTFOT veya PAV ile yaşlandırılmış numuneler kullanılır. Düşük sıcaklıklarda asfalt sertliğinin zamanla değişme oranı, m-değer yardımı ile kontrol edilir. Sıcaklık düştükçe ve termal gerilmeler devam ettikçe, asfalttaki sertlik zamanla değişeceğinden, yüksek m-değerleri tercih edilmektedir. Yüksek m-değeri, daha az sert asfalt anlamına geleceğinden kaplamada oluşacak çekme gerilmeleri azalacak ve termal çatlaklar oluşmayacaktır. Bu nedenle, bağlayıcı şartnamesi 60 sn yükleme sonunda m-değerinin en az 0,300 olması şartını getirmiştir [20,141].

Ayrıca, doğrudan çekme deneyinde (DTT) kopma uzaması orijinal uzunluğun %1’inden daha az ise çatlak oluşmasının azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, DTT deneyi alternatif bir gereklilik olarak şartnameye ilave edilmiştir. Bu gereklilik sadece sünme sertliği (S) 300 ile 600 MPa arasında olan ve m-değeri 0,300 veya daha büyük olan asfalt bağlayıcılara uygulanmaktadır. Sünme sertliği 300 MPa’dan daha düşük olan asfalt bağlayıcılara DTT deneyi gerekli görülmemektedir [20,141].

4.1.4. Performans Dereceli (PG) Bağlayıcı Sınıfı Seçimi

Superpave bağlayıcı şartnamesinde bağlayıcılar, hizmet vereceği bölgenin sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa dayalı olarak sınıflandırılmıştır. Bu nedenle bu tür asfaltlara “performans sınıfı” (Performance Grade) adı verilmiş ve PG simgesi ile tanımlanmıştır. Sistemde, asfaltın tanımlanması için yapılan deneylerde bütün asfaltlardan beklenen özellikler aynıdır ancak, bu özelliklerin beklendiği en düşük ve en yüksek sıcaklıklar farklılık gösterir. Yani, performans sınıfı asfaltlardan beklenen fiziksel özellikler sabit kalır, fakat bu özelliklerin elde edileceği sıcaklıklar asfaltın kullanılacağı yerdeki iklim şartlarına göre farklılık gösterir. Örneğin, PG 64–22 olarak isimlendirilen bir asfaltta; 64°C ve -22°C’lerde beklenen performans, PG 58–40 asfaltı için 58°C ve -40°C’lerde beklenir. Superpave bağlayıcı şartnamesinde sıcaklıklar sınırlandırılmamıştır ve iki yöne doğru da genişleyebilir. Gerek duyuldukça en yüksek ve en düşük sıcaklıklar altışar derecelik artışlarla uzatılabilir. Yani, şartnamede PG 58–10 gösterilmemiş olmasına rağmen sistem içinde yer almaktadır [10,11,22,31,139].

Superpave yönteminde, performans esaslı bağlayıcı sınıfı iki değişkenli olarak PG X-Y simgesi ile ifade edilmektedir. Burada birinci değişken (X), bağlayıcının performans şartlarını sağladığı yüksek kaplama dizayn sıcaklığını, ikinci değişken (Y) ise bağlayıcının performans şartlarını sağladığı düşük kaplama dizayn sıcaklığını belirtmektedir [134,136,141]. Tablo 4.7’de kaplama dizayn sıcaklıkları ve bunlara karşılık gelen bağlayıcı sınıfı verilmiştir.

Tablo 4.7. Kaplama Dizayn Sıcaklıkları ve Bağlayıcı Sınıfı [31,134,141]

Yüksek Sıcaklık Sınıfları (X), °C	Düşük Sıcaklık Sınıfları (Y), °C	Gösterim
46	-34, -40, -46	PG 46-Y
52	-10, -16, -22, -28, -34, -40, -46	PG 52-Y
58	-16, -22, -28, -34, -40	PG 58-Y
64	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 64-Y
70	-10, -16, -22, -28, -34, -44	PG 70-Y
76	-10, -16, -22, -28, -34	PG 76-Y
82	-10, -16, -22, -28, -34	PG 82-Y

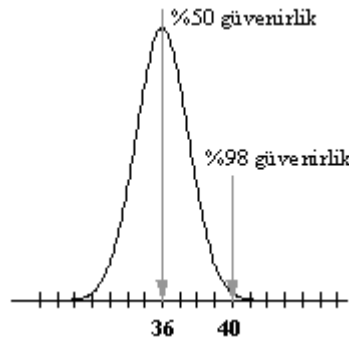
Superpave yönteminde, bağlayıcı sınıfının belirlenmesinde geniş bir meteorolojik veri tabanını kullanan ve istatistik kabullerle tahminde bulunabilen bir bilgisayar yazılım sistemi kullanılmaktadır. Yazılım sistemi ile kullanıcı tarafından bağlayıcı sınıfı seçilirken coğrafi bölge, kaplama sıcaklığı ve hava sıcaklığı bilgileri esas alınmaktadır [11,22,31,141]. Bağlayıcı seçiminde aşağıda belirtilen kriterler dikkate alınmaktadır.

4.1.4.1. Meteorolojik Veri Tabanı

Superpave yönteminde bağlayıcı sınıfı seçimi, proje uygulama bölgesindeki en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri esas alınarak yapıldığından, meteorolojik veri tabanının önemi çok büyüktür. Uygulama bölgesi için meteorolojik veri tabanı oluşturmak üzere, meteoroloji istasyonlarında 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının ortalaması alınarak yüksek hava sıcaklığı hesaplanır. Elde edilen bu sıcaklık, tasarım koşullarını en iyi temsil eden yöntem olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde, bütün yıllar dikkate alınarak, her yılın bir günlük en düşük hava sıcaklık değerleri de tespit edilerek ortalaması alınır. Ayrıca, istasyona ait yıllık en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük sıcaklık değerlerinin standart sapması hesaplanır. Bu hesaplamalarda 20 yıldan az veriye sahip istasyonlar dikkate alınmaz [22,31,136,138,141].

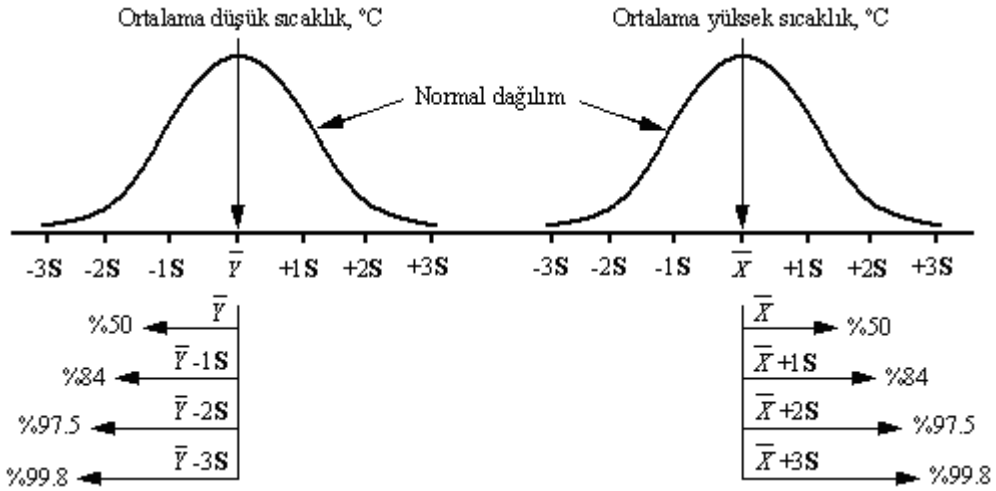
4.1.4.2. Güvenirlilik

Superpave yöntemi, kaplama tasarımcılarına bağlayıcı sınıfının en düşük ve en yüksek sıcaklıklara göre tespit edilmesinde bir tasarım riski kabul edilmesine ve istatistikî güvenirlilik hesaplama yöntemlerinin kullanılmasına imkân tanımaktadır. Güvenirlilik, bir yıl içerisinde mevcut çevre sıcaklığının (bir günlük en düşük veya 7 günlük en yüksek ortalaması) proje sıcaklığını geçmeme ihtimali olarak tanımlanmaktadır. Superpave bağlayıcı seçimi, yüksek ve düşük sıcaklık dereceleri farklı güvenirlilik seviyelerinde seçilebildiği için çok esnekler. Örneğin, ortalama 7 günlük en yüksek sıcaklığı 36 °C ve standart sapması 2 °C olan bir bölgenin hava sıcaklıklarının normal frekans dağılımı Şekil 4.31'deki gibi kabul edilir. Bu dağılıma göre hava sıcaklığının bir yıl içinde 36 °C'yi aşma ihtimali %50'dir. Ancak sıcaklığın 40 °C'yi aşma ihtimali sadece %2 olacaktır ve bu yüzden 40 °C'lik dizayn hava sıcaklığı %98 güvenirlilik sağlar [10,22,31,141].



Şekil 4.31. Yıllık En Yüksek 7-Günlük Hava Sıcaklığı Dağılımı [31,141]

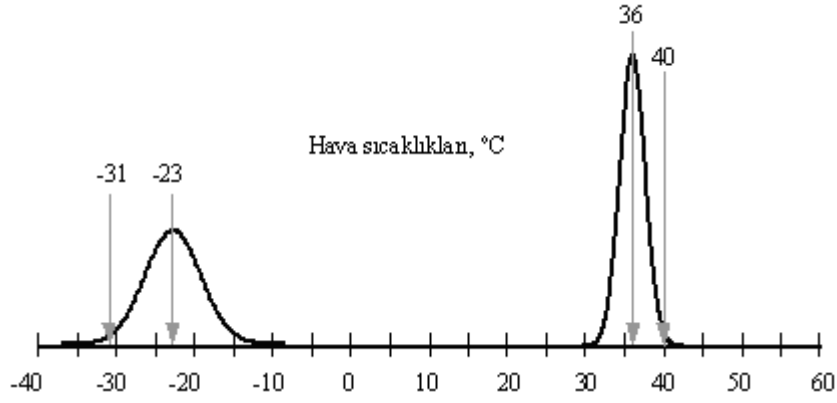
Superpave yönteminde, bağlayıcı seçimi için esas alınan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında, istenilen güvenilirlik derecesi için sıcaklık değerlerinin standart sapma (S) değeri kullanılmaktadır [10,31,136,149]. Düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinin güvenilirlik derecelerinin, standart sapma ile değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir. Buna göre, ortalama yüksek sıcaklığa 1 standart sapma ilavesi ile %84; 2 standart sapma ilavesi ile %97,5 (98 alınmaktadır) ve 3 standart sapma ilavesi ile %99,8 güvenilirlik elde edilmektedir.



Şekil 4.32. Düşük ve Yüksek Hava Sıcaklığı Normal Dağılımı ve Güvenirlik Kabulleri [136,149]

4.1.4.3. Hava Sıcaklığı Seçimi

Şekil 4.33’de düşük ve yüksek hava sıcaklıklarına ait bir frekans dağılım eğrisi görülmektedir. Buna göre normal bir yaz mevsiminde, 7-günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 36 °C ve standart sapması 2 °C’dir. Ortalama sıcaklığa iki standart sapma ilavesiyle elde edilen 40 °C’lik sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2’dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir. Benzer şekilde, normal bir kış mevsiminde ortalama en düşük sıcaklık -23 °C ve standart sapma 4 °C olduğunda, çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -31 °C olması ihtimali %2, dolayısıyla ortalama sıcaklığa iki standart sapma ilavesiyle elde edilen güvenilirlik derecesi %98’dir [31,141].



Şekil 4.33. En Düşük ve En Yüksek Hava Sıcaklıklarının Dağılımı [31,141]

4.1.4.4. Hava Sıcaklıklarının Kaplama Sıcaklıklarına Dönüştürülmesi

Superpave yazılımı, asfalt bağlayıcı sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak hava sıcaklığını değil, kaplamanın kendi sıcaklığını ele almaktadır. Sistem bu amaçla, ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığını esas alarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek dizayn sıcaklığını ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklığı esas alarak kaplama yüzeyindeki düşük dizayn sıcaklığını hesaplamaktadır [22, 31,138,150].

Kaplama dizayn sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında, güncel koşullarla ilgili net ısı akışı ve enerji dengesi modeli ile canlandırılan teorik analizi kullanılarak, güneş ışıını absorpsiyonu (0,90), hava yoluyla yayılan radyasyon (0,81), atmosferik radyasyon (0,70) ve rüzgar hızı (4,5 m/sn) gibi tahmin edilen değerler kullanılmaktadır [10,22,150].

Superpave yönteminde, kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek kaplama dizayn sıcaklığı (T_{20mm}), SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunmaktadır [10,22,31,150].

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (4.17)$$

Burada;

T_{20mm} : Yüzeyden 20 mm derinlikteki yüksek kaplama dizayn sıcaklığı (°C),

$T_{havamaks}$: En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı (°C),

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemidir.

Superpave yönteminde düşük kaplama dizayn sıcaklığı iki yöntemle tespit edilebilmektedir. SHRP tarafından kullanılan ve tavsiye edilen birinci yöntem, en düşük hava sıcaklığının düşük kaplama dizayn sıcaklığı olarak alınmasıdır. İkinci yöntemde ise Kanada SHRP tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmasıdır [22,31,150].

$$T_{min} = 0,859T_{havamin} + 1,17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.18)$$

Burada;

$T_{\min}$: En düşük kaplama dizayn sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

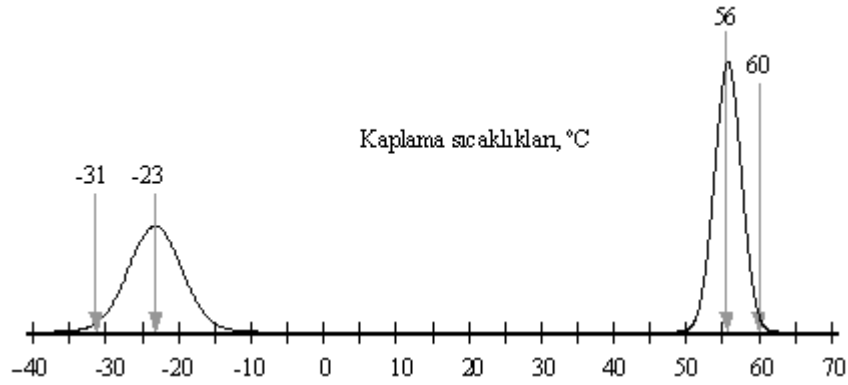
T_{havamin} : En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)'dır.

Yukarıda (4.17) ve (4.18) bağıntıları ile bulunan kaplama dizayn sıcaklıkları %50 güvenilirlik derecesinde elde edilmektedir. Elde edilen bu değerlere her bir sıcaklık türünün standart sapması, aşağıdaki bağıntılarda olduğu gibi ilave edildiğinde, Superpave sisteminde esas alınan %98 güvenilirlik değerleri elde edilir [149].

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} \quad (4.19)$$

$$T_{\min\%98} = T_{\min\%50} + 2S_{\min} \quad (4.20)$$

Şekil 4.34'de, yukarıda düşük ve yüksek hava sıcaklıkları ve standart sapmaları verilen ve enlem derecesi ($40,63^{\circ}$) olan bir bölgeye ait kaplama dizayn sıcaklıkları, yine yukarıdaki bağıntılar kullanılarak %50 ve %98 güvenilirlikte grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.34. En Düşük ve En Yüksek Kaplama Sıcaklıklarının Dağılımı [31,141]

Yapılan çalışmalarda, orijinal SHRP düşük kaplama sıcaklığı algoritmasının hava sıcaklığından düşük kaplama sıcaklığını tespit etmede isabetsiz olması, FHWA (Federal Karayolu İdaresi) bünyesindeki LTPP (Uzun Dönem Kaplama Performansı) programını yeni araştırmalara sevk etmiştir. Araştırma kapsamında, kuzey Amerika'daki 30'un üzerinde bölgede SMP (Mevsimsel Görüntüleme Programı) verileri kullanılarak daha fazla çevresel parametreler yardımıyla bir dönüştürme modeli hazırlanmış ve bu model önerilmiştir. Buna göre yüksek ve düşük kaplama dizayn sıcaklıkları aşağıdaki bağıntılarla belirlenmektedir [10,138,149].

$$T_{\text{maks}} = 54,32 + 0,78T_{\text{havmaks}} - 0,0025E^2 - 15,14\log(H+25) + z(9 + 0,61S_{\text{maks}}^2)^{0,5} \quad (4.21)$$

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72T_{\text{havamin}} - 0,004E^2 + 6,26\log(H+25) - z(4,4 + 0,52S_{\min}^2)^{0,5} \quad (4.22)$$

Burada;

T_{maks} : Yüzey altındaki yüksek kaplama sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

$T_{\min}$: Yüzey altındaki düşük kaplama sıcaklığı, °C

T_{havamaks} : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığı, °C

T_{havamin} : En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığı, °C

E: Derece olarak projenin uygulanacağı coğrafi bölgenin enlemi,

H: Yüzeye olan derinlik, mm

S_{maks} : En yüksek 7 günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması, °C

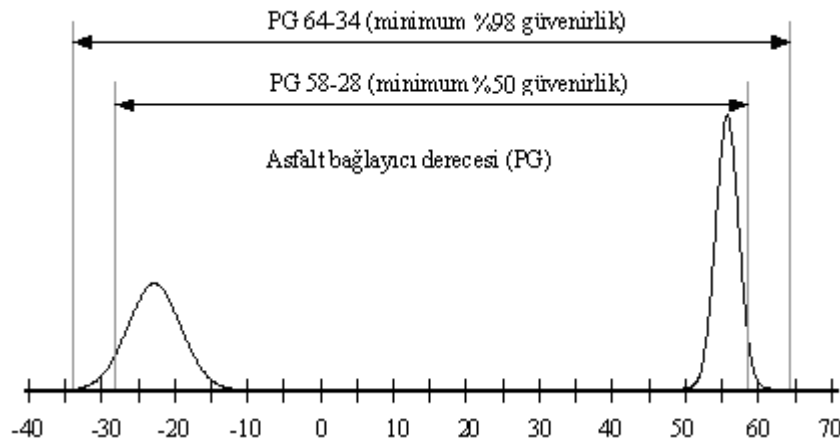
$S_{\min}$: En düşük bir günlük ortalama hava sıcaklığının standart sapması, °C

z: Standart sapma dağıtma tablosundan %98 güvenirlilik için alınan katsayı ($z=2,055$)'dır.

4.1.4.5. Kaplama Sıcaklıklarına Göre Bağlayıcı Seçimi

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen bölgenin %50 güvenirlikle bulunmuş kaplama dizayn sıcaklık değerleri, Şekil 4.34'de görüldüğü üzere yüksek sıcaklık için 56 °C, düşük sıcaklık için -23 °C olarak bulunmuştur. Buna göre, 56 °C'de bağlayıcı sınıfı mevcut olmadığından bir üst sınıf seçilir ve %50 güvenirlilik için yüksek sıcaklık derecesi PG 58-Y olmalıdır. Bu durumda seçilen PG 58-Y sınıfı yaklaşık %85 güvenirliliktir. Daha düşük bir derece olan 52 °C seçilirse güvenirlilik %50'den daha az olacaktır. Benzer şekilde, -23 °C'den daha düşük sıcaklıklardan korunmak için düşük sıcaklık derecesi PG X-28 olmalıdır. Kaplama dizayn sıcaklıklarında %98 güvenirlilik esas alındığından, yüksek sıcaklık derecesi PG 64-Y; düşük sıcaklık derecesi ise PG X-34 olacaktır [31,141]. Her iki değer farklı güvenirlilik dereceleri için Superpave sistemine göre birleştirildiğinde, Şekil 4.35'de görüldüğü bağlayıcı sınıfı belirlenmiş olur.

Superpave bilgisayar yazılımı, bütün bu hesapları fazla girdiye gerek duymadan kendiliğinden yaparak gerekli güvenirliliği hesaplar ve bir şantiyede kullanıcısı da bu verilerden faydalanarak istenilen asfalt derecesini belirler.



Şekil 4.35. Superpave Asfalt Bağlayıcı Seçimi [31,141]

4.1.4.6. Trafik Hızına ve Sayısına Göre Seçim

Superpave asfalt bağlayıcı seçiminde ifade edilen işlemler, tipik yol yükleme koşullarını esas teşkil etmektedir. Bu koşullar altında yolun, 90 km/saat hızda ve belirli ağırlıkta transit trafiğe maruz kalacağı varsayılmıştır. Yüksek sıcaklık tasarımında kalıcı deformasyonlarla yakından ilgili olan yükleme hızı da performansa etki eden ek bir faktör olarak dikkate alınmaktadır. Şartname, yavaş hareket eden ve duran taşıtlar için yüksek sıcaklık bağlayıcı seçiminde ilave değişiklikleri gerekli görmektedir. Bu gibi düşük yükleme oranlarını karşılayabilmesi için bağlayıcının daha sert bir özelliğe sahip olması gerekir. Bunu sağlamak için Superpave sistemi, yükleme oranı veya trafik hızına göre yüksek sıcaklık derecesini en az bir veya iki derece arttırmayı gerekli görmektedir [10,22,31,141]. Örneğin, tipik koşullarda PG 64–22 olarak bulunan bir bağlayıcı sınıfı, yavaş hareket eden yükler için bir derece yüksek bağlayıcı olan PG 70–22; duran yükler için iki derece yüksek bağlayıcı olan PG 76–22 seçilecektir. Yükleme durumu, düşük sıcaklık derecesi seçilmesinde etkili değildir [10,31,141].

Ayrıca, kaplamanın maruz kalacağı yüksek sayıdaki eşdeğer tek dingil yükleri için de ilave değişikliklere gereksinim vardır. Eşdeğer tek dingil yükü (ETDY), iki dingilli ve dört tekerlekli bir araçta 80,0 kN (8,0 ton) olarak tanımlanır ve üstyapı tabaka kalınlıklarının hesaplanmasında birim yük olarak kabul edilmektedir [11]. Normal koşullarda hareket eden ve trafik yükü 10.000.000 ile 30.000.000 eşdeğer dingil yükü arasında tahmin edilen bir yolda mühendis, iklime göre seçilen bağlayıcı sınıfını bir üst değer olarak alabilir. Ancak, eşdeğer dingil yükü 30.000.000’den fazla tahmin edilmesi durumunda bir yüksek dereceli bağlayıcının alınması gerekir [10,22,31,141]. Tablo 4.8’de, trafik sayısı ve hızına bağlı olarak bağlayıcı derecesi seçilmesinde, AASHTO MP-2 standardı tarafından tavsiye edilen düzeltme sayıları verilmiştir.

Tablo 4.8. Trafik Hızı ve Sayısı Esas Alınarak Bağlayıcı Seçilmesi [10,149,151]

Dizayn ETDY Sayısı, Milyon (20 Yıllık)	Bağlayıcı PG Derecesi Ayarlama		
	Trafik Hızı (Yük Oranı)		
	Duran Trafik (<20 km/saat)	Yavaş Trafik (20–70 km/saat)	Standart Trafik (>70 km/saat)
<0,3	-	-	-
0,3–3	2	1	-
3–10	2	1	-
10–30	2	1	-
≥30	2	1	1

4.2. Superpave Agregas Şartnamesi

SHRP araştırmaları süresince yapılan çalışma ve incelemelerde, agrega özelliklerinin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu görölmüştür. Özellikle de sıcak karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini önemli ölçüde etkilediği, buna karşılık yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlağı direnci üzerinde daha az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [22,31,152]. Superpave yönteminde, yeni agrega deneyleri geliştirilmemiş ancak mevcut deney işlemleri geliştirilerek yöntemle uyarlanmış ve kullanılmaktadır [11]. SHRP araştırmaları sonucunda, Superpave yönteminde kullanılacak agrega özellikleri, mutabakat (consensus) ve kaynak (source) zellikleri olmak üzere iki kategoride tanımlanmıştır. Ayrıca, “dizayn agrega gradasyonu” olarak isimlendirilen ve yeni bir yöntemle belirlenen agrega gradasyonu geliştirilmiştir [22,31,152].

4.2.1. Agregas Mutabakat zellikleri

Bitümlü sıcak karışımların yüksek performansa sahip olabilmesi için kritik bir önem taşıyan mutabakat özelliklerinin, yüksek trafik düzeylerinde ve ince kaplamalarda dikkatle seçilmesi gerekir. Karışım tasarımıöndan önce, karışımda kullanılacak agregaların, bu özellikleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir [11,22,31].

4.2.1.1. Kaba Agregas Köşeliliği

Bu özellikle, agreganın yüksek içsel sürtünme açısının ve sıcak karışımın kalıcı deformasyonunun (tekerlek izi) arttırılması garanti edilmektedir. ASTM D5821 standardına göre gözle incelenerek belirlenen kaba agrega köşeliliği, 4,75 mm’den daha büyük agregaların bir ya da daha fazla kırılmış yüzeyinin agrega ağırlığına göre yüzdesi olarak tarif edilmektedir [22,31,152]. Agreganın kırılmışlık durumu, bir yüzünün %25’inden daha fazlasının kırılmış olması ile belirlenir [31,153]. Superpave yönteminde, kaba agrega köşeliliği için şartname kriterleri, Tablo 4.9’da görölmektedir.

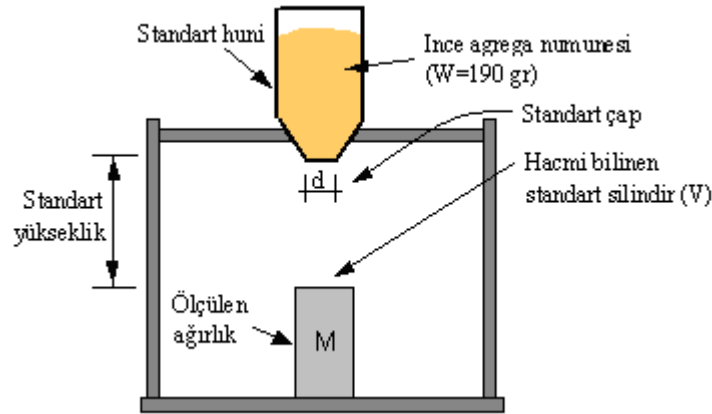
Tablo 4.9. Kaba Agrega Köşelilik Kriterleri (%) [22,31,134,136]

Trafik (ETDY), milyon	Yüzeyden Derinlik	
	<100 mm	>100 mm
<0,3	55/-	-/-
<1	65/-	-/-
<3	75/-	50/-
<10	85/80*	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
≥100	100/100	100/100

Not: 85/80* anlamı, kaba agreganın en az %85'inin bir yüzeyi kırılmış, en az %80'inin iki yüzeyi kırılmış olması

4.2.1.2. İnce Agrega Köşeliliği (İnce Agreganın Sıkışmamış Boşluk İçeriği)

Bu özellik, kaba agregada olduğu gibi agreganın içsel sürtünme açısını ve kaplamadaki kalıcı deformasyon direncinin artırılmasını esas almaktadır. AASHTO T304 standardına göre 2,36 mm'lik elekten geçen ince agreganın gevşekçe sıkıştırılmış haldeki sahip olduğu boşluk yüzdesi, bu özelliğin kriteri olarak belirlenmiştir. Daha yüksek boşluk içeriği daha fazla kırılmışlık anlamına gelmektedir [22, 31,152]. Yapılan çalışmalarda, kırılarak üretilmiş ince agregalardaki sıkışmamış boşluk içeriği genellikle en az %44,5 bulunurken, doğal kumun boşluk içeriği bu değerden daha az gelmiştir [152]. Köşelilik tayininde Şekil 4.36'da şematik olarak gösterilen deney aparatı kullanılmaktadır.

**Şekil 4.36.** İnce Agrega Köşeliliği Deney Aparatları [22, 31]

Kırılmışlık miktarının tayini için yıkanmış ve kurutulmuş ince agrega, standart bir huniye boşaltılarak belirli bir yükseklikten hacmi (V) bilinen standart bir silindire dökülür. Silindire dolan agreganın ağırlığı tartılır (W) ve daha önceden deneyle tespit edilen hacim özgül

ağırlığı (Gsb) değeri kullanılarak agreganın sıkıştırılmamış (gevşek) boşluk yüzdesi değeri aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunur [22, 31,149].

$$\text{Sıkıştırılmamış boşluk \% 'si} = 100 \times [V - (W/Gsb)]/V \quad (4.23)$$

İnce agreganın köşeliliği şartname kriterleri, Tablo 4.10'da görülmektedir.

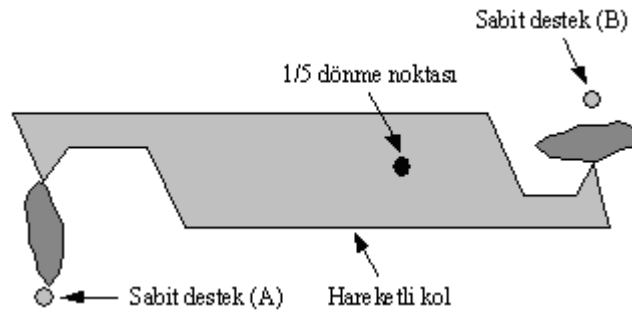
Tablo 4.10. İnce Agreganın Köşelilik Kriterleri (%) [22,31,136]

Trafik (ETDY), milyon	Yüzeyden Derinlik	
	<100 mm	>100 mm
<0,3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥100	45	45

Not: Kriter, gevşek halde sıkışmış ince agreganın hava boşluğu yüzdesine göre hazırlanmıştır.

4.2.1.3. Yassı ve Uzun Daneler

Bu özellik, kaba agreganın en büyük boyutunun en küçük boyutuna oranının beşten büyük olan kısmının ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Bu tür agregalar, asfalt karışımının serilmesi ve sıkıştırılması aşamasında ve kaplama trafiğe açıldıktan sonra trafik yükleri altında kırıldıklarından karışımlarda kullanılması sınırlandırılmıştır. Yassı ve uzun danelerin tespiti ASTM D4791 standardı uygulanarak tespit edilir ve 4,75 mm'den büyük kaba agregalara uygulanır [22,31,134,149,152]. Bu özelliğin tayin edilmesi için gereken test aparatı Şekil 4.37'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Yassı ve Uzun Daneleri Ölçme Test Aparatı [22,31,149]

Deneyde, yassı ve uzun dane tespiti için önce agreganın en büyük boyutu sol taraftaki hareketli kol ile sabit A desteği arasına yerleştirilir ve hareketli kol sabitlenir. Aynı agreganın danesi sol taraftan alınarak sağ taraftaki boşluğa yerleştirilmeye çalışılır. Şayet agreganın danesi bu

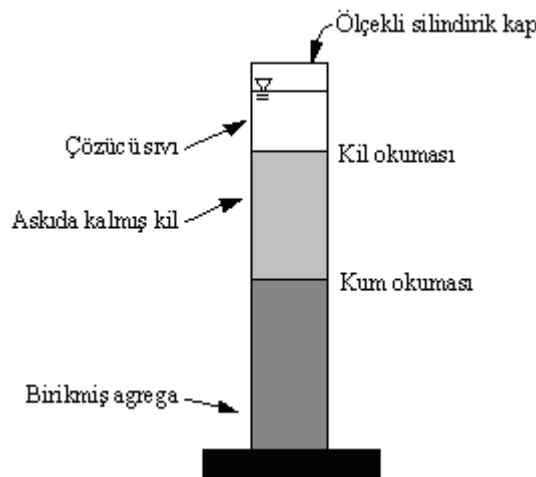
boşluktan geçebiliyorsa yassı ve uzun dane olarak kabul edilir ve kusurlu olarak değerlendirilir. Karışımlarda ağırlıkça kullanılabilecek miktarları Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11. Yassı ve Uzun Dane Kriteri [22,31]

Trafik (ETDY), milyon	Maksimum, %
<0.3	-
<1	-
<3	10
<10	10
<30	10
<100	10
≥100	10

4.2.1.4. Kil İçeriği

Kil içeriği, 4,75 mm’lik elekten geçen agrega karışımında bulunan kil malzemesinin yüzdesi olarak tarif edilir ve AASHTO T176 standardına göre “Kum Eşdeğerlik Deneyi” uygulanarak belirlenir [22,31,136]. Deneyde, ince agrega numunesi, içerisinde çözücü bir sıvı bulunan Şekil 4.38’deki gibi ölçekli silindirik bir kaba yerleştirilir ve kap hafifçe çalkalanarak kil taneciklerinin agregadan ayrılması sağlanır. Bu tanecikler çözücü sıvı etkisiyle agrega üzerinde askıda kalır. Uygulanan bu işlemten sonra altta biriken agrega ve askıda kalmış kilin ölçekli kap üzerinde yükseklikleri ölçülür. Kum eşdeğerlik değeri, kum yüksekliğinin kil yüksekliğine oranı olarak yüzde cinsinden belirlenir ve bu değer Tablo 4.12’de verilen şartname kriterlerini sağlamalıdır.



Şekil 4.38. Kum Eşdeğerlik Deneyi [22, 31,149]

Tablo 4.12. Kil İçeriği Kriterleri [22, 31,136]

Trafik (ETDY), milyon	Kum Eşdeğerliği, Minimum, %
<0.3	40
<1	40
<3	40
<10	45
<30	45
<100	50
≥100	50

4.2.2. Agreg a Kaynak Özellikleri

Bölgesel agreg a kaynaklarının nitelendirilmesi için kullanılan kaynak özellikleri, önemli olmasına karşın, kaynağa özel olduğundan kritik değerler olarak tanımlanmamış ve ayrıca araştırmaya gerek görülmemiştir. Ancak, kullanılması tavsiye edilmiştir. Agreg a kaynak özellikleri dayanıklılık, sağlamlık ve zararlı maddeler olarak sıralanmaktadır [22, 31].

Dayanıklılık (Toughness); AASHTO T96 veya ASTM C131 standardına göre “Los Angeles” aşınma deneyi süresince bir agreg a yığnında oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve kaba agreg anın karıştırma, yapım ve servis süresinde aşınma ve mekanik parçalanmaya karşı direncini ifade eder [20,22,23,31,136]. Agreg alarda aşınma kaybının genel olarak en fazla %35–45 civarında olması istenmektedir [22,31,149]. Ancak, SHRP asfalt araştırma programı ürünü olan SHRP-A-410’da, trafik düzeyine bağlı olarak Tablo 4.13’de belirtilen limit değerler önerilmiştir.

Tablo 4.13. Önerilen Los Angeles Aşınma Limitleri [134]

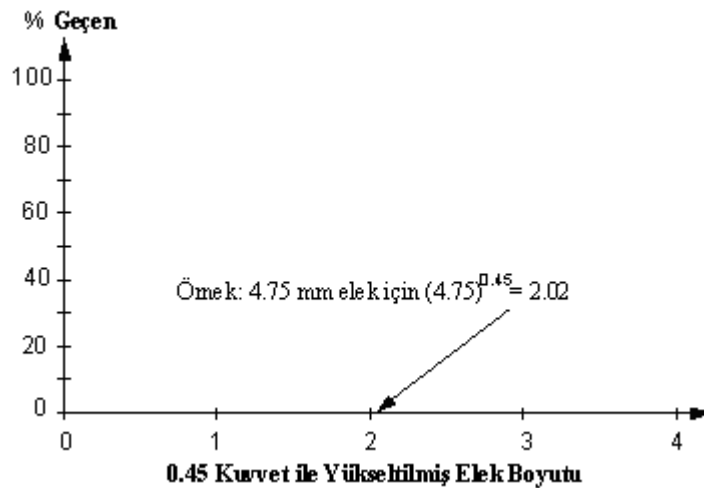
Trafik (ETDY), milyon	Kaplanmış Kaba Agreg a, maks. %	Kaplanmamış Kaba Agreg a, maks. %
<1	50	50
<10	45	50
<100	40	50
≥100	35	50

Sağlamlık (Soundness); AASHTO T104 veya ASTM C88 standardına göre doygun sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisine daldırılan agreg anın kütesinde oluşan kayıp malzemenin yüzdesi olarak belirlenir ve agreg aların servis süresince hava etkileriyle donarak ufalanmaya karşı olan direncini ifade eder [22,23,31,136,154]. Agreg alarda donma kaybı yüzdesinin en fazla %10–20 civarında olması istenmektedir [22,31,149].

Zararlı maddeler; agrega yığınındaki kil topakları, ufalanabilir parçalar, odun, mika, kömür gibi ağırlıkça yüzdesi olarak tanımlanır ve bu özellik AASHTO T112 veya ASTM C142 standartlarına göre tayin edilir. Zararlı maddenin kirletici özelliğine bağlı olarak en fazla izin verilebilir değerleri %0,2 ile %10 arasındadır [22,31,136,149]. Ancak, SHRP asfalt araştırma programı ürünü olan SHRP-A-410'da bu limit agrega ağırlığının %2'si olarak önerilmiştir [134].

4.2.3. Gradasyon

Superpave yönteminde, müsaade edilebilir agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla geleneksel yöntemlerden farklı bir gradasyon grafiği kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, mevcut gradasyon grafikleri ile düşeyde aritmetik ölçekte % geçen ve yatayda elek boyutu logaritmik ölçekte hazırlanarak, bunun üzerinde agrega karışımının kümülatif tane dağılımı belirlenmektedir. Superpave yönteminde, müsaade edilebilir agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla grafiğin düşey ekseninde % geçen, yatay ekseninde ise elek açıklıklarının “mm” olarak 0,45'lik üstel kuvvet ile yükseltilmiş boyutları kullanılmaktadır. Gradasyon tespitinde kullanılacak standart elek açıklıklarının mm cinsinden 0,45 kuvvet değerleri hesaplanarak yatay eksen üzerindeki yerleri tespit edilir ve bu noktalara elek açıklıklarının değerleri yazılır [22,31]. Örneğin, göz açıklığı 4,75 mm olan bir eleğin yatay eksenindeki aritmetik değeri Şekil 4.39'da gösterildiği gibi 2,02 olacaktır.



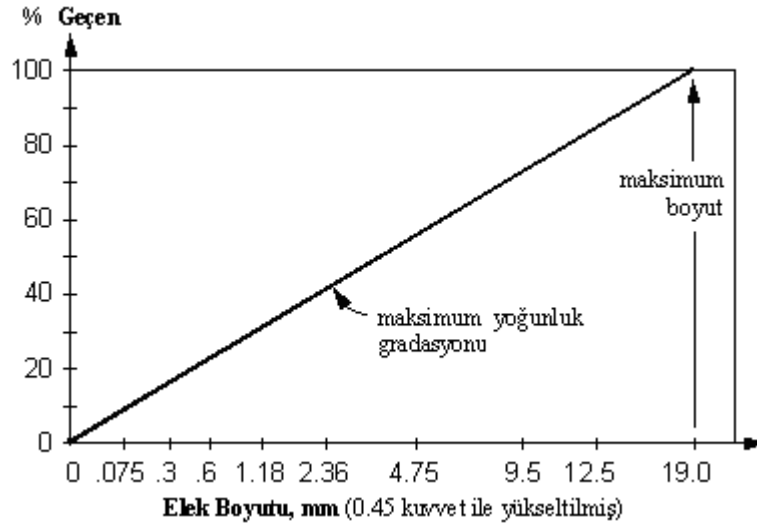
Şekil 4.39. 0,45 Üstel Kuvvet Grafik Çizim Esası [22,31]

Superpave agrega gradasyon grafiğinin önemli bir özelliği de maksimum yoğunluk gradasyonu veya hattıdır. Burada, 0,45 üstel kuvvet eğrisinin en önemli özelliği, maksimum yoğunluktaki gradasyonu elde etmek içindir. Bu yoğunluk ise, grafiğin orijininden yani 0,0

noktasından maksimum agrega boyutunun %100 geçtiğini gösteren noktaya çizilen doğru ile elde edilmektedir [20,22,31]. Maksimum yoğunluk hattına yakın veya paralel geçen malzemelerin içerisinde yeteri kalınlıkta asfalt film tabakasının oluşmasına izin vermeyecek kadar az boşluğa sahip olması sebebiyle, bu tür gradasyona sahip agrega karışımlarının kullanılmasından kaçınılmalıdır [31,35]. Ayrıca bu yöntemde, maksimum ve nominal maksimum agrega boyutu kavramları geliştirilmiştir.

- Nominal maksimum boyut: Agreg a 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.

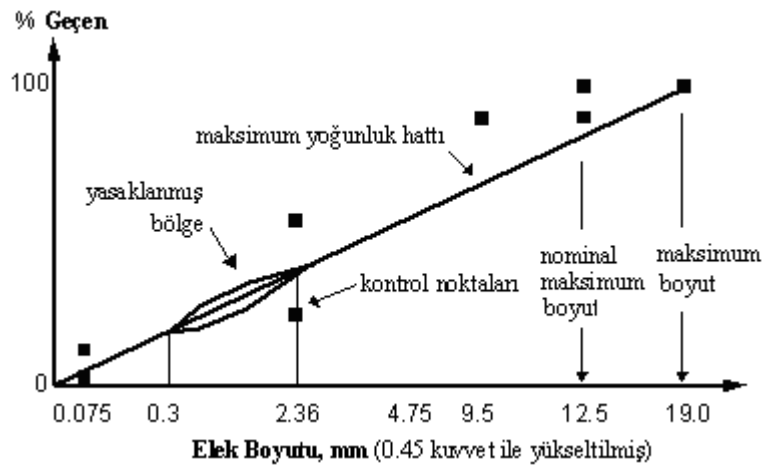
Şekil 4.40'da, 19 mm maksimum boyut veya 12,5 mm nominal maksimum boyuta sahip bir agrega karışımının maksimum yoğunluk gradasyonu verilmiştir.



Şekil 4.40. 19 mm Maksimum Boyut için Maksimum Yoğunluk Gradasyonu [22,31,152]

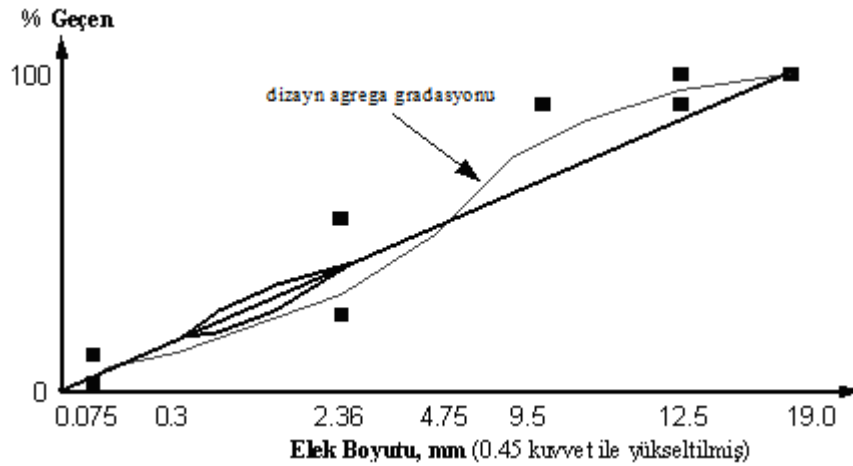
Agrega gradasyonunu belirlemek amacıyla, 0,45 kuvvet eğrisine “kontrol noktaları” ve “yasaklanmış bölge” kavramları getirilmiştir (Şekil 4.41). Kontrol noktaları, gradasyon eğrisinin geçmek zorunda olduğu sınırları belirlemektedir. Bu sınır noktaları nominal maksimum elek, orta elek (2,36 mm) ve en küçük boyutlu elek (0,075)’lerin 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. Eğer agrega gradasyonu bu bölgeden geçerse, şekli kambura benzediği için “kambur (humped) gradasyon olarak isimlendirilir. 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 VMA (agregalar arasındaki boşluk yüzdesi) sağladığından ve bu boşluklar içerisine yetersiz miktarda asfalt bağlayıcı gireceğinden karışımın durabilitesi azalacaktır. Ayrıca bu tip gradasyonlar asfalt içeriğine çok duyarlı olup asfalt içeriğindeki çok küçük değişimlerde bile kolayca plastik özellik gösterebilmektedir. Superpave sistemi, 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 [20,22,31,152].



Şekil 4.41. Superpave Gradasyon Limitleri [22,31]

Superpave yönteminde, agrega tane büyüklüklerinin kümülatif dağılımını tanımlamak amacıyla dizayn agrega gradasyonu terimi kullanılmaktadır. Yasaklanmış bölgeden geçmeden kontrol noktaları arasından geçen dizayn agrega gradasyonu, Şekil 4.42’de görüldüğü gibi Superpave agrega gradasyon şartlarını sağlamaktadır [22,31,152].



Şekil 4.42. Superpave Dizayn Agrega Gradasyonu [152]

Superpave yönteminde, Tablo 4.14’de görüldüğü gibi nominal maksimum agregâ boyutuna göre tanımlanan beş çeşit agregâ karışımı kullanılmaktadır. Ayrıca, bu beş Superpave karışımı için kullanılan sayısal gradasyon limitleri Tablo 4.15’de görülmektedir.

Tablo 4.14. Superpave Karışım Gradasyonları [22,31]

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

Tablo 4.15. Superpave Karışım Gradasyon Limitleri [149]

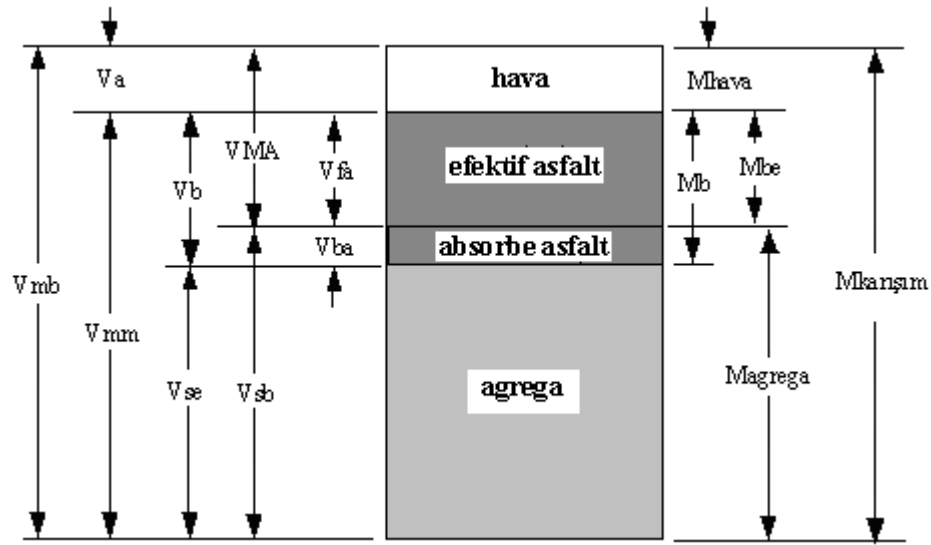
Standart Elek (mm)	Yüzde Geçen Kriteri (Kontrol Noktaları)				
	Nominal Maksimum Elek Boyutu				
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm
50,0					100
37,5				100	90–100
25,0			100	90–100	
19,0		100	90–100		
12,5	100	90–100			
9,5	90–100				
2,36	32–67	28–58	23–49	19–45	15–41
0,075	2,0–10,0	2,0–10,0	2,0–8,0	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

4.3. Karışımların Hacimsel Özellikleri

Asfalt karışımların davranışı dikkate alındığında hesaba katılması gereken unsur, asfalt bağlayıcı ve agregâ bileşenlerinin hacimsel oranlarıdır. Superpave yöntemini geliştiren araştırmacılar, bitümlü karışımların hacimsel özelliklerinin çok önemli olduğunu değerlendirmişler ve bu sebeple hacimsel karışım tasarım protokolünü geliştirmişlerdir. Çoğu karışım tasarım yönteminde önemli rol oynayan bitümlü sıcak karışımların (BSK) hacimsel analizleri, Superpave yönteminde de büyük önem arz etmektedir [22, 31].

Sıkıştırılmış bir kaplama karışımının hacimsel özellikleri olan hava boşlukları (Va), mineral agregâlar arasındaki boşluklar (VMA), asfaltla dolu boşluklar (VFA) ve efektif asfalt

içeriği (Pbe) kaplamanın olası servis performansının göstergesi olarak dikkate alınmaktadır. Dizayn asfalt karışımı ile ilgili doğru seçim yapabilmek için bu özelliklerle ilgili tanımlama ve analitik yöntemleri anlamak gereklidir [22,155]. Bitümlü sıcak karışımların kütle ve hacim özelliklerini tanımlamak için kullanılan model bileşen diyagramıdır. Bileşen diyagramı, sıkışmış bir bitümlü sıcak karışım numunesindeki hava boşlukları, asfalt çimentosu ve mineral agrega bileşenleri, ayrı bileşenler gibi gösterilerek dikkate alınmaktadır (Şekil 4.43). Bileşen diyagramının basitleştirilmiş şekli, bitümlü sıcak karışım analizinde kullanılan hacim ve kütle ilişkilerini canlandırmaya yardımcı olmaktadır [22,31,155].



Şekil 4.43. Sıkışmış BSK Numunesinin Bileşen Diyagramı [31,34,155]

- VMA: Mineral agregadaki boşluk hacmi,
- Vmb: Sıkışmış karışımın hacmi,
- Vmm: Asfalt karışımın boşluksuz hacmi,
- Vfa: Asfalt ile dolu boşluk hacmi,
- Va: Hava boşluk hacmi,
- Vb: Asfalt bağlayıcının hacmi,
- Vba: Absorbe (emilen) asfalt bağlayıcı hacmi,
- Vsb: Mineral agreganın hacmi (hacim özgül ağırlığı),
- Vse: Mineral agreganın hacmi (efektif özgül ağırlığı),
- Mb: Asfalt bağlayıcının kütlesi,
- Mbe: Asfalt bağlayıcının efektif kütlesi,
- Magrega: Agreganın kütlesi,
- Mhava: Havanın kütlesi,
- Mkarışım: Asfalt karışımın toplam kütlesi.

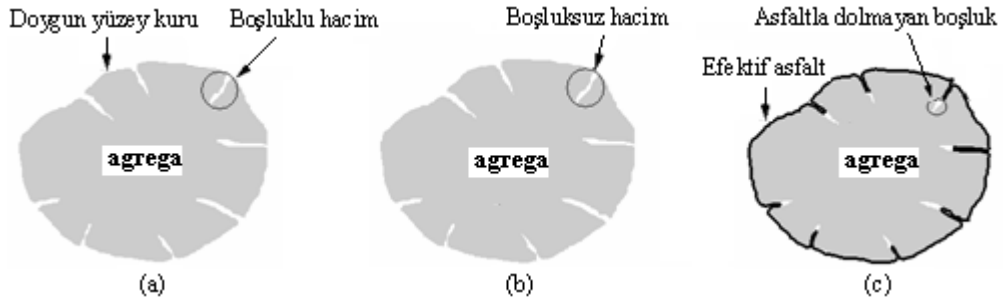
4.3.1. Özgöl Ağırlıklar

Özgöl ağırlık, bir maddenin birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25 °C'deki suyun ağırlığına oranı olarak tarif edilir [16]. Başka bir deyişle, bir maddenin yoğunluğunun 25 °C'deki yoğunluğu 1,00 gr/cm³ olan suyun yoğunluğuna bölümü olarak ifade edilir. Sıklıkla yoğunluk ve özgöl ağırlık özdeş olarak kullanılırlar ancak sayısal bakımdan bir eşitlik söz konusu olmasına rağmen özgöl ağırlık birimsiz bir değerdir [31].

Bitümlü sıcak karışımların analizinde, karışımın özgöl ağırlığının olduğu gibi özel bileşenlerinin de özgöl ağırlıklarında bileşen diyagramındaki hacim ve kütle değerleri kullanılmaktadır.

4.3.1.1. Agregat Özgöl Ağırlıkları

Mineral agregat poroz veya gözenekli olması sebebiyle belirli değerlere kadar suyu ve asfaltı absorbe edebilir. Ayrıca, her agreganın absorbe ettiği su ve asfalt oranı birbirinden farklı olacaktır. Agregaların özgöl ağırlıklarının ölçülmesinde kullanılan üç yöntem bu farklılığı göz önüne almaktadır. Kullanılan bu yöntemler hacim, zahiri ve efektif özgöl ağırlıklardır. Şekil 4.44'te agregat özgöl ağırlık hesaplamalarında boşluklar dikkate alınarak esas alınan hacim değerleri görülmektedir.



Şekil 4.44. Agreganın Hacim (a), Zahiri (b) ve Efektif (c) Özgöl Ağırlık Hacimleri [31]

a) Hacim Özgöl Ağırlık (Gsb); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki geçirgen malzemenin (geçirgen ve geçirgen olmayan boşluklar dâhil) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır [10,22,31]. Başka bir deyişle, agregat hacim özgöl ağırlığı agregadaki su geçiren boşlukların hacmini (doygun yüzey kuru hacim) de kapsar ve aşağıdaki bağıntı ile bulunur [31].

$$Gsb = (Kuru Ağırlık/Boşluklu Hacim)/1,000 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.24)$$

Boşluklu hacim; dane katı hacmi ve su geçiren boşlukların hacim toplamından ibarettir.

b) Zahiri Özgöl Ağırlık (Gsa); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki geçirgen olmayan malzemenin havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır [10,22,31]. Diğer bir ifadeyle, agrega zahiri özgöl ağırlığı, agregadaki suyun nüfuz ettiği boşluk hacmini kapsamaz ve aşağıdaki bağıntı ile bulunur [31].

$$Gsa = (Kuru Ağırlık/Zahiri Hacim)/1,000 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.25)$$

Zahiri hacim; agrega kütesinin boşluklar çıktıktan sonraki katı hacmidir.

c) Efektif Özgöl Ağırlık (Gse); Standart bir sıcaklıkta, birim hacimdeki geçirgen malzemenin (asfalt absorbe eden boşluklar hariç) havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır [10,22,31]. Başka bir deyişle, agrega efektif özgöl ağırlığı agregadaki asfalt tarafından ulaşılamamış ancak su geçiren boşlukların hacmini de kapsar ve aşağıdaki bağıntı ile bulunur [31].

$$Gse = (Kuru Ağırlık/Efektif Hacim)/1,000 \text{ gr/cm}^3 \quad (4.26)$$

Efektif hacim; dane katı hacmi ve asfaltla dolmamış su geçiren boşlukların hacim toplamından ibarettir.

Özgöl ağırlıklar karşılaştırıldığında, agrega ağırlığının değişmediği ancak hacminin değiştiği görülmektedir. Bu durumda hacim, zahiri ve efektif özgöl ağırlık hesaplamalarında alınan hacim değerleri arasında $V_{sb} > V_{se} > V_{sa}$ ve özgöl ağırlık değerleri arasında $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ ilişkisi bulunmaktadır.

4.3.1.2. Karışım Özgöl Ağırlıkları

Bitümlü sıcak karışımların maksimum teorik özgöl ağırlığı (Gmm) ve hacim özgöl ağırlığı (Gmb) değerleri, karışımın hacimsel özelliklerinin tespit edilmesinde çok önemlidir.

Maksimum Teorik Özgöl Ağırlık (Gmm); Standart bir sıcaklıkta, asfalt ve agregadan oluşan karışımın (boşluksuz) birim hacminin havadaki ağırlığının, standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Diğer bir ifadeyle, asfalt ve agrega karışımının ağırlığının hava boşluğu içermeyen karışım hacmine bölümünden ibarettir. AASHTO T209/ ASTM D2041 ile belirlenen teorik maksimum özgöl ağırlık, asfalt betonu karışımındaki hava boşluğu miktarının ve yapım süresince kaplama sıkıştırması için hedef yoğunluk değerinin hesaplanmasını sağlar [34].

Hacim Özgöl Ağırlık (Gmb); Standart bir sıcaklıkta, sıkışmış asfalt ve agrega karışımının (boşluklu) birim hacminin standart sıcaklıkta ve aynı hacimdeki damıtılmış suyun ağırlığına oranıdır. Diğer bir ifadeyle, hacim özgöl ağırlığı asfalt ve agrega karışımının ağırlığının hava boşluğu içeren karışım hacmine bölümünden ibarettir.

4.3.2. Asfalt Karışımların Analizi ve Şartname Gereksinimleri

Superpave karışım dizaynı, agrega hacim özgül ağırlığı (G_{sb}) cinsinden sıkıştırılmış kaplama karışımlarının mineral agregalar arasındaki boşluk (VMA) değerini hesaplar. VMA değerini hesaplamak için diğer agrega özgül ağırlık değerlerini kullanmak, VMA kriterinin uygulanamayacağı ve karışımın Superpave kriterlerini karşılamadığı anlamına gelir. Agrega efektif özgül ağırlığı (G_{se}), sıkıştırılmış bir asfalt karışım kaplamadaki hava boşluklarının hesaplanmasında esas teşkil eder. Mineral agregadaki boşluklar (VMA) ve hava boşlukları (V_a), kaplama karışımı hacminin yüzdeleri olarak ifade edilirler. Asfaltla dolu boşluklar (VFA), efektif asfalt ile dolmuş mineral agregadaki boşlukların (VMA) yüzdesidir. Karışımındaki asfalt içeriğinin belirlenme şekline bağlı olarak, efektif asfalt içeriği ya kaplama karışımının toplam ağırlığının ya da karışımındaki agregaların ağırlığının ağırlıkça yüzdesi olarak ifade edilmektedir. V_a , VMA ve VFA değerleri hacimsel büyüklük oldukları için tartılamadıklarından, kaplama karışımı öncelikle hacimsel olarak tasarlanmalı veya analiz edilmelidir. Tasarım amacıyla bu hacimsel yaklaşım, işyeri karışım formülü elde etmek üzere kolayca ağırlık ölçütlerine dönüştürülebilirler [22,31]. Boşluk analizleri için gerekli ölçümler ve hesaplamalar aşağıdaki işlem sırasına göre yapılabilir.

- Kaba agregaların hacim özgül ağırlığı (AASHTO T85 veya ASTM C127) ve ince agregaların hacim özgül ağırlığı (AASHTO T84 veya ASTM C128) ölçülür.
- Asfalt çimentosunun özgül ağırlığı (AASHTO T228 veya ASTM D70) ve mineral fillerin özgül ağırlığı (AASHTO T100 veya ASTM D854) ölçülür.
- Kaplama karışımı agrega kombinasyonunun hacim özgül ağırlığı hesaplanır.
- Sıkıştırılmamış (gevşek) asfalt karışımının maksimum teorik özgül ağırlığı (AASHTO T209 veya ASTM D2041) ölçülür.
- Sıkıştırılmış asfalt karışımının hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166 veya ASTM D1188/ D2726) ölçülür.
- Agreganın efektif özgül ağırlığı hesaplanır.
- Diğer asfalt içeriklerindeki maksimum özgül ağırlıklar hesaplanır.
- Agreganın asfalt absorpsiyonu hesaplanır.
- Asfalt karışımındaki efektif asfalt içeriği hesaplanır.
- Sıkıştırılmış asfalt karışımında, mineral agregadaki boşluk yüzdesi hesaplanır.
- Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki hava boşluğu yüzdesi hesaplanır.
- Sıkıştırılmış asfalt karışımındaki asfalt ile dolu boşlukların yüzdesi hesaplanır [10,22].

Bu hesaplamalar için gerekli olan bağıntılar ve şartname gereklilikleri aşağıda verilmiştir.

4.3.2.1. Agreganın Hacim Özgöl Ağırlığı (Gsb)

Bir asfalt karışımında kullanılan agreganın, farklı özgül ağırlıklarına sahip kaba agreganın, ince agreganın ve mineral fillerin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edildiğinden, toplam agreganın hacim özgül ağırlığı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (4.27)$$

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı,

P₁, P₂, P_N: Her bir agreganın ağırlıkça yüzdesi,

G₁, G₂, G_N: Her bir agreganın hacim özgül ağırlığı.

Mineral fillerin hacim özgül ağırlığını tam olarak belirlemek güç olduğundan, fillerin hacim özgül ağırlığı yerine zahiri özgül ağırlık değeri kullanılabilir [10,22,155].

4.3.2.2. Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı (Gse)

Agreganın efektif özgül ağırlığı (Gse), asfalt kaplama karışımının teorik maksimum özgül ağırlığına (Gmm) bağlı olduğundan, agreganın tanelerindeki asfalt absorbe eden boşluklar hariç tüm boşlukları içerir ve aşağıdaki bağıntı ile tespit edilir.

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (4.28)$$

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Pmm: Toplam gevşek karışımın ağırlıkça yüzdesi = 100,

Gmm: Asfalt karışımının (boşluksuz) maksimum özgül ağırlığı (AASHTO T209/ASTM D2041),

Pb: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak, AASHTO T209/ASTM D2041 deneyi yapıldığında kullanılan asfalt içeriği,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı.

Agreganın absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi, her zaman absorbe edilen suyun hacminden daha az olmaktadır. Bu sebeple agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Aksi durumda bu değerlerin yanlış olduğu kabul edilir. Bu amaçla, asfalt karışımının maksimum özgül ağırlığı ve karışımın yapısı ile ilgili hesaplamalar, agreganın ve toplam asfalt içeriği bakımından hatanın kaynağını bulmak için kontrol edilmelidir [22].

4.3.2.3. Farklı Asfalt İçeriğindeki Karışımların Maksimum Özgöl Ağırlığı (Gmm)

Verilen bir agregaya ile bir kaplama karışımı tasarımında her bir asfalt içeriğindeki karışımın maksimum özgül ağırlık (Gmm) değeri, her asfalt içeriği için hava boşluğu yüzdesini hesaplamak amacıyla gereklidir. Maksimum özgül ağırlığı, AASHTO T209/ASTM D2041 standardı ile her asfalt içeriği için tespit edilebilir ancak karışım, tasarım asfalt içeriğine yaklaştığı zaman deney en iyi sonucu verir. Ayrıca, maksimum özgül ağırlığın hesaplanmasında iki veya üç numunenin kullanılması tercih edilmektedir.

Ölçülmüş olan her maksimum özgül ağırlık ve buna bağlı olarak hesaplanan efektif özgül ağırlıklarının ortalamasından efektif özgül ağırlığı belirlendikten sonra, diğer asfalt içerikleri için maksimum özgül ağırlık değeri (4.29) bağıntısı ile bulunabilir. Bu bağıntı, agreganın efektif özgül ağırlığının sabit olduğunu kabul eder ve bu doğrudur. Çünkü asfalt absorpsiyonu, asfalt içeriğindeki değişmelerle kayda değer bir değişim göstermez [10,22].

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}} \quad (4.29)$$

Gmm: Asfalt karışımın (boşluksuz) maksimum özgül ağırlığı,

Pmm: Toplam gevşek karışımın ağırlıkça yüzdesi (Pmm= 100),

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agregaya içeriği,

Pb: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği,

Gse: Agregaya karışımının efektif özgül ağırlığı,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı.

4.3.2.4. Agreganın Asfalt Absorpsiyonu (Pba)

Asfalt absorpsiyonu, karışımın toplam ağırlığının yüzdesi olarak değil, toplam agregaya ağırlığının yüzdesi olarak tarif edilir ve aşağıdaki (4.30) bağıntısı ile tayin edilir [10,22]. Agregaya tarafından absorbe edilen asfalt, karışım performansı üzerinde bir etkiye sahip değildir ancak agreganın özgül ağırlığına bağlı olarak değişiklik gösterir [34].

$$Pba = 100 \times \frac{Gse - Gsb}{GsbGse} \times Gb \quad (4.30)$$

Pba: Agregaya ağırlığının yüzdesi olarak absorbe edilen asfalt,

Gse: Agregaya karışımının efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agregaya karışımının hacim özgül ağırlığı,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı.

4.3.2.5. Asfalt Karışımın Efektif Asfalt İçeriği (Pbe)

Bir asfalt karışımın efektif asfalt içeriği (Pbe), agrega taneleri tarafından absorbe edilen asfalt miktarının toplam asfalt içeriğinden çıkarılmasıdır. Diğer bir ifadeyle, toplam asfalt içeriğinin agrega tanelerini kaplayan miktarı ve asfalt karışımın performansını belirleyen asfalt içeriğidir. Efektif asfalt içeriği (Pbe), aşağıdaki bağıntı ile bulunur [10,22,34].

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} \times Ps \quad (4.31)$$

Pbe: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği,

Pb: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği,

Pba: Agreganın ağırlığının yüzdesi olarak absorbe edilen asfalt,

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agreganın içeriği.

4.3.2.6. Sıkıştırılmış Asfalt Karışımındaki Mineral Agregadaki Boşluk (VMA) Yüzdesi

Mineral agregadaki boşluklar (VMA), efektif asfalt içeriği ve hava boşlukları içeren sıkıştırılmış bir asfalt karışımında, agrega taneleri arasındaki granüler boşluklar olarak tanımlanır ve karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. VMA, agreganın hacim özgül ağırlığına göre hesaplanır ve sıkıştırılmış asfalt karışımın hacim özgül ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Bu sebeple VMA, sıkıştırılmış asfalt karışımın toplam hacminden, hacim özgül ağırlığına belirlenmiş agreganın hacminin çıkartılması ile hesaplanır. VMA yüzdesi, karışım ağırlığı ve agreganın ağırlığının yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [22,34].

Eğer karışım bileşimi toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (4.32)$$

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı,

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (AASHTO T166/ASTM D1188-D2726)

Ps: Toplam karışımın ağırlıkça yüzdesi olarak agreganın içeriği.

Eğer karışım bileşimi toplam agreganın ağırlığının yüzdesi olarak tespit edilmişse:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{100 + Pb} \times 100 \quad (4.33)$$

Pb: Toplam agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak asfalt içeriği.

Superpave yönteminde, agreganın boyutuna bağlı olarak %4 dizayn hava boşluğunda tavsiye edilen minimum VMA değerleri Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.16. Superpave VMA Gereksinimleri [22,31,34,136]

Nominal Maksimum Agregâ Boyutu, mm	Minimum VMA, %
9,5	15,0
12,5	14,0
19	13,0
25	12,0
37,5	11,0

4.3.2.7. Sıkıştırılmış Karışımdaki Hava Boşlukları (Va) Yüzdesi

Toplam sıkıştırılmış asfalt karışımındaki hava boşlukları (Va), asfalt ile kaplanmış agregâ taneleri arasında oluşan küçük hava parçacıklarıdır. Sıkıştırılmış bir karışımdaki hava boşluklarının hacimce yüzdesi aşağıdaki bağıntı ile belirlenir ve bütün trafik düzeyleri için tavsiye edilen dizayn Va değeri %4'dür [22,31,34,136].

$$Va = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (4.34)$$

Va: Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları,

Gmm: Asfalt karışımın maksimum özgül ağırlığı (hesaplanmış veya deneyle bulunmuş),

Gmb: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı.

4.3.2.8. Sıkıştırılmış Karışımdaki Asfaltla Dolu Boşluk (VFA) Yüzdesi

Asfaltla dolu olan mineral agregadaki boşluk yüzdesi (VFA), agregâ tarafından absorbe edilmiş asfalt hariç aşağıdaki bağıntı ile belirlenir [10,22,34].

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA} \quad (4.35)$$

VFA: VMA'nın yüzdesi olarak asfalt ile dolu boşluklar,

VMA: Karışımın toplam hacminin yüzdesi olarak mineral agregadaki boşluklar,

Va: Sıkıştırılmış bir karışımda toplam hacmin yüzdesi olarak hava boşlukları.

Superpave yönteminde, trafik düzeyine bağlı olarak %4 dizayn hava boşluğu yüzdesinde kabul edilebilir VFA değer aralığı Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Superpave VFA Gereksinimleri [22,31,34,136]

Dizayn Trafik (ETDY), milyon	Dizayn VFA, %
<0,3	70–80
0,3–3	65–78
3–10	65–75
10–30	65–75
≥30	65–75

4.4. Superpave Karışım Tasarımı

Superpave karışım dizayn yöntemi, kendi kriterlerini sağlayan uygun agrega ve asfalt bağlayıcı malzemelerinin seçilmesini içermektedir. Karışım dizayn işlemleri, Superpave agrega gradasyon kriterlerini sağlayan farklı agrega deneme karışımlarını hazırlayarak, bu deneme karışımlarını asfalt bağlayıcı ile karıştırmak ve bu sıcak karışımları kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutmak, yaşlanmış numuneleri sıkıştırmak ve agrega deneme karışımlarının hacimsel özelliklerini analiz ederek en iyi agrega deneme karışımını dizayn agrega gradasyonu olarak seçmek ve seçilen dizayn agrega gradasyonu için gerekli olan dizayn asfalt içeriğini belirlemek amacıyla çeşitli asfalt içeriklerinde karışım numunesi hazırlayarak sıkıştırmaktır.

Superpave karışım numunesi hazırlama deney prosedürleri, AASHTO TP4 “SHRP Yoğurmalı Sıkıştırıcı ile Sıkıştırılmış Modifiye ve Modifiye Olmayan Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması” ve AASHTO PP2 “Bitümlü Karışımların Kısa ve Uzun Dönem Yaşlandırılması” standartları ile belirtilmiştir [22].

4.4.1. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcısı

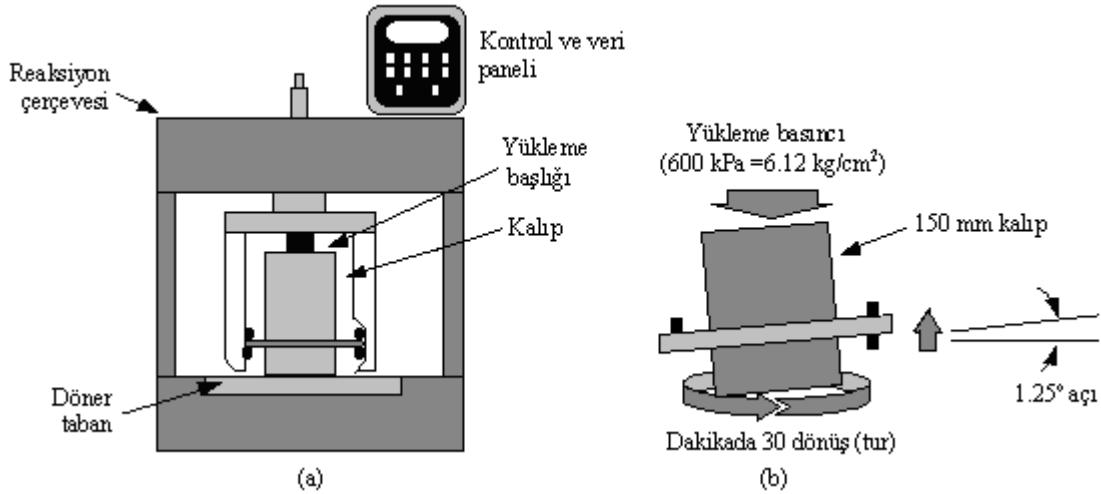
Superpave karışım tasarımında kullanılan en önemli araç “Superpave Gratory Compactor” denilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (SGC)’dır. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı, hacimsel analizler için karışım numuneleri üretmek ve ayrıca numune üretilirken sıkıştırma işlemi süresince veriler kaydederek numunenin yoğunluğunu ölçmek için kullanılmaktadır [22]. Bu amaçla günümüzde birçok yoğurmalı sıkıştırıcı çeşidi üretilmiştir.

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı, SHRP araştırmacıları tarafından sıcak karışımların arazideki sıkışmasını en iyi temsil edecek bir laboratuvar sıkıştırma metodu olarak geliştirilmiştir. SGC temelde Texas yoğurmalı sıkıştırıcısının, bir Fransız yoğurmalı sıkıştırıcısının sıkışma prensipleri ile çalışacak şekilde modifiye edilmesi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan bu cihaz ile, arazi şartlarına en uygun sıkıştırma elde edilmesi, iri daneli agregaların karışımda kullanılabilmesi, sıkışabilirliğin ölçülmesi ve tesislerde kalite kontrol işlemlerinde kullanılabilecek kadar kolay taşınması gibi hedefler gerçekleştirilmiştir. Cihaz ayrıca, 150 mm (6 inç) iç çapa sahip kalıbı ile maksimum tane boyutu 50 mm (nominal maksimum 37,5mm) olan agrega içeren karışım numunelerinin hazırlanmasına imkan vermektedir [10,22,31,34]. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı şu bölümlerden oluşmaktadır;

- Reaksiyon çerçevesi, dönen taban ve motor,
- Yükleme sistemi, yükleme kolu ve basınç ölçer,
- Yükseklik ölçme ve kaydetme sistemi,

- Kalıp ve taban plakası.

SHRP tarafından geliştirilen Superpave yoğurmalı sıkıştırıcının şematik görünüşü ve kalıp konfigürasyonu Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



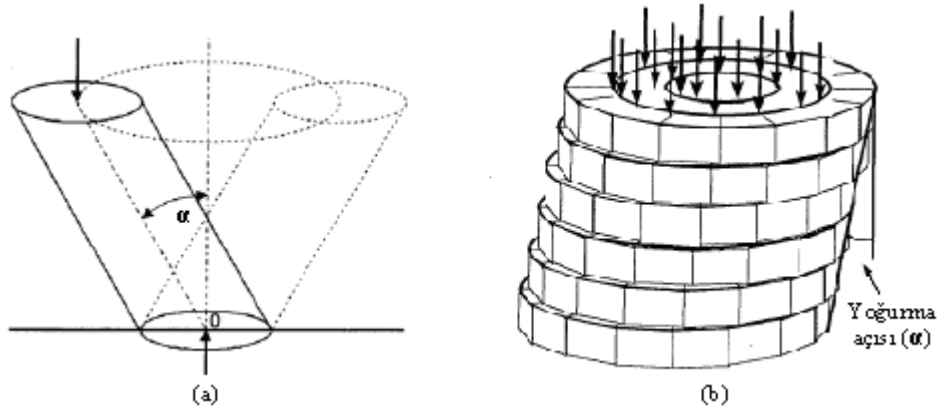
Şekil 4.45. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı (a) ve Kalıp Konfigürasyonu (b) [20,22,31,134,155]

Yükleme başlığı vasıtasıyla 600 ± 18 kPa ($6,12 \text{ kg/cm}^2$)'lik sabit bir basınç numune üzerine tatbik edilirken numune kalıbı altındaki döner taban $1,25 \pm 0,02^\circ$ 'lik açı ile dakikada $30 \pm 0,5$ dönüş yapmakta ve kontrol cihazı uygulanan yükü sabit tutarak numunenin yüksekliğini deney boyunca kaydetmektedir. Numune yüksekliğinin ölçümü SGC'nin önemli bir fonksiyonudur. Numunenin sıkıştırma sırasındaki yoğunluğunu, numune ağırlığı, kalıbın iç çapı ve numune yüksekliği bilindiğinden hesaplamak mümkündür [20,22,31,34,134]. Dönüş (tur) sayısı arttıkça asfalt karışımın yoğunluk değişimi Şekil 4.46'da görüldüğü gibi olmaktadır.

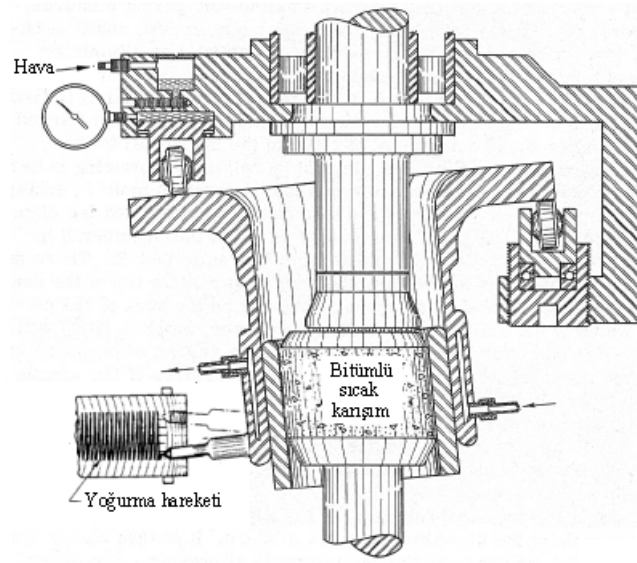


Şekil 4.46. SGC'de Karışım Sıkıştırma Karakteristikleri [20, 22,31,34,134]

Çeşitli şekillerde imal edilen yoğurmalı sıkıştırıcılar, sabit bir basınç altında ve belirli bir açıda çalıştırıldıklarında, Şekil 4.47'de görüldüğü gibi kalıba bir jirasyon hareketi vererek numuneyi kesme gerilmeleri altında sıkıştırırlar. Şekil 4.48'de, bir yoğurmalı sıkıştırıcının çalışır durumdaki yoğurma hareketinin şematik görünüşü verilmiştir.

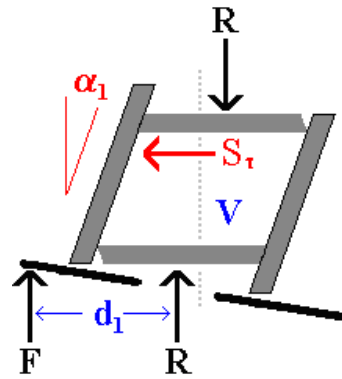


Şekil 4.47. Numunenin Dönme (a)[156,157,158,159] ve Sıkıştırma Boyunca Kesme (b) Hareketi [52,160]



Şekil 4.48. Bir Yoğurmalı Sıkıştırıcının Şematik Görünüşü [105, 159, 161]

Sıkıştırma esnasında numunede meydana gelen kesme gerilmesi (S_r), Şekil 4.49'daki gibi oluşur ve (4.36) bağıntısı ile bulunur.



Şekil 4.49. Numuneye Etki Eden Kuvvetler [162, 163]

$$S_r = (F \times d_1) / V \quad (4.36)$$

Burada, S_r (kg/cm²) kesme gerilmesi, F (kg) kalıba açmak için gereken kuvvet, d_1 (cm) bu kuvvetin eksenel kuvvete mesafesi, V (cm³) numunenin hacmidir. Numuneye etki eden basınç kuvveti (P_b); eksenel kuvvetin (R), numune kesit alanına (A_o) bölümü ile elde edilir [162, 163]. Yoğurma esnasında uygulanan sabit basınç (600 kPa) altında, numunelere etki eden eksenel kuvvet (R) değeri, numune yüzey alanları dikkate alındığında, 150 mm'lik numuneler için yaklaşık 10600±320 N, 100 mm'lik numuneler için 4710±140 N olarak hesaplanmaktadır [156,164].

Brown ve Buchanan tarafından yapılan literatür araştırmaları sonucunda hazırladıkları bir raporda, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı kullanılarak 100 mm ve 150 mm'lik karışım numunelerinin hazırlanabileceğini, ancak 100 mm'lik numunelerin hazırlanması durumunda nominal maksimum tane boyutu 19 mm'den küçük olan agreganın kullanılması gerektiğini, buna karşılık; 150 mm'lik numunelerin 37,5 mm nominal maksimum tane boyutuna kadar olan agreganın karışımlarında kullanılabildiğini belirtmişlerdir [165]. Ayrıca, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı kullanılarak hazırlanan numunelerin yoğunluk tespiti için Colorado'da hazırlanan bir laboratuvar deney prosedüründe, her iki numune için 600 kPa basınç uygulanması gerektiği belirtilmiştir [164]. Yıldırım ve arkadaşları, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısını kullanarak, 100 mm ve 150 mm'lik karışım numunelerini sıkıştırmış ve yoğunluk değerlerini karşılaştırmışlardır. Deney sonucunda, sıkıştırılan 150 mm'lik numunelerin hacim özgül ağırlık değeri 2,347; 100 mm'lik numunelerin ise 2,336 bulunmuştur. Sonuç olarak, bu küçük farkın yaklaşık %0,4 hava boşluğu ve %0,2 asfalt içeriğinde değişim gösterdiği, dolayısıyla bu farkın önemli olmadığı ve 100 mm'lik numunelerin Superpave karışım dizaynında kullanılabileceğini belirtmişlerdir [166]. Ayrıca Czor ve arkadaşları, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısını kullanarak 100 mm'lik numuneler hazırlamış ve sonuçlarını 150 mm'lik numunelerle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, mühendislik bakımından iki numunenin sonuçları arasında önemli bir fark olmadığı ve maksimum tane boyutu 25,4 mm veya daha küçük boyutlu agreganın hazırlanmasında 100 mm'lik kalıpların kullanılabileceği belirtilmiştir. İlave olarak, dört kat daha küçük olan 100 mm'lik numunelerin hazırlanmasının, zaman, malzeme, işçilik ve ulaşım kolaylığı sağlayacağı ve ayrıca yüzey karışımlarında genellikle 25,4 mm'den küçük boyutlu agreganın kullanılması sebebiyle 150 mm'lik numunelerin hazırlanmasına gerek olmadığı belirtilmiştir [167].

Mevcut karışım dizayn yöntemlerinde olduğu gibi, Superpave sisteminde de asfalt karışımlar belirli bir sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılmaktadır. Superpave sisteminde bu sıkıştırma enerjisi yoğurma sayısının (N_{des}) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Kompaktörün dönüş veya yoğurma sayısına bağlı olarak sıkıştırma enerjisinin seviyesi Tablo 4.18'de verilmiştir. Dönüş

sayısı veya sıkıştırma enerji seviyesi, dizayn trafik yüküne ve ortalama dizayn yüksek hava sıcaklığına bağlı olarak Ndes değeri olarak alınmaktadır. Ortalama dizayn yüksek sıcaklığı olarak, kaplamanın yapılacağı bölgenin iklimini temsil eden ortalama 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı (%50 güvenirlilikteki sıcaklık) esas alınır ve Superpave yazılımı tarafından belirlenir. Trafik ise dizayn eşdeğer trafik yükleme sayısı ile temsil edilir [20,22,31].

Tablo 4.18. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırma Enerjisi [20,22, 31,168]

Dizayn Trafik (ETDY), milyon	Ortalama Dizayn Yüksek Hava Sıcaklığı											
	<39			39–40			41–42			43–44		
	Nini	Ndes	Nmaks	Nini	Ndes	Nmaks	Nini	Ndes	Nmaks	Nini	Ndes	Nmaks
<0,3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0,3–1	7	76	117	7	83	129	7	83	129	8	93	146
1–3	7	86	134	8	95	150	8	95	150	8	105	167
3–10	8	96	152	8	106	169	8	106	169	9	119	192
10–30	8	109	174	9	121	195	9	121	195	9	135	220
30–100	9	126	204	9	139	228	9	139	228	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	158	262	10	172	288

Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmış karışımların analizi, üç sıkıştırma düzeyindeki (Nini, Ndes, Nmaks) teorik maksimum özgül ağırlığın (Gmm) yüzdesi esas alınarak yapılmaktadır. Bu sıkıştırma düzeyleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

- Nini; başlangıç yoğurma sayısıdır ve yapım sırasında karışımın sıkışabilirliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Bu aşamada çok çabuk sıkışan karışımlar, yapım sırasında yumuşak ve trafik altında dengesiz olabilir. Bu sebeple karışım, başlangıç yoğurma sayısında en az % 11 hava boşluğu yüzdesine sahip olmalıdır.
- Ndes; dizayn yoğurma sayısıdır ve belirlenen trafik yüklerinin etkisiyle kaplamada oluşacağı düşünülen yoğunluğun aynısını elde etmek için numune üretiminde esas alınmaktadır. Karışım tasarımında, bu yoğurma sayısı için arzu edilen hava boşluğu yüzdesi % 4'dür.
- Nmaks; maksimum yoğurma sayısıdır ve arazide bu değeri hiç geçmeyecek bir laboratuvar yoğunluğu elde etmek için kullanılmaktadır. Bu yoğurma sayısındaki hava boşluğu yüzdesi çok düşük ise kaplama karışımı trafik yükleri altında çok fazla sıkışabilir ve tekerlek izi oluşumu aşırı olarak artış gösterir. Bu sebeple maksimum yoğurma sayısındaki hava boşluğu yüzdesi en az %2 olmalıdır [10,34].

Başlangıç ve maksimum yoğurma sayıları ile dizayn yoğurma sayısı arasında aşağıdaki gibi ilişkiler mevcuttur [10,20,22,35,127].

$$\text{Log Nmaks} = 1,10 \times \text{Log Ndes} \quad (4.37)$$

$$\text{Log Nini} = 0,45 \times \text{Log Ndes} \quad (4.38)$$

Yukarıda ifade edilen sıkıştırma düzeylerine bağlı olarak Superpave yoğunluk gereksinimleri Tablo 4.19’da verilmiştir.

Tablo 4.19. Superpave Sıkıştırma Kriterleri [10,149,151]

Dizayn Trafik (ETDY), milyon	Gerekli Yoğunluk (%Gmm)		
	Nini	Ndes	Nmaks
<0,3	≤91,5	96,0	≤98,0
0,3–3	≤90,5		
3–10	≤89,0		
10–30			
>30			

4.4.2. Dizayn Agrega Gradasyonu Seçimi

Dizayn agregası gradasyonu seçilmeden önce kullanılacak agregası ve asfalt bağlayıcı malzemelerinin seçilmiş ve onaylanmış olması gerekir. Dizayn agregası gradasyonunu seçmek için kullanılacak maksimum boyuttaki agregaya boyutuna göre bir gradasyon dizisini kapsayan üç deneme karışımı başlangıç olarak yeterli görülmektedir. Bu deneme karışımları, belirli elek aralıkları için Superpave karışım gradasyonu şartname ölçütleri olan kontrol noktaları ve yasak bölgeleri ile karşılaştırılarak elde edilir. Deneme karışımları seçildiğinde, karışım agregasının mutabakat ve kaynak özellikleri ile özgül ağırlık özelliklerinin değerlendirilmesi gerekir. Agregası özellikleri değerlendirildikten sonraki adım, her deneme karışımı için hazırlanan asfalt karışım numunelerini sıkıştırmak ve hacimsel özelliklerini belirlemektir. Her deneme karışımı için gereken başlangıç asfalt bağlayıcı içeriği, agregası karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile belirlenmektedir. Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı (Gse) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb) \quad (4.39)$$

Gse: Agregası karışımının efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agregası karışımının hacim özgül ağırlığı,

Gsa: Agregası karışımının zahiri özgül ağırlığı,

Bu bağıntıdaki 0,8 katsayısı, tasarımcının yorumuna bağlı olarak değiştirilebilir. Absorbsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5’e kadar azaltılabilir.

Agregası tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Vba = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \times \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse}\right) \quad (4.40)$$

Vba: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Pb: Bağlayıcı yüzdesi (0,05 alınabilir),

Ps: Agregat yüzdesi (0,95 alınabilir),

Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı (1,02 alınabilir),

Va: Hava boşluğu hacmi (karışıma göre, 0,04 cm³/cm³).

Efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn) \quad (4.41)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Sn: Agregat karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

Son olarak, başlangıç asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{(Gb \times (Vbe + Vba)) + Ws} \times 100 \quad (4.42)$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

$$Ws = \frac{Ps \times (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}\right)} \quad (4.43)$$

Hazırlanmış olan üç farklı agregat deneme karışımının her bir karışımı için en az iki numune, Superpave yoğurmalı sıkıştırıcısı (SGC) ile sıkıştırılır. Ayrıca her bir deneme karışımının maksimum teorik özgül ağırlığının (Gmm) tespit edilebilmesi için birer numune daha olmak üzere toplam 9 numune hazırlanmalıdır. Asfalt karışım numunelerinin sıkıştırılması için 150 mm'lik kalıp kullanılması durumunda 4600-4800gr agregat genellikle yeterli gelmektedir. Bu durumda sıkıştırılmış karışım numunesinin yüksekliği 115 mm civarında elde edilmektedir. Asfalt karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının tespitinde kullanılacak numuneler sıkıştırılmaz ve ağırlığı agregat boyutuna göre 1000 gr ile 2000 gr arasında değişir [20,22,31,135,136].

4.4.3. Karışımın Hazırlanması ve Sıkıştırılması

Asfalt karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, asfalt bağlayıcının viskozite-sıcaklık diyagramı kullanılarak tespit edilir. Bunun için, asfalt bağlayıcının iki değişik sıcaklıktaki viskozluğu tayin edilerek Şekil 4.25'deki grafik hazırlanır ve karıştırma için 0,17±0,02 Pa.s, sıkıştırma için 0,28±0,03 Pa.s viskozluk olacak şekilde asfalt bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenir. Ancak bu viskozite sınırları modifiye bağlayıcılar için geçerli değildir. Modifiye bağlayıcılar için üretici firma önerileri göz önüne alınmalıdır.

Hazırlanan asfalt bağlayıcı ve agreg a malzemesi, belirlenen karışım sıcaklığına 2–4 saat erişecek şekilde ısıtılır. Isıtılmış asfalt bağlayıcı ısıtılmış agreg a üzerine belirlenen miktarda dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metre kareye 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilir ve önceden ısıtılmış 135 °C’deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Kısa süreli yaşlandırma işleminden sonra numune maksimum teorik özgül ağırlığının tayininde kullanılacaksa, AASHTO T209/ASTM D2041 standardına göre devam edilir. Aksi taktirde sıkıştırma işlemine geçilir. İlk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve yerleştirilir. Yoğurmalı sıkıştırıcının sıkıştırma basıncı, açısı, yoğurma hızı ve yoğurma sayısı istenilen değerlere ayarlanarak hazırlanır. Kısa süreli yaşlandırma işleminden sonra numune etüvden alınır ve sıkıştırma sıcaklığı 135 °C’den fazla ise istenilen sıcaklığa ayarlanmış etüvde 30 dakika bekletilerek sıkıştırma sıcaklığına getirilir. Sıcaklık 135 °C’den az ise karışım oda sıcaklığında sıkıştırma sıcaklığına gelinceye kadar bekletilir. Hazırlanan karışım kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanır. Sabit 600 kPa basınç, 1,25°’lik yoğurma açısı altında karışım istenen yoğurma sayısı tamamlanıncaya kadar sürer. Sıkıştırma işleminden sonra sıkışan numune yaklaşık 5 dakikalık bir bekleme süresi sonunda zarar görmeden kalıptan çıkartılır ve örselenmeden soğumaya bırakılır [22, 31,169].

4.4.4. Verilerin Değerlendirilmesi

Superpave yoğurmalı sıkıştırma verileri, istenen her yoğurma işlemi için hesaplanmış hacim özgül ağırlık, düzeltilmiş hacim özgül ağırlık ve düzeltilmiş maksimum teorik özgül ağırlık yüzdesi hesaplanarak analiz edilir. Sıkıştırma esnasında numune yüksekliği sürekli olarak her dönüş için yazılım tarafından ölçülür ve kaydedilir. Sıkıştırılmış numunenin hacim özgül ağırlığı (Gmb) ve sıkıştırılmamış (gevşek) numunenin maksimum teorik özgül ağırlığı (Gmm) ölçülür. Herhangi bir yoğurma değeri için hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlık değeri olan Gmb(tahmini), karışım ağırlığının numunenin hacmine bölünmesi ile elde edilir.

$$Gmb(tahmini) = \frac{(Wm / Vmx)}{\gamma_{su}} \quad (4.44)$$

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

Wm: Numunenin ağırlığı (gr),

γ_{su} : Suyun yoğunluğu (1 gr/cm³),

Vmx: Numunenin (4.45) bağıntısı kullanılarak bulunan hacmi (cm³).

$$Vmx = \frac{\pi d^2 h_x}{4} \times 0.001 \text{ cm}^3 / \text{mm}^3 \quad (4.45)$$

d: Kalıbın çapı (100 mm veya 150 mm),

hx: Sıkıştırma esnasında numunenin yüksekliği (mm),

π : 3,1416

Bu hesaplama, numune kenarlarının düzgün ve boşluksuz olduğunu kabul eder ancak gerçekte böyle değildir. Numune yüzeyindeki pürüz ve boşluklar, numune hacminin düzgün kenarlı bir silindirin hacminden daha düşük olmasına sebep olur. Bu sebeple, hesaplanan tahmini hacim özgül ağırlığı (Gmb(tahmini)), ölçülen hacim özgül ağırlığı (Gmb(ölçülen)) ile oranlanarak bir düzeltme faktörü (C) değeri hesaplanır.

$$C = \frac{Gmb(ölçülen)}{Gmb(tahmini)} \quad (4.46)$$

C: Düzeltme faktörü,

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

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

Düzeltme faktörü kullanılarak, istenen yoğurma sayısındaki düzeltilmiş hacim özgül ağırlık değeri hesaplanır.

$$Gmb(düzeltilmiş) = C \times Gmb(tahmini) \quad (4.47)$$

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

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

Superpave yönteminde, yoğurma düzeyleri olan Nmaks, Ndes ve Nini değerleri, belirli bir proje için tasarım trafik düzeyi ve ortalama yüksek sıcaklık ile belirlenmiştir. 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) aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$Va = 100 - \%Gmm@Ndes \quad (4.48)$$

Va: Toplam hacmin yüzdesi olarak Ndes’deki hava boşluğu,

%Gmm@Ndes: Ndes’deki maksimum teorik ağırlık yüzdesi.

Mineral agregadaki boşluk yüzdesi ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\%VMA = 100 - \left(\frac{\%Gmm@Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right) \quad (4.49)$$

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 agrega içeriği (cm^3/cm^3).

Karışımın hava boşluğu yüzdesi % 4'e eşit bulunduğu, bu veriler hacimsel şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve bu karışımın bir analizi tamamlanmış olur. Dizayn yoğurma sayısında (Ndes) bulunan hava boşluğu yüzdesi genellikle % 4'den farklı çıktığından, dizayn yoğurma sayısındaki hava boşluğu % 4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanarak belirlenir ve hesaplanan tahmini dizayn asfalt içeriğindeki tahmini dizayn özellikleri hesaplanır. Dizayn yoğurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Pb(\text{tahmini}) = Pbi - (0,4 \times (4 - Va)) \quad (4.50)$$

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

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

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

Dizayn yoğurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısı (Nini) ile maksimum yoğurma sayısındaki (Nmaks) karışım yoğunlukları bu deneme asfalt içeriği için aşağıdaki (4.51), (4.52), (4.53) ve (4.54) bağıntıları ile hesaplanır.

$$\%VMA(\text{tahmini}) = \%VMA(\text{başlangıç}) + C \times (4 - Va) \quad (4.51)$$

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

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

$$\%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{(\%VMA(\text{tahmini}) - 4,0)}{\%VMA(\text{tahmini})} \quad (4.52)$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nini = \%Gmm(\text{deneme})@Nini - (4,0 - Va) \quad (4.53)$$

$$\%Gmm(\text{tahmini})@Nmaks = \%Gmm(\text{deneme})@Nmaks - (4,0 - Va) \quad (4.54)$$

Son olarak, karışımda kullanılan 0,075 mm'lik elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesinin, efektif asfalt bağlayıcı içeriğine oranlanması ile hesaplanan filler oranı hesaplanmaktadır. Bir karışımdaki efektif asfalt bağlayıcı içeriği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$Pbe(\text{tahmini}) = Pb(\text{tahmini}) - (Ps \times Gb) \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) \quad (4.55)$$

Pbe: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak efektif asfalt içeriği,

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

Ps: Toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak agrega içeriği,

Gb: Asfaltın özgül ağırlığı,

Gse: Agreganın efektif özgül ağırlığı,

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı.

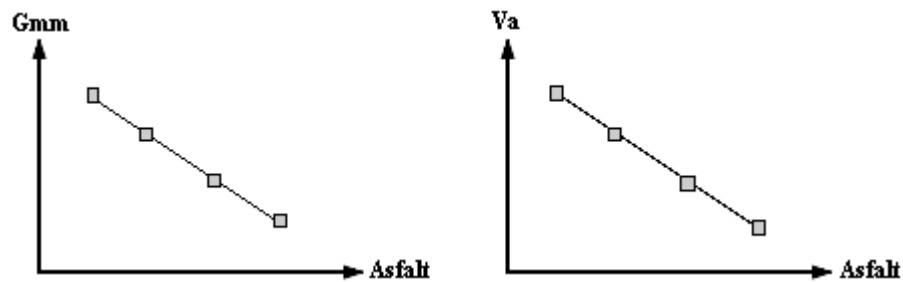
Diğer bir Superpave karışım gereksinimi de, DP ile ifade edilen filler veya toz oranıdır. Bu değer; 0,075 mm’lik elekten geçen filler malzemesinin agrega karışım ağırlığının yüzdesinin ($P_{0,075}$), toplam karışım ağırlığının yüzdesi olarak hesaplanan efektif asfalt içeriğine ($P_{be(tahmini)}$) oranı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [22, 31,34].

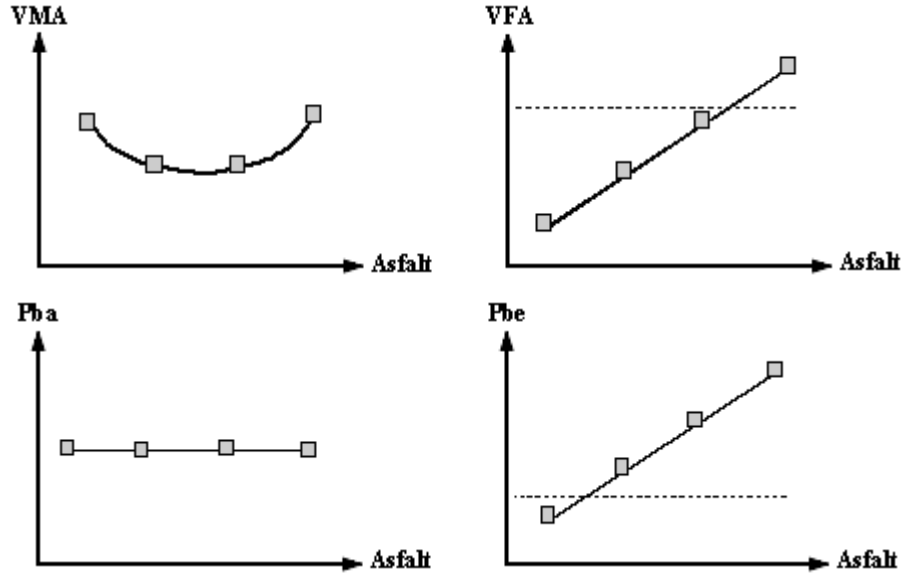
$$DP = \frac{P_{0,075}}{P_{be(tahmini)}} \quad (4.56)$$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılır. Tasarımcı, bu deneme karışımlarından şartname kriterlerini sağlayan en uygun karışımı tespit ederek dizayn agrega gradasyonunu kabul eder veya başka deneme karışımlarının yapılmasına karar verir [22,31].

4.4.5. Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriği

Hazırlanan deneme karışımlarından dizayn agrega gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının tahmini asfalt içeriğinde, $\pm\%0,5$ ve $+\%1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için en az iki numune hazırlanır. Bu dört asfalt içeriği Superpave karışım dizayn yöntemi için minimum gereksinimdir. Ayrıca, en az iki numune tahmini asfalt içeriğinde karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının belirlenmesi için hazırlanır [22,31]. Dizayn yoğurma sayısındaki (N_{des}) G_{mb} değerleri, $\%G_{mm}$, V_a , VMA , VFA ve filler oranı değerleri her asfalt yüzdesi için hesaplanarak V_a , VMA ve VFA grafikleri asfalt yüzdesine bağlı olarak çizilir. Dizayn asfalt bağlayıcı içeriği, karışımın hava boşluğu yüzdesi $\% 4$ olacak şekilde belirlenir ve diğer dizayn değerleri dizayn asfalt yüzdesine göre tespit edilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılır [22,31,34,134]. Bitümlü sıcak karışımların analizinde hesaplanan hacimsel özelliklerin, karışımda kullanılan asfalt bağlayıcı içeriğine göre değişimi Şekil 4.50’deki gibi grafiklerle ifade edilebilir.





Şekil 4.50. Hacimsel Özelliklerin (Gmm, Va, VMA, VFA, Pba, Pbe) Asfalt İçeriği ile Değişimi

Ayrıca son olarak, tespit edilen dizayn asfalt içeriğinde en az iki karışım hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılır ve yoğunluk özellikleri şartname kriterleri ile karşılaştırılır. Superpave hacimsel karışım dizayn yöntemi şartname kriterleri Tablo 4.20’de verilmiştir.

Tablo 4.20. Superpave Hacimsel Karışım Dizayn Kriterleri [149,151,170]

Dizayn Trafik (ETDY), milyon	Gerekli Yoğunluk (%Gmm)			Mineral Agregadaki Boşluk (VMA), min %					Asfalt ile Dolu Boşluk (VFA), min %	Filler-Asfalt Oranı (DP)
	Nini	Ndes	Nmaks	Nominal Maksimum Agregat Boyutu (mm)						
				37,5	25,0	19,0	12,5	9,50		
<0,3	≤91,5	96,0	≤98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70–80	0,6–1,2*
0,3–3	≤90,5								65–78	
3–10	≤89,0								65–75	
10–30										
≥30										

* : Agregat gradasyonu yasak bölgesinin altından geçiyorsa 0,8–1,6 alınmalıdır.

* : Agregat gradasyonu yasak bölgenin altından geçiyorsa 0,8–1,6 alınmalıdır.

4.4.6. Nem Hassasiyeti

Superpave karışım dizayn işleminin son aşaması, tasarlanan karışımın neme karşı hassasiyetinin tespit edilmesidir. Bu işlem, dizayn asfalt içeriğinde ortalama % 7 hava boşluğuna sahip olarak hazırlanmış asfalt karışım numunelerinin, ikinci bölümde izah edilen AASHTO T283 deneyine tabi tutulması ile yapılmaktadır. Superpave dizayn yönteminde, asfalt karışımların nem hassasiyet ölçüsünün en az % 80 olması istenmektedir [22,31].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, siyah karbonun bitüm ve bitümlü karışımlarda bir modifiyer olarak kullanılabilirliği ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar, Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi ve Superpave karışım dizaynı çerçevesinde yapılarak değerlendirilmiştir. Superpave hacimsel karışım dizayn yöntemi, başlıca dört esas adımdan oluşmaktadır. Bunlar;

1. Malzemelerin seçilmesi (asfalt bağlayıcı, agreg, katkı maddesi, vb.),
2. Dizayn agreg yapısının seçilmesi,
3. Dizayn asfalt bağlayıcı içeriğinin tespit edilmesi,
4. Dizayn karışımının nem hassasiyetinin değerlendirilmesidir [22,31].

Çalışmada ilk olarak, BSK'yı oluşturan agreg ve bağlayıcı malzemelerin özellikleri araştırılarak Superpave dizayn yöntemine göre uygunluğu tespit edilmiştir. Ayrıca, modifiye bitüm ve karışımlar konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar doğrultusunda, TÜPRAŞ tarafından üretilen Siyah Karbonun (SK), bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü karışımın performansı üzerinde sağladığı iyileştirmeler araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda, siyah karbonun, bitüm ve bitümlü karışımların performansı üzerindeki etkileriyle ilgili deneysel veriler (asfalt bağlayıcı ve karışım performansı) değerlendirilerek, uygulamada bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ile ilgili geniş ve kapsamlı bilgiler ülkemize kazandırılmaya çalışılmıştır.

5.1. Malzeme Seçilmesi

Superpave hacimsel karışım dizayn yönteminde, malzeme seçimi (bağlayıcı ve agreg) ve karışım tasarımı yapılırken coğrafi bölge, hava sıcaklıkları, trafik sayısı ve kaplama kalınlığı bilgileri esas alınmaktadır.

Bu amaçla, uygulama bölgesi olarak 38°17' ile 39°11' kuzey enlemleri arasında yer alan Elazığ bölgesi seçilmiştir. Elazığ için 20 yıllık trafik dizayn sayısı tahmini olarak 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü (ETDY) tekerrür sayısı alınmıştır. Dizayn trafik değeri, sıkıştırma yoğurma sayısı, agreg fiziksel özellikleri ve karışım hacimsel gereksinimlerinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Superpave yöntemine göre karışım numunelerinin hazırlanmasında nominal maksimum dane boyutu 12,5 mm olan agreg yığını kullanılmıştır. Ayrıca, bitümlü sıcak kaplama kalınlığı, 100 mm'den daha az olan aşınma tabakası olarak tasarlanmıştır.

5.1.1. Asfalt Bağlayıcı Seçilmesi

Bu çalışmada, Superpave yöntemine uygun olarak Elazığ bölgesi için bağlayıcı seçiminde aşağıda belirtilen işlem sırası takip edilmiştir.

5.1.1.1. Hava Veri Tabanı Kullanılarak Proje Hava Şartlarının Tespit Edilmesi

Çalışmada, uygulama bölgesi için meteorolojik veri tabanı oluşturmak üzere, Elazığ Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden temin edilen son 20 yıldaki her yılın birbirini takip eden en yüksek 7 günlük ve her yılın en düşük bir günlük hava sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, Elazığ için enlem derecesi olarak Meteoroloji Müdürlüğü kayıtlarında esas alınan 38°41' değeri alınmıştır. Elazığ için temin edilen son 20 yıllık en yüksek 7 günlük ve en düşük 1 günlük hava sıcaklık değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Elazığ'ın 20 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		
03-09.08.1987	36,0	35,5	37,6	38,1	40,1	40,0	39,0	27.01.1987	-10,8
21-27.08.1988	35,0	36,3	36,3	35,5	36,5	36,6	34,7	22.01.1988	-8,7
25-31.07.1989	35,0	35,4	36,0	36,7	37,5	38,0	36,2	04.01.1989	-11,2
16-22.07.1990	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
11-17.08.1992	33,0	34,2	34,2	36,8	37,0	35,2	34,4	10.02.1992	-19,1
18-24.07.1993	34,5	36,8	39,4	40,2	40,2	40,0	38,0	16.02.1993	-18,6
10-16.07.1994	37,0	37,4	37,8	38,8	38,4	37,4	35,4	06.12.1994	-15,3
01-07.08.1995	36,0	36,2	37,0	37,6	37,0	35,4	35,6	23.01.1995	-10,4
10-16.07.1996	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
15-22.07.1998	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
25-31.07.2001	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
05-11.08.2003	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
25-31.07.2005	37,6	37,3	37,3	39,6	38,6	38,8	37,8	27.01.2005	-10,0
11-17.08.2006	39,2	40,6	41,2	40,6	40,2	40,2	38,7	22.01.2006	-13,0

5.1.1.2. Güvenirliğin Seçilmesi

Superpave yönteminde, bağlayıcı seçimi için esas alınan en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında, istenilen güvenilirlik derecesi için sıcaklık değerlerinin standart sapma değeri kullanılmaktadır.

Bir örneği meydana getiren gözlemler $x_1, x_2, \dots, x_n$ ve bunların aritmetik ortalaması $x_{ort} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$ olduğuna göre bu örnek için standart sapma (S) değeri aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur [171].

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

Burada;

S: Standart sapma,

n: Örnekteki toplam gözlem sayısını,

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

Buna göre, son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (140 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (20 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması yukarıda belirtilen (5.1) bağıntısı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan yüksek ve düşük hava sıcaklıklarının ortalama değeri ve standart sapması Tablo 5.2’de verilmiştir.

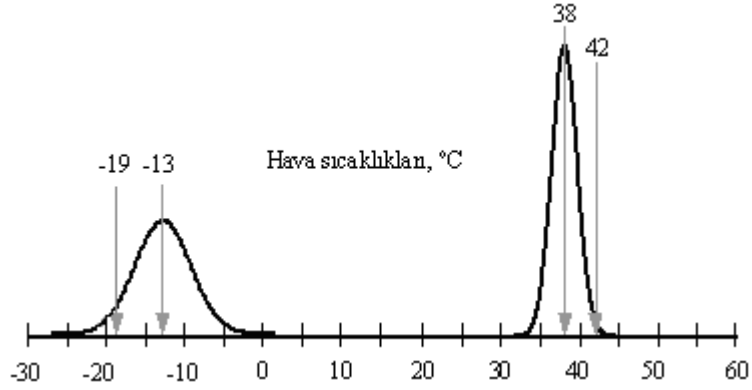
Tablo 5.2. Sıcaklık Ortalamaları ve Standart Sapmaları

Hesaplamalar	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	38	-13
Standart Sapma (°C)	2	3

Superpave sistemine göre, ortalama yüksek veya düşük sıcaklığa 1 standart sapma ilavesi ile %84, 2 standart sapma ilavesi ile %97,5 (98 alınmaktadır) ve 3 standart sapma ilavesi ile %99,8 güvenilirlik elde edilmektedir. Ancak, bağlayıcı seçiminde genellikle 2 standart sapma ilavesi ile elde edilen %98 güvenilirlik derecesi kullanılmaktadır.

5.1.1.3. Hava Sıcaklığının Seçilmesi

Şekil 5.1’de, uygulama bölgesine ait Tablo 5.1’de verilen düşük ve yüksek hava sıcaklık değerleri kullanılarak bir frekans dağılım eğrisi temsili olarak ifade edilmiştir.



Şekil 5.1. Elazığ için En Düşük ve En Yüksek Hava Sıcaklıklarının Dağılımı

Buna göre, normal bir yaz mevsiminde 7 günlük en yüksek hava sıcaklığı ortalaması 38 °C ve standart sapması 2 °C olan Elazığ için ortalama sıcaklığa iki standart sapma ilavesiyle elde edilen 42 °C'lık sıcaklığa, çok sıcak geçen bir yaz mevsiminde ulaşılma ihtimali %2'dir ve bu durumda güvenilirlik %98 olarak kabul edilir. Benzer şekilde, normal bir kış mevsiminde ortalama en düşük sıcaklığı -13 °C ve standart sapması 3 °C olan Elazığ'da, çok soğuk bir kış mevsiminde sıcaklığın -19 °C olması ihtimali %2, dolayısıyla güvenilirlik derecesi %98 olacaktır.

5.1.1.4. Hava Sıcaklıklarının Kaplama Sıcaklıklarına Dönüştürülmesi

Superpave yönteminde, asfalt bağlayıcı sınıfının seçilmesinde kullanılacak tasarım sıcaklığı olarak kaplamanın kendi sıcaklığı alındığından, ortalama en yüksek 7 günlük hava sıcaklığı esas alınarak kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki yüksek dizayn sıcaklığı ve en düşük bir günlük ortalama sıcaklık esas alınarak kaplama yüzeyindeki düşük dizayn sıcaklığı SHRP, Kanada SHRP ve LTPP yöntemlerine göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

SHRP yöntemine göre, kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki kaplama yüksek dizayn sıcaklığı ve kaplama yüzeyi düşük dizayn sıcaklığı;

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

$$T_{20\text{mm}} = (38 - 0,00618 \times 38,41^2 + 0,2289 \times 38,41 + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 = 59 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{\text{min}} = T_{\text{havamin}} = -13 \text{ } ^\circ\text{C' dir.}$$

Kanada SHRP yöntemine göre kaplama yüzeyi düşük dizayn sıcaklığı;

$$T_{\text{min}} = 0,859T_{\text{havamin}} + 1,17 \text{ } ^\circ\text{C} = 0,859 \times (-13) + 1,17 = -10 \text{ } ^\circ\text{C' dir.}$$

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

$$T_{20\text{mm}\%98} = T_{20\text{mm}\%50} + 2S_{\text{maks}} = 59 + 2 \times 2 = 63 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$T_{\text{min}\%98} = T_{\text{min}\%50} + 2S_{\text{min}} = -13 + 2 \times (-3) = -19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

LTPP yöntemine göre yüksek ve düşük kaplama dizayn sıcaklıkları %98 güvenirlilik ile aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$T_{maks} = 54,32 + 0,78T_{havamaks} - 0,0025E^2 - 15,14\log(H+25) + z(9 + 0,61S_{maks}^2)^{0,5}$$

$$T_{maks} = 54,32 + 0,78 \times 38 - 0,0025 \times 38,41^2 - 15,14 \times \log(20+25) + 2,055 \times (9 + 0,61 \times 2^2)^{0,5}$$

$$T_{maks} = 62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{min} = -1,56 + 0,72T_{havamin} - 0,004E^2 + 6,26\log(H+25) - z(4,4 + 0,52S_{min}^2)^{0,5}$$

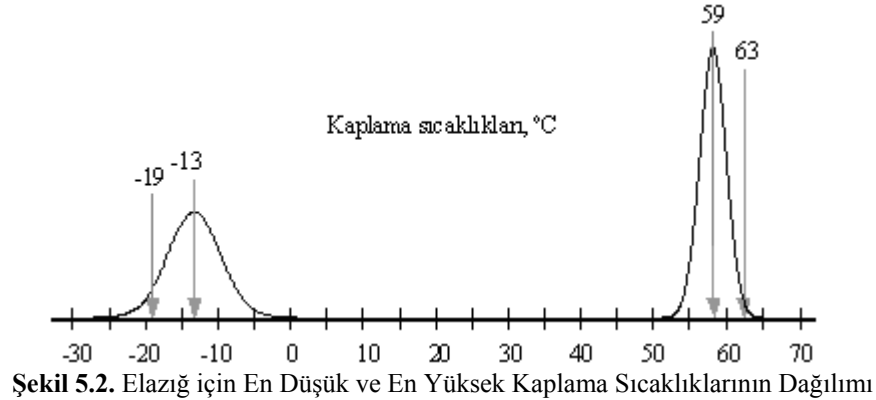
$$T_{min} = -1,56 + 0,72 \times (-13) - 0,004 \times 38,41^2 + 6,26 \times \log(0+25) - 2,055 \times (4,4 + 0,52 \times 3^2)^{0,5}$$

$$T_{min} = -14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Yukarıda hava sıcaklıkları verilen uygulama bölgesinin hesaplanan dizayn sıcaklıklarının %50 ve %98 güvenirlilik değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir. Hesaplanan sıcaklıklara bakıldığında en olumsuz olması sebebiyle çalışmada, SHRP yöntemi ile elde edilen sıcaklık değerleri esas alınmıştır. Buna göre, uygulama bölgesi için %50 ve %98 güvenirlilikteki kaplama dizayn sıcaklıkları Şekil 5.2’de grafik olarak verilmiştir.

Tablo 5.3. Farklı Yöntemlere Göre Hesaplanan Kaplama Dizayn Sıcaklıkları

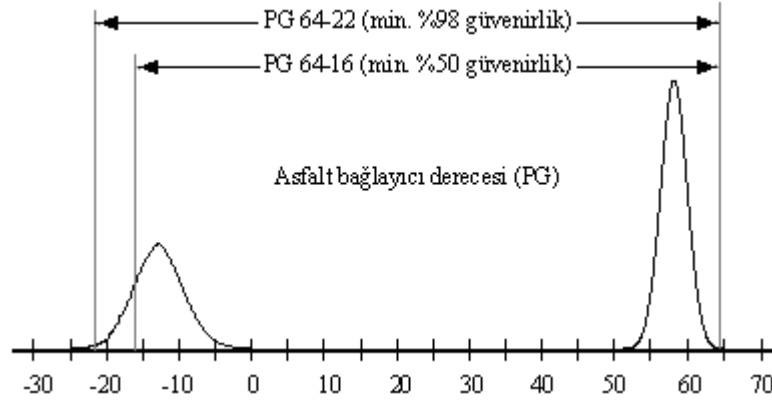
Hesaplama Yöntemi	% 50 Güvenirlilik				% 98 Güvenirlilik			
	$T_{havamaks}$	T_{20mm}	$T_{havamin}$	T_{min}	$T_{havamaks}$	T_{20mm}	$T_{havamin}$	T_{min}
SHRP	38	59	-13	-13	42	63	-19	-19
K. SHRP	38	-	-13	-10	42	-	-19	-16
LTPP	38	-	-13	-	42	62	-19	-14



5.1.1.5. Kaplama Sıcaklıklarına Göre Bağlayıcı Seçilmesi

Tablo 5.3’de, SHRP yöntemine göre uygulama bölgesi için %50 güvenirlilikte hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 59 °C, düşük sıcaklık değeri -13 °C’dir. Bu güvenirlilik değeri için seçilecek olan bağlayıcı sınıfı PG 64–16 olacaktır. Aynı yöntemle %98 güvenirlilik derecesi için hesaplanan yüksek sıcaklık değeri 63 °C, düşük sıcaklık değeri -19 °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 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Elazığ için Bağlayıcı Sınıfı Seçimi

Benzer şekilde, Kanada SHRP yöntemine göre seçilmesi gereken bağlayıcı sınıfı %50 güvenilirlik için PG 64–10, %98 güvenilirlik için PG 64–16 ve LTPP yöntemine göre %98 güvenilirlik için PG 64–16 olmaktadır.

5.1.1.6. Trafik Hızı ve Sayısına Göre Bağlayıcı Seçilmesi

Elazığ bölgesi için 20 yıllık trafik dizayn sayısı tahmini olarak 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısı alınmış ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Superpave yöntemine göre, dizayn trafik sayısı 30 milyona kadar olan yollarda bağlayıcının yüksek sıcaklık derecesinin arttırılmasına gerek görülmediğinden bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada, uygulama bölgesi için ana bağlayıcı olarak PG 64–22 (B 70/100) dereceli ve modifikasyon amaçlı olarak daha yumuşak kıvamda olan PG 58–28 (B 160/220) dereceli iki farklı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAŞ) tarafından üretilmiş olan asfalt bağlayıcılar, Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü Asfalt Şantiyesinden temin edilmiştir. Kullanılan her iki asfalt çimentosunun orijinal (katkısız) haldeki bazı fiziksel özellikleri geleneksel deneylerle tespit edilerek sonuçları aşağıda Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Asfalt Çimentolarının Fiziksel Özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	PG 64-22 (B 70/100)		PG 58-28 (B 160/220)	
		Sonuç	Şartname Sınırı	Sonuç	Şartname Sınırı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³), 25 °C	TS 1087	1,030	1,0-1,1	1,028	1,0-1,1
Düktilite (cm), 25 °C	TS 119	114	min. 100	132	min. 100
Penetrasyon (0,1 mm), 100gr, 5 sn, 25 °C	EN 1426	94	70-100	172	160-220
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	48,2	43-51	40,6	35-43
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	322	min. 230	304	min. 230

5.1.2. Agrega Seçilmesi

Çalışmada mineral agregası olarak, Elazığ çevresindeki Hanpınarı taş ocağında konkasörle kırılmış bir şekilde temin edilen kalker (kireçtaşı) kullanılmıştır. Agrega karışımının No:4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış bir şekilde deneylerde kullanılmıştır.

Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave agregası gradasyonu seçilmiştir. Karışımlarda kullanılacak agregası yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, trafik sayısı (15 milyon) ve kaplamanın yüzeyden derinliğine (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.5. Kalker Agregasının Fiziksel Özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agrega			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Dayanıklılık (Los Angeles Aşınma kaybı), (%)	ASTM C-131	28	-	-	Maks. 35
Sağlamlık (Na ₂ SO ₄ ile Donma kaybı), (%)	ASTM C-88	4,5	-	-	Maks. 10
Kaba Agrega Köşeliliği, (%)	ASTM D-5821	98/94	-	-	Min. 95/90
İnce Agrega Köşeliliği, (%)	AASHTO T304	-	52	-	Min. 45
Yassı ve Uzun Daneler, (%)	ASTM D-4791	2	-	-	Maks. 10
Kil İçeriği, (Kum Eşdeğerlik), (%)	AASHTO T176	-	54		Min. 45
Zararlı Maddeler, (%)	ASTM C-142	Bulunmamıştır			Maks. 2

5.1.3. Katkı Maddesinin Seçilmesi

Bu çalışmada katkı maddesi olarak, birçok çeşidinin bitüm modifikasyonunda kullanılabileceği belirtilen ve ülkemizde üretimi yapılabilen Siyah Karbon (SK) seçilmiştir. Çalışmada, bitüm ve bitümlü karışımın modifikasyonunda katkı maddesi olarak kullanılan Siyah Karbon (SK), Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAŞ) tarafından üretilen birçok siyah karbon çeşidinden biri olan Petkara FEF N-550 hızlı gönderme fırını siyah karbon çeşididir. Siyah karbonun fiziksel özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Siyah Karbonun Fiziksel Özellikleri [172]

Özellikler	Deney Standardı	Siyah Karbon (FEF N-550)
Toz Miktarı, (Ağırlıkça, Maks. %)	ASTM D-1508	12
Isıtma Kaybı (125 °C), (Ağırlıkça, Maks. %)	ASTM D-1509	1,0
İyod Miktarı (mg/g)	ASTM D-1510	38–48
Pellet Sertliği ₂₀ , (gr)	ASTM D-3313	50
PH	ASTM D-1512	7
Yoğunluk, (gr/lt)	ASTM D-1513	350
Kükürt İçeriği, (Ağırlıkça %)	ASTM D-1619	0,5
Dibutyl Ftalat (DBP) Absorpsiyonu, (ml/100gr)	ASTM D-3493	83
Özgül Yüzey Alanı (CTAB), (m ² /gr)	ASTM D-3765	40
Kül İçeriği, (Ağırlıkça %)	ASTM D-1506	0,2
Ürün Şekli	-	Siyah Pellet

5.2. Siyah Karbon ile Bitüm Modifikasyonu Yapılması

Yapılan literatür araştırmalarında, karışımlarda %10-15 oranında kullanılan siyah karbonun, bağlayıcı ve karışım performansını iyileştirdiği ve bu iyileşmelerin, siyah karbon katılan asfaltın dayanıklılığının artması, sıcaklık hassasiyetinin azalması ve dolayısıyla sertleşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise, uygulama bölgesi için seçilmiş olan PG 64–22 (B 70/100) ana bağlayıcısı esas alınarak, en az bu bağlayıcı derecesinde bir modifiye bağlayıcı elde edebilmek amacıyla çok daha yumuşak olan PG 58–28 (B 160/220) bağlayıcısına ağırlıkça belirli oranlarda (%5, %10, %15) Siyah Karbon (SK) ilave edilerek PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK modifiye bağlayıcıları elde edilmiştir. Elde edilen modifiye bağlayıcıların reolojik özellikleri incelenerek, saf PG 58–28 ve özellikle PG 64–22 ana bağlayıcısı ile kıyaslanmış ve siyah karbonun bitümlü bağlayıcıların performansı üzerindeki iyileştirme etkisi araştırılmıştır.

Homojen bir bağlayıcı-siyah karbon karışımı elde etmek amacıyla, siyah karbon 145–150 °C sıcaklığında ısıtılarak, sıcaklığı 150 °C'ye ayarlanmış 8 cm çapındaki silindir kalıpta, her bir kanat uzunluğu 3 cm olan iki kanatlı bir karıştırıcı ile 500 devir/dakika hızda 1,0 saat karıştırılmıştır. Hazırlanmış olan saf ve modifiye bağlayıcıların fiziksel özellikleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	PG 64–22	PG 58–28	PG 58–28 + %5SK	PG 58–28 + %10SK	PG 58–28 + %15SK
Özgül Ağırlık (gr/cm ³), 25 °C	TS 1087	1,030	1,028	1,046	1,063	1,079
Düktilite (cm), 25 °C	TS 119	114	132	108	86	56
Penetrasyon (0,1mm), 100gr, 5sn, 25°C	EN 1426 (TS 118)	94	172	124	106	78
Yumuşama Noktası, (°C)	EN 1427 (TS 120)	48,2	40,6	46,8	56,8	64,6
Parlama Noktası, (°C)	EN 22719	322	304	316	325	338

5.2.1. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların RTFOT Deneyi ile Yaşlandırılması

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcıların karıştırma ve yapım sırasındaki yaşlanmasını tespit etmek amacıyla bağlayıcılar, Şekil 5.4’te görülen Dönel İnce Film Etüvü Deney (RTFOT) cihazı kullanılarak yaşlandırılmıştır.

Saf ve modifiye asfalt bağlayıcılar ayrı ayrı 140 °C ısıtılarak, 8 adet şişenin her birinin içine 0,001 gram hassasiyetle tartılmış 35±0,5 gram asfalt bağlayıcı numunesi doldurularak 163 °C’ye kadar ısıtılmış RTFOT etüvünün dönen tablası üzerine yerleştirilmiş ve tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 85 dakika süreyle döndürülerek deney yapılmıştır (Şekil 5.5). Deney sonucunda, şişelerdeki numunelerin bir kısmı bağlayıcıların kütle kaybının tespiti için kullanılmış, diğerleri ise performans testleri için ayrı bir kaba boşaltılarak saklanmıştır.



Şekil 5.4. Dönel İnce Film Etüvü (RTFOT) Aleti (a) ve Şişelerin Yerleştirilmesi (b)

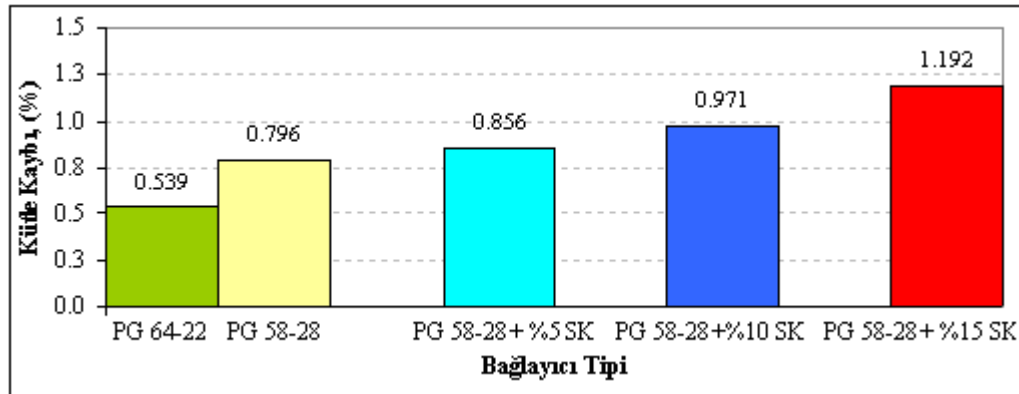


Şekil 5.5. RTFOT Deneyi Yapılışı (a) ve Şişelerin Deneyden Önceki ve Sonraki Görünüşü (b)

Saf ve SK modifiyeli bağlayıcıların RTFOT deney sonrası kütle kayıpları Tablo 5.8’de, bu bağlayıcılarda, katkı oranı değişimi ile kütle kaybı arasındaki ilişki ise Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Saf ve Modifiye Bitümlü Bağlayıcıların RTFOT Kütle Kaybı

Özellikler	Şartname Sınırı (%)	PG 64-22	PG 58-28	PG 58-28 + %5SK	PG 58-28 + %10SK	PG 58-28 + %15SK
İlk Kütle, M_1 (gr)	maks. 1,0	35,22	35,18	35,05	35,01	35,24
Son Kütle, M_2 (gr)		35,03	34,90	34,75	34,67	34,82
Kütle Kaybı (%) = $100(M_1 - M_2) / M_1$		0,539	0,796	0,856	0,971	1,192



Şekil 5.6. Yaşlanmanın Etkisiyle Bağlayıcılarda Meydana Gelen Kütle Kaybı

Tablo 5.8 incelendiğinde, saf PG 64-22 ana bağlayıcısı ile modifikasyon amaçlı kullanılan PG 58-28 bağlayıcılarının yaşlanma sonrası kütle kayıpları şartnamenin öngördüğü sınırın altında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, SK ile modifiye edilmiş bağlayıcıların kütle kayıpları katkı oranının artmasına paralel olarak saf PG 58-28 bağlayıcına göre sırasıyla yaklaşık %7,5; %22 ve %49,8 oranında artış göstermiştir.

5.2.2. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Performans Deneyleri

Çalışmalarda ilk olarak, uygulama bölgesi için seçilmiş olan PG 64–22 bağlayıcısının bölgenin en yüksek (64 °C) ve en düşük (-22 °C) sıcaklıklarında göstereceği performans belirlenmiştir. Daha sonra modifiye amaçlı seçilen PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcının farklı SK (%5, %10, %15) içeriğindeki modifiye karışımlarının performansları tespit edilerek, ana bağlayıcının performans özellikleri ve şartname kriterleri ile kıyaslanmıştır.

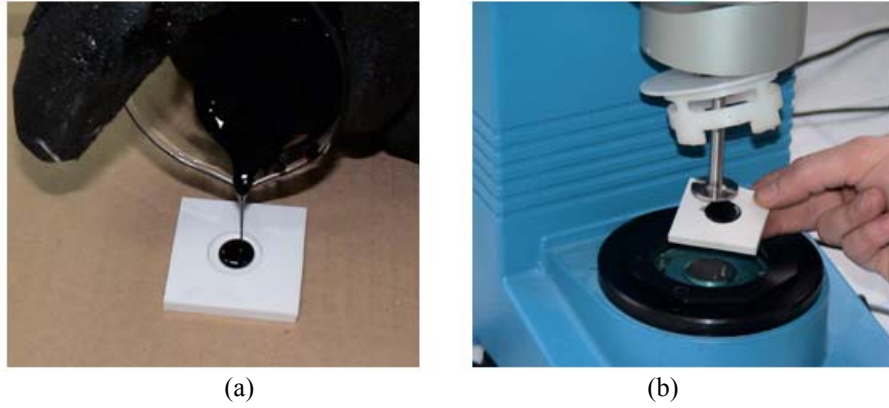
5.2.2.1. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)

Çalışmada ilk olarak, uygulama bölgesi için seçilen PG 64–22 ana bağlayıcısının yüksek servis sıcaklığı olan 64 °C sıcaklıktaki reolojik özellikleri olan kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenerek, bağlayıcının “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği direnç belirlenerek, şartname kriterleri ile kıyaslanmış ve uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla çalışmada, Şekil 5.7’de görülen Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi kullanılmıştır.

Bağlayıcının yüksek sıcaklık özelliklerinin tespiti için yaşlandırılmamış (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler 4 farklı deney sıcaklığında (58, 64, 70 ve 76 °C) yapılmıştır. İlk önce asfalt bağlayıcı 140 °C ısıtılarak Şekil 5.8’de görüldüğü gibi silikon kalıba doldurularak soğumaya bırakılmış ve soğuyan numuneler, deney sıcaklığına getirilmiş cihazın üst plakasına yerleştirilerek alt ve üst plakalar deney konumuna getirilmiştir. Yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış numuneler için 1000 mikron (1 mm) aralık ve 25 mm çaplı plakalar kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Bohlin DSR II Dinamik Kayma Reometresi



Şekil 5.8. Numunenin Silikon Kalıba Doldurulması (a) ve Üst Plakaya Yerleştirilmesi (b)

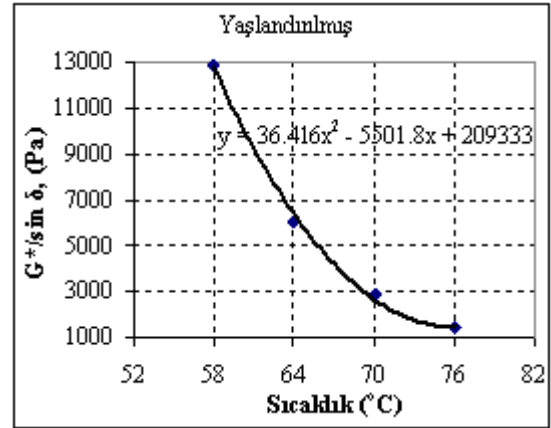
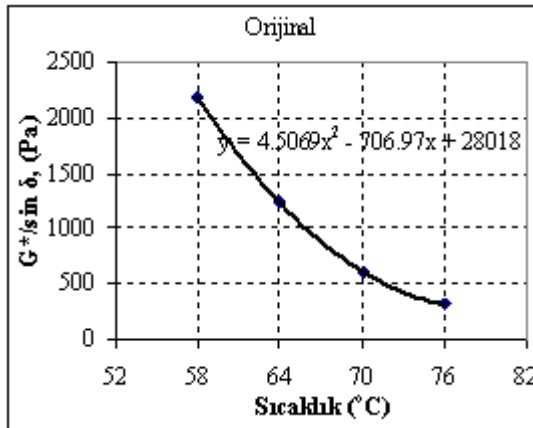
Deneye hazır hale getirilen numune, su banyosu yardımıyla $0,1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle deney sıcaklığına ($58, 64, 70$ ve 76°C) getirilerek ısı dengesinin sağlanması için 10 dakika bekletilmiş ve bu süre sonunda bağlayıcı şartnamesine göre salınım hızı 10 radyan/saniyelik frekansta, yaşlandırılmamış (orijinal) numuneler için 120 Pa, yaşlandırılmış numuneler için 220 Pa gerilme uygulanarak 10 devirlik bir ön koşullandırma yapılmıştır. 10 devirlik hazırlıktan sonra 10 ilave devir daha yaptırılarak deney verileri elde edilmiştir. Reometre yazılımı tarafından, uygulanan gerilme ve elde edilen deformasyon arasındaki ilişki kullanılarak kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri otomatik olarak hesaplanmıştır.

Deney sonucunda, saf PG 64–22 bağlayıcısının yaşlandırılmadan önce ve sonra farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçları Tablo 5.9’da verilerek şartname kriterleri (AASHTO MP1) ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre, yaşlandırılmamış (orijinal) ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi parametresinin sıcaklıkla değişim grafiği Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Çalışmada ikinci olarak, modifiye amaçlı seçilen PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcının farklı SK (%5, %10, %15) içeriğindeki modifiye bağlayıcıların, yüksek servis sıcaklığındaki reolojik özellikleri (G^* , δ) belirlenmiş ve bağlayıcının “ $G^*/\sin \delta$ ” tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği direnç tespit edilerek, şartname kriterleri (AASHTO MP1) ile kıyaslanmış ve bu bağlayıcıların yüksek servis sıcaklıklarındaki performans dereceleri belirlenmiştir. Saf PG 58–28 bağlayıcısı ile PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK içerikli bağlayıcıların orijinal ve yaşlandırılmış numunelerinin farklı sıcaklıklardaki DSR deney sonuçları sırasıyla Tablo 5.10–5.13’de, bunların tekerlek izi parametresi-sıcaklık ilişkisi grafikleri Şekil 5.10–5.13’de gösterilmiştir.

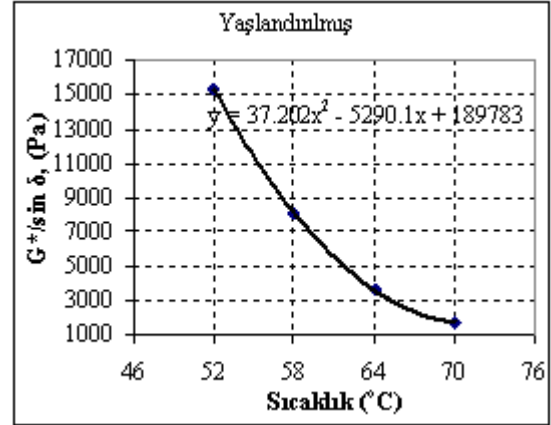
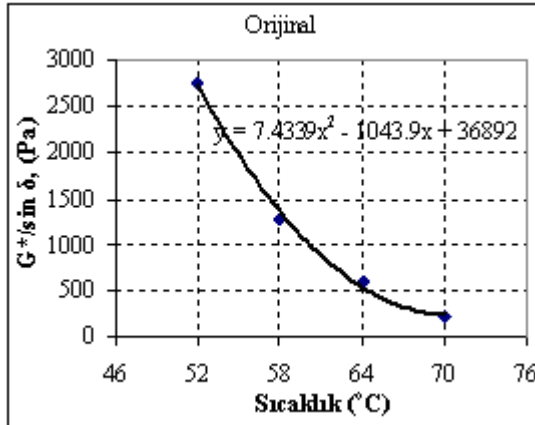
Tablo 5.9. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	Numune	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
58 °C Orijinal	1	2155,5	80,56	2185,09	≥1000	PG 64-Y
	2	2137,2	80,57	2166,48		
	3	2142,2	80,59	2171,42		
	Ortalama			2174,33		
64 °C Orijinal	1	1226,7	81,68	1239,75		
	2	1214,3	81,64	1227,34		
	3	1216,2	81,63	1229,29		
	Ortalama			1232,127		
70 °C Orijinal	1	607,58	83,04	612,091		
	2	608,86	83,10	613,302		
	3	609,99	83,05	613,498		
	Ortalama			612,964		
76 °C Orijinal	1	317,51	84,02	319,247		
	2	318,56	83,95	320,344		
	3	317,91	83,98	319,673		
	Ortalama			319,755		
58 °C Yaşlandırılmış	1	11833	66,70	12883,7	≥2200	PG 64-Y
	2	11774	66,74	12815,6		
	3	11768	66,73	12810,1		
	Ortalama			12836,47		
64 °C Yaşlandırılmış	1	5712,3	70,36	6065,15		
	2	5737,7	70,30	6094,4		
	3	5728,4	70,30	6084,52		
	Ortalama			6081,357		
70 °C Yaşlandırılmış	1	2834,1	73,98	2948,61		
	2	2855,6	73,95	2971,42		
	3	2821	73,98	2934,98		
	Ortalama			2951,67		
76 °C Yaşlandırılmış	1	1403,9	77,13	1440,08		
	2	1412,6	77,14	1448,94		
	3	1396,7	77,16	1432,52		
	Ortalama			1440,513		

**Şekil 5.9.** Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 64–22 Numunelerinin G*/sin δ -Sıcaklık İlişkisi

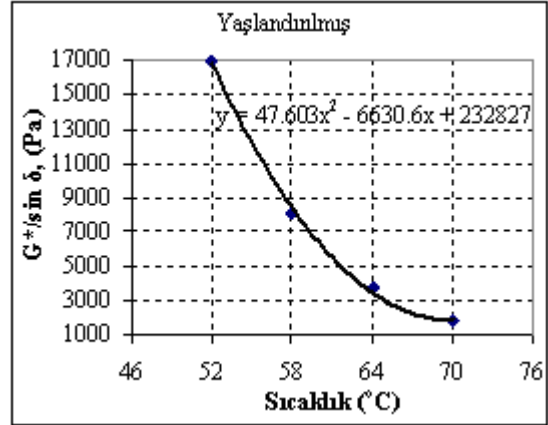
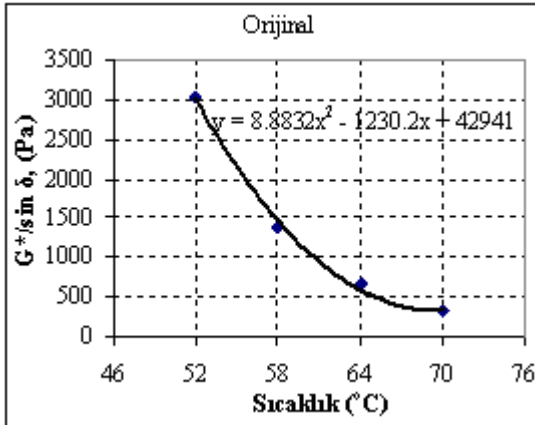
Tablo 5.10. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	Numune	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
52 °C Orijinal	1	2702,6	79,58	2747,92	≥1000	PG 58-Y
	2	2692,4	79,52	2738,08		
	3	2683,6	79,55	2728,86		
	Ortalama			2738,287		
58 °C Orijinal	1	1269,5	81,91	1282,26		
	2	1269,1	81,90	1281,89		
	3	1268,2	81,87	1281,08		
	Ortalama			1281,743		
64 °C Orijinal	1	609,6	83,36	613,717		
	2	605,96	83,32	610,102		
	3	602,07	83,20	606,335		
	Ortalama			610,05		
70 °C Orijinal	1	224,37	84,89	225,265		
	2	221,52	84,77	222,446		
	3	223,34	84,83	224,252		
	Ortalama			223,99		
52 °C Yaşlandırılmış	1	14256,8	68,42	15331,46	≥2200	
	2	14270,4	68,6	15327,11		
	3	14205,3	68,28	15290,9		
	Ortalama			15316,49		
58 °C Yaşlandırılmış	1	7612,5	71,24	8039,61		
	2	7586,1	70,79	8033,4		
	3	7592,9	70,84	8038,17		
	Ortalama			8037,06		
64 °C Yaşlandırılmış	1	3465,8	73,12	3621,85		
	2	3583,7	72,84	3750,66		
	3	3478,42	73,4	3629,7		
	Ortalama			3667,40		
70 °C Yaşlandırılmış	1	1670,18	76,4	1718,36		
	2	1710,4	76,35	1760,11		
	3	1705,4	76,10	1756,85		
	Ortalama			1745,11		

**Şekil 5.10.** Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28 Numunelerinin G*/sin δ -Sıcaklık İlişkisi

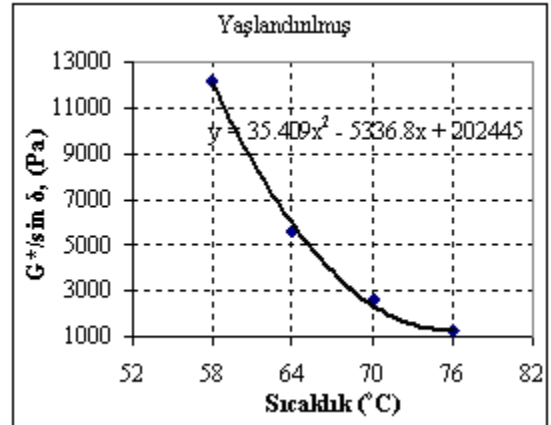
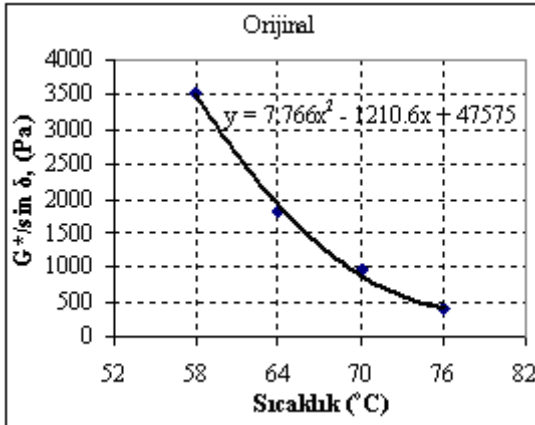
Tablo 5.11. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%5SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	Numune	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
52 °C Orijinal	1	2998,2	80,68	3038,31	≥1000	PG 58-Y
	2	2961,3	80,65	3001,17		
	3	2975,4	80,64	3015,55		
	Ortalama			3018,34		
58 °C Orijinal	1	1381,7	82,85	1392,53		
	2	1369,8	82,81	1380,66		
	3	1357	82,79	1367,82		
	Ortalama			1380,337		
64 °C Orijinal	1	683,47	84,52	686,608		
	2	671,28	84,44	674,453		
	3	677,45	84,49	680,595		
	Ortalama			680,55		
70 °C Orijinal	1	320,78	85,63	321,715		
	2	321,16	85,58	322,118		
	3	320,45	85,66	321,37		
	Ortalama			321,734		
52 °C Yaşlandırılmış	1	15680	68,14	16894,8	≥2200	
	2	15661	68,11	16877,9		
	3	15636	68,18	16842,7		
	Ortalama			16871,8		
58 °C Yaşlandırılmış	1	7637,9	71,44	8056,93		
	2	7605,8	71,43	8023,54		
	3	7617,1	71,39	8037,35		
	Ortalama			8039,273		
64 °C Yaşlandırılmış	1	3656,5	74,69	3791,04		
	2	3673,7	74,71	3808,51		
	3	3670,9	74,73	3805,24		
	Ortalama			3801,6		
70 °C Yaşlandırılmış	1	1780,3	77,86	1821,02		
	2	1777,3	77,84	1818,09		
	3	1791,7	77,88	1832,55		
	Ortalama			1823,89		

**Şekil 5.11.** Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%5SK Numunelerinin G*/sin δ -Sıcaklık İlişkisi

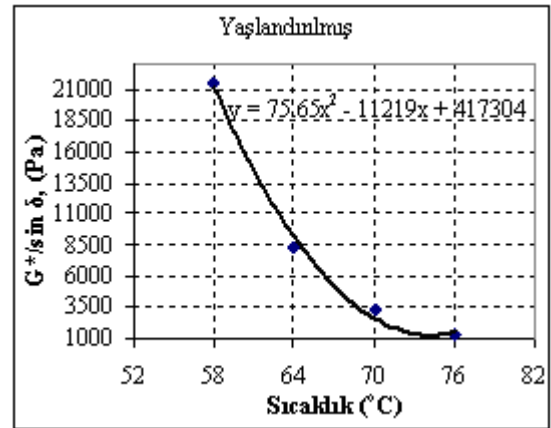
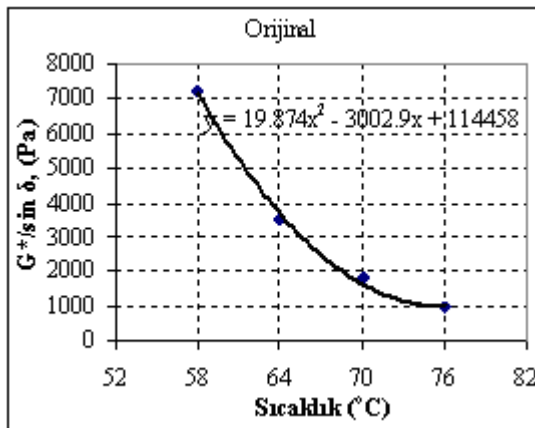
Tablo 5.12. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+ %10SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	Numune	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
58 °C Orijinal	1	3401,9	74,42	3531,67	≥1000	PG 64-Y
	2	3367,8	74,37	3497,12		
	3	3380,6	74,38	3510,24		
	Ortalama			3513,01		
64 °C Orijinal	1	1751,3	76,84	1798,53		
	2	1791	76,91	1838,78		
	3	1771	76,89	1813,39		
	Ortalama			1816,9		
70 °C Orijinal	1	954,4	78,59	973,642		
	2	951,13	78,56	970,409		
	3	955,19	78,60	974,414		
	Ortalama			972,82		
76 °C Orijinal	1	392,63	81,63	396,857		
	2	391,99	81,62	396,22		
	3	387,84	81,65	391,995		
	Ortalama			395,02		
58 °C Yaşlandırılmış	1	11432	70	12165,7	≥2200	
	2	11384	70,01	12113,8		
	3	11364	70,03	12091		
	Ortalama			12123,5		
64 °C Yaşlandırılmış	1	5411,1	73,69	5637,99		
	2	5447,9	73,63	5678,08		
	3	5367,2	73,73	5591,11		
	Ortalama			5635,727		
70 °C Yaşlandırılmış	1	2584	77,16	2650,27		
	2	2598	77,11	2665,16		
	3	2606,5	77,02	2674,85		
	Ortalama			2663,427		
76 °C Yaşlandırılmış	1	1272,3	80,24	1290,99		
	2	1253	80,29	1271,21		
	3	1243,6	80,33	1261,52		
	Ortalama			1274,573		

**Şekil 5.12.** Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+ %10SK Numunelerinin G*/sin δ -Sıcaklık İlişkisi

Tablo 5.13. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%15SK Numunelerinin DSR Deney Sonuçları

Sıcaklık / Özellik	Numune	G* (Pa)	δ (°)	G*/sin δ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
58 °C Orijinal	1	6821	70,84	7221	≥1000	PG 70-Y
	2	6812	71	7204,51		
	3	6786,6	70,86	7183,71		
	Ortalama			7203,07		
64 °C Orijinal	1	3382,6	74,31	3513,52		
	2	3347,7	74,33	3476,93		
	3	3368,2	74,34	3498,05		
	Ortalama			3496,17		
70 °C Orijinal	1	1764,3	76,84	1811,88		
	2	1766,3	76,82	1814,09		
	3	1756,6	76,80	1813,52		
	Ortalama			1813,16		
76 °C Orijinal	1	950,34	78,60	969,466		
	2	948,36	78,59	967,481		
	3	948,32	78,57	967,508		
	Ortalama			968,15		
58 °C Yaşlandırılmış	1	17461	53,15	21820,6	≥2200	
	2	17141	53,70	21268,6		
	3	16958	54,21	20905,7		
	Ortalama			21331,63		
64 °C Yaşlandırılmış	1	7427,2	62,55	8369,49		
	2	7762	60,48	8919,96		
	3	7099,2	63,80	7912,1		
	Ortalama			8400,52		
70 °C Yaşlandırılmış	1	3075,3	72,40	3226,32		
	2	3374,1	69,75	3596,39		
	3	3190,1	71,29	3368,09		
	Ortalama			3396,93		
76 °C Yaşlandırılmış	1	1426,3	78,14	1457,41		
	2	1315,6	80,03	1335,77		
	3	1266,8	80,35	1284,98		
	Ortalama			1359,39		

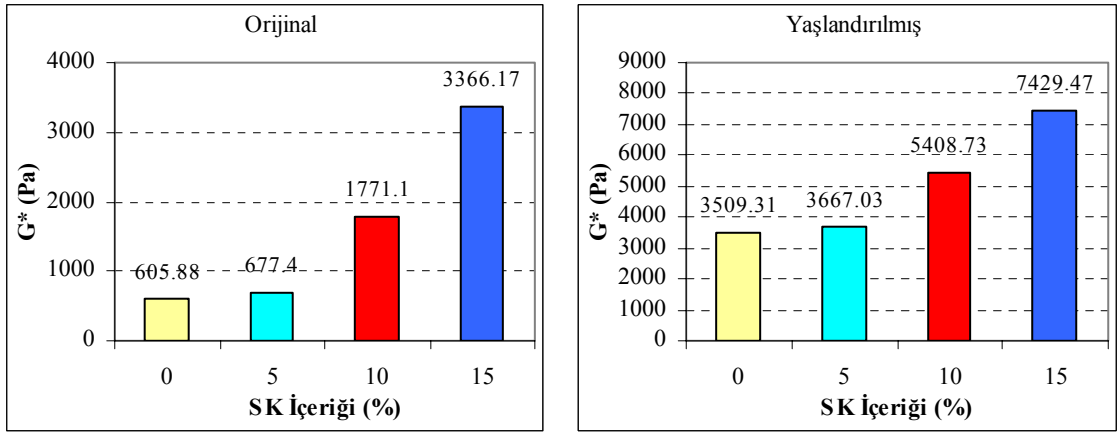
**Şekil 5.13.** Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58–28+%15SK Numunelerinin G*/sin δ –Sıcaklık İlişkisi

Ayrıca, uygulama bölgesi için seçilen PG 64–22 ana bağlayıcısının 64°C’de göstermiş olduğu yüksek servis sıcaklık performans özelliklerini sağlamak için modifiye amaçlı kullanılan PG 58–28 bağlayıcısı ve PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK içerikli orijinal ve yaşlandırılmış modifiye bağlayıcılarının 64°C sıcaklıktaki DSR deney sonuçları ve yüksek sıcaklık performans dereceleri toplu olarak Tablo 5.14’te verilmiştir.

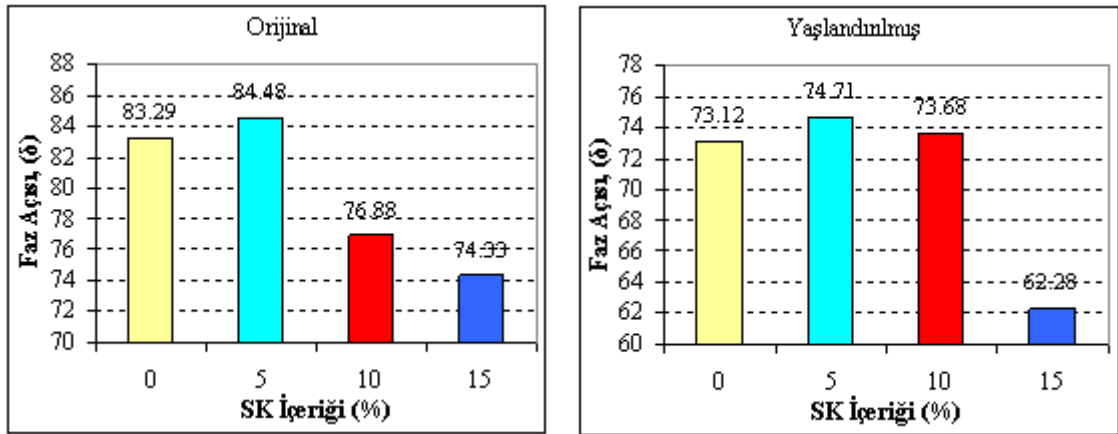
Orijinal ve yaşlandırılmış modifiye bağlayıcıların 64°C sıcaklıkta elde edilen deney sonuçlarına göre, kompleks kayma modülünün (G^*), katkı içeriğine göre değişimi Şekil 5.14’te, faz açısının (δ) değişimi Şekil 5.15’de ve tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin \delta$) değişimi Şekil 5.16’da verilmiştir.

Tablo 5.14. SK Katkılı Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların 64°C Sıcaklıktaki DSR Deney Sonuçları

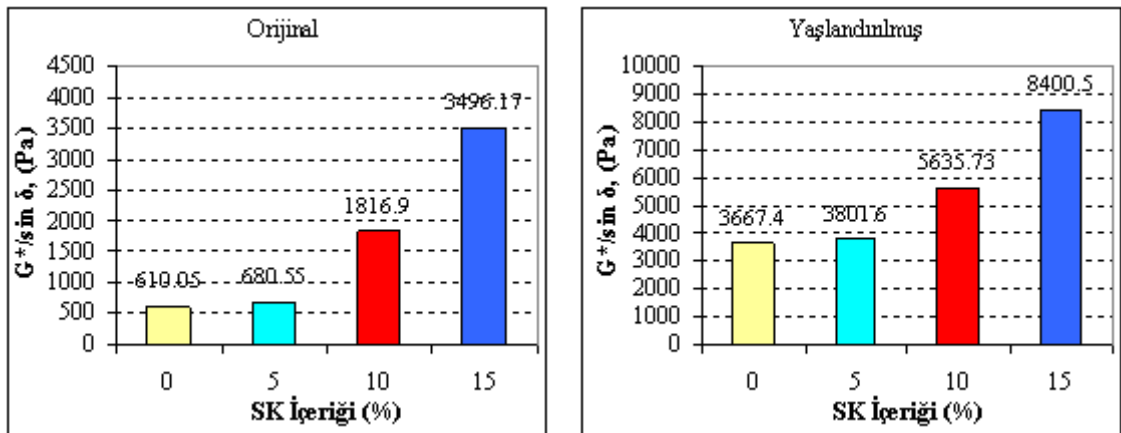
Bağlayıcı / Özellik	Numune	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname Limiti (Pa)	Performans Derecesi
PG 58–28 Orijinal	1	609,6	83,36	613,717	≥ 1000	PG 58-Y
	2	605,96	83,32	610,102		
	3	602,07	83,20	606,335		
	Ortalama			610,05		
PG 58–28 Yaşlandırılmış	1	3465,8	73,12	3621,85	≥ 2200	PG 58-Y
	2	3583,7	72,84	3750,66		
	3	3478,42	73,4	3629,7		
	Ortalama			3667,40		
PG 58–28 +%5SK Orijinal	1	683,47	84,52	686,608	≥ 1000	PG 58-Y
	2	671,28	84,44	674,453		
	3	677,45	84,49	680,595		
	Ortalama			680,55		
PG 58–28 +%5SK Yaşlandırılmış	1	3656,5	74,69	3791,04	≥ 2200	PG 58-Y
	2	3673,7	74,71	3808,51		
	3	3670,9	74,73	3805,24		
	Ortalama			3801,6		
PG 58–28 +%10SK Orijinal	1	1751,3	76,84	1798,53	≥ 1000	PG 64-Y
	2	1791	76,91	1838,78		
	3	1771	76,89	1813,39		
	Ortalama			1816,9		
PG 58–28 +%10SK Yaşlandırılmış	1	5411,1	73,69	5637,99	≥ 2200	PG 64-Y
	2	5447,9	73,63	5678,08		
	3	5367,2	73,73	5591,11		
	Ortalama			5635,727		
PG 58–28 +%15SK Orijinal	1	3382,6	74,31	3513,52	≥ 1000	PG 70-Y
	2	3347,7	74,33	3476,93		
	3	3368,2	74,34	3498,05		
	Ortalama			3496,17		
PG 58–28 +%15SK Yaşlandırılmış	1	7427,2	62,55	8369,49	≥ 2200	PG 70-Y
	2	7762	60,48	8919,96		
	3	7099,2	63,80	7912,1		
	Ortalama			8400,52		



Şekil 5.14. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği-G* Değişimi

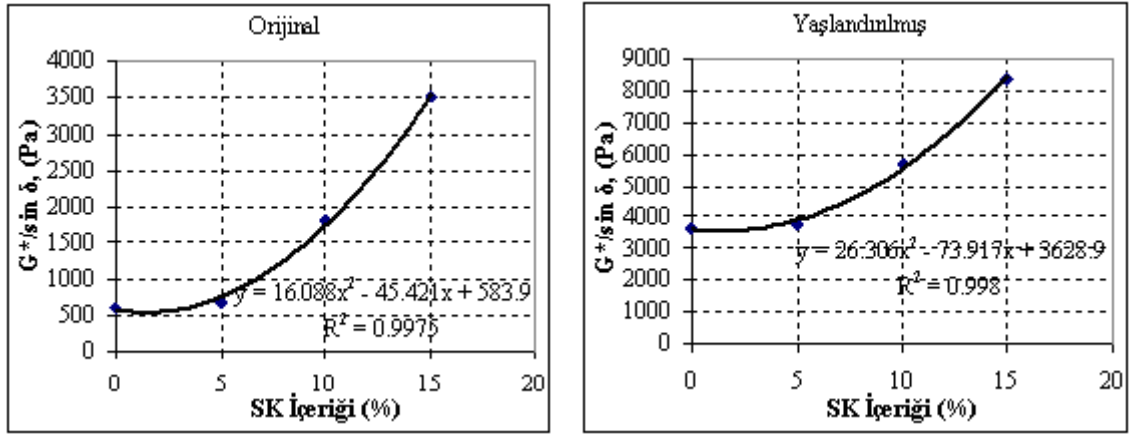


Şekil 5.15. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği-δ Değişimi



Şekil 5.16. 64°C Sıcaklıkta Orijinal ve Yaşlandırılmış Bağlayıcıların SK İçeriği-G*/sin δ Değişimi

Orijinal ve yaşlandırılmış modifiye bağlayıcıların 64°C sıcaklıktaki tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin \delta$), Siyah Karbon (SK) yüzdesi ile ilişkisi Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Orijinal ve Yaşlandırılmış Modifiye Bağlayıcıların 64 °C'deki SK İçeriği-G*/sin δ İlişkisi

DSR deney sonuçlarına göre; Tablo 5.9 ve Şekil 5.9 incelendiğinde uygulama bölgesi için seçilmiş olan ana bağlayıcının (PG 64–22) tekerlek izi parametresinin ($G^*/\sin\delta$) orijinal bağlayıcı için 1232,12 Pa ile şartname limiti olan min.1000 Pa değerini sağladığı, ayrıca RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı için 6081,35 Pa değeri ile şartname limiti olan min. 2200 Pa değerini sağladığı görülmektedir. Buna göre, Elazığ için seçilmiş olan ana bağlayıcısının 64 °C yüksek sıcaklıktaki performans özelliklerini sağlaması sebebiyle PG 64-Y sınıfı bir bağlayıcı olduğu; ayrıca bu bağlayıcının şartname limitlerini yaklaşık 66 °C sıcaklığa kadar sağladığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.10 ve Şekil 5.10 incelendiğinde, modifiye amaçlı seçilen PG 58–28 bağlayıcısının şartname limitlerini yaklaşık 60 °C sıcaklığa kadar sağladığı ve dolayısıyla bu bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının PG 58-Y olduğu görülmektedir. PG 58–28 bağlayıcısına %5 SK ilave edilmesiyle elde edilen modifiye bağlayıcının DSR deney sonuçları incelendiğinde (Tablo 5.11 ve Şekil 5.11), PG 58–28 bağlayıcısına göre tekerlek izi parametresinde artış olmasına rağmen bağlayıcı sınıfının değişmediği, dolayısıyla PG 58-Y olduğu görülmüştür. Tablo 5.12 ve Şekil 5.12 incelendiğinde, PG 58–28+%10 SK modifiye bağlayıcısının, PG 58–28 bağlayıcısına göre sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düştüğü ve tekerlek izi dayanımının arttığı, ayrıca modifiye bağlayıcının 69 °C sıcaklığa kadar şartname limitlerini sağladığı görülmektedir. Buna göre PG 58–28+%10 SK modifiye bağlayıcısının yüksek sıcaklık performans derecesi PG 64-Y olarak uygulama bölgesi için seçilen ana bağlayıcıya eşit bulunmakla beraber tekerlek izi dayanımı daha yüksek elde edilmiştir. PG 58–28+%15 SK modifiye bağlayıcısının DSR deney sonuçları (Tablo 5.13 ve Şekil 5.13) incelendiğinde şartname limitlerinin yaklaşık 75 °C yüksek sıcaklığa kadar sağlandığı, tekerlek izi dayanımı ve sıcaklık hassasiyetinin PG 58–28 bağlayıcısına göre önemli ölçüde arttığı ve modifiye bağlayıcı performans sınıfının PG 70-Y'ye yükselerek uygulama bölgesi için seçilen

ana bağlayıcı derecesini de geçtiği görülmektedir. Modifiye bağlayıcılar kendi içinde değerlendirildiklerinde, bağlayıcı şartnamesine göre %5 SK katkılı bağlayıcının performans derecesinde PG 58–28 bağlayıcısına göre değişim olmadığı, %10 SK katkılı bağlayıcının performans derecesinin bir sınıf (6 °C) artarak uygulama bölgesi performans derecesine eşit olduğu ve %15 SK katkılı bağlayıcının iki sınıf (12 °C) artması sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmektedir.

Tablo 5.14’deki verilere ve Şekil 5.16’ya göre, SK katkılı orijinal ve yaşlandırılmış bağlayıcıların 64°C sıcaklıktaki DSR deney sonuçları değerlendirildiğinde, orijinal PG 58–28 bağlayıcısına göre orijinal SK katkılı bağlayıcıların (%5, 10, 15) tekerlek izi parametrelerinin sırasıyla yaklaşık %12, %198 ve %473’lük bir artış meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde, yaşlandırılmış bağlayıcılarda bu değer artışı sırasıyla %4, %54 ve %129 olarak meydana gelmiştir. Bu sebeple SK ilave edilmiş bağlayıcılarda, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü, tekerlek izine karşı dayanımının önemli ölçüde arttığını ve sonuç olarak, bağlayıcının daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabileceğini ifade etmek mümkündür.

Şekil 5.14 incelendiğinde, malzemenin sürekli tekrar eden kayma gerilmelerine tabi tutulmasıyla deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olan kayma modülü (G^*) değerinin hem orijinal hem de yaşlandırılmış bağlayıcılarda SK katkı miktarının artmasıyla önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Şekil 5.15 incelendiğinde PG 58–28 bağlayıcısına göre, %5 SK katkılı bağlayıcının faz açısının (δ) kısmen yükseldiği yani bağlayıcının daha da viskoz hale geldiği ancak katkı miktarlarının artması ile birlikte faz açılarında düşüş meydana geldiği dolayısıyla modifiye bağlayıcıların SK miktarının artması ile birlikte daha elastik bir katı gibi davrandıkları görülmektedir. Bu iki özellik dolayısıyla, bağlayıcılara SK ilave edilmesiyle bağlayıcıların deformasyonlara karşı göstermiş olduğu dirençte büyük artışlar meydana gelirken aynı zamanda bağlayıcının elastiklik özelliğinin de arttığı görülmektedir.

Şekil 5.17’deki grafik incelendiğinde, yüksek sıcaklık derecesi için elde edilen tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) bakımından uygulama bölgesi için seçilmiş olan PG 64–22 ana bağlayıcı eşdeğeri bir modifiye bağlayıcı elde etmek için, daha yumuşak bir bağlayıcı olan PG 58–28 bağlayıcısına matematiksel olarak yaklaşık %7 SK ilave edilmesiyle şartname alt limit değerlerinin sağlanabildiği görülmektedir. Ancak, yapılan deneysel çalışmalarda daha emniyetli tarafta kalmak amacıyla %10 SK katkı oranının uygun olduğu görülmüştür.

5.2.2.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (AASHTO TP1)

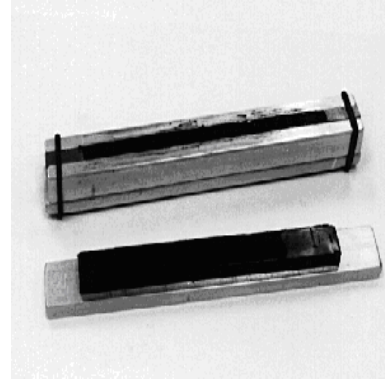
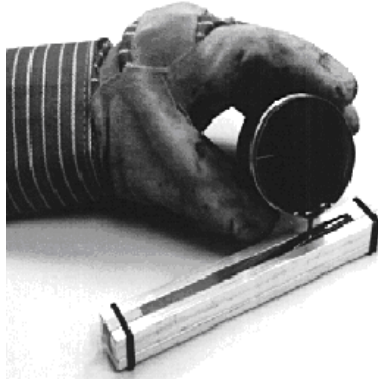
Superpave sisteminde bulunan Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deneyi, bağlayıcıların soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlaklarına karşı dayanımlarını ve bağlayıcının performans seviyesi değerlerini tespit etmek amacıyla uygulanan bir deneydir. Superpave yönteminde düşük ısı çatlaklarının bağlayıcıların servis ömürleri boyunca meydana geldiği göz önünde bulundurulduğundan, bitümlü bağlayıcılar önce RTFOT deney yöntemi ile kısa süreli yaşlandırıldıktan sonra PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırılarak deneye tabi tutulmaktadır. Ancak, PAV yaşlandırma deney cihazının bulunmaması sebebiyle, çalışmada bağlayıcıların uzun süreli servis koşullarındaki düşük sıcaklık performans seviyesi belirlenememiştir. Fakat bunun yerine, bağlayıcıların kısa süreli yaşlandırma işleminden sonraki veya kaplamanın inşaatından hemen sonraki düşük sıcaklıklarda göstereceği performans özellikleri tespit edilerek, bu özelliklerin kaplamanın uzun süreli servis koşullarındaki düşük sıcaklık performans seviyesi tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Deneyde ilk olarak PG 64–22 bağlayıcısının, düşük servis sıcaklığı olan -22 °C’deki performans özelliklerini sağlayıp sağlamadığının tespiti için RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcı, -22°C’de, bir düşük sıcaklık derecesi olan -28°C’de ve -34°C’de BBR deneyine tabi tutulmuş, bağlayıcının sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m-değer) değerleri elde edilerek, bağlayıcının düşük servis sıcaklıklarında termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmiştir. Yine modifikasyon için seçilmiş olan PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcıya belirli oranlarda SK katılarak elde edilmiş olan PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK modifiye bağlayıcıları da RTFOT ile yaşlandırılarak aynı sıcaklıklarda deneye tabi tutulmuş ve düşük sıcaklık performans özellikleri tespit edilmiştir.

Bağlayıcıların yüke bağlı olmayan, ancak iklim ve çevre şartlarından kaynaklanan düşük sıcaklıklardaki davranışlarının gözlenmesi amacıyla, saf ve katkılı bağlayıcılar, Şekil 5.18’de görülen kiriş eğme reometresi (BBR) cihazı kullanılarak deneye tabi tutulmuştur. Saf ve modifiye edilmiş ve yaşlandırılmış olan asfalt bağlayıcılar 140 °C ısıtılarak Şekil 5.19’da görüldüğü gibi alüminyum kalıplara doldurulmuştur. Soğuyan numuneler, kalıplardan çıkartılarak BBR aletinin sıvı banyosunda 60 dakika deney sıcaklığında (-22, -28 ve -34°C) koşullandırılmıştır.



Şekil 5.18. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti



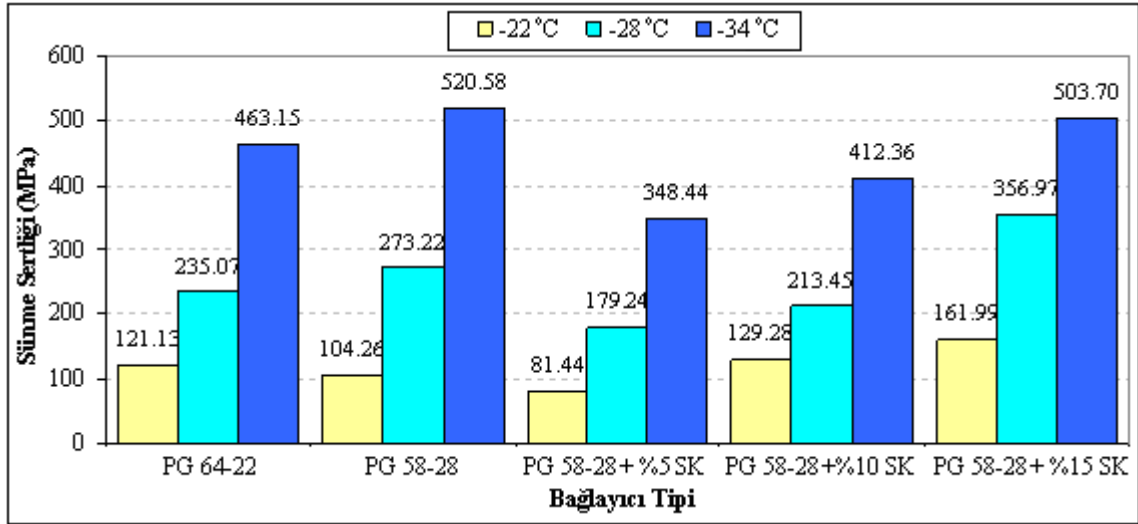
Şekil 5.19. BBR Deney Numunelerinin Hazırlanması

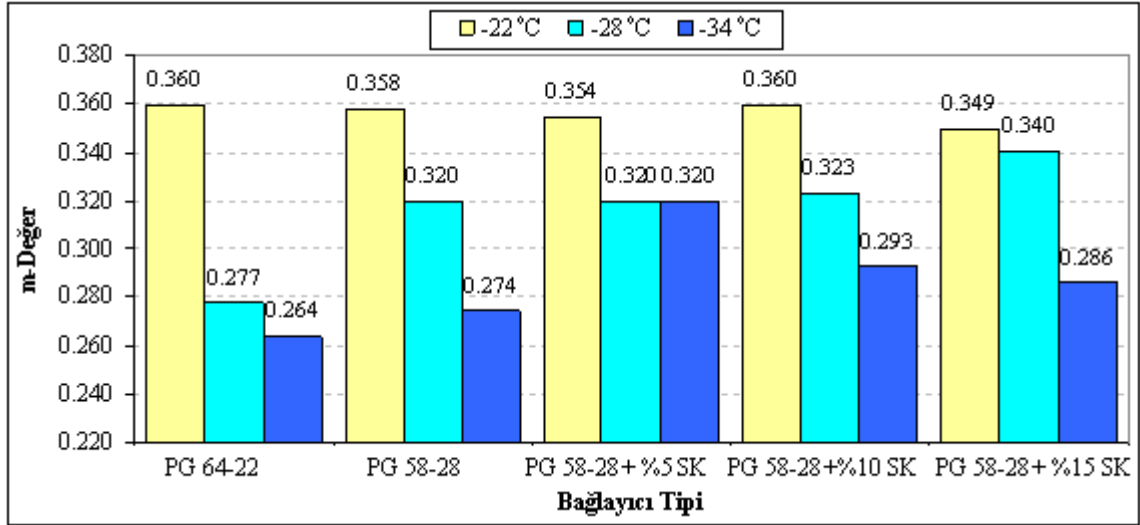
Deney için asfalt kiriş numunesi cihazın mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatılmış ve toplam 240 saniye süreyle kirişe 980 ± 5 mN (100 ± 5 gr) yük uygulanmıştır. Deney esnasında uygulanan 980 mN'luk yükün etkisiyle kirişte meydana gelen defleksiyon, zamana bağlı olarak bilgisayar tarafından grafik halinde çizilmiştir. Ayrıca, sistem yazılımı tarafından 240 saniye sonunda deney yükü otomatik olarak kaldırılmış ve sünme sertliği ile sünme oranı hesaplanmıştır.

Deney sonucunda, saf ve modifiye bağlayıcıların 60 saniye sonra elde edilen sünme değerleri Tablo 5.15'de verilmiştir. Saf ve modifiye karışım numunelerinin, farklı sıcaklıklarda BBR deneyinden elde edilen sünme sertliği (S) ve m-değerlerinin SK katkı miktarına bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de gösterilmiştir.

Tablo 5.15. Saf ve Modifiye Karışımların Farklı Sıcaklıklardaki BBR Deney Sonuçları

Bağlayıcı	Numune	-22 (-12)		-28 (-18)		-34 (-24)	
		S (MPa)	m-değer	S (MPa)	m-değer	S (MPa)	m-değer
PG 64-22	1	127,5579	0,372940	225,6950	0,261865	439,2378	0,287495
	2	126,7864	0,345609	233,3752	0,283090	460,1932	0,260898
	3	109,0495	0,360519	246,1355	0,287176	490,0293	0,243441
	Ortalama	121,1300	0,35970	235,0700	0,277400	463,1500	0,263900
PG 58-28	1	106,3449	0,370156	281,8727	0,333463	573,6923	0,288027
	2	101,6847	0,352191	264,3649	0,273091	469,6232	0,277523
	3	104,7548	0,351814	273,4092	0,353164	518,4358	0,256644
	Ortalama	104,2600	0,358100	273,2200	0,319900	520,5800	0,274100
PG 58-28 + %5SK	1	75,2138	0,348727	171,8494	0,345492	355,4217	0,340806
	2	81,0802	0,387657	176,5341	0,297644	355,5041	0,312292
	3	88,0314	0,326793	189,3229	0,315725	334,3949	0,307380
	Ortalama	81,4400	0,354400	179,2400	0,319600	348,4400	0,320200
PG 58-28 + %10SK	1	113,1548	0,368839	213,3189	0,356168	408,7353	0,276138
	2	137,6913	0,339144	204,4916	0,295710	421,3784	0,326479
	3	136,9770	0,371199	222,5512	0,318450	406,9568	0,275411
	Ortalama	129,2800	0,359700	213,4500	0,323400	412,3600	0,292700
PG 58-28 + %15SK	1	160,4457	0,363277	346,5902	0,320991	490,9404	0,302678
	2	175,5744	0,344824	393,4497	0,340602	524,7667	0,294290
	3	149,9591	0,340199	330,8765	0,358668	495,3983	0,260192
	Ortalama	161,9900	0,349400	356,9700	0,340100	503,7000	0,285700

**Şekil 5.20.** Kiriş Eğme Reometresi Deneyinden Elde Edilen Sünme Sertliği (S) Değerleri



Şekil 5.21. Kiriş Eğme Reometresi Deneyinden Elde Edilen m-Değerleri

Saf ve modifiye bağlayıcıların BBR deney verilerine göre, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 grafikleri incelendiğinde; uygulama bölgesi için seçilen PG 64–22 ana bağlayıcısının -22 °C’deki sünme sertliği değerinin 121,13 MPa ile şartname limiti olan maks.300 MPa değerini sağladığı, yine aynı sıcaklıktaki m-değer’in 0,360 değeri ile min.0,300 şartname limitini sağladığı, dolayısıyla ana bağlayıcısının kaplamanın inşaatından sonraki düşük sıcaklık performans derecesinin PG X–22 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, seçilen ana bağlayıcının yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 64–22 performans derecesini sağladığı ifade edilebilir.

Yine aynı şekillerdeki veriler göz önüne alındığında modifiye amaçlı seçilen PG 58–28 bağlayıcısının -28 °C düşük sıcaklıkta limit değerleri sağladığı, dolayısıyla yüksek ve düşük sıcaklık performans dereceleri birlikte değerlendirildiğinde PG 58–28 performans derecesini sağladığı ifade edilebilir. Benzer şekilde %5 ve %10 SK katkılı PG 58–28 bağlayıcısının düşük sıcaklık performansının, sünme sertliği ve m-değer değerlerinin farklılık göstermesine rağmen PG 58–28 bağlayıcısına göre değişmediği, bununla birlikte yüksek sıcaklık performans derecesi de göz önüne alındığında %5 SK ve %10 SK katkılı modifiye bağlayıcıların performans derecelerinin sırasıyla PG 58–28 ve PG 64–28 olacağı görülmektedir. Ancak buna karşılık, %15 SK katkılı modifiye bağlayıcının düşük sıcaklık performans derecesinin -22 °C olduğu görüldüğünden bu bağlayıcının performans sınıfının PG 70–22 olduğu ifade edilebilir.

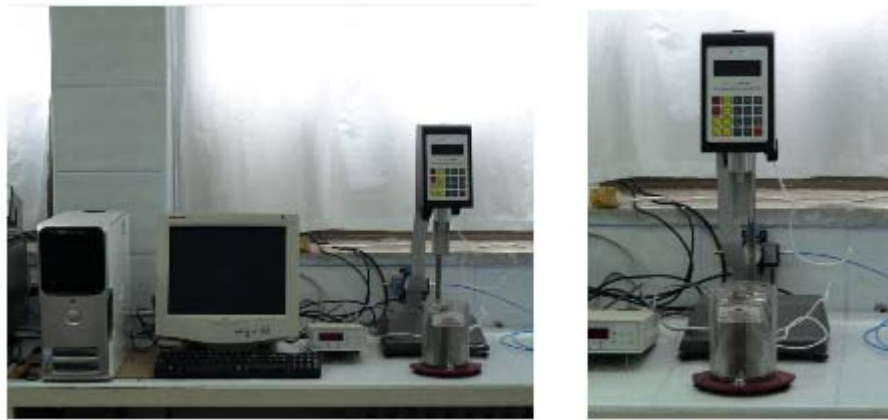
Bu veriler dikkate alındığında, bağlayıcının düşük sıcaklık performansı üzerinde Siyah Karbonun % 10’dan daha büyük oranlarda kullanılması durumunda bağlayıcı rijitliğinin artmasında daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca, uygulama bölgesi için seçilen PG 64–22 ana bağlayıcısına eşdeğer performans özelliği göstermesi bakımından modifiye bağlayıcılar değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklık (64 °C) performansı açısından %10 SK katkılı modifiye

PG 58–28 bağlayıcısının uygun olduğu, bu modifiye bağlayıcının kullanılması durumunda aynı zamanda daha düşük sıcaklıklarda (-28°C) iyi performans göstereceği görülmektedir. Buna karşılık daha yüksek sıcaklıkların hüküm sürdüğü bölgelerde PG 70–22 performans derecesi ile %15 SK katkılı modifiye bağlayıcıların kullanılabileceği görülmektedir.

5.2.2.3. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Dönel viskozimetre deneyi, yaşlandırılmamış saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerinde uygulanan ve karışım tasarımında kullanılacak bu bağlayıcıların, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının tespitinde kullanılmaktadır. Bu amaçla çalışmada, uygulama bölgesi için seçilmiş olan PG 64–22 ana bağlayıcısı ile, modifikasyon için seçilmiş olan PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcıya belirli oranlarda SK katılarak elde edilmiş olan PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK modifiye bağlayıcılarının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları tespit edilmiştir.

Çalışmada, bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleri, Şekil 5.22’de görülen DV-III Ultra Brookfield viskozimetresi kullanılarak belirlenmiştir. Deneye tabi tutulacak bağlayıcılar 140°C ısıtılarak Viskozimetre kabına yaklaşık 10 gr olacak şekilde dökülmüş ve kap Viskozimetreye yerleştirilmiştir. Deney sıcaklığına gelen Viskozimetre sıfırlandıktan sonra, No:27 silindirik mili cihaza takılarak dönme hızı 20 devir/dakika (20 rpm.) hıza ayarlanmış ve deney başlatılmıştır. Deney sırasında sistem tarafından otomatik olarak saptanan viskozluk değeri, numune sıcaklığı dengeli bir duruma geldikçe sabitleşmeye başlar. Bu şekilde saf ve modifiye bağlayıcıların birer dakika aralıklarla üç okuma değeri alınarak deney sonuçları kaydedilmiş ve sonuçları Tablo 5.16’da verilmiştir.

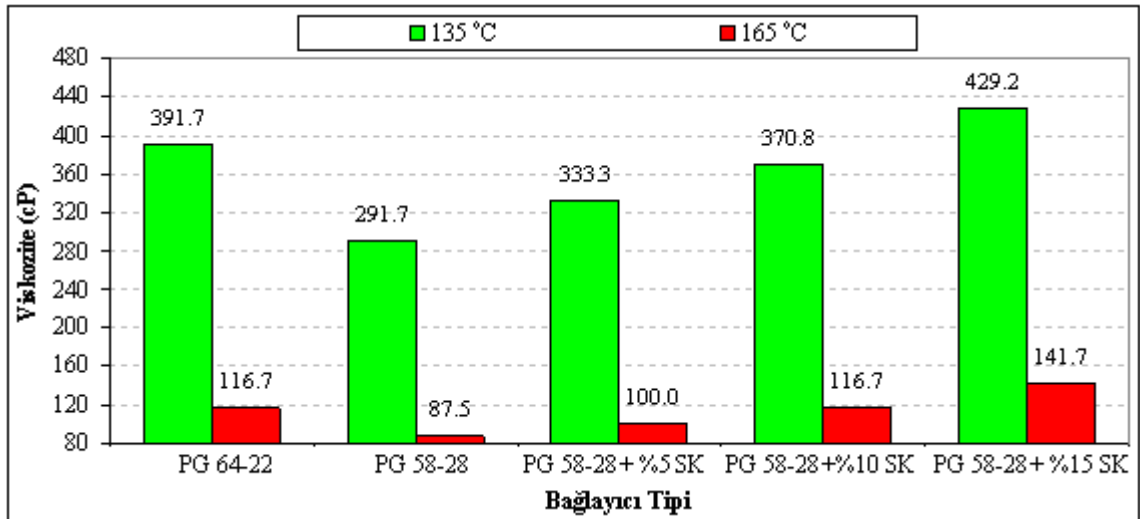


Şekil 5.22. Brookfield DV-III Ultra Dönel Viskozimetresi

Tablo 5.16. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Viskozite Değerleri

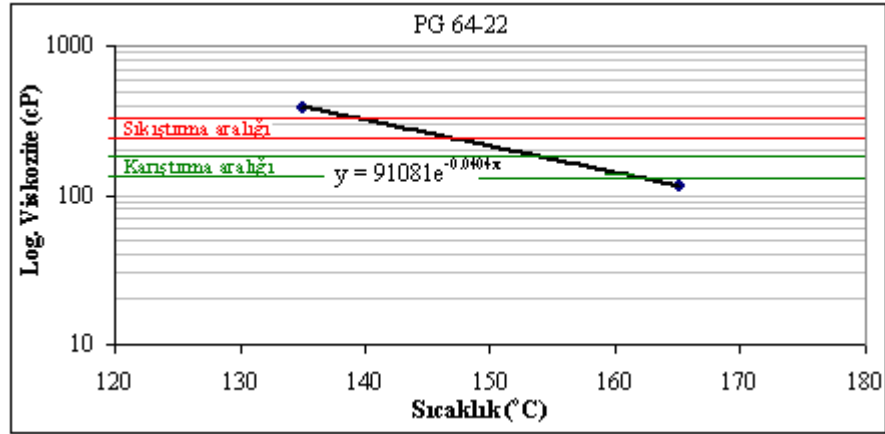
Bağlayıcı	Okumalar	Viskozite, cP	
		135°C	165°C
PG 64-22	1	387,5	112,5
	2	387,5	125,0
	3	400,0	112,5
	Ortalama	391,7	116,7
PG 58-28	1	287,5	87,5
	2	287,5	87,5
	3	300,0	87,5
	Ortalama	291,7	87,5
PG 58-28+%5SK	1	325,0	100,0
	2	350,0	100,0
	3	325,0	100,0
	Ortalama	333,3	100,0
PG 58-28+%10SK	1	375,0	112,5
	2	362,5	112,5
	3	375,0	125,0
	Ortalama	370,8	116,7
PG 58-28+%15SK	1	425,0	137,5
	2	425,0	137,5
	3	437,5	150,0
	Ortalama	429,2	141,7

Saf ve SK ile modifiye edilmiş bağlayıcıların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.23’de grafik olarak gösterilmiştir.

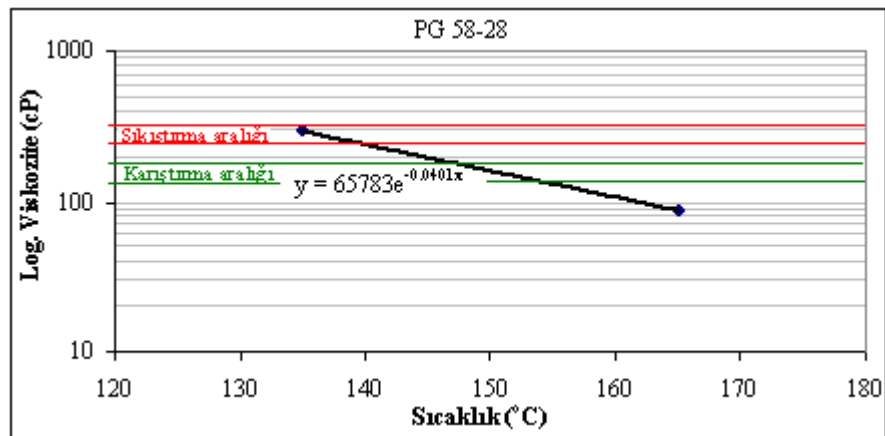
**Şekil 5.23.** Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların 135 ve 165 °C Sıcaklıktaki Viskozite İlişkisi

Superpave yönteminde, bağlayıcıların sıcak karışımında kullanılması durumunda, karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozite değerlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralıklarını belirleyebilmek amacıyla, iki farklı sıcaklıkta (135 ve 165°C) yapılan viskozite deneylerinden elde edilen viskozite değerleri yardımıyla çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır. Yukarıda ifade edilen karıştırma (170 ± 20 cP) ve sıkıştırma (280 ± 30 cP) viskozite değerlerinin viskozite-sıcaklık grafiğini kestiği aralıklar belirlenerek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları bulunur.

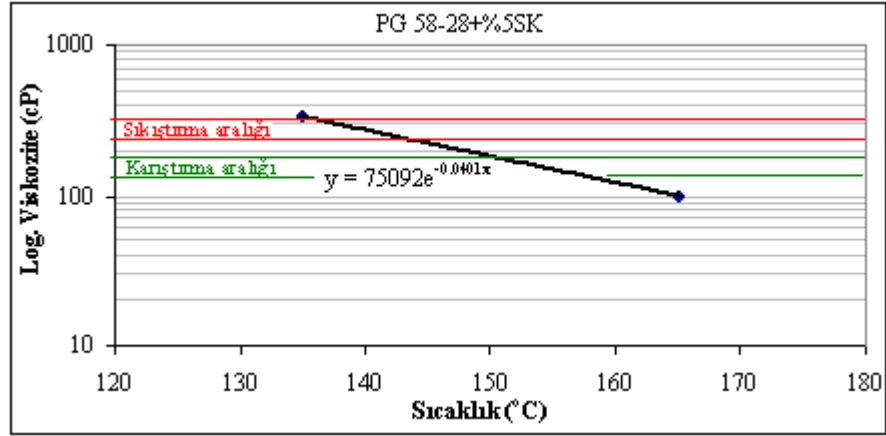
Çalışmada kullanılan saf ve SK modifiyeli karışımların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 5.24–5.28’de gösterilmiştir. Bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bu grafiklerden faydalanılarak tespit edilmiş ve Tablo 5.17’de verilmiştir.



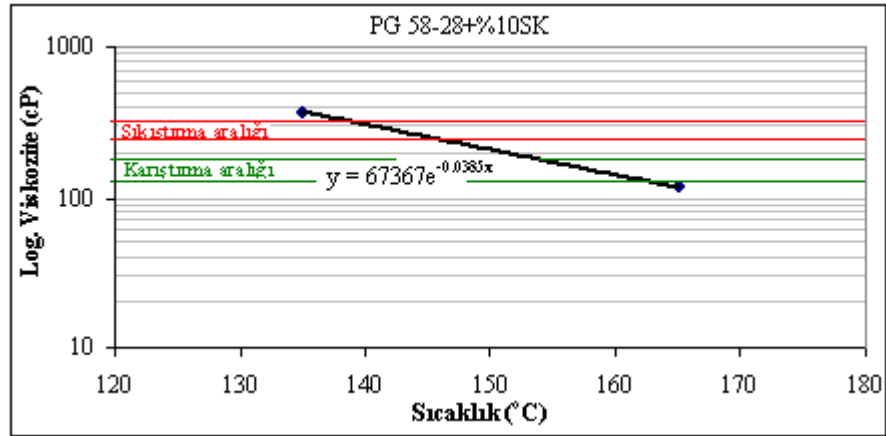
Şekil 5.24. PG 64–22 Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi



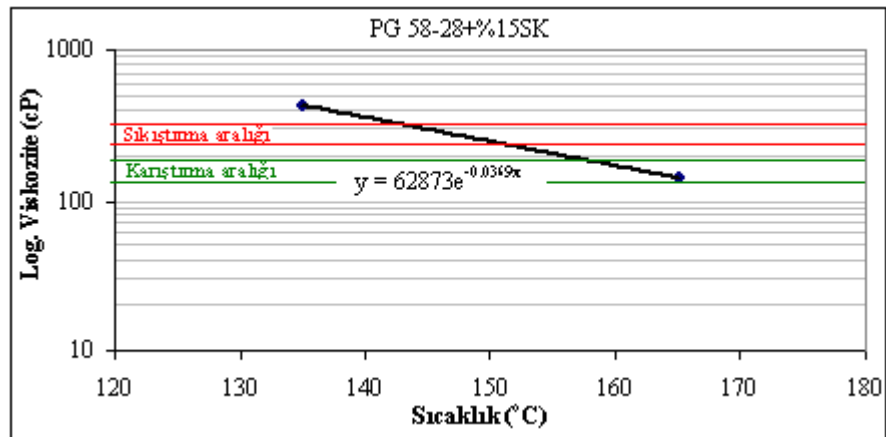
Şekil 5.25. PG 58–28 Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi



Şekil 5.26. PG 58–28+%5SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi



Şekil 5.27. PG 58–28+%10SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi

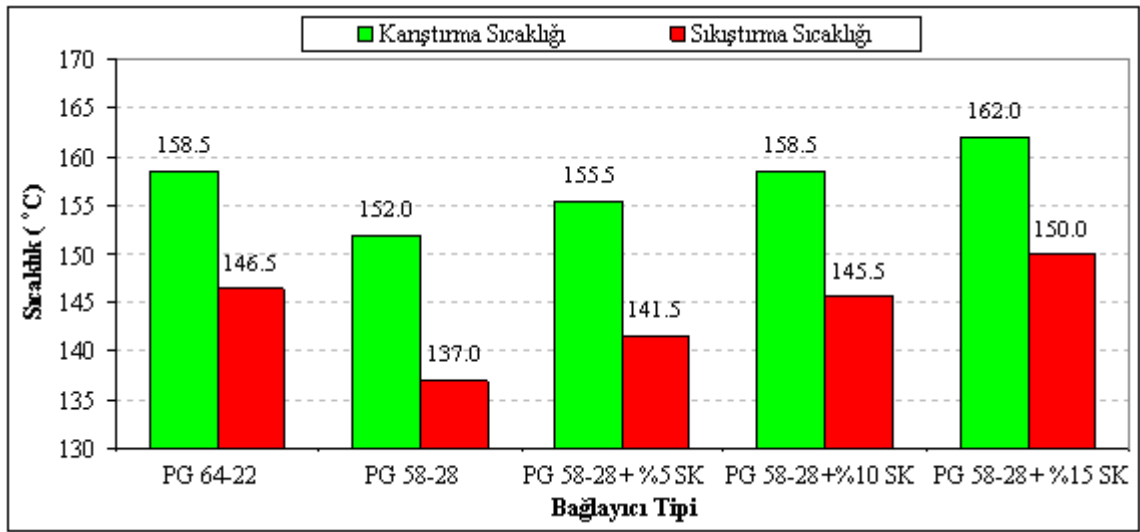


Şekil 5.28. PG 58–28+%15SK Bağlayıcı Viskozitesinin Sıcaklıkla Değişimi

Tablo 5.17. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları

Bağlayıcı	Karıştırma Aralığı, °C	Sıkıştırma Aralığı, °C
PG 64-22	156-161	143-150
PG 58-28	149-155	133-141
PG 58-28+%5SK	153-158	138-145
PG 58-28+%10SK	156-161	142-149
PG 58-28+%15SK	160-164	147-153

Saf ve SK ile modifiye edilmiş bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları arasındaki ilişki Şekil 5.29’da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.29. Saf ve SK Katkılı Modifiye Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları İlişkisi

Şekil 5.23’e göre, seçilen PG 64-22 ana bağlayıcısının 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri sırasıyla 391,7 ve 116,7 cP olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık, modifiye amaçlı kullanılan ve daha yumuşak olan PG 58-28 bağlayıcısının aynı sıcaklıklardaki viskozite değerleri sırasıyla 291,7 ve 87,5 cP olarak bulunmuştur. PG 58-28 bağlayıcısına artan miktarlarda (%5, 10, 15) SK ilave edilmesiyle elde edilen modifiye karışımların 135 ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerlerinde de bu artışa bağlı olarak önemli bir artış meydana gelmiştir. Bu artış miktarı, PG 58-28 bağlayıcısına göre sırasıyla 135 °C sıcaklık için yaklaşık %14, %27 ve %47; 165 °C sıcaklık için %14, %33 ve %62 olarak meydana gelmiştir. Tablo 5.17 ve Şekil 5.29’daki veriler incelendiğinde PG 64-22 ana bağlayıcı için ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sırasıyla 158,5 ve 146,5 °C olarak belirlenmiştir. Buna karşılık PG 58-28 bağlayıcısının ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 152 ve 137 °C olarak tespit edilmiştir. Ancak, PG 58-28 bağlayıcısına artan miktarlarda (%5, 10, 15) SK ilave edilmesiyle elde edilen modifiye karışımların ortalama karıştırma sıcaklıklarında

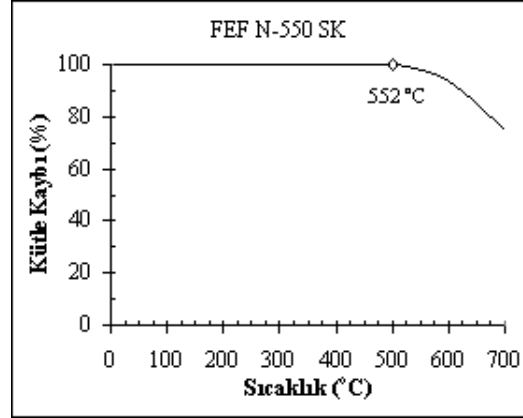
PG 58–28 bağlayıcısına göre sırasıyla %2, %4 ve %7; sıkıştırma sıcaklıklarında ise yaklaşık %3, %6 ve %9 oranında bir artış meydana gelmiştir.

Bu verilere göre, bağlayıcıya SK ilave edilmesiyle katkı miktarına bağlı olarak, elde edilen modifiye bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düşürdüğü ve bağlayıcıların daha sert bir kıvama geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, viskozite veya kıvam bakımından ana bağlayıcıya (PG 64–22) eşdeğer modifiye bağlayıcının yaklaşık %10 oranında SK ilavesiyle elde edilebileceği belirlenmiştir.

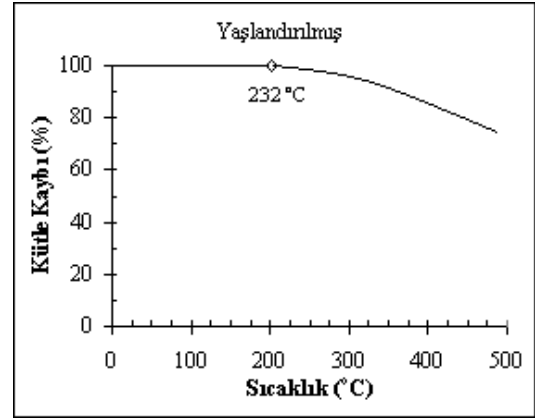
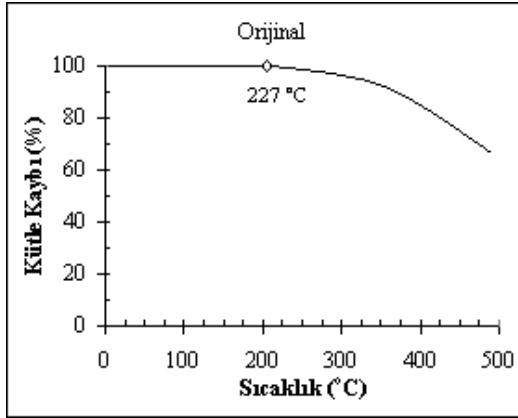
5.2.3. Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Başlangıç Bozulma Sıcaklıklarının Belirlenmesi

Kontrollü şartlarda maddelerin sıcaklığının artırılması ile ağırlıklarındaki değişimin ölçülmesine termogravimetri denilmektedir. Bir madde örneğinin sabit bir ısıtma hızında sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybının incelenmesine dinamik termogravimetri, sabit bir sıcaklıkta zamanın bir fonksiyonu olarak ağırlık kaybının incelenmesine izotermal termogravimetri denir [173]. Bitümlü bağlayıcıların bozulma başlangıç sıcaklıklarının tespit edilmesi amacıyla yaygın olarak termogravimetrik analiz (TGA) kullanılmaktadır. Termogravimetrik analizde bağlayıcı, azot ortamında 10 °C/dakika hızla ortam sıcaklığından 500 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak, kütlede meydana gelen ağırlık kaybı tespit edilmektedir. Analiz sonrası elde edilen sıcaklık-kütle kaybı grafiğinde, kırılmanın meydana geldiği sıcaklık değeri malzemenin başlangıç bozulma sıcaklığı olarak alınmaktadır.

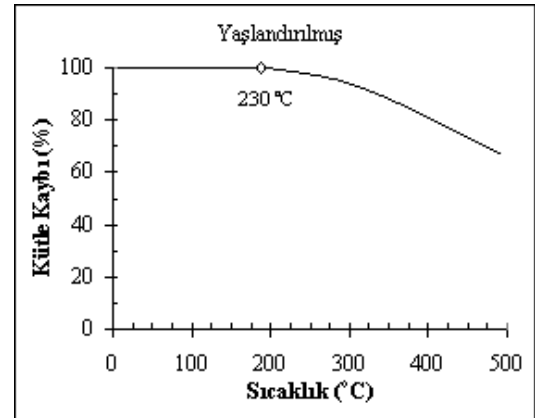
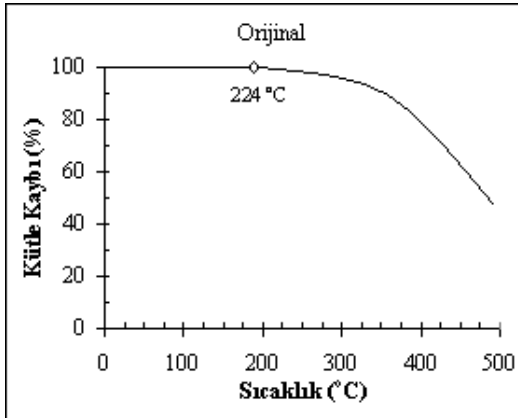
Bu amaçla, çalışmada kullanılan PG 64–22 ana bağlayıcısı ile, katkı maddesi olarak seçilen Siyah Karbonun (SK) ve modifikasyon amaçlı seçilen PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcının SK katkılı PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK modifiye bağlayıcıların bozulma sıcaklıkları termogravimetrik analiz (TGA) ile araştırılmıştır. Termal analiz, 10°C/dak ısıtma hızındaki bir TGA-50 termobalansı kullanılarak azot atmosferinde yapılmıştır. Çalışmada kullanılan SK ile saf ve SK katkılı modifiye bağlayıcıların yaşlandırılmadan önce ve sonraki TGA grafikleri Şekil 5.30–5.35’de, bağlayıcıların bozulma başlangıç sıcaklıkları ise Tablo 5.18’de verilmiştir.



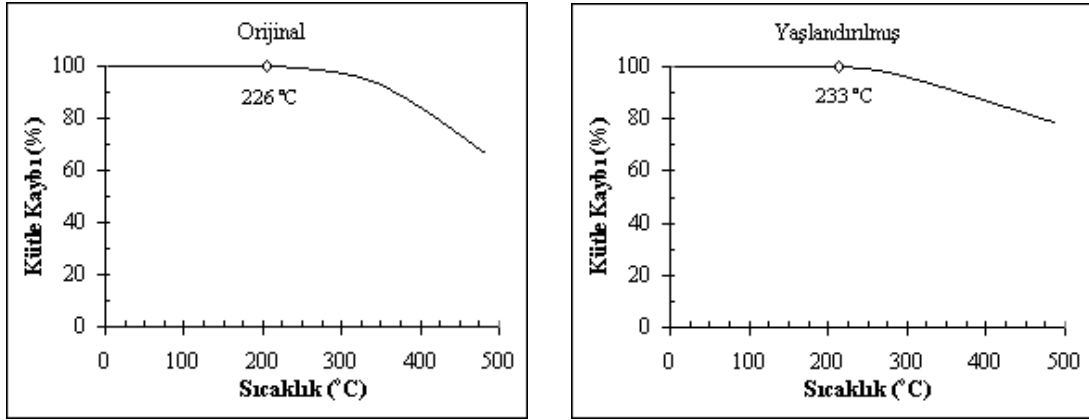
Şekil 5.30. FEF N-550 Siyah Karbonun (SK) TGA Eğrisi



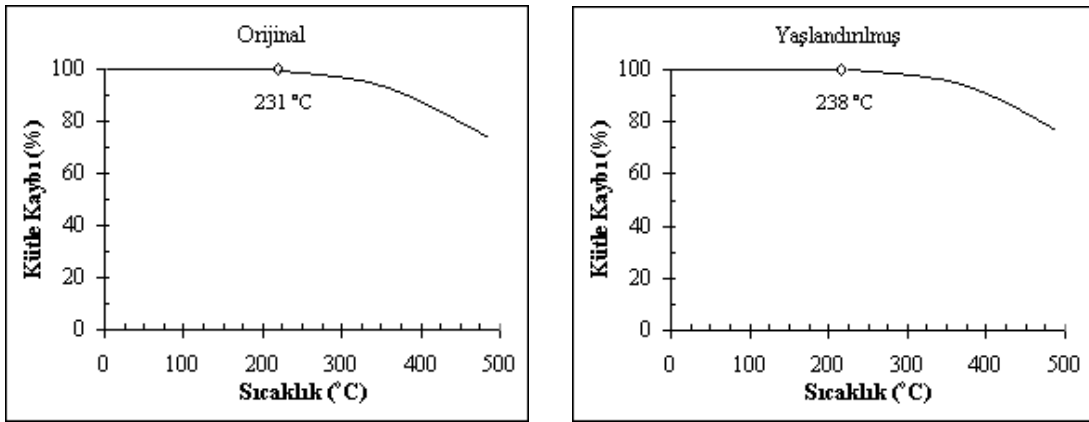
Şekil 5.31. Orjinal ve Yaşlandırılmış PG 64-22 Bağlayıcısının TGA Eğrisi



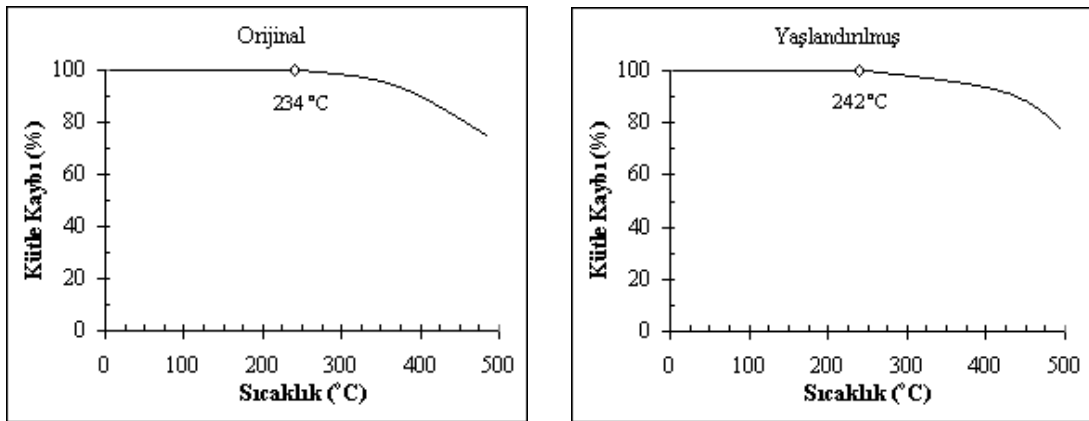
Şekil 5.32. Orjinal ve Yaşlandırılmış PG 58-28 Bağlayıcısının TGA Eğrisi



Şekil 5.33. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58-28+%5SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi



Şekil 5.34. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58-28+%10SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi



Şekil 5.35. Orijinal ve Yaşlandırılmış PG 58-28+%15SK Bağlayıcısının TGA Eğrisi

Tablo 5.18. Saf ve SK Katkılı Bağlayıcıların Yaşlanma Öncesi ve Sonrası Bozulma Sıcaklıkları

Bağlayıcı Tipi	Yaşlanma Öncesi Bozulma Sıcaklıkları, °C	Yaşlanma Sonrası Bozulma Sıcaklıkları, °C
PG 64-22	227	232
PG 58-28	224	230
PG 58-28+%5SK	226	233
PG 58-28+%10SK	231	238
PG 58-28+%15SK	234	242

Şekil 5.30’da belirtilen TGA eğrisi incelendiğinde, Siyah Karbonun başlangıç bozulma sıcaklığının (552 °C), yaşlanma öncesi ve sonrası bütün bağlayıcı değerlerinden yüksek elde edilmesi sebebiyle sıcak karışımlarda kullanılabileceği belirlenmiştir. Tablo 5.18’deki verilere göre yaşlanma öncesi ve sonrasında modifiye bağlayıcıların bozulma sıcaklıklarının, PG 58-28 bağlayıcısına göre, artan SK içeriğine bağlı olarak orantılı bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Ayrıca, bütün bağlayıcıların yaşlanma sonrası bozulma sıcaklıkları incelendiğinde, yaşlanma öncesi sıcaklıklara göre belirli miktarlarda bir artış olduğu görülmektedir. Bağlayıcıların RTFOT yöntemiyle yaşlandırılmasının etkisiyle bağlayıcı ve katkı maddesinin bünyesinde bulunan hafif bileşenler ve uçucu maddelerin buharlaşması sebebiyle bozulma sıcaklıklarında, yaşlanmadan önceki değerlere göre bir artış meydana gelmiştir.

5.3. Dizayn Agrega Gradasyonu Seçimi

Superpave karışım dizayn yöntemine göre, dizayn agrega gradasyonunu seçmek amacıyla, çalışma için seçilmiş olan nominal maksimum 12,5 mm büyüklüğündeki agregaya boyutu esas alınarak, aşağıda Tablo 5.19’da belirtilen sınırlar içerisinde (kontrol noktaları ve yasaklanmış bölge) kalacak şekilde bir gradasyon dizisini kapsayan üç deneme karışımının başlangıç olarak seçilmesi gerekir.

Tablo 5.19. Superpave 12,5 mm Nominal Karışım için Gradasyon Kriterleri [31,149]

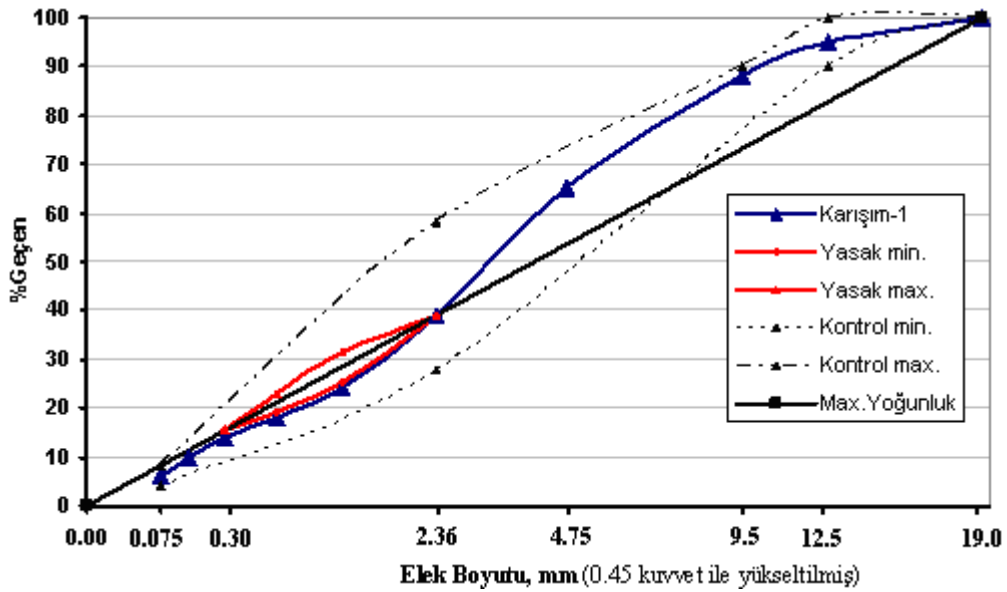
Elek Boyutu, mm	Kontrol Noktaları		Yasaklanmış Bölge	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
19,0	100,0	100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5				
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,150				
0,075	2,0	10,0		

5.3.1. Deneme Agregası Karışımlarının Oluşturulması

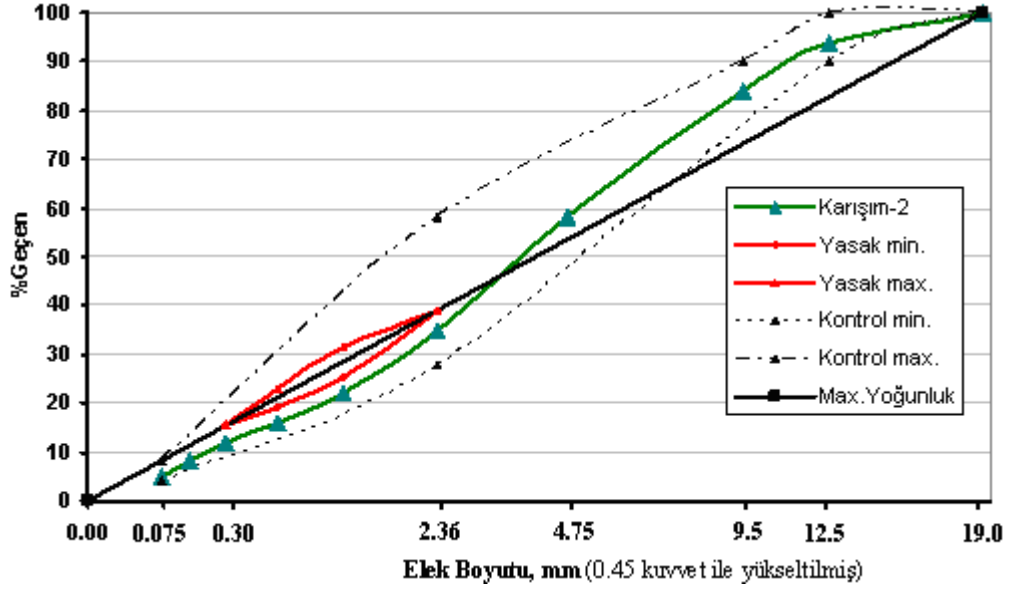
Çalışmada kullanılmak üzere, yukarıda Tablo 5.19’da belirtilen şartname sınırları içerisinde kalacak şekilde başlangıç üç deneme agregası karışımı (Karışım-1, Karışım-2 ve Karışım-3) seçilerek karışım gradasyonları Tablo 5.20’de verilmiştir. Ayrıca, bu üç deneme agregası karışımında kullanılan kaba, ince ve filler agregalarının ağırlıkça yüzdeleri de tabloda verilmiştir. Seçilen bu deneme agregası karışımlarının gradasyon eğrileri aşağıda sırasıyla Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de gösterilmiştir.

Tablo 5.20. Başlangıç Deneme Karışımları

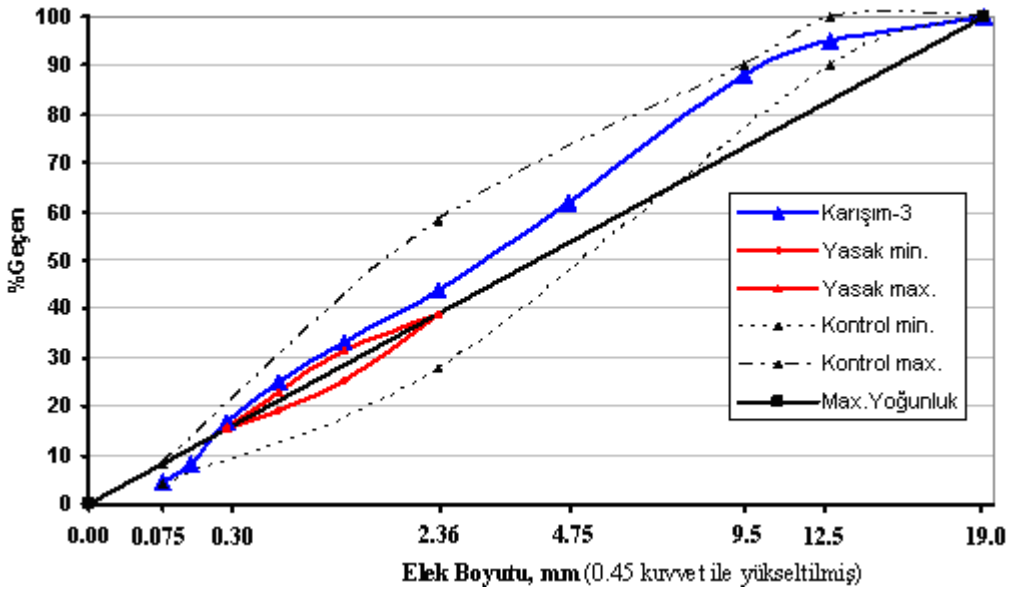
Elek Boyutu, mm	Karışım Gradasyonu, % Geçen		
	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3
19	100	100	100
12,5	95	94	95
9,5	88	84	88
4,75	65	58	62
2,36	39	35	44
1,18	24	22	33
0,600	18	16	25
0,300	14	12	17
0,150	10	8	8
0,075	6	5	4,5
Karışımlardaki Agregası Yüzdelele			
Kaba Agregası	35	42	38
İnce Agregası	59	53	57,5
Filler	6	5	4,5



Şekil 5.36. Karışım-1 Agregası Gradasyon Eğrisi



Şekil 5.37. Karışım-2 Agregada Gradasyon Eğrisi



Şekil 5.38. Karışım-3 Agregada Gradasyon Eğrisi

Seçilen deneme karışımlarındaki, kaba ve ince agregada ile fillerin özgül ağırlıkları tespit edilerek, her bir deneme agregada karışımının hacim (G_{sb}) ve zahiri (G_{sa}) özgül ağırlığı aşağıdaki bağıntıdan (4.27) yararlanılarak hesaplanmış ve bu değerler Tablo 5.21’de gösterilmiştir. Hesaplamalarda, fillerin hacim özgül ağırlığını tespit etmek güç olduğundan zahiri özgül ağırlık değeri kullanılmıştır.

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

Burada; $G_1, G_2 \dots G_N$ değerleri Gsb için hacim, Gsa için zahiri özgül ağırlığı olarak alınmıştır.

$$\text{Karışım-1: Gsb} = \frac{100}{\frac{35}{2,593} + \frac{59}{2,604} + \frac{6}{2,635}} = 2,602$$

$$\text{Gsa} = \frac{100}{\frac{35}{2,610} + \frac{59}{2,621} + \frac{6}{2,635}} = 2,618$$

$$\text{Karışım-2: Gsb} = \frac{100}{\frac{42}{2,590} + \frac{53}{2,593} + \frac{5}{2,635}} = 2,594$$

$$\text{Gsa} = \frac{100}{\frac{42}{2,613} + \frac{53}{2,618} + \frac{5}{2,635}} = 2,617$$

$$\text{Karışım-3: Gsb} = \frac{100}{\frac{38}{2,583} + \frac{57,5}{2,591} + \frac{4,5}{2,635}} = 2,590$$

$$\text{Gsa} = \frac{100}{\frac{38}{2,611} + \frac{57,5}{2,623} + \frac{4,5}{2,635}} = 2,619$$

Tablo 5.21. Deneme Karışımlarının Özgül Ağırlıkları

Özellik	Deney Standardı	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
		Kaba	İnce	Kaba	İnce	Kaba	İnce
Hacim Özgül Ağırlık	ASTM C-127 ve ASTM C-128	2,593	2,604	2,590	2,593	2,583	2,591
Zahiri Özgül Ağırlık		2,610	2,621	2,613	2,618	2,611	2,623
Zahiri Özgül Ağırlık		Filler = 2,635					
Su absorpsiyonu, (%)		0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
Toplam Agrega Karışımı							
Karışım Hacim Özgül Ağırlığı, Gsb		2,602		2,594		2,590	
Karışım Zahiri Özgül Ağırlığı, Gsa		2,618		2,617		2,619	

5.3.2. Deneme Karışımlarının Hazırlanması ve Sıkıştırılması

Agrega özellikleri değerlendirildikten ve uygunluğu tespit edildikten sonraki adımda, her deneme karışımı için hazırlanan asfalt karışım numuneleri sıkıştırılmış ve hacimsel özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla, her bir deneme karışımı için başlangıçta gereken asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi), agregası karışımının efektif özgül ağırlığının (Gse) tespit edilmesi ile birlikte aşağıdaki işlem sırasına göre belirlenmiştir.

Deneme karışımlarının efektif özgül ağırlığı (Gse) aşağıdaki bağıntı (4.39) ile hesaplanmıştır.

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb)$$

$$\text{Karışım-1: } Gse = 2,602 + 0,8 \times (2,618 - 2,602) = 2,615$$

$$\text{Karışım-2: } Gse = 2,594 + 0,8 \times (2,617 - 2,594) = 2,612$$

$$\text{Karışım-3: } Gse = 2,590 + 0,8 \times (2,619 - 2,590) = 2,613$$

Bu bağıntıda, su absorpsiyonuna bağlı olarak değişen katsayı değeri 0,8 olarak alınmıştır. Absorpsiyonu yüksek olan agregalarda bu katsayı 0,6 veya 0,5'e kadar azaltılabilir.

Agrega tarafından absorbe edilecek olan asfalt bağlayıcı hacmi (Vba) aşağıdaki bağıntı (4.40) ile hesaplanmıştır.

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

Vba: Absorbe edilen asfalt bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Pb: Bağlayıcı yüzdesi (0,05 alınmıştır),

Ps: Agreg a yüzdesi (0,95 alınmıştır),

Gb: Bağlayıcının özgül ağırlığı (PG 64–22 için 1,030 alınmıştır),

Va: Hava boşluğu hacmi (karışıma göre, 0,04 cm³/cm³).

$$\text{Karışım-1: } Vba = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,615}\right)} \times \left(\frac{1}{2,602} - \frac{1}{2,615}\right) = 0,004 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-2: } Vba = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,612}\right)} \times \left(\frac{1}{2,594} - \frac{1}{2,612}\right) = 0,006 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

$$\text{Karışım-3: } Vba = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,613}\right)} \times \left(\frac{1}{2,590} - \frac{1}{2,613}\right) = 0,008 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Her üç deneme karışımının efektif bağlayıcı hacmi (Vbe) ise aşağıdaki bağıntı (4.41) ile belirlenmiştir.

$$Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(Sn)$$

Vbe: Efektif bağlayıcı hacmi (karışıma göre, cm³/cm³),

Sn: Agreg a karışımındaki nominal maksimum elek boyutu (mm).

$$\text{Karışım-1,2,3: } Vbe = 0,176 - 0,0675 \times \text{Log}(12,5) = 0,102 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Son olarak, başlangıç deneme asfalt bağlayıcı içeriği (Pbi) aşağıdaki bağıntı (4.42 ve 4.43) ile belirlenmiştir.

$$Pbi = \frac{Gb \times (Vbe + Vba)}{(Gb \times (Vbe + Vba)) + Ws} \times 100$$

Pbi: Karışım ağırlığına göre bağlayıcı yüzdesi,

Ws: Agreganın ağırlığı (gr).

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

$$\text{Karışım-1: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,615}\right)} = 2,214 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,030 \times (0,102 + 0,004)}{(1,030 \times (0,102 + 0,004)) + 2,214} \times 100 = \%4,7$$

$$\text{Karışım-2: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,612}\right)} = 2,212 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,030 \times (0,102 + 0,006)}{(1,030 \times (0,102 + 0,006)) + 2,212} \times 100 = \%4,8$$

$$\text{Karışım-3: } W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{\left(\frac{0,05}{1,030} + \frac{0,95}{2,613}\right)} = 2,213 \text{ gr}$$

$$P_{bi} = \frac{1,030 \times (0,102 + 0,008)}{(1,030 \times (0,102 + 0,008)) + 2,213} \times 100 = \%4,9$$

Hazırlanmış olan üç farklı agrega deneme karışımının her biri için en az iki numune Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı (SGC) ile sıkıştırılmış ve her bir deneme karışımının maksimum teorik özgül ağırlığının (Gmm) tespit edilebilmesi için birer numune fazladan hazırlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, dizayn agrega gradasyonunu tespit etmek için, her bir deneme agrega karışımının sıkıştırılması ve teorik özgül ağırlığının (Gmm) bulunması için dörder adet olmak üzere toplam 12 adet karışım numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım numunelerinin sıkıştırılması için 100 mm (4 inç)'lik silindirik kalıp kullanılmış ve bu kalıp için gereken toplam agrega ağırlığı 1200 gr olarak alınmıştır.

Karışım ağırlığına göre bulunan bağlayıcı yüzdesi (Pbi) yardımıyla, toplam agrega ağırlığına göre alınacak bağlayıcı miktarı (Wb) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$W_b = \frac{W_s \times P_{bi}}{100 - P_{bi}}$$

$$\text{Karışım-1: } W_b = \frac{1200 \times 4,7}{100 - 4,7} = 59,2 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-2: } W_b = \frac{1200 \times 4,8}{100 - 4,8} = 60,5 \text{ gr}$$

$$\text{Karışım-3: } W_b = \frac{1200 \times 4,9}{100 - 4,9} = 61,8 \text{ gr}$$

Asfalt karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması için gerekli olan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, bitüm modifikasyonu bölümünde, asfalt bağlayıcının (PG 64–22) viskozite-sıcaklık diyagramı kullanılarak tespit edilmiştir. Buna göre, uygulama bölgesi için ana bağlayıcı olarak seçilmiş olan PG 64–22 asfalt bağlayıcısının karıştırma sıcaklığı 156–161 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 143–150 °C sıcaklık aralığında tespit edilmiştir.

Çalışmada ilk olarak, deneme agregası karışımlarının sıkıştırılması amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu amaçla; belirlenen karışım sıcaklığına erişmesi için hazırlanan asfalt bağlayıcı 2 saat, agregası ise 3 saat kadar etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış asfalt bağlayıcı ısıtılmış agregası üzerine önceden belirlenen miktarda dökülerek bir karıştırıcı vasıtasıyla agregası taneleri asfalt bağlayıcı ile iyice kaplanana kadar 1,5–2 dakika karıştırılmıştır. Karışım, düz ve yayvan bir tepsiye metrekaresine 21–22 kg düşecek kalınlıkta yerleştirilmiş ve önceden ısıtılmış 135 °C’deki etüve konularak 4 saat boyunca kısa süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Karışım numuneleri, yaşlandırma işleminden sonra, sıkıştırma sıcaklığına ulaşması için yaklaşık 30 dakika etüvde bekletilmiştir. Bu sırada, ilk numunenin sıkıştırılmasından yaklaşık 45–60 dakika önce, sıkıştırma kalıbı, alt ve üst plakalar sıkıştırma sıcaklığına ayarlanmış bir etüve konulmuş ve yağurmalı sıkıştırıcının sıkıştırma basıncı (600 kPa), açısı (1,25°), yağurma hızı (30 devir/dak.) ve yağurma sayısı istenilen değerlere ayarlanarak hazırlanmıştır. Sıkıştırma enerjisinin bir fonksiyonu olan yağurma sayısı; trafik sayısı ve yolun sınıfına bağlı olarak AASHTO TP4 standardı ile güncellenmiş son şekliyle Tablo 5.22’de görülmektedir.

Tablo 5.22. Trafik Seviyesine Göre Sıkıştırma Parametreleri [151,173]

Dizayn 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

Superpave sisteminde sıkıştırma enerjisi, yağurma sayısının (Ndes) bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. Nini sayısı karışımın sıkışabilirliğini, Nmaks sayısı ise karışımın ulaşabileceği maksimum yoğunluğu tespit etmek için kullanılmaktadır. Çalışmada, kabul edilen 15 milyon eşdeğer tek dingil yükü tekerrür sayısına göre sıkıştırma parametreleri; Nini = 8, Ndes = 100 ve Nmaks = 160 olarak alınmıştır.

Çalışmada, Avustralya yapımı olan ve Avustralya karayolu otoriteleri tarafından kullanılan “Gyropac” yağurmalı sıkıştırıcısı kullanılmıştır. Orijinal cihaz, 0-3° aralığında

yoğurma açısına sahip, yoğurma hızı 60 devir/dakika, yoğurma basıncı 0–700 kPa olarak ayarlanabilen ve 100 mm ile 150 mm’lik numune dökmeye elverişli olarak imal edilmiştir. Ayrıca, yoğurma sayısını gösteren otomatik bir sayaca ve yoğurma basıncını gösteren bir göstergeye sahiptir. Hava basıncı ve elektrik enerjisiyle çalışan cihazın basınç ve açı ayarları mekanik olarak elle yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar başlamadan önce Cihazın yoğurma hızı, Superpave sistemine uygun olarak 30 devir/dakika hıza getirilmiş ve buna bağlı olarak yoğurma sayacı bu hıza göre düzenlenerek cihaz modifiye edilmiştir. Deney çalışmalarında kullanılan modifiye edilmiş “Gyropac” yoğurmalı sıkıştırıcısı Şekil 5.39’da gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Gyropac Yoğurmalı Sıkıştırıcı

Deney için sıkıştırma sıcaklığına getirilerek hazırlanan karışımlar kalıba yerleştirilerek sıkıştırma işlemine başlanmıştır. Sıkıştırma işlemi esnasında, karışımların belirli yoğurma sayılarındaki yükseklikleri ölçülmüş ve istenen yoğurma sayısı ($N_{des} = 100$) tamamlanıncaya kadar numuneler sıkıştırılmıştır. Sıkışan numuneler yaklaşık 5 dakikalık bir bekleme süresi sonunda zarar görmeden kalıptan çıkartılarak soğumaya bırakılmış ve bu numunelerin hacim özgül ağırlığı ($G_{mb}(\text{ölçülen})$), AASHTO T166 [175] standardına göre tespit edilerek değerleri Tablo 5.23’te verilmiştir.

Tablo 5.23. Deneme Karışımlarının Ölçülen Hacim Özgül Ağırlıkları

Hacim Özgül Ağırlık, $G_{mb}(\text{ölçülen})$	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
	1	2	1	2	1	2
Kuru ağırlık, A (gr)	1252,16	1254,13	1255,15	1254,95	1252,34	1253,15
Doygun yüzey kuru ağırlık, B (gr)	1257,30	1259,10	1260,0	1260,20	1255,12	1256,55
Sudaki ağırlık, C (gr)	725,40	728,50	720,86	721,56	721,80	722,10
$G_{mb}(\text{ölçülen}) = A/(B-C)$	2,354	2,364	2,328	2,330	2,348	2,345

Daha sonra, deneme agrega karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlıklarının (Gmm) tespit edilmesi amacıyla her bir deneme karışımı için iki olmak üzere toplam 6 adet asfalt karışımı daha hazırlanmıştır. Yukarıda ifade edildiği gibi hazırlanan ve yaşlandırma işleminden sonra soğumaya bırakılan karışım numunelerinin maksimum teorik özgül ağırlıkları AASHTO T209 [176] standardına göre tespit edilerek sonuçları Tablo 5.24’de verilmiştir.

Tablo 5.24. Deneme Karışımlarının Maksimum Teorik Özgül Ağırlıkları

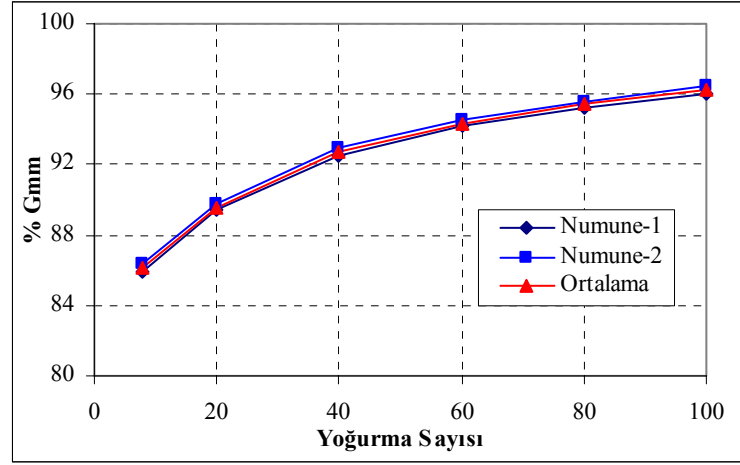
Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	Karışım-1		Karışım-2		Karışım-3	
	1	2	1	2	1	2
Piknometre, A (gr)	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7	984,9	984,9
Piknometre +Su, B (gr)	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3	2969,8	2969,8
Piknometre +Numune, C (gr)	2343,8	2345,3	2342,9	2341,5	2242,5	2243,8
Piknometre +Numune+Su, D (gr)	3817,8	3819,2	3812,6	3810,8	3712,8	3712,6
$Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))$	2,450	2,452	2,427	2,423	2,444	2,439
Ortalama, Gmm	2,451		2,425		2,442	

5.3.3. Deneme Karışımlarının Değerlendirilmesi

Her bir karışım numunesinin elde edilen sıkıştırma verileri (hx, Gmb(ölçülen), Wm, Gmm) kullanılarak, dizayn yoğurma sayısındaki (Ndes) 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 5.25’te deneme karışımlarından Karışım-1’in, PG 64–22 ana bağlayıcısı ile %4,7 bitüm içeriğinde hazırlanan numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri verilmiştir. Sıkıştırılan Karışım-1 numunelerinin farklı yoğurma sayılarındaki yoğunluk değerleri ve bu değerlerin ortalaması Şekil 5.40’da gösterilmiştir.

Tablo 5.25. Karışım-1 Numunelerinin %4,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1252,16gr		Numune-2		Wm = 1254,13gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,0	2,045	2,107	85,95	78,2	2,043	2,116	86,32	86,14
20	75,0	2,127	2,191	89,39	75,2	2,124	2,200	89,77	89,58
40	72,5	2,200	2,266	92,47	72,6	2,201	2,279	92,98	92,72
60	71,22	2,240	2,308	94,16	71,4	2,238	2,317	94,54	94,35
80	70,4	2,266	2,334	95,23	70,6	2,263	2,344	95,61	95,42
100	69,8	2,285	2,354	96,05	70,0	2,282	2,364	96,43	96,24
Gmb(ölçülen)		2,354			2,364				
Düz. Faktörü. (C)		1,030			1,036				
Gmm(ölçülen)		2,451							



Şekil 5.40. Karışım-1 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

Tablo 5.25'te dizayn yoğurma sayısında (Ndes) 1.Numune için gösterilen hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$W_m = 1252,16 \text{ gr}$$

$$V_{mx} = \frac{\pi d^2 h x}{4} \times 0,001$$

$$V_{mx} = \frac{3,14 \times 100^2 \times 69,8}{4} \times 0,001 = 547,93 \text{ cm}^3$$

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

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

$$G_{mb}(\text{tahmini}) = (1252,16 / 547,93) / 1 = 2,285$$

$$G_{mb}(\text{ölçülen}) = 2,354$$

$$G_{mm}(\text{ölçülen}) = 2,451$$

$$C = \frac{G_{mb}(\text{ölçülen})}{G_{mb}(\text{tahmini})} = 2,354 / 2,285 = 1,030$$

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

$$G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) = 1,030 \times 2,285 = 2,354$$

$$\% G_{mm} = 100 \times G_{mb}(\text{düzeltilmiş}) / G_{mm}(\text{ölçülen})$$

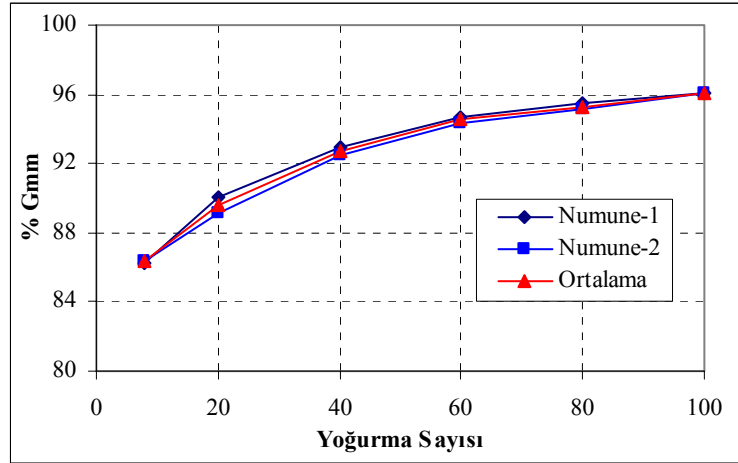
$$\% G_{mm} = 100 \times 2,354 / 2,451 = \%96,04$$

$$\text{Ortalama } \% G_{mm} = (96,04 + 96,43) / 2 = \%96,24$$

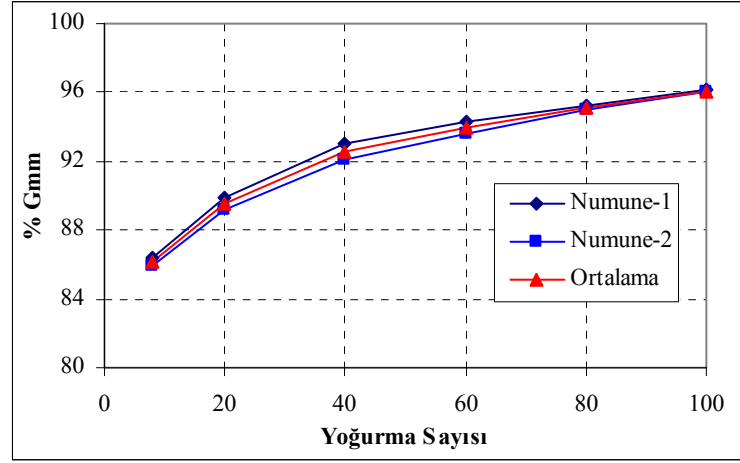
Karışım-2'nin %4,8 ve Karışım-3'ün %4,9 bitüm içeriğinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.26 ve Tablo 5.27'de, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de verilmiştir.

Tablo 5.26. Karışım-2 Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım-2 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1255,15gr		Numune-2		Wm = 1254,95gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,037	2,091	86,23	78,2	2,044	2,094	86,38	86,31
20	75,2	2,126	2,183	90,02	75,8	2,109	2,161	89,12	89,57
40	72,8	2,196	2,255	92,98	73,0	2,190	2,244	92,54	92,76
60	71,5	2,236	2,295	94,67	71,6	2,233	2,288	94,35	94,51
80	70,9	2,255	2,315	95,48	71,0	2,252	2,307	95,14	95,31
100	70,5	2,268	2,328	96,02	70,3	2,274	2,330	96,09	96,05
Gmb(ölçülen)		2,328			2,330				
Düz. Faktörü. (C)		1,026			1,025				
Gmm(ölçülen)		2,425							

**Şekil 5.41.** Karışım-2 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması**Tablo 5.27.** Karışım-3 Numunelerinin %4,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım-3 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1252,34gr		Numune-2		Wm = 1253,15gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,0	2,045	2,110	86,41	78,2	2,041	2,099	85,94	86,17
20	75,0	2,127	2,195	89,87	75,4	2,117	2,177	89,13	89,50
40	72,5	2,200	2,270	92,97	73,0	2,187	2,248	92,06	92,51
60	71,5	2,231	2,302	94,27	71,8	2,223	2,286	93,60	93,93
80	70,8	2,253	2,325	95,20	70,7	2,258	2,322	95,06	95,13
100	70,1	2,276	2,348	96,15	70,0	2,281	2,345	96,01	96,08
Gmb(ölçülen)		2,348			2,345				
Düz. Faktörü. (C)		1,032			1,028				
Gmm(ölçülen)		2,442							



Şekil 5.42. Karışım-3 Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

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. Bu amaçla, deneme karışımlarının özelliklerinin tayin edilebilmesi ve şartname limitleri ile karşılaştırılabilmesi için, hesaplamalar için gerekli olan ortalama %Gmm@Ndes ve %Gmm@Nini değerleri Tablo 5.25, Tablo 5.26 ve Tablo 5.27’den alınarak aşağıda Tablo 5.28’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 5.29’da verilmiştir.

Tablo 5.28. Deneme Karışımlarının Nini ve Ndes’deki %Gmm Değerleri

Deneme Karışımı	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	86,14	96,24
Karışım-2	86,31	96,05
Karışım-3	86,17	96,08

$$V_a = 100 - \%Gmm@Ndes$$

$$\text{Karışım-1: } V_a = 100 - 96,24 = \%3,76$$

$$\text{Karışım-2: } V_a = 100 - 96,05 = \%3,95$$

$$\text{Karışım-3: } V_a = 100 - 96,08 = \%3,92$$

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

$$\text{Karışım-1: } VMA = 100 - \left(\frac{96,24 \times 2,451 \times 0,953}{2,602} \right) = \%13,60$$

$$\text{Karışım-2: } VMA = 100 - \left(\frac{96,05 \times 2,425 \times 0,952}{2,594} \right) = \%14,52$$

$$\text{Karışım-3: VMA} = 100 - \left(\frac{96,08 \times 2,442 \times 0,951}{2,590} \right) = \%13,84$$

Tablo 5.29. Deneme Karışımlarının Sıkıştırma Hesap Özeti

Deneme Karışımı	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
Karışım-1	4,7	86,14	96,24	3,76	13,60
Karışım-2	4,8	86,31	96,05	3,95	14,52
Karışım-3	4,9	86,17	96,08	3,92	13,84

Karışımların hava boşluğu yüzdesi % 4'e eşit bulunduğunda, bu veriler hacimsel şartname kriterleri ile karşılaştırılır ve uygun karışımlardan biri dizayn agrega gradasyonu seçilir. Çalışmada, deneme karışımları için dizayn yoğurma sayısında (Ndes) bulunan hava boşluğu yüzdeleri % 4'den farklı çıktığından, dizayn yoğurma sayısındaki hava boşluğu %4 olan tahmini bir asfalt içeriği hesaplanarak belirlenmiş ve hesaplanan tahmini dizayn asfalt içeriğindeki tahmini dizayn özellikleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Dizayn yoğurma sayısında (Ndes) hava boşluğu % 4 olan tahmini asfalt içeriği;

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

$$\text{Karışım-1: } Pb(\text{tahmini}) = 4,7 - (0,4 \times (4 - 3,76)) = \%4,6$$

$$\text{Karışım-2: } Pb(\text{tahmini}) = 4,8 - (0,4 \times (4 - 3,95)) = \%4,8$$

$$\text{Karışım-3: } Pb(\text{tahmini}) = 4,9 - (0,4 \times (4 - 3,92)) = \%4,9$$

Dizayn yoğurma sayısındaki (Ndes), hacimsel özellikler olan VMA ve VFA ve başlangıç yoğurma sayısındaki (Nini) karışım yoğunlukları, bu tahmini asfalt içerikleri için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

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

C = Boşluk yüzdeleri %4'den küçük olduğundan 0,1 olarak alınmıştır.

$$\text{Karışım-1: } \%VMA(\text{tahmini}) = 13,60 + 0,1 \times (4 - 3,76) = \%13,62$$

$$\text{Karışım-2: } \%VMA(\text{tahmini}) = 14,52 + 0,1 \times (4 - 3,95) = \%14,52$$

$$\text{Karışım-3: } \%VMA(\text{tahmini}) = 13,84 + 0,1 \times (4 - 3,92) = \%13,85$$

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

$$\text{Karışım-1: } \%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{13,62 - 4,0}{13,62} = \%70,6$$

$$\text{Karışım-2: } \%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{14,52 - 4,0}{14,52} = \%72,4$$

$$\text{Karışım-3 : } \%VFA(\text{tahmini}) = 100 \times \frac{13,85 - 4,0}{13,85} = \%71,1$$

$$\%Gmm(tahmini)@Nini = \%Gmm(deneme)@Nini - (4,0 - Va)$$

$$\text{Karışım-1: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 86,14 - (4,0 - 3,76) = \%85,9$$

$$\text{Karışım-2: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 86,31 - (4,0 - 3,95) = \%86,3$$

$$\text{Karışım-3: } \%Gmm(tahmini)@Nini = 86,17 - (4,0 - 3,92) = \%86,1$$

Son olarak, karışımda kullanılan 0,075 mm'lik elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesinin, efektif asfalt bağlayıcı içeriğine oranlanması ile hesaplanan filler veya toz oranı (DP) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Pbe(tahmini) = Pb(tahmini) - (Ps \times Gb) \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right)$$

$$\text{Karışım-1: } Pbe(tahmini) = 4,6 - (95,4 \times 1,030) \times \left(\frac{2,615 - 2,602}{2,615 \times 2,602} \right) = \%4,46$$

$$\text{Karışım-2: } Pbe(tahmini) = 4,8 - (95,2 \times 1,030) \times \left(\frac{2,612 - 2,594}{2,612 \times 2,594} \right) = \%4,54$$

$$\text{Karışım-3: } Pbe(tahmini) = 4,9 - (95,1 \times 1,030) \times \left(\frac{2,613 - 2,590}{2,613 \times 2,590} \right) = \%4,57$$

$$DP = \frac{P_{0,075}}{Pbe(tahmini)}$$

$$\text{Karışım-1: } DP = 6,0/4,46 = 1,35$$

$$\text{Karışım-2: } DP = 5,0/4,54 = 1,10$$

$$\text{Karışım-3: } DP = 4,5/4,57 = 0,98$$

Sonuç olarak, başlangıçta değerlendirilmeye alınan üç farklı agrega karışımı için, başlangıç asfalt içeriklerinde hazırlanan numunelerin yukarıda ifade edilen tahmini değerleri hesaplandıktan sonra, bu değerler Tablo 5.30'da gösterilerek şartname kriterleri ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.30. Deneme Karışımlarının Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri

Deneme Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
Karışım-1	4,7	4,6	4,0	13,62	70,6	1,35	85,9	96
Karışım-2	4,8	4,8	4,0	14,52	72,4	1,10	86,3	96
Karışım-3	4,9	4,9	4,0	13,85	71,1	0,98	86,1	96
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96

Sıkıştırılan deneme karışımlarının özellikleri şartname kriterleri ile kıyaslandığında, Karışım-1 ve Karışım-3 denemelerinin agregalar arası boşluk (VMA) koşulunu sağlamadığı, ayrıca Karışım-1'in filler oranının (DP) şartname limitini aştığı görülmektedir. Buna karşılık

bütün koşulları sağlaması sebebiyle çalışmada, Karışım-2 deneme agregası karışımı, dizayn agregası gradasyonu olarak seçilmiştir.

5.4. Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğinin Tespit Edilmesi

Hazırlanan deneme agregası karışımlarından dizayn agregası gradasyonu seçildikten sonra, kabul edilen deneme karışımının (Karışım-2) tahmini asfalt içeriğinde, $\pm 0,5$ ve $+1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde ve her asfalt içeriği için en az iki numune olmak üzere toplam 8 asfalt karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu dört asfalt içeriği, Superpave karışım dizayn yöntemi için minimum gereksinimdir. Karışım-2 için; PG 64-22 ana bağlayıcısı kullanılarak %4,3; %4,8; %5,3 ve %5,8 asfalt içeriklerinde hazırlanan karışım numuneleri “Dizayn Agregası Gradasyonu Seçimi” bölümünde ifade edildiği gibi hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Ayrıca, seçilen agregası karışımının her bir asfalt içeriğindeki karışımlarının maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.31’de gösterilmiştir.

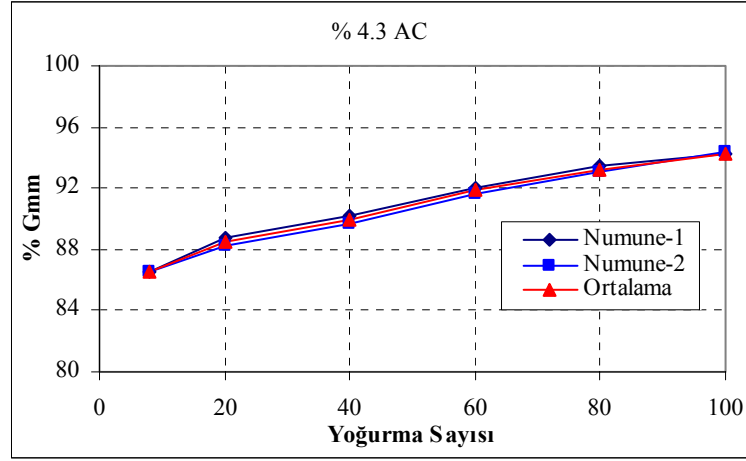
Karışım-2 agregasının %4,3; %4,8; %5,3 ve %5,8 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.32-5.35’te, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.43-5.46’da verilmiştir.

Tablo 5.31. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerinin Fiziksel Özellikleri

%AC (Pb)	Wb (gr)	Numune-1				Numune-2				Gmm
		A (kuru)	B (doğun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	A (kuru)	B (doğun)	C (sudaki)	Gmb (ölç.)	
4,3	53,9	1247,82	1257,18	716,77	2,309	1249,41	1259,93	719,75	2,313	2,452
4,8	60,5	1255,74	1260,91	721,49	2,328	1254,58	1257,43	722,16	2,344	2,434
5,3	67,2	1260,88	1263,18	724,53	2,341	1260,64	1262,33	724,82	2,345	2,417
5,8	73,9	1265,78	1267,76	730,42	2,356	1268,16	1269,59	731,07	2,355	2,400

Tablo 5.32. Karışım Numunelerinin %4,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

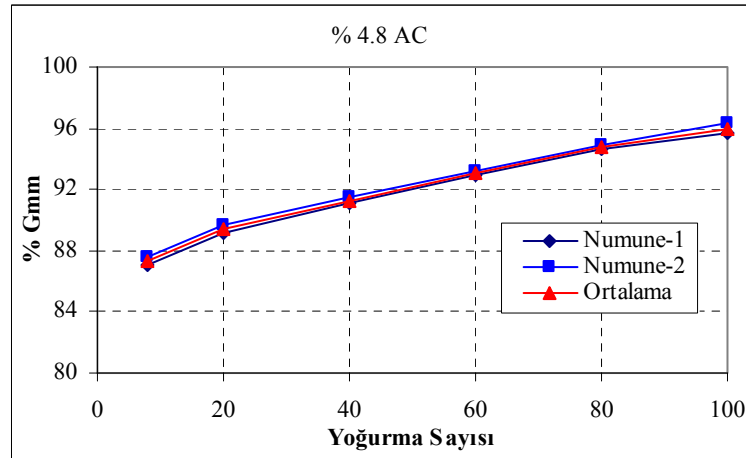
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1247,82gr		Numune-2		Wm = 1249,41gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,033	2,120	86,48	78,0	2,041	2,120	86,49	86,48
20	76,2	2,086	2,176	88,75	76,5	2,081	2,162	88,18	88,47
40	75,0	2,119	2,211	90,17	75,2	2,116	2,199	89,71	89,94
60	73,5	2,163	2,256	92,01	73,6	2,163	2,247	91,66	91,83
80	72,4	2,196	2,290	93,41	72,5	2,195	2,281	93,05	93,23
100	71,8	2,214	2,309	94,19	71,5	2,226	2,313	94,35	94,27
Gmb(ölçülen)		2,309			2,313				
Düz. Faktörü. (C)		1,043			1,039				
Gmm(ölçülen)		2,452							



Şekil 5.43. Karışım Numunelerinin %4,3 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Tablo 5.33. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

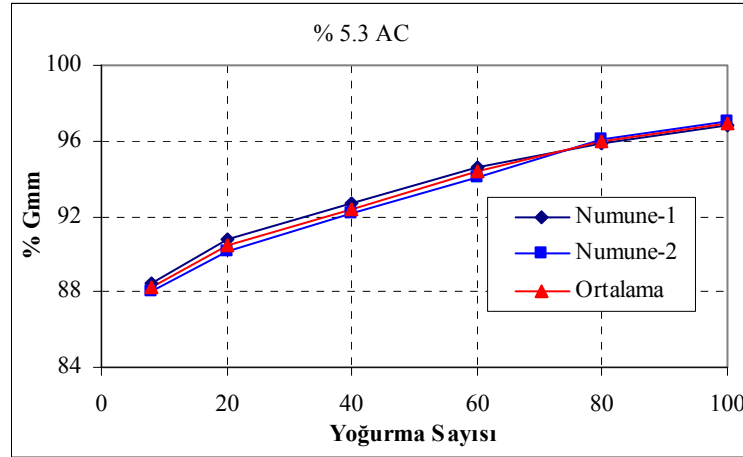
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1255,74gr		Numune-2		Wm = 1254,58gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,038	2,117	86,99	77,8	2,054	2,133	87,63	87,31
20	76,6	2,088	2,170	89,15	76,0	2,103	2,183	89,71	89,43
40	75,0	2,133	2,216	91,15	74,5	2,145	2,227	91,51	91,28
60	73,5	2,176	2,261	92,91	73,2	2,183	2,267	93,14	93,03
80	72,2	2,216	2,302	94,58	71,8	2,226	2,311	94,96	94,77
100	71,4	2,240	2,328	95,64	70,8	2,257	2,344	96,30	95,97
Gmb(ölçülen)		2,328			2,344				
Düz. Faktörü. (C)		1,039			1,038				
Gmm(ölçülen)		2,434							



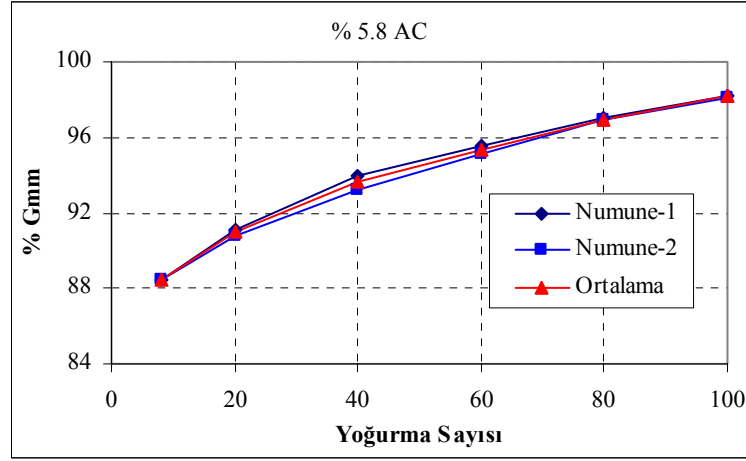
Şekil 5.44. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Tablo 5.34. Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1260,88gr		Numune-2		Wm = 1260,64gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,0	2,086	2,137	88,43	77,5	2,072	2,127	88,03	88,23
20	75,0	2,142	2,194	90,79	75,7	2,121	2,178	90,13	90,46
40	73,5	2,185	2,239	92,64	74,0	2,170	2,228	92,20	92,42
60	72,0	2,231	2,286	94,57	72,5	2,215	2,274	94,10	94,34
80	71,0	2,262	2,318	95,91	71,0	2,262	2,322	96,09	96,0
100	70,3	2,285	2,341	96,86	70,3	2,284	2,345	97,05	96,96
Gmb(ölçülen)		2,341			2,345				
Düz. Faktörü. (C)		1,025			1,027				
Gmm(ölçülen)		2,417							

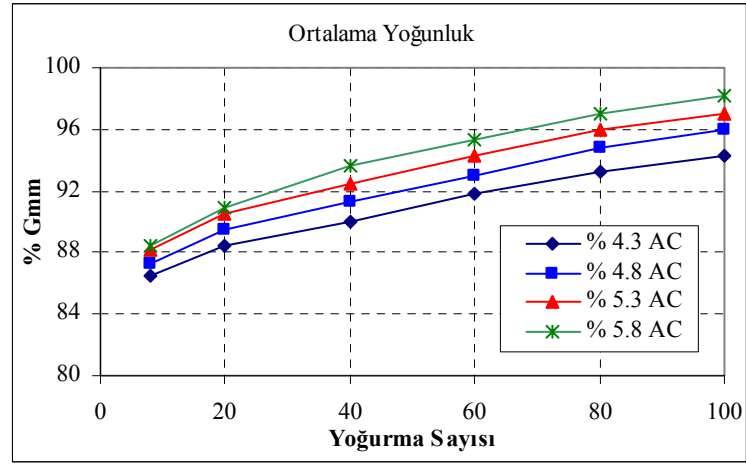
**Şekil 5.45.** Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri**Tablo 5.35.** Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1265,78gr		Numune-2		Wm = 1268,16gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,073	2,122	88,45	78,0	2,071	2,122	88,45	88,45
20	75,5	2,136	2,187	91,15	76,0	2,126	2,178	90,78	90,96
40	73,2	2,203	2,256	94,01	74,0	2,183	2,237	93,23	93,62
60	72,0	2,240	2,293	95,58	72,5	2,228	2,283	95,16	95,37
80	70,9	2,274	2,329	97,06	71,2	2,269	2,325	96,90	96,98
100	70,1	2,300	2,356	98,17	70,3	2,298	2,355	98,14	98,15
Gmb(ölçülen)		2,356			2,355				
Düz. Faktörü. (C)		1,024			1,025				
Gmm(ölçülen)		2,400							



Şekil 5.46. Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Karışım-2 agregasının %4,3; %4,8; %5,3 ve %5,8 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerinin ortalama yoğunluk eğrileri, Şekil 5.47’de gösterilmiştir.



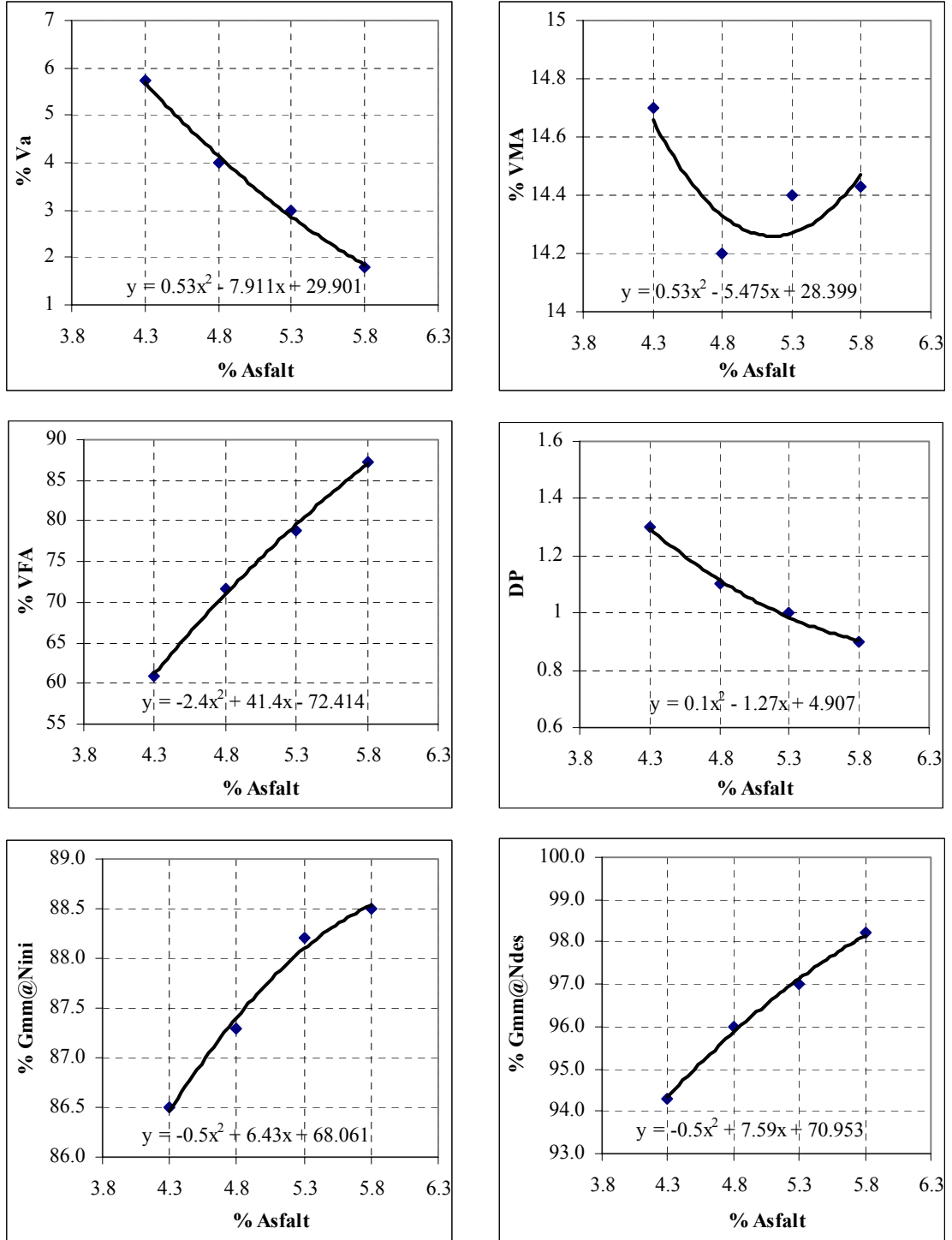
Şekil 5.47. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri

Dizayn yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.36’da verilmiştir.

Tablo 5.36. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
4,3	5,7	14,7	61,0	1,25	86,5	94,3
4,8	4,0	14,2	71,7	1,11	87,3	96,0
5,3	3,0	14,4	78,9	1,00	88,2	97,0
5,8	1,8	14,4	87,2	0,91	88,5	98,2

Dizayn yoğurma sayısında (Ndes=100) hesaplanan Va, VMA, VFA ve DP değerleri ile yoğunluk değerlerinin, asfalt yüzdelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafikler çizilerek Şekil 5.48’de gösterilmiştir.



Şekil 5.48. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi

Karışımlarda ana bağlayıcı olarak kullanılan PG 64–22 bağlayıcısı için dizayn asfalt bağlayıcı içeriği; karışımın hava boşluğu yüzdesi-asfalt yüzdesi grafiği yardımıyla, boşluk % 4 olacak şekilde %4,85 olarak tespit edilmiştir. Bulunan bu dizayn asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, grafikler yardımıyla diğer dizayn değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.37’de verilmiş ve Superpave şartname kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

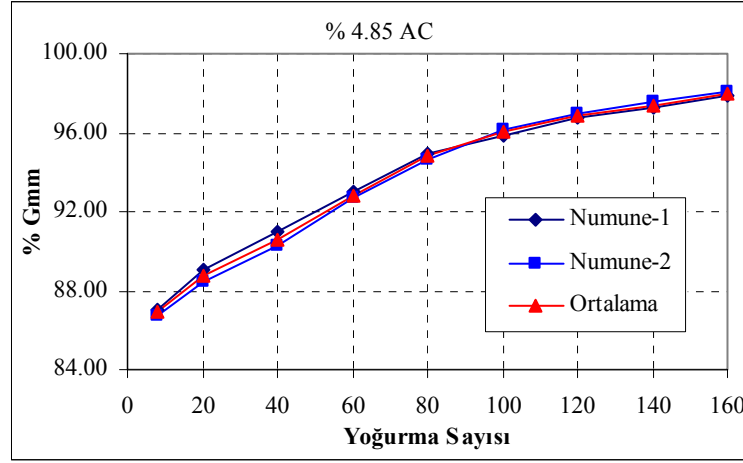
Tablo 5.37. Karışımların %4,85 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 14,3	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 71,9	% 65–75
Toz Oranı (DP)	1,10	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 87,5	Maks. % 89
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96

Ayrıca son olarak, tespit edilen dizayn asfalt 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 sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.38’de, yoğunluk eğrileri Şekil 5.49’da ve bu numunelerin farklı yoğurma sayılarındaki (Nini, Ndes ve Nmaks) ortalama maksimum yoğunluk yüzdesi (%Gmm) değerleri de Tablo 5.39’da verilmiştir.

Tablo 5.38. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1255,71gr		Numune-2		Wm = 1256,10gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,056	2,115	87,02	78,0	2,051	2,110	86,78	86,90
20	76,0	2,105	2,165	89,08	76,5	2,092	2,151	88,49	88,78
40	74,4	2,150	2,212	90,99	75,0	2,134	2,194	90,26	90,62
60	72,8	2,197	2,261	92,99	73,0	2,192	2,254	92,73	92,86
80	71,3	2,244	2,308	94,95	71,5	2,238	2,302	94,67	94,81
100	70,6	2,266	2,331	95,89	70,4	2,273	2,337	96,15	96,02
120	70,0	2,285	2,351	96,71	69,8	2,292	2,358	96,98	96,85
140	69,6	2,298	2,365	97,27	69,4	2,306	2,371	97,54	97,40
160	69,2	2,312	2,378	97,83	69,0	2,319	2,385	98,10	97,97
Gmb(ölçülen)		2,378			2,385				
Düz. Faktörü. (C)		1,029			1,028				
Gmm(ölçülen)		2,431							



Şekil 5.49. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Tablo 5.39. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,85 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri

Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	86,90	96,0	97,97
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

Tablo 5.39 incelendiğinde, seçilmiş olan dizayn agrega gradasyonu (Karışım-2) ile ana bağlayıcı (PG 64-22) kullanılarak tespit edilen dizayn bitüm içeriğinde (%4,85) hazırlanan ve Nmaks'da sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk yüzdesi değerlerini Nini, Ndes ve Nmaks yoğurma sayılarında sağladığı görülmektedir.

5.5. Siyah Karbon Modifiyeli Bağlayıcılarla Karışım Modifikasyonu Yapılması

Siyah karbonun, bitümün fiziksel özellikleri üzerinde göstermiş olduğu iyileştirmelerin, karışımın fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ için belirlenen ana bağlayıcı olan PG 64-22 ve bitüm modifikasyonu için seçilen PG 58-28 asfalt bağlayıcıları kullanılmıştır. Karışım modifikasyonu için, bitüm modifikasyonunda kullanılan saf PG 64-22 ve PG 58-28 bağlayıcıları ile ağırlıkça %5, %10 ve %15 Siyah Karbon (SK) içerikli PG 58-28+%5SK, PG 58-28+%10SK ve PG 58-28+%15SK katkılı modifiye bağlayıcılar kullanılmıştır.

Çalışmada ilk olarak, PG 58-28 katkısız bağlayıcısı ile PG 58-28+%5SK, PG 58-28+%10SK ve PG 58-28+%15SK katkılı bağlayıcılarının, PG 64-22 ana bağlayıcısı kullanılarak seçilen dizayn agrega gradasyonu kullanılarak, Superpave dizayn yöntemine göre optimum bitüm içerikleri ayrı ayrı tespit edilmiş ve bu içeriklerdeki fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra, modifiye karışımların performans özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla optimum bitüm içeriklerinde, katkısız ve katkılı karışım numuneleri hazırlanmıştır.

Saf PG 58–28 ve katkılı bağlayıcıların özgül ağırlıklarının farklı olması sebebiyle, karışımlarda kullanılacak bu bağlayıcıların optimum bitüm oranlarının (dizayn bitüm içeriği) tespiti için, her bir karışımda kullanılacak başlangıç bitüm yüzdeleri ve ağırlıkları hesaplanarak aşağıda Tablo 5.40’da gösterilmiştir.

Tablo 5.40. Saf ve Katkılı Bağlayıcıların Başlangıç Bitüm Oranları

Karışım	Kabbuller			Hesaplamalar					
	Pb (%)	Ps (%)	Va (%)	Gb	Vba (%)	Vbe (%)	Ws (gr)	Pbi (%)	Wb (gr)
PG 58–28	0,05	0,95	0,04	1,028	0,0060	0,102	2,212	4,78	60,2
PG 58–28+%5SK				1,046	0,0060	0,102	2,216	4,85	61,2
PG 58–28+%10SK				1,063	0,0061	0,102	2,220	4,92	62,0
PG 58–28+%15SK				1,079	0,0061	0,102	2,224	4,98	62,9

Saf PG 58–28 ve katkılı bağlayıcılar, hesaplanan başlangıç bitüm oranlarında, her bir karışım için iki numune olmak üzere hazırlanarak sıkıştırılmış ve bu karışımların hacim özgül ağırlıkları (Gmb) tespit edilerek Tablo 5.41’de, ayrıca hazırlanan karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları (Gmm) ise Tablo 5.42’de verilmiştir.

Tablo 5.41. Saf ve Katkılı Karışımların Ölçülen Hacim Özgül Ağırlıkları

Hacim Özgül Ağırlık, Gmb(ölçülen)	PG 58–28		PG 58–28 +%5SK		PG 58–28 +%10SK		PG 58–28 +%15SK	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Kuru ağırlık, A (gr)	1253,01	1254,12	1257,85	1258,2	1258,6	1259,76	1261,13	1261,83
Doyg. yüzey kuru ağırlık, B (gr)	1256,26	1258,55	1262,05	1263,5	1264,22	1264,74	1267,55	1268,45
Sudaki ağırlık, C (gr)	718,51	720,4	722,38	722,38	722,15	721,95	722,32	722,28
Gmb(ölçülen) = A/(B-C)	2,330	2,330	2,331	2,325	2,322	2,321	2,313	2,310

Tablo 5.42. Saf ve Katkılı Karışımların Maksimum Teorik Özgül Ağırlıkları

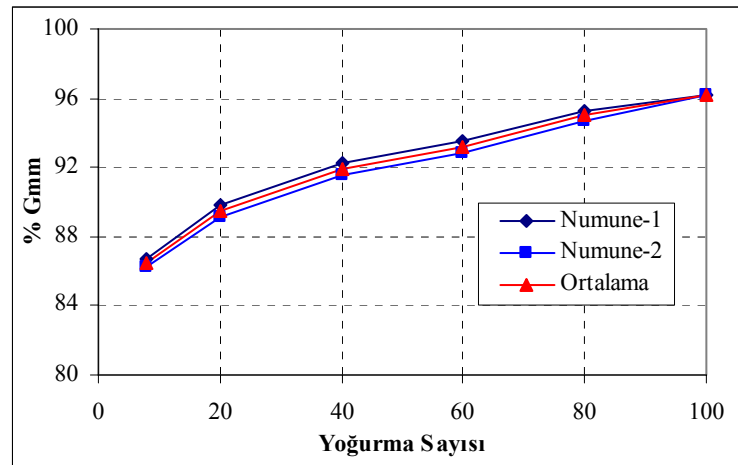
Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, (Gmm)	PG 58–28		PG 58–28 +%5SK		PG 58–28 +%10SK		PG 58–28 +%15SK	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Piknometre, A(gr)	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7	1085,7
Pikno.+Su, B(gr)	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3	3073,3
Piknometre + Numune, C (gr)	2342,55	2341,25	2343,94	2343,22	2342,75	2342,05	2342,7	2343,4
Piknometre + Su +Numune, D (gr)	3810,24	3811,35	3813,36	3812,9	3813,88	3813,1	3813,8	3812,9
Gmm=(C-A)/((B-A)-(D-C))	2,417	2,426	2,428	2,428	2,434	2,432	2,434	2,428
Ortalama, Gmm	2,422		2,428		2,433		2,431	

5.5.1. PG 58–28 Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması

PG 58–28 saf bağlayıcısı için hesaplanan %4,78 başlangıç bitüm içeriğinde (Pbi), dizayn yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılan karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.43’de, yoğunluk eğrileri de Şekil 5.50’de gösterilmiştir.

Tablo 5.43. Karışım Numunelerinin %4,78 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1253,01gr		Numune-2		Wm = 1254,12gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,041	2,101	86,73	78,5	2,035	2,090	86,29	86,51
20	75,5	2,114	2,176	89,83	76,0	2,102	2,159	89,13	89,48
40	73,5	2,172	2,235	92,28	74,0	2,159	2,217	91,53	91,90
60	72,5	2,202	2,266	93,55	73,0	2,189	2,247	92,79	93,17
80	71,2	2,242	2,307	95,26	71,5	2,234	2,295	94,74	95,0
100	70,5	2,264	2,330	96,20	70,4	2,269	2,330	96,22	96,21
Gmb(ölçülen)		2,330			2,330				
Düz. Faktörü. (C)		1,029			1,027				
Gmm(ölçülen)		2,422							



Şekil 5.50. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

Karışımın Ndes yoğurma sayısındaki yoğunluk özellikleri yardımıyla, hava boşluğu ve agregalar arasındaki boşluk değerleri tespit edilmiştir (Tablo 5.44). Hava boşluğunun %4 olarak kabul edildiği Ndes sayısındaki karışımın diğer tahmini fiziksel özellikleri tespit edilerek Tablo 5.45’te verilmiş ve şartname limitleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 5.44. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti

Karışım	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
PG 58–28	4,78	86,51	96,21	3,79	14,45

Tablo 5.45. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri

Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
PG 58–28	4,78	4,70	4,0	14,47	72,36	1,13	86,30	96,00
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96

PG 58–28 karışımının optimum asfalt içeriğinin tespiti için, elde edilen tahmini asfalt içeriğinde (%4,70), $\pm 0,5$ ve $+1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde asfalt karışım numuneleri hazırlanarak sıkıştırılmış ve her bir karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.46’da verilmiştir.

Tablo 5.46. Farklı Asfalt İçeriklerinde 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.)	
4,2	52,55	1247,45	1255,8	717,58	2,318	1248,15	1256,14	718,01	2,319	2,454
4,7	59,12	1252,72	1256,27	720,05	2,336	1252,4	1256,28	719,62	2,334	2,436
5,2	65,76	1257,45	1260,05	725,22	2,351	1258,32	1260,4	725,52	2,353	2,418
5,7	72,47	1266,62	1267,59	730,35	2,358	1266,24	1267,05	730,05	2,358	2,401

PG 58–28 karışımının %4,2; %4,7; %5,2 ve %5,7 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.47–5.50’de, ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 5.51’de gösterilmiştir.

Tablo 5.47. Karışım Numunelerinin %4,2 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1247,45gr		Numune-2		Wm = 1248,15gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,032	2,107	85,89	78,0	2,038	2,105	85,81	85,85
20	76,5	2,077	2,154	87,80	76,0	2,092	2,161	88,07	87,93
40	75,0	2,119	2,197	89,55	74,5	2,134	2,204	89,84	89,70
60	73,5	2,162	2,242	91,38	73,0	2,178	2,250	91,69	91,53
80	72,0	2,207	2,289	93,29	71,6	2,221	2,294	93,48	93,38
100	71,1	2,235	2,318	94,47	70,8	2,246	2,319	94,54	94,50
Gmb(ölçülen)		2,318			2,319				
Düz. Faktörü. (C)		1,037			1,033				
Gmm(ölçülen)		2,454							

Tablo 5.48. Karışım Numunelerinin %4,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

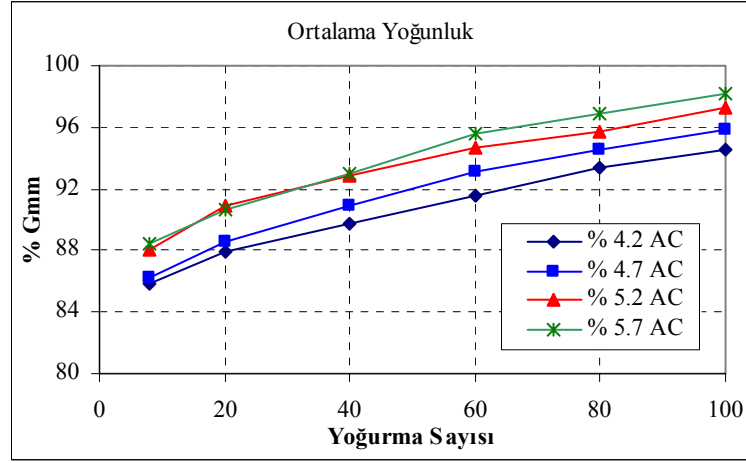
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1252,72gr		Numune-2		Wm = 1252,4gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,0	2,046	2,100	86,19	78,0	2,045	2,100	86,22	86,21
20	75,8	2,105	2,161	88,70	76,0	2,099	2,156	88,49	88,59
40	74,0	2,157	2,213	90,85	74,0	2,156	2,214	90,89	90,87
60	72,0	2,216	2,275	93,38	72,5	2,201	2,260	92,77	93,07
80	71,0	2,248	2,307	94,69	71,2	2,241	2,301	94,46	94,58
100	70,1	2,276	2,336	95,91	70,2	2,273	2,334	95,81	95,86
Gmb(ölçülen)		2,336			2,334				
Düz. Faktörü. (C)		1,026			1,027				
Gmm(ölçülen)		2,436							

Tablo 5.49. Karışım Numunelerinin %5,2 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1257,45gr		Numune-2		Wm = 1258,32gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,059	2,127	87,97	78,0	2,055	2,129	88,04	88,01
20	75,0	2,136	2,207	91,25	75,8	2,115	2,191	90,60	90,93
40	73,6	2,176	2,249	92,99	74,0	2,166	2,244	92,80	92,90
60	72,4	2,212	2,286	94,53	72,5	2,211	2,291	94,72	94,63
80	71,4	2,243	2,318	95,85	71,8	2,233	2,313	95,65	95,75
100	70,4	2,275	2,351	97,21	70,6	2,270	2,353	97,27	97,24
Gmb(ölçülen)		2,351			2,353				
Düz. Faktörü. (C)		1,033			1,036				
Gmm(ölçülen)		2,418							

Tablo 5.50. Karışım Numunelerinin %5,7 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1266,62gr		Numune-2		Wm = 1266,24gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,063	2,125	88,51	78,0	2,068	2,119	88,25	88,38
20	76,5	2,109	2,173	90,48	75,8	2,128	2,181	90,81	90,64
40	74,5	2,166	2,231	92,91	74,0	2,180	2,234	93,02	92,96
60	72,5	2,226	2,293	95,47	72,0	2,240	2,296	95,60	95,54
80	71,5	2,257	2,325	96,81	71,0	2,272	2,328	96,95	96,88
100	70,5	2,289	2,358	98,18	70,1	2,301	2,358	98,19	98,19
Gmb(ölçülen)		2,358			2,358				
Düz. Faktörü. (C)		1,030			1,025				
Gmm(ölçülen)		2,401							



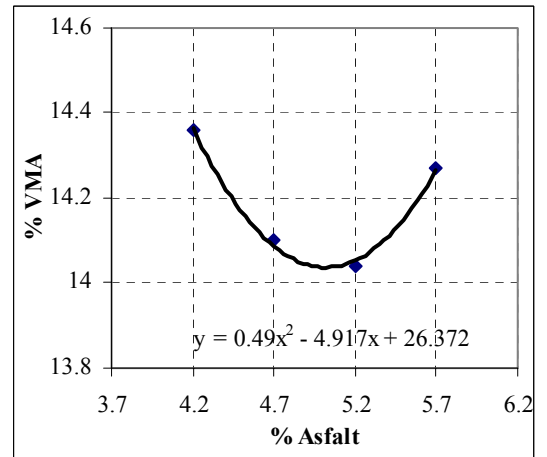
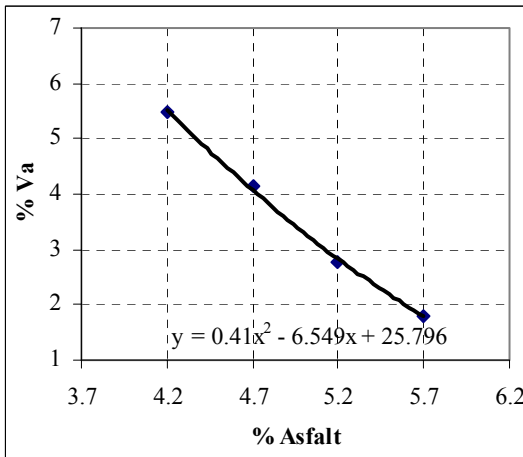
Şekil 5.51. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri

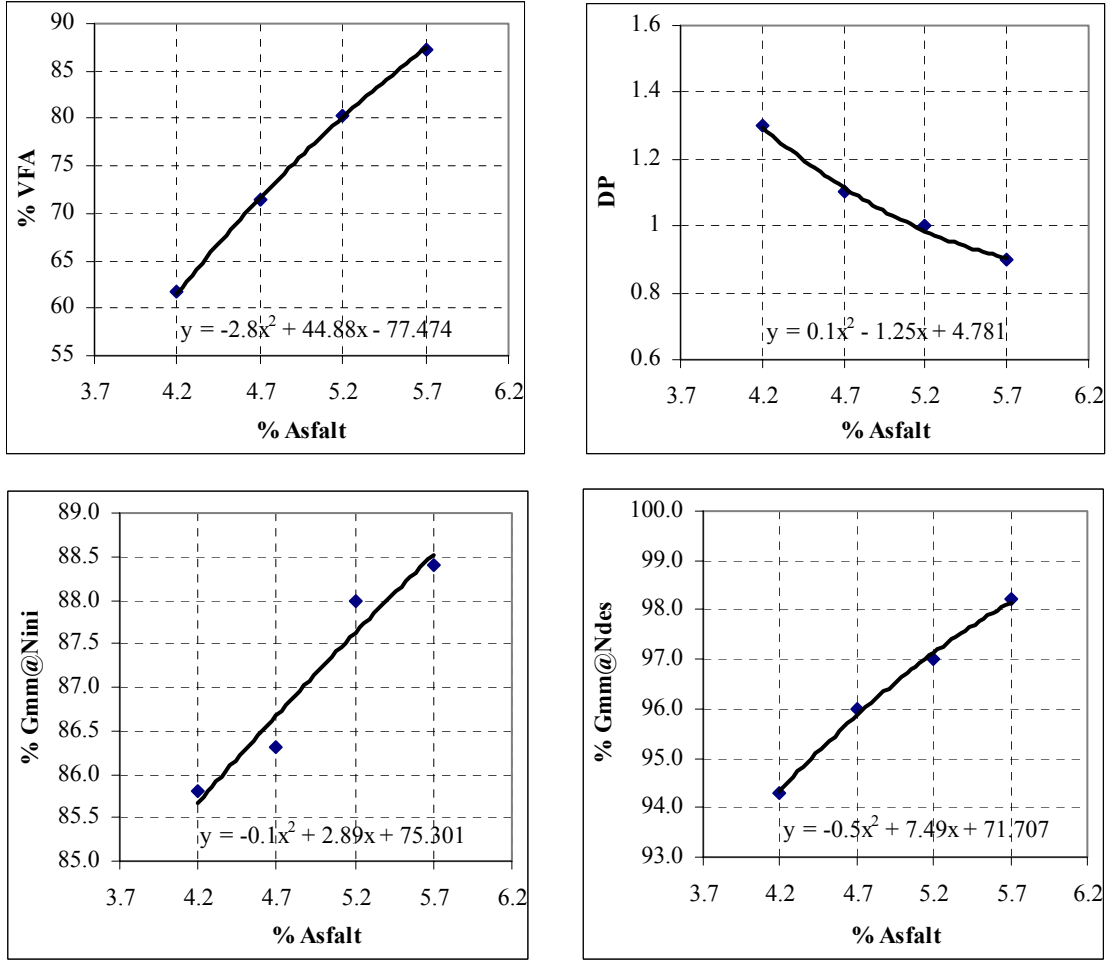
Dizayn yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.51’de verilmiştir.

Tablo 5.51. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes.
4,2	5,50	14,36	61,7	1,27	85,8	94,5
4,7	4,14	14,20	70,8	1,13	86,2	95,9
5,2	2,76	14,04	80,4	1,01	88,0	97,2
5,7	1,81	14,27	87,3	0,92	88,4	98,2

Ayrıca, dizayn yoğurma sayısında belirlenen bu hacim ve yoğunluk değerlerinin asfalt yüzdelere bağlı olarak değişimini gösteren grafikleri çizilerek Şekil 5.52’de gösterilmiştir.





Şekil 5.52. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi

PG 58–28 karışımının optimum bitüm içeriği, Superpave sisteminde dizayn yoğurma sayısında istenen %4 hava boşluğu esas alınarak, hava boşluğu (Va) yüzdesi-asfalt içeriği grafiği yardımıyla %4,75 olarak tespit edilmiştir. Belirlenen bu dizayn (optimum) asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, diğer dizayn değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.52’de verilmiş ve şartname kriterleri ile karşılaştırılarak uygunluğu tespit edilmiştir.

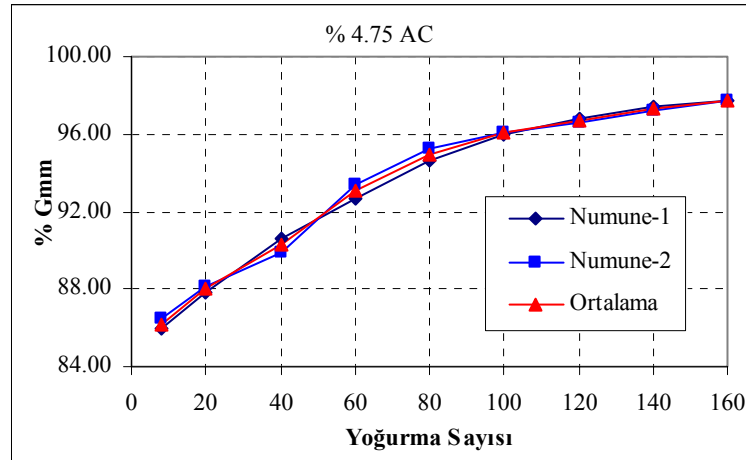
Tablo 5.52. Karışımların %4,75 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 14,1	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 72,5	% 65–75
Toz Oranı (DP)	% 1,1	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 86,7	Maks. % 89
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96

Ayrıca son olarak, tespit edilen dizayn asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve sıkıştırılan numunelerin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.53'te, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.53'te gösterilmiştir.

Tablo 5.53. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1252,72gr		Numune-2		Wm = 1253,15gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,041	2,092	85,95	78,0	2,047	2,105	86,46	86,21
20	76,5	2,086	2,138	87,86	76,5	2,087	2,146	88,16	88,01
40	74,2	2,151	2,205	90,58	75,0	2,128	2,189	89,92	90,25
60	72,5	2,201	2,256	92,70	72,2	2,211	2,274	93,41	93,06
80	71,0	2,248	2,304	94,66	70,8	2,255	2,319	95,26	94,96
100	70,0	2,280	2,337	96,02	70,2	2,274	2,338	96,07	96,04
120	69,4	2,299	2,357	96,85	69,8	2,287	2,352	96,62	96,73
140	69,0	2,313	2,371	97,41	69,4	2,300	2,365	97,18	97,29
160	68,8	2,320	2,378	97,69	69,0	2,314	2,379	97,74	97,72
Gmb(ölçülen)		2,378			2,379				
Düz. Faktörü. (C)		1,025			1,028				
Gmm(ölçülen)		2,434							



Şekil 5.53. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk değerleri Tablo 5.54'te verilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı görülmüştür.

Tablo 5.54. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,75 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri

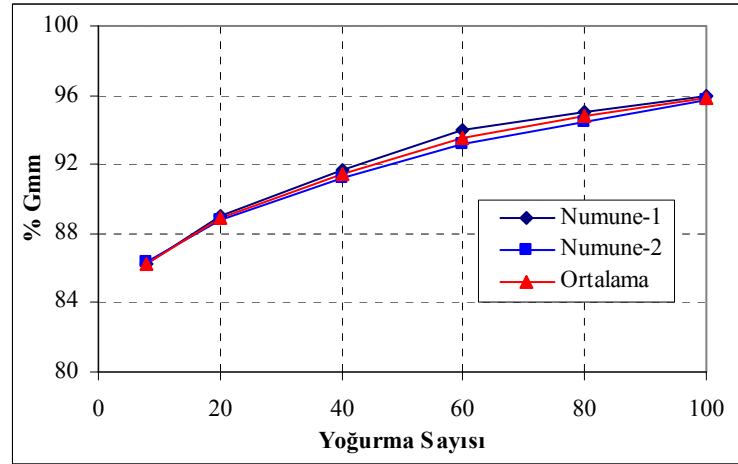
Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	86,21	96,0	97,72
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

5.5.2. PG 58–28+%5 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması

PG 58–28+%5 SK katkılı bağlayıcısı için hesaplanan %4,85 başlangıç bitüm içeriğinde (Pbi), dizayn yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılan karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.55'te, yoğunluk eğrileri de Şekil 5.54'te gösterilmiştir.

Tablo 5.55. Karışım Numunelerinin %4,85 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1257,85gr		Numune-2		Wm = 1258,2gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,041	2,093	86,22	78,2	2,050	2,096	86,34	86,28
20	76,0	2,108	2,162	89,05	76,0	2,109	2,157	88,84	88,95
40	73,8	2,171	2,227	91,71	74,0	2,166	2,215	91,24	91,47
60	72,0	2,225	2,282	94,0	72,5	2,211	2,261	93,13	93,56
80	71,2	2,251	2,308	95,06	71,5	2,242	2,293	94,43	94,74
100	70,5	2,273	2,331	96,0	70,5	2,273	2,325	95,77	95,88
Gmb(ölçülen)		2,331			2,325				
Düz. Faktörü. (C)		1,025			1,023				
Gmm(ölçülen)		2,428							



Şekil 5.54. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

Karışımın Ndes yoğurma sayısındaki yoğunluk özellikleri yardımıyla, hava boşluğu ve agregalar arasındaki boşluk değerleri tespit edilmiştir (Tablo 5.56). Hava boşluğunun %4 olarak kabul edildiği Ndes sayısında, karışımın diğer tahmini fiziksel özellikleri tespit edilerek Tablo 5.57'de verilmiş ve şartname limitleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 5.56. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti

Karışım	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
PG 58–28+%5SK	4,85	86,28	95,88	4,12	14,60

Tablo 5.57. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri

Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
PG 58-28 + %5SK	4,85	4,90	4,0	14,57	72,55	1,08	86,39	96,0
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96,0

PG 58-28+%5SK karışımının optimum asfalt içeriğinin tespiti için, elde edilen tahmini asfalt içeriğinde (%4,90), ±%0,5 ve +%1,0 olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde asfalt karışım numuneleri hazırlanarak sıkıştırılmış ve her bir karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.58’de verilmiştir.

Tablo 5.58. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerin 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.)	
4,4	55,18	1251,28	1261,66	721,21	2,315	1251,95	1261,23	721,0	2,317	2,451
4,9	61,78	1258,25	1262,13	723,08	2,334	1257,3	1261,22	723,18	2,337	2,434
5,4	68,45	1263,26	1265,5	730,54	2,361	1262,7	1265,25	730,15	2,360	2,417
5,9	75,19	1269,71	1271,58	735,25	2,367	1270,2	1271,85	735,48	2,368	2,400

PG 58-28+%5SK karışımının %4,4; %4,9; %5,4 ve %5,9 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.59-5.62’de, ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 5.55’te gösterilmiştir.

Tablo 5.59. Karışım Numunelerinin %4,4 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1251,28gr		Numune-2		Wm = 1251,95gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,038	2,084	85,05	78,0	2,045	2,095	85,47	85,26
20	76,0	2,097	2,145	87,51	76,0	2,089	2,150	87,71	87,61
40	74,0	2,154	2,203	89,87	74,0	2,155	2,208	90,09	89,98
60	72,5	2,199	2,248	91,73	72,0	2,215	2,269	92,59	92,16
80	71,2	2,239	2,289	93,41	71,0	2,246	2,301	93,89	93,65
100	70,4	2,264	2,315	94,47	70,5	2,262	2,317	94,56	94,51
Gmb(ölçülen)		2,315			2,317				
Düz. Faktörü. (C)		1,023			1,024				
Gmm(ölçülen)		2,451							

Tablo 5.60. Karışım Numunelerinin %4,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

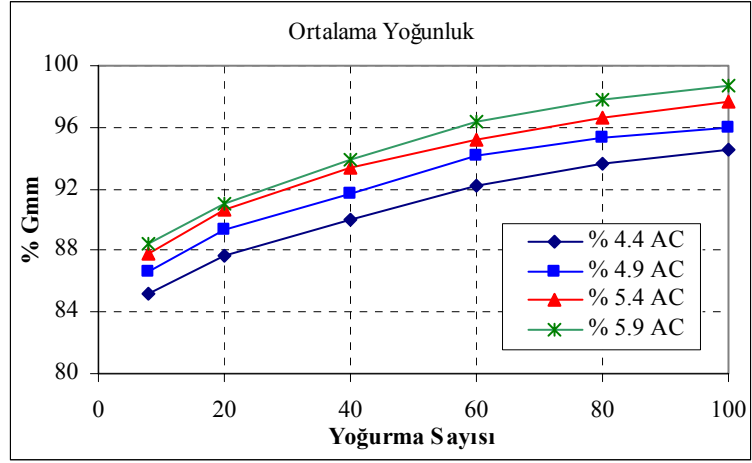
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1258,25gr		Numune-2		Wm = 1257,3gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,042	2,096	86,14	77,8	2,059	2,118	87,01	86,57
20	76,0	2,109	2,165	88,97	75,5	2,121	2,182	89,66	89,31
40	74,0	2,166	2,224	91,37	73,5	2,179	2,241	92,10	91,74
60	72,0	2,226	2,286	93,91	71,8	2,231	2,295	94,28	94,10
80	71,0	2,258	2,318	95,24	71,0	2,256	2,320	95,34	95,29
100	70,5	2,274	2,334	95,91	70,5	2,272	2,337	96,02	95,96
Gmb(ölçülen)		2,334			2,337				
Düz. Faktörü. (C)		1,027			1,029				
Gmm(ölçülen)		2,434							

Tablo 5.61. Karışım Numunelerinin %5,4 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1263,26gr		Numune-2		Wm = 1262,7gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,068	2,125	87,91	77,5	2,076	2,119	87,68	87,80
20	75,5	2,131	2,189	90,59	75,0	2,145	2,190	90,61	90,60
40	73,0	2,204	2,264	93,69	73,0	2,203	2,250	93,09	93,39
60	71,8	2,241	2,302	95,26	71,5	2,250	2,297	95,04	95,15
80	70,8	2,273	2,335	96,60	70,4	2,285	2,333	96,53	96,56
100	70,0	2,299	2,361	97,71	69,6	2,311	2,360	97,64	97,67
Gmb(ölçülen)		2,361			2,360				
Düz. Faktörü. (C)		1,027			1,021				
Gmm(ölçülen)		2,417							

Tablo 5.62. Karışım Numunelerinin %5,9 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1269,71gr		Numune-2		Wm = 1270,2gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,079	2,118	88,24	77,8	2,080	2,125	88,52	88,38
20	75,5	2,142	2,182	90,92	75,5	2,143	2,189	91,21	91,07
40	73,0	2,216	2,257	94,04	73,5	2,201	2,249	93,70	93,87
60	71,2	2,272	2,314	96,42	71,5	2,263	2,312	96,32	96,37
80	70,2	2,304	2,347	97,79	70,5	2,295	2,345	97,68	97,74
100	69,6	2,324	2,367	98,63	69,8	2,318	2,368	98,66	98,64
Gmb(ölçülen)		2,367			2,368				
Düz. Faktörü. (C)		1,019			1,022				
Gmm(ölçülen)		2,400							



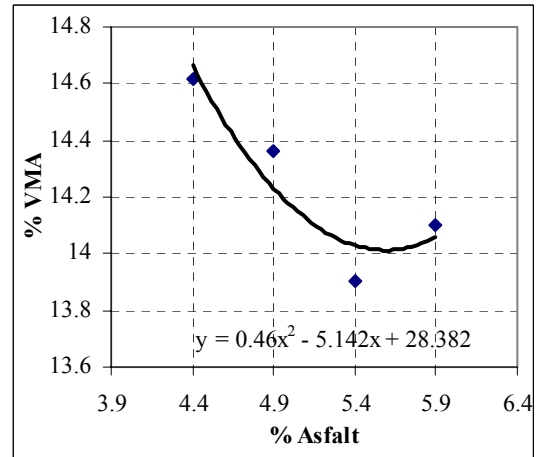
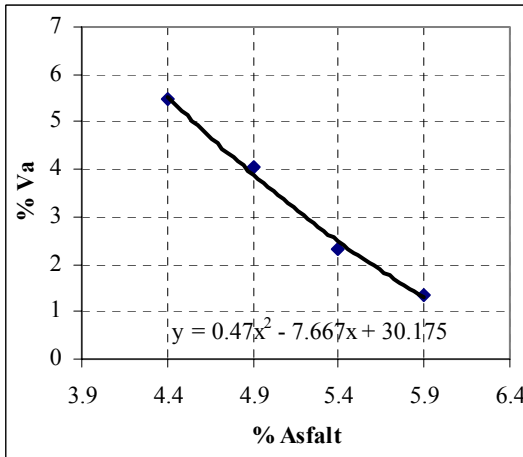
Şekil 5.55. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri

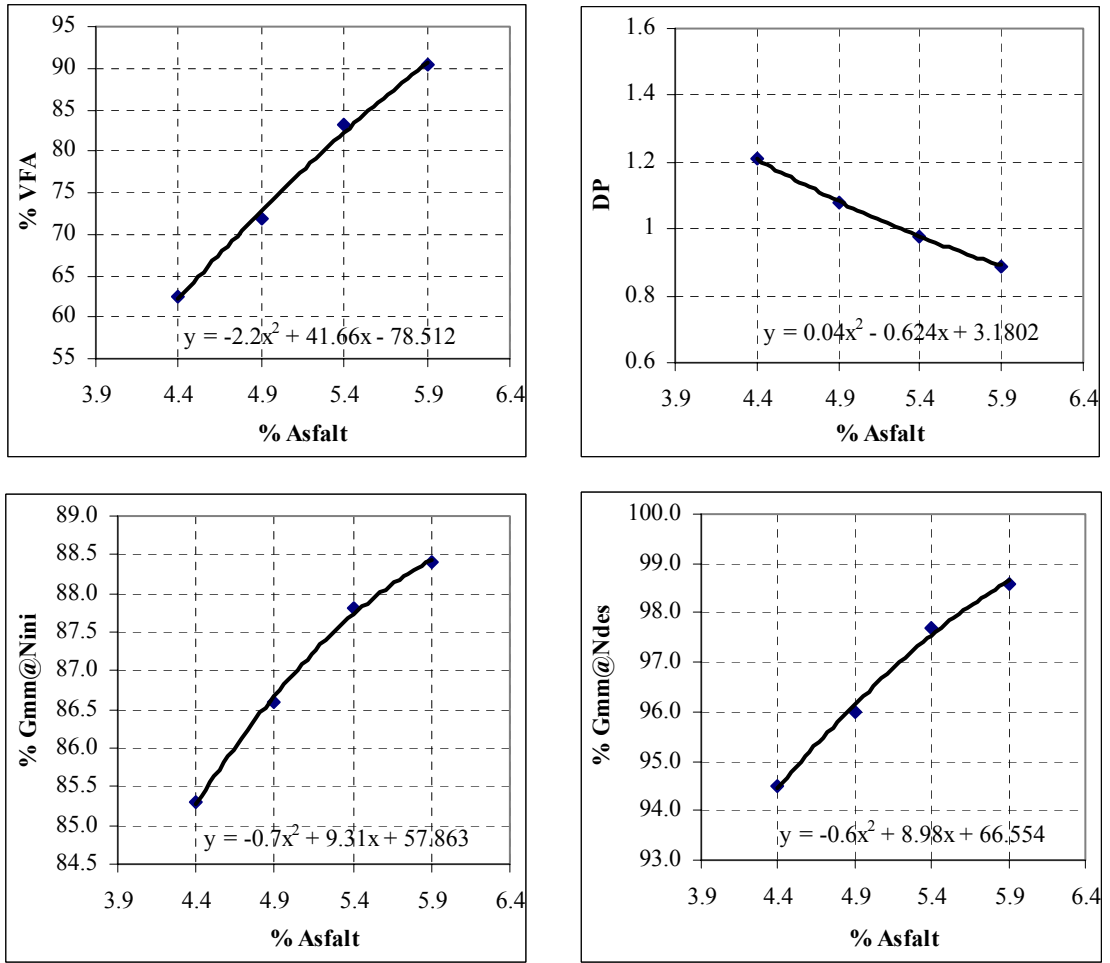
Dizayn yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.63'te verilmiştir.

Tablo 5.63. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes.
4,4	5,49	14,62	62,5	1,21	85,3	94,5
4,9	4,04	14,36	71,9	1,08	86,6	96,0
5,4	2,33	13,90	83,2	0,98	87,8	97,7
5,9	1,35	14,09	90,4	0,89	88,4	98,6

Ayrıca, dizayn yoğurma sayısında belirlenen bu hacim ve yoğunluk değerlerinin asfalt yüzdelere bağlı olarak değişimini gösteren grafikleri çizilerek Şekil 5.56'da gösterilmiştir.





Şekil 5.56. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi

PG 58–28+%5SK karışımının optimum bitüm içeriği, Superpave sisteminde dizayn yoğunurma sayısında istenen %4 hava boşluğu esas alınarak, hava boşluğu (Va) yüzdesi-asfalt içeriği grafiği yardımıyla %4,90 olarak tespit edilmiştir. Belirlenen bu dizayn (optimum) asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, diğer dizayn değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.64’te gösterilmiş ve şartname kriterleri ile karşılaştırılarak uygunluğu tespit edilmiştir.

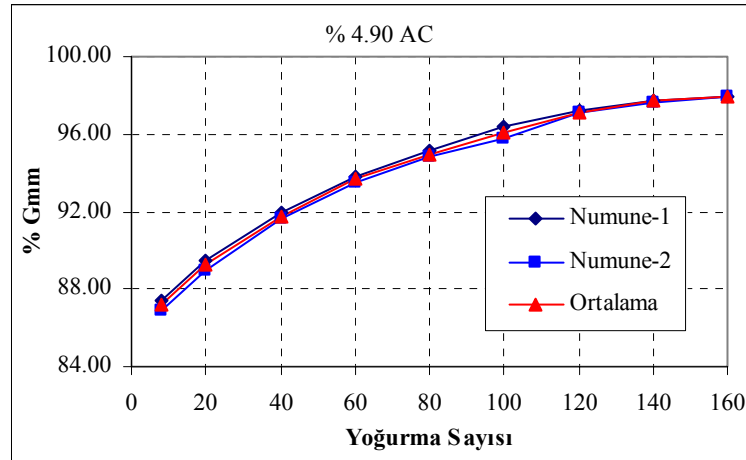
Tablo 5.64. Karışım Numunelerinin %4,90 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 14,25	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 72,5	% 65–75
Toz Oranı (DP)	% 1,1	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 86,7	Maks. % 89
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96,0

Ayrıca son olarak, tespit edilen dizayn asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve sıkıştırılan numunelerin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.65'te, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.57'de gösterilmiştir.

Tablo 5.65. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1258,25gr		Numune-2		Wm = 1257,55gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,060	2,128	87,45	78,0	2,054	2,115	86,90	87,18
20	76,0	2,109	2,179	89,52	76,2	2,102	2,165	88,96	89,24
40	74,0	2,166	2,237	91,94	74,0	2,165	2,229	91,60	91,77
60	72,5	2,211	2,284	93,84	72,5	2,210	2,275	93,50	93,67
80	71,5	2,242	2,316	95,16	71,5	2,241	2,307	94,80	94,98
100	70,6	2,270	2,345	96,37	70,8	2,263	2,330	95,74	96,05
120	70,0	2,290	2,365	97,20	69,8	2,295	2,363	97,11	97,15
140	69,6	2,303	2,379	97,75	69,4	2,308	2,377	97,67	97,71
160	69,5	2,306	2,382	97,89	69,2	2,315	2,384	97,65	97,92
Gmb(ölçülen)		2,382			2,384				
Düz. Faktörü. (C)		1,033			1,030				
Gmm(ölçülen)		2,434							



Şekil 5.57. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk değerleri Tablo 5.66.'da verilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların bu kriterleri sağladığı görülmüştür.

Tablo 5.66. Karışım Numunelerinin Nmaks.'da %4,90 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri

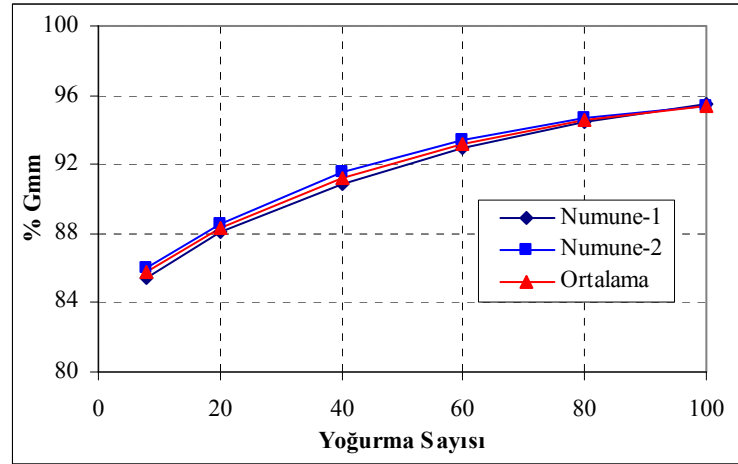
Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	87,18	96,0	97,92
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

5.5.3. PG 58–28+%10 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması

PG 58–28+%10SK katkılı bağlayıcısı için hesaplanan %4,92 başlangıç bitüm içeriğinde (Pbi), dizayn yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılan karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.67’de, yoğunluk eğrileri de Şekil 5.58’de gösterilmiştir.

Tablo 5.67. Karışım Numunelerinin %4,92 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1258,60gr		Numune-2		Wm = 1259,76gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,042	2,079	85,48	78,2	2,052	2,092	86,01	85,75
20	76,2	2,104	2,142	88,06	76,0	2,112	2,153	88,50	88,28
40	73,8	2,173	2,212	90,92	73,5	2,183	2,226	91,51	91,22
60	72,2	2,221	2,261	92,93	72,0	2,229	2,273	93,42	93,18
80	71,0	2,258	2,299	94,51	71,0	2,260	2,305	94,74	94,62
100	70,3	2,281	2,322	95,45	70,5	2,276	2,321	95,41	95,43
Gmb(ölçülen)		2,322			2,321				
Düz. Faktörü. (C)		1,018			1,020				
Gmm(ölçülen)		2,433							



Şekil 5.58. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

Karışımın Ndes yoğurma sayısındaki yoğunluk özellikleri yardımıyla, hava boşluğu ve agregalar arasındaki boşluk değerleri tespit edilmiştir (Tablo 5.68). Hava boşluğunun %4 olarak kabul edildiği Ndes sayısında, karışımın diğer tahmini fiziksel özellikleri tespit edilerek Tablo 5.69’da verilmiş ve şartname limitleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 5.68. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti

Karışım	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
PG 58–28+%10SK	4,92	85,75	95,43	4,57	14,90

Tablo 5.69. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri

Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
PG 58-28 +%10SK	4,92	5,10	4,0	14,78	72,94	1,03	86,32	96,0
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96,0

PG 58-28+%10SK karışımının optimum asfalt içeriğinin tespiti için, elde edilen tahmini asfalt içeriğinde (%5,10), $\pm 0,5$ ve $\pm 1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde asfalt karışım numuneleri hazırlanarak sıkıştırılmış ve her bir karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.70’te verilmiştir.

Tablo 5.70. Farklı Asfalt İçeriklerinde 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.)	
4,6	58,46	1254,51	1266,78	724,7	2,314	1255,23	1266,18	723,8	2,314	2,446
5,1	65,09	1258,95	1264,33	725,46	2,336	1259,15	1264,75	725,36	2,334	2,430
5,6	71,80	1264,82	1267,13	729,93	2,354	1264,12	1267,95	729,63	2,348	2,414
6,1	78,57	1270,65	1271,19	734,4	2,367	1271,28	1273,1	734,21	2,359	2,397

PG 58-28+%10SK karışımının %4,6; %5,1; %5,6 ve %6,1 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.71–5.74’te, ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 5.59’da gösterilmiştir.

Tablo 5.71. Karışım Numunelerinin %4,6 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1254,51gr		Numune-2		Wm = 1255,23gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,044	2,095	85,64	78,5	2,037	2,096	85,68	85,66
20	76,0	2,103	2,156	88,12	76,5	2,090	2,151	87,92	88,02
40	74,0	2,160	2,214	90,50	74,5	2,146	2,209	90,28	90,39
60	72,5	2,204	2,260	92,38	73,0	2,190	2,254	92,13	92,26
80	71,5	2,235	2,292	93,67	72,0	2,221	2,285	93,41	93,54
100	70,8	2,257	2,314	94,59	71,1	2,249	2,314	94,60	94,60
Gmb(ölçülen)		2,314			2,314				
Düz. Faktörü. (C)		1,025			1,029				
Gmm(ölçülen)		2,446							

Tablo 5.72. Karışım Numunelerinin %5,1 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

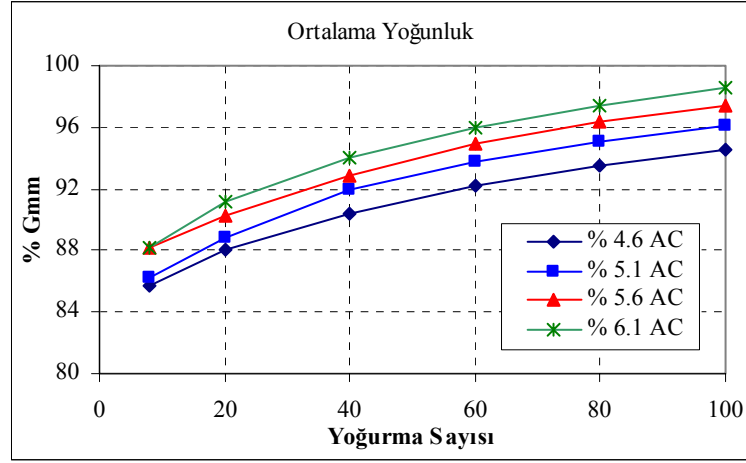
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1258,95gr		Numune-2		Wm = 1259,15gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,043	2,092	86,10	78,5	2,043	2,099	86,40	86,25
20	76,5	2,096	2,147	88,35	76,0	2,111	2,169	89,24	88,80
40	73,8	2,173	2,225	91,59	73,5	2,182	2,242	92,28	91,93
60	72,4	2,215	2,269	93,36	72,0	2,228	2,289	94,20	93,78
80	71,0	2,259	2,313	95,20	71,5	2,243	2,305	94,86	95,03
100	70,3	2,281	2,336	96,15	70,6	2,272	2,334	96,07	96,11
Gmb(ölçülen)		2,336			2,334				
Düz. Faktörü. (C)		1,024			1,027				
Gmm(ölçülen)		2,430							

Tablo 5.73. Karışım Numunelerinin %5,6 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1264,82gr		Numune-2		Wm = 1264,12gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,071	2,131	88,27	77,5	2,078	2,124	88,01	88,14
20	75,6	2,131	2,193	90,84	76,0	2,119	2,166	89,74	90,29
40	73,5	2,192	2,255	93,44	74,0	2,176	2,225	92,17	92,80
60	72,2	2,232	2,296	95,12	72,0	2,237	2,286	94,73	94,92
80	71,0	2,269	2,335	96,73	71,0	2,268	2,319	96,06	96,39
100	70,4	2,289	2,354	97,55	70,1	2,297	2,348	97,30	97,42
Gmb(ölçülen)		2,354			2,348				
Düz. Faktörü. (C)		1,029			1,022				
Gmm(ölçülen)		2,414							

Tablo 5.74. Karışım Numunelerinin %6,1 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1270,65gr		Numune-2		Wm = 1271,28gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,081	2,124	88,58	78,4	2,066	2,106	87,86	88,22
20	75,6	2,141	2,186	91,16	75,5	2,145	2,187	91,23	91,20
40	73,5	2,202	2,248	93,77	73,0	2,218	2,262	94,36	94,06
60	70,2	2,248	2,295	95,72	71,5	2,265	2,310	96,34	96,03
80	70,8	2,286	2,334	97,34	70,6	2,294	2,339	97,56	97,45
100	69,8	2,319	2,367	98,74	70,0	2,314	2,359	98,40	98,57
Gmb(ölçülen)		2,367			2,359				
Düz. Faktörü. (C)		1,021			1,020				
Gmm(ölçülen)		2,397							



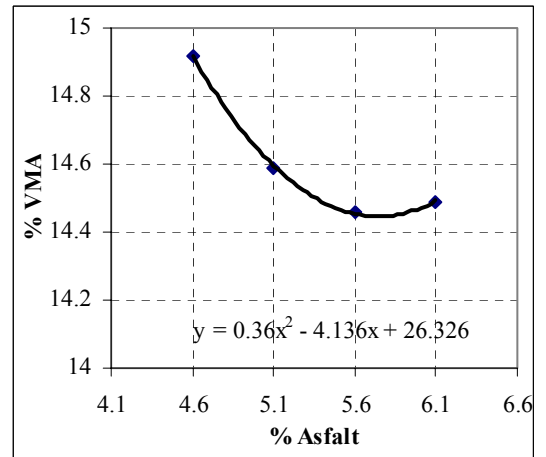
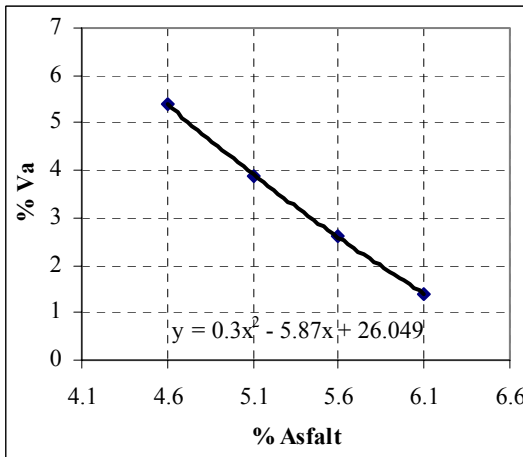
Şekil 5.59. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri

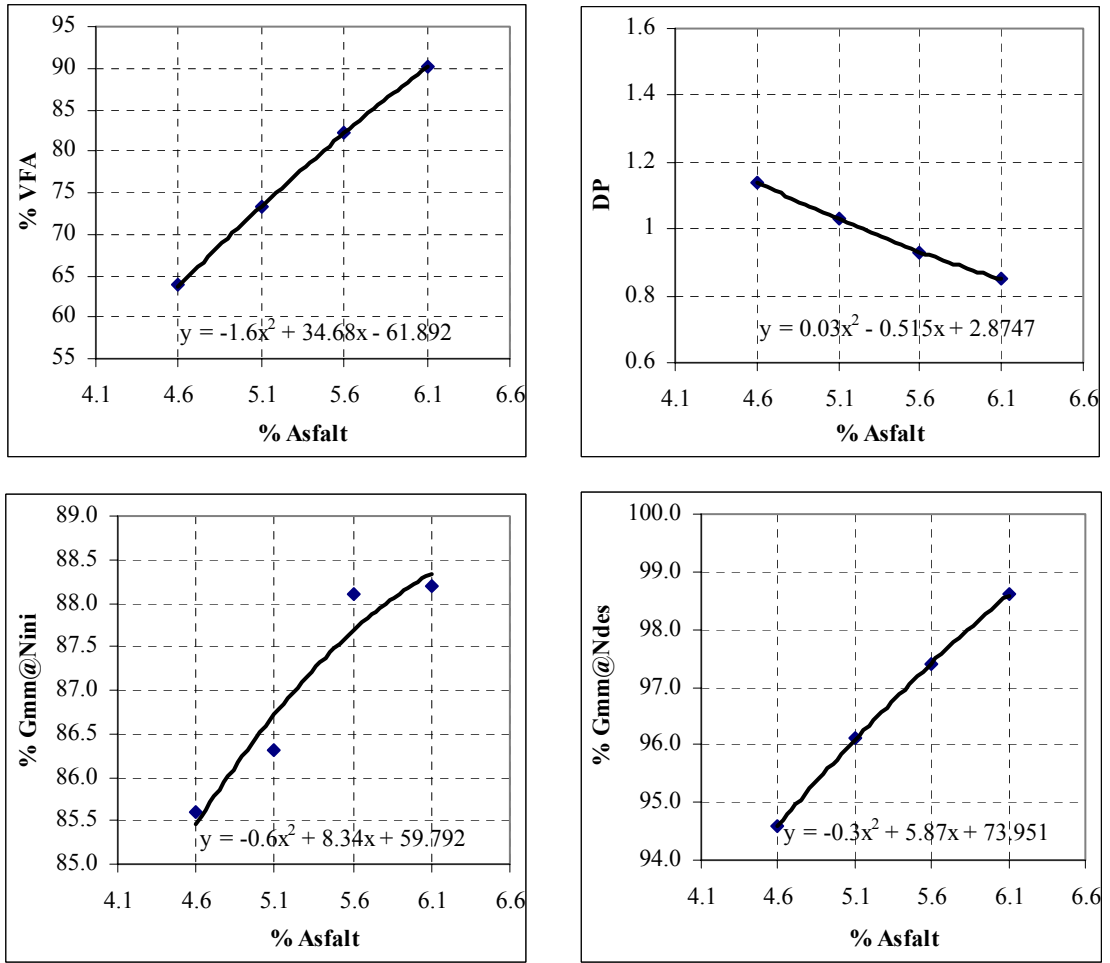
Dizayn yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.75'te verilmiştir.

Tablo 5.75. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes.
4,6	5,40	14,92	63,8	1,14	85,7	94,6
5,1	3,89	14,59	73,3	1,03	86,3	96,1
5,6	2,58	14,46	82,2	0,93	88,1	97,4
6,1	1,43	14,49	90,1	0,85	88,2	98,6

Ayrıca, dizayn yoğurma sayısında belirlenen bu hacim ve yoğunluk değerlerinin asfalt yüzdelere bağlı olarak değişimini gösteren grafikleri çizilerek Şekil 5.60'da gösterilmiştir.





Şekil 5.60. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi

PG 58–28+%10SK karışımının optimum bitüm içeriği, Superpave sisteminde dizayn yoğunurma sayısında istenen %4 hava boşluğu esas alınarak, hava boşluğu yüzdesi (Va)-asfalt içeriği grafiği yardımıyla %5,10 olarak tespit edilmiştir. Belirlenen bu dizayn (optimum) asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, diğer dizayn değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.76’da verilmiş ve şartname kriterleri ile karşılaştırılarak uygunluğu tespit edilmiştir.

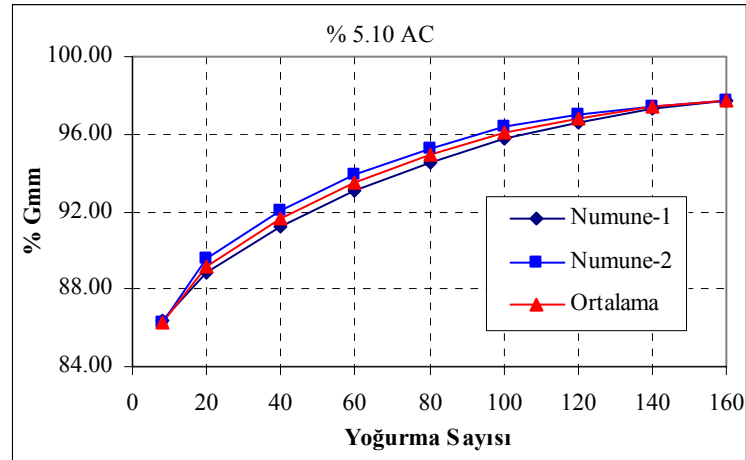
Tablo 5.76. Karışım Numunelerinin %5,10 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 14,6	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 73,3	% 65–75
Toz Oranı (DP)	% 1,04	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 86,8	Maks. % 89
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96,0

Son olarak, tespit edilen dizayn asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve sıkıştırılan numunelerin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.77’de, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.61’de gösterilmiştir.

Tablo 5.77. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1259,25gr		Numune-2		Wm = 1258,75gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,051	2,099	86,33	78,4	2,045	2,098	86,27	86,30
20	76,0	2,111	2,160	88,83	75,5	2,124	2,178	89,59	89,21
40	74,0	2,168	2,218	91,23	73,5	2,182	2,238	92,03	91,63
60	72,5	2,213	2,264	93,11	72,0	2,227	2,284	93,94	93,53
80	71,4	2,247	2,299	94,55	71,0	2,258	2,316	95,27	94,91
100	70,5	2,275	2,328	95,75	70,2	2,284	2,343	96,35	96,05
120	69,9	2,295	2,348	96,58	69,7	2,301	2,360	97,04	96,81
140	69,4	2,311	2,365	97,27	69,4	2,311	2,370	97,46	97,37
160	69,1	2,321	2,375	97,70	69,2	2,317	2,377	97,74	97,72
Gmb(ölçülen)		2,375			2,377				
Düz. Faktörü. (C)		1,023			1,026				
Gmm(ölçülen)		2,431							



Şekil 5.61. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk değerleri Tablo 5.78’de verilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların bu kriterleri sağladığı görülmüştür.

Tablo 5.78. Karışım Numunelerin Nmaks.’da %5,10 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri

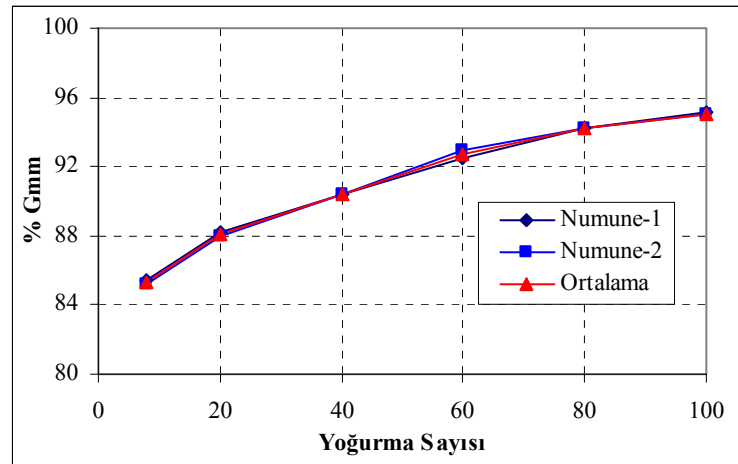
Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	86,30	96,0	97,72
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

5.5.4. PG 58–28+%15 SK Bağlayıcısının Dizayn Bitüm İçeriğinin Bulunması

PG 58–28+%15 SK katkıli bağlayıcısı için hesaplanan %4,98 başlangıç bitüm içeriğinde (Pbi), dizayn yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılan karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.79’da, yoğunluk eğrileri de Şekil 5.62’de gösterilmiştir.

Tablo 5.79. Karışım Numunelerinin %4,98 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir (Yoğ.) Sayısı	Karışım-1 Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1261,13gr		Numune-2		Wm = 1261,83gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,047	2,077	85,44	78,5	2,048	2,072	85,22	85,33
20	76,0	2,114	2,146	88,25	76,0	2,115	2,140	88,03	88,14
40	74,2	2,165	2,198	90,39	74,0	2,172	2,198	90,40	90,40
60	72,5	2,216	2,249	92,51	72,0	2,233	2,259	92,92	92,72
80	71,2	2,256	2,290	94,20	71,0	2,264	2,291	94,22	94,21
100	70,5	2,279	2,313	95,14	70,4	2,283	2,310	95,03	95,08
Gmb(ölçülen)		2,313			2,310				
Düz. Faktörü. (C)		1,015			1,012				
Gmm(ölçülen)		2,431							



Şekil 5.62. Karışım Numunelerinin Yoğunluk Eğrileri ve Ortalaması

Karışımın Ndes yoğurma sayısındaki yoğunluk özellikleri yardımıyla, hava boşluğu ve agregalar arasındaki boşluk değerleri tespit edilmiştir (Tablo 5.80). Hava boşluğunun %4 olarak kabul edildiği Ndes sayısındaki karışımın diğer tahmini fiziksel özellikleri tespit edilerek Tablo 5.81’de verilmiş ve şartname limitleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 5.80. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Hesap Özeti

Karışım	%AC	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes	%Va	%VMA
PG 58–28+%15SK	4,98	85,33	95,08	4,92	15,31

Tablo 5.81. Karışım Numunelerinin Sıkıştırma Sonuçları ve Şartname Kriterleri

Karışımı	Pbi (%)	Pb (%)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes
PG 58-28 +%15SK	4,98	5,30	4,0	15,13	73,56	0,99	86,25	96,0
Şartname Kriterleri			4,0	14,0 (min.)	65-75 (min.)	0,6-1,2	≤89,0	96,0

PG 58-28+%15SK karışımının optimum asfalt içeriğinin tespiti için, elde edilen tahmini asfalt içeriğinde (%5,30), $\pm 0,5$ ve $\pm 1,0$ olmak üzere dört ayrı asfalt içeriğinde asfalt karışım numuneleri hazırlanarak sıkıştırılmış ve her bir karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (Gmm) ve sıkışmış hacim özgül ağırlık (Gmb) değerleri belirlenerek Tablo 5.82’de verilmiştir.

Tablo 5.82. Farklı Asfalt İçeriklerinde Sıkıştırılan Karışım Numunelerin 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.)	
4,8	61,11	1256,61	1269,57	725,97	2,312	1256,11	1296,45	725,8	2,311	2,444
5,3	67,77	1262,94	1269,81	729,16	2,336	1263,14	1270,18	729,45	2,336	2,428
5,8	74,51	1268,32	1270,85	732,06	2,354	1268,75	1271,1	732,22	2,354	2,412
6,3	81,31	1274,23	1276,02	737,16	2,365	1275,25	1278,21	737,28	2,358	2,396

PG 58-28+%15SK karışımının %4,8; %5,3; %5,8 ve %6,3 asfalt içeriklerinde hazırlanan asfalt karışım numunelerine ait sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.83–5.86’da, ortalama yoğunluk eğrileri Şekil 5.63’te gösterilmiştir.

Tablo 5.83. Karışım Numunelerinin %4,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1256,61gr		Numune-2		Wm = 1256,11gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,0	2,052	2,098	85,86	78,2	2,046	2,092	85,60	85,73
20	76,0	2,108	2,153	88,12	75,5	2,119	2,167	88,66	88,39
40	74,0	2,163	2,212	90,50	73,5	2,177	2,226	91,07	90,78
60	72,5	2,208	2,257	92,37	72,4	2,210	2,259	92,45	92,41
80	71,5	2,239	2,289	93,66	71,4	2,241	2,291	93,75	93,71
100	70,8	2,261	2,312	94,59	70,8	2,260	2,311	94,54	94,57
Gmb(ölçülen)		2,312			2,311				
Düz. Faktörü. (C)		1,022			1,022				
Gmm(ölçülen)		2,444							

Tablo 5.84. Karışım Numunelerinin %5,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

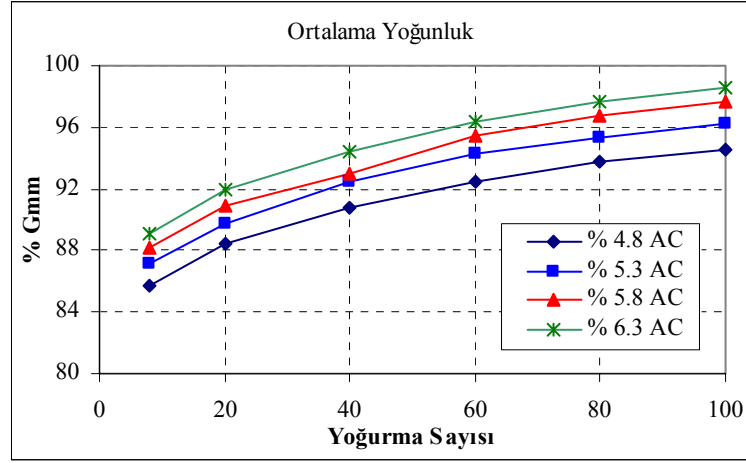
Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1262,94gr		Numune-2		Wm = 1263,14gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,5	2,049	2,107	86,78	78,0	2,063	2,126	87,59	87,18
20	76,0	2,117	2,176	89,64	76,0	2,117	2,182	89,89	89,76
40	73,5	2,189	2,250	92,69	74,0	2,174	2,241	92,32	92,50
60	72,2	2,228	2,291	94,35	72,6	2,216	2,285	94,10	94,23
80	71,4	2,253	2,316	95,41	71,8	2,241	2,310	95,15	95,28
100	70,8	2,272	2,336	96,22	71,0	2,266	2,336	96,22	96,22
Gmb(ölçülen)		2,336			2,336				
Düz.Faktörü. (C)		1,028			1,031				
Gmm(ölçülen)		2,428							

Tablo 5.85. Karışım Numunelerinin %5,8 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1268,32gr		Numune-2		Wm = 1268,75gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,0	2,071	2,122	87,97	77,8	2,077	2,130	88,34	88,15
20	75,5	2,140	2,192	90,88	75,5	2,141	2,195	91,03	90,95
40	74,0	2,183	2,236	92,72	73,8	2,190	2,246	93,12	92,92
60	71,8	2,250	2,305	95,56	72,0	2,245	2,302	95,45	95,51
80	71,0	2,276	2,331	96,64	71,0	2,276	2,335	96,80	96,72
100	70,3	2,298	2,354	97,60	70,4	2,296	2,354	97,62	97,61
Gmb(ölçülen)		2,354			2,354				
Düz. Faktörü. (C)		1,024			1,026				
Gmm(ölçülen)		2,412							

Tablo 5.86. Karışım Numunelerinin %6,3 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1274,23gr		Numune-2		Wm = 1275,25gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	77,8	2,086	2,140	89,30	77,8	2,088	2,127	88,78	89,04
20	75,5	2,150	2,205	92,02	75,2	2,160	2,201	91,85	91,94
40	73,8	2,199	2,256	94,14	73,0	2,225	2,267	94,62	94,38
60	72,0	2,254	2,312	96,50	71,8	2,263	2,305	96,20	96,35
80	71,0	2,286	2,345	97,86	70,8	2,295	2,338	97,56	97,71
100	70,4	2,306	2,365	98,69	70,2	2,314	2,358	98,39	98,54
Gmb(ölçülen)		2,365			2,358				
Düz. Faktörü. (C)		1,026			1,019				
Gmm(ölçülen)		2,396							



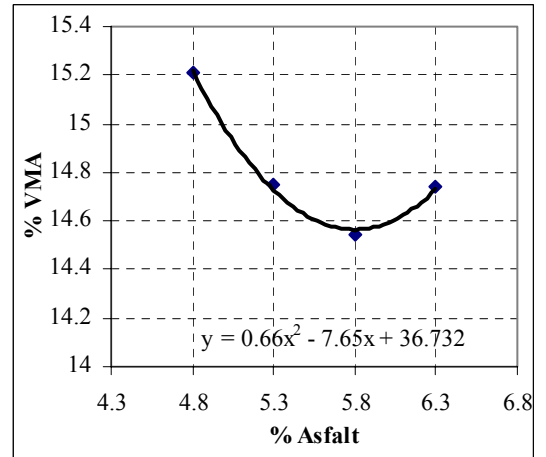
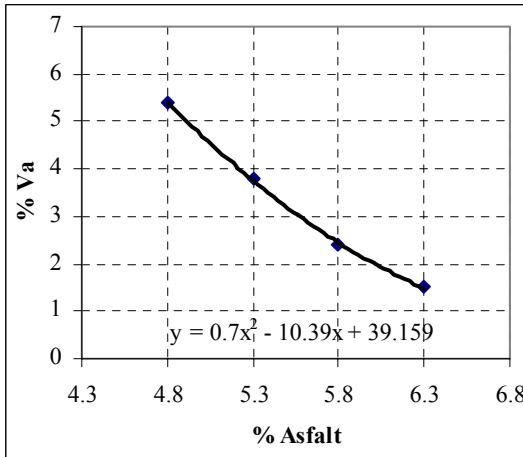
Şekil 5.63. Karışım Numunelerinin Ortalama Yoğunluk Eğrileri

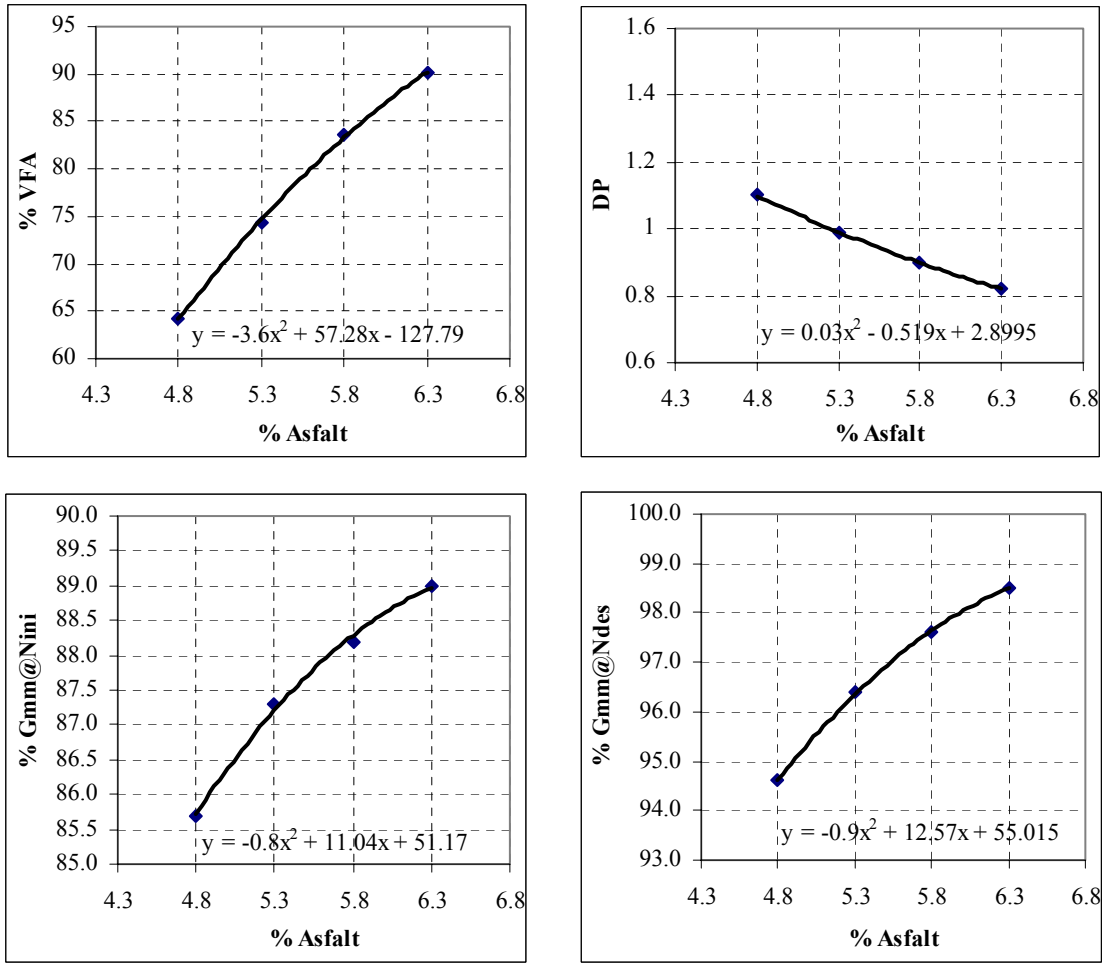
Dizayn yoğurma sayısında sıkıştırılan dört farklı asfalt içeriğindeki karışım numunelerinin sıkıştırma karakteristikleri kullanılarak, karışımların hacim ve yoğunluk özellikleri tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 5.87’de verilmiştir.

Tablo 5.87. Karışım Numunelerinin Hacim Özellikleri ve Yoğunluk Değerleri

%AC (Pb)	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)	DP	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndes.
4,8	5,43	15,21	64,3	1,10	85,7	94,6
5,3	2,78	14,75	74,4	0,99	87,2	96,2
5,8	2,39	14,54	83,6	0,90	88,2	97,6
6,3	1,46	14,74	90,1	0,82	89,0	98,5

Ayrıca, dizayn yoğurma sayısında belirlenen bu hacim ve yoğunluk değerlerinin asfalt yüzdelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafikleri çizilerek Şekil 5.64’te gösterilmiştir.





Şekil 5.64. Karışımların Hacimsel ve Yoğunluk Özelliklerinin Asfalt İçeriği ile Değişimi

PG 58–28+%15SK karışımının optimum bitüm içeriği, Superpave sisteminde dizayn yağurma sayısında istenen %4 hava boşluğu esas alınarak, hava boşluğu yüzdesi (Va)-asfalt içeriği grafiği yardımıyla %5,25 olarak tespit edilmiştir. Belirlenen bu dizayn (optimum) asfalt bağlayıcı yüzdesine göre, diğer dizayn değerleri tespit edilerek sonuçları Tablo 5.88’de verilmiş ve şartname kriterleri ile karşılaştırılarak uygunluğu tespit edilmiştir.

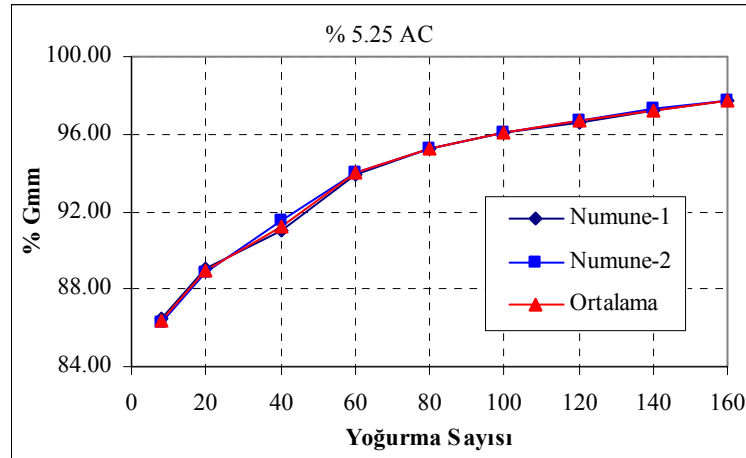
Tablo 5.88. Karışım Numunelerinin %5,25 Dizayn Asfalt Bağlayıcı İçeriğindeki Özellikleri

Karışım Özelliği	Sonuç	Şartname Kriteri
Hava Boşluğu Yüzdesi (Va)	% 4,0	% 4,0
Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)	% 14,75	Min. %14,0
Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA)	% 74,0	% 65–75
Toz Oranı (DP)	% 1,0	0,6–1,2 (0,8–1,6)
%Gmm@Nini. = 8	% 87,0	Maks. % 89,0
%Gmm@Ndes. = 100	% 96,0	% 96,0

Son olarak, tespit edilen dizayn asfalt içeriğinde iki karışım numunesi hazırlanarak maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılmış ve sıkıştırılan numunelerin sıkıştırma karakteristikleri Tablo 5.89’da, yoğunluk eğrileri ise Şekil 5.65’te gösterilmiştir.

Tablo 5.89. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Sıkıştırma Karakteristikleri

Devir Sayısı	Karışım Numunelerinin Sıkıştırılması								Ortalama %Gmm
	Numune-1		Wm = 1263,14gr		Numune-2		Wm = 1262,75gr		
	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	H (mm)	Gmb (tah.)	Gmb (düz.)	%Gmm	
8	78,2	2,058	2,103	86,51	78,5	2,049	2,096	86,25	86,38
20	76,0	2,117	2,164	89,01	76,2	2,111	2,160	88,85	88,93
40	74,3	2,166	2,213	91,05	74,0	2,174	2,224	91,49	91,27
60	72,0	2,235	2,284	93,96	72,0	2,234	2,286	94,03	93,99
80	71,0	2,266	2,316	95,28	71,1	2,262	2,315	95,22	95,25
100	70,4	2,286	2,336	96,09	70,5	2,282	2,334	96,03	96,06
120	70,0	2,299	2,349	96,64	70,0	2,298	2,351	96,72	96,68
140	69,6	2,312	2,363	97,20	69,6	2,311	2,365	97,27	97,24
160	69,2	2,325	2,376	97,76	69,3	2,321	2,375	97,70	97,73
Gmb(ölçülen)		2,376			2,375				
Düz. Faktörü. (C)		1,022			1,023				
Gmm(ölçülen)		2,431							



Şekil 5.65. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Eğrileri

Maksimum yoğurma sayısında (Nmaks) sıkıştırılan karışım numunelerinin yoğunluk değerleri Tablo 5.90’da verilerek şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların bu kriterleri sağladığı görülmüştür.

Tablo 5.90. Karışım Numunelerinin Nmaks.’da %5,25 Bitüm İçeriğindeki Yoğunluk Değerleri

Özellik	%Gmm@Nini.	%Gmm@Ndes.	%Gmm@Nmaks.
Sonuç	86,38	96,0	97,73
Şartname Kriteri	≤89,0	96,0	≤98,0

Son olarak çalışmada, uygulama bölgesi için seçilmiş ana bağlayıcı olan PG 64–22 bitümlü karışımı ile karışım modifikasyonunda kullanılan PG 58–28, PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK bitümlü karışımların tespit edilen optimum bitüm içerikleri (Pb_{opt}) veya dizayn asfalt içerikleri aşağıda Tablo 5.91’de verilmiştir.

Tablo 5.91. Saf ve Modifiye Karışımların Optimum Asfalt İçerikleri

Karışım	PG 64–22	PG 58–28	PG 58–28 +%5SK	PG 58–28 +%10SK	PG 58–28 +%15SK
Pb_{opt} (%)	4,85	4,75	4,90	5,10	5,25

Tablo 5.91 incelendiğinde, daha sert kıvamlı olan PG 64–22 asfalt bağlayıcısı ile hazırlanan sıcak karışımların dizayn bağlayıcı içeriğinin, daha yumuşak kıvamlı PG 58–28 bağlayıcısı ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Ayrıca, PG 58–28 bağlayıcısına SK ilave edilerek elde edilen modifiye bağlayıcılarla hazırlanan sıcak karışımların dizayn bitüm içeriklerinde, SK artış miktarına bağlı olarak önemli artışlar meydana gelmiştir. Saf PG 58–28 bağlayıcısına göre bu artış miktarı, PG 58–28+%5SK için %3,2; PG 58–28+%10SK için %7,4 ve PG 58–28+%15SK için %10,5 olarak meydana gelmiştir.

Sonuç olarak; çalışmada kullanılan bağlayıcılar ve seçilmiş olan dizayn agrega yapısı kullanılarak, dizayn ve maksimum yoğurma sayılarında, optimum bitüm içeriğinde sıkıştırılan bütün karışımların fiziksel özelliklerinin, şartname koşullarını sağladığı tespit edilmiştir.

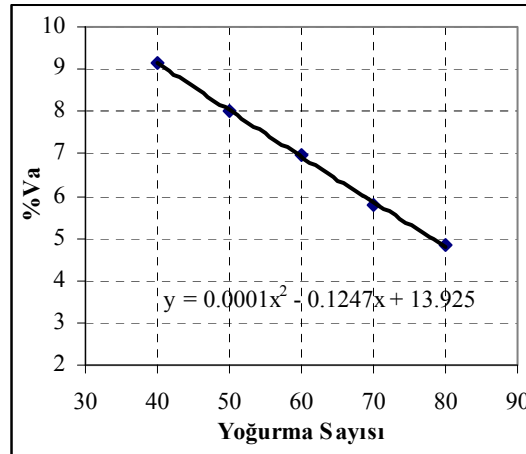
5.5.5. Bitümlü Karışımların %7 Boşluk Oranındaki Sıkıştırma Sayısının Bulunması

Superpave karışım dizaynında, sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi amacı ile yaygın olarak kullanılan AASHTO T-283 deneyinde deney standardı, numunelerin %6-8 boşluk oranında test edilmesini öngörmektedir. Bu çalışmada, optimum bağlayıcı içeriğinde hazırlanmış numunelere farklı sıkıştırma enerjileri uygulanarak boşluk oranı değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, Tablo 5.91’de optimum bitüm oranı verilen bütün karışımların, optimum bağlayıcı içeriğindeki sıkıştırma karakteristikleri tabloları (Tablo 5.38-5.53-5.65-5.77-5.89) incelenmiş ve hepsi için yoğunluk yüzdesi-boşluk oranı bakımından en kritik yoğurma sayısının 50 olduğu görülerek, %7 boşluk oranındaki hava boşluğunun tespit edilebilmesi için, karışımlara 40, 50, 60, 70 ve 80 yoğurma sayısı uygulanarak numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, PG 64–22 bağlayıcısı kullanılarak optimum bağlayıcı içerikli karışım numuneleri hazırlanmış ve her yoğurma sayısı için ikişer numunenin boşluk oranları incelenmiştir. Tablo 5.92’de, farklı yoğurma sayılarında sıkıştırılmış

numunelerin kuru (A), doymun (B) ve sudaki (C) ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri verilmiş; Şekil 5.66’da ise boşluk oranı ve yoğurma sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Tablo 5.92. Farklı Yoğurma Sayısı Uygulanarak Hazırlanmış Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Yoğurma Sayısı	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
40	1	75,2	1254,4	1273,68	705,18	2,207	2,431	9,23	19,06	51,56
	2	74,8	1254,88	1274,42	708,86	2,211	2,431	9,05	18,90	52,12
	Ortalama					2,209	2,431	9,14	18,98	51,84
50	1	73,7	1256,45	1270,12	708,23	2,236	2,431	8,02	17,98	55,41
	2	73,9	1255,67	1270,2	708,54	2,236	2,431	8,04	17,99	55,54
	Ortalama					2,236	2,431	8,03	17,99	55,37
60	1	72,7	1254,65	1263,52	709,1	2,263	2,431	6,91	16,99	59,33
	2	73,1	1256,18	1266,95	711,12	2,260	2,431	7,03	17,10	58,87
	Ortalama					2,262	2,431	6,97	17,05	59,10
70	1	72,2	1255,12	1261,64	712,45	2,285	2,431	5,99	16,17	62,66
	2	72,3	1254,8	1260,32	713,63	2,295	2,431	5,58	15,81	64,68
	Ortalama					2,290	2,431	5,79	15,99	63,82
80	1	71,5	1256,23	1261,22	717,58	2,311	2,431	4,95	15,24	67,55
	2	71,4	1254,96	1260,43	718,65	2,316	2,431	4,72	15,03	68,63
	Ortalama					2,314	2,431	4,83	15,14	68,09



Şekil 5.66. Yoğurma Sayısı – Boşluk oranı ilişkisi

Şekil 5.66 grafiği incelendiğinde, yaklaşık %7’lik hava boşluğu oranının, yoğurma sayısı 60 uygulanarak sıkıştırılmış numunelerden elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple, bitümlü sıcak karışımların suyun etkilerine karşı hassasiyetlerinin belirlenmesi için, 60 yoğurma sayısı uygulanarak karışım numuneleri sıkıştırılmıştır.

5.5.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, Siyah Karbonun (SK) bitümlü sıcak karışımlarda karışım modifikasyonunda kullanılmasının, karışımın performans özellikleri üzerinde göstermiş olduğu iyileştirmenin görülebilmesi ve değerlendirilebilmesi amacıyla, Superpave dizayn yöntemine göre deney karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu amaçla, dizayn asfalt içeriği belirlenen ana bağlayıcı olan PG 64–22 ile karışım modifikasyonunda kullanılan PG 58–28 bağlayıcısı ve bu bağlayıcıya belirli oranlarda SK katılarak elde edilen PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK katkılı bağlayıcıları kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Çalışmada, sadece performans deneylerinde kullanılmak üzere optimum bitüm içeriğinde hazırlanmış numune sayısı Tablo 5.93’te, deneylere tabi tutulmuş numunelerin bir kısmı ise Şekil 5.67’de gösterilmiştir.

Tablo 5.93. Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayısı

Performans Deneyi	Karışım Çeşidi				
	PG 64–22	PG 58–28	PG 58–28 +%5SK	PG 58–28 +%10SK	PG 58–28 +%15SK
ITSM ve Sünme Modülü Deneyi	9	9	9	9	9
ITS ve AASHTO T-283 Deneyi	6	6	6	6	6
Toplam	15	15	15	15	15
Toplam Numune Sayısı	75				



Şekil 5.67. Deney Numuneleri

5.6. Karışımların Performans Deneyleri

Karışımların performans değerlendirilmesinde, PG 64–22 ve PG 58–28 bağlayıcılı karışımlar kontrol numuneleri olarak esas alınmıştır. Siyah karbon katılarak elde edilen PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK katkılı bağlayıcıları kullanılarak hazırlanmış karışım numuneleri ise modifiye karışımlar olarak değerlendirilmiştir.

5.6.1. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Nem Hassasiyeti Deneyleri ve Sonuçları

Siyah Karbon (SK) ile Superpave yöntemine göre dizayn edilmiş modifiye karışımların performans özelliklerini tespit etmek amacıyla ilk olarak, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve nem hassasiyeti (AASHTO T-283) deneyleri yapılmıştır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, Şekil 5.68’de görülen Marshall stabilitesi deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.68. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deney Düzeneği

Karışımların nem hassasiyetini AASHTO T-283 (2003) yöntemine göre tespit etmek amacıyla, 5 farklı karışım tipinin her biri için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Optimum bağlayıcı içeriğinde hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri tepsilere konarak oda sıcaklığında 2 saat soğutulduktan sonra 60°C’deki fırında 16 saat bekletilerek yaşlandırılmıştır. Daha sonra, sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletilen karışım numuneleri, standardın [64] öngördüğü ortalama %7 boşluk oranını teşkil etmek amacıyla, yoğurmalı sıkıştırıcı ile 60 yoğurma sayısı uygulanarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler, deneye tabi tutulmadan önce havadaki kuru (A), doygun (B) ve sudaki (C) ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyine tabi tutulacak şartlandırılmamış (kuru) ve şartlandırılmış (yaş) numunelerin fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 5.94 ve Tablo 5.95’te verilmiştir.

Tablo 5.94. Şartlandırılmamış (Kuru) Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
PG 64–22	1	72,8	1255,59	1265,22	711,16	2,266	2,431	6,78	16,88	59,82
	2	72,5	1255,74	1265,96	710,28	2,260	2,431	7,04	17,11	58,84
	3	72,8	1256,24	1265,49	710,43	2,263	2,431	6,90	16,98	59,37
	Ortalama					2,265	2,431	6,91	16,99	59,34
PG 58–28	1	72,6	1254,33	1264,54	711,1	2,266	2,434	6,88	16,78	58,97
	2	72,3	1256,19	1265,77	710,82	2,264	2,434	7,00	16,88	58,53
	3	72,5	1255,8	1265,26	712,3	2,271	2,434	6,69	16,61	59,69
	Ortalama					2,269	2,434	6,86	16,76	59,06
PG 58–28 +%5SK	1	72,9	1256,62	1266,74	712,08	2,266	2,434	6,92	16,94	59,15
	2	72,8	1258,22	1267,85	711,62	2,262	2,434	7,06	17,07	58,61
	3	72,6	1256,64	1266,16	711,85	2,267	2,434	6,86	16,89	59,38
	Ortalama					2,266	2,434	6,95	16,97	59,05
PG 58–28 +%10SK	1	72,5	1258,93	1269,36	713,41	2,264	2,431	6,85	17,16	60,07
	2	72,8	1260,23	1272,32	713,47	2,255	2,431	7,24	17,50	58,64
	3	72,9	1260,17	1271,8	712,84	2,254	2,431	7,26	17,52	58,56
	Ortalama					2,259	2,431	7,12	17,39	59,09
PG 58–28 +%15SK	1	73,0	1263,31	1274,94	715,57	2,258	2,431	7,10	17,51	59,46
	2	72,5	1263,22	1272,2	713,71	2,262	2,431	6,96	17,38	59,97
	3	72,7	1263,65	1273,88	714,32	2,258	2,431	7,10	17,51	59,43
	Ortalama					2,258	2,431	7,05	17,47	59,62

Tablo 5.95. Şartlandırılmış (Yaş) Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
PG 64–22	1	72,6	1255,34	1265,32	710,16	2,261	2,431	6,98	17,06	59,05
	2	72,9	1255,79	1266,3	710,41	2,259	2,431	7,07	17,14	58,73
	3	73,0	1256,1	1265,82	711,25	2,265	2,431	6,83	16,92	59,64
	Ortalama					2,263	2,431	6,96	17,04	59,14
PG 58–28	1	72,8	1254,89	1264,44	709,50	2,261	2,434	7,10	16,97	58,18
	2	72,5	1255,58	1265,54	711,62	2,267	2,434	6,87	16,77	59,01
	3	73,0	1255,36	1265,07	711,44	2,268	2,434	6,84	16,74	59,13
	Ortalama					2,264	2,434	6,93	16,82	58,78
PG 58–28 +%5SK	1	72,5	1259,13	1269,78	713,51	2,264	2,434	7,00	17,02	58,84
	2	72,7	1259,46	1270,12	712,22	2,258	2,434	7,25	17,24	57,93
	3	73,1	1257,8	1267,65	711,47	2,261	2,434	7,09	17,09	58,53
	Ortalama					2,263	2,434	7,11	17,11	58,43
PG 58–28 +%10SK	1	72,9	1259,54	1271,81	714,56	2,260	2,431	7,02	17,31	59,43
	2	73,1	1259,86	1270,82	712,62	2,257	2,431	7,16	17,43	58,93
	3	72,5	1260,22	1271,08	713,04	2,258	2,431	7,10	17,38	59,13
	Ortalama					2,259	2,431	7,09	17,37	59,16
PG 58–28 +%15SK	1	72,4	1262,7	1272,35	714,72	2,264	2,431	6,85	17,29	60,36
	2	72,8	1263,29	1275,25	715,15	2,255	2,431	7,22	17,62	59,01
	3	72,8	1263,24	1274,36	715,26	2,259	2,431	7,06	17,47	59,60
	Ortalama					2,262	2,431	7,04	17,46	59,66

Numunelerin fiziksel özellikleri tespit edildikten sonra, şartlandırmaya tabi tutulmayacak kuru numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye tabi tutularak, kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve dolaylı çekme mukavemetleri (ITS_{kuru}) hesaplanmıştır. Şartlandırılacak numunelere ise, 13–67 kPa emme basıncı altında 5–10 dakika süreyle, Şekil 5.69'da görülen bir manometre ile vakum uygulanarak %70–80 oranında su ile doygun hale gelmesi sağlanmıştır. Bu karışım numunelerinin doygunluk dereceleri (D), Tablo 5.96'da verilmiştir.



Şekil 5.69. Numunelerin Manometre ile Doygun Hale Getirilmesi

Tablo 5.96. Şartlandırılan Karışım Numunelerin Doygunluk Dereceleri

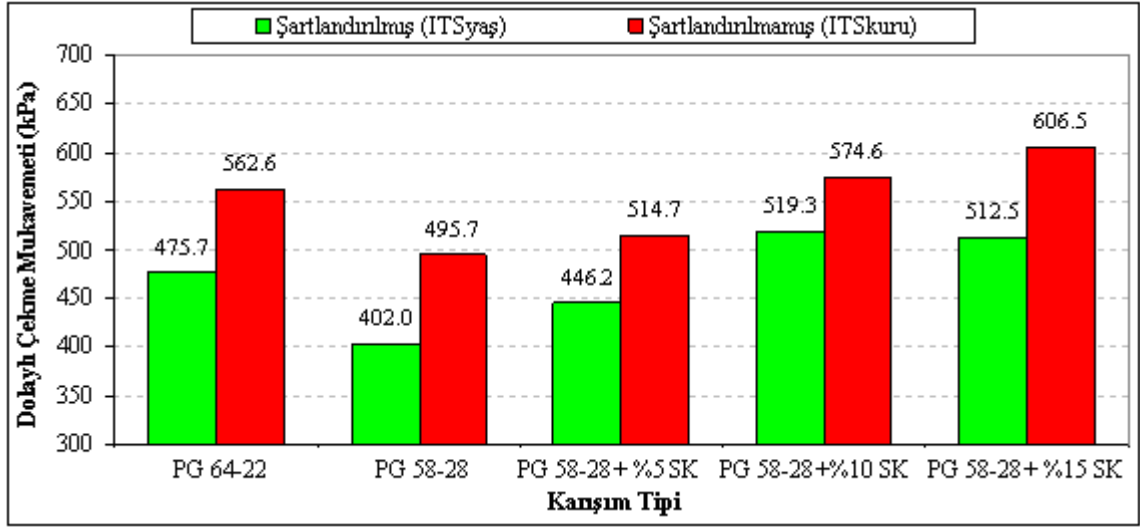
Karışım Tipi	No	Şartlandırmadan Önce						Şartlandırmadan Sonra		
		A Kuru, (gr)	B Doyg., (gr)	C Suda, (gr)	V Hacim, (cm ³)	Va (%)	Va (cm ³)	B ₁ Doyg., (gr)	Vsu (cm ³)	D Doyg. (%)
PG 64–22	1	1255,34	1265,32	710,16	555,16	6,98	38,82	1283,07	27,73	71,42
	2	1255,79	1266,3	710,41	555,89	7,07	39,33	1284,39	28,60	72,71
	3	1256,10	1265,82	711,25	554,57	6,83	37,86	1283,46	27,36	72,25
	Ortalama									72,13
PG 58–28	1	1254,89	1264,44	709,50	554,94	7,10	39,44	1282,97	28,08	71,19
	2	1255,58	1265,54	711,62	553,92	6,87	38,00	1283,05	27,47	72,28
	3	1255,36	1265,07	711,44	553,63	6,84	37,75	1282,35	26,99	71,48
	Ortalama									71,65
PG 58–28 +%5SK	1	1259,13	1269,78	713,51	556,27	7,00	38,85	1286,85	27,72	71,34
	2	1259,46	1270,12	712,22	557,90	7,25	40,34	1287,80	28,34	70,25
	3	1257,80	1267,65	711,47	556,18	7,09	39,53	1286,58	28,78	72,80
	Ortalama									71,46
PG 58–28 +%10SK	1	1259,54	1271,81	714,56	557,25	7,02	39,19	1288,74	29,20	74,49
	2	1259,86	1270,82	712,62	558,20	7,16	39,95	1288,60	28,74	71,93
	3	1260,22	1271,08	713,04	558,04	7,10	39,71	1289,46	29,24	73,62
	Ortalama									73,35
PG 58–28 +%15SK	1	1262,70	1272,35	714,72	557,63	6,85	38,30	1292,22	29,52	77,06
	2	1263,29	1275,25	715,15	560,10	7,22	40,55	1293,55	30,26	74,62
	3	1263,24	1274,36	715,26	559,10	7,06	39,55	1292,32	29,08	73,51
	Ortalama									75,06

Doygun hale getirilen numuneler, 16 saat süreyle -18 °C'ye ayarlanmış bir dondurucuya yerleştirilmiştir. Dondurucudan çıkartılan numuneler 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra çıkarılarak 25 °C'deki su banyosuna yerleştirilmiş ve 2 saat bekletildikten sonra Marshall deney cihazında eksenel yüklemeye tabi tutularak kırılmaya neden olan maksimum yük tespit edilmiş ve dolaylı çekme mukavemetleri ($ITS_{yaş}$) hesaplanmıştır.

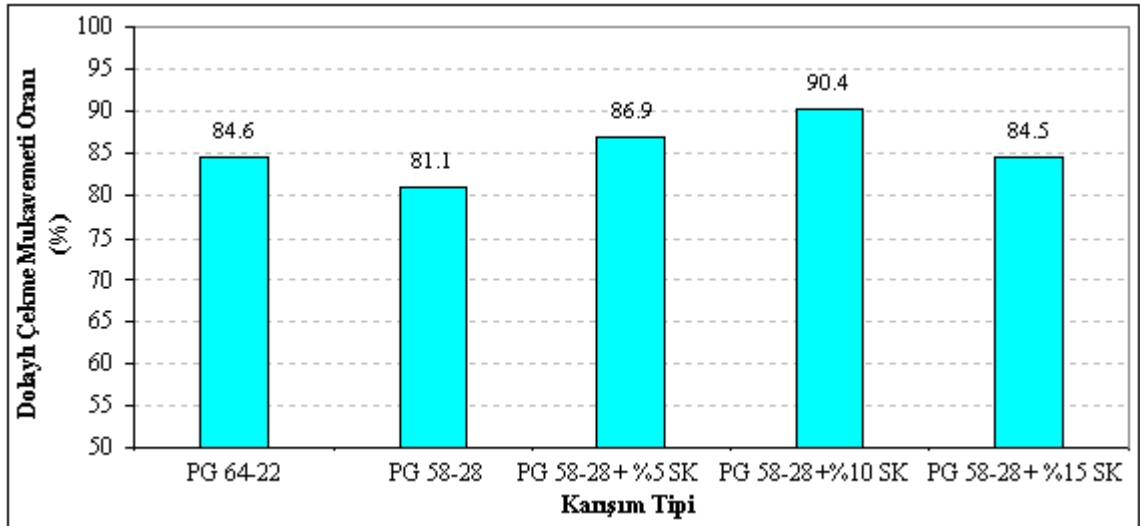
Şartlandırılmış yaş numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ($ITS_{yaş}$), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) bölünerek, nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) tespit edilmiş ve sonuçları Tablo 5.97'de verilmiştir. İlave olarak Şekil 5.70'te, kuru ve şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri, Şekil 5.71'de ise şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetlerinin, kuru numunelerin dolaylı çekme mukavemetlerine oranları (ITSR) gösterilmiştir.

Tablo 5.97. Kuru ve Şartlandırılmış Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Oranları (ITSR)

Karışım Tipi	No	Şartlandırılmış Numuneler			Kuru Numuneler			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{yaş} (kPa)	Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{kuru} (kPa)	
PG 64–22	1	72,6	5,48	473,21	72,8	6,59	567,49	84,56
	2	72,9	5,75	494,48	72,5	6,73	581,95	
	3	73,0	5,35	459,45	72,8	6,25	538,21	
	Ortalama			475,71	562,55			
PG 58–28	1	72,8	4,78	411,63	72,6	5,71	493,07	81,10
	2	72,5	4,55	393,44	72,3	5,92	513,32	
	3	73,0	4,67	401,05	72,5	5,56	480,78	
	Ortalama			402,04	495,72			
PG 58–28 +%5SK	1	72,5	5,14	444,46	72,9	6,08	522,86	86,91
	2	72,7	4,97	428,58	72,8	5,84	502,91	
	3	73,1	5,43	465,68	72,6	5,96	514,66	
	Ortalama			446,24	513,47			
PG 58–28 +%10SK	1	72,9	5,86	503,94	72,5	6,43	556,01	90,38
	2	73,1	6,19	530,86	72,8	6,85	589,88	
	3	72,5	6,05	523,15	72,9	6,72	577,89	
	Ortalama			519,31	574,59			
PG 58–28 +%15SK	1	72,4	6,15	532,53	73,0	7,12	611,45	84,50
	2	72,8	5,72	492,57	72,5	7,05	609,62	
	3	72,8	5,95	512,38	72,7	6,94	598,46	
	Ortalama			512,49	606,51			



Şekil 5.70. Kuru ve Şartlandırılmış Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Değişimi



Şekil 5.71. Numunelerin Dolaylı Çekme Mukavemeti Oranı (ITSR) Değişimi

Şekil 5.70 ve Şekil 5.71 incelendiğinde ana bağlayıcı (PG 64-22) ile hazırlanan kuru ve şartlandırılmış karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemetleri sırasıyla 562,6 ve 475,7 kPa; dolaylı çekme mukavemeti oranı ise %84,6 bulunmuş ve bu oran şartname limiti olan min. %80 değerinden daha yüksek elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak, PG 64-22 bağlayıcısı ve seçilen dizayn agrega yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu; ayrıca karışımın orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitesinin yeterli olduğu; yine dolaylı çekme oranının yüksek çıkması ile karışımın sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğu görülmektedir. Modifiye amaçlı kullanılan daha düşük viskoziteye sahip PG 58-28 bağlayıcısı ile hazırlanmış olan kuru ve şartlandırılmış karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemeti oranı, ana bağlayıcıya göre daha düşük elde edilmiş ancak sudan

kaynaklanan bozulmalara karşı direnci yeterli seviyede bulunmuştur. Bununla birlikte, SK ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanmış olan modifiye kuru karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemetleri, saf PG 58–28 bağlayıcısı ile hazırlanmış kuru karışım numunelerine göre SK katkı miktarının artış miktarına (%5, 10 ve 15) bağlı olarak sırasıyla %3,8; %15,9 ve %22,4 oranında artış göstermiştir. Benzer artış şartlandırılmış karışım numuneleri için de meydana gelmiş ve bu artış oranı sırası ile %11, %29,2 ve %27,5 olarak tespit edilmiştir. Modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışım numunelerindeki en büyük artış miktarı, kuru karışım numuneleri için %15 SK, şartlandırılmış numuneler için ise %10 SK ihtiva eden karışımlarda meydana gelmiştir. SK ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanmış olan modifiye karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları, saf PG 58–28 bağlayıcısı ile hazırlanmış karışım numunelerine göre SK katkı miktarının artış miktarına bağlı olarak sırasıyla %7,2; %11,5 ve %4,2 oranında artış göstermiştir. Dolaylı çekme mukavemeti oranındaki en büyük artış miktarı %10 SK ihtiva eden karışım numunelerinden elde edilmiştir.

Bu verilerin bir sonucu olarak, genel anlamda bütün saf ve modifiye bağlayıcılar ve seçilen dizayn agrega yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu, ayrıca karışımların orta sıcaklıklardaki tekerlek izi direncinin önemli bileşenleri olan sertlik ve durabilitelerinin yeterli olduğu, yine dolaylı çekme oranının yüksek çıkması ile karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yeterli olduğu görülmektedir. Ancak; saf PG 58–28 bağlayıcısına göre, kuru modifiye numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri sürekli bir artış gösterirken, şartlandırılmış numunelerde % 15 SK katkılı numunelerde, %10 SK numunelere göre bir azalma görülmektedir. Aynı yüzdeler için benzer durum dolaylı çekme mukavemeti oranlarında da söz konusudur. Ayrıca, dolaylı çekme mukavemetleri bakımından ana bağlayıcıya (PG 64–22) eşdeğer kabul edilebilecek karışım %10 SK katkılı modifiye karışım numunelerinden elde edilmiştir. Ancak, %10 SK katkılı modifiye karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranı ana bağlayıcı değerinden oldukça yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, %10 SK katkılı karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin önemli ölçüde arttığı, dolayısıyla karışımların yorulma direnci, kohezyon ve durabilite özelliklerinin iyileştiğini ifade etmek mümkündür.

5.6.2.Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi

Siyah karbon ile modifiye edilmiş karışımların performansının değerlendirilmesi amacıyla ikinci olarak, karışım numuneleri Şekil 5.72’de görülen UMATTA deney cihazı kullanılarak dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.72. UMATTA Deney Cihazı

Bu deney için 5 farklı karışım tipinin her biri için 9 adet olmak üzere toplam 45 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Optimum bağlayıcı içeriğinde hazırlanan numuneler, yoğurmalı sıkıştırıcı kullanılarak dizayn yoğurma sayısında (Ndes) sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numunelerin havadaki kuru, doymun ve sudaki ağırlıkları tespit edilerek fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Farklı sıcaklıklarda (0, 20 ve 40°C) deneye tabi tutulacak bu numuneler üç guruba bölünerek bunların fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 5.98–5.100’de verilmiştir.

Tablo 5.98. 0 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulan Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
PG 64–22	1	70,3	1253,39	1257,74	721,45	2,337	2,431	3,86	14,27	72,95
	2	70,5	1255,9	1260,58	722,03	2,332	2,431	4,07	14,46	71,84
	3	69,9	1254,56	1258,7	721,42	2,335	2,431	3,95	14,35	72,49
	Ortalama					2,335	2,431	3,96	14,36	72,42
PG 58–28	1	71,1	1255,93	1259,21	721,82	2,337	2,434	3,98	14,18	71,93
	2	70,5	1255,76	1258,12	722,01	2,342	2,434	3,77	13,99	73,09
	3	70,2	1256,25	1260,40	722,54	2,336	2,434	4,04	14,24	71,62
	Ortalama					2,338	2,434	3,93	14,14	72,21
PG 58–28 +%5SK	1	71,0	1258,64	1262,72	723,25	2,333	2,434	4,15	14,46	71,34
	2	71,0	1258,58	1261,65	722,75	2,335	2,434	4,05	14,38	71,84
	3	70,6	1257,60	1261,40	723,32	2,337	2,434	3,98	14,31	72,22
	Ortalama					2,335	2,434	4,06	14,39	71,80
PG 58–28 +%10SK	1	71,8	1259,32	1264,48	723,55	2,328	2,431	4,23	14,83	71,45
	2	71,2	1260,12	1266,21	725,45	2,330	2,431	4,14	14,75	71,91
	3	71,0	1259,6	1264,15	724,63	2,335	2,431	3,96	14,59	72,84
	Ortalama					2,331	2,431	4,11	14,72	72,06
PG 58–28 +%15SK	1	71,2	1262,56	1266,84	725,45	2,332	2,431	4,07	14,82	72,54
	2	72,1	1262,62	1269,10	727,69	2,332	2,431	4,07	14,82	72,54
	3	71,1	1262,25	1267,66	726,18	2,331	2,431	4,11	14,85	72,33
	Ortalama					2,332	2,431	4,08	14,83	72,47

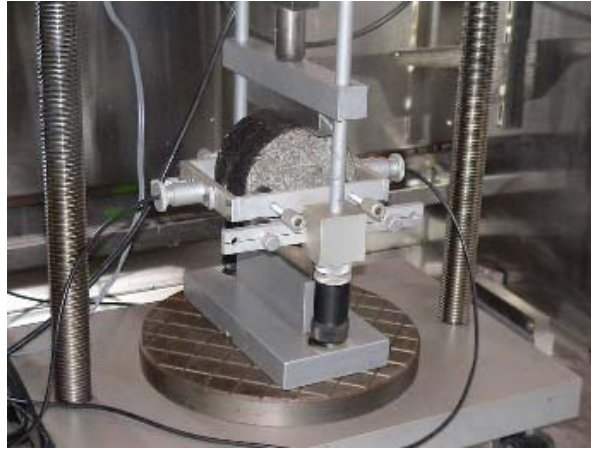
Tablo 5.99. 20 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulan Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
PG 64–22	1	70,1	1254,9	1259,35	721,8	2,334	2,431	3,97	14,37	72,37
	2	69,9	1256,02	1259,65	721,08	2,332	2,431	4,07	14,46	71,87
	3	70,2	1256,32	1260,28	721,4	2,331	2,431	4,10	14,48	71,70
	Ortalama					2,333	2,431	4,05	14,44	71,98
PG 58–28	1	70,3	1256,13	1259,00	721,28	2,336	2,434	4,03	14,22	71,70
	2	70,4	1256,08	1258,94	722,36	2,341	2,434	3,82	14,04	72,76
	3	70,5	1255,80	1259,52	721,66	2,335	2,434	4,08	14,27	71,44
	Ortalama					2,335	2,434	3,98	14,18	71,97
PG 58–28 +%5SK	1	71,0	1259,18	1262,93	723,32	2,334	2,434	4,13	14,45	71,43
	2	71,2	1258,78	1262,45	723,42	2,335	2,434	4,06	14,39	71,80
	3	70,8	1258,63	1262,10	723,08	2,335	2,434	4,07	14,39	71,75
	Ortalama					2,334	2,434	4,08	14,41	71,66
PG 58–28 +%10SK	1	71,1	1260,01	1265,43	724,82	2,331	2,431	4,13	14,73	72,00
	2	71,2	1260,37	1264,09	723,6	2,332	2,431	4,08	14,69	72,25
	3	70,8	1259,75	1264,32	724,62	2,334	2,431	3,98	14,61	72,73
	Ortalama					2,332	2,431	4,06	14,68	72,33
PG 58–28 +%15SK	1	71,7	1262,05	1268,40	726,62	2,329	2,431	4,18	14,91	71,99
	2	71,4	1262,46	1267,64	725,96	2,331	2,431	4,13	14,87	72,24
	3	71,5	1263,63	1268,14	726,42	2,333	2,431	4,05	14,80	72,65
	Ortalama					2,331	2,431	4,12	14,86	72,29

Tablo 5.100. 40 °C Sıcaklıkta Deneye Tabi Tutulan Numunelerin Fiziksel Özellikleri

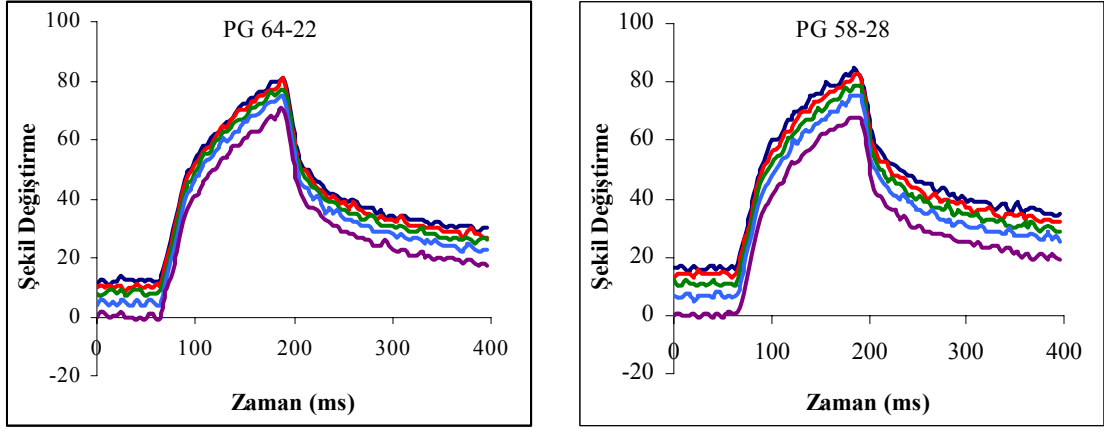
Karışım Tipi	No	Yükseklik (mm)	A (gr)	B (gr)	C (gr)	Gmb	Gmm	Va (%)	VMA (%)	VFA (%)
PG 64–22	1	69,9	1254,44	1258,29	721,58	2,337	2,431	3,86	14,27	72,98
	2	69,5	1254,83	1260,3	722,05	2,331	2,431	4,10	14,49	71,69
	3	70,2	1256,32	1260,8	721,86	2,331	2,431	4,11	14,49	71,65
	Ortalama					2,334	2,431	4,02	14,42	72,10
PG 58–28	1	70,3	1256,84	1260,32	722,84	2,338	2,434	3,93	14,14	72,21
	2	70,7	1256,42	1260,95	722,41	2,333	2,434	4,15	14,33	71,05
	3	70,3	1256,35	1260,3	721,97	2,334	2,434	4,12	14,30	71,22
	Ortalama					2,336	2,434	4,06	14,26	71,49
PG 58–28 +%5SK	1	71,3	1257,97	1262,12	723,30	2,335	2,434	4,08	14,41	71,68
	2	71,0	1256,21	1259,74	721,65	2,335	2,434	4,08	14,41	71,65
	3	71,0	1258,15	1261,47	723,52	2,339	2,434	3,91	14,26	72,56
	Ortalama					2,337	2,434	4,03	14,36	71,96
PG 58–28 +%10SK	1	71,4	1260,00	1264,14	724,58	2,335	2,431	3,94	14,57	72,96
	2	71,3	1259,66	1264,44	723,88	2,330	2,431	4,14	14,75	71,91
	3	71,2	1259,45	1263,87	724,12	2,333	2,431	4,02	14,63	72,56
	Ortalama					2,334	2,431	4,03	14,65	72,48
PG 58–28 +%15SK	1	71,3	1263,15	1267,6	725,84	2,332	2,431	4,09	14,84	72,43
	2	71,6	1263,48	1270,15	727,90	2,330	2,431	4,15	14,89	72,12
	3	71,0	1262,76	1267,84	726,96	2,335	2,431	3,96	14,72	73,08
	Ortalama					2,333	2,431	4,07	14,82	72,54

Fiziksel özellikleri standartlara uygun olan numuneler, Şekil 5.73'te deney düzeneği verilen esneklik modülü deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney, 0°C, 20°C ve 40°C'de olmak üzere üç farklı sıcaklıkta deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 7 μ , yükleme periyodu 3 sn, yük artış süresi (rise time) 0,124 sn olarak alınmıştır. Deneye başlanmadan önce numuneler 2 saat deney sıcaklıklarında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler tek tek yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçecek sensorlar (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0,35) bilgisayara girilmiş, cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensorların aynı sıcaklık değerini göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Yükleme başlığı pönomatik olarak çalışan cihaz, ilk önce numunede 7 μ deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü otomatik olarak ayarlayan cihaz, esas yüklemeleri yapmakta ve her darbeye 7 μ deformasyon oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuç olarak, yazılım tarafından 5 yüklemenin ortalama değeri ve standart sapmaları hesaplanmaktadır. Deneylerde standart sapması %10'dan fazla olan numuneler iptal edilmiştir.

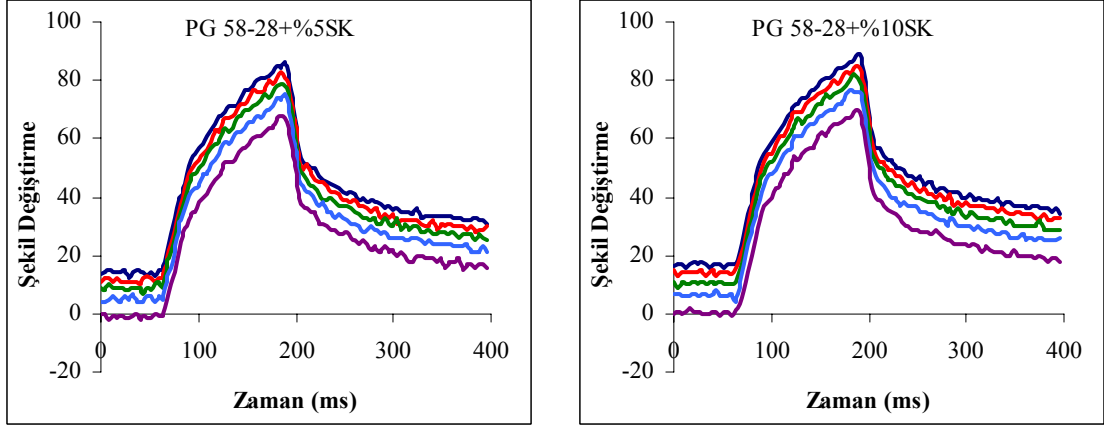


Şekil 5.73. Esneklik Modülü Deney Düzeneği

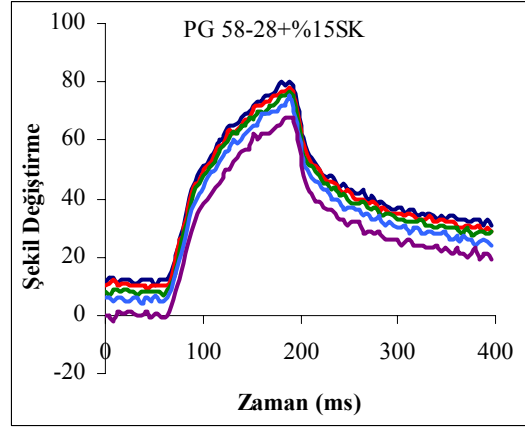
Şekil 5.74–5.76'da, örnek olarak PG 64–22, PG 58–28, PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK bitümlü karışım numunelerinin, 0–400 ms arası için, 20°C sıcaklıktaki birim şekil değiştirme- zaman ilişkileri gösterilmiştir. Bu şekillere göre, yükün uygulanmaya başlanması ile numunede yatay deformasyonların artış gösterdiği, yük maksimuma eriştiğinde hedef deformasyonun sağlandığı, yükün kalkması ile birlikte deformasyonların önemli bir kısmının geri dönmesine rağmen, numune üzerinde bir miktar kalıcı deformasyonun olduğu görülmektedir. Bu şekil değiştirme durumu 5 periyotluk yük uygulanması işlemi süresinde devam etmektedir.



Şekil 5.74. Saf Numunelerin Birim Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi



Şekil 5.75. %5SK ve %10SK Katkı Numunelerin Birim Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi



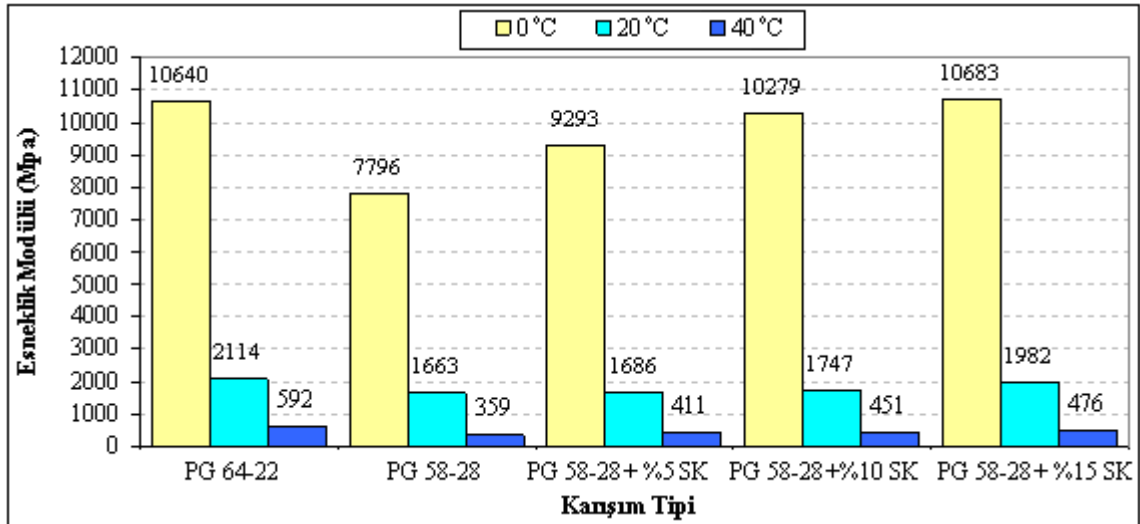
Şekil 5.76. %15SK Katkı Numunelerin Birim Şekil Değişirme – Zaman İlişkisi

Karışım numunelerinin bilgisayar yazılımı tarafından hesaplanan, farklı sıcaklıklardaki esneklik modülü (E_m) değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Tablo 5.101’de verilmiştir.

Tablo 5.101. Numunelerin Esneklik Modülü (Em) Değerleri

Karışım Tipi	No	0°C		20°C		40°C	
		Yükseklik (mm)	Em (Mpa)	Yükseklik (mm)	Em (Mpa)	Yükseklik (mm)	Em (Mpa)
PG 64-22	1	70,3	10380	70,1	1914	69,9	612,3
	2	70,5	10780	69,9	2290	69,5	560,5
	3	69,9	10760	70,2	2138	70,2	602,7
	Ortalama	70,2	10640	70,1	2114	69,9	591,8
PG 58-28	1	71,1	7858	70,3	1770	70,3	360,4
	2	70,5	7470	70,4	1578	70,7	337,2
	3	70,2	8060	70,5	1641	70,3	378,5
	Ortalama	70,6	7796	70,4	1663	70,4	358,7
PG 58-28 +%5SK	1	71,0	9490	71,0	1772	71,3	390,0
	2	71,0	8993	71,2	1626	71,0	437,9
	3	70,6	9396	70,8	1660	71,0	406,0
	Ortalama	70,9	9293	71,0	1686	71,1	411,3
PG 58-28 +%10SK	1	71,8	10415	71,1	1792	71,4	460,7
	2	71,2	10312	71,2	1745	71,3	471,2
	3	71,0	10110	70,8	1704	71,2	420,2
	Ortalama	71,0	10279	71,0	1747	71,3	450,7
PG 58-28 +%15SK	1	71,2	10770	71,7	2060	71,3	500,8
	2	72,1	10386	71,4	1930	71,6	475,4
	3	71,1	10893	71,5	1956	71,0	453,0
	Ortalama	71,5	10683	71,5	1982	71,3	476,4

Farklı sıcaklıklarda (0, 20 ve 40 °C) deneye tabi tutulan karışım numunelerinin esneklik modülü (Em) değerleri, Şekil 5.77’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

**Şekil 5.77.** Numunelerin Esneklik Modülü (Em) Değişimi

Şekil 5.77 incelendiğinde; daha sert ve yüksek viskoziteye sahip PG 64–22 ana bağlayıcılı karışımların bütün sıcaklıklardaki (0, 20, 40 °C) esneklik modülü değeri, daha yumuşak ve düşük viskoziteye sahip PG 58–28 bağlayıcılı karışımların esneklik modülü değerinden daha yüksek elde edilmiştir. Modifiye amaçlı kullanılan PG 58–28 bağlayıcısına SK ilave edilmesiyle elde edilen modifiye karışımların esneklik modülü değerleri, saf PG 58–28 bağlayıcılı karışımlara göre bütün sıcaklıklar için, katkı miktarının artış oranına bağlı olarak düzenli bir artış göstermiştir. Bu artış miktarı katkı miktarına (%5, 10, 15) bağlı olarak, 0 °C sıcaklık için sırasıyla %19,2; %31,9 ve %37; 20 °C sıcaklık için %1,4; %5,1 ve %19,2 ve 40 °C sıcaklık için %14,7; %25,7 ve %32,8 olarak tespit edilmiştir. Bu durumda, esneklik modülü değeri bakımından ana bağlayıcılı karışıma eşdeğer kabul edilebilecek karışım, %15 SK ilavesiyle hazırlanmış modifiye karışımdan elde edilmiştir. Özellikle bu karışımların 0 °C sıcaklıkta elde edilmiş esneklik modülü değerleri çok yakın bulunmuştur.

Sonuç olarak, SK ile modifiye edilmiş karışımların esneklik modülü, SK artış miktarına bağlı olarak sürekli bir artış göstermiş, dolayısıyla karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı görülmüştür. Buna göre; SK katkılı karışımlarda, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı; esneklik modülünün artmasıyla bitümlü kaplamalarda, kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin iyileştiğini ifade etmek mümkündür.

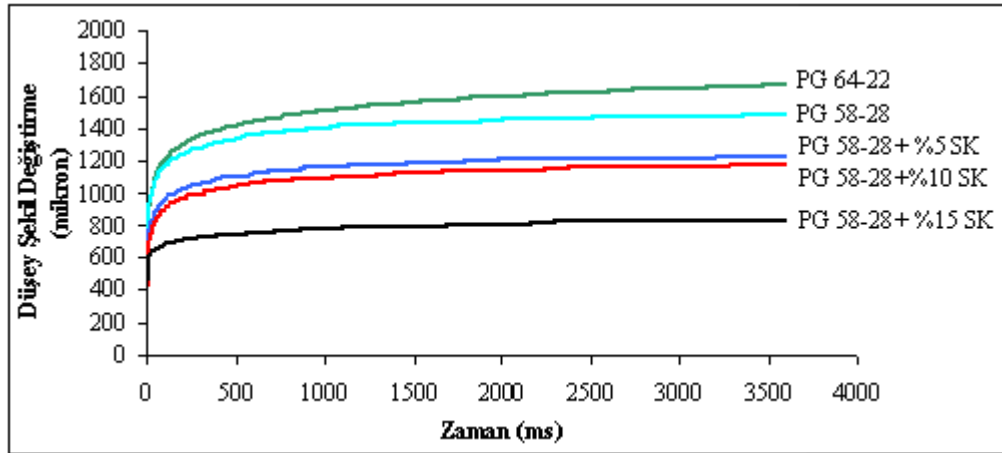
5.6.3. Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi

Siyah karbon (SK) ile modifiye edilmiş karışımların performansının değerlendirilmesi amacıyla üçüncü olarak, karışım numuneleri Şekil 5.72’de verilmiş olan UMATTA deney cihazı kullanılarak statik yüklemeli sünme modülü deneyine tabi tutulmuştur. Esneklik modülü (ITSM) deneyi tahribatsız bir deney yöntemi olduğu için, bu deneyde kullanılan karışım numuneleri, ikinci olarak sünme modülü deneyi için de kullanılmıştır. Standart deney sıcaklığı 40 °C olmasına karşın aşırı sıcak mevsimler göz önünde bulundurularak, deney ayrıca 60 °C sıcaklıkta da yapılmıştır. Bu amaçla, esneklik modülü (ITSM) deneyinde 0 °C’de deneye tabi tutulan numuneler, sünme modülü deneyinde 40 °C sıcaklıkta, 20 °C’deki numuneler ise 60°C sıcaklıkta deneye tabi tutulmuştur. Deney, statik yüklemeli ve yük kontrollü olarak yapılmıştır. Statik yüklemeli sünme modülü deney düzeneği Şekil 5.78’de görülmektedir.

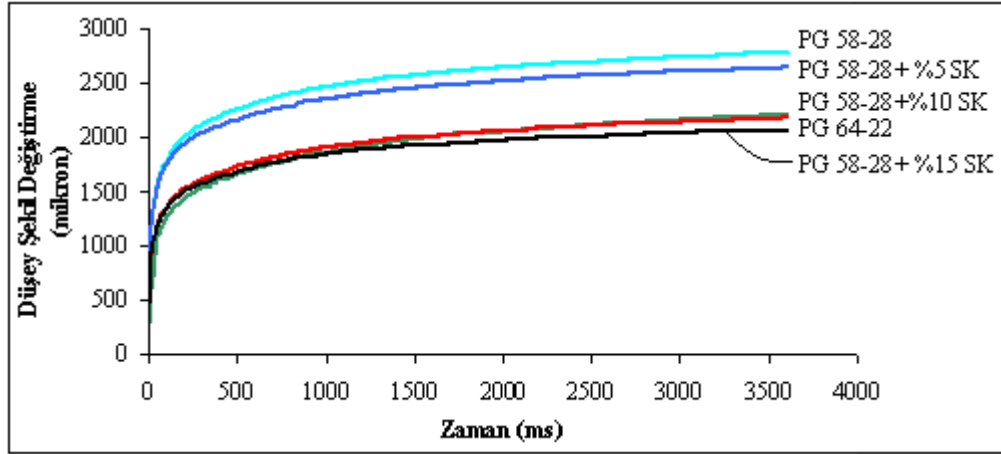


Şekil 5.78. Sünme Modülü Deney Düzenegi

Deneye başlanmadan önce, karışım numuneleri deney sıcaklığında 2 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği ve çapı bilgisayara girilmiş, cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensorların aynı sıcaklık değerini göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Cihaz, ilk önce numunede 10 kPa gerilme oluşturacak yükleme ile 10 dakika hazırlık yüklemesi yapmıştır. Bu süre sonunda sensorlarda meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanarak ve gerilme değeri 100 kPa'a çıkartılarak 1 saat sürecek deney başlatılmıştır. Bu 1 saatlik süre içerisinde bilgisayar yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplamakta ve sonuç olarak vermektedir. Şekil 5.79 ve Şekil 5.80'de karışım numunelerinin 40 ve 60 °C sıcaklıktaki birikimli düşey birim şekil değiştirme ve zaman ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.79. Karışım Numunelerinin 40 °C Sıcaklıktaki Birim Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi



Şekil 5.80. Karışım Numunelerinin 60 °C Sıcaklıktaki Birim Şekil Değiştirme – Zaman İlişkisi

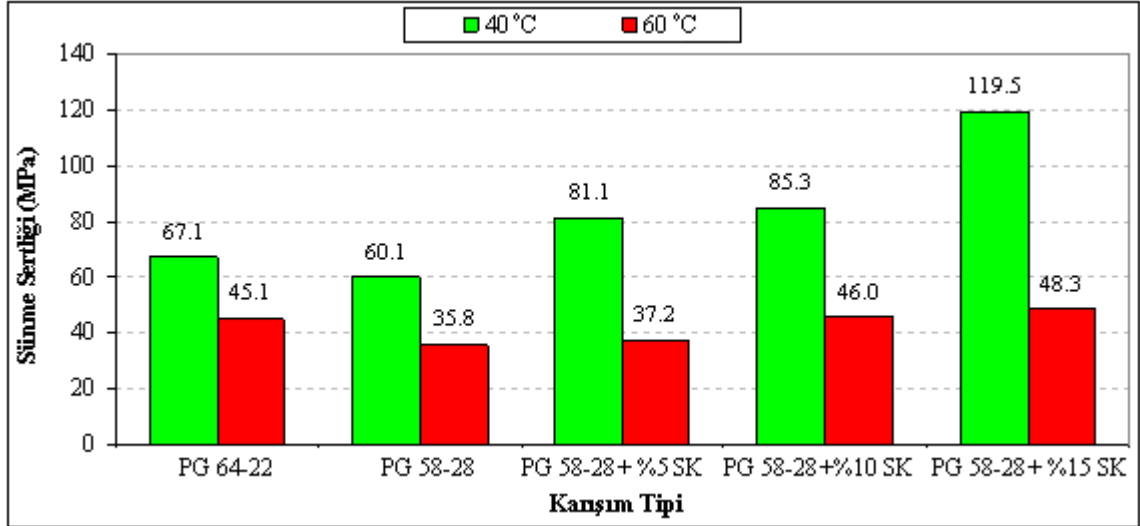
Şekil 5.79 ve Şekil 5.80’de, karışım numunelerinin deney başlangıcında çok hızlı düşey deformasyon yaptığı daha sonra hava boşluğu azalarak sıkışan numunelerin daha az miktarlarda deformasyon yaparak sünme özelliklerini sergilediği görülmektedir.

Karışım numunelerinin bilgisayar yazılımı tarafından hesaplanan, farklı sıcaklıklardaki sünme sertliği modülü (R_m) değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Tablo 5.102’de verilmiştir.

Tablo 5.102. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (R) Değerleri

Karışım Tipi	No	40 °C		60 °C	
		Yükseklik (mm)	R_m (Mpa)	Yükseklik (mm)	R_m (Mpa)
PG 64–22	1	70,3	65,32	70,1	46,778
	2	70,5	71,27	69,9	45,71
	3	69,9	64,77	70,2	42,944
	Ortalama	70,2	67,12	70,1	45,144
PG 58–28	1	71,1	58,12	70,3	34,47
	2	70,5	60,271	70,4	36,567
	3	70,2	62,032	70,5	36,50
	Ortalama	70,6	60,141	70,4	35,846
PG 58–28 + %5SK	1	71,0	84,456	71,0	35,854
	2	71,0	78,682	71,2	37,41
	3	70,6	80,25	70,8	38,432
	Ortalama	70,9	81,129	71,0	37,232
PG 58–28 + %10SK	1	71,8	82,475	71,1	48,373
	2	71,2	85,50	71,2	43,04
	3	71,0	87,805	70,8	46,51
	Ortalama	71,0	85,26	71,0	45,974
PG 58–28 + %15SK	1	71,2	115,50	71,7	48,313
	2	72,1	120,00	71,4	47,20
	3	71,1	123,00	71,5	49,426
	Ortalama	71,5	119,50	71,5	48,313

Farklı sıcaklıklarda (40 ve 60 °C) deneye tabi tutulan karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (Rm) değerleri Şekil 5.81’de, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.81. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (Rm) Değişimi

Şekil 5.81 incelendiğinde; daha sert ve yüksek viskoziteye sahip PG 64–22 ana bağlayıcılı karışımların 40 °C ve 60 °C sıcaklıklardaki sünme sertliği değerleri, daha yumuşak ve düşük viskoziteye sahip PG 58–28 bağlayıcılı karışımların sünme sertliği değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Modifiye amaçlı kullanılan PG 58–28 bağlayıcısına SK ilave edilmesiyle elde edilen modifiye karışımların, viskozite artışlarına paralel olarak sünme sertliği değerleri; saf PG 58–28 bağlayıcılı karışımlara göre her iki sıcaklık için, katkı miktarının artış oranına bağlı olarak düzenli bir artış göstermiştir. Bu artış miktarı katkı miktarına (%5, 10, 15) bağlı olarak, 40 °C sıcaklık için sırasıyla %34,9; %41,9 ve %98,8 ve 60 °C sıcaklık için %3,9; %28,5 ve %34,9 olarak tespit edilmiştir. Sünme sertliklerinin özellikle 40 °C sıcaklıkta çok yüksek çıktığı, ayrıca 40 °C sıcaklıkta en yüksek sünme sertliği değerinin %15 SK katkılı modifiye karışımların elde edildiği görülmektedir.

Bu verilere göre, sünme sertliği değeri bakımından ana bağlayıcılı karışıma eşdeğer kabul edilebilecek karışım, 40 °C sıcaklık için yaklaşık %2 SK katkılı PG 58–28 bağlayıcılı modifiye karışımlardan; 60 °C sıcaklık için %10 SK ilavesiyle hazırlanmış modifiye karışımlardan elde edilebileceği görülmektedir. İlave olarak, saf PG 58–28 bağlayıcısına SK ilave edilmesiyle hazırlanan modifiye karışımların, katkı miktarının artışına paralel olarak sünme sertliği değerinin, dolayısıyla karışımın tekerlek izi veya uzun süreli deformasyonlara karşı direncinin, özellikle 40 °C sıcaklıkta büyük artış gösterdiğini ifade etmek mümkündür.

5.7. Karışımların Maliyet Hesabı

Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılacak malzemelerin tercih edilir olabilmesi için, sağladığı faydaların yanında kolaylıkla elde edilebilir ve maliyetlerinin uygun olması önem taşımaktadır.

Bitümlü karışımların maliyet hesabı için 2008 yılı itibariyle asfalt çimentosu ve siyah karbonun TÜPRAŞ rafineri satış fiyatları sırasıyla 770 YTL ve 1920 YTL (1600\$) olarak alınmıştır. Tablo 5.91’de PG 64–22, PG 58–28, PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK, PG 58–28+%15SK saf ve modifiye karışımların optimum bitüm içerikleri sırasıyla %4,85; %4,75; %4,90; %5,10 ve %5,25 olarak verildiğine göre, bu bitümler kullanılarak hazırlanan 1 ton karışım için bitümlere harcanacak para miktarı aşağıda belirlenmiştir.

Saf PG 64–22 ve PG 58–28 bağlayıcılarının 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$F_{(PG\ 64-22)} = 770 \times 4,85 / 100 = 37,35 \text{ YTL}$$

$$F_{(PG\ 58-28)} = 770 \times 4,75 / 100 = 36,58 \text{ YTL}$$

PG 58–28 bağlayıcısına %5, %10 ve %15 SK katılarak elde edilen modifiye bitümlerin 1 ton fiyatı sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$F_{KARIŞIM(PG\ 58-28+%5SK)} = [770 \times (100-5) + 1920 \times (5)] / 100 = 827,50 \text{ YTL/Ton}$$

$$F_{KARIŞIM(PG\ 58-28+%10SK)} = [770 \times (100-10) + 1920 \times (10)] / 100 = 885,00 \text{ YTL/Ton}$$

$$F_{KARIŞIM(PG\ 58-28+%15SK)} = [770 \times (100-15) + 1920 \times (15)] / 100 = 942,50 \text{ YTL/Ton}$$

Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların 1 ton karışım içerisindeki bedeli;

$$F_{(PG\ 58-28+%5SK)} = 827,50 \times 4,90 / 100 = 40,55 \text{ YTL}$$

$$F_{(PG\ 58-28+%10SK)} = 885,00 \times 5,10 / 100 = 45,14 \text{ YTL}$$

$$F_{(PG\ 58-28+%15SK)} = 942,50 \times 5,25 / 100 = 49,48 \text{ YTL'dir.}$$

Bu sonuçlara göre, SK ile modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanan karışımların maliyetlerinde saf bağlayıcıya (PG 58–28) göre, SK artış miktarına bağlı olarak bir artış söz konusudur. Bu artış miktarı sırasıyla %10,9; %23,4 ve %35,3 oranında gerçekleşmiştir. Bağlayıcı ve karışımların performans deney sonuçları dikkate alındığında genel olarak, ana bağlayıcıya (PG 64–22) eşdeğer bağlayıcı elde etmek amacıyla PG 58–28 bağlayıcısına %10 siyah karbon ilave edilmesi yeterli görülmektedir. Bu durumda, ana bağlayıcı yerine PG 58–28+%10SK bağlayıcısının kullanılması halinde, ton başına 7,79 YTL’lik fazla bir harcama yapılacağı veya maliyette %20,9’lik bir artış olacağı görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Siyah karbonun bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerine etkisinin Superpave dizayn yöntemi çerçevesinde araştırıldığı bu çalışmada, teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda ifade edilmiştir.

- Çalışmada, uygulama bölgesi olarak seçilen Elazığ için bağlayıcı sınıfı PG 64–22 olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın deneysel ilk aşamasında, seçilmiş olan PG 64–22 (B 70/100) ana bağlayıcısı esas alınarak, en az bu bağlayıcı derecesinde bir modifiye bağlayıcı elde edebilmek amacıyla, daha yumuşak olan PG 58–28 (B 160/220) bağlayıcısına ağırlıkça %5, %10 ve %15 Siyah Karbon (SK) ilave edilerek PG 58–28+%5SK, PG 58–28+%10SK ve PG 58–28+%15SK modifiye bağlayıcıları elde edilmiş ve bunların performans sonuçları değerlendirilmiştir.

- Geleneksel test sonuçlarına göre; SK katkılı bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre düktilite ve penetrasyon değerlerinde azalma, yumuşama ve parlama noktalarında ise artış meydana gelmiştir. Bu durum, SK ilavesiyle bağlayıcıların sertliğinin arttığını ve sıcaklık hassasiyetinin düştüğünü göstermektedir.
- Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deney sonuçlarına göre; SK ilavesiyle bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinde iki sınıf (12 °C), tekerlek izi direncinde ise %462 kadar büyük artışlar olduğu, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin düştüğü ancak elastiklik özelliğinin arttığı ve çok yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerde kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, yüksek sıcaklık performansı bakımından PG 64–22 ana bağlayıcısına eşdeğer özellikteki bağlayıcı, yaklaşık %10SK katkılı PG 58–28 bağlayıcısından elde edilmiştir.
- Kiriş Eğme Reometresi (BBR) deney sonuçlarına göre; SK ilavesiyle bağlayıcının düşük sıcaklık performans derecesinin bir sınıf (6 °C) kadar yükseldiği ve SK'un %10'dan fazla kullanılması durumunda, bağlayıcı sertliğinin artmasında daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, %10SK ilavesiyle ana bağlayıcıya eşdeğer özellikte modifiye bağlayıcı elde edildiği ve bu miktarın kullanılması durumunda modifiye bağlayıcının, aynı zamanda daha düşük sıcaklıklarda da (-28 °C) iyi performans göstereceği tespit edilmiştir.
- Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi sonuçlarına göre; SK katkılı bağlayıcıların viskozitelerinde 135 °C sıcaklık için %47, 165 °C sıcaklık için %62'ye varan artışlar meydana gelmiştir. Buna göre, SK ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin önemli ölçüde düştüğü ve daha sert bir kıvama geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, viskozite bakımından ana bağlayıcıya eşdeğer özellikte bağlayıcının yaklaşık %10SK ilavesiyle elde edilebileceği belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, saf ve SK modifiyeli bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanarak, siyah karbonun karışımların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve AASHTO T-283 deneyleri sonucunda; SK katkılı karışımların ITS değerleri, kuru karışımlar için %22,4; şartlandırılmış karışımlar için %27,5 kadar artış göstermiştir. Bu artış ITS değerleri için %11,5 kadar olmuştur. ITS değerindeki en büyük artış miktarı, kuru karışım numuneleri için %15SK, şartlandırılmış numuneler için %10 SK; ITS değerlerinde ise %10SK ihtiva eden modifiye karışımlardan elde edilmiştir. Ayrıca, ITS değeri bakımından ana bağlayıcı karışımlara eşdeğer kabul edilebilecek karışımlar %10SK katkılı modifiye karışımlardan elde edilmiştir. SK ilavesiyle, karışımların adezyon ve kohezyon özelliklerinin iyileştiği, sertlik ve durabilitesinin arttığı, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin önemli ölçüde yükseldiği görülmüştür.
- Dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) deneyi sonucunda; SK modifiyeli karışımların esneklik modülü değerleri, 0 °C, 20 °C ve 40 °C sıcaklıklar için sırasıyla %37; %19,2 ve %32,8 kadar artış göstermiştir. Esneklik modülündeki en büyük artış özellikle 0 °C ve 40 °C’de elde edilmiştir. Esneklik modülü bakımından, %15SK ilaveli karışımlar ana bağlayıcı karışımlara eşdeğer özellik göstermiştir. SK katkılı karışımlarda, trafik etkisiyle kaplamanın altında meydana gelen ve yorulma çatlaklarına neden olan çekme ve basınç gerilmelerinin neden olduğu kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı, esneklik modülünün artmasıyla bitümlü kaplamalarda kaplamanın yük dağıtma kabiliyetinin iyileştiğini ifade etmek mümkündür.
- Sünme modülü deneyi sonucunda; SK modifiyeli karışımların sünme sertliği değerleri, 40 °C ve 60 °C sıcaklıklar için sırasıyla %98,8 ve %34,9 kadar büyük artış göstermiştir. Yüksek sünme sertliğinin 40 °C sıcaklıkta %15SK katkılı modifiye karışımların elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, ana bağlayıcı karışımlara eşdeğer özellikteki karışımlar, 40 °C için yaklaşık %2SK, 60 °C için %10SK katkılı karışımlardan elde edilmiştir. Buna göre SK katkılı karışımların, uzun süreli deformasyonlara karşı direncinin önemli artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Bitüm ve karışım modifikasyonu ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunda; Siyah karbonun (SK) bir katkı maddesi olarak karışımlarda %10–15 oranında kullanılması durumunda, bitüm ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle, sıcaklık hassasiyetinin düştüğü, sertliğinin artmasına rağmen esneklik özelliğinin arttığı, agrega–asfalt adezyonu ve asfaltın kohezyonunun artış gösterdiği, su hasarlarına karşı büyük direnç sağlandığı, kaplama yorulma direncinin yükseldiği ve özellikle yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı büyük direnç olduğu görülmüştür. Ayrıca, SK ilavesiyle karışımların maliyetlerinde artışlar olmasına karşın, kaplamada yaptığı iyileştirmelerle kaplamanın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı bakım-onarım masraflarını, gösterdiği iyi performansla çok daha aza indireceğinden uzun vadede daha ekonomik olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2006, Stratejik Plan 2007–2011, Ankara, 85s.
- [2] <http://www.asnud.org.tr>, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [3] T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, 2007, Karayolu Ulaşım İstatistikleri (2006), Ankara, 32s.
- [4] Dikicioğlu, A.E., 2004, Ülkemizdeki Sathi Kaplamalı ve Sıcak Karışım Kaplamalı Yollarda Ömür-maliyet İlişkisine Genel Bakış, 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu, 149-153.
- [5] Francken, L., 1998, Bituminous Binders and Mixes, Rilem Reports, 352p.
- [6] Nicholls, C., 1998, Asphalt Surfacing, E & FN Spon, pp. 68–79.
- [7] Malkoç, G., Önal, M.A., 1998, Modifiye Bitümlü Bağlayıcılar, Özel Bitümler ve Katkılı Bitümlerin Yol Uygulamalarındaki Kullanımları, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 30-45.
- [8] Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A.G., 2004, Yeni Bitüm Standardı, 4.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., Ankara, 405-413.
- [9] Orhan, F., 2000, Asfaltın Geleceği Superpave, 3.Ulusal Asfalt Sempozyumu, K.G.M., Ankara, 146-160.
- [10] Lavin, P.G., 2003, Asphalt Pavements, Spon Pres, London and New York, 444p.
- [11] Altaş, Ö.Y., 2002, Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 150s.
- [12] Ilıcalı, M., 2001, Asfalt Kaplamalar, İstanbul Asfalt Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yayınları, Yayın No.1, İstanbul.
- [13] Yıldırım, B., 1984, Yol İnşaatı, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayını, Elazığ, 181s.
- [14] Umar, F., Yayla, N., 1981, Yol İnşaatı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 205s.
- [15] Umar, F., Ağar, E., 1991, Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 339s.
- [16] Önal, M. A., Kahramangil M., 1993, Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 200s.
- [17] TS 706, 1980, Beton Agregaları, TSE, Ankara, 1-2s.
- [18] Kandhall, P.S., Mallick, R.B., 1997, Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of Practice, NCAT Report No.97-6, Alabama, USA, pp. 10-15.

- [19] Roberts F.L., Mohammad L.N., Wang L. B., 2002, History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States, American Society of Civil Engineers, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No.4, pp.279-293.
- [20] Tunç, A., 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- [21] Yollar Fenni Şartnamesi, 1994, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 258-280s.
- [22] The Asphalt Institute, 1996, Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2), U.S.A., 100p.
- [23] Asfalt ve Uygulamaları, 2001, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 280s.
- [24] ASTM D 242, 1992, Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures, Annual Book of ASTM Standards, USA.
- [25] Terzi, S., 2000, Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 70s.
- [26] Kandhal, P. S., Lynn, C., Parker, F., 1998, Characterization Tests for Mineral Fillers Related to Performance of Asphalt Paving Mixtures, Transportation Research Record, Auburn University, USA, pp.101-110.
- [27] Balta, İ., 2004, Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 224s.
- [28] Kurtis, K., 2003, Asphalt and Asphalt Concrete, Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, Atlanta, Georgia, pp. 14-18.
- [29] Shell Bitüm El Kitabı, 2004, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.
- [30] Tunç, A., 2004, Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 352s.
- [31] McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M., 1995, Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003, 172p.
- [32] Uluçaylı, M., 1998, Superpave ve Fransız Bitüm Şartnameleri, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, s.118-129.
- [33] Kuloğlu, N., 2000, Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, Tübitak, s.61-67.
- [34] Alshamsi, K.S., 2006, Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom, 226p.

- [35] Dinç, E., 1999, Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas, 45s.
- [36] Berkers, R.F.A., 2005, Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen, Master's Degree in Technology Engineering: Civil in the Department of Civil Engineering Tswane University of Technology, 172p.
- [37] Fitzgerald, R.L., 2000, Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Pre-forms, The Degree of Master of Science in Chemical Engineering Michigan Technological University, 70p.
- [38] Orhan, F., Superpave, KGM Üstyapı Şube Müdürlüğü, Ankara, 40s.
- [39] Zeng, H., Isacson, U., 1997, Relationships Between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behavior of Asphalt, Royal Institute of Technology, Elsevier PII: S0950-0618(97) 00008-1, Stockholm, Sweden, pp.4-9
- [40] Whiteoak, D., Read, J., 2003, The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Lti., London, 464p.
- [41] Asfalt El Kitabı, 2002, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
- [42] Ceran, M.B., 2007, Lojistik Sektöründe Geçerli Olan İstiap Hadleri'nin Ülkemizdeki ve Diğer Ülkelerdeki Durumu, Konya Ticaret Odası Araştırma Raporu, 10s.
- [43] Karayolları Trafik Yönetmeliği, 2003, İçişleri, Bayındırlık ve İskân ve Ulaştırma Bakanlıkları, 117s.
- [44] Çakıroğlu, M., 1996, Yol Esnek Üstyapıda Oluşan Bozulmalar, 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, İSFALT, İstanbul, s.154-163.
- [45] Karaşahin, M., Aşırı Dingil Yüklemesinin Karayollarına Verdiği Zararlar, T.C. Ulaştırma Bakanlığı, www.ubak.gov.tr/tr/kugm/dosyalar/diger/dosya65.ppt, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [46] Bekheet, W., Helali, K., Kazmierowski, T., Ningyuan, L., 2005, Integration of Preventive Maintenance in the Pavement Preservation Program Ontario Experience, Transportation Research Circular, Roadway Pavement Preservation 2005, Kansas City, Missouri, pp. 87-98.
- [47] Terzi, S., Karaşahin, M., 2004, Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Esnek Üstyapı Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, s.344-357.
- [48] Brown, E.R., Kandhal, P.S., Zhang, J., 2001, Performance Testing for Hot Mix Asphalt, NCAT Report 01-05, Auburn, 79p.
- [49] Karayolu Bakım El Kitabı, 1998, Karayolları Genel Müdürlüğü Bakım Dairesi Başkanlığı, Ankara, 478s.

- [50] Harold, R., Paul, P.E., Chris, P.E., 1995, Pavement Distress, Technical Assistance Report, LTRC, PP. 14-15.
- [51] Zoorob, S.E., Suparna, L.B., 2000, Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt), Cement and Concrete Composites, Vol.22, pp. 233-242.
- [52] Clyne, T.R., Hanson, M.P., Chadbourn, B., Drescher, A., Newcomb, D.E., 2001, Superpave Level One Mix Design at the Local Government Level, Final Report 2002-19, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 198p.
- [53] Ping, W.V., Xiao, Y., 2007, Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida, Final Report for the Florida Department of Transportation, FSU Project No.: OMNI 008664, Tallahassee, FL 32310, 253p.
- [54] Taute, A., Verhaeghe, B.M.J.A., Visser, A.T., 2001, Interim guidelines for the design of Hot-Mix Asphalt in South Africa, 157p.
- [55] Protocol P07: Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device, 2001, FHWA-LTPP Technical Support Services Contractor, Virginia, 79p.
- [56] Ghile, D.B., 2006, Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, Masters of Science in Road and Railway Engineering from Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 151p.
- [57] Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Nukunya, B., 2002, Evaluation of SuperpaveTM Criteria for VMA and Fine Aggregate Angularity, Final Report, UF Project No.: 4910-4504-619-12, University of Florida, 261p.
- [58] Sargand, S., Kim, S.S., 2001, Pavement Performance Testing, Final Report, Report No.: FHWA/OH-2001/14, Ohio Department of Transportation, 188p.
- [59] Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007, Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 179-189.
- [60] Flintsch, G.W., Al-Quadi, I.L., Loulizi, A., Mokarem, D., 2005, Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Virginia, Final Contract Report, Virginia Transportation Research Council, Virginia, 56p.
- [61] Zaniewski, J.P., Srinivasan, G., 2004, Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential, Technical Report, West Virginia University, 73p.
- [62] Bagampadde, U., 2005, Investigations on Moisture Damage-related Behaviour of Bituminous Materials, Doctoral Thesis, Civil and Architectural Engineering, KTH, Sweden, 45p.
- [63] Hunter, E.R., 2001, Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes, University of Wyoming, Laramie, 159p.

- [64] Zaniewski, J., Viswanathan, A.G., 2006, Investigation of Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Concrete, West Virginia University, 87p.
- [65] Eribol, S., Orhan, F., Önal, M.A., 2002, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şube Müdürlüğü, 94s.
- [66] Birliker, R.Y., 1998, Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu Tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 208s.
- [67] Abbas, A.R., 2004, Simulation of the Micromechanical Behavior of Asphalt Mixtures Using the Discrete Element Method, Doctor of Philosophy in Civil Engineering Washington State University, 180p.
- [68] Isacsson, U., Lu, X., 1995, Testing and Appraisal of Polymer Modified Road Bitumens-State of the Art, Materials and Structures, 28, 139-159
- [69] Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Kim, B., Cui, Z., 2004, Guidelines for Use of Modifiers in Superpave Mixtures: Evaluation of Ground-Tire-Rubber (GTR), Final Report No. 4910-4504-718-12, University of Florida Department of Civil and Coastal Engineering, 81p.
- [70] Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M., 2001, Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report 459, National Academy Press, Washington, DC, 53p.
- [71] Carreau, P.J., Bousmina, M., Bonniot, F., 2000, The Viscoelastic Properties of Polymer-Modified Asphalt, The Canadian Journal of Chemical Engineering, V.78, No.3, pp. 495-502.
- [72] Yousefi, A.A., Ait-Kadi, A., Roy, C., 2000, Composite Asphalt Binders: Effect of Modified RPE on Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, V.12, No. 2, 113-123.
- [73] Lu, X., Isacsson, U., 1998, Effect of Filler on Low Temperature Physical Hardening of Bitumen, Construction and Building Materials, V.12, 463-470.
- [74] Ait-Kadi, A., Brahimi, B., Bousmina, M., 1996, Polymer Blends for Enhanced Asphalt Binders, Polymer Engineering and Science, V.36, No.12, pp. 1724-1733.
- [75] Iqbal, M.H., 2004, Influence of Polymer Type and Structure on Polymer Modification of Saudi Asphalt, Master of Science Degree, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 142p.
- [76] Lu, X., Isacsson, U., 2001, Effect of Binder Rheology on the Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures, Road Materials and Pavement Design, V.2, No.1, 29-47,
- [77] Kaya, F., 2005, Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katkı Maddeleri, 294s.
- [78] Downes, J.W., 1986, Modified Binders to the Year 2000, 6th International Asphalt Conference, Sidney, Australian, pp. 35-39.

- [79] Nolan, K.L., Hesp Simon, A.M., 1994, Low-Temperature Fracture Toughness of Polyethylene Modified Asphalt Binders, In Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 54-59.
- [80] Airey, G.D., 2002, Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, Vol.16, pp. 473-487.
- [81] 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, pp. 178-186.
- [82] Airey, G.D., 2003, Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, Volume 82, Issue 14, pp. 1709-1719.
- [83] Khattak, M.J., Baladi, G.Y., 1998, Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures, Transportation Research Record, Vol.1638, pp. 12-22.
- [84] Rogge, D.F., Terrel, R.L., George, A.J., 1990, Polymer Modified Hot Mix Asphalt, Oregon State University, U.S.A., pp. 151-172.
- [85] Murphy, M., O'Mahony, M., Lycett, C., Jamieson, I., 2001, Recycled Polymers for Use as Bitumen Modifiers, Journal of Materials in Civil Engineering, V.13, No.4, pp.306-314
- [86] Larry, F., 1993, Recycled Plastic Finds Home in Asphalt Binder, Roads and Bridges, USA, pp. 41-47
- [87] Panda, M., Mazumdar, M., 2002, Utilization of reclaimed polyethylene in bituminous paving mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.14, pp.527-530.
- [88] Brule, B., Brion, Y., Tanguy, T., 1998, Paving polymer blends: Relationships between composition, structure and properties, Proc. Assoc. Asphalt Paving Technol. Vol.57, pp. 41-63
- [89] Kuloğlu, N., Namlı, R., 1996, Evsel Plastik Atıkların Üstyapı Aşınma Tabakasında Kullanılması, IX. Mühendislik Sempozyumu, SDÜ, Isparta, s. 43-46.
- [90] Salab, Z.E., Suparna, L.B., 2000, Laboratory design and performance of improved bituminous composites utilizing recycled plastics packaging waste, Presented at Technology Watch and Innovation in the Construction Industry, Palais Descongres, Brussels, Belgium, pp. 203–209.
- [91] Kerh,T., Wang,Y.M., Lin,Y., 2005, Experimental evaluation of anti-stripping additives mixing in road surface pavement materials, American Journal of Applied Sciences, Vol.2, No.10, pp. 1427-1433.
- [92] Yıldırım, B., Kuloğlu, N., Güngör, M.M., 1997, Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Asfalt Betonu Kaplamalarda Kullanılması, Eskişehir, s. 187-196.
- [93] Tyson, S.S., 1993, Present and Future Use of Coal Ash in Construction, ASCE, New York, USA, pp. 1-14.
- [94] Kuloğlu, N., 1999, Effect of Astragalus on Characteristics of Asphalt Concrete, ASCE, s. 283-286.

- [95] Tuncan, A., Çetin, A., Tuncan, M., 1998, Lastik Atıkların Asfalt Betonu Kaplamaların Mekanik Özelliklerine Etkileri, 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu, KGM, Ankara, s.139-155.
- [96] Serfass, J.P., Samanos, J., 1996, Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.65, pp. 193-230.
- [97] Simpson, A.L., Mahboud, K.C., 1994, Case study of modified bituminous mixtures: Somerset, Kentucky, Proceedings of the Third Materials Engineering Conference, ASCE, pp. 88-96.
- [98] Kauçuk Ürünleri Özel İhtisas Komisyonu Raporu Karbon Siyahı ve Sentetik Kauçuk Alt Komisyonu Raporu, 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, DPT:2809-ÖİK:612, 43s, <http://ekutup.dpt.gov.tr/imalatsa/kaucuk/oik612.pdf> , Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [99] Özbaş, H., 2004, Yüksek Yoğunluklu Polietilene Karbon Siyahı Karıştırılması İşlemindeki Proses Parametrelerinin Tork Reometresi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 57s.
- [100] Krueger, Q.J., 2002, Electromagnetic Interference and Radio Frequency Interference Shielding of Carbon-Filled Conductive Resins, Master of Science in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 320p.
- [101] Konell, J.P., 2002, Characterization and Tensile Modulus Modeling of Conductive Resins, Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 413p.
- [102] Kızıldaş, Ü., 1999, Lastik Üretiminde Katkı Elemanlarının Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 64s.
- [103] www.en-tek.org , Karbon Siyahı, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [104] www.maden.org.tr , Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [105] Park, T., Lovell, C., 1996, Using Pyrolyzed Carbon Black (PCB) from Waste Tires in Asphalt Pavement (Part 1, Limestone Aggregate), Final Report No.FHWA/IN/JHRP-95/10, Joint Highway Research Project Civil Engineering Building, Perdue University, Indiana, 344p.
- [106] Popovic, N., 2000, Physical and Chemical Characterization and Upgrading of Char Derived from Scrap Tires by Ultra Fast Pyrolysis, Master of Science, Memorial University of Newfoundland St. John's, Newfoundland, Canada, 120p.
- [107] Weber, E.H., 2001, Development and Modeling of Thermally Conductive Polymer/Carbon Composites, Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 225p.
- [108] Heiser, J.A., 2003, Conductive, Shielding, Tensile, and Impact Properties of Carbon-Filled Nylon 6,6 Based Resins, Master of Science in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 260p.

- [109] Clingerman, M.L., 2001, Development and Modelling of Electrically Conductive Composite Materials, Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Michigan Technological University, Michigan, 299p.
- [110] Edeskär, T., 2006, Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications, Technical and Environmental Properties, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, 317p.
- [111] Eren, A., Dönüştürülen Lastikler, www.sth.org.tr , Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [112] Gönüllü, T., 2004, Atık Lastiklerin Yönetimi, www.yildiz.edu.tr , Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [113] www.bcm.org.tr , Lastiklerin Geri Kazanımı, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [114] Roy, C., Labrecque, B., Caumia de, B., 1990, Recycling of Scrap Tires to Oil and Carbon Black by Vacuum Pyrolysis, Resources, Conservation and Recycling, No.4, pp.203-213.
- [115] Benson, F.C., Martinez, D.F., 1984, Evaluation of several mineral fillers for use in item 340 hot-mix asphaltic concrete, Report FHWA/TX/85/1, Texas Transportation Institute, USA.
- [116] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., 2000, Hot mix asphalt materials, mixture design and construction, NAPA Education Foundation, Maryland, USA.
- [117] Martin, K.G., 1962, Preliminary Microviscometer Studies of Carbon Black (Rubber) Bitumen Dispersions, Proceedings Australian Road Research Board, Vol.1, Part 1, 895p.
- [118] Rostler, F.S., White, R.M., Dannenberg, E.M., 1977, Carbon Black as a Reinforcing Agent for Asphalt, AAPT, Vol.46, pp. 376-401.
- [119] Terrel, R.L., Rimstrington, S., 1980, Evaluation of wood lignin as a substitute or extender for asphalt, Report FHWA/RD-80/125, FHA, Washington DC.
- [120] Wallerga, B.A., Gridley, P.F., 1980, Carbon Black Reinforcement of Asphalt in Paving Mixtures, Asphalt Pavement Construction, New Materials and Techniques, ASTM STP 724, J.A. Scherocman, Ed., American Society for Testing and Materials, pp.110-128.
- [121] Yao, Z., Monismith, L.C., 1986, Behavior of Asphalt Mixtures with Carbon Black Reinforcement, AAPT, Vol.55, pp. 564-585
- [122] Button, J.W., Little, D.N., Kim, Y., Ahmed, J., 1987, Mechanistic evaluation of selected asphalt additives, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.56, pp.62-90.
- [123] Jennings, P.W., Pribanic, J.A.S., Smith, J., Mendes, T.M., 1988, Predicting the Performance of Montana Test Sections by Physical and Chemical Testing, TRR 1171, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 59-65.
- [124] Khosla, N.P., 1991, Effect of the Use of Modifiers on Performance of Asphaltic Pavements, TRB, Transportation Research Record, No.1317, Washington D.C., pp.10-22.

- [125] Ali, N., Zahran, S., Trogton, J., Bergan, A., 1994, A Mechanistic Evaluation of Modified Asphalt Paving Mixtures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.21, No.6, pp. 954-965.
- [126] Yamaguchi, K., Sasaki, I., Nishizaki, I., Meiarashi, S., Moriyoshi, A., 2005, Reinforcing Effects of Carbon Black on Asphalt Binder for Pavement, *Journal of Japan Petroleum Institute*, 48, (6), 373-379.
- [127] Ahmedzade, P., Geçkil, T., 2007, Influence of Carbon Black on the Mechanical and Electrical Properties of Asphalt Mixtures, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 14, pp.358-364.
- [128] Park, T., Coree, B.J., Lovell, C.W., 1996, Evaluation of Pyrolized Carbon Black from Scrap Tires as Additive in Hot Mix Asphalt, *Transportation Research Record*, Vol.1530, pp. 43-50.
- [129] Lesueur, D., Dekker, D.L., Planche, J.P., 1995, Comparison of Carbon Black from Pyrolized Tires to Other Fillers as Asphalt Rheology Modifiers, *Transportation Research Record*, Vol.1515, pp. 47-55.
- [130] Chebil, S., Chaala, A., Roy, C., 1999, Use of softwood bark charcoal as a modifier for road bitumen, *Elsevier, FUEL*, 79, 671-683.
- [131] Button, J.W., Williams, D., Scherocman, J.A., 1996, Roofing Shingles and Toner in Asphalt Pavements, *Research Report No. FHWA/TX-97/1344-2F*, Texas Transportation Institute, Texas, 132p.
- [132] Solaimanian, M., Kennedy, T.W., Tripathi, R., 1998, Performance characterization of asphalt binders and mixtures modified by waste toner, *Transportation Research Record*, Vol.1638, pp. 120-128.
- [133] Lohrey, C.E., 1991, Field Evaluation of an Experimental Bituminous Pavement Utilization an Asphalt Additive-Carbon Black, *State of Connecticut Department of Transportation*, Report No. 1085-3-91-6, Rocky Hill, Connecticut, 29p.
- [134] Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., 1994, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, *SHRP-A-410*, National Research Council, Washington, DC, 170p.
- [135] Zaniewski, J.P., Padula, M., 2003, Automation of the Superpave Mix Design Process for the West Virginia Division of Highways, *Asphalt Technology Program*, West Virginia, 154p.
- [136] Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., 1994, The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, *SHRP-A-407*, National Research Council, Washington, DC, 184p.
- [137] Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, *West Virginia University*, Morgantown, 109p.

- [138] Loh, S., Olek, J., 1999, Contributions of PG Graded Asphalt to low Temperature Cracking Resistance of Pavement, Joint Transportation Research Program, Final Report FHWA/IN/JHRP-96/22, Perdue University, Indiana, 172p.
- [139] Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., 2004, Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 19, No 2, 175-184.
- [140] Zaniewski, J.P., Nallamothe, S.H., 2003, Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia, 76p.
- [141] McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., 1994, Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, KY, 104p.
- [142] http://bitval.fehrl.org/fileadmin/bitval/BitVal_final_report.pdf, Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BiTVaL Project, FEHRL, 213p, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [143] Reubush, S.D., 1999, Effects of Storage on the Linear Viscoelastic Response of Polymer-Modified Asphalt at Intermediate to High Temperatures, Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 351p.
- [144] Warren, R.S., McGennis, R.B., Bahia, H.U., 1994, Superpave Asphalt Binder Test Methods an Illustrated Overview, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-068, Asphalt Institute, Lexington, 164p.
- [145] Christensen, D.W., Anderson, D.A., 1992, Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, Proc. Assn. Asphalt Paving Technol., Vol. 61, pp 67–116.
- [146] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., et.al., 1994, Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, SHRP-A-370, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 197p.
- [147] Bahia, H.U., Anderson, D.A., 1995, Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties, Transportation Research Record 1488, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 32-39.
- [148] Yildirim, Y., Solaimanian, M., Kennedy, T.W., 2000, Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete, Report No. 1250-5, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, 99p.
- [149] Harman, T., D'Angelo, J., Bukowski, J., 2002, Superpave Asphalt Mixture Design Workshop, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, 78p.
- [150] Huber, G.A., 1994, Weather Database for the SUPERPAVE™ Mix Design System, SHRP-A-648A, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 149p.

- [151] Superpave 2000 – Improved Standards for a New Millennium, 1999, Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP), C-SHRP Technical Brief # 17, Ontario, 8p.
- [152] Superpave Mixture Design Guide, 2001, WesTrack Forensic Team Consensus Report, FHWA-RD-01-052, Washington, DC, 23p.
- [153] D'Angelo, J., 2000, Superpave Mix Design Test Methods and Requirements, APWA International Public Works Congress, pp. 103-115.
- [154] Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F., 1988, Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, T.C.K. Araştırma Dairesi Başkanlığı, 156s.
- [155] Druta, C., 2006, A Micromechanical Approach for Predicting the Complex Shear Modulus and Accumulated Shear Strain of Asphalt Mixtures from Binder and Mastics, Doctor of Philosophy, Louisiana State University, 250p.
- [156] Bitümlü Karışımların Tasarımında Yeni Gelişmeler, Yoğurmalı Pres, 1997, Yollar Türk Milli Komitesi, Ankara, 31s.
- [157] Smith, R., Santi, M., 2006, Development and Performance Prediction of Idaho Superpave Mixes, Final Report, NIATT Project No. KKK 464, National Institute for Advanced Transportation Technology University of Idaho, 229p.
- [158] Cominsky, R., Leahy, R.B., Harrigan, E.T., 1994, Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning, SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program National Research Council, Washington, DC, 129p.
- [159] Ping, W.V., Xing, G., Leonard, M., Yang, Z., 2003, Evaluation of Laboratory Compaction Techniques for Simulating Field Soil Compaction (Phase II), Research Report No.: FL/DOT/RMC/BB-890 (F), Florida A & M University – Florida State University, Tallahassee, 203p.
- [160] Chadbourn, B.A., Newcomb, D.E., Voller, V.R., DeSombre, R.A., Luoma, J.A., Timm, D.H., 1998, An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions, Final Report 1998-18, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 168p.
- [161] Prowell, B.D., Brown, E.R., 2006, Appendixes to NCHRP Report 573: Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table, Final Report for NCHRP Project 9-9(1), 195p.
- [162] Gudimettla, J.M., Cooley, L.A., Brown, E.R., 2003, Workability of Hot Mix Asphalt, NCAT Report 03-03, Auburn University, Auburn, 66p.
- [163] Gyrotory Shear and Volumetric Mix Design Using the Pine AFG1 Superpave Gyrotory Compactor, 2000, Report 1999-04, Pine Instrument Company, 13p.
- [164] Preparing and Determining the Density of Bituminous Mixture Test Specimens Compacted by the Superpave Gyrotory Compactor, 2006, Colorado Procedure-Laboratory 5115, 9p, <http://www.dot.state.co.us/DesignSupport>, Erişim Tarihi. 28.12.2007.

- [165] Brown, E.R., Buchanan, M.S., 2001, Literature Review: Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign Table, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board National Research Council, 83p.
- [166] <http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/sgcsize.html>, Comparison of 100 and 150 mm Specimens in the Superpave Gyratory Compactor, Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [167] Jackson, N.M., M.Asce, P.E., Czor, L.J., 2003, 100-mm-Diameter Mold Used with Superpave Gyratory Compactor, ASCE-Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 1, 60-66.
- [168] Biensch, B.O., 2000, The Impact that Superpave Aggregate Specifications will have on the Calgary Asphalt Industry, The Degree of Master, The University of Calgary, 92p.
- [169] Anderson, R.M., McGennis, R.B., 1994, Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-95-004, Asphalt Institute, Lexington, KY, 80p.
- [170] Zaniewski, J.P., Kanneganti, V., 2003, Comparison of 19 mm Superpave and Marshall Base II Mixes in West Virginia, West Virginia University, Morgantown, 78p.
- [171] Ünver, Ö., 1995, Uygulamalı İstatistik Yöntemler, Siyasal Kitabevi, Ankara, 545s.
- [172] http://www.tupras.com.tr/faaliyet_3_2.htm , Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi (TÜPRAS) , Erişim Tarihi. 28.12.2007.
- [173] Erdoğan, B., 1977, Termal Yöntemler, Gazi Üniversitesi, Ankara, 196s.
- [174] AASHTO TP4, 1999, Standart Method for Preparing and Determining The Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens By Means of The SHRP Gyratory Compactor, FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 14p.
- [175] AASHTO T166, 1999, Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens, FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 9p.
- [176] AASHTO T209, 1999, Bulk Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures, FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group, 5p.

ÖZGEÇMİŞ

Tacettin GEÇKİL, 1972 yılında Elazığ'ın Baskil ilçesi Akuşığı köyünde doğmuştur. İlkokulu kendi köyünde, ortaokulu Keban'da ve liseyi Elazığ Merkez Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamlamıştır.

1990 yılında kazandığı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 1994 yılında mezun olmuştur. Bu tarihten itibaren 1997 yılına kadar özel bir firmada şantiye şefi olarak çalışmıştır. Ayrıca bu süre zarfında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programını tamamlayarak 1997 yılında yüksek mühendis unvanı almıştır. Aynı yıl Fırat Üniversitesine bağlı Bingöl Meslek Yüksekokulu İnşaat programına öğretim görevlisi olarak atanmıştır. 2000 yılında vatani görevini tamamladıktan sonra aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Doktora Programını kazanarak doktora programına başlamıştır.

Evli ve bir çocuk babası olan GEÇKİL, 2007 yılında Bingöl Üniversitesinin kurulması ile birlikte bu üniversiteye bağlanan Bingöl Meslek Yüksekokulunda halen öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.