

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEYTİN POSASI (PRİNA)'NİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

SEMİH İSSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2019

Tezin Başlığı: Zeytin Posası (Prina)'nın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Tezi Hazırlayan: Semih İSSİ

Sınav Tarihi: 17.10.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Tez Danışmanı:

Doç.Dr.Tacettin GEÇKİL

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

Fırat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYZ

İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Kazım TÜRK

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum ‘Zeytin Posası (Prina)’nın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma gerek kalmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde, hem de kaynakçada yöntemine uygun bir şekilde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Semih İSSİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZEYTİN POSASI (PRİNA)'NİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Semih İSSİ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
105 + xiv sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada atık bir malzeme olan zeytin posası (prina)'nın bitümün ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışım kaplamaların performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla penetrasyon sınıfı B160/200 olan bir bitüme bitümün ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 oranlarında prina eklenerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri penetrasyon, yumuşama, duktilite, parlama, dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR), ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca bu bitümlerle marshall dizayn yöntemi kullanılarak hazırlanmış olan modifiye karışım numuleri marshall stabilite ve akma, kalıcı marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), dolaylı çekme esneklik modülü (ITSM) ve statik sünme deneylerine tabi tutulmuştur.

Deneyler sonucunda prina ilavesi ile genel olarak bitümlerin sertleştiği bunda en kritik değerin %15 oranı olduğu görülmüştür. Bu orandan sonra bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfının arttığı, ancak düşük sıcaklık performans sınıfının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca prina ilavesi ile karışımların özellikle nem hasarı ve kalıcı deformasyona karşı dirençlerinin arttığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Asfalt, Prina, Modifikasyon, Reolojik Özellik, Tekerlek İzi, Esneklik Modülü

ABSTRACT

Master of Science Thesis

OLİVE PULP (PRİNA) ON PROPERTIES BİTUMEN AND BİTUMİNOUS HOT MİX

Semih İSSİ

Inönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
105 + xiv pages

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr.Tacettin GEÇKİL

In this study, the effect of pulp of olive that is waste material (olive pomace) on bitumen and hot mix coating with bitumen was investigated.

For this purpose, modified bitumen was prepared by adding 5, 10, 15 and 20% by weight of pomace to a bitumen of penetration class B160 / 200. Physical and rheological properties of pure and modified bitumen were determined by penetration, softening, ductility, glare, dynamic shear rheometer (DSR), beam bending rheometer (BBR), and rotational viscometer (RV) tests. Furthermore, modified mixture samples prepared by using marshall design method with these bitumens have been exposed to many tests marshall stability and yield, permanent marshall stability (RMS), indirect tensile strength (ITS), indirect tensile elasticity modulus (ITSM) and static creep tests.

As a result of the experiments, it was observed that the most critical value was the 15% ratio in which bitumen hardens generally with the addition of the pomace. After this rate, it was determined that the high temperature performance class of the binder increased but the low temperature performance class decreased. With the increase of this rate, it has been found that the high temperature performance class of the binder increases but the low temperature performance class decreases. In addition, it has been observed that the resistance of the mixtures to moisture damage and permanent deformation is increased with addition of pomace.

KEYWORDS: Asphalt, Prina, Modification, Rheological Properties, Rheological Properties, Flexibility Module

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konu tespitini gerçekleştiren ve çalışmanın her aşamasında tecrübelerinden yararlandığım, yardım, öneri ve desteğini esirgemeyerek tez çalışmamı tamamlamamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e;

Fırat Üniversitesi ulaştırma laboratuvarını kullanmamı sağlayan ve çalışmalarım da yardımcı olan hocam Prof. Dr. Mehmet YILMAZ 'a

Çalışmalarım da her türlü desteği sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Fatih KANTARCI'ya, Arş. Grv. Talha SARICI'ya ve Arş. Grv. Enes GÜL'e,

Çalışmalarımın her safhasında yardımcı olan beraber çalıştığım arkadaşlarım Sayın İnş. Müh. Eda TÜZÜN ÖZPINAR'a ve İnş. Müh. Ceren Beyza İNCE'ye,

Laboratuvar çalışmalarımıza yardımcı olan teknisyenimiz Sayın İlhami BAYSAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışma süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, **İÜ-BAP FYL 2016/118** numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Semih İSSİ

Malatya-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK).....	3
2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar.....	3
2.1.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	3
2.1.1.1. Mineralojik Sınıflandırma.....	4
2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması.....	4
2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması.....	4
2.1.1.4. Biçim ve Yüzey Yapısı.....	5
2.1.1.5. Porozite.....	5
2.1.2. Agregalara Uygulanan Deneyler.....	5
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar.....	6
2.2.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı.....	8
2.2.2. Asfaltın Reolojik Davranışı.....	8
2.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	10
2.3.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5).....	10
2.3.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)..	11
2.3.3. Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589).....	12
2.3.4. Parlama Noktası Deneyi.....	12
2.3.5. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087).....	13
2.4. Superpave Asfalt Bağlayıcı Deneyleri.....	14
2.4.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT).....	18
2.4.2. Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi (AASHTO PP1).....	18
2.4.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV).....	19
2.4.4. Kiriş Eğme Reometresi (BBR).....	20
2.4.5. Dinamik Kesme Reometresi (DSR).....	22
2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Performans Deneyleri.....	25
2.5.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	25
2.5.2. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi.....	26
2.5.3. Modifiye Lottman (AASHTO T-283) Deneyi.....	28
2.5.4. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi.....	29
2.5.5. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall) (RMS).....	31
2.5.6. Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi.....	32
2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	33
2.6.1. Stabilite.....	33
2.6.2. Durabilite.....	33
2.6.3. Geçirimsizlik.....	34
2.6.4. İşlenebilirlik.....	34
2.6.5. Esneklik.....	34
2.6.6. Yorulmaya Karşı Direnç.....	34
2.6.7. Kaymaya Karşı Direnç.....	35
2.7. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar.....	36
2.7.1. Deformasyonlar.....	36

2.7.1.1.	Tekerlek izi oluşumu.....	37
2.7.1.2.	Oturmalar ve çökmeler.....	37
2.7.1.3.	Ondülasyonlar ve kabarmalar.....	38
2.7.2.	Çatlamlar.....	38
2.7.2.1.	Yorulma Çatlakları.....	39
2.7.2.2.	Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	39
2.7.3.	Kusma.....	40
2.7.4.	Ayrışmalar.....	41
2.7.4.1.	Dağılmalar ve sökülmeler.....	41
2.7.4.2.	Soyulma.....	41
3.	BİTÜM MODİFİKASYONU.....	42
3.1.	Modifikasyonun Amacı.....	42
3.2.	Katkı Maddelerinin Bitümlü Karışımlardaki Rolü.....	42
3.3.	Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması.....	45
3.4.	Prina ve Literatür Taraması.....	48
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
4.1.	Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi.....	52
4.2.	Agrega Seçilmesi.....	53
4.3.	Kullanılacak Katkı Oranlarının Seçilmesi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması.....	53
4.4.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları.....	55
4.4.1.	Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	55
4.4.2.	Saf ve Prina Modifiyeli Bağlayıcıların Yaşlandırılması.....	59
4.5.	Bağlayıcıların Performans Deneyleri.....	60
4.5.1.	Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)....	60
4.5.2.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	68
4.5.3.	Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	70
4.6.	Marshall Numunelerinin Hazırlanması.....	73
4.6.1.	Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması.....	76
4.7.	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri.....	83
4.7.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	84
4.7.2.	Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS).....	87
4.7.3.	Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi.....	89
4.7.4.	Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T283 Sonuçları..	90
4.7.5.	Statik Sünme Deneyi.....	94
5.	SONUÇLAR.....	101
6.	KAYNAKLAR.....	103
	ÖZGEÇMİŞ.....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Kurumu
SUPERPAVE	Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
RTFOT	Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi
PAV	Basınçlı Yaşlandırma Kabı
DSR	Dinamik Kayma Reometresi
RV	Dönel Viskozimetre
BBR	Kiriş Eğme Reometresi
DTT	Direkt Çekme Deneyi
ITSM	Dolaylı Çekme Esneklik Modülü
AASHTO	Amerika Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık
SHRP	Stratejik Karayolu Araştırma Programı
HMA	Sıcak Asfalt Karışım
VMA	Agregalar Arası Boşluk
RMS	Kalıcı Marshall Stabilitesi
MQ	Marshall katsayısı
Gk	Kaba agreganın özgül ağırlığı
Gi	İnce agreganın özgül ağırlığı
Gf	Fillerin özgül ağırlığı

D _p	Karışım numunesinin pratik özgül ağırlığı
W _a	Agrega içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
M _a	Karışım içindeki agreganın miktarı
M _b	Karışım içindeki bağlayıcı miktarı
W _b	Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi
G _b	Bağlayıcının özgül ağırlığı
W _A	Toplam agreganın ağırlığı (1200gr)
W _B	Bitüm ağırlığı (agregaya göre)
A	Havadaki kuru ağırlık
B	Doygun-yüzey kuru ağırlık
C	Sudaki ağırlık
V	Numunenin hacmi
D _{port}	Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı
D _t	Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı
V _h	Numunedeki boşluk yüzdesi
V _b	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si
V _a	Numunedeki agreganın hacmi %'si
V _{ma}	Agregalar arasındaki boşluk %'si
V _f	V _{ma} 'nın bitümlle dolu boşluk %'si
P _{be}	Agreganın ağırlığına göre efektif bitüm %'si
G _{sb}	Agreganın hacim özgül ağırlığı
G _{se}	Efektif özgül ağırlığı
G _{sa}	Agreganın zahiri özgül ağırlığı

%K	Karışımındaki kaba agrega %'si
%İ	Karışımındaki ince agrega %'si
%F	Karışımındaki filler %'si
Sm	Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ITS	Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme dayanımı
G*	Bitümlü bağlayıcı kompleks kayma modülü
δ	Bitümlü bağlayıcı faz açısı
c	Düzeltilme katsayısı
ITS	Dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
Pmax	Maksimum yük (kN)
h	Numune yüksekliği (mm)
d	Numune çapı (mm)
ITSR	Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%)
ITSyaş	Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
ITSkuru	Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
P	Maksimum yük (N)
Hy	Toplam yatay deformasyon (mm)
H	Numune kalınlığı(mm)
v	Poisson oranı
Vd	Düşey deformasyon (mm)
Rm	Sünme sertliği modülü (MPa)

E	Toplam kalıcı aksenal deformasyon (mm)
τ_{maks}	Maksimum kayma gerilmesi
τ_{min}	Minimum kayma gerilmesi
γ_{maks}	Maksimum kayma deformasyon



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Agrega Gradasyon Tipleri ve Görsel Dağılımı.....	4
Şekil 2.2.	Ham Petrolün Damıtılmasıyla Elde Edilen Asfaltlar.....	7
Şekil 2.3.	Asfaltın Yapısı ve Bileşenleri.....	8
Şekil 2.4.	Asfaltın Farklı Sıcaklık ve Zamana Göre Değişimi.....	9
Şekil 2.5.	Bitümün Sıcaklıkla Değişimi.....	9
Şekil 2.6.	Standart Penetrasyon Deney Aleti.....	11
Şekil 2.7.	Yumuşama Noktası Cihazı.....	11
Şekil 2.8.	Düktilite Cihazı.....	12
Şekil 2.9.	Parlama Noktası Cihazı.....	13
Şekil 2.10.	Piknometre Kabı ile Özgül Ağırlık Tayini.....	13
Şekil 2.11.	RTFOT cihazı.....	18
Şekil 2.12.	PAV Deney Cihazı.....	19
Şekil 2.13.	Brookfield Viskoziyetresi ve Tüpler.....	20
Şekil 2.14.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deney Aleti.....	20
Şekil 2.15.	BBR Deneyi İçin Numune Hazırlanması (a) ve Deneyin Yapılması (b).....	21
Şekil 2.16.	Sünme Oranının Belirlenmesi.....	21
Şekil 2.17.	Bohlin DSR II Dinamik Kesme Reometresi.....	22
Şekil 2.18.	Numunenin Kalıba Doldurulması (a), Üst Plağa Yerleştirilmesi (b).....	22
Şekil 2.19.	DSR Deneyinde Numunelere Uygulanan Deformasyon Yönleri.....	23
Şekil 2.20.	Asfalt Bağlayıcının Viskoelastik Özelliği.....	23
Şekil 2.21.	Viskoelastik Malzemelerin Gerilme-Deformasyon İlişkisi.....	24
Şekil 2.22.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Cihazı.....	26
Şekil 2.23.	ITS Deneyi Yükleme Durumu (a) ve Kırılma Düzlemi (b).....	27
Şekil 2.24.	Dolaylı Çekme Deneyi (a) ve Şematik Görünüşü (b).....	30
Şekil 2.25.	ITSM Deney Cihazı.....	31
Şekil 2.26.	Sünme Deneyi Uygulanan Numune.....	33
Şekil 2.27.	Karışımların Sıcaklık, Gerilme ve Yorulma Ömrü İlişkisi.....	35
Şekil 2.28.	Kaplama Pürüzlülüğü.....	36
Şekil 2.29.	Tekerlek İzi Oluşumu.....	37
Şekil 2.30.	Tipik Bir Esnek Üstyapısı (a) ve Oluşan Bozulmalar (b).....	39
Şekil 2.31.	Kaplama Gerilme Durumu ve Düşük Sıcaklık Çatlakları.....	40
Şekil 3.1.	Bitümün Statik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı.....	43
Şekil 3.2.	Bitümün Dinamik Yükler Altındaki Visko-Elastik Davranışı.....	44
Şekil 4.1.	Karıştırma Cihazı(a),karışımlarda kullanılan prina(b).....	54
Şekil 4.2.	Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.....	55
Şekil 4.3.	Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.....	56
Şekil 4.4.	Bağlayıcıların düktilite değişimleri.....	57
Şekil 4.5.	Bağlayıcıların penetrasyon indeksleri.....	58
Şekil 4.6.	Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim.....	59
Şekil 4.7.	Orijinal bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	61
Şekil 4.8.	Orijinal bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi.....	62

Şekil 4.9.	Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	63
Şekil 4.10.	RTFOT sonrası bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerinin sıcaklıkla değişimi.....	64
Şekil 4.11.	RTFOT sonrası bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi.....	64
Şekil 4.12.	RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	65
Şekil 4.13.	PAV kalıntısı bağlayıcıların kayma modülünün (G^*) sıcaklıkla değişimi.....	66
Şekil 4.14.	PAV kalıntısı bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi.....	67
Şekil 4.15.	PAV sonrası bağlayıcıların $G^*.\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	68
Şekil 4.16.	Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki Viskozite Değişimi.....	71
Şekil 4.17.	Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi.....	72
Şekil 4.18.	Bağlayıcıların ortalama karıştırma- sıkıştırma sıcaklık değerleri.....	73
Şekil 4.19.	Karıştırma cihazı.....	74
Şekil 4.20.	Marshall tokmağı.....	74
Şekil 4.21.	Numunelerin krikoyla çıkarılması ve kumpasla yüksekliğin ölçülmesi.....	75
Şekil 4.22.	Marshall stabilite ve akma cihazı.....	76
Şekil 4.23.	Dp- Bitüm %'si.....	81
Şekil 4.24.	Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi.....	81
Şekil 4.25.	Akma – Bitüm %'si.....	81
Şekil 4.26.	Vh- Bitüm %'si.....	82
Şekil 4.27.	VMA- Bitüm %'si.....	82
Şekil 4.28.	Vf- Bitüm %'si.....	82
Şekil 4.29.	Stabilitenin katkı miktarı ile değişimi.....	86
Şekil 4.30.	Karışımların Akma- katkı miktarı değişimi.....	86
Şekil 4.31.	Karışımların MQ- katkı miktarı değişimi.....	87
Şekil 4.32.	RMS değerinin katkı oranına göre değişimi.....	88
Şekil 4.33.	Karışımların ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi.....	90
Şekil 4.34.	Numunelere vakum uygulanması (a), Streç film ile sarılması (b).....	91
Şekil 4.35.	Numunelerin 60 °C su banyosunda bekletilmesi (a) , Numunenin kırılması (b).....	91
Şekil 4.36.	Karışımların ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi...	93
Şekil 4.37.	Karışımların ITSr değerlerinin katkı oranı ile değişimi...	93
Şekil 4.38.	Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme – zaman- deformasyon grafiği.....	94
Şekil 4.39.	B+%5P karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman – deformasyon grafiği.....	95
Şekil 4.40.	B+%10P karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme –zaman- deformasyon grafiği.....	95
Şekil 4.41.	B+%15P karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman- deformasyon grafiği.....	96

Şekil 4.42.	B+%20Pkarışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman – deformasyon grafiği.....	96
Şekil 4.43.	Numunelerin toplam birim şekil değiştirme- zaman grafiği	97
Şekil 4.44.	Numunelerin Sünme Sertliği Modülü Değişimi.....	98



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Agrega Deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi).....	6
Çizelge 2.2.	Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Test Yöntemleri.....	10
Çizelge 2.3.	Superpave Deneyleri ve Amaçları.....	14
Çizelge 2.4.	Superpave Performans Esaslı Bağlayıcı Şartnamesi.....	16
Çizelge 2.5.	DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri.....	24
Çizelge 3.1.	Bitüm Katkı Maddelerinin Genel Sınıflandırılması.....	45
Çizelge 3.2.	Yaygın Olarak Kullanılan Modifiyerlerin Bağlayıcı Üzerindeki Etkisi.....	46
Çizelge 3.3.	Bitümlü Karışımlarda Kimyasal Katkıların Olumlu Etkileri.....	46
Çizelge 3.4.	Yaygın Olarak Kullanılan Asfalt Modifiyerlerin Muhtemel Olumlu Etkileri.....	47
Çizelge 4.1.	Saf bağlayıcının (B160/220) fiziksel özellikleri.....	52
Çizelge 4.2.	Çalışmada kullanılan agrega gradasyonu.....	53
Çizelge 4.3.	Agreganın fiziksel özellikleri.....	53
Çizelge 4.4.	PrinaGenel Özellikleri.....	54
Çizelge 4.5.	Prinanın Kimyasal Bileşimi ve Özellikleri.....	54
Çizelge 4.6.	Saf ve Prina modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri..	55
Çizelge 4.7.	Penetrasyon İndeksi (PI) sonuçları.....	58
Çizelge 4.8.	Bağlayıcıların kütle kayıpları.....	59
Çizelge 4.9.	Yaşlandırılmamış Bağlayıcıların DSR Sonuçları.....	61
Çizelge 4.10.	RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları.....	63
Çizelge 4.11.	PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları.....	66
Çizelge 4.12.	Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.....	69
Çizelge 4.13.	Bağlayıcıların RV Sonuçları.....	70
Çizelge 4.14.	Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları.....	72
Çizelge 4.15.	80
Çizelge 4.16.	Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler.....	83
Çizelge 4.17.	Kontrol Numunesine Ait Sonuçlar.....	83
Çizelge 4.18.	Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayıları....	84
Çizelge 4.19.	Prina ilaveli karışım numunelerinin Marshall Stabilite ve Akma Değerleri.....	85
Çizelge 4.20.	Karışımların RMS Değerleri.....	88
Çizelge 4.21.	Karışımların ITSM deney sonuçları.....	89

Çizelge 4.22. Karışımların ITS ve ITSR değerleri.....	92
Çizelge 4.23. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (Rm) Değerleri.....	98



1. GİRİŞ

Günümüzde ulaşım; karayolu, denizyolu, demiryolu, havayolu ve boru hatları olmak üzere çeşitli sistemlerle sağlanmaktadır. Ancak dünyada ve ülkemizde en çok tercih edilen ulaşım türü karayolu taşımacılığıdır. Karayolu taşımacılığı için kullanılan yol üst yapıları ülkemizde ağırlıklı olarak esnek üst yapı şeklinde tasarlanmakta ve inşa edilmektedir. Esnek üst yapılar alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Trafik için düzgün ve güvenli bir sürüşten sorumlu olan esnek üst yapı kaplamaları sathi ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar olarak iki şekilde inşa edilmektedir. Ancak ülkemizde son zamanlarda artan trafik yükleri ve daha sağlam ve uzun ömürlü olması sebebiyle BSK kaplama yapımına büyük hız verilmiştir. BSK kaplamalar agrega ve bağlayıcı olarak bitümlü bağlayıcılar kullanılarak inşa edilmektedir.

BSK kaplamalar sathi kaplamaya göre daha iyi performanslı ve daha konforlu olmalarına rağmen ilk yapım maliyetleri yüksek olmaktadır. Bu sebeple inşa edilecek BSK kaplamaların uzun ömürlü olması istenmektedir. Ancak yol kaplaması inşa edildikten sonra ağır trafik, olumsuz hava şartları, bakım-onarım eksiklikleri ve bazı yapım hataları sebebiyle belirli bir süre sonra bozulmaya başlayabilmektedir. Bu bozulmalar çoğunlukla yüksek sıcaklıklar ve ağır taşıtlar sebebiyle oluşabilen kalıcı deformasyon ya da tekerlek izi, düşük hava sıcaklıklarından oluşan çatlakları, ağır trafik etkisiyle oluşan yorulma çatlakları, su etkilerinden kaynaklı bozulmalar ve farklı şekillerde birçok bozulmalar meydana gelebilmektedir.

Son yıllarda özellikle BSK'larda meydana gelen bozulmaları engelleyebilmek amacıyla BSK'ların modifiye edilmesi çalışmaları hızla artmaktadır. Bu çalışmalarda çeşitli katkı maddeleri kullanarak ya bitümlü bağlayıcılar modifiye edilir ya da katkıları direkt olarak asfalt-agrega karışımına ilave edilerek kaplamaların performansı geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesiyle elde edilen bağlayıcılara modifiye bitüm, asfalt-agrega karışımına katkı ilave edilerek elde edilen karışımlara ise modifiye karışım denilmektedir. Bitüm ve karışımların modifiye edilmesi amacıyla son yıllarda özellikle polimer kökenli katkıları kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak polimer kökenli katkıların yanında ayrıca filler katkıları, çeşitli sanayi yan ürünleri veya atıkları, bar atık yağlar da modifikasyon amaçlı kullanılmaktadır.

Günümüzde bilim ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak endüstriyel sanayinin de gelişmesi sonucunda tarımsal ürünler işlenirken çeşitli atık malzemeler oluşabilmektedir. Oluşan bu malzemelerin faydalı ürün olarak kullanılamaması durumunda çeşitli çevresel ve ekonomik zararlar oluşabilmektedir. Bu zararları ortadan kaldırmak ve ortaya çıkan atıkların karayolu mühendisliğinde kullanılabilmesi için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir.

Zeytin üretimi bakımından dünyanın sayılı ülkelerinden olan ülkemizin zeytin endüstrisi bakımından gelişmişliği göz önüne alındığında prina miktarının oldukça yüksek bir seviyede olduğu düşünülmektedir. Bu atıkların BSK kaplamalarda kullanılması, kaplama performansı ve maliyet açısından faydalar sağlayacağı gibi, çevresel zararlarının ortadan kalması ve prina'nın ekonomik bir değer kazanması açısından da yarar sağlayacaktır.

Bu çalışmada endüstriyel bir atık olan zeytin posası (prina)'nın BSK kaplamalarda bir katkı maddesi olarak kullanılmasının kaplamanın performansı üzerinde gösterceği etki araştırılmıştır. Bu amaçla elde edilen prina ile ilk olarak bitüm modifikasyonu gerçekleştirilmiş ve katkının bitüm özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen modifiye bitümlerin BSK performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla karışım numuneleri hazırlanmış ve çeşitli performans deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde BSK hakkında temel bilgilere yer verilmiştir. BSK'larda beklenen özellikler ve meydana gelen bozulmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca geleneksel ve suparpave test yöntemleri açıklanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde; bitüm ve BSK'ların özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleri hakkında genel bilgiler verilerek, kullanılan başlıca katkı türleri hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde farklı oranlarda prinanın bitüme ilave edilmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri belirlenip Marshall karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler performans deneyleri tabii tutulup elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde; modifiye bitüm ve bu bitümlerle elde edilmiş olan modifiye karışımların performansları genel olarak değerlendirilmiştir.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK)

Günümüzde ülkemiz karayolları kaplama yapımında en fazla kullanılan kaplama çeşidi esnek kaplamalardır. Esnek kaplamalar, yapıları daha kolay ve çabuk, yapım maliyetleri daha uygun ve her seviyedeki trafik hacmine hizmet verecek şekilde çok farklı tipte imal edilebilmesi sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir. Esnek kaplamalar alt temel, temel ve kaplama tabakası olarak inşaa edilmektedir. Esnek kaplamaların yapımında belirlenmiş olan agrega gradasyonu ve uygun oranda bitümlü bağlayıcı kullanılmaktadır. Asfalt plentinde yaklaşık 170°C'ye kadar ısıtılan agreganın yaklaşık 150°C'ye kadar ısıtılmış olan bitüm ile karıştırılmasıyla bitümlü sıcak karışım (BSK) elde edilmektedir. Oluşan karışımlarda; agrega %93-95, bitüm ise %5-7 aralığında bir oranda kullanılmaktadır [1]. BSK kullanılarak yapılan kaplamalarda, kaplama performansını doğrudan etkileyen agrega ve bitümün fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. BSK'ların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturan bitümler, agrega daneleri ile birleştğinde birbirine bağlanarak ve düzgün kaplama yüzeyi oluşturarak yük altındaki kaplamanın dağılmasını önler, sürüş konforu sağlar ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliği sağlarlar [2].

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

BSK'ların ağırlıkça %90-95 oranında oluşturan agregalar kırmataş, dere malzemesi, cüruf ve çeşitli sanayi atıklarından oluşan taneli malzemelerdir. Kullanılan agreganın mekanik özellikleri kaplamanın performansını büyük oranda etkilemektedir. Karışımda kullanılacak agreganın fiziksel özelliklerinin bilinmesi kaplamanın yapısı hakkında birçok bilgi sunmaktadır. Agreganın boyutu, mineralojik yapısı, biçimi, yüzeyi, porozluluğu, gradasyonu, özgül ağırlığı, yüzey alanı ve boşluk oranı hakkında bilgi sahibi olmak agregaların yapısının karışım için uygun olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir [3].

2.1.1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla birçok sınıflandırma yapılmaktadır. Bu sınıflandırmalar mineralojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, özgül ağırlık, yüzey alanı ve boşluk oranı olup ve bu sınıflandırmalara göre agregaların uygun olup olmadıkları belirlenmektedir [3.4].

2.1.1.1. Mineralojik Sınıflandırma

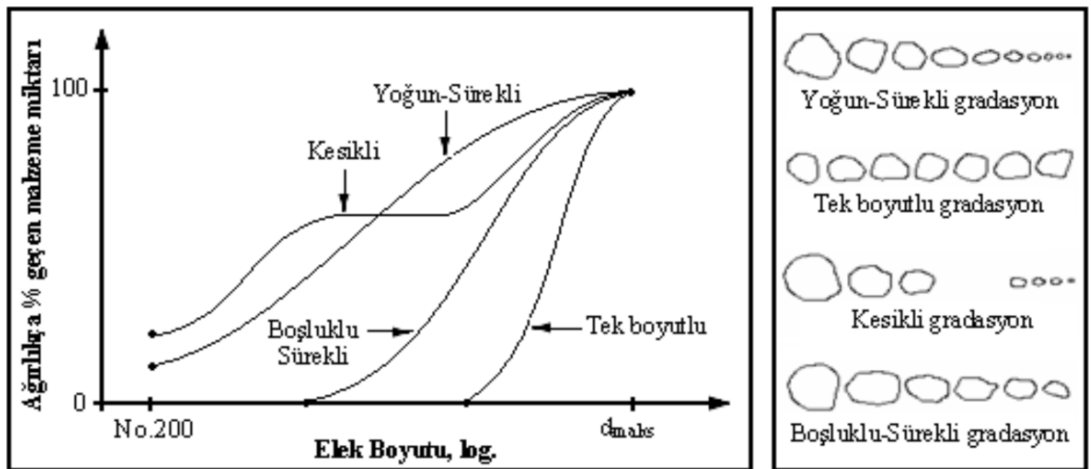
Agregalar genellikle kırmataş, dere malzemesi ve suni taşların kırılmasıyla elde edilmektedir. Dere malzemeleri çoğunlukla yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Bunun sebebi yüzey pürüzsüzlüğünden dolayı bitüm ile karıştırıldığında iyi bir aderans sağlayamamasıdır. Suni taşlar da genellikle yüksek fırın cürufundan elde edilir. Yol kaplamalarında kullanılacak agrega kayaların kırılması sonucu oluşan kırmataşlardır [2].

2.1.1.2. Boyut Sınıflandırması

Agregalar kendi aralarında dane büyüklüklerine göre iri, ince ve filler olarak 3 gruba ayrılmaktadır. İri agrega 4,75mm (No:4) elek üstü malzemedir. İnce agrega 4,75mm (No:4) elek altı ve 0,075mm (No:200) elek üstünde kalan malzemelerden oluşan agregalardır. Filler ise 0,075mm (No:200) elek altında kalan malzeme olarak tanımlanmaktadır [2,5].

2.1.1.3. Gradasyon Sınıflandırması

Gradasyon, agrega karışımını meydana getiren danelerin boyutlarına göre dağılımını ifade etmektedir. Agrega gradasyonundaki maksimum dane boyutu arttıkça işlenebilirlik ve sıkışma güçleşmekte, yoğunluk ve stabilite artarken bağlayıcı ihtiyacı azalmaktadır. Agrega gradasyon yönünden kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu- sürekli ve tek boyutlu gradasyon olarak dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu gradasyon tipleri Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, elek analiz grafiğinde çizilirse kolayca ayırt edilebilir ve farklı özelliklere sahiptir [5].



Şekil 2.1. Agrega gradasyon tipleri ve görsel dağılımı [4]

Kesikli gradasyon, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden boşluk miktarı fazladır. Genel olarak taşmastik asfalt yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak aynı boyuttaki agregalardan meydana gelen tek boyutlu gradasyon ise sathi kaplama gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince agrega ihtiva etmediğinden agrega karışımın boşluk oranı oldukça yüksektir. Bu tip, filtre ve drenaj malzemesi olarak kullanılabilir. Yoğun-sürekli gradasyon, maksimum yoğunluk ve minimum boşluk ihtiva eder. Bu tip, karışımın yoğunluğunu arttırmanın yanında geçirimsizliğin azalmasını sağlamaktadır. Yoğun-sürekli gradasyon sınıfına giren agregalar BSK'larda en çok kullanılan gradasyon sınıfıdır [4].

2.1.1.4. Biçim ve Yüzey Yapısı

Yüzey yapısı, pürüzlülük ve cilalanma ile ilgilidir. Danelerinin pürüzlülüğü miktarı arttıkça işlenebilirlik oranı azalmaktadır. Bu yüzden cilalı agregalar BSK kaplamaları için uygun görülmemektedir. Dane biçimleri, işlenebilirliğe, yoğunluğa, stabiliteye ve kayma mukavemetine etki eder. Dane biçimi olarak; yuvarlak, köşegen, düzensiz ve yassı, ince-uzun olarak sınıflandırılırlar. Yuvarlak biçimli agregaların işlenebilirliği köşelilerden daha fazla olmasına rağmen stabilite bakımından köşeli olanlar daha dirençli olmaktadır [2].

2.1.1.5. Porozite

Agrega karışımında asfaltın emiliminin yeterince yapılabilmesi için karışımında belirli bir poroziteye sahip agregalardan oluşması gerekir. Yeterli porozitesi olan agregalar, soyulmanın azalmasını ve stabilitenin artmasını sağlar. Ancak porozitenin yüksek olması düşük stabiliteye ve asfaltın terlemesine sebep olur [2].

2.1.2. Agregalara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların uygunluğunun tayini için dane boyutu (elek analizi), Los Angeles (aşınma), hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma, su tesirine karşı dayanıklılık, özgül ağırlık ve yassılık indeksi tayini gibi birçok deney yapılmaktadır. Bu deneyler ve tabaka cinsine göre Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) belirtilen deney limitleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Agregada deneyleri (Karayolları teknik şartnamesi) [4]

AGREGA DENEYLERİ	AŞINMA	BİNDER	BİTÜMLÜ TEMEL	SATHİ KAPLAMA	TAŞ MASTİK ASFALT
Aşınma, maks %	30	35	35	30	25
Sağlamlık, (MgSO ₄) maks %	16	18	18	18	14
Soyulma Mukavemeti, min %	50	50	50	50	60
Yapışma, maks %	-	-	-	12	-
Cilalanma Değeri, min	50	-	-	50	50
Kırılmışlık, min %	100	100	100	80	-
Yassılık İndeksi, maks %	30	35	35	25	25
Su Absorbsiyonu, maks %	2	2,5	2,5	2,5	2
Metilen Mavisini, maks %	1,5	1,5	2	2	1,5

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Bitümlü sıcak karışımların performansını önemli bir derecede etkileyen bitümlü bağlayıcılar, sıcak karışımların en önemli malzemesidir. BSK'ların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturarak agregada danelerinin birbirine bağlanmasını sağlayan bitümlü bağlayıcılar, trafik yükü altında kaplamanın dağılmasını önler. Böylece iyi bir sürüş konforu sağlar, oluşturduğu kohezyon ile kaplamanın stabilitesini artırır ve geçirimsizlik sağlar [6].

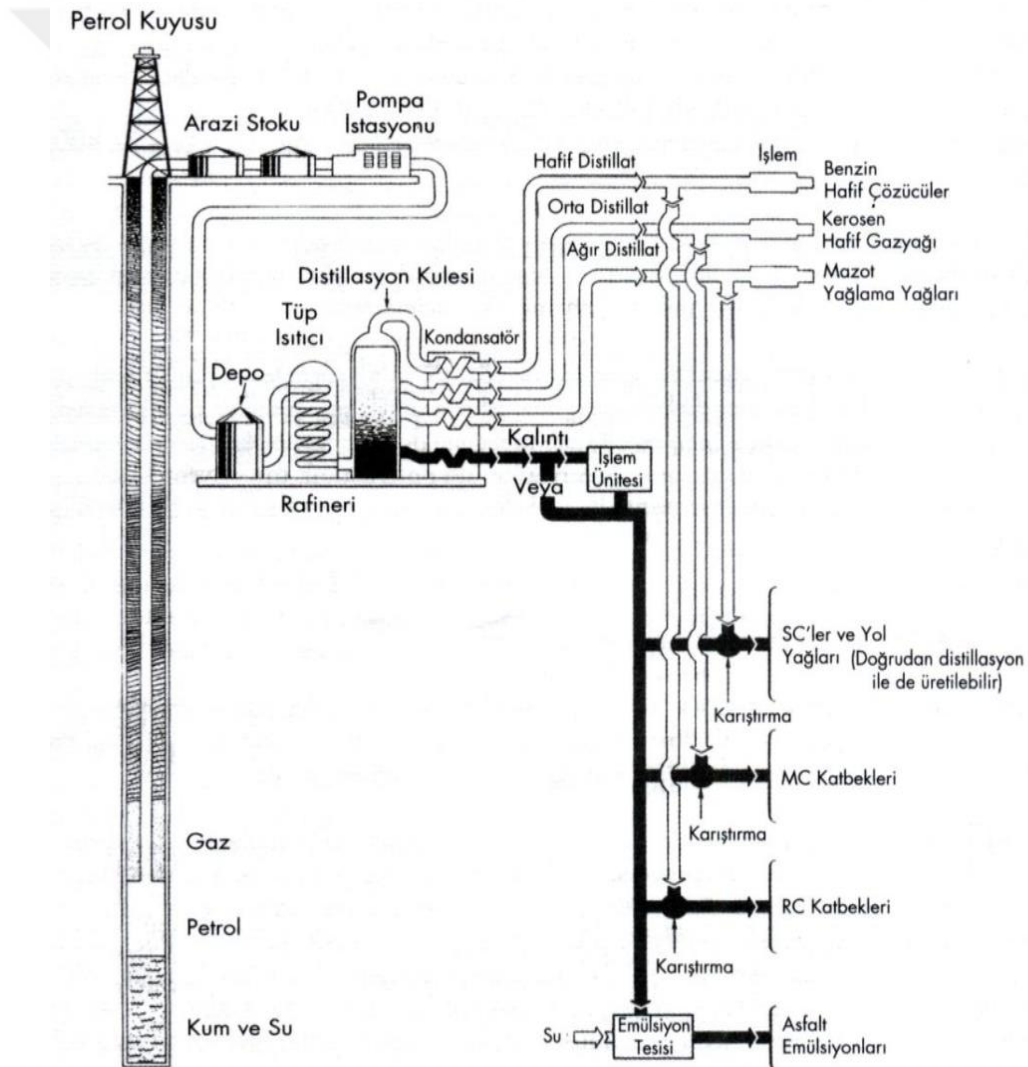
Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Asfalt; doğal kökenli veya petrolün damıtılmasıyla elde edilen koyu kahve ile siyah arasında rengi değişen bağlayıcı malzemedir. "Asfalt", "asfalt çimentosu", "bitüm" ve "asfalt bağlayıcı" terimleri esnek kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde genellikle birbirlerinin yerine kullanılmaktadır [4].

Asfaltlar, elde edilme usüllerine göre doğal ve yapay olarak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Doğal asfaltlar; tabiatta genel olarak mineral maddeler ile karışmış halde bulunmaktadır. Yapay asfaltlar ise ham petrolün damıtılması sonucu elde edilirler. Damıtma işleminde kolay uçan kısımlar damıtma kulesinin üst kısmından çıkar ve soğutucularla yoğunlaştırılarak ayrılmış olur. Bu şekilde meydana gelenler hafif ürünler, daha az uçucu olan ürünler ise aynı şekilde orta ürünleri meydana getirmektedir. En ağır uçan ürünler ise ağır ürünleri oluşturur. Kalıntılar da kulenin

dibinde biriktirilir. Bu şekilde ham petrol benzin, gaz yağı, dizel yağları, yağlama yağlar ve ağır kalıntı maddeleri olarak başlıca beş ana kısma ayrılmış olur. Şekil 2.2’de ham petrolün damıtılma şeması verilmiştir. Elde edilen bu ürünler gerektiğinde tekrar damıtılarak farklı petrol ürünleri elde edilebilmektedir [1,7]

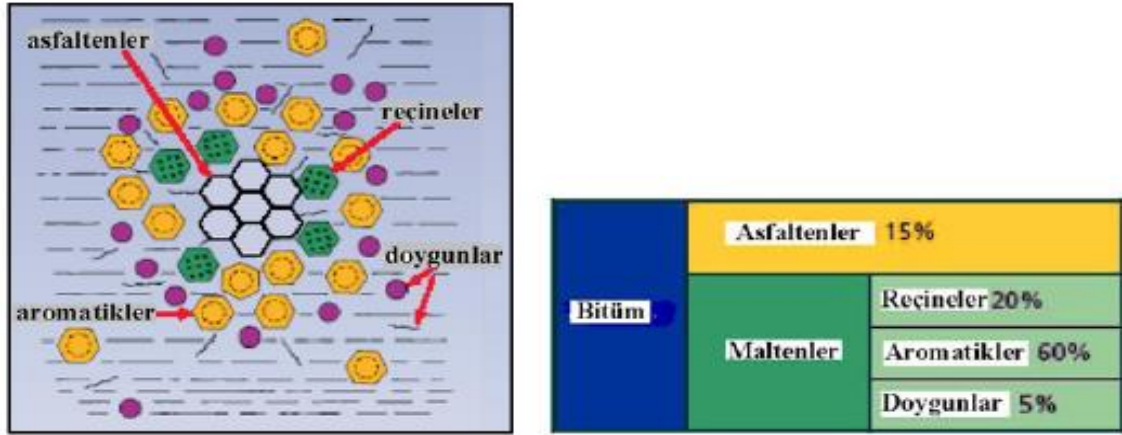
Katranlar ise; petrol ürünlerinin yaygın kullanımı başlamadan önce kömür ürünü olan en çok kullanılan bitümlü malzemedir. Katran, zift ile hafif ve ağır yağların doğal ve yapay karışımıdır. Genellikle ham taşkömürünün karbonizasyonu sırasında çıkan buharların yoğunlaştırılmasıyla bir yan ürün olarak elde edilir. Katranın damıtılıp muhtelif organik maddeleri ayrıldıktan sonra geride artık madde olarak zift elde edilir.



Şekil 2.2. Ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen asfaltlar [8]

2.2.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

Asfalt veya asfalt bağlayıcının kimyasal yapısı oldukça karmaşıktır. Bu yüzden tam olarak kimyasal analizi oldukça zahmetli olmakta ve analiz sonucunda çok miktarda veri elde edilmektedir. Ancak asfaltı, asfaltenler ve maltenler diye iki gruba ayırmak mümkündür. Maltenler de kendi aralarında doygunlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır [1,8].



Şekil 2.3. Asfaltın yapısı ve bileşenleri [1]

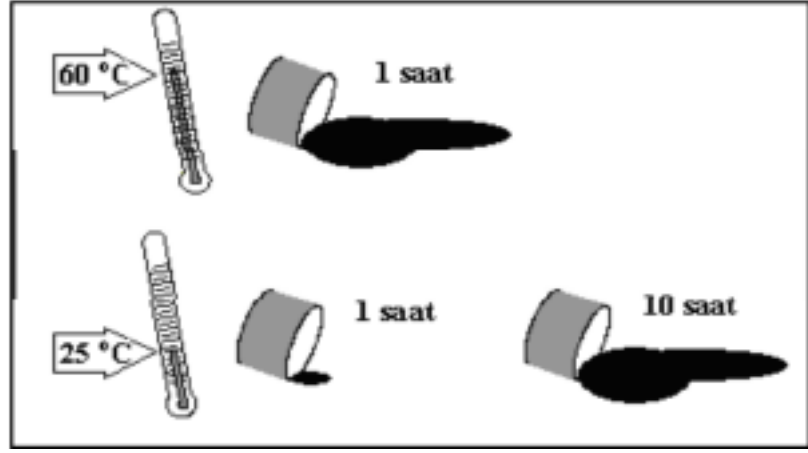
Asfaltenler, esas olarak karbon ve hidrojenden oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi kendine özgü biçimleri olmayan yapılardır. Genel olarak yüksek molekül ağırlığına sahiptirler ve polar yapıdadırlar. Asfaltın %5-25'ini oluşturmaktadırlar [9].

Maltenler, asfaltın n-heptanda çözülen kısmı olan maltenler üç alt gruba ayrılmaktadır [9]. İlk olarak reçineler n-heptanda çözülebilen yapılardır. Asfaltenler gibi yüksek miktarda hidrojen ve karbonla, küçük miktarda oksijen, sülfür ve nitrojen içeriğinden oluşmaktadır. Aromatikler ise asfaltın %40-65'ini oluşturan yapılardır. Koyu kahverengine sahip viskoz yağ şeklindedirler. Son olarak doygunlar genel olarak renksiz, yağlı yapıya sahip olup parafinik ve naftanik yağ halkalarını içeren yapılardır. Asfaltın % 5-20'sini oluştururlar [1,9].

2.2.2. Asfaltın Reolojik Davranışı

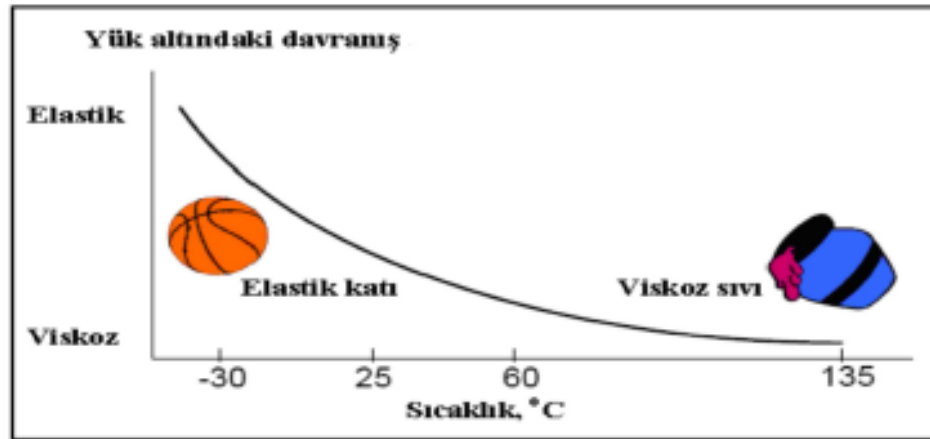
Bitüm mühendislik özellikleri bakımından incelendiğinde viskoelastik bir davranış gösteren termoplastik bir malzeme olup trafik yükünün altında yükün şiddetine, zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar gösteren bir

malzemedir. Şekil 2.4’de asfaltın farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Asfaltın farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi [5]

Şekilde görüldüğü gibi 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış ile 25 °C sıcaklıkta 10 saatte gösterdiği akış aynı olmaktadır. Bu da sıcaklık ile yüklenme süresinin arasındaki ilişkinin benzer olduğunu göstermektedir. Böyle malzemeler düşük yük altında viskoz, orta yüklemeye altında orta elastik, yüksek yüklemeye hızında ise elastik özellik göstermektedir. Bitümün bu reolojik özelliği asfalt karışımların da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu sebeple yüklenme süresi ve sıcaklık karışımının rijitliğine doğrudan etki etmektedir [10].



Şekil 2.5. Bitümün sıcaklıkla değişimi [5]

2.3. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin tespit etmek amacıyla çeşitli geleneksel veya konvansiyonel deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler Çizelge 2.2’de belirtildiği gibi penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, ısıtma kaybı ve özgül ağırlık gibi deneylerdir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Geleneksel asfalt bağlayıcı test yöntemleri [5]

TEST TİPİ	STANDART KOŞULLAR	DENEY STANDARTI
Penetrasyon Deneyi	25 °C, 5sn, 100gr	ASTM D5-AASHTO T49-EN 1426- TS 118
Yumuşama Noktası Deneyi	-	ASTM D36- EN 1427- TS 120
Duktilite Deneyi	25 °C, 5cm/dak	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Parlama Noktası Deneyi	-	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Çözünürlük Deneyi	-	ASTM D2042- AASHTO T44 TS 1090
Dinamik Viskozite Deneyi	60 °C	ASTM D2171- AASHTO T202
Kinematik Viskozite Deneyi	135 °C	ASTM D2170- AASHTO T201 EN 12595
Isıtma Kaybı (TFOT)Deneyi	163 °C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma Kaybı (RTFOT)Deneyi	163 °C, 75 dak	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık Deneyi	25 °C	TS 1087- ASTM D70

2.3.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5)

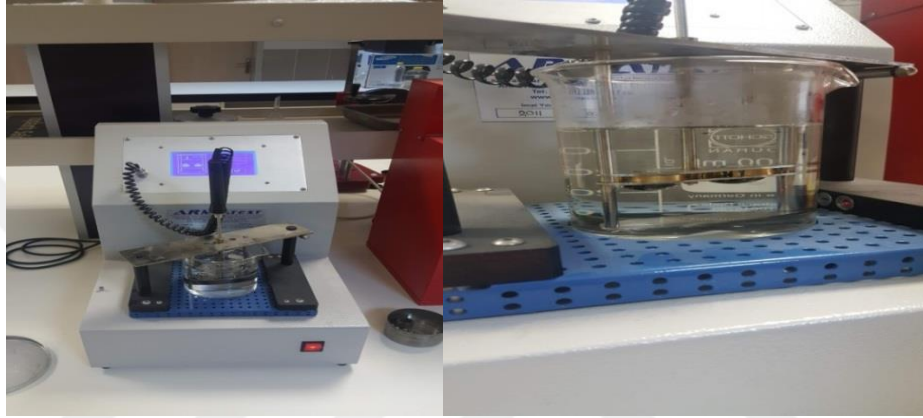
Bu deney asfaltın sertlik derecesini belirlemek ya da bir başka deyişle kıvamını belirlemek için yapılır. Standart penetrasyon aleti, 100gr ağırlığındaki bir iğnenin 25 °C sıcaklıkta, 5 saniye içerisinde asfalt içerisinde battığı düşey mesafe olarak tanımlanır. Deney birimi 10^{-1} mm’dir. Asfaltın penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılıdır. Şekil 2.6’da penetrasyon cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Standart penetrasyon deney aleti

2.3.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36)

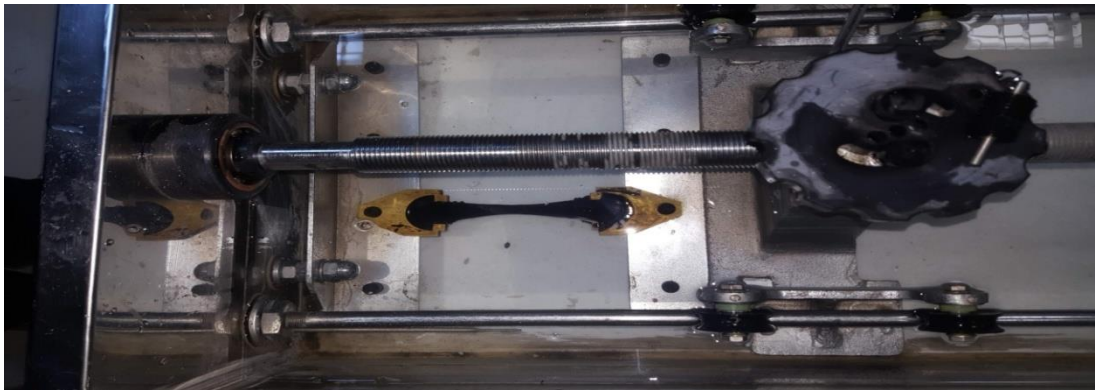
Asfaltın yumuşamaya başladığı andaki sıcaklığının tespit edilmesi için yumuşama noktası deneyi yapılmaktadır. Deneyde; bitümlü doldurulmuş olan iki yuvarlak halka, deney düzeneğine yerleştirilir ve bu halkalar üzerine birer adet bilye koyulur. Deney için başlangıç sıcaklığı 5 °C'dir ve sıcaklık dakikada 5 °C arttırılır. Bitümlü malzemenin düzenek tabanına değdiği anda cihaz otomatik olarak yumuşama anındaki sıcaklık değerini okumaktadır. Şekil 2.7'de yumuşama noktası cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Yumuşama noktası cihazı

2.3.3. Düktilite Deneyi (TS 119, TS EN 12589)

Bir asfalt bağlayıcının kohezyon mukavemeti, düşük ısıdaki düktilitesi ile ölçülmektedir. Deney, standart kalıp içerisinde hazırlanmış asfaltın, 25 °C sıcaklıkta ve 5 cm./dak. hızla çekilerek kopuncaya kadar uzadığı miktardır. Düktilite cihazı Şekil 2.8'de verilmiştir.

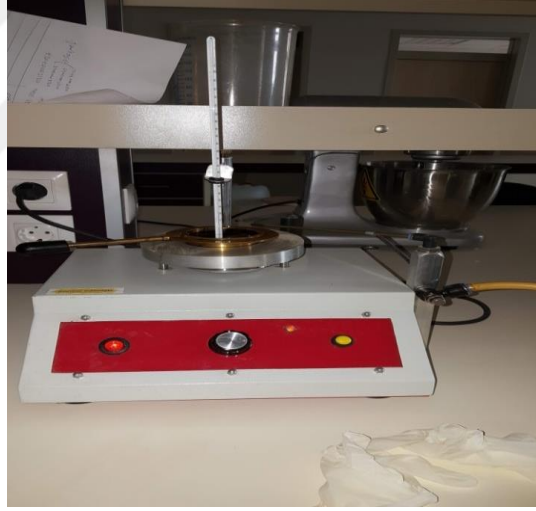


Şekil 2.8. Düktilite cihazı

2.3.4. Parlama Noktası Deneyi

Parlama noktası, ısıtılan asfalt numunenin yüzeyine, ucunda alev saçan deney cihazının temas ettirilmesiyle parlayıp fakat yanmaya devam ettiği en düşük sıcaklık değeridir. Petrol ve türevi ürünlerin parlama değerinin bilinmesi, uygulama esnasında ortaya çıkabilecek tehlikelerin önlenmesi için çok önemlidir.

Deney yapılacak olan asfalt 150 °C'ye kadar ısıtıldıktan sonra deney kabına hava kabarcığı kalmayacak şekilde seviye çizgisine kadar doldurulur. Numune sıcaklığı ilk olarak dakikada 14-17 °C artacak şekilde ayarlanır. Numune sıcaklığı 28 °C 'ye ulaştığında dakikada 5 °C artacak şekilde ısıtıcı hızı ayarlanır ve numune üzerinden deney alevi geçirilir. Alev çapı yaklaşık olarak 4mm civarındadır. Alev kabın üzerinden 1 saniye içerisinde geçirilmelidir. Numune yüzeyinde herhangi bir noktada olan tutuşma görüldüğü anda okunan değer parlama değeri olarak kabul edilmektedir [3]. Şekil 2.9'da parlama noktası cihazı verilmiştir.



Şekil 2.9. Parlama noktası cihazı

2.3.5. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)

Bağlayıcının belirli bir hacimdeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranına özgül ağırlık denilir. Asfaltın özgül ağırlık tayini için piknometre metodu kullanılmaktadır. İlk olarak boş kap tartılır. Sonrasında kap su ile doldurulup tekrar tartılır. Kap içerisindeki su boşatılıp kap tekrar kurutulduktan sonra uygun miktarda bağlayıcı koyulup tekrar tartılır. Isıtılmış bağlayıcı kap içerisinde dökülürken hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilir. Bağlayıcının üzerine kalan miktarda su

koyularak tartım işlemi yapılır. Deneyde kullanılan suyun saf olması gerekir. Uygun deney sıcaklığı ise 25 °C dir [9]. Şekil 2.10'da piknometre kabı ile özgül ağırlık tayini deneyi yapım aşamasından bir görsel sergilenmektedir.



Şekil 2.10.Piknometre kabı ile özgül ağırlık tayini

2.4.Superpave Asfalt Bağlayıcı Deneyleri

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.

Günümüz trafiğinin gereksinimlerini büyük ölçüde karşılamaya çalışan, her türlü hava şartlarında yolun performansını koruyarak hizmet vermesini sağlayan Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) yöntemi geliştirilmiştir [1,11].

Superpave tasarım yöntemi asfalt bağlayıcı şartnamesi ve karışım dizaynı olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Superpave asfalt bağlayıcı şartnamesinin 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 [5,11].

Superpave asfalt test yöntemleri saf ve modifiye asfalt bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Bu deneyler; kısa dönem yaşlanmayı tespit eden, Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), uzun dönem yaşlanmayı tespit eden Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi, bağlayıcının işlenebilir özelliğinin tespit edilmesi

için yapılan Dönel Viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımın belirlenmesi için Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme (DDT), yüksek sıcaklık dayanımlarının tespiti için yapılan Dinamik Kayma Reometresi (DSR)'dir.

Çizelge 2.3'de Superpave asfalt deneyleri ve kullanım amaçları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Superpave deneyleri ve amaçları [1]

DENEY ADI	KULLANIM AMACI
Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT) Deneyi	Kaplamanın kısa süreli yaşlanmasını belirlemek
Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV) Deneyi	Kaplamanın uzun süreli yaşlanmasını belirlemek
Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi	Bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıktaki özelliklerini tespit etmek
Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi	Bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki özelliklerini tayin etmek
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek
Doğrudan Çekme (DDT) Deneyi	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini belirlemek

Superpave yönteminde bağlayıcılar, farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performanslara göre sınıflandırılır ve PG simgesi ile tanımlanmaktadır. Performans dereceli (PG) bağlayıcılar, PG 52-22 gibi bir ifade kullanılarak tanımlanmaktadır. Burada ilk sayı olan 52, "yüksek sıcaklık derecesi" olarak isimlendirilir ve bağlayıcının bu sıcaklığa kadar iyi performans göstereceği kabul edilir. İkinci ifade olan -22 ise "düşük sıcaklık derecesi" olarak tanımlanır ve bağlayıcının bu sıcaklığa kadar iyi performans göstereceği kabul edilir [1].

Çizelge 2.4'te Superpave asfalt bağlayıcı şartnamesi verilmiştir.

Çizelge 2.4. Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi [1]

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
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46				< 52				< 58				< 64				
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46		>	>	>	>	>	>	>		>	>	>	>	>
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																	
Ağır-luk 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 Deneş 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
Fiziksel Sertleşme,																	
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	-24	-30	-36		-	-	-	-	-	-	-		-6	-12	-18	-24	-30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	-24	-30	-36		-	-	-	-	-	-	-		-6	-12	-18	-24	-30

Çizelge 2.4. Superpave performans esaslı bağlayıcı şartnamesi [1]

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															
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
	- 10	- 16	- 22	- 28	- 34	- 40	- 10	- 16	- 22	- 28	- 34	- 10	- 16	- 22	- 28	- 34
ORJİNAL BAĞLAYICI																
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230															
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s, Test Sıcaklığı, °C	135															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinđ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70					76					82					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE İSİTİMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00															
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinđ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	70					76					82					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																
PAV Deneysel Sıcaklığı, °C	100 (110)					100 (110)					100 (110)					
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinđ, maksimum, 5000kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fiziksel Sertleşme,																
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

2.4.1. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT)

Bu deney ince bir film halinde deney şişelerin içerisinde dönel bir tablada hareket eden asfaltların, sıcaklık ve havanın etkisiyle fiziksel özelliklerindeki değişimini tayin etmek amacıyla yapılmaktadır. TS EN 12607-1 standartlarına göre yapılan deney, 163 °C sıcaklıktaki cihaza 8 adet şişe yerleştirilerek yapılmaktadır. Deneyde her bir şişeye 35 gr. malzeme doldurulup düşey ekseninde 15 devir/dakika yapacak şekilde dönebilen bir tablaya yerleştirilir ve cihaz 75 dakika süreyle çalıştırılır. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici bulunmaktadır. Bu üfleyici şişelere 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verir. Sıcaklığın etkisiyle malzeme şişeleri tam olarak kaplar ve film tabakası oluşturur. Bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi daha basit hale getirilmiş olur [10]. Deney sonunda önceden işaretlenmiş ve tartılmış iki şişe kütle kaybını tayin etmek amacıyla cihazdan çıkarılınca ağırlıkları tekrar tartılır. Geri kalan altı şişe ise başka kaplara alınarak sonraki deneylerde kullanılmak amacıyla saklanır. Deneyden sonra yaşlanmadan önceki ağırlık M1, yaşlanmadan sonraki ağırlık M2 alınarak aşağıdaki (2.1) bağıntısı ile bağlayıcıda oluşan kütle kaybı yüzdesi bulunur [11].

Şekil 2.11 'de RTFOT cihazı gösterilmektedir.

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2.1)$$



Şekil 2.11. RTFOT cihazı

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

Bu deney, asfalt bağlayıcıda oluşan uzun dönemli yaşlanma özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilmiş kısa süreli yaşlanmış numuneler üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına göre her numune kabına 50 gram numune koyulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90-100 ve 110 °C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [12]. PAV cihazı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. PAV deney cihazı

2.4.3. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)

Bu deney bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık altındaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olup olmadıklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir [7,12]. Deney için 30gr. malzeme alınarak etüvde ısıtılıp akışkan hale getirilir. Yaklaşık 11 gr. numune deney tüpüne doldurulur. Numune, sıcaklık kontrollü olan hazneye yerleştirilir ve 15 dk sabit sıcaklıkta bekletilerek deney başlatılır. Deneyde, asfaltın içine daldırılan silindirik milin devamlı 20 rpm. hızla dönmesi sağlanır. Yaklaşık olarak birbirine yakın viskozite değerlerine ulaşıncaya üç adet okuma yapılır ve bunların ortalamasından bağlayıcının viskozitesi belirlenmiş olur. Bağlayıcıların 135 °C de 3000 cP'yi aşmaması istenmektedir [13]. Bu amaçla, standart 135°C ve 165°C

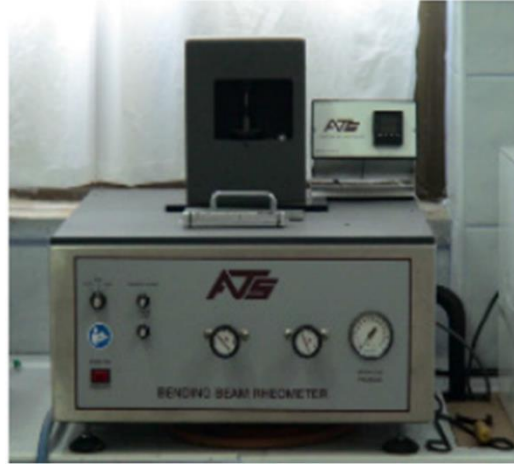
sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak asfaltın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir. Şekil 2.13’de RV cihazı ve numunelerin doldurulduğu tüpler gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Brookfield viskozimetresi ve tüpler

2.4.4. Kiriş Eğme Reometresi (BBR)

Asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıklara maruz kaldıklarında rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkinin nasıl olacağını belirlemek oldukça zor olabilmektedir. Bu sebeple BBR deneyi belirli bir sıcaklıkta tutulan bağlayıcının, sabit bir yük altında ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmek için yapılmaktadır [7,14]. Deneyde PAV kalıntısı yani uzun süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş olan asfalt bağlayıcılar kullanılmaktadır. Deney boyunca bitümlü bağlayıcı kırınumunesi, bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük bir sıcaklıkta tutulmaktadır. Deney için iç ölçüleri 6,35x127x12,7 mm. ebatlarında olan metal kalıplar yardımıyla elde edilmiş olan asfalt kırış numuneleri kullanılmaktadır. BBR deney aleti Şekil 2.14’te görülmektedir.



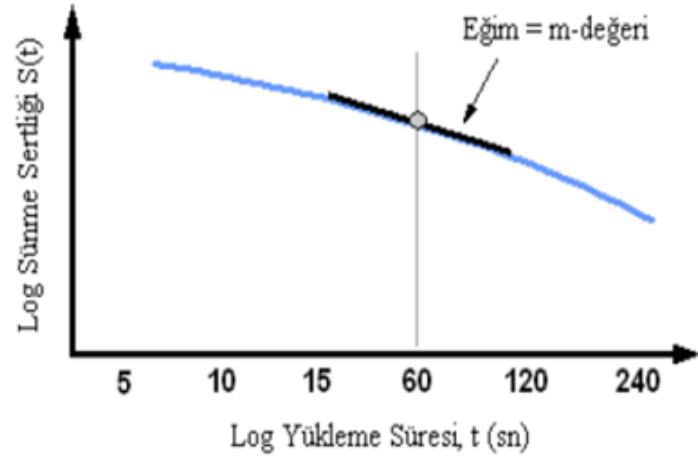
Şekil 2.14. Kiriş eğme reometresi (BBR) deney aleti

AASHTO TP1 standardına uygun olarak yapılan kiriş eğme reometresi deneyinde asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye boyunca 980 mN'luk yük etki ettirilmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. BBR deneyi için numune hazırlanması (a) ve deneyin yapılması (b)

Deney sonunda, uygulanan yük ve elde edilen defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini (s) ve sünme oranının (m -değer) tayininde kullanılır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımının bir göstergesidir. Sünme oranı (m -değeri) ise sünme sertliğindeki değişimler ile yükleme süresi arasındaki oranı belirtmektedir. Yüke ve defleksiyona bağlı olarak sünme sertliği değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir (Şekil 2.16). Bu grafikte eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi sünme oranını (m -değer) vermektedir. AASHTO TP1 standardına göre sünme sertlik değerinin maksimum 300 Mpa ve sünme oranı değerinin ise minimum 0,300 olması gerekmektedir [15].



Şekil 2.16. Sünme oranının belirlenmesi [15]

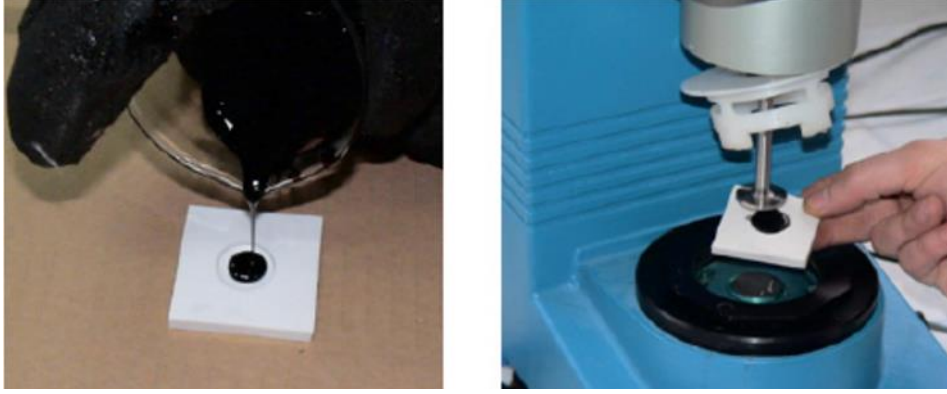
2.4.5. Dinamik Kesme Reometresi (DSR)

DSR deneyi, saf ve modifiyeli bağlayıcının orta sıcaklıklardaki yorulma ve yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını belirlemek için yapılır. Bu deneyde tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımların belirlenmesi için saf bitüm ve RTFOT kalıntısı numuneler; yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla da PAV kalıntısı numuneler kullanılır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını belirlemek için 25 mm. çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını belirlemek için ise 8 mm. çapında ve 2000 mikron yüksekliktedir [8]. Deneylerde kullanılan DSR deney aleti Şekil 2.17’de görülmektedir.



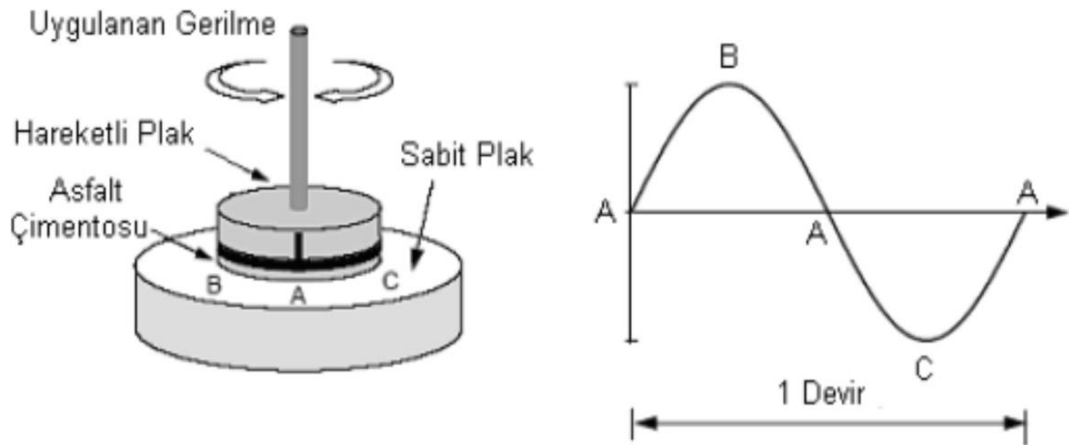
Şekil 2.17. Bohlin DSR II dinamik kesme reometresi

Deneyde bitümlü numuneler doğrudan plaklar üzerine dökülebildiği gibi silikon kalıplar ile de numune hazırlanabilmektedir. Silikon kalıplarla numune hazırlanışı ve numunenin deney aletine yerleştirilişi Şekil 2.18’de görülmektedir.



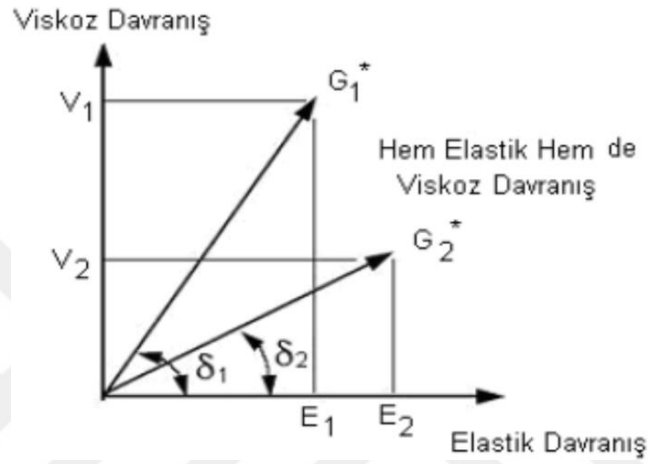
Şekil 2.18. Numunenin kalıba doldurulması (a), üst plağa yerleştirilmesi (b)

Deneyde, Şekil 2.19’da görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasında bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gidip geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır. Deneyde dönme frekansı ise yaklaşık 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde ortam şartlarını yansıtması amacıyla 10 devir ön koşullandırma yapılır. Daha sonra 10 devirlik standart deney periyodu uygulanmaktadır [15].



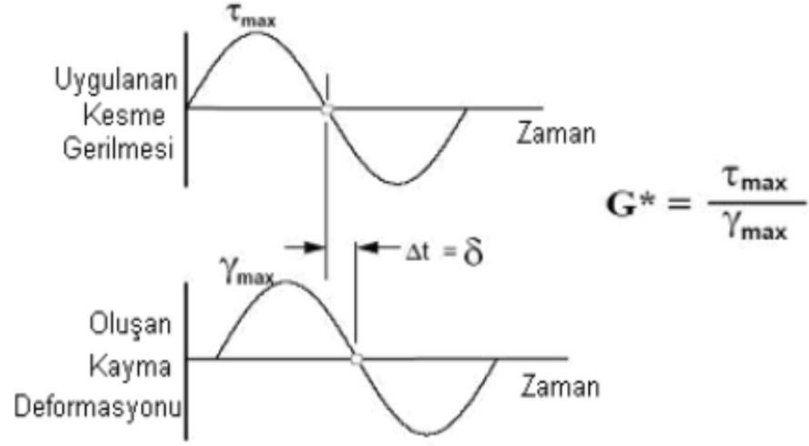
Şekil 2.19. DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri [9]

Dinamik kesme reometresi deneyi, bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını temsil etmektedir (Şekil 2.20). Şekilde G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direnci temsil eder. Hem G^* hem de δ değerleri bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir [6].



Şekil 2.20. Asfalt bağlayıcının viskoelastik özelliği [15]

Viskoelastik davranışı ifade eden Şekil 2.26'da görüldüğü gibi yatay eksen elastik davranışı (sıcaklık düşük, yükleme hızı yüksek) gösterirken, dikey eksen ise viskoz davranışı (yükleme hızı düşük, sıcaklık yüksek) temsil etmektedir. Ancak normal kaplama ısı ve normal yükleme durumlarında asfalt bağlayıcı hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Asfalt bağlayıcının visko-elastik özelliğe sahip olması ve her bir asfalt bağlayıcının birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi visko-elastik özellik hem G^* 'a hem de δ 'a bağlıdır. Bu nedenle asfalt bağlayıcının visko-elastik özelliği, G^* ve δ birlikte göz önüne alınarak belirlenmelidir. Faz açısı (δ), uygulanan gerilme ile meydana gelen deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit olmaktadır (Şekil 2.21) [1].



Şekil 2.21. Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi [14]

AASHTO TP-5 standardına uygun olarak yapılan bu deneyde yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım şartname limitleri Çizelge 2.5’de verilmiştir [9].

Çizelge 2.5. DSR deneyinde kullanılan bağlayıcı türlerine göre şartname limitleri [9]

BAĞLAYICI TÜRÜ	DENEY AMACI	ŞARTNAME LİMİTLERİ
Orijinal	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 1 kPa
RTFOT	Tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım	Minimum 2,2 kPa
PAV	Yorulmaya karşı dayanım	Maksimum 5000 kPa

2.5.Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Performans Deneyleri

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 bozulma özelliklerinin göstergesi olan performans özellikleri olmak üzere iki grup özellik değerlendirilir. En önemli performans özellikleri, bitümlü tabakalarda oluşan yorulma çatlakları ile üstyapıdaki her türlü tabakada görülen kalıcı deformasyondur [15].

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 laboratuvarında güçlkle sağlanabildiğinden, arazideki davranışın belirli bazı yönlerini sağlayan birçok basitleştirilmiş deney bulunmaktadır [11].

Bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerinin tayini için Marshall numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman deneyi, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, statik sünme deneyi yapılmaktadır.

2.5.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Stabilite, kaplamaya etkiyen yükler sebebiyle oluşabilecek deformasyona karşı kaplamanın gösterebileceği maksimum dayanımı ifade eder. Akma; numunenin maksimum yüke ulaştığı anda meydana gelen düşey deformasyondur. Deneyde öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilir. Daha sonra numuneler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda yaklaşık 40 dakika, kırma çenesi ise 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika veya 60 ± 1 °C sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 1 saat kadar bekletilmelidir. Süre sonunda numune sudan çıkarılıp kırma çenesine ortalanacak biçimde yerleştirilir ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılır. Deneyde, stabilite ve akma değerleri kaydedilir. Numune sudan çıkarıldıktan sonra en fazla 60 sn. içerisinde deney bitirilmiş olmalıdır. Deney için standart numune yüksekliği 63,5 mm kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için ise stabilite düzeltme katsayıları eşitlik (2.2) yardımıyla hesaplanır [1,16].

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258xh)} \quad (2.2)$$

Eşitlikteki c, düzeltme katsayısı, h ise numune yüksekliğini göstermektedir. Elde edilen stabilite ve akma değerlerinin ortalaması alınarak kaydedilir ve bu şekilde değerler belirlenmiş olur. Stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine ve akma ortalamasından %20 farklı akma değerine sahip olan numuneler değerlendirme yapılmadan deneyden çıkarılmalıdır. Geriye kalan numunelerin ortalaması alınarak sapma miktarları belirlenmektedir. Eğer aynı oranda sapma

(stabilite için %15, akma için %20) olan numuneler varsa numune seri olarak iptal edilip yeni bir seri numune üzerinde deney tekrar yapılmalıdır [4,17].

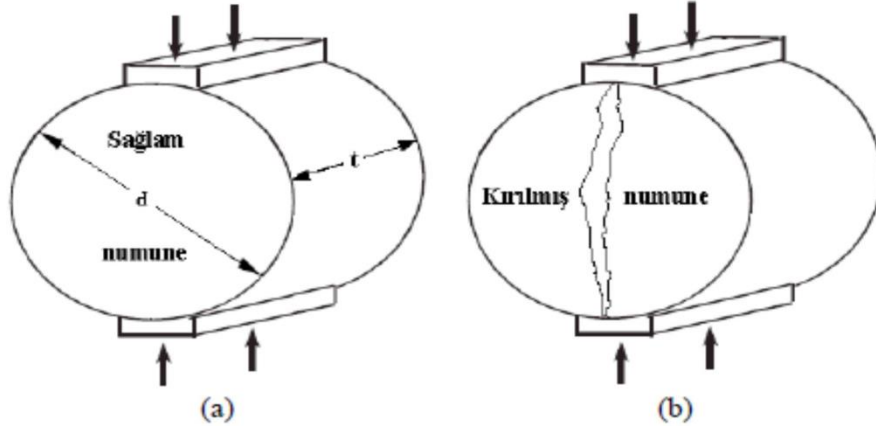
Deney sonucunda ayrıca Marshall oranı (MQ) da değerlendirilmektedir. Marshall oranı (MQ) ise stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [3,16]. Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Marshall stabilite ve akma deneyi cihazı

2.5.2. 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 yapılmaktadır. Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilmektedir. Deneyde, numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [1,17]. Şekil 2.23’de numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu görülmektedir.



Şekil 2.23. ITS deneyi yükleme durumu (a) ve kırılma düzlemi (b) [1]

Dolaylı çekme mukavemeti (2.3) 'deki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır [1].

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad (2.3)$$

- ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa),
Pmax : Maksimum yük (kN),
h : Numune yüksekliği (mm),
d : Numune çapı (mm).

ITS deneyi, genel olarak bitümlü karışımların çekme mukavemeti özelliklerinin tayini içindir. 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 tespitinde de kullanılabilir. Bununla beraber, bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında sergilediği davranış hakkında bilgi almak içinde kullanılabilir [18].

Bu deney, genel olarak bitümlü karışımların kohezyon kuvvetinin tayininde de 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 ve Yoğurmalı pres cihazlarıyla üretilmiş biriketlere de uygulanabilmektedir. Bitümlü karışımın ITS değeri, 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 alakalıdır [1].

2.5.3. Modifiye Lottman (AASHTO T-283) 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 [1].

Sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki guruba ayrılmakta ve bu iki gurup 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 [1,19].

Deneye tabi tutulacak her test gurubu için 3 adet kuru ve 3 adet şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet Marshall numunesi 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 doygun hale gelmesi sağlanır. Doygun hale getirilen Marshall numuneleri 16 saat süreyle -18 °C'deki soğutucuya yerleştirilir. Soğutucudan 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 [1,20]. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme

mukavemetinin (ITSyaş), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITSkuru) oranıyla (2.4)teki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır [1,5,18].

$$ITSR = \frac{ITSyaş}{ITSkuru} \times 100 \quad (2.4)$$

ITSR: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

ITSyaş: Şartlandırılmış (yaş) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa),

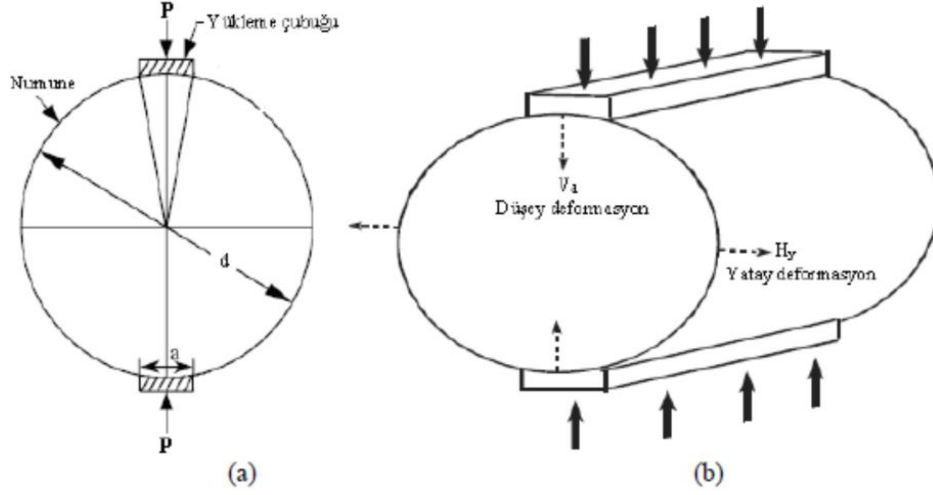
ITSkuru: Şartlandırılmamış (kuru) gurubun ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa).

Bitümlü sıcak karışımın su etkilerine karşı yeterli dayanımda kabul edilebilmesi için Superpave karışım dizayn metoduna göre ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir. Ancak, orijinal Lottman metodunda bu değer en az %70 olması yeterlidir. Deneyde %80'den daha düşük ITSR değerine sahip sıcak karışımların su etkilerine karşı yeterli dayanıklılığa 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 [1,20].

2.5.4. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) Deneyi

Bu deney BSK'ların dinamik yükler altındaki esnekliğini belirlemek için yapılır. Esneklik modülü, kaplamanın yük dağıtma yeteneği ve kaplamanın performans özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir ölçüttür[4]. Esneklik modülü tek eksenli yükleme altında tespit edilir ve maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır [3,4,18].

ITSM deneyi ile farklı sıcaklık ve yükleme süreleri altında numuneye ait esneklik modülü değeri belirlenmektedir. Bu deneyde numuneye yarı sünizoidal olarak, düşey yönde bir basınç yükü tekrarlı darbeler halinde uygulanmaktadır [3,4,18]. Şekil 2.24'te ITSM deneyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.24. Dolaylı çekme deneyi (a) ve şematik görünüşü (b)

$$E_m = \frac{P \times (v + 0,2734)}{H_y \times h} \quad (2.5)$$

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) eşitlik (2.5) ile yardımıyla hesaplanır [3,4].

- E_m : Esneklik modülü (Mpa),
- P : Maksimum yük (N),
- H_y : Toplam yatay deformasyon(mm)
- H : Numune kalınlığı (mm),
- v : Poisson oranı.

Bitümlü karışımın esneklik modülünü etkileyen en önemli faktörleri şöyle sıralanabilir; sıcaklık, yükleme frekansı veya hızı ve karışımın hava boşluğudur. Düşük sıcaklıklar, yüksek yükleme hızı ve yüksek viskoziteli bitüm kullanımı karışımın esneklik modülünü arttırmaktadır [6]. Esneklik modülü, ayrıca deneyde kullanılan numunenin büyüklüğüne ve poisson oranına göre farklılık gösterdiğinden 100 mm ve 150 mm'lik numunelerin poisson oranları aşağıdaki (2.6) ve (2.7) bağıntıları ile bulunur [1].

$$v = 3,59 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \text{ (100 mm'lik numuneler için)} \quad (2.6)$$

$$v = 4,09 \times \frac{H_y}{V_d} - 0,27 \text{ (150 mm'lik numuneler için)} \quad (2.7)$$

Burada;

H_y : Yatay deformasyon (mm),

V_d : Düşey deformasyon (mm),

v : Poisson oranı.

Yapılan çalışmalarda, poisson oranının bitümlü karışımlar için sıcaklığa bağlı olarak; 5°C'de 0,25; 25°C'de 0,35; 40°C'de 0,40 olarak değiştiği görülmüştür. Ancak; çalışmalarda bitümlü karışımın esneklik modülünün tayininde genel olarak 0,35 oranının alınması tavsiye edilmektedir [1]. Şekil 2.25' de ITSM deney cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2.25. ITSM deney cihazı

2.5.5. Kalıcı Marshall Stabilitesi (Retained Marshall) (RMS)

Kalıcı Marshall stabilitesi deneyi bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının tayini için yapılmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesinde numuneler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilip Marshall stabilite deneyine tabi tutulmaktadır [9]. 60 °C suda 24 saat süre boyunca bekletilen numunelerin stabilite değerinin tespit edilen normal stabilite değerine oranlanmasıyla Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) belirlenmektedir. Kalıcı Marshall stabilitesi değeri yüksek olan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olduğu bilinmektedir [3].

2.5.6. Statik Yüklemeli Sünme Modülü Deneyi

Bitümlü sıcak karışımların statik yükler altındaki dayanımlarını tayin etmek için numune üzerine bir yük uygulayıp yük kaldırıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyonun ölçülmesi esasına dayanan statik sünme modülü deneyi yapılmaktadır [5]. Sünme modülü deneyinde, yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değeri belirlenir. Ayrıca bu değer karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek içinde 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. 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 [1].

Standart deney sıcaklığı 40 °C olmasına karşın aşırı sıcak bölgeler göz önünde bulundurularak daha yüksek sıcaklıklarda da deney uygulanabilmektedir [1,5]. 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 (2.8)'deki

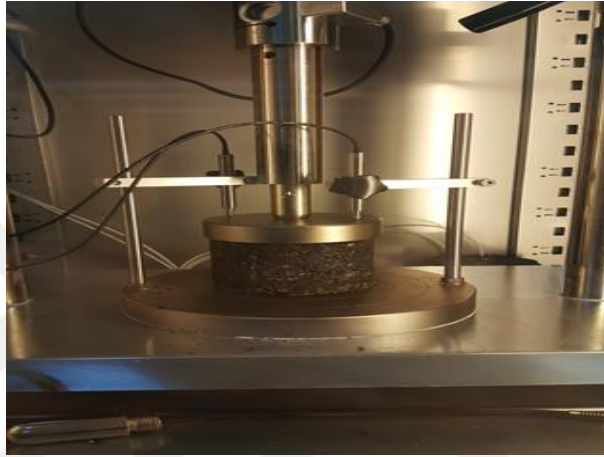
eşitlikle saptanır [1]. Şekil 2.26’da sünme deneyi uygulanan deney numunesi gösterilmiştir.

$$R_m = \sigma / \varepsilon \quad (2.8)$$

R_m : Sünme sertliği modülü (MPa),

σ : Uygulanan gerilme (MPa),

ε : Toplam kalıcı eksenel deformasyon (mm).



Şekil 2.26. Sünme deneyi uygulanan numune

2.6.Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

BSK ile elde edilen kaplamaların performansı, sıcak karışımın sahip olduğu özelliklerle doğrudan bağlı olduğundan bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden karışımların dizayn yapılmalı ve hazırlanan karışım stabilite, işlenebilirlik, durabilite, geçirimsizlik, yorulmaya karşı direnç, esneklik, kaymaya karşı direnç gibi özelliklerine bakılmalıdır [1].

2.6.1. Stabilite

Stabilite; trafik yükü, sıcaklık, çevresel faktörlere karşı direnç göstermedir. Stabilitenin tüm bunları karşılayabilmesi gerekir. Bunun dışında çok yüksek stabilite de istenmeyen bir durumdur ve bu durumlarda kaplamaların trafik yükleri altında çatladığı görülmektedir. Bu nedenle stabilitenin çok yüksek olması da istenmeyen bir durumdur [4,6].

2.6.2. Durabilite

Durabilite, asfalt kaplamanın 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 agrega üzerinde meydana gelen değişiklikler de eklenebilir. Dayanıklılık özelliği, genellikle yüksek asfalt içeriği, yoğun veya iyi derecelenmiş agrega gradasyonu ve iyi sıkıştırılmış karışımlar sayesinde iyileşmektedir [1,19].

2.6.3. Geçirimsizlik

Asfalt karışımın içindeki hava boşluğu yüzdesiyle belirlenmektedir. Düşük asfalt içeriği ve karışımdaki yüksek boşluk oranı tabakayı çok geçirimli yapar. Bu yüzden karışımlar belirli orandaki esnekliği sağlayacak boşluk yüzdesine göre tasarlanıp dizayn edilmelidir [6].

2.6.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın hazırlanıp serilmesi ve sıkıştırılması esnasındaki kolaylık olarak tanımlanabilir. İşlenebilirlik genel olarak;

- ◆Kaba agrega miktarı ve agrega maksimum dane boyutu arttıkça,
- ◆Kırmataş agrega kullanıldıkça ve agrega kırılmışlığı ile yüzey pürüzlülüğü arttıkça,
- ◆Karışımın ısısı düştükçe,
- ◆Asfalt katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça,
- ◆Mineral filler miktarı ve ara boyutlu malzeme miktarı arttıkça azalmaktadır [5].

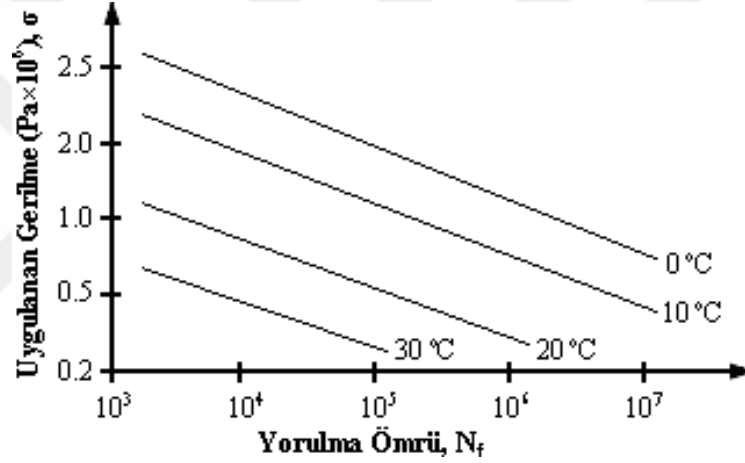
İşlenebilirliği düşük olan karışımlar, serme ve özellikle sıkıştırma zorlukları doğuracaklarından, genellikle homojen olmayan ve stabilitesi düşük olan kaplamalar elde edilmektedir [1].

2.6.5. Esneklik

Asfalt kaplamanın geçici oturma ve hareketlerine karşı, herhangi bir çatlamaya, deformasyona sebep olmadan uyum göstermesidir. Karışımdaki bitümün yüzdesi ve agrega gradasyonu esnekliği etkileyen faktörlerdir [6].

2.6.6. Yorulmaya Karşı Direnç

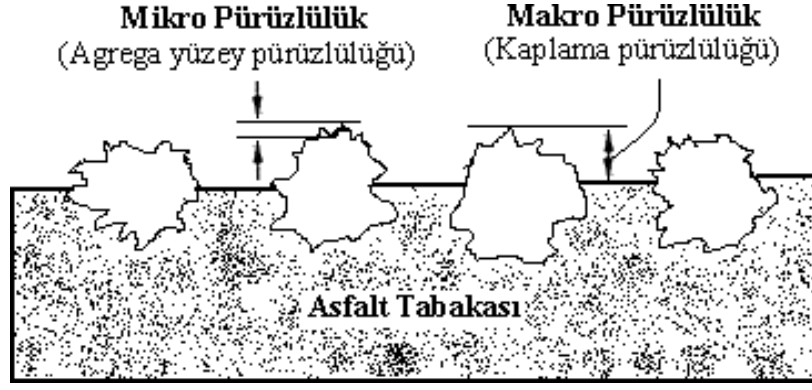
Trafik yüklerinin neden olduğu deformasyonlara karşı gösterilen direnç yorulmaya karşı gösterilen tepki olarak ifade edilir. Boşluk yüzdesi ve asfaltın viskozite değerleri yorulmayı etkileyen faktörlerdir. Yorulma ömrü, genel olarak karışımın boşluğu azaldıkça, rijitliği ve kalınlığı arttıkça ve asfalt miktarı ve yumuşaklığı arttıkça artış göstermektedir. Aynı özelliklere sahip karışımların farklı sıcaklıklarda ve sabit gerilme altındaki yorulma ömürleri Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Şekil 2.27’de görüldüğü gibi aynı özellikteki asfalt kaplamalar yorulma ömrü uygulama gerilmelerinin büyüklüğüyle ters orantılı olarak, ancak daha düşük sıcaklıklarda doğru orantılı olarak ifade etmek mümkündür [1].



Şekil 2.27. Karışımların sıcaklık, gerilme ve yorulma ömrü ilişkisi [1]

2.6.7. Kaymaya Karşı Direnç

Kaplamanın ve üzerinde bulunan taşıtların, her türlü hava koşullarında uygun mesafede durabilmeleri için kaplamanın yeterli sürtünmeye sahip olması gerekmektedir. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega yoğun gradasyonlu karışım kullanılmasıyla artmaktadır. Asfalt kaplamaların kayma direnci Şekil 2.13’te görüldüğü gibi makro ve mikro pürüzlülüğüne bağlıdır. Mikro pürüzlülük agreganın yüzey yapısına bağlı iken makro pürüzlülük asfalt karışımında kullanılan agreganın nominal boyutu ile ilgilidir [1,21].



Şekil 2.28. Kaplama pürüzlülüğü [1]

2.7.Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

BSK kaplamalar inşa edildikten bir müddet sonra maruz kaldıkları birçok etkenden dolayı bozulmaya başlarlar. BSK yol kaplamalarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenleri; yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçilmesi, tasarım hataları, iklim koşullarını göz önünde bulundurmadan malzeme ve proje tasarımının yapılması, denetimsiz seyreden aşırı yüklü taşıtların kullanımınıdır. Bu sebeplerin sonucunda ise kaplamada deformasyonlar (tekerlek izi oluşumu), çatlaklar (yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlakları) ve ayrışmalar (kusma) meydana gelmektedir [4].

2.7.1. Deformasyonlar

Deformasyon, asfalt kaplama tabakalarının inşa edildikten bir süre kaplamanın bir bölümü veya tamamında görülebilen şekil değiştirmeler olarak tanımlanabilir. Çoğu araştırmacı, asfalt mühendisliği ile ilgili çalışmalarda öneminden dolayı, çalışmalarını esnek kaplamalarda meydana gelen kalıcı deformasyonlar (oluklanma ya da tekerlek izi) üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis yeteneğinde azalmaya neden olmaktadır [6,19].

Deformasyonlar genel olarak düşük stabiliteli bitümlü sıcak karışımların imalatından kaynaklansa da;

- ◆Kaplama tabakalarının yetersiz sıkıştırılması
- ◆Aşınma tabakasında aşırı filler ve bitümlü bağlayıcı kullanımı

- ◆ Tabaka kalınlıklarının yetersiz oluşu
- ◆ Yetersiz drenaj

gibi nedenler de önemli etkenlerdir. Deformasyonları oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması olarak bölümlere ayırmak mümkündür [18,21].

2.7.1.1. Tekerlek izi 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 [19,21].

- ◆ Ağır trafik yükü ve tekerrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı,
- ◆ Yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti,
- ◆ Aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi,
- ◆ Yuvarlak dere malzemesi,
- ◆ Yetersiz sıkıştırma.

Kalıcı deformasyona sebep olan tekerlek izi oluşumu Şekil 2.29’da görüldüğü gibi genellikle ağır trafiklerin hareket ettiği şeritte meydana gelmektedir [19].



Şekil 2.29. Tekerlek izi oluşumu[19]

2.7.1.2. Oturmalar ve çökmeler

Oturmalar, kaplama altındaki alt tabakalarda meydana gelen bozulmaların satha yansması 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 ulaşabilir fakat kırılğan asfalt kaplamalarda çatlamalar görülür [4]. Oturmaların nedenleri; alt tabakaların yetersizliği, yetersiz sıkıştırma, üstyapı tabanının taşıma gücünün zayıf olması, dolgu şevinde hatalar, yer altı su seviyesinin yüksekliği, yetersiz drenaj, uygun olmayan bakım teknikleri şeklinde sıralanabilir [19].

Çökme, orjinal kaplama yüzeyine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Temel ve alttemel tabakalarının stabilite yetersizliği, yetersiz sıkıştırma, yetersiz drenaj, kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması, kötü işçilik ve yapım hataları çökmenin oluşma nedenleri olarak sıralanabilir [21].

2.7.1.3. Ondülasyonlar 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. Kabarmalar ise kaplamanın bir bölgede yukarıya doğru hareket etmesidir. Bu hareket oluşum nedeni genel olarak tabii zeminin ve üst tabakaların şişmesiyle ortaya çıkmaktadır [1].

2.7.2. Çatlamalar

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 kısmında başlamakta ve zamanla kaplama yüzeyine çıkması sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.30). Yorulma çatlakları ağır trafik yüklerinin tekrarı 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 çatlakları ise, çevre ve iklim etkisiyle oluşan büzülme veya düşük ısı çatlaklarının trafiğın etkisiyle büyüyerek belirgin hale gelmesidir. Esnek kaplamalarda çoğunlukla yorulma çatlakları oluşmaktadır [1,19].



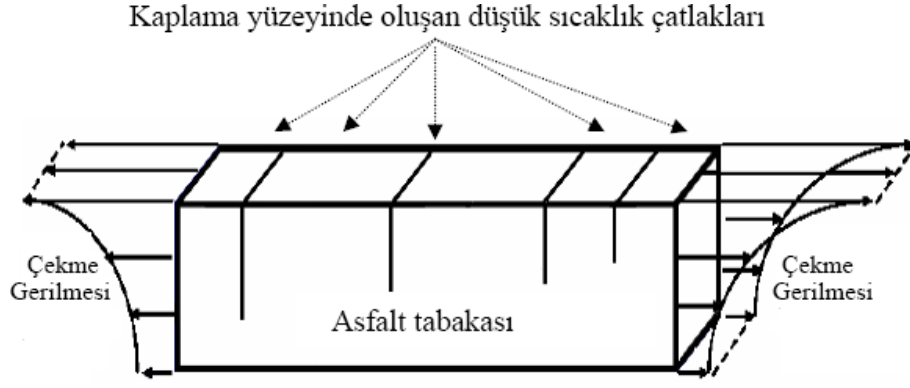
Şekil 2.30. Tipik bir esnek üstyapısı (a) ve oluşan bozulmalar (b) [1,19]

2.7.2.1. Yorulma Çatlakları

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. 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 [21].

2.7.2.2. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, trafiğın etkilerinden çok, soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak meydana gelen enine doğrultudaki çatlaklardır. Kış şartlarında büzölmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında, Şekil 2.31'de göröldüğü gibi yüzeyde çatlaklar meydana gelir.



Şekil 2.31. Kaplama gerilme durumu ve düşük sıcaklık çatlakları

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. Karışımda kullanılacak asfalt miktarı, asfaltın yaşlanması, karışımın rijitliği, hava sıcaklığı ve çok soğuk gün sayıları, kaplama kalınlığı ve tabakalar arasındaki sürtünme kuvvetleride çatlak oluşumuna sebep olmaktadır [1,21].

2.7.3.Kusma

Yol kaplamasını oluşturan bitümün sıcaklıktan dolayı kaplamanın yüzeyine doğru yükselerek yüzeyde kalın bir film tabakası oluşturması durumuna kusma denir. Oluşan film tabakasından dolayı yüzeyin sürtünme katsayısı azalmaktadır [2].

Kusma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genişleyen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Astar veya yapıştırma tabakalarının çok kalın serilmeside kusmaya sebep olabilir. Karayollarımızın bakım görmüş kesimlerinde görülen kusma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri dikkatli seçilmesiyle önlenabilir [21].

Yapılan çalışmalarda agrega gradasyonundaki ince malzeme miktarının kusma olayında etkili olduğu, kusma miktarının sıcaklık, trafik yükü ve bitüm miktarı arttıkça arttığı tespit edilmiştir [17].

2.7.4. Ayrışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının trafik ve iklim etkisi ile küçük parçalar halinde ayrışması sonucu kopma ve parçalanma şeklinde görülür ve aşınma tabakasından agrega danelerinin koparak ayrılmasından kaynaklanır. Ayrışmalar genel olarak yapım hataları, düşük kaliteli malzeme kullanımı, kirli ve ıslak agrega kullanımı, hatalı serim ve sıkıştırma ve yetersiz asfalt veya yetersiz adezyon gibi nedenlerden oluşur [1].

2.7.4.1. Dağılmalar ve sökülmeler

Asfalt kaplamalarında dağılma, karışımda bulunan agregaların ufalanması sonucu agrega tanelerinin küçük çukurlar bırakarak sökülmesiyle meydana gelir. Sökülmeler önce ince agregaların kaplamadan ayrılmasıyla başlar ve sonraki aşamada iri agrega tanelerinin ayrılması ile devam eder. Dağılma ve sökülmelerin en önemli nedenleri ise karışımda kullanılan agregaların temiz olmaması ve soğuk hava koşullarında yapım olarak sayılabilir [21].

2.7.4.2. Soyulma

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan asfaltın, agregaların etrafını film şeklinde sarması istenir. Fakat kaplamalarda zamanla trafik yüklemeleri, su ve kil etkisi ile bu film tabakası agregadan ayrılarak çıplak kalmasına neden olur. Ülkemizde soyulma olayı çok gerçekleşmediğinden dolayı bugün için büyük bir sorun haline gelmemiştir [21].

3. BİTÜM MODİFİKASYONU

Esnek kaplamaların stabilite ve performans yönünden nitelikli, uzun ömürlü ve bakım-onarım maliyetinin düşük olması amaçlanmaktadır. Kaplamaların bu özelliklere sahip olabilmesi kaplamanın ömrünü etkileyen bazı özelliklerinden kalıcı deformasyonlarının, yorulma ve düşük ısı çatlaklarının, su etkisiyle soyulmasının ve düşük durabilitelerinin en aza düşürülmesi gerekmektedir. Bu sebeple modifikasyon işlemi gerçekleştirilerek gerek asfalt bağlayıcının gerekse bitümlü karışımın performansını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Modifikasyon; bağlayıcının ve bitümlü karışımların performanslarını arttırmak için, modifiyer olarak kullanılacak katkıların belli miktarlarda ya bitüm içerisine veya bitümlü bağlayıcı karışım içerisine ilavesiyle yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalta ‘Modifiye Asfalt (MA)’ ve karışıma ise ‘Modifiye Edilmiş Karışım’ denilmektedir [20].

3.1. Modifikasyonun Amacı

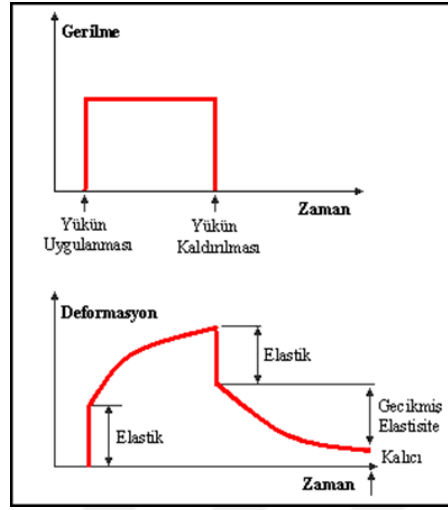
Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmelerinin genel olarak şu şekilde sıralanabilir [1]:

- Düşük servis sıcaklıklarında daha esnek karışımlar elde ederek çatlakları minimuma indirmek,
- Yüksek sıcaklıklarda daha rijit karışımlar elde ederek tekerlek izlerinin minimuma indirmek,
- Yüksek kayma dirençli kaplama yüzeyleri elde etmek,
- Karışımların dirençlerini, işlenebilirliğini, dayanımlarını arttırmak.

3.2. 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 özelliğinde önemli rol oynayarak bitümlü karışımların da visko-elastik özellik göstermelerine sebep olmaktadır. Genel olarak, bitümlü bir malzemede oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir [1]. Bitümlü bir malzemeye uygulanan yük sonucunda

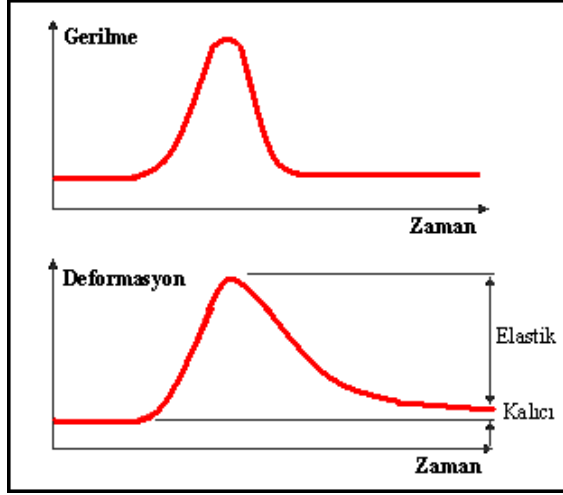
oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Bitümün statik yükler altındaki visko-elastik davranışı [1]

Şekil 3.1, bitümlü bir malzemenin statik yüklerle 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 elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zaman geçtikçe de bir miktar daha toparlanma olmaktadır. Bu durum “gecikmiş elastisite” olarak isimlendirilmekte ve sonuç olarak geri kazanılamayan bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir [1].

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 [1]

Şekil 3.2’de; deformasyon-zaman grafiğinde, yükten önce ve sonra ortaya çıkan 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 olabilir fakat bunun gibi milyonlarca dingil yükünün uygulanması sonucunda kalıcı şekil değiştirmelerin toplamı büyür ve kaplamada kalıcı deformasyon oluşturur. Yukarıdaki her iki durumda da deformasyonlardaki artış; yüksek sıcaklık, ağır veya hareketsiz trafik etkisiyle olmaktadır [1].

Modifiyerlerin başlıca görevlerinden biri de, bitümün veya bitümlü sıcak karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini, başka sıcaklıklardaki bitüm veya bitümlü karışım özelliklerini olumsuz yönde etkilemeksizin arttırmaktır. Bu işlem, karışımın toplam visko-elastik tepkisini azaltmak ve bununla birlikte kalıcı şekil değiştirmede azalma meydana getirmek için bitümün sertleştirilmesi, kalıcı şekil değiştirmeyi azaltmak için bitümün elastik bileşenini çoğaltarak viskoz bileşeni azaltarak gerçekleştirilmektedir. Bitümün sertliğinin artmasıyla karışımın da sertliğini artacak ve dolayısıyla malzemenin yük yayma yeteneği ile kaplamanın yapısal mukavemetini ve beklenen tasarım ömrünü iyileştirecektir [1].

3.3. Bitüm Katkı Maddelerinin Sınıflandırılması

Bitüm katkı maddeleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve katkı maddesinin bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma Çizelge 3.1’de verilmiştir [1,16].

Çizelge 3.1. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması [1]

Tip	Özellikler	Modifiyerlerin Bağlayıcı Kıvamına Genel Etkisi
1. Filler	Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül Karbon Siyahı Sülfür	Sertleşme
2. Genleştirici (Ekstender)	Sülfür, Lignin (Odun Özü)	Sertleşme
Kauçuk Doğal Lateks Yapay Lateks Blok Kopolimer İşlenmiş Kauçuk	POLİMERLER Doğal Kauçuk Strene-Butodien veya SBR Strene-Butodien- Strene veya SBS Dönüştürülmüş Kauçuk Poliyeten Polipropilen EVA, Etil-Vinil-Asetat PVC, Polivinil Klorid	-
4. Plastik		Sertleşme
5. Bileşim		3 ve 4’deki polimerlerin karışımı
6. Fiber	Doğal: Asbest Taş Yünü Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleşme
7. Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleşme
8. Antioksidan	Kurşun Karışımları Karbon, Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları Sertleştirme ve Doğal Asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleşme
10. Soyulma Önleyici	Aminler, Kireç	Yumuşatma

Yaygın olarak kullanılan bazı modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi Çizelge 3.2’de, bundan ayrı olarak bitümlü karışımlara eklenen kimyasal katkıların olumlu etkileri Çizelge 3.3’de verilmektedir.

Çizelge 3.2.Yaygın olarak kullanılan modifiyerlerin bağlayıcı üzerindeki etkisi [1]

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(AtaktikPolipropilen)E VA (Etilen Vinil Asetat)	Sertlik, Penetrasyon değeri Frass kırılma noktası, Yumuşama noktası
SBS(Stren-Butodien-Stren)	Penetrasyon değeri, Yumuşama noktası Elastik geri dönüş, Düşük sıcaklık kırılmalılığı
Solvent	Viskozite
Emülsifikasyon	Viskozite, Islatma kabiliyeti, Uygulama sıcaklığı
Islatma Ajanları	Islatma kabiliyeti, Adezyon

Çizelge 3.3.Bitümlü karışımlarda kimyasal katkıların olumlu etkileri [1]

Kimyasal Katkıların Rolü	Kimyasal Katkılar					
	Hidrate Kil	Portland Çimentosu	Manganez Modifiyesi	Katyonik Yüzey Aktif Ajanları	Sülfür	Organik Polimer
Yaşlanma	x			x		
Nem hasarı	x			x		
Agrega bağlayıcı değışikliğı			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
Soyulma	x		x			
Sertlik	x		x		x	

x: Olumlu etki

Günümüzde yaygın olarak kullanılan doğal ve üretilmiş modifiyer çeşitleri ve bu modifiyerlerin bitümlü karışımlarda kullanılması ile oluşabilecek ana kusurları azalttığı ispatlanan, ifade edilen veya iddia edilen sınıflandırması ve muhtemel faydaları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yaygın olarak kullanılan asfalt modifiyerlerin muhtemel olumlu etkileri [1]

Modifiyer Tipi	Sınıfı	Bozulmalara Etkisi				
		KD ¹	YÇ ²	DSC 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			
Polimerler-Plastomerler	Doğal kauçuk	x				
	Ethylene vinyl acetate (EVA)	x	x			
	Ethylene propylene diene monomer (EDPM)	x				
	Ethylene acrylate (EA)	x				
	Polyethylene (low density and high density)	x		x		
Ufalanmış kauçuk Oksidanlar	Farklı boyutlar, iyileştirmeler ve işlemler	x	x	x		
	Manganez bileşikleri	x				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			x		
	Naftenik					
	Parafmiks/mum			x		
	Vakum gaz yağı			x		
	Asfaltener: yüksek işlem reçineler	x				
	SDA asfaltener	x				
	Asfaltener: DEMEX Asfaltener	x				
	Shale oil				x	x
	Tall oil					
	Doğal asfaltlar: Trinidad	x	x	x	x	
Soyulma önleyiciler	Aminler: Amidoaminler				x	
	Polyaminler				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				
Antioksidanlar	Mineral	x				
	Karbamatlar: Kurşun			x		x
	Çinko			x		x
	Siyah karbon	x				x
	Kalsiyum tuzlar					x
	Sönmüş kireç				x	x
Aminler	Fenollar					x
	Aminler				x	x
¹ : Kalıcı Deformasyon		⁴ : Nem Hasarı				
² : Yorulma Çatlağı		⁵ : Yaşlanma				
³ : Düşük Sıcaklık Çatlağı		x: Olumlu etki				

3.4. Prina ve Literatür Taraması

Prina, zeytinyağı üretimi sonrasında çekirdek, kabuk ve posadan oluşan bir yan üründür. Ülkemiz, 91.700.000 adet zeytin ağacı ve 1.800.000 ton zeytin üretimi dünyada zeytin üretiminde 4. sıradadır. Bu üretimin yaklaşık %75'i zeytinyağı üretiminde değerlendirildiği ve zeytinyağı üretiminden %35-45 prina elde edildiği göz önüne alınırsa ülkemizde yıllık 472.500-540.000ton prina elde edilmektedir [22].

Prina hayvan yemi üretimde kullanılmaktadır. Ciddi miktarda atık madde potansiyeline sahip prinanın ülkemizde endüstriyel atık olarak kirliliğe de sebep olduğu görülmektedir. Bu sebeple atık madde olarak ortaya çıkan prinanın çevre kirliliğine etkisini azaltmak için inşaat sektörü alanında kullanılması büyük bir önem oluşturacaktır [22].

Günümüzde endüstriyel sektörün gelişmesiyle çeşitli atık maddeler oluşmaktadır. Bu atık maddeler çevresel kirliliğine sebep olduğundan inşaat sektöründe katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Endüstriyel üretim sonucu oluşan bazı atıkların karayolu mühendisliğinde gerek bitüm gerekse BSK modifikasyonunda bir katkı olarak kullanılma potansiyeli olduğu düşünülmektedir. Bu amaçla, bu katılardan biri olan prinanın bu çalışmada bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi ve BSK kaplamaların performans özellikleri üzerindeki olumlu etkisi araştırılmıştır.

Son yıllarda bitüm BSK'ların performansını geliştirmek amacıyla polimer kökenli çeşitli katkılar, filler malzemeler, çeşitli sanayi atıkları, çeşitli yağlar ve endüstriyel atıklar kullanılmış ve kullanılmaya da devam edilmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda bir endüstriyel atık olan prinanın bu amaçla şu ana kadar hiç kullanılmadığı görülmüştür. Ancak bir filler atık malzeme olan, prinaya benzeyen katkı maddeleri bitüm ve karışım modifikasyonu için sıkça kullanılmıştır.

Üstüncöl ve Turabi yaptıkları çalışmada, mermer tozu, uçucu kül, fosfo alçı ve cam tozu gibi endüstriyel atıkların filler malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda; genel olarak atık filler oranı arttıkça (cam tozu dışında) stabilite ve boşluk oranının arttığı, akma değerinin azaldığı ve bu sebeple BSK'larda endüstriyel atıklar kullanılarak üretilen yol kaplamalarının iyi bir dayanıma sahip olacağı sonucuna varmışlardır [23].

Mistry ve Roy yaptıkları çalışmada uçucu külün filler malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada farklı bitüm içeriklerinde (%0.5'lik artışlarla %3.5-6.5), %2'lik hidratlı kireç (HL) kontrol karışımı olacak şekilde ve ayrıca %2, 4, 6 ve 8 oranlarında uçucu kül (FA) filler malzemesi olarak bir dizi Marshall numunesi hazırlanmıştır. Çalışmanın sonucunda; düşük bitüm içeriğinde filler oranının artmasıyla stabilitenin arttığı, bitüm içeriğinin artmasıyla beraber filler oranı artış göstermesine rağmen stabilitenin düştüğü sonucuna varmışlardır [24].

Likitlersuang ve Chompoorat (2016), çimento ve uçucu külün modifiye asfalt beton karışımları üzerindeki performansını araştırmışlardır. Bu çalışmada çimento, uçucu kül ve %5'lik bir asfalt içeriği ile toplam 11 grup örneği değerlendirmişlerdir. Bu karışımların mekanik özellikleri 25° C ve 55° C'de belirlemişler ve nem hasarı potansiyellerini belirlemek için 55° C 'de nem duyarlılık testlerini yapmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, çimento ve uçucu külün, asfalt karışımların dayanıklılığını, sertliği ve kayma direncini arttırdığı tespit edilmiştir [25].

Sharma ve arkadaşları (2010), bitümlü sıcak karışımlarda taş tozu yerine filler olarak uçucu kül kullandıkları bir çalışmada uçucu külün karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda karışımların Marshall stabilitesi, kalıcı stabilite, çekme mukavemeti oranı ve statik sünme testleri gibi mukavemet ve dayanıklılık özellikleri üzerinde optimum %7 oranında uçucu külün iyi performans gösterdiği görülmüştür [26].

Al-Mansob ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada, doğal kauçuğun (ENR) bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı yüzdelerde ENR ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların geleneksel ve reolojik özellikleri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda ENR ile modifiye edilmiş bitümlerin sıcaklığa karşı duyarlılıklarının azaldığı, viskozite, sertlik ve elastikliklerinin arttığı, ayrıca düşük sıcaklıklarda yorulma davranışını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır [27].

Caro ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada, tarımsal atıklardan üretilen biyomodifiyerlerin bitüm üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla tarımsal atık olarak şeker kamışı küspesi, mısır koçanı ve pirinç kabuğu kullanılmışlardır. Çalışmada çeşitli yüzdelerde modifiye bağlayıcılar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu modifiye bağlayıcılar iki farklı frekansta (0.1 ve 100 Hz) DSR deneyi

uygulanmışlardır. Çalışma sonucunda tarımsal atıklarla modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izine karşı dayanımını arttırdığı ve bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını arttırdığı sonucuna varmışlardır [28].

Sargın ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada, pirinç kabuğu külünün bitümlü karışımlarda filler olarak değerlendirilmesini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı yüzdelerdeki pirinç kabuğu külü eklenmiş bitümlü karışımlara Marshall Stabilite (MS) deneyi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda pirinç kabuğu külünün stabiliteyi arttırdığı ve akma miktarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca pirinç kabuğu külü kullanımı optimum bitüm yüzdesinde azalma sağladığı sonucuna varmışlardır [29].

Al, A. ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada, nişastanın bitüm ve modifiye edilmiş taşmastik asfalt üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı yüzdelerde hazırlanmış nişasta katkılı bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri incelemişlerdir. Ayrıca modifiye edilmiş taşmastik asfalt numuları üzerinde Marshall Stabilite deneyi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda nişasta modifiyeli bitüm numularının sertleştiği penetrasyon sınıfının değiştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca taşmastik asfalt numuları üzerine uygulanan Marshall stabilite deneyi sonucunda nişasta katkılı numuların stabilite değerinin arttığı, akma miktarında ise azalma sağladığı sonucuna varmışlardır [30].

Chebil, S. ve arkadaşları(1999) yaptıkları çalışmada, yumuşak ağaç kabuğu külünün bitüm üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla piroliz edilmiş yumuşak ağaç kabuğu kömürünü çeşitli oranlarda bitüme katmışlardır. Çalışmada modifiye edilmiş bitümlerin fiziksel ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yumuşak ağaç kabuğu kömürünün eklenmesiyle bitümde sertleşme meydana geldiği ve bunun sonucunda bitüm performansında iyileşme sağladığı sonucuna varmışlardır [31].

Portugal ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, mısır yağı ile hazırlanan modifiye bitümlerin reolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla çeşitli oranlarda eklenen mısır yağı ile modifiye edilmiş bitümler üzerinde penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi, RTFOT ve DSR deneyi yapmışlardır. Çalışma sonucunda bitümde sertleşme ve tekerlek izine karşı dayanımın arttığı sonucuna varılmıştır [32].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, katkı maddesi olarak prina kullanılarak, prinanın bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle saf bağlayıcı ile agreganın fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar incelenerek, saf bağlayıcıya ağırlıkça %5,10, 15 ve 20 oranlarında prina eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Hazırlanmış olan saf ve modifiye bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite) testlerle, reolojik özellikleri ise Superpave bağlayıcı deneyleri (RV, DSR ve BBR) ile belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen agrega gradasyonuna göre Marshall dizayn yöntemi kullanılarak optimum bitüm içeriği tespit edilmiştir. Belirlenen optimum bitüm içeriği ile farklı oranlarda hazırlanmış olan prina katkımodifiye bağlayıcılar kullanılarak Marshall karışım numuneleri hazırlanmış ve bu karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS), Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) ve Statik Sünme deneyleri uygulanmıştır.

4.1. Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi

Bu tez çalışmasında bağlayıcı olarak Karayolları 8.Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen B 160/220 penetrasyon sınıfına sahip bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan bitümlü bağlayıcının bazı fiziksel özellikler geleneksel deneylerle tespit edilerek sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Saf bağlayıcının (B160/220) fiziksel özellikleri

Deneyler	Deney Standardı	B 160/220	
		Şartname Limitleri	Ölçülen Değer
Penetrasyon (0.1mm)	EN 1426	160-220	163
Yumuşama Noktası(°C)	EN 1427	35-43	41,6
Düktülite (cm)	TS 119	min 100	>100
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	min 220	244
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0 – 1,1	1,038

4.2. Agrega Seçilmesi

Çalışmada, agregamalzemesi olarak olarak Karayolları 8.Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen kalker kökenli kırmataş malzeme kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agreganın gradasyonu Çizelge 4.2'de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2.Çalışmada kullanılan agregagradasyonu

Elek Boyutu (mm-no)	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,600	0,300	0,150	0,075
	(3/4")	(1/2")	(3/8")	(#4)	(#8)	(#16)	(#30)	(#50)	(#100)	(#200)
% Geçen	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5

Çizelge 4.3. Agreganın fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Standardı	Şartname Limiti	Hesaplanan Değer
Kaba agregazahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 127	-	2,70
Kaba agregahacim özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,67
Kaba agregasu emme yüzdesi		max. 2	0,47
İnce agregazahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 128	-	2,75
İnce agregahacim özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,63
İnce agregasu emme yüzdesi		max. 2	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM D131	max. 30	27
Donma Kaybı (MgSO ₄) (%)	ASTM C88	max. 10	5
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D4791	max. 10	5

4.3.Kullanılacak Katkı Oranlarının Seçilmesi ve Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada, katkı malzemesi olarak kullanılmak üzere, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği tarafından temin edilen zeytin posası (prina) kullanılmıştır. Prina'nın genel özellikleri İnönü Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarında tespit edilmiş, elde edilen veriler Çizelge 4.4'de, prina'nın kimyasal bileşimi ve özellikleri ise Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Prina'nın genel özellikleri

Özellik	PRİNA
Form	Ultra ince amorf toz (solunabilir toz)
Koku	Kokusuz
Çözünürlük(Su)	Çözünmez/Hafifçe Çözünür
Çözünürlük(Organik Çözücüler)	Çözünmez/Az Çözünür
Yoğunluk	1.9 gr/cm ³

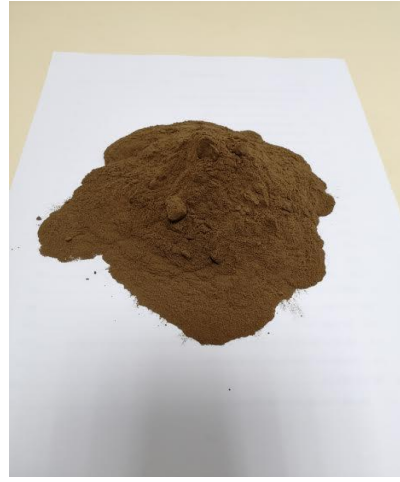
Çizelge 4.5. Prinanın kimyasal bileşimi ve özellikleri

Element İçeriği	C	H	N	S	Diğer
%	53	12,37	7,515	3,087	24,03

Çalışmada modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak B 160/220 saf bitüm etüvde 150 °C'de ısıtılmıştır. Daha sonra akışkan hale gelen saf bitüme, bitüm ağırlığının %5, 10, 15 ve %20 oranlarında prina eklenerek modifikasyon işlemi tamamlanmıştır. Modifikasyon işlemi aynı sıcaklıkta 1000 devirde 1 saat boyunca karıştırılarak yapılmıştır. Şekil 4.1(a)'da karışımların hazırlanmasında kullanılan karıştırma cihazı, (b)'de ise karışımlarda kullanılan prina gösterilmiştir. Tüm modifiye bağlayıcılar için aynı işlem sırası takip edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Karıştırma cihazı(a),karışımlarda kullanılan prina(b)

Çalışmada elde edilmiş olan saf ve modifiye bitümler sırasıyla; B, B+%5P, B+%10P, B+%15P ve B+%20P olarak adlandırılmıştır.

4.4. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

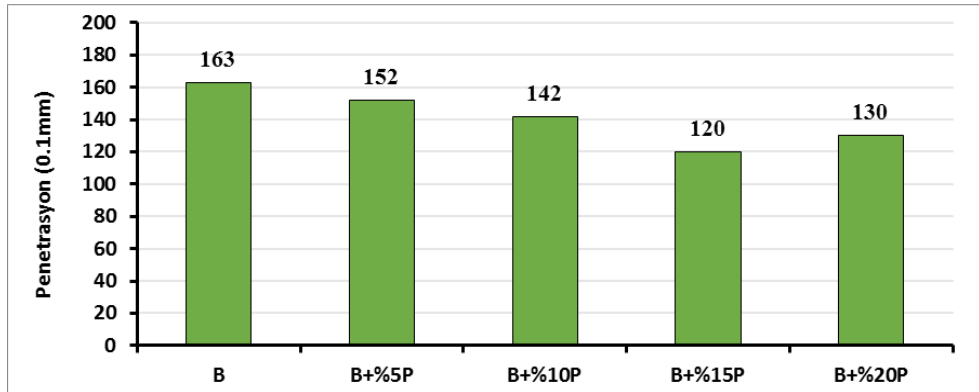
Hazırlanan saf ve prina modifiyeli bağlayıcılar üzerinde ilk olarak fiziksel yapılmıştır. Daha sonra kısa süreli (RTFOT) yaşlandırma ve uzun süreli (PAV) yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV kalıntısı bağlayıcılar Superpave testlerine de tabii tutulmuştur Tüm deney sonuçları sırasıyla alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.4.1. Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri; penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite deneyleri ile belirlenmiş olup deney sonuçları Çizelge 4.6' da, penetrasyon değerindeki değişim ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri

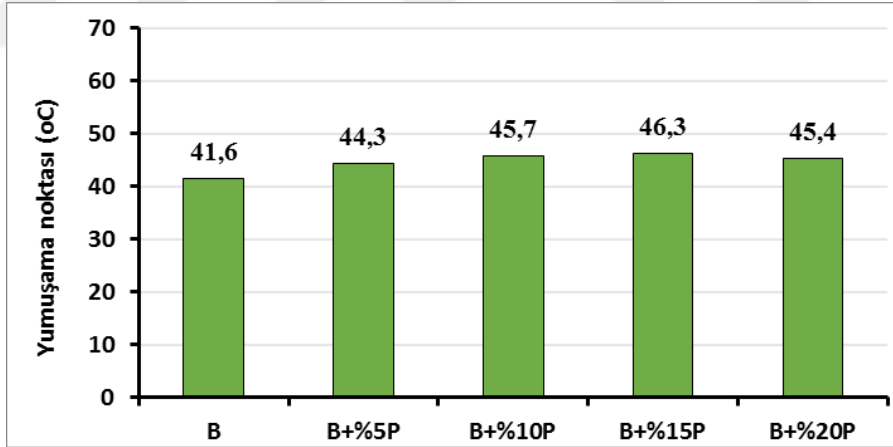
Bağlayıcı Türü	Penetrasyon (0.1mm)	Yumuşama Noktası(°C)	Düktülite (cm)
B	163	41,6	125
B+%5P	152	44,3	120
B+%10P	142	45,7	111
B+%15P	120	46,3	107
B+%20P	130	45,4	105



Şekil 4.2. Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi saf bitüme prina katkı ilavesi ile %15 prina oranına kadar penetrasyonda önce bir azalma meydana gelmiş, fakat katkı oranının artmaya devam etmesiyle penetrasyon değerindedaha sonra bir artış meydana gelmiştir. Bu durumu, prina ilavesiyle modifiye bitümde önce sertleşme görüldüğü ama daha sonra katkı oranının artmasıyla tekrar yumuşamaya başladığını ifade etmek mümkündür. Bu yumuşama durumu, prina katkısının yoğunluğunun fazla olması sebebiyle, karıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra karışımın soğumaya bırakıldığında kısmende olsa dibe çökmesi sebebiyle olacağını ifade etmek mümkündür. Bu sertleşme veya penetrasyon değerindeki azalma sonucunda %15 prina katkılı modifiye bitümün penetrasyon sınıfı B 100/150 olarak değişmiştir. Bunun sonucu olarak, nispeten daha ılıman bölgelerde kullanılabilen B160/220 penetrasyon dereceli bağlayıcının %15 prina ilave edilmesiyle daha sıcak bölgelerde de kullanılabileceğini ve bitümden kaynaklı kalıcı deformasyonlara karşı daha elverişli olduğunu ifade etmek mümkündür.

Saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim Şekil 4.3’de verilmiştir.

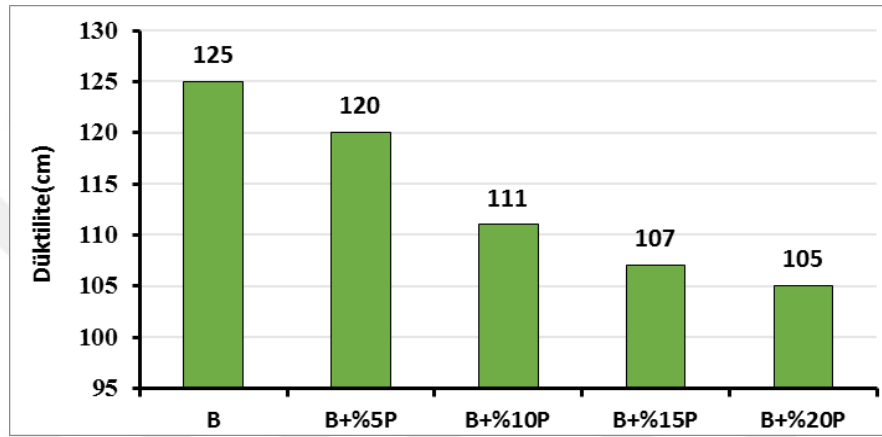


Şekil 4.3. Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.3’de görüldüğü üzere B 160/220 saf bitümüne prina eklenmesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Prina modifiyeli bitümlü karışımlarda katkı oranı arttıkça yumuşama noktası değeri %15 oranına kadar artış gösterip, daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Bu karışımlarda en yüksek yumuşama noktası değeri %15 prina oranında iken elde edilmiştir. Ayrıca yumuşama

noktası deney sonuçlarının penetrasyon sonuçları ile uyumluluk gösterdiğini de söylemek mümkündür. Kısacası bağlayıcılar ilk olarak sert bir kıvama gelmiş, daha sonra tekrar yumuşama eğilimi göstermiştir. Düşük penetrasyon ve yüksek yumuşama noktası değerleri, %15 prina ilavesiyle bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını ve daha sıcak bölgelerde kullanılabileceğini ifade etmek mümkündür.

Saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların düktülite değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bağlayıcıların düktülite değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi B 160/220 saf bitüme prina ilave edilmesiyle düktülite değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Prina ilavesiyle modifiye bitümlerin düktülite değerlerinde devamlı bir azalma gözlemlenmiştir. Düktülite değerindeki bu azalma, bitümlü bağlayıcının uzama kabiliyetinin ve kohezyon mukavemetinin düşmesini ifade etmektedir.

Çalışmada ayrıca saf ve prina katkılı bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığının bir ölçüsü olan penetrasyon indeksi (PI) değerleri de değerlendirilmiştir. Bağlayıcıların PI değeri, formül 1 ve formül 2 yardımıyla hesaplanmıştır. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların PI değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

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

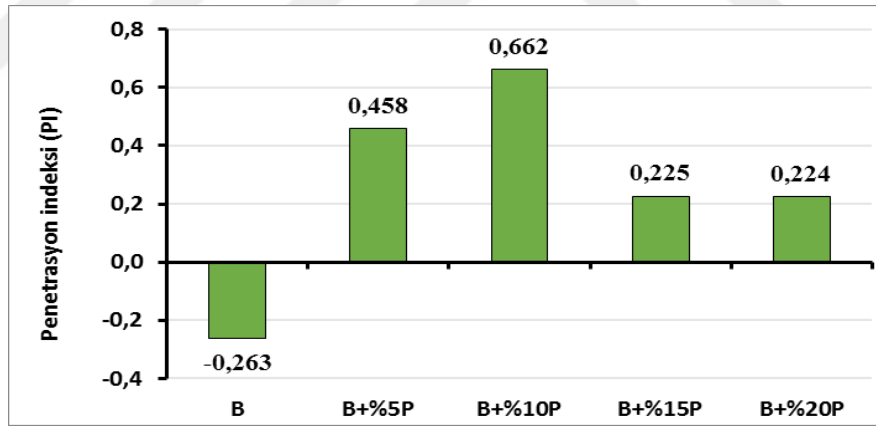
$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (4.2)$$

Formüldeki P_{25} , bitümün 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası değerini belirtmektedir. PI değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [52].

Çizelge 4.7. Penetrasyon İndeksi (PI) sonuçları

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B	-0,263
B+%5P	0,458
B+%10P	0,662
B+%15P	0,225
B+%20P	0,224

Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi B 160/220 saf bitüme prina ilavesi ile PI değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların PI değerleri sırasıyla -0,263; 0,458; 0,662; 0,225; ve 0,224 olarak elde edilmiştir. Prina ilaveli bağlayıcıların PI değerlerindeki değişim Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Bağlayıcıların penetrasyon indeksleri

Prina ilavesiyle bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin önce düştüğü sonra tekrar yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Saf bitüme göre sıcaklık hassasiyeti en az olan katkı oranının %10 prina katkılı modifiye karışım olduğu görülmektedir.

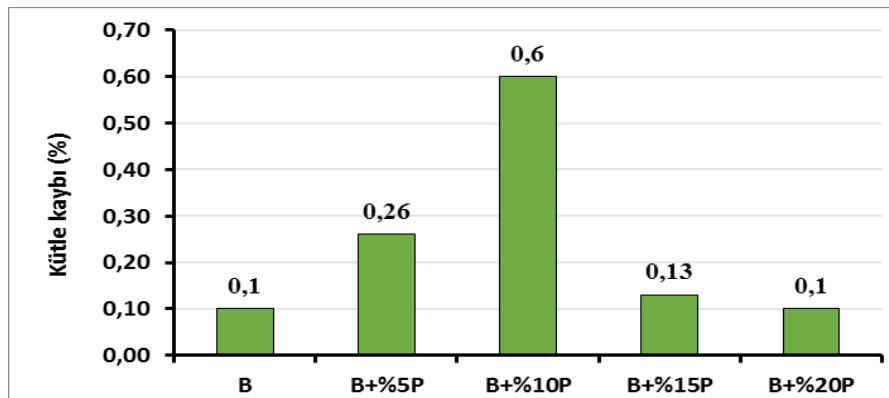
4.4.2. Saf ve Prina Modifiyeli Bağlayıcıların Yaşlandırılması

Hazırlanan saf ve prina katkılı bağlayıcılar dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile kısa süreli yaşlandırma deneyine tabii tutulmuştur. Bu amaçla bağlayıcılar 150 °C sıcaklıkta ısıtılarak 8 adet deney şişesinin herbiri içerisine yaklaşık 35±0,5 gr. doldurularak 163 °C sıcaklığa ulaşmış olan RTFOT cihazının içindeki dönel tabla bölmelerine yerleştirildi. Tabla dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle deney başlatıldı. Deney sonucunda kütle kayıplarının hesabı için, önceden darası alınmış ve tartılmış olan 2 şişe, yaşlandırma işleminden sonra tartılarak kütle kayıpları hesaplandı. Geriye kalan 6 şişe ise diğer performans deneylerinde kullanılmak üzere başka kaplara alınarak muhafaza edildi.

Saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların kütle kayıpları Çizelge 4.8’de, bağlayıcıların kütle kaybındaki değişimleri ise Şekil 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Bağlayıcıların kütle kayıpları

Bağlayıcı Türü	Şartname Limitleri	M1	M2	Kütle Kaybı	Ort. Kütle Kaybı
B	max. 1	194,36	194,1	0,13	0,10
		194,42	194,28	0,07	
B+%5P		201,93	201,12	0,40	0,26
		190,12	189,89	0,12	
B+%10P		192,03	191,86	0,09	0,6
		202,72	202,65	0,03	
B+%15P		188,86	188,62	0,13	0,13
		192,6	192,36	0,12	
B+%20P		191,92	191,76	0,08	0,10
		192,25	192,02	0,12	



Şekil 4.6. Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi saf bitüme prina ilave edilmesiyle kütle kaybında önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu değişim oranları saf bitüme göre farklılıklar göstermiştir. En fazla kütle kaybı %10 prina ilaveli modifiye bağlayıcıda görülmüştür. KTŞ’ye göre kütle kaybının en fazla %1 olması istenmektedir. Prina eklenmesiyle elde edilen bağlayıcılardaki kütle kaybı sonuçlarının şartname limitlerinin aşmadığı, bu sebeple de bağlayıcıların sıcaklık ve oksidasyona karşı oldukça dirençli olduğunu ifade etmek mümkündür.

4.5. Bağlayıcıların Performans Deneyleri

Bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklık performans özelliklerinin tespit edilmesi için, Superpave bağlayıcı şartnamesine göre, bağlayıcılara RV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Yaşlandırılmamış saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların karıştırma-sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla RV deneyi uygulanmıştır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyelerini belirlemek amacıyla, yaşlandırılmamış bağlayıcılarla kısa dönem yaşlandırılmış (RTFOT) bağlayıcılar DSR deneyine tabii tutulmuştur. Bağlayıcıların orta ve düşük sıcaklıktaki performans seviyelerini belirlemek amacıyla, uzun dönem yaşlandırılmış (PAV)bağlayıcılar DSR ve BBR deneylerine tabii tutulmuştur. Performans deneyleri sonucunda bütün bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları ile yüksek ve düşük sıcaklık performans sınıfları belirlenmiştir.

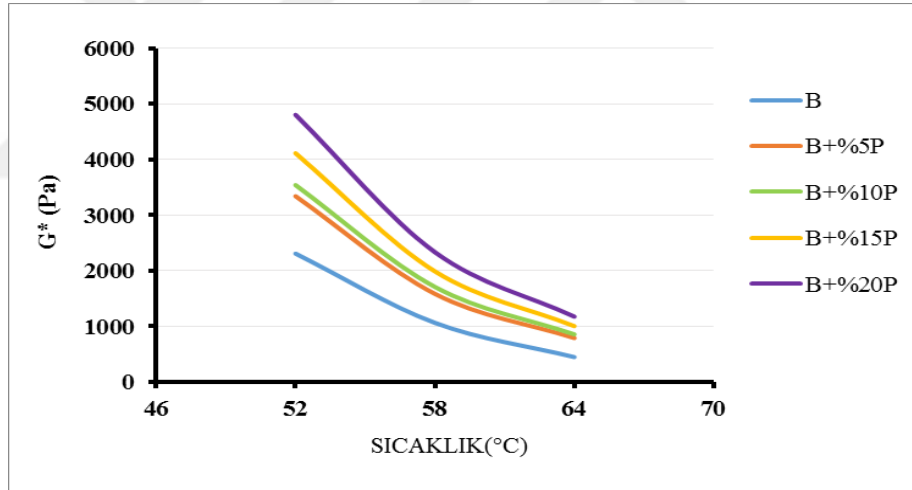
4.5.1. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi (AASHTO TP5)

Bu deney ile bağlayıcıların yapımından hemen sonra yüksek servis sıcaklığında kaplamanın tekerlek izi oluşumuna ve ilerleyen servis ömründe orta servis sıcaklığında yorulma çatlak oluşumuna karşı göstereceği direnç belirlenmektedir. Deney orijinal, kısa dönem yaşlandırılmış (RTFOT) ve uzun dönem yaşlandırılmış (PAV) bağlayıcılara uygulanmıştır. Deney, orijinal bağlayıcılar üzerinde 52 °C, 58°C, 64°C sıcaklıklarda, RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 52 °C, 58°C, 64°C, 70 °C sıcaklıklarda, PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde ise 16 °C, 19°C, 22°C ve 25 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. Orijinal saf ve prina katkılı bağlayıcılar üzerine uygulanan DSR sonuçları Çizelge 4.9’ da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR sonuçları

Sıcaklık (°C)	B	B+%5P	B+%10P	B+%15P	B+%20P
	G* (Pa)				
52	2311	3342,4	3542,1	4114,3	4805,1
58	1065	1586,3	1711,2	1991	2335,6
64	450	791,91	857,87	1006,4	1177
δ (°)					
52	79,89	79,5	79,7	79,5	79,5
58	82,74	82,1	82,4	82,1	82,3
64	84,39	84	84,5	84,1	84,2
G*/sinδ (Pa)					
52	2347,45	3399,3	3600,1	4184,37	4886,93
58	1073,61	1601,5	1726,4	2010,08	2356,85
64	452,17	796,27	861,84	1011,76	1183,06

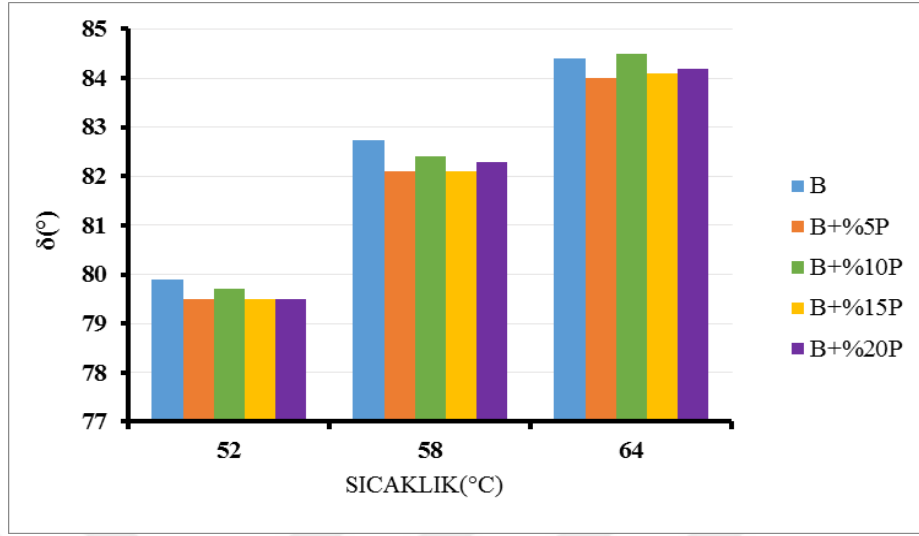
Orijinal bağlayıcılara ait kayma modülü (G*)'ın sıcaklıkla değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Orijinal bağlayıcıların kayma modülü (G*) değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla kayma modülü değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak herhangi bir sıcaklık dikkate alındığında katkı oranının artışına bağlı olarak kayma modülü değerinin önemli bir ölçüde arttığı görülmektedir. Bu sebeple prina ilavesinin asfalt deformasyonlarına karşı direncini arttırdığını ifade etmek mümkündür. Çünkü G*, tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam dirençtir. Bu durumda G*'ın artması, bağlayıcının deformasyonlara karşı direncin arttığının göstergesidir.

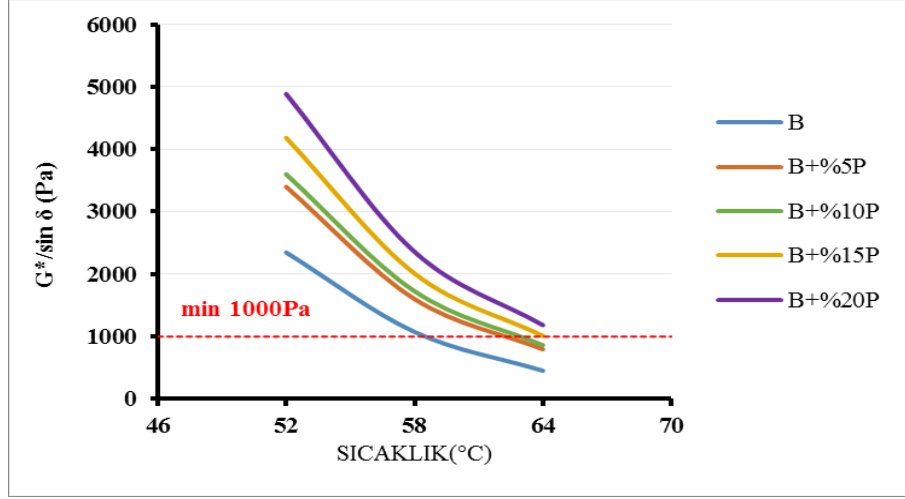
Orijinal bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Orijinal bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.8 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla bağlayıcıların faz açıları doğal olarak artmaya başlamıştır. Faz açısının artması malzemenin viskoz davranmaya başladığını göstermektedir. Bağlayıcının viskoz davranışı, kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azaldığını ve daha fazla kalıcı deformasyon yapacağını ifade etmektedir. Ancak bağlayıcıların herhangi bir sıcaklıktaki faz açısı değerleri incelendiğinde saf ve prina katkılı numunelerin değerlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmektedir. Bu durumda prinanın bağlayıcıların viskoziteleri üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Katkı oranının artmasına rağmen bağlayıcı akıcılığının değişmemesi, onun elastik kıvamını koruduğu anlamına geldiğinden olumlu bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

Superpave şartnamesine göre, bağlayıcıların tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değeri 1000 Pa’ın altına düşünceye kadar deney sıcaklığı artırılarak deney devam edilmiştir. Orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.9’ da verilmiştir.



Şekil 4.9. Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

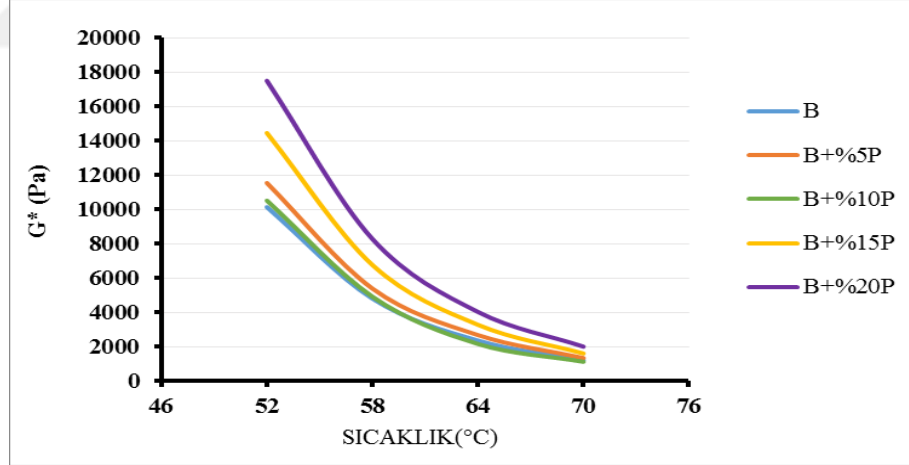
Şekil 4.9’da görüldüğü gibi bütün bağlayıcılar 52°C ve 58 °C sıcaklıkta $G^*/\sin \delta$ şartname limitini (min.1000 Pa) sağlamıştır. 64 °C sıcaklıkta, sadece %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcılar şartname limitini sağlamıştır. Tüm bu sonuçlardan hareketle; saf, %5 ve %10 Prina modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 58-Y olarak, %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı ise PG 64-Y olarak tespit edilmiştir. Saf ve prina katkılı bağlayıcıların farklı davranış sergiledikleri, prina katkısının tekerlek izi parametresine etki ederek yüksek sıcak performans sınıfını artırdığını söylemek mümkündür.

RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 52 °C, 58°C, 64°C, 70 °C sıcaklıkta yapılmış DSR deney sonuçları Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

Sıcaklık (°C)	B	B+%5P	B+%10P	B+%15P	B+%20P
	G* (Pa)				
52	10142	11549	10519	14465	17512
58	4802	5385,3	4911,4	6764	8281,6
64	2353	2675	2157,51	3275,7	4024,6
70	1208	1338,3	1118,1	1600,5	2000,8
δ (°)					
52	69,22	69,9	70,9	69,9	69,4
58	73,4	74,2	75,2	72,31	73,1
64	77,15	77,7	78,8	77,7	77,2
70	80,11	80,8	81,6	80,8	80,3
G*/sinδ (Pa)					
52	10847,64	12298,02	11131,82	15403,14	18708,21
58	5010,84	5596,76	5079,94	7099,71	8655,40
64	2413,44	2737,85	2199,40	3352,66	4127,16
70	1226,22	1355,74	1130,22	1621,36	2029,82

RTFOT kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerinin sıcaklık ile değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.

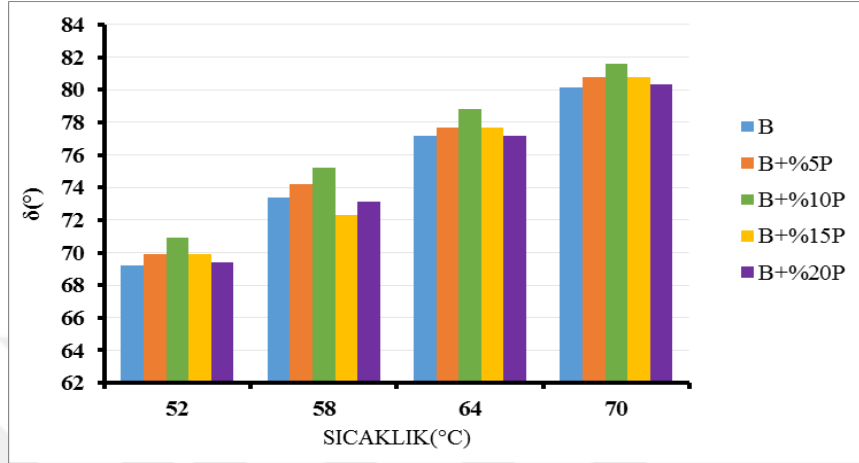


Şekil 4.10. RTFOT sonrası bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi RTFOT kalıntısı bağlayıcıların, sıcaklık arttıkça kayma modülü (G^*) parametresinin azaldığı görülmektedir. Kayma modülü parametresinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığı anlamına gelmektedir. Ancak herhangi bir sıcaklık incelendiğinde prina

oranı arttıkça modifiye bağlayıcıların kalıcı deformasyonlara karşı dirençlerinin önemli ölçüde artış göstereceği görülmektedir.

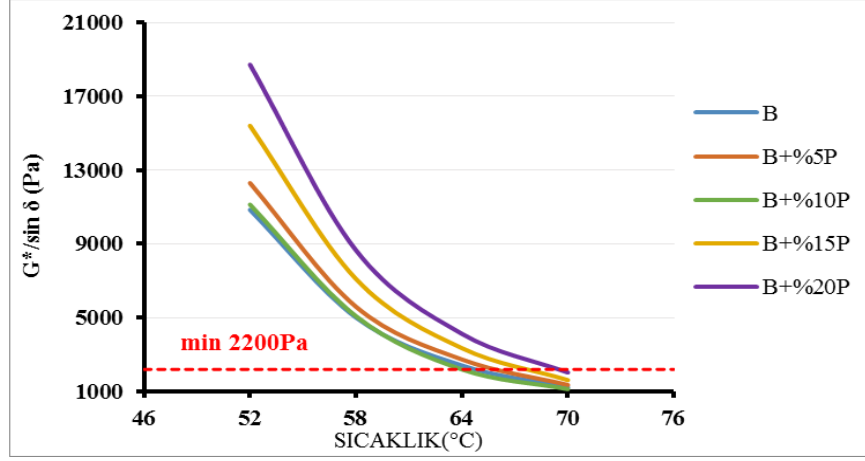
Şekil 4.11' de bağlayıcıların RTFOT sonrası faz açılarının sıcaklıkla değişimi verilmiştir.



Şekil 4.11. RTFOT sonrası bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda faz açısı parametresinin sıcaklıkla arttığı Şekil 4.11'de görülmektedir. Faz açısının sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Ancak bütün sıcaklıklarda katkı oranının artışına rağmen modifiye bağlayıcıların faz açısı değerlerinde saf bağlayıcıya göre önemli bir değişme görülmemiştir. Hatta aynı seviyede kaldığını söylemek mümkündür. Katkı oranının artmasına rağmen bağlayıcı akıcılığının değişmemesi, daha önce ifade edildiği gibi, olumlu bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesine göre RTFOT kalıntısı bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerleri min 2200 Pa olmalıdır. Çizelge 4.10’da görüldüğü gibi 52 °C ve 58 °C sıcaklıkta tüm bağlayıcıların şartname limitini sağladığı, 64°C sıcaklıkta sadece %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcıların şartname limitini sağladığı, 70 °C sıcaklıkta ise bağlayıcıların şartname limitini sağlamadığı görülmektedir.

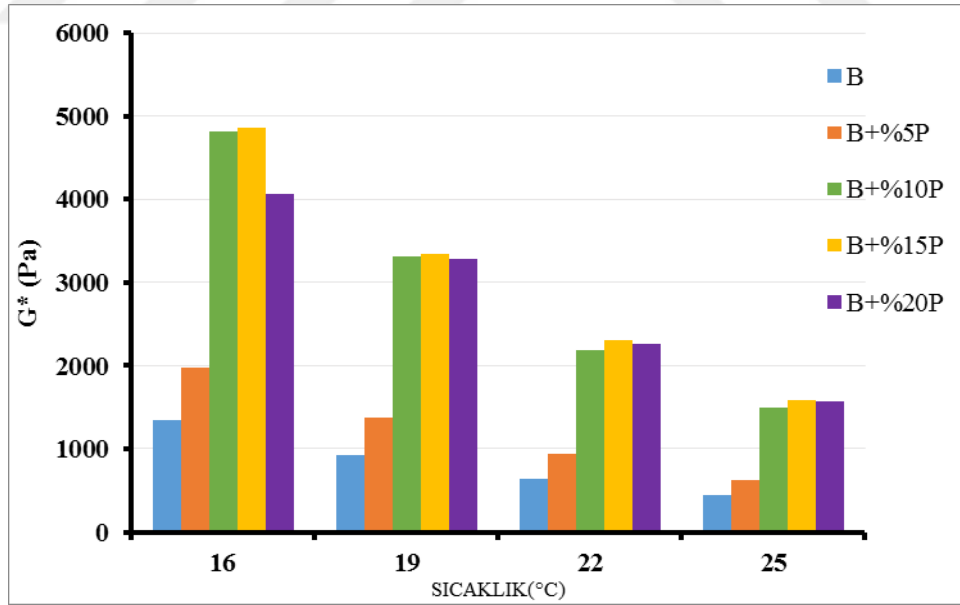
Orijinal bağlayıcılardan; saf, %5 ve %10 prina katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı değeri PG 58-Y olarak, %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcıların ise yüksek sıcaklık performans sınıfı değeri PG 64-Y olarak belirlenmişti. RTFOT kalıntısı bağlayıcıların da performans sınıfı değerleri değişmeyerek; saf, %5 ve %10 prina katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfı değeri PG 58-Y olarak, %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcıların ise yüksek sıcaklık performans sınıfı değeri PG 64-Y olarak kalmıştır.

Bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma performansı için PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 16 °C, 19°C, 22°C ve 25 °C sıcaklıkta yapılan DSR deney sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

Sıcaklık (°C)	B	B+%5P	B+%10P	B+%15P	B+%20P
	G* (Pa)				
16	1342,89	1983,1	4808,6	4854,7	4067,9
19	926,56	1374,4	3316	3338,5	3278,5
22	631,92	937,8	2192,2	2304,9	2265
25	443,13	627,82	1502	1588,2	1564,2
δ (°)					
16	37,7	39,2	38,6	38,1	37,1
19	39,5	40,9	40,5	39,9	39,6
22	41,2	42,8	42,5	41,6	41,2
25	42,9	44,8	44,4	43,3	41,5
G*.sinδ (Pa)					
16	821,21	1253,38	2999,99	2995,52	2453,8
19	589,36	899,88	2153,57	2141,48	2089,8
22	416,24	637,18	1481,03	1530,28	1491,9
25	301,65	442,38	1050,89	1089,22	1036,47

PAV kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G^*)'ın sıcaklıkla değişimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

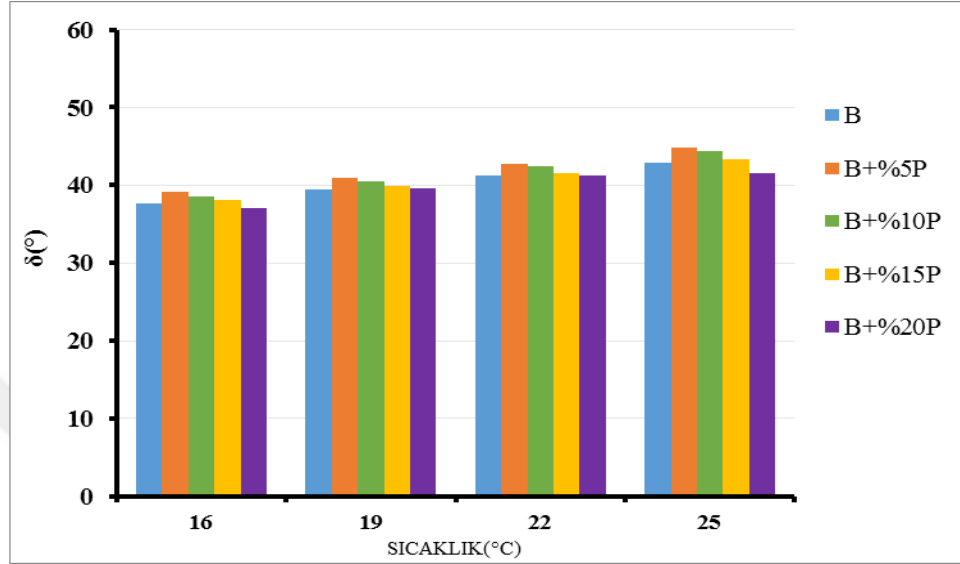


Şekil 4.13. PAV kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G^*)'ın sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, kayma modülü parametresinin sıcaklık arttıkça azaldığı

görülmektedir. Kayma modülü parametresinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığı anlamına gelmektedir.

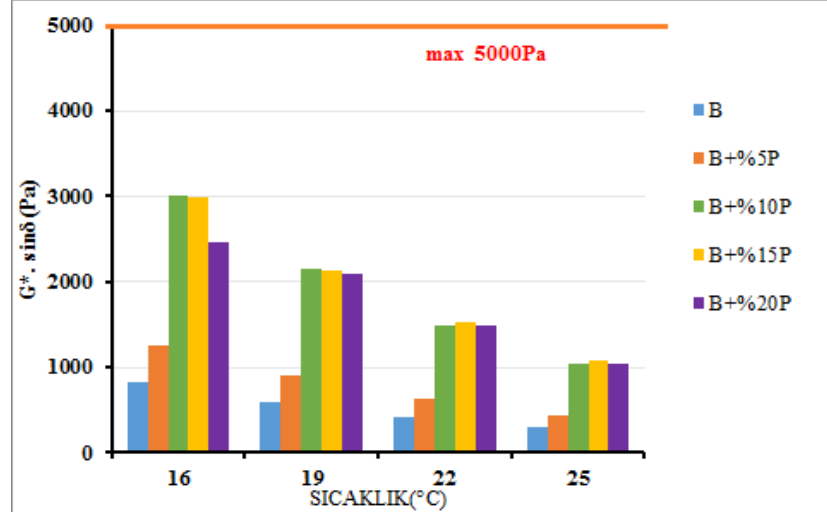
Şekil 4.14’ de PAV kalıntısı bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi verilmiştir.



Şekil 4.14. PAV kalıntısı bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda faz açısı parametresinin sıcaklıkla arttığı Şekil 4.14’de görülmektedir. Faz açısının sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Katkı miktarının ve sıcaklığın artmasıyla bağlayıcıların viskoz davranış gösterdiği ve kalıcı deformasyona karşı direncinin azaldığını söylemek mümkündür.

PAV sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen yorulma parametresi değeri olan $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.15’ de verilmiştir.



Şekil 4.15. PAV sonrası bağlayıcıların $G^*.sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde PAV kalıntısı bağlayıcıların Superpave şartnamesine göre $G^*.sin \delta$ değerlerinin 5000'i aşmaması istenmektedir. Bütün sıcaklıklarda %5, %10, %15 ve %20 prina katkılı bağlayıcılarda katkı oranının artmasıyla tekerlek izi parametresi olan $G^*.sin \delta$ değerinin 5000'i aşmadığı ve dolayısıyla bağlayıcıların orta sıcaklıklarda yorulma performansının iyi olduğunu ifade etmek mümkündür.

4.5.2. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

BBR deneyi ile bağlayıcıların düşük sıcaklık altındaki termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç tespit edilmektedir. Deney PAV kalıntısı numunelere uygulanmaktadır. Saf ve prina modifiyeli bağlayıcılar 150 °C sıcaklıkta ısıtılıp, alüminyum kaplara doldurulup soğumaya bırakıldı. Soğuyan numuneler kalıplardan çıkarılarak BBR cihazı içerisindeki sıvıya bırakıldı (-16 °C ve -22 °C) ve koşullandırma yapıldı. Deneyde kiriş numunesi cihaz mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatıldı ve 240 saniye süreyle kiriş numuneye 980±5 mN (100±5 gr) yük uygulandı. Deney bitiminde yük otomatik olarak kaldırılarak sünme sertliği ve m değeri hesaplanmış oldu.

Saf ve prina modifiyeli bitümlerin BBR deney sonuçları Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	Sünme Sertliği (MPa)	m-değer
B	-16	21,98	0,349
	-22	48,02	0,351
	-28	106,35	0,303
	-34	91,28	0,161
B+%5P	-16	21,64	0,347
	-22	64,14	0,387
	-28	77,58	0,22
	-34	178,46	0,254
B+%10P	-16	20,11	0,307
	-22	67,43	0,333
	-28	125,82	0,288
	-34	174,14	0,252
B+%15P	-16	29,49	0,362
	-22	85,04	0,409
	-28	132,04	0,312
	-34	248,99	0,259
B+%20P	-16	29,94	0,367
	-22	87,26	0,337
	-28	157,71	0,296
	-34	273,63	0,257

Superpave şartnamesine göre deney sıcaklığında bağlayıcıların rijitlik değerinin 300 MPa'dan fazla olmaması, m-değer'inin ise 0,300 den büyük olması gerekmektedir. Çizelge 4.12 incelendiğinde saf bağlayıcı ve %15 prina katkılı modifiye karışımın düşük sıcaklık performans derecesinin değeri -28°C olduğu, dolayısıyla performans derecesinin PG X-28 olarak alınabileceği, %5, 10 ve 20 prina katkılı modifiye karışımların düşük sıcaklık performans derecesinin ise -22 °C ve performans derecesinin PG X-22 olarak alınabileceği ifade edilebilir.

Bağlayıcıların hem yüksek hem de düşük sıcaklık performans sınıfları değerlendirildiğinde saf bağlayıcının performans sınıfı PG 58-28, %5 prina katkılı bağlayıcının PG 58-22, %10 prina katkılı bağlayıcının PG 58-22, %15 prina katkılı bağlayıcıların PG 64-28, %20 prina katkılı bağlayıcıların ise performans sınıfı PG 64-22 olarak belirlenmiştir.

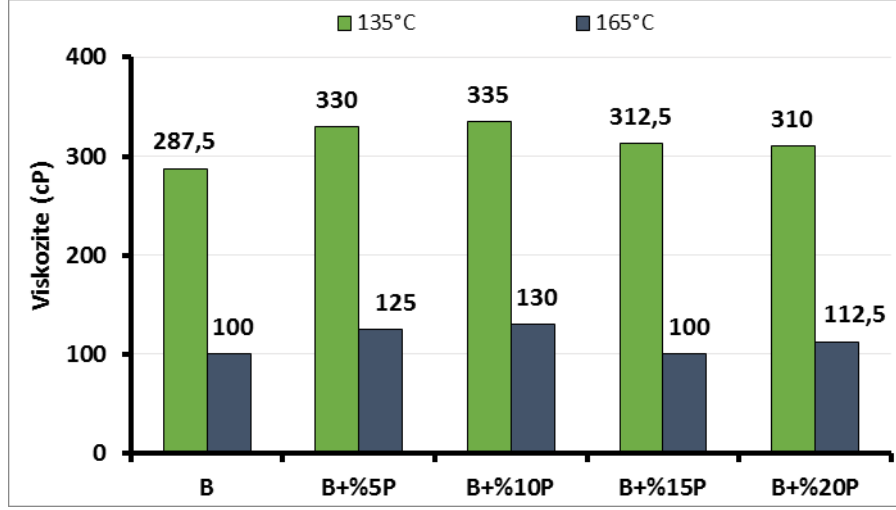
4.5.3. Dönel Viskozimetre (RV)Deneyi

Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için dönel viskozimetre (RV) deneyi yapılmaktadır. Bu amaçla saf ve modifiyeli bitümler, 135 °C ve 165 °C sıcaklıkta deneye tabii tutulmaktadır. Bağlayıcılar 150 °C de ısıtılarak yaklaşık 11 gr. kadar viskozite kabına doldurulur ve kap deney cihazına yerleştirilir. İstenilen deney sıcaklığına ulaşıldığında viskozimetre sıfırlanır ve 20 rpm. hızına ayarlanır. Cihaza no:27 mili takılır ve deney başlatılır. Deney esnasında sabit sıcaklığa gelen numune üzerinde otomatik olarak viskozite değeri saptanır. Bu şekilde elde edilmiş olan saf ve prina modifiyeli bağlayıcıların RV sonuçları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Bağlayıcıların RV sonuçları

Bağlayıcı Türü	Okumalar	Viskozite, cP	
		135°C	165°C
B	1	287,5	100
	2	287,5	100
	3	287,5	100
	Ortalama	287,5	100
B+%5P	1	330	125
	2	330	125
	3	330	125
	Ortalama	330	125
B+%10P	1	335	130
	2	335	130
	3	335	130
	Ortalama	335	130
B+%15P	1	312,5	100
	2	312,5	100
	3	312,5	100
	Ortalama	312,5	100
B+%20P	1	310	112,5
	2	310	112,5
	3	310	112,5
	Ortalama	310	112,5

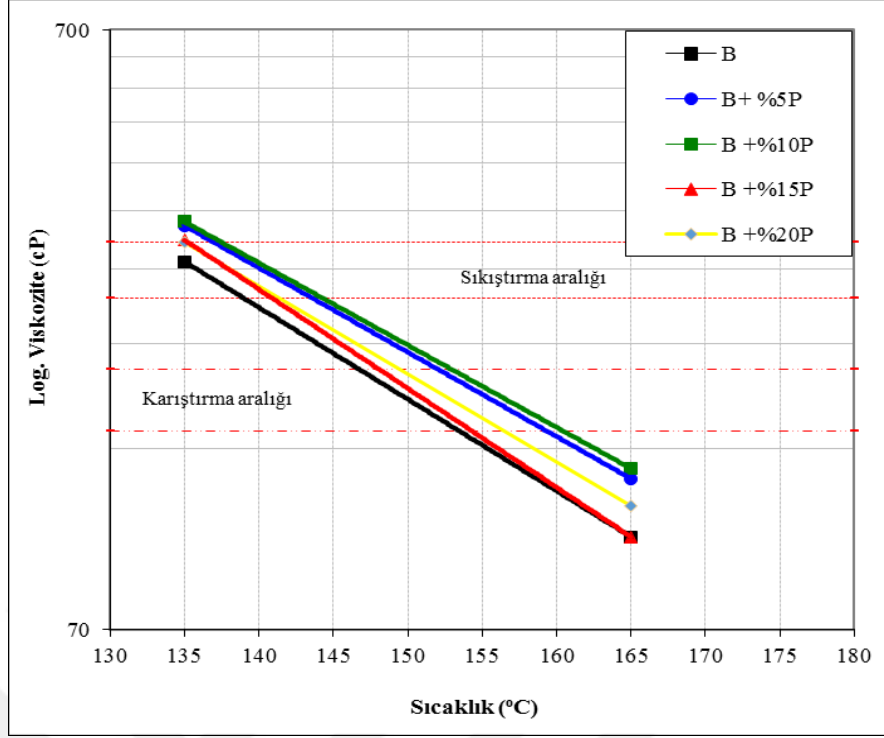
Saf ve Prina katkılı bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.16 ‘da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değişimi

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi 135 °C sıcaklıkta saf bitümeprina ilavesiyle, saf bitüme göre tüm yüzdelerde viskozite değerinde artış görülmüştür. Bu değişimler saf bitüme göre sırasıyla %14,8; %16,5; %8,7 ve %7,8 artış şeklinde olmuştur. Bu sonuç, bağlayıcı akıcılığının prina ilavesiyle azaldığı anlamına gelmektedir. 165 °C sıcaklıkta ise bağlayıcıların viskozite değerlerinde %10 prina katkılı bağlayıcıya kadar bir artış, %15 oranında sabitve daha sonra tekrar artış gözlenmiştir. Bağlayıcıların viskozite değerinin 135 °C de 3000 cP’ yi aşmaması olumlu olarak yorumlanmaktadır.

Bitümlü bağlayıcıların agrega ile plentte karıştırılırken ve arazide sıkıştırma işlemi yapılırken belirli bir işlenebilirliğe sahip olması gerekir. BSK ‘nın karıştırılmasında bitümlü bağlayıcıların 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [9]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma aralıklarını belirleyebilmek için 135 ve 165 °C sıcaklıkta yapılan viskozite deneyinden elde edilen viskozite değeri ile çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır. Saf ve prinakatkılı bağlayıcıların viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Ayrıca bu bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları, bu grafikler yardımıyla belirlenmiş Çizelge 4.14’de gösterilmiştir.

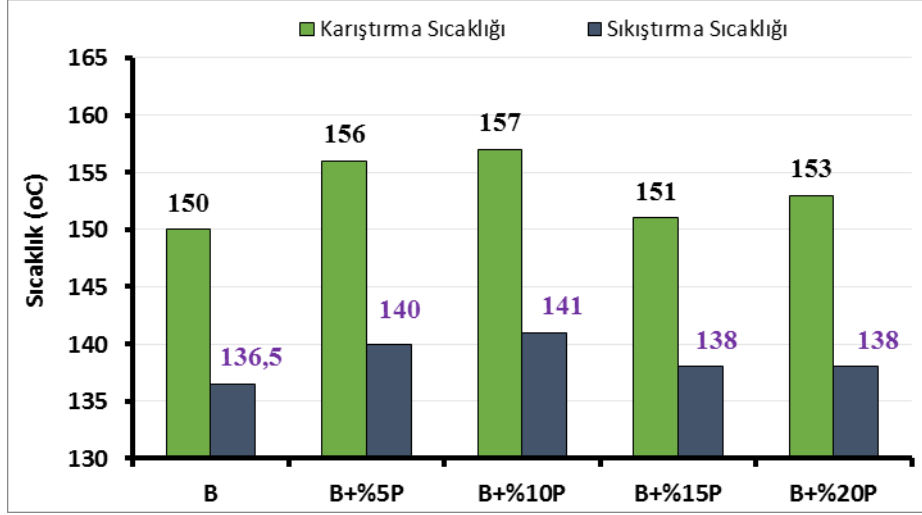


Şekil 4.17. Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık ilişkisi

Çizelge 4.14. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Bağlayıcı Türü	Karıştırma aralığı(°C)	Sıkıştırma aralığı(°C)
B	147-153	135-138
B+%5P	152-159	137-143
B+%10P	154-160	137-144
B+%15P	148-154	135-141
B+%20P	150-156	135-141

Saf ve prina katkılı bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları arasındaki ilişki Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Bağlayıcıların ortalama karıştırma- sıkıştırma sıcaklık değerleri

Şekil 4.18 incelendiğinde, B160/220 bağlayıcı için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 150°C ve 136,5 °C olarak belirlenmiştir. Safbağlayıcıya artan oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) prina eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıklarında saf bağlayıcıya göre sırasıyla %4, %4,6, %0,6 ve %2 artış göstermiştir. Prina katkılı modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklıklarında ise saf bağlayıcıya göre sırasıyla %2,6, %3,3, %1,1 ve %1,1 artış meydana gelmiştir. Bağlayıcıların penetrasyon sonuçları dikkate alındığında %5, 10 ve 15 prina katkılı bağlayıcıların B 100/150 sınıfına geçtiği yani bağlayıcıların sertleştiği görülmüştü. Tüm bu veriler dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında prina katkısıyla modifiye bağlayıcıların sertleştiği ve bu sertleşme sonucunda karışımların hazırlanırken harcayacağı enerji ve ısının arttığını ifade etmek mümkündür.

4.6. Marshall Numunelerinin Hazırlanması

Marshall dizayn yöntemi kullanılarak hazırlanacak olan numunelerde, her bitüm yüzdesi için üç numune hazırlanmakta ve bu numunelerde kullanılacak olan bağlayıcının miktarı, kuru agrega ağırlığının yüzdesi alınarak belirlenmektedir. Tartımı yapılan agrega numuneleri 165 °C sıcaklıkta, bitümlü bağlayıcılar ise RV deneyi ile belirlenen karıştırma sıcaklıklarda ısıtıldı. Isıtılmış olan agrega, karıştırma kabına aktarılarak orta kısmına bir çukur açıldı ve ısıtılan bağlayıcı belirli miktarda buraya döküldü. Agrega, bitümlü bağlayıcı ile tamamıyla kaplanıncaya kadar karıştırma cihazında karıştırıldı. Karıştırma işlemi yaklaşık 1-2 dk. içerisinde yapıldı. Karıştırma cihazı Şekil 4.19' da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Karıştırma cihazı

Karıştırma işlemi bittikten sonra, daha önceden temizlenip 160°C ısıtılmış olan kalıpların içerisine, malzeme dökülmeden önce kalıp çapına göre uygun kesilmiş aydınlar kağıdı kalıp tabanına koyuldu. Malzemede ayrışma olmamasına özen gösterilerek daha önceden ısıtılmış olan kürek yardımıyla kalıp içerisine malzeme koyuldu. Kalıba koyulan malzemenin zaman kaybedilmeden 15 defa kenarlarına ve 10 defa orta kısmına sıcak cam çubuk ile şişleme işlemi yapıldı. Numune üzerine tekrar aydınlar kağıdı koyuldu ve sıkıştırma işlemi için tokmağa yerleştirildi. 457 mm. yüksekten serbest olarak düşen tokmak ile 75 defa ön yüze, 75 defa da arka yüze olmak üzere toplam 150 vuruş yapıldı. Sıkıştırma için kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



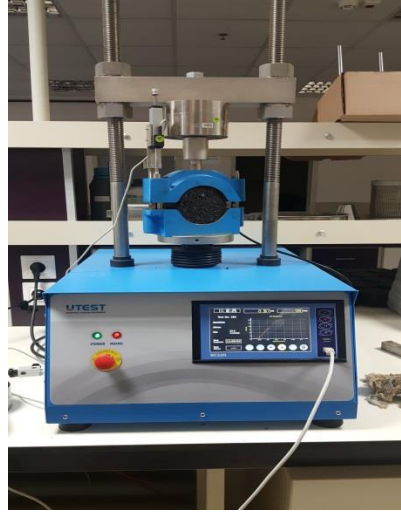
Şekil 4.20. Marshall tokmağı

Hazırlanmış olan briketler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kriko yardımıyla kalıptan çıkartıldı. Çıkarılan numunenin üst ve alt yüzeyi spatula yardımıyla düzeltilir ve numunenin yükseklikleri kumpas yardımıyla en az üç yerden ölçülüp ve kaydedildi. Yükseklikleri alınan numunelerin ilk olarak havadaki kuru ağırlıkları alındı. Daha sonra numunelerin Arşimet terazisinde sudaki ağırlıkları alındı ve numuneler sudan çıkarıldı. Çıkarılan numunelerin doygun hale getirilmesi için 3-5 dk. kadar su banyosunda tüm yüzeyi su ile kaplanacak şekilde suda bekletildi ve süresi dolan numune havlu yardımıyla yüzeyinde parlaklık kalmayacak şekilde kurutulup tartıldı ve böylece suya doygun kuru yüzey ağırlığı belirlenmiş oldu. Kalıptan kriko yardımıyla çıkarılan briket Şekil 4.21 (a)' da gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Numunelerin krikoyla çıkarılması ve kumpasla yüksekliğin ölçülmesi

Deneye hazır hale getirilen numunelerin stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi için numuneler 60 °C suda 30-40 dk. kadar bekletildi. Sudan çıkarılan numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirildive akma çubuğu sabitlendi. Daha sonra yüklemeye başlandı. En yüksek yükleme değeri ve buna karşılık gelen akma değeri cihaz tarafından ekranda otomatik olarak gösterilip ve kaydedildi. Marshall stabilite ve akma cihazı şekil 4.22' de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Marshall stabilite ve akma cihazı

4.6.1. Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması

Optimum bitüm oranının bulunması için karışımda kullanılacak olan agrega miktarı sabit tutulmuştur ve agrega ağırlığının %3,5 - %4 - %4,5 - %5 - %5,5 - %6 - %6,5 oranlarında bitüm eklenerek her bir yüzde için 3'er adet numune, toplamda ise 18 adet numune hazırlanmıştır. Tüm numunelerin havada, suda ve doygun ağırlıkları belirlenip hacimleri ve birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra formül 4.3- 4.14 kullanılarak numunelerin hacim özgül ağırlıkları (D_p), boşluk oranları (V_h), agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve asfaltla dolu boşluk oranları (V_f) belirlenmiştir. Daha sonra numuneler Marshall stabilite aletinde stabilite ve akma deneyine tabii tutularak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler yardımıyla stabilite, D_p , V_h , V_f ve akma -% bitüm grafikleri elde edilmiştir.

$$V = B-C \quad (4.3)$$

$$D_p = A/V \quad (4.4)$$

$$D_{port} = (D_{p1} + D_{p2} + D_{p3})/3 \quad (4.5)$$

$$W_a = (W_B/W_A) \times 100 \quad (4.6)$$

$$W_b = (W_B/W_{A+W_B}) \times 100 \quad (4.7)$$

$$Gsb = \frac{100}{\left(\frac{\%K}{Gk-h}\right) + \left(\frac{\%I}{Gi-h}\right) + \left(\frac{\%F}{Gf-z}\right)} \quad (4.8)$$

$$G_{sa} = 100 / [(\%K/G_{k-z}) + (\%I/G_{i-z}) + (\%F/G_{f-z})] \quad (4.9)$$

$$D_t = \frac{100}{\left(\frac{100-W_b}{G_{se}}\right) + \left(\frac{W_b}{G_b}\right)} \quad (4.10)$$

$$G_{se} = (G_{sb} + G_{sa}) / 2 \quad (4.11)$$

$$V_h = \frac{D_t - D_{port}}{D_t} \times 100 \quad (4.12)$$

$$V_b = (P_{be} \times D_{port}) / G_b \quad (4.13)$$

$$V_a = 100 - (V_h + V_b) \quad (4.14)$$

$$V_{ma} = 100 - V_a = (V_h + V_b) \quad (4.15)$$

$$V_f = (V_b / V_{ma}) \times 100 \quad (4.16)$$

Formüllerde;

W_a: Agregaya göre seçilen bitüm %'si

W_b: Karışıma göre seçilen bitüm %'si

W_A: Toplam agregaya ağırlığı (1200gr)

W_B: Bitüm ağırlığı (agregaya göre)

A: Havadaki kuru ağırlık

B: Doymun-yüzey kuru ağırlık

C: Sudaki ağırlık

V: Numunenin hacmi

D_p: Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı

D_{port}: Numunelerin ortalama pratik hacim özgül ağırlığı

D_t: Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı

V_h: Numunedeki boşluk yüzdesi

V_b: Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si

Va: Numunedeki agregata hacmi %'si

Vma: Agregalar arasındaki boşluk %'si

Vf: Vma'nın bitümlü dolu boşluk %'si

Pbe: Agregata ağırlığına göre efektif bitüm %'si

Gsb: Agregata hacim özgül ağırlığı

Gsa: Agregata zahiri özgül ağırlığı

Gse: Agregata efektif özgül ağırlığı

%K: Karışımdaki kaba agregata %'si

%İ: Karışımdaki ince agregata %'si

%F: Karışımdaki filler %'si ifade etmektedir.

Hazırlanan deney numunelerinden %3,5 bitüm içeren 1. Numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Kaba agregata} = \%42, \quad G_{k-h} = 2,676 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{İnce agregata} = \%53, \quad G_{i-h} = 2,624 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Filler} = 5, \quad G_{f-z} = 2,727 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Bitüm oranı} = \%3,5, \quad G_b = 1,031 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Agregata toplam ağırlığı} = 1100 \text{ gr}$$

$$W_a = (38,50/1100) \times 100 = 3,5$$

$$W_b = (38,50/(38,50+1100)) \times 100 = 3,38$$

$$V = 1143,64 - 656,43 = 487,21 \text{ cm}^3$$

$$D_p = 1136,38/487,21 = 2,332 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_{p_{ort}} = (2,332 + 2,326 + 2,336) / 3 = 2,331 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sb} = \frac{100}{\left(\frac{42}{2,676}\right) + \left(\frac{53}{2,624}\right) + \left(\frac{5}{2,727}\right)} = 2,651 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = 100 / [(42/2,74) + (53/2,75) + (5/2,73)] = 2,746 \text{ gr/cm}^3$$

$$Dt = \frac{100}{\left(\frac{100-3,38}{2,699}\right) + \left(\frac{3,38}{1,031}\right)} = 2,559 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{se} = (2,651 + 2,746) / 2 = 2,699 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_h = [(2,559 - 2,331) / 2,559] \times 100 = 8,88$$

$$V_b = (2,72 \times 2,331) / 1,031 = 6,15$$

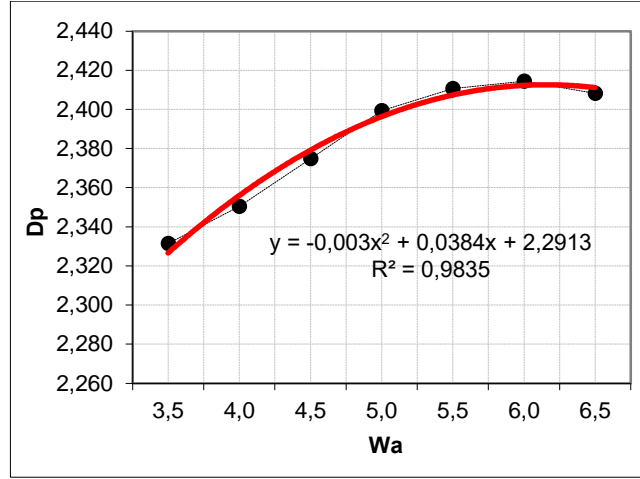
$$V_a = 100 - (8,88 + 6,15) = 84,97$$

$$V_{ma} = 100 - 84,97 = 15,03$$

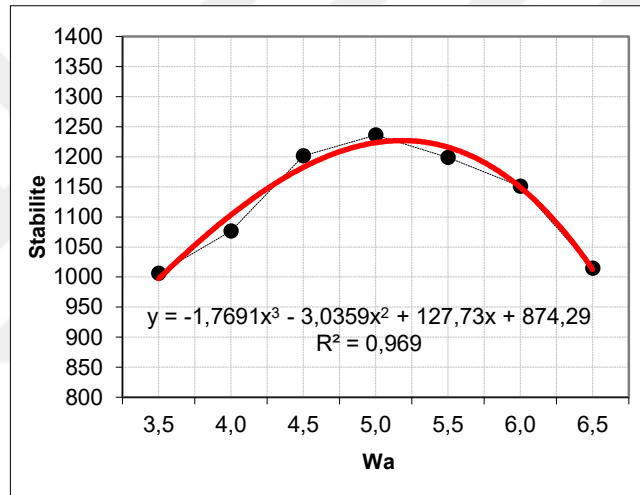
$$V_f = (6,15 / 15,03) \times 100 = 40,92$$

Aynı şekilde her bitüm yüzdesi ve her numune için hesaplamalar yapılmış olup tabloya aktarılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

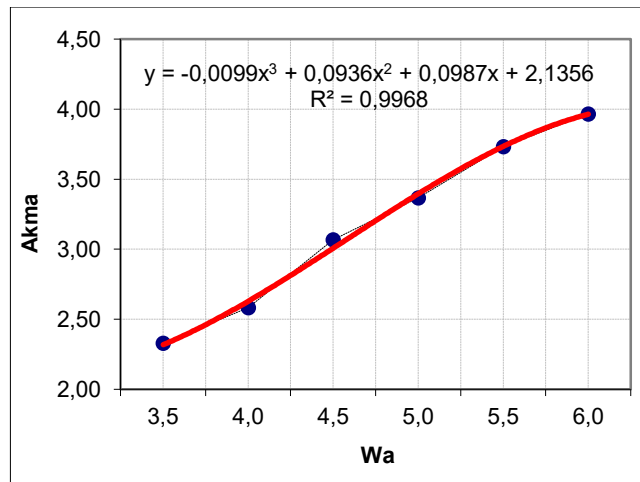
N	W (%)	W (%)	WB (gr)	Numune Yükleklği			A (gr)	C(su) (gr)	B (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vm (%)	Vf (%)	Akm (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fak	Dz.St (kG)
				1	2	3															
1	3,5	3,3	38,5	62,2	62	62,3	62,18	1136,4	656,4	1143,6	487,2	2,332						2,34	9,8	1,045	10,24
2				61,7	62,0	61,9	61,8	1130,7	652,7	1138,9	486,2	2,326						2,13	9,8	1,050	10,29
3	2,8	2,7		61,9	61,7	61,8	61,79	1126,7	652,0	1134,3	482,3	2,336						2,52	9,2	1,050	9,66
ORTALAMALAR																					
4	4,0	3,8	44,0	61,2	61,5	61,5	61,37	1136,6	660,3	1142,9	482,6	2,355						2,8	10	1,067	10,67
5				61,7	61,4	61,5	61,5	1133	656,7	1139,5	482,8	2,347						2,54	10	1,063	10,63
6	3,3	3,1		61,4	61,6	61,2	61,4	1131,5	656,8	1138,4	481,6	2,349						2,41	10,3	1,066	10,99
ORTALAMALAR																					
7	4,5	4,3	49,5	61,0	60,8	60,8	60,86	1141,5	663,1	1144,2	481,1	2,373						3	11,5	1,081	12,43
8				61,1	60,7	60,7	60,8	1139,9	662,4	1141,1	478,8	2,381						3,10	10,5	1,083	11,37
9	3,8	3,6		61,4	61,0	61,0	61,15	1136,7	659,4	1138,9	479,5	2,371						3,10	11,4	1,073	12,23
ORTALAMALAR																					
1	5,0	4,7	55,0	60,4	60,5	60,3	60,36	1142,1	666,8	1142,9	476,1	2,399						3,5	11,5	1,095	12,59
1				60,2	60,3	60,4	60,3	1141	667,9	1141,7	473,9	2,408						3,30	10,8	1,097	11,85
1	4,3	4,1		60,7	60,4	60,5	60,54	1144,8	667,0	1145,7	478,7	2,391						3,30	11,6	1,090	12,64
ORTALAMALAR																					
1	5,5	5,2	60,5	60,4	60,3	60,5	60,41	1146,4	671,5	1147,1	475,6	2,411						4	11,3	1,094	12,36
1				60,4	60,3	60,4	60,4	1145,3	670,3	1145,6	475,3	2,410						3,50	10,7	1,094	11,71
1	4,8	4,5		60,1	60,2	60,2	60,14	1148,7	672,9	1149,2	476,3	2,412						3,70	10,8	1,101	11,89
ORTALAMALAR																					
1	6,0	5,6	66,0	60,1	60,4	60,3	60,26	1151,8	675,5	1152,4	476,9	2,415						3,8	10,1	1,098	11,09
1				60,7	60,4	60,5	60,5	1155,3	676,6	1156,0	479,4	2,410						3,80	10,7	1,091	11,67
1	5,3	5,0		59,6	59,9	60,0	59,83	1149,2	674,4	1149,7	475,3	2,418						4,30	10,6	1,110	11,77
ORTALAMALAR																					
1	6,5	6,1	71,5	60,1	60,1	60,0	60,07	1154	676,3	1154,6	478,3	2,413						3,55	11,2	1,103	12,35
2				60,0	60,0	60,1	60,0	1148,9	672,4	1149,5	477,1	2,408						3,10	11,3	1,105	12,49
2	5,8	5,4		60,1	60,2	60,2	60,15	1157,8	676,6	1158,3	481,7	2,404						3,30	11,1	1,101	12,22
OPTIMUM BİTİM ORANI SONUÇLARI																					
												2,4	1,9	12,	85,3	14,7	86,7	3,317			12,35



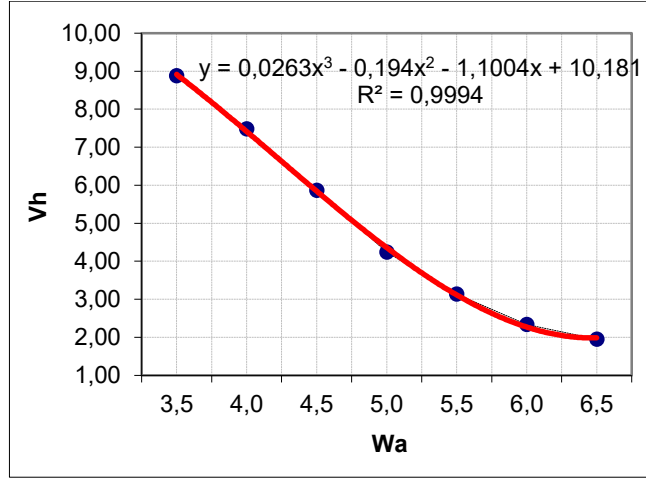
Şekil 4.23. Dp- Bitüm %'si



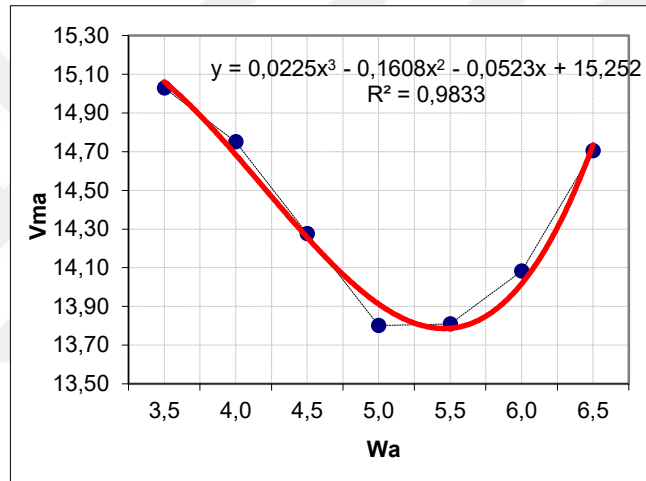
Şekil 4.24. Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi



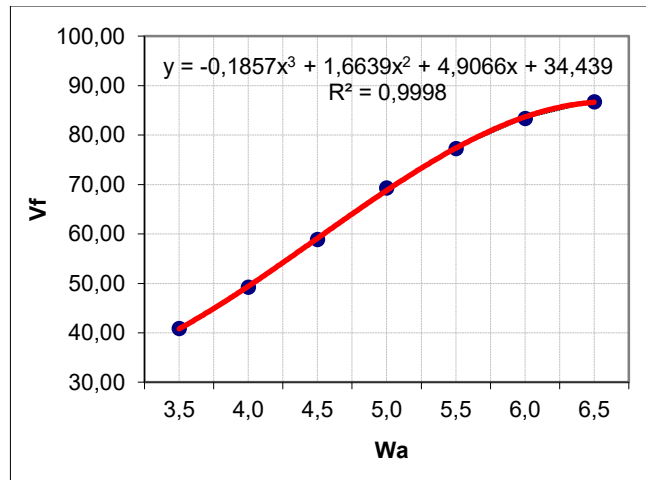
Şekil 4.25. Akma – Bitüm %'si



Şekil 4.26. Vh- Bitüm %'si



Şekil 4.27. VMA- Bitüm %'si



Şekil 4.28. Vf- Bitüm %'si

Çizilen grafiklerden boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e, stabilite ve hacim özgül ağırlığın maksimum değere karşılık geldiği yüzdelere alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm yüzdesi %5,2 olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.16'da optimum bitüm içeriğinde kullanılan hesaplamalar gösterilmiştir. Belirlenen optimum bitüm yüzdesine göre saf ve prina modifiye bitümlü karışım numuneleri hazırlanmıştır.

Çizelge 4.16. Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler

Kriterler	Sonuçlar
Max. Dp	5,8
Max. Stabilite	5,1
%4 V _h	5
%70 V _f	5
Optimum bitüm oranı	%5,2

Belirlenen optimum bitüm yüzdesine göre saf bitüm ile 3 adet kontrol karışım numunesi hazırlanmış ve sonuçları Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) ile karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerinin ortalama sonuçları Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Kontrol numunesine ait sonuçlar

No	Wa	Wb	WB	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava)	C (su)	B (doz.)	V	Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vf	Akma	Stb.	Dz.Fak	Dz.Stb
	(%)	(%)	(gr)	1	2	3	Ort	(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)
1	5,2	4,94	57,20	59,55	59,13	59,39	59,36	1144,30	671,90	1147,20	475,3	2,408							2,596	10	1,13	1125
2				59,69	59,86	60,01	59,85	1152,00	674,30	1154,50	480,2	2,399							2,59	10,8	1,10	1186
3	4,51	4,29		59,76	59,50	59,96	59,74	1147,90	673,50	1150,80	477,3	2,405							2,52	10,3	1,11	1146
OPTIMUM BİTÜM SONUÇLARI											2,404	2,499	3,80	10,01	86,19	13,81	72,49	2,569				
ŞARTNAME LİMİTLERİ											FB<1,5=	0,77	(3-5)				>14	(65-75)	(2-4)	Su/Ak=	448,58	>900

4.7. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Çalışmada Marshall karışım dizayn yöntemiyle bulunan optimum bitüm içeriğinde saf ve prina katkılı modifiye bitümlü karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi(RMS),dolaylı çekme mukavemeti (ITSM) deneyi, indirekt çekme rijitlik modülü (ITS) deneyi ve statik sünme deneyleri yapılmıştır. Performans deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanan numune sayıları Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları

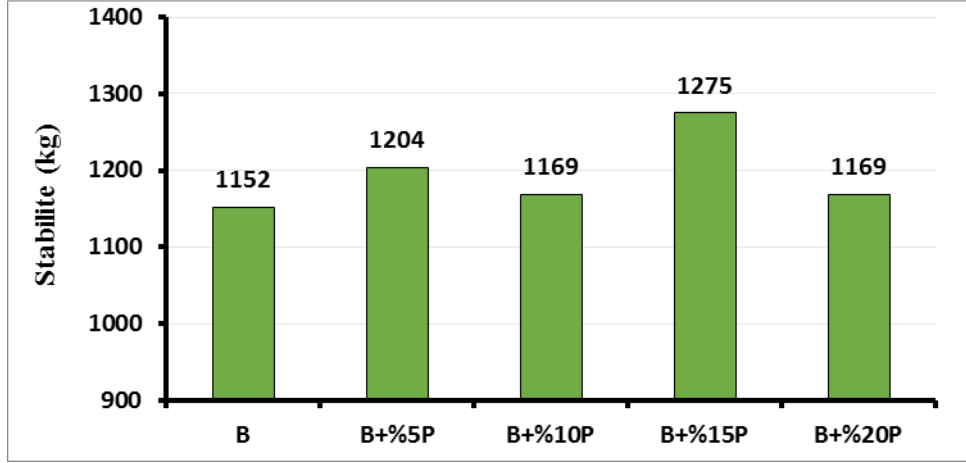
Performans Deneyleri	Karışım Türü				
	B	B+%5P	B+%10P	B+%15P	B+%20P
Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	3	3	3	3	3
RMS Deneyi	3	3	3	3	3
ITS Deneyi	6	6	6	6	6
ITSM Deneyi	3	3	3	3	3
Sünme Deneyi	3	3	3	3	3
Toplam	18	18	18	18	18
Genel Toplam	90				

4.7.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Saf bitüm B160/220 ve %5, %10, %15 ve %20 prinalaveli modifiye bitümlü karışımlar kullanılarak optimum bitüm içerikli hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. TS EN 12697-34 standardına göre 60 °C suda yaklaşık 40 dk. kadar bekletilen numuneler çıkarıldıktan sonra deneye tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.19’de verilmiştir. Stabilite değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Akma değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.30’da gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin, stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle, Marshall oranı (MQ) değerleri de elde edilmiş olup MQ- katkı miktarı değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir.

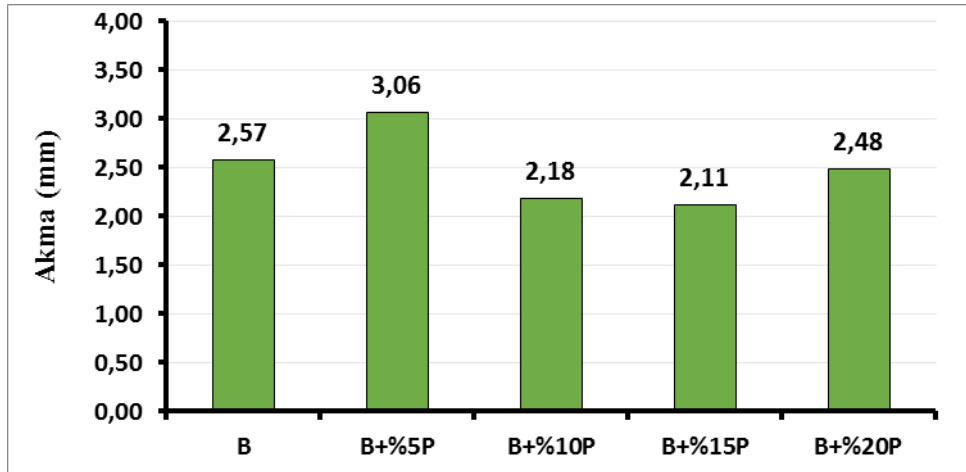
Çizelge 4.19. Prina ilaveli karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri

No	Wa (%)	Wb (%)	Numune Yüksekliği (mm)			A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doz.) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Sf. (kN)	Dz.Fak	Dz.Stb (kg)	
			1	2	3																
1	5,2	4,94	57,20	59,55	59,13	59,39	59,36	1144,30	671,90	1147,20	475,3	2,408					2,596	10	1,13	1125	B
2				59,69	59,86	60,01	59,85	1152,00	674,30	1154,50	480,2	2,399					2,59	10,8	1,10	1186	
3	4,51	4,29		59,76	59,50	59,96	59,74	1147,90	673,50	1150,80	477,3	2,405					2,52	10,3	1,11	1146	
ORTALAMALAR																					
4	5,2	4,94	57,20	60,3	59,9	60,1	60,07	1149,1	674,6	1152,6	478	2,404					3,42	11,2	1,103	1236	B+%5P
5				59,6	59,5	59,9	59,66	1145,7	672,3	1148,7	476,4	2,405					2,82	10,6	1,115	1184	
6	4,51	4,29		59,6	59,8	59,7	59,68	1147,2	674,2	1149,3	475,1	2,415					2,93	10,7	1,115	1193	
ORTALAMALAR																					
7	5,2	4,94	57,20	59,8	59,8	60,1	59,89	1148,1	673,5	1151,5	478	2,402					2,081	10,3	1,109	1138	B+%10P
8				60	59,9	60,4	60,11	1150,3	674,8	1151,4	476,6	2,414					2,28	10,8	1,102	1185	
9	4,51	4,29		59,8	60,2	59,8	59,95	1147,2	672,8	1150,2	477,4	2,403					2,18	10,7	1,107	1184	
ORTALAMALAR																					
10	5,2	4,94	57,20	61,1	61,4	61,4	61,29	1151,5	668,2	1153,8	485,6	2,371					2,09	11,8	1,069	1261	B+%15P
11				60	60,8	60,5	60,4	1150,4	675,3	1152	476,7	2,413					2,12	11,7	1,094	1280	
12	4,51	4,29		60,1	60,1	59,7	59,94	1147,9	673,3	1148,8	475,5	2,414					2,11	11,6	1,107	1284	
ORTALAMALAR																					
13	5,2	4,94	57,20	60,3	60	60,5	60,29	1149,4	671,9	1150,8	478,9	2,400					2,383	10	1,097	1097	B+%20P
14				59,9	59,4	59,6	59,64	1150,2	676,6	1151	474,4	2,425					2,58	10,80	1,116	1205	
15	4,51	4,29		60,1	59,8	60,1	60	1151,9	675,8	1152,8	477	2,415					2,46	10,9	1,106	1206	
ORTALAMALAR																					
									2,413	2,499	3,42	10,05	86,53	13,47	74,58		2,475			1169	



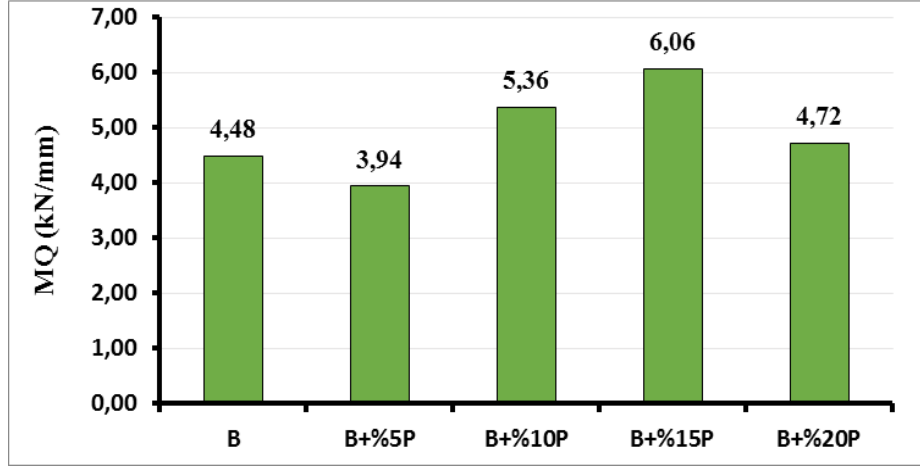
Şekil 4.29. Stabilitenin katkı miktarı ile değişimi

Şekil 4.29 incelendiğinde, prina katkılı modifiye bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlarda, tüm karışımların stabilite değerlerinin genel olarak saf karışımdan yüksek olduğunu, prina'nın stabiliteyi artırdığı görülmektedir. Modifiye karışımlardaki en yüksek stabilite değerine ise %15 prina katkılı karışım numunesinde ulaşıldığı görülmektedir. Stabilitenin artması, kaplamanın kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını ifade etmektedir. %15 prina katkılı karışımın kalıcı deformasyonlara karşı, saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımara göre, daha dirençli olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.30. Karışımların akma- katkı miktarı değişimi

Şekil 4.30 incelendiğinde karışımların akma değerleri, saf karışıma göre sadece %5 prina katkılı karışımda artış göstermiştir. %10, 15 ve 20 prina katkılı karışımlarda akma değeri saf karışıma göre daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.31. Karışımların MQ- katkı miktarı değişimi

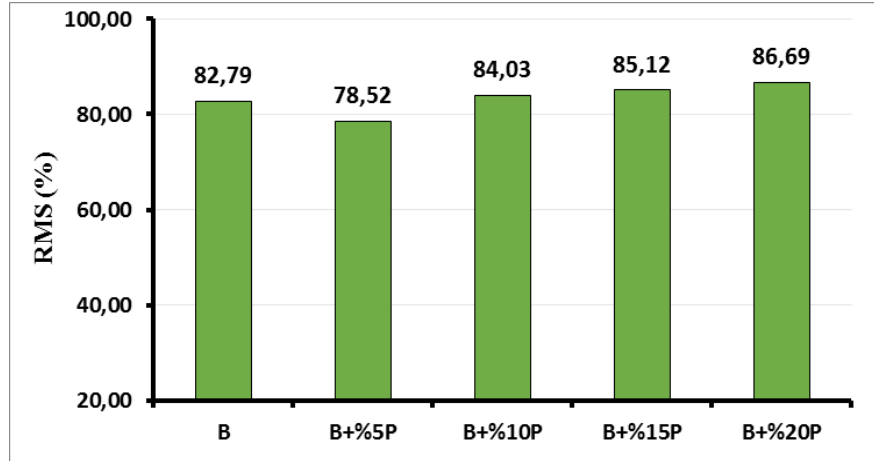
Şekil 4.31 incelendiğinde, karışımlardaki prina yüzdesinin artmasıyla MQ değerinin önce azaldığı daha sonra arttığı görülmüştür. MQ değeri, karışımların kayma gerilmelerine karşı direncin göstergesidir. Saf ve prina ilaveli karışımların MQ değerleri kıyaslandığında en yüksek MQ değerine %15 prina katkılı karışımda ulaşıldığı görülmektedir.

4.7.2. Kalıcı Marshall Stabilesi (RMS)

RMS değeri karışımların nem hasarına karşı direncinin göstergesi olarak kabul edilir. RMS değerinin belirlenmesi için numuneler 60 °C suda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite deneyine tabii tutulmuştur. 24 saat suda bekletilen numuneler 'Koşullandırılmış', 40 dakika bekletilen numuneler ise 'koşullandırılmamış' olarak adlandırılmıştır. RMS değeri, koşullandırılmış numunelerin stabilite değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin stabilite değerlerine bölünmesiyle elde edilmektedir. Karışımların RMS değerleri Çizelge 4.20'de verilmiştir. RMS değerinin katkı oranına göre değişimi de Şekil 4.32'de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Karışımların RMS değerleri

Karışım Türü	Numune No	Koşullandırılmış Numunelerin Stabilesi (kN)	Koşullandırılmamış Numunelerin Stabilesi (kN)	RMS (%)
B	1	9,35	11,25	82,79
	2	9,76	11,86	
	3	9,51	11,46	
	Ortalama	9,54	11,52	
B+%5P	1	9,21	12,36	78,52
	2	9,38	11,84	
	3	9,78	11,93	
	Ortalama	9,46	12,04	
B+%10P	1	9,85	11,38	84,03
	2	9,64	11,85	
	3	9,98	11,84	
	Ortalama	9,82	11,69	
B+%15P	1	10,55	12,61	85,12
	2	10,76	12,8	
	3	11,25	12,84	
	Ortalama	10,85	12,75	
B+%20P	1	10,03	10,97	86,69
	2	10,13	12,05	
	3	10,25	12,06	
	Ortalama	10,14	11,69	



Şekil 4.32. RMS değerinin katkı oranına göre değişimi

Çizelge 4.20 ve Şekil 4.32 incelendiğinde, saf ve prina ilaveli karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının %80' in üzerinde olduğu, prina'nın nem hasarına karşı dayanımı artırdığı görülmektedir. En yüksek RMS oranı ise %20 prina ilaveli numunede görülmektedir.

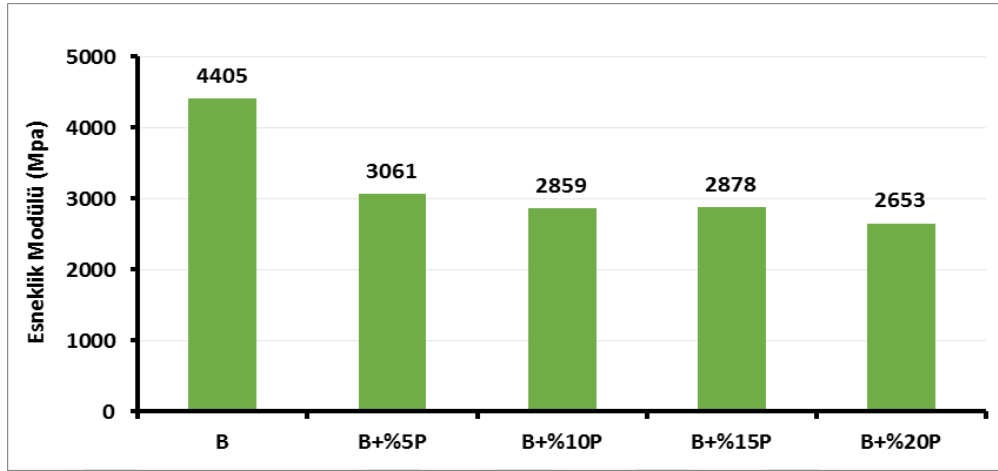
4.7.3. Dolaylı Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi

Saf ve prina katkılı karışımlar üzerinde BS DD 213 standartına uygun olarak dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. Deneyde saf ve %5, %10, %15 ve %20 prina katkılı karışım numunelerin her birinden üçer adet, toplamda 15 adet numuneye ITSM deneyi uygulanmıştır. Deneyde numuneler üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonrada 5 defa deney yükleme yapılarak karışımların dinamik yükler karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0,35, hedef deformasyon ise 5 µm olarak seçilmiştir. Cihazda yatay ekseninde 5 µm deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmektedir. Numuneye uygulanan 5 darbe sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda verilir, elde değerlerin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. 25 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçları Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Karışımların ITSM deney sonuçları

Karışım Türü	No	25°C	
		Yükseklik (mm)	Es (Mpa)
B	1	59,7	3564
	2	60,0	5064
	3	59,8	4586
	Ortalama	59,8	4405
B+%5P	1	59,8	4007
	2	59,7	2567
	3	60,0	2610
	Ortalama	59,8	3061
B+%10P	1	60,2	2579
	2	60,5	2885
	3	60,0	3112
	Ortalama	60,2	2859
B+%15P	1	61,0	3039
	2	61,1	2737
	3	61,2	2859
	Ortalama	61,1	2878
B+%20P	1	60,9	2812
	2	60,1	2538
	3	60,3	2608
	Ortalama	60,4	2653

Saf ve prina katkılı karışımların ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Karışımların ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi

Şekil 4.33 incelendiğinde, karışımlarda prina ilavesinin (%5, %10, %15 ve %20) giderek artmasıyla saf bitümlü karışım numunelerine göre ITSM değerleri 25 °C sıcaklıkta azalma göstermiştir. Katkılı karışım numuneleri içerisinde en yüksek ITSM değeri %5 prina katkılı karışımda görülmüştür. Buna göre; prina katkılı karışımlarda, kalıcı deformasyonlara karşı direncinin saf karışım numunesine göre azaldığını söylemek mümkündür.

4.7.4. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve AASHTO T283 Sonuçları

ITS deneyi, AASHTO T283 standardına göre saf ve modifiye bitümlerin çekme oranının belirlenerek nem hasarına karşı dayanımlarının tespiti amacıyla yapılmaktadır. B160/220 saf bitüm ve %5, %10, %15 ve %20 prina katkılı modifiye bitümler ile hazırlanan her bir karışım türü için 6 numune olmak üzere toplamda 18 numune hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin üçer tanesine vakum uygulanarak boşluk oranlarının %70-%80’in suyla doldurulması sağlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler vakum cihazından çıkarıldığında hemen streç film ile sarılmış ve -18 °C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiştir. Numunelere vakum çekilmesi Şekil 4.34.(a)’da, streç film ile sarılma işlemi de (b)’de gösterilmiştir.



(a)



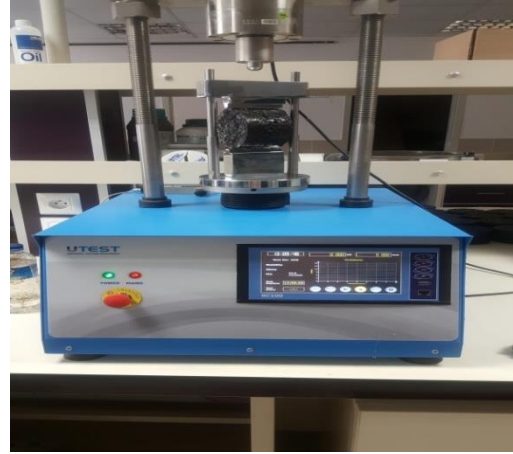
(b)

Şekil 4.34. Numunelere vakum uygulanması (a), streç film ile sarılması (b)

Dondurucudan çıkarılan numunelerdından 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Son aşama olarak numuneler 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall stabilite cihazında kırılmıştır. Tüm bu işlemlerin uygulandığı numuneler 'koşullandırılmış' numuneler olarak adlandırılmıştır. 60 °C su banyosunda bekletilen numuneler Şekil 4.35.(a) da, numunelerin kırılması ise (b) de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.35. Numunelerin 60 °C su banyosunda bekletilmesi (a) , numunenin kırılması (b)

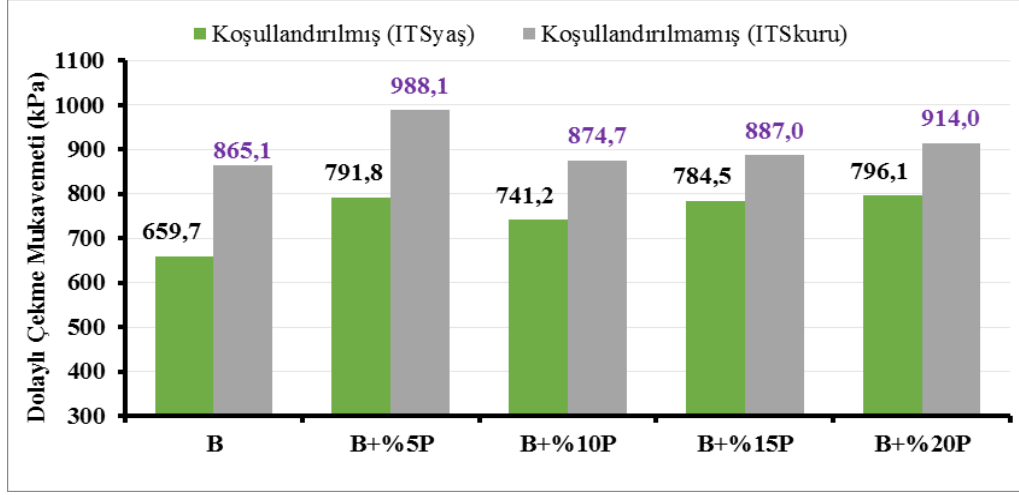
‘Koşullandırılmamış’ numuneler ise sadece 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra kırılmıştır. Kırma işlemi süresince numunelere 50.8 mm/dk ‘lık sabit yükleme hızı uygulanmıştır.

Çizelge 4.22’de ITS deneyine tabi tutulan koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri $ITS_{yaş}$, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ITS_{kuru} olarak adlandırılmıştır. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) ise, $ITS_{yaş}$ değerinin ITS_{kuru} değerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar Çizelge 4.22’ de gösterilmiştir.

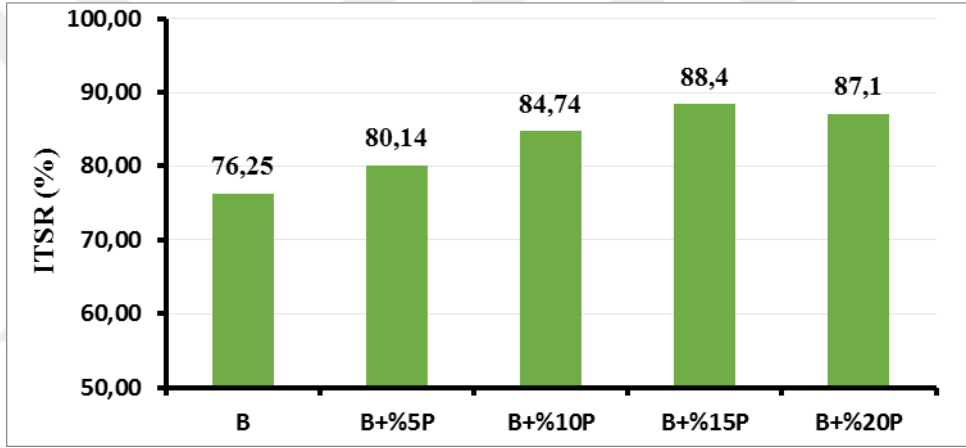
Çizelge 4.22. Karışımların ITS ve ITSR değerleri

Karışım Türü	No	Koşullandırılmış Numuneler			Koşullandırılmamış Numuneler			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P_{maks} (kN)	$ITS_{yaş}$ (kPa)	Yükseklik (mm)	P_{maks} (kN)	ITS_{kuru} (kPa)	
B	1	59,58	6,15	647,11	59,53	8,22	865,65	76,25
	2	60,09	6,3	657,27	60,24	8,26	859,61	
	3	59,94	6,45	674,61	59,73	8,29	870,10	
	Ortalama			659,66				
B+%5P	1	59,02	7,22	766,91	59,37	9,35	987,30	80,14
	2	59,97	7,55	789,26	59,73	9,36	982,40	
	3	58,85	7,69	819,19	59,89	9,5	994,43	
	Ortalama			791,79				
B+%10P	1	59,95	7,02	734,10	60,14	8,45	880,85	84,74
	2	60,22	7,17	746,42	60,26	8,38	871,81	
	3	60,4	7,16	743,16	59,43	8,26	871,33	
	Ortalama			741,23				
B+%15P	1	60,2	7,46	776,87	59,88	8,38	877,34	88,44
	2	60,62	7,5	775,63	60,08	8,65	902,59	
	3	59,88	7,65	800,91	60,48	8,5	881,08	
	Ortalama			784,47				
B+%20P	1	59,72	7,78	816,71	59,8	8,58	899,48	87,10
	2	60,35	7,88	818,57	60,07	8,78	916,31	
	3	60,37	7,25	752,88	59,91	8,85	926,08	
	Ortalama			796,05				

Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.36’da verilmiştir. Karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.36. Karışımların ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi



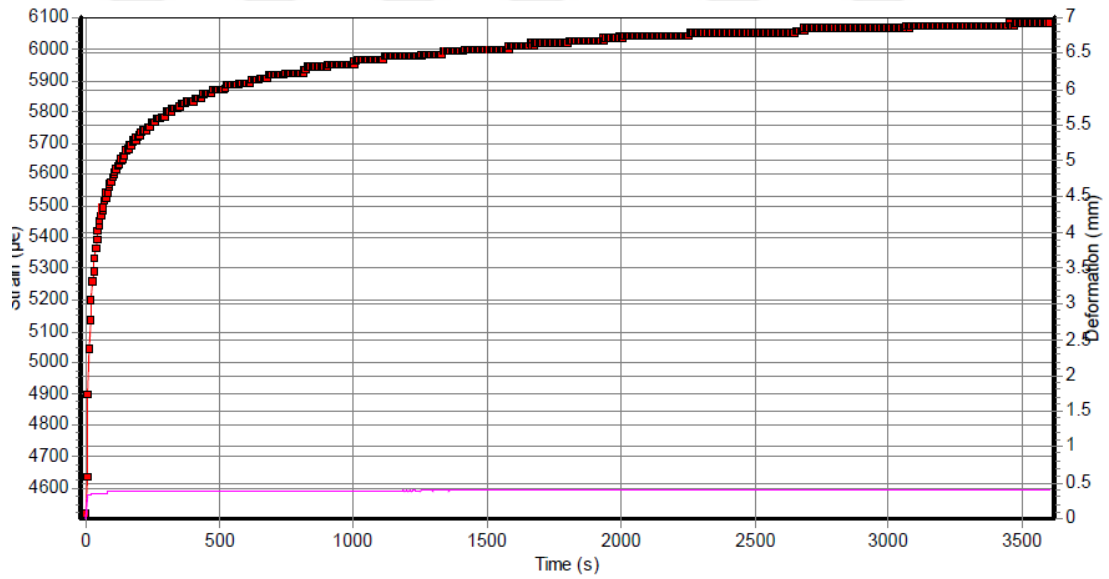
Şekil 4.37. Karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi

Şekil 4.37 incelendiğinde karışımlarda prina katkı oranının artmasıyla (%5, %10, %15 ve %20) saf bitümlü karışım numunelerine göre koşullandırılmış (ITSyas) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri sırasıyla %20, %12, %19 ve %21 artış göstermiştir. Koşullandırılmamış (ITSkuru) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri de saf karışıma göre %14, %11, %2,5 ve %5,6 artış göstermiştir. Şekil 4.37 incelendiğinde, karışımlarda prina katkı oranının artmasıyla (%5, %10, %15 ve %20) saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri %5,1, %11,1, %16 ve %14,2 olarak artış göstermiştir. En yüksek ITSR değeri %15 prina katkı modifiye karışımlarda görülmüştür. Saf ve modifiye karışımlarda ITSR değerlerinin %70'in üzerinde olması, karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu

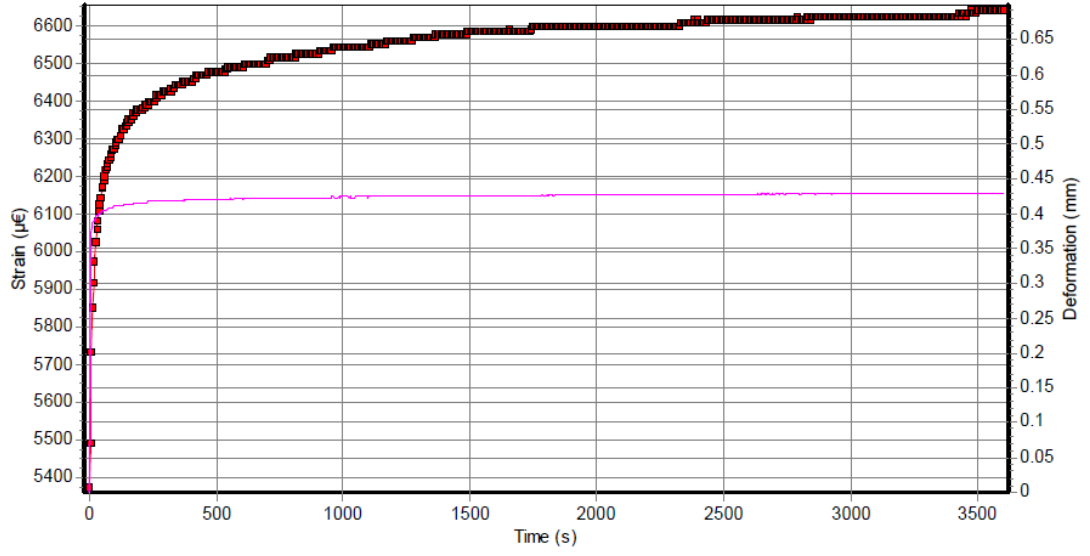
göstermektedir. Ayrıca prina katkı olarak kullanımı ile hazırlanan modifiye karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı dirençlerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

4.7.5. Statik Sünme Deneyi

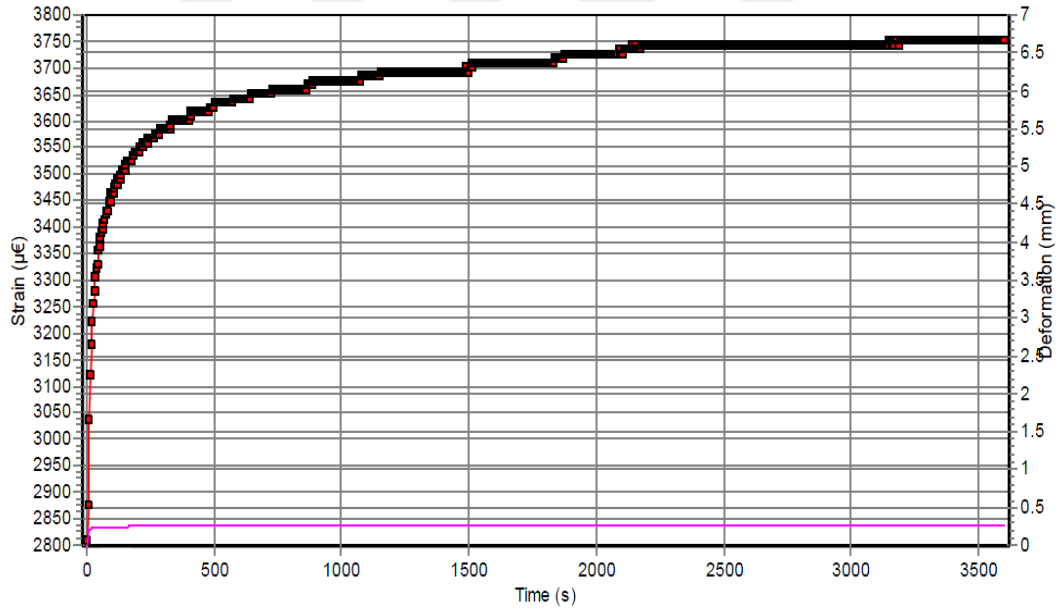
Saf ve prina katkı ilaveli modifiye edilmiş karışımlar üzerinde uygulanan sünme deneyinde, deney 50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce karışım numuneleri 3 saat boyunca deney sıcaklığında bekletilmiştir. Cihaz, ilk önce numunede 10 dakika boyunca 20 kPa gerilme oluşturacak ön yüklemeye yapmıştır. Daha sonrasensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanır ve gerilme değeri 200 kPa'a çıkartılarak 1 saatlik deney süresi başlatılır. Deney süresi içerisinde bilgisayar yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünmesertliği değerini otomatik olarak hesaplamakta ve sonuç olarak vermektedir. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme–zaman–deformasyon sonuçları Şekil 4.38-4.42' de verilmiştir.



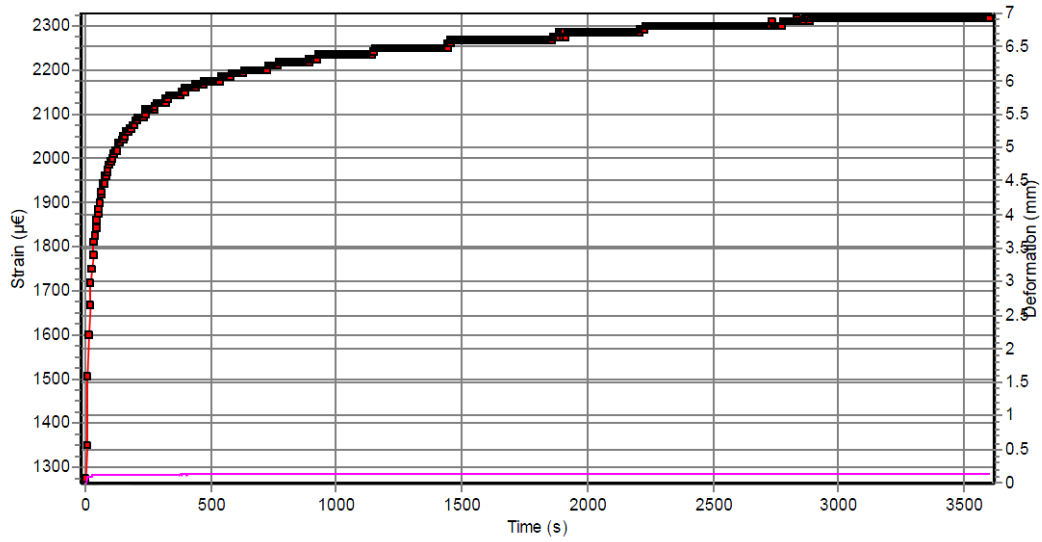
Şekil 4.38. Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme – zaman-deformasyon grafiği



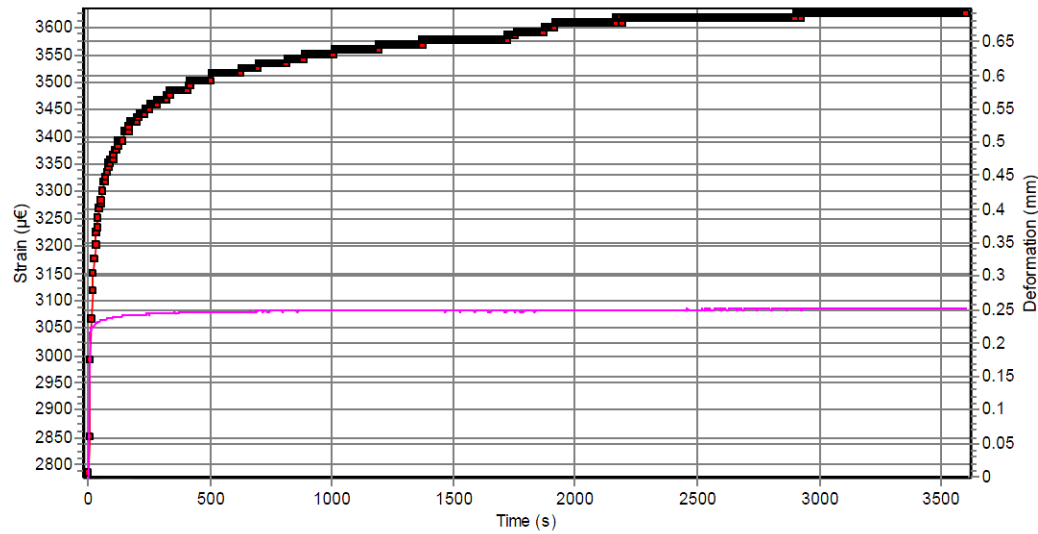
Şekil 4.39. B+%5Pkarışım numunesinin toplam birim şekil değıştirme - zaman – deformasyon grafiği



Şekil 4.40. B+%10Pkarışım numunesinin toplam birim şekil değıştirme –zaman- deformasyon grafiği

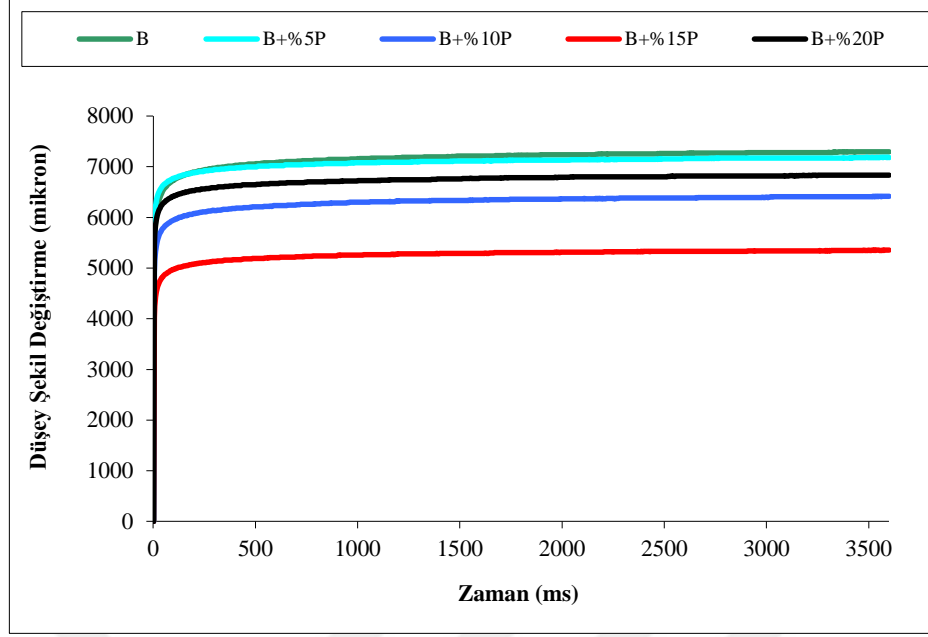


Şekil 4.41. B+%15Pkarışım numunesinin toplam birim şekil değıştirme - zaman-deformasyon grafiği



Şekil 4.42. B+%20Pkarışım numunesinin toplam birim şekil değıştirme - zaman - deformasyon grafiği

Saf ve modifiye bağlayıcılı karışım numunelerinin toplam birim şekil değıştirme-zaman-deformasyon grafikleri incelendiğinde prina ilavesiyle numunelerin daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. Tüm numunelere ait toplam birim şekil değıştirme – zaman grafiği Şekil 4.43’de verilmiştir.



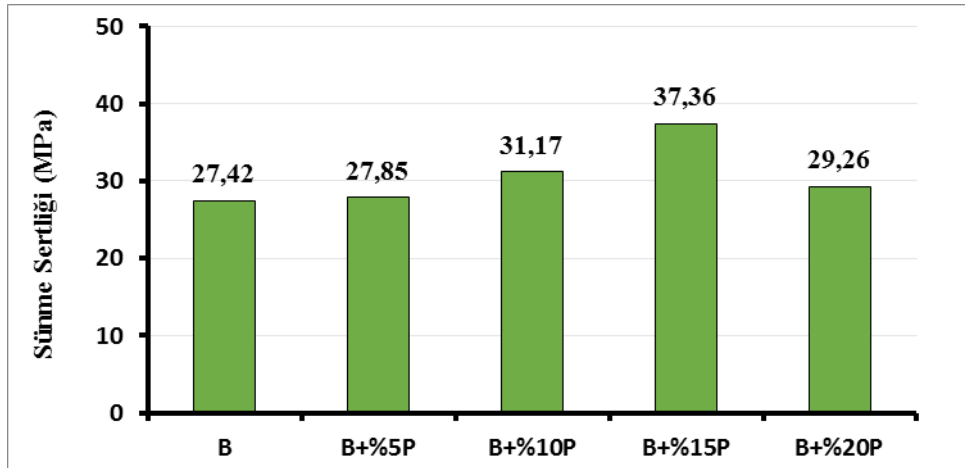
Şekil 4.43. Numunelerin toplam birim şekil değıştirme- zaman grafiği

Şekil 4.43 incelediğinde prina katkısıyla hazırlanan numunelerin, saf numuneye göre, toplam birim şekil değıştirme değeriinin azaldığı ve daha az deformasyon yaparak sünme özelliklerini gösterdiği görülmektedir.

Karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (R_m) değeri Çizelge 4.23’de gösterilmektedir. Numunelerin sünme değeriinin katkı oranı ile değışimi Şekil 4.43’ de verilmiştir.

Çizelge 4.23. Numunelerin sünme sertliği modülü (R_m) değerleri

Karışım Türü	Numune No	50°C	
		Yükseklik	R
		(mm)	(Mpa)
B	1	59,9	27,36
	2	60,0	28,65
	3	59,8	26,25
	Ortalama	59,9	27,42
B+%5P	1	59,5	25,840
	2	59,9	29,3
	3	59,7	28,5
	Ortalama	59,7	27,85
B+%10P	1	60,1	30,5
	2	59,4	32,3
	3	60,2	30,7
	Ortalama	59,9	31,17
B+%15P	1	60,2	36,3
	2	61,2	38,55
	3	61,0	7,3
	Ortalama	60,8	37,36
B+%20P	1	60,3	31,2
	2	59,6	28,6
	3	60,0	28
	Ortalama	60,0	29,26



Şekil 4.44. Numunelerin sünme sertliği modülü değişimi

Şekil 4.44'teki grafik incelendiğinde prinakatkılı modifiye karışımların, saf karışım numunesine göre sünme sertliği değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bu artışlar saf karışım numunesine göre sırasıyla %1,6, %13,7, %36,3 ve %6,7'dir. En

yüksek sünme sertliği değerine %15 prina katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır. Katkı miktarının artışına paralel olarak sünme sertliği değerlerinin artış göstermesi, karışımın tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin arttığını ifade etmektedir.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, zeytin posası (prina)'nın bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Saf bağlayıcıya prina katkısının eklenmesiyle penetrasyon değerinin ilk olarak azalma gösterdiği (%15 prina) daha sonra ise arttığı gözlenmiştir. Prina katkısıyla bağlayıcıların B 100/150 sınıfına geçtiği (%5 Prina hariç) görülmüştür. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının da penetrasyon değeri ile uyumluluk gösterdiği ve yumuşama değerinin arttığı, daha sonra ise azaldığı tespit edilmiştir. Sıcaklık hassasiyet ölçüsü olan PI değeri de bağlayıcılar için hesaplanıp en uygun bağlayıcının %10 prina katkılı bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir.
2. Bağlayıcıların RV sonuçları değerlendirildiğinde ise, katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı görülmüştür. Bu durum prina katkılı bağlayıcıların karıştırma ve yola serilme esnasındaki sıkıştırmak için harcanacak olan enerji ve ısının saf bağlayıcıya göre artacağını göstermektedir.
3. Bağlayıcıların DSR ve BBR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, prina katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıfının arttığı, düşük sıcaklık performans sınıfını ise kısmen azalttığı görülmüştür. Saf bağlayıcının performans sınıfı PG 58-22 olarak bulunmuşken, katkı oranının artmasıyla (%5, 10, 15 ve 20) sırasıyla performans sınıfları PG 58-22, PG 58-22, PG 64-28 ve PG 64-22 olarak bulunmuştur.
4. Karışımların Marshall stabilite deney sonuçları değerlendirildiğinde, prina'nın stabiliteyi artırdığı, en yüksek stabilite değerine ise %15 prina katkılı karışım numunesinin ulaştığı tespit edilmiştir.
5. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) deney sonuçları değerlendirildiğinde prina katkısının genel olarak nem hasarı dayanımını arttırdığını söylemek mümkündür. Nem hasarı dayanımının en yüksek olduğu karışımın %20 prina katkılı karışım olduğu görülmüştür.

6. Nem hasarı (ITS ve AASHTO T283) deney sonuçlarına göre en yüksek ITSR değeri %15 prina katkılı karışımda görüldüğü ve prina katkılı karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu ve nem hasarına karşı dirençli olduğunu ifade etmek mümkündür.

7. Esneklik modülü (ITSM) deney sonuçları değerlendirildiğinde ise, prina katkılı karışımların trafik etkisi sonucu kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azaldığı, en iyi sonucun %5 prina katkılı karışım numunesinde elde edilmiştir.

8. Statik sünme deney sonucu değerlendirildiğinde, prina katkılı karışım numunelerinin saf karışım numunesine göre sünme sertliği değerlerinin arttığı ve sünme sertliği değerinin en yüksek %15 prina katkılı karışım numunesi olduğu görülmüştür. Prina katkılı karışım numunelerin tekerlek izi deformasyonlarına karşı oldukça dirençli olduğu ifade edilebilir.

Sonuç olarak prina katkısının asfaltı sertleştirdiği ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı, bağlayıcının yüksek sıcaklık performansını artırarak kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırdığı, ancak buna karşın düşük sıcaklık performans kısmen azalttığı görülmüştür. Karışım sonuçlarına göre ise prina katkısının genel olarak %15 oranında kullanılmasının kaplamanın performans özelliklerini ciddi şekilde artırdığını ifade etmek mümkündür. Dolayısıyla prina katkısının, yol kaplamalarının servis ömrünü artıracığı, kaplama maliyetini düşüreceği ve bu katkının değer kazanarak aynı zamanda çevreye vereceği zararı bertaraf edeceğini söylemek mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- [1] Tacettin Geçkil. *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.
- [2] *Asfalt ve Uygulamaları*, 2001. İSFALT Bilimsel Yayınları, No:1, İstanbul, 280 s.
- [3] Tunç, A., 2004. *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*, Asil Yayın Dağıtım, E6.
- [4] *Karayolları Teknik Şartnamesi*, 2013. K.G.M. Yayınları, Ankara
- [5] Tunç, A., 2001. *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas, İstanbul.
- [6] Anonim, 2002, *Asfalt El Kitabı*, İstanbul.
- [7] *Shell Bitüm El Kitabı*, 2004, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:3, İstanbul, 334s.
- [8] Fırat Yelken. *Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2009.
- [9] Mehmet Yılmaz. *Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2011.
- [10] Maksut Seloğlu. *Reaktif Terpolimerin Bitümlü Sıcak Karışım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, 2015.
- [11] J.P.Zaniewskive M.E. Pumphrey, *Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol*, Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia, 2004, 107p.
- [12] Petersen, J.C., Robertson, R.E., Branthaver, J.F., Harnsberger, P.M., Duvall, J.J., Kim, S.S., Anderson, D.A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Antle, C.E. ve Sharma, M.G., 1994. *Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods*, Strategic Highway Research Program, SHRP A- 370, 197 p., National Research Council Washington, DC.C9.
- [13] R.B. McGennis, S. Shuler, ve H.U. Bahia, *Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods*, U.S. Department of Transportation Federal Highway.

- [14] Zoorob, S.E. ve Suparma, L.B., 2000. *Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt)*, **Cement&Concrete Composites**, 22, 233-242.
- [15] Yılmaz, M. ve Kök, B.V., 2008. *Stiren-Butidien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Süperpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi*, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 23:41, 811-819.
- [16] Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., 2007. *Siyah Karbonun Asfalt Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi*, **Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi**,25:2, 179-189.
- [17] İbrahim Balta. *Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2004.
- [18] Selçuk Torun. *Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Pr Plast S Kullanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2015.
- [19] Kırbaş, H., 1999, *Asfalt kaplamalarda bozulma sebepleri ve oluşan yüzeysel soyulmalar ile çatlakların modern malzemelerle onarım yöntemleri*, **Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, Kütahya, 3-5.
- [20] Sağlık, A. ve Güngör, G.A., 2006, *Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi*, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [21] Kuloğlu, M., Kök, B.V. ve Öndaş, M., 2004, *Sathi kaplamalarda kasma olayına etki eden faktörler*, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, 141-148.
- [22] Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., Sucu E. 2006. *Kurutulmuş Prinanın Yem Değeri ve Kuzu Besisinde Kullanılma Üzerinde Araştırmalar*. **Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 20:1, 13-23.
- [23] Üstünkol, F.N ve Turabi, A., 2009. *Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi*, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**,11:1,15-27.

- [24] Mistry, R. ve Roy, T.K., 2016. *Effect of Using Fly Ash As Alternative Filler in Hot Mix Asphalt*, **Perspectives in Science**, 8, 307-309.
- [25] Likitlersuang, S. And Chompoorat, T., 2016. *Laboratory Investigation Of The Performances of Cement And Fly Ash Modified Asphalt Concrete Mixtures*, **International Journal of Pavement Research and Technology**,9, 337-344.
- [26] Sharma, V., Chandra, S., & Choudhary, R. (2010). *Characterization of fly ash bituminous concrete mixes*, **Journal of Materials in Civil Engineering**, 22:12, 1209-1216.
- [27] Al-Mansob, R.A., Ismail, A., Alduri, A.N., Azhari, C.H.,Karim, M.R., Yusoff, N.I.Md., 2014. *Physical And Rheological Properties Of Epoxidized Natural Rubber Modified Bitumens*, **Construction and Building Materials**, 63, 242-248.
- [28] Caro, S., Vega, N., Husserl, J., Alvarez, A.E., 2016 . *Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders*, **Construction and Building Materials**,126, 369-380.
- [29] Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S., 2013. *Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete*, **Construction and Building Materials**, 48, 390-397.
- [30] Al, A., Yi-qiu, T., Hameed, A.T., 2011. *Starch as a modifier for asphalt paving materials*, **Construction and Building Materials**, 25,14-20
- [31] Chebil, S., Chaala, A., Roy, C., 2000, *Use of softwood bark charcoal as a modifier for road bitumen*, **Fuel**, 79, 671-683.
- [32] Portugal, A.C., Lucena, L.C., Lucena, A.E., Costa, D.B., Lima, K.A.,2017. *Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil*, **Construction and Building Materials**, 152, 1015-1026.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Semih İSSİ

Doğum Yeri ve Tarihi: Elazığ - (20.04.1991)

Adres: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
MALATYA

E-Posta: semih.issi23@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi 2009– 2015

