

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

**METİL METAKRİLAT BİRİMLERİ TAŞIYAN POLİPROPİLEN ESASLI GRAFT
KOPOLİMERİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alperen ÖBEK**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

MAYIS 2021

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

**METİL METAKRİLAT BİRİMLERİ TAŞIYAN POLİPROPİLEN ESASLI GRAFT
KOPOLİMERİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alperen ÖBEK
(36173621010)**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL
Eş Danışman: Prof. Dr. Kadir DEMİRELLİ**

MAYIS 2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

İlk olarak ve en önemlisi, bana sadece bir yüksek lisans öğrencisi olarak grubuna katılma fırsatı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda tez konusunu tasarlayıp öneren, yol gösteren ve yürütülmesinde bilgi ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve sabırla danışmanlığı yapan Sayın Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Kadir DEMİRELLİ'ye,

Disiplinler arası yüttüğüm bu çalışmanın gerek laboratuvar kısmında örneklerin taranması ve analiz edilmesinde gerekse tez yazım aşamasında değerli fikir ve düşünceleriyle katkı sağlayan Fırat Üniversitesi Öğr. Üyesi Prof. Dr. Mehmet YILMAZ 'a, Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU'na, Dr. Öğr. Üyesi M. Fatih COŞKUN'a, Doç Dr. Kenan KORAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Erkut YALÇIN'a ve Munzur Üniversitesi Öğr. Üyesi Doç Dr. Murat TOPAL'a ve Dr. Öğr. Üyesi Naim ASLAN'a,

Birçok laboratuvar çalışmamda bana koşulsuz destek sağlayan ve yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Fatih BİRYAN'a, Öğr. Gör. Zülfükar AKSAĞAN'a, İnş. Yük. Müh. Ceren Beyza İNCE'ye,

Kullanılan bitümün temininde ve çeşitli laboratuvarların kullanılmasını sağlama hususunda büyük yardımları dokunan Karayolları 82. Şube Şefi Yüksel BAYKARA'ya, Araştırma ve Geliştirme Başmüh.'de çalışan bütün personellere ve özellikle İlhan BİNGÖL'e,

Her daim yanımda bulunan, desteğini asla esirgemeyen ve her sorunumda bana yardımcı olabilmek için uğraşan değerli dostum Arş. Gör. Dr. Aykut ÖZPOLAT'a

Son olarak, hayatımın her aşamasında olduğu gibi, bu tez çalışmam süresince de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme,

En içten sevgilerimi ve sonsuz şükranlarımı sunarım. Sizlere çok şey borçluyum.

Alperen ÖBEK

Malatya - 2021

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Metil Metakrilat Birimleri Taşıyan Polipropilen Esaslı Graft Kopolimerin Bitüm ve Bitümlü Karışımların Özellikleri Üzerine Etkileri’ başlıklı bu çalışmada bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan özenle yazıldığını ve yararlandığım kaynakların, kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Alperen ÖBEK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	6
2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar	6
2.1.1 Agregaların özellikleri.....	7
2.1.1.1 Gradasyon.....	7
2.1.1.2 Biçimsel özellikler.....	8
2.1.1.3 Yüzey yapısı	9
2.1.1.4 Porozite.....	9
2.1.1.5 Özgül ağırlık.....	9
2.1.2 Agregalara uygulanan deneyler	9
2.1.2.1 Elek analizi deneyi (ASTM C131 – TS 1900)	10
2.1.2.2 Aşınma (Los Angeles) deneyi (TS EN 1097-2 - AASHTO T96)	10
2.1.2.3 Özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-6)	10
2.1.2.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi (TS EN 1367-1, AASHTO T104)	11
2.1.2.5 Cilalanma deneyi (TS EN 1097-8).....	11
2.1.2.6 Su tesirine karşı dayanıklılık (Soyulma) deneyi (ASTM D 1664).....	11
2.1.2.7 Yassılık ve ince-uzunluk indekslerinin tayini deneyi (BS 812)	12
2.2 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar	12
2.2.1 Bitümün kimyasal bileşimi, yapısı ve reolojisi	15
2.2.1.1 Bitümün kimyasal bileşimi.....	15
2.2.1.2 Bitümün yapısı.....	17
2.2.1.3 Bitümün reolojisi	19
2.2.2 Bitümün davranışı	19

2.2.2.1 Yüksek sıcaklık davranışı.....	20
2.2.2.2 Düşük sıcaklık davranışı.....	21
2.2.2.3 Orta sıcaklık davranışı.....	22
2.2.2.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı.....	22
2.2.3 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan geleneksel deneyler.....	24
2.2.3.1 Penetrasyon deneyi (ASTM D5).....	25
2.2.3.2 Yumuşama noktası deneyi (ASTM D36).....	26
2.2.3.3 Düktilite deneyi (ASTM D113).....	27
2.2.3.4 Parlama noktası deneyi (ASTM D92).....	27
2.2.3.5 Özgül ağırlık tayini (ASTM D70).....	27
2.2.4 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan Superpave deneyleri.....	28
2.2.4.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) (ASTM D2872).....	32
2.2.4.2 Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV) (ASTM D6521).....	33
2.2.4.3 Dönel viskozimetre deneyi (RV) (ASTM D2196).....	33
2.2.4.4 Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR) (ASTM D7552).....	35
2.2.4.5 Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR) (ASTM D6648).....	37
2.3 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	39
2.3.1 Stabilite.....	39
2.3.2 Dayanıklılık (durabilite).....	39
2.3.3 Esneklik (fleksibilite).....	39
2.3.4 İşlenebilirlik.....	39
2.3.5 Geçirimsizlik.....	40
2.3.6 Yorulmaya karşı direnç.....	40
2.3.7 Kaymaya karşı direnç.....	40
2.4 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar.....	40
2.4.1 Tekerlek izi oluşumu.....	41
2.4.2 Yorulma çatlakları.....	41
2.4.3 Düşük sıcaklık çatlakları.....	41
2.4.4 Kusma.....	41
2.5 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri.....	41
2.5.1 Marshall dizayn yöntemi.....	41
2.5.2 Superpave dizayn yöntemi.....	42
2.6 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler.....	43
2.6.1 Marshall stabilite ve akma deneyi (TS EN 12697-34).....	43

2.6.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS)	44
2.6.3 Dolaylı çekme mukavemeti deneyi (ITS) (ASTM D4867)	44
2.6.4 Modifiye lottman deneyi (AASHTO T-283)	45
2.6.5 Dolaylı çekme esneklik modülü deneyi (ITSM) (BS DD213)	46
2.6.6 Sünme deneyi	47
2.7 Malzemelerin Karakterizasyonu	48
2.7.1 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FT-IR)	49
2.7.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	49
2.7.3 X-ışını difraktometresi (XRD)	50
3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU	51
3.1 Literatür Özeti	57
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	70
4.1 Bitümlü Bağlayıcının Seçilmesi	70
4.2 Kopolimer Sentezi	71
4.3 Agreganın Seçilmesi	77
4.4 Modifiye Bitümlerin Hazırlanması	78
4.5 Modifiye Bitümlerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	79
4.6 Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Kısa Süreli Yaşlandırılması	81
4.7 Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Performans Deneyleri	85
4.7.1 Dönel viskozimetre (RV) deneyi	85
4.7.2 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi	88
4.7.3 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi	97
4.8 Saf ve Kopolimer Katkılı Bağlayıcıların Karakterizasyonu	99
4.8.1 Saf ve katkıli bağlayıcıların SEM analizleri	99
4.8.2 Saf ve katkıli bağlayıcıların XRD analizleri	102
4.8.3 Saf ve katkıli bağlayıcıların FT-IR analizleri	105
4.9 Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması	107
4.9.1 Marshall tasarım yöntemine göre karışım numunelerinin hazırlanması	108
4.9.2 Optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi	111
4.9.3 Marshall karışım numunelerine uygulanan performans deneyleri	118
4.9.3.1 Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları	118
4.9.3.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları	121
4.9.3.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları	123
4.9.3.4 ITSM deney sonuçları	126

4.9.3.5 Statik sünme deney sonuçları	128
5. SONUÇ	133
KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ	142



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1:	Türkiye’deki yol ağı uzunluğunun sath cinsine göre dağılımı	2
Çizelge 2.1:	Geleneksel Bağlayıcı Test Yöntemleri	25
Çizelge 2.2:	Superpave Bağlayıcı Deneyleleri ve Kullanım Amaçları.....	29
Çizelge 2.3:	Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi.....	30
Çizelge 3.1:	Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması	52
Çizelge 3.2:	Modifiye bitümler için en yaygın katkı maddeleri	53
Çizelge 3.3:	Polimerlerin sınıflandırılması	54
Çizelge 4.1:	Saf B 100/150 bitümün fiziksel özellikleri	71
Çizelge 4.2:	Atık PP’in Fiziksel Özellikleri.....	71
Çizelge 4.3:	Atık MAH’in Fiziksel Özellikleri.....	72
Çizelge 4.4:	Atık PMMA’nın Fiziksel Özellikleri.....	72
Çizelge 4.5:	Polipropilen-g- (MMA-co-MA)’nın Fiziksel Özellikleri	75
Çizelge 4.6:	Polipropilen-g- (MMA-co-MA)’in FT-IR Bandları	76
Çizelge 4.7:	Seçilen Agreganın Fiziksel Özellikleri	77
Çizelge 4.8:	Agrega Gradasyonu	77
Çizelge 4.9:	Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Özellikleri.....	79
Çizelge 4.10:	Bağlayıcıların PI değerleri	81
Çizelge 4.11:	Saf ve Modifiye Bağlayıcılara Ait Kütle Kayıpları	82
Çizelge 4.12:	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Geleneksel Deneyle Sonuçları.....	83
Çizelge 4.13:	RTFOT ile Yaşlandırılan Bağlayıcıların PI Değerleri	84
Çizelge 4.14:	Bağlayıcıların RV Deneyle Sonuçları	86
Çizelge 4.15:	Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Değerleri	87
Çizelge 4.16:	Yaşlandırılmamış Bitümlere Ait DSR Deneyle Sonuçları	89
Çizelge 4.19:	Bağlayıcıların BBR Deneyle Sonuçları	97
Çizelge 4.20:	Optimum Bitüm Oranını Belirlemek İçin Kullanılan B100/150 Saf Bitüme Ait Deneyle Sonuçları.....	114
Çizelge 4.21:	Optimum Bitüm Oranının Tespitinde Kullanılan Değerler	117
Çizelge 4.22:	Performans Deneyleleri İçin Üretilen Numune Sayıları.....	118
Çizelge 4.23:	Numunelere Ait Marshall Stabilite ve Akma Deneyle Sonuçları.....	119
Çizelge 4.24:	RMS Deneyle Sonuçları	122
Çizelge 4.25:	ITS Deneyle ile Elde Edilen Sonuçlar	125
Çizelge 4.26:	Karışımların ITSM Deneyle Sonuçları	127
Çizelge 4.27:	Karışım Numunelerinin Rm Değerleri.....	131

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1:	Esnek Üstyapı Enkesiti.....	1
Şekil 2.1:	Agrega Gradasyon Tipleri ve Görsel Dağılımı	8
Şekil 2.2:	Bitümlü Türler	13
Şekil 2.3:	Petrolün İşlenmesi ve Bitümlü Bağlayıcının Elde Edilişi.....	14
Şekil 2.4:	Bitüm Emülsiyonun Şematik Gösterimi	15
Şekil 2.5:	Bitümlü Bağlayıcın Yapısını Oluşturan Ana Unsurlar	16
Şekil 2.6:	Sol Tipi Bitüm.....	18
Şekil 2.7:	Jel Tipi Bitüm.....	18
Şekil 2.8:	Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamanlara Göre Davranışı.....	20
Şekil 2.9:	Bitümün Sıcaklık Hassasiyeti.....	20
Şekil 2.10:	Bitümün Moleküler Düzeyde Akışı	21
Şekil 2.11:	Viskoelastik Davranış ve Yay-Amortisör Modeli.....	22
Şekil 2.12:	Bitümdeki Bileşenlerin Yaşlanma Sonucunda Değişimi	23
Şekil 2.13:	Bitümün Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması	24
Şekil 2.14:	Penetrasyon Cihazı ve Ölçüm Yapılmış Penetrasyon Kalıbı.....	25
Şekil 2.15:	Yumuşama Noktası Cihazı.....	26
Şekil 2.16:	Parlama Noktası Cihazı.....	27
Şekil 2.17:	RTFOT Cihazı ve RTFOT numuneleri	32
Şekil 2.18:	PAV Cihazı ve PAV Numuneleri.....	33
Şekil 2.19:	RV Deney Tüpleri ve Cihazı.....	34
Şekil 2.20:	Asfalt Bağlayıcı İçin Tipik Viskozite Eğrisi	34
Şekil 2.21:	DSR Deney Düzeneği ve Numunelerin Karşılaştığı Deformasyon Yönleri ..	35
Şekil 2.24:	DSR Cihazı ve DSR Numuneleri	37
Şekil 2.25:	BBR Deney Cihazı ve BBR Numuneleri	38
Şekil 2.26:	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi	38
Şekil 2.27:	ITS Deneyinde Numune Yüklenmesi ve Kırılması.....	45
Şekil 2.28:	ITSM Deneyi Şeması	47
Şekil 2.29:	FT-IR Cihazı	49
Şekil 2.30:	SEM Görüntüleme Cihazı	50
Şekil 2.31:	XRD Görüntüleme Cihazı.....	50
Şekil 3.1:	Bağlanma Reolojisinde Yaşlanmanın Etkisi	58

Şekil 3.2:	SBS ile Karıştırılan Bitümün Tekerlek İzi Testinden Elde Edilen Rut Derinliği.	59
Şekil 3.3:	Karışım Sıcaklığı/Karıştırma Süresi ve Akış	60
Şekil 3.4:	(a) M1 30 dak, (b) M2 30 dak, (c) M4 30 dak, (d) M4 24 sa, (e) M7 30 dak., (f) M7 24 saat kürlenme, (g) M7 48 saat kürlenme ve (h) M8 2 saat karıştırma.....	61
Şekil 3.5:	100'lük Büyütme ile SBS PMB Örneklerinin Flüoresan Görüntüleri.	63
Şekil 3.6:	100'lük Büyütme ile EVA PMB Örneklerinin Flüoresan Görüntüleri.	64
Şekil 3.7:	SBS ve ST'nin Esnek Modül Üzerindeki Etkileri	65
Şekil 3.8:	PP Modifiye Edilmiş SMA Karışımının Performans Testleri Arasındaki Doğrusal İlişkiler.....	66
Şekil 3.9:	SBS ve Elvaloy RET (EVLr) ile Modifiye Edilen 50/70 Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi Grafiği	66
Şekil 3.10:	Konvansiyonel ve %8 Atık Polimer Modifiye Bitümlü (WPMB) Karışım İçin Esnek Modül Değerleri	68
Şekil 3.11:	Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları	68
Şekil 3.12:	Katkılı ve Katkısız Bitüm Numunelerinin Ortalama Tekerlek İzi Derinlikleri (mm).....	69
Şekil 4.1:	MMA Monomeri Hazırlamak İçin Kurulan Deney Düzeneği	72
Şekil 4.2:	Atık Polimetilmetakrilat (PMMA)'ın 500 °C'ye Kadar Isıtıldığında Metil Metakrilat (MMA) Monomerine Dönüşüm Reaksiyonu	73
Şekil 4.3:	MMA Monomeri	73
Şekil 4.4:	Polipropilen-graft- (MMA-co-MA) Bileşenleri	74
Şekil 4.5:	Hazırlanan Graft Kopolimerin Çöktürme – Süzülme ve Kurutulması.....	74
Şekil 4.6:	Polipropilen-g- (maleikanhidrit-ko-metilmetakrilat)'ın Sentezi	75
Şekil 4.7:	Polipropilen-g- (MMA-co-MA)'ın FT-IR Spektrumu.....	76
Şekil 4.8:	Agrega Gradasyon Eğrisi	77
Şekil 4.9:	Karıştırma Cihazı ve Kopolimerin Bitüme Eklenmesi	78
Şekil 4.10:	Bağlayıcıların Penetrasyon Değerlerindeki Değişimler	79
Şekil 4.11:	Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değerlerindeki Değişimler.....	80
Şekil 4.12:	PI Değerinin Katkı Oranına Göre Değişimi	81
Şekil 4.13:	RTFOT ile Yaşlanan Bağlayıcıların Kütle Kayıp Oranları.....	82
Şekil 4.14:	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Penetrasyon Değerleri	83
Şekil 4.15:	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değerleri.....	84
Şekil 4.16:	RTFOT Sonrası Bağlayıcıların PI Değerleri	85
Şekil 4.17:	Bağlayıcıların 135 ve 165 °C Sıcaklıktaki Viskoziteleri.....	86

Şekil 4.18:	Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi.....	87
Şekil 4.19:	Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları	88
Şekil 4.20:	Yaşlandırılmamış Bitümlerin G^* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	89
Şekil 4.21:	Yaşlandırılmamış Bitümlerin δ^o Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	90
Şekil 4.22:	Yaşlandırılmamış Bitümlerin $G^*/\sin \delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi.....	91
Şekil 4.23:	RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin G^* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişim.	92
Şekil 4.24:	RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin δ^o Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi .	93
Şekil 4.25:	RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	94
Şekil 4.26:	PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin G^* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	95
Şekil 4.27:	PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $\delta(^o)$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi ...	96
Şekil 4.28:	PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi	96
Şekil 4.29:	Bağlayıcıların Sünme Sertliği Değerleri	98
Şekil 4.30:	Bağlayıcıların m-değerleri.....	98
Şekil 4.31:	Bağlayıcıların altın tozu ile kaplanması ve SEM cihazı	99
Şekil 4.32:	Saf Bitüme Ait SEM Görüntüleri.....	100
Şekil 4.33:	B+%3koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri.....	100
Şekil 4.34:	B+%4koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri.....	100
Şekil 4.35:	B+%5koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri.....	101
Şekil 4.36:	B+%6koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri.....	101
Şekil 4.37:	Saf Bitüme Ait XRD Görüntüsü	102
Şekil 4.38:	B+%3koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü	102
Şekil 4.39:	B+%4koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü	103
Şekil 4.40:	B+%5koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü	103
Şekil 4.41:	B+%6koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü	104
Şekil 4.42:	Saf Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri	105
Şekil 4.43:	B+%3koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri.....	105
Şekil 4.44:	B+%4koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri.....	106
Şekil 4.45:	B+%5koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri.....	106
Şekil 4.46:	B+%6koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri.....	107
Şekil 4.47:	Agregaların Etüvde Isıtılması ve Kalıplar ile Bitümün Isıtılması.....	108
Şekil 4.48:	Karıştırma Cihazı	108
Şekil 4.49:	Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall Tokmağı.....	109

Şekil 4.50:	Hazırlanan karışım numuneleri ve kumpas ile yüksekliklerinin belirlenmesi	110
Şekil 4.51:	Arşimet terazisi	110
Şekil 4.52:	Numunelerin su banyosunda bekletilmesi ve Marshall stabilite deneyine tabi tutulması	111
Şekil 4.53:	Dp-%Bitüm	115
Şekil 4.54:	Stabilite-%Bitüm	115
Şekil 4.55:	Akma-%Bitüm	115
Şekil 4.56:	VMA-%Bitüm	116
Şekil 4.57:	Vh-%Bitüm	116
Şekil 4.58:	Vf-%Bitüm	116
Şekil 4.59:	Kontrol Numunesi Deney Sonuçları	117
Şekil 4.60:	Karışımların Stabilite Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	120
Şekil 4.61:	Karışımların Akma Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	120
Şekil 4.62:	Karışımların MQ Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	121
Şekil 4.64:	Vakum Cihazı, Numunelerin Streç Filmle Sarılması ve Dondurucuda Bekletilmesi.....	123
Şekil 4.65:	Su Banyosunda Bekletilen Numuneler, ITS Deneyi ve Kırılan Numuneler	124
Şekil 4.66:	Karışımların ITS Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi.....	125
Şekil 4.67:	Karışımların ITSR Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	126
Şekil 4.68:	ITSM Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	127
Şekil 4.69:	Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği	128
Şekil 4.70:	B+%3koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği	129
Şekil 4.71:	B+%4koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği	129
Şekil 4.72:	B+%5koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği	130
Şekil 4.73:	B+%6koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği	130
Şekil 4.74:	Karışım numunelerin toplam birim şekil değiştirme - zaman grafiği	131
Şekil 4.75:	Sünme Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi	132

SİMGELER VE KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü sıcak karışım
PG	: Performans sınıfı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği
DSR	: Dinamik kesme reometresi
RV	: Dönel viskozimetre
RTFOT	: Dönel ince film etüvü deneyi
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kabı
BBR	: Kiriş eğme reometresi
ITSM	: Dolaylı çekme rijitlik modülü
ITSR	: Dolaylı çekme dayanım oranı
SUPERPAVE	: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama
DDT	: Doğrudan çekme deneyi
RMS	: Kalıcı Marshall Stabilitesi
MQ	: Marshall oranı
G _k	: Kaba agreganın özgül ağırlığı
G _i	: İnce agreganın özgül ağırlığı
G _f	: Fillerin özgül ağırlığı
V	: Karışım numunesinin hacmi
D _p	: Karışım numunesinin pratik özgül ağırlığı
W _a	: Agregada içerisindeki bağlayıcı yüzdesi
M _a	: Karışım içindeki agregada miktarı (gr)
M _b	: Karışım içindeki bağlayıcı miktarı (gr)
W _b	: Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi
G _b	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
D _t	: Karışımın teorik özgül ağırlığı
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
V _f	: VMA'nın bağlayıcıyla doluluk oranı
G _{sa}	: Agregada zahiri özgül ağırlığı
G _{se}	: Agregada efektif özgül ağırlığı
S _m	: Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ITS	: Dolaylı çekme dayanımı

G^* : Kompleks kayma modülü
 δ : Faz açısı



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METİL METAKRİLAT BİRİMLERİ TAŞIYAN POLİPROPİLEN ESASLI GRAFT KOPOLİMERİN BİTÜM VE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

ALPEREN ÖBEK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

143+xv sayfa

2021

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada, termoplastik atıklardan, bitümün fiziksel ve kimyasal yapısına uygun, özgün bir graft kopolimerin sentezlenmesi ve bu polimerin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla önce atık hale gelen ve ticari yaygınlığı bulunan termoplastik atıklardan polimetilmetakrilat (PMMA) termal yollarla depolimerizasyona uğratarak metilmetakrilat (MMA) monomeri elde edilmiştir. Monomer, FT-IR spektroskopisi ile karakterize edildikten sonra, atık halde bulunan polipropilen (PP) ve maleikanhidrit (MAH)'in farklı ağırlık oranları ile kimyasal bir prostesten geçirilerek özgün polipropilen-graft-(metilmetakrilat-ko-maleikanhidrit) katkı maddesi üretilmiştir. Üretilen graft kopolimer katkı maddesinin karakterizasyonu yapılmış ve B 100/150 penetrasyonlu saf bitüme ağırlıkça %3-%6 aralığında ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri, geleneksel ve Superpave deneyleriyle, kimyasal özellikleri ise SEM, XRD ve FT-IR spektroskopisi analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca modifiye bitümler kullanılarak Marshall Karışım Dizayn Yöntemi'ne göre bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall stabilite ve akma, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Esneklik modülü (ITSM), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Statik Sünme testlerine maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre kopolimerin bitüm ile reaksiyona girdiği, bitümün sertliğini artırarak sıcaklık hassasiyetini düşürdüğü ve bitümün yüksek ve düşük sıcaklık performansı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kopolimerin bitümlü sıcak karışımların stabilitesi, nem hasarı ve kalıcı deformasyon direnci üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Bitüm, Polipropilen, Metil Metakrilat, Graft Kopolimer, Modifiye Bitüm, Bitümlü Sıcak Karışım

ABSTRACT

Master's Thesis

EFFECTS OF POLYPROPYLENE BASED GRAFT COPOLYMER CARRYING METHYL METACRYLATE UNITS ON THE PROPERTIES OF BITUMEN AND BITUMINOUS MIXTURES

ALPEREN ÖBEK

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

143+xv pages

2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study, it was aimed to synthesize a unique graft copolymer suitable for the physical and chemical structure of bitumen from thermoplastic wastes and to investigate the effect of this polymer on bitumen and bituminous hot mixtures. For this purpose, methyl methacrylate (MMA) monomer was obtained by thermal depolymerization of polymethylmethacrylate (PMMA) from thermoplastic wastes, which became waste first and are widely available commercially. After the monomer was characterized by FT-IR spectroscopy, a unique polypropylene-graft-(methylmethacrylate-co-maleicanhydride) additive was produced by passing it through a chemical process with different weight ratios of waste polypropylene (PP) and maleicanhydride (MAH). The produced graft copolymer additive was characterized and modified bitumens were prepared by adding in the range of 3%-6% by weight to pure bitumen with B 100/150 penetration. Physical and rheological properties of pure and modified bitumens were investigated by conventional and Superpave tests, and chemical properties by SEM, XRD and FT-IR spectroscopy analyzes. In addition, bituminous hot mix samples were prepared according to Marshall Mix Design Method using modified bitumens. These samples were subjected to Marshall stability and flow, Retained Marshall Stability (RMS), Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM), Indirect Tensile Strength (ITS) and Static Creep tests.

According to the test results, it has been observed that the copolymer reacts with bitumen, increases the hardness of the bitumen and decreases the temperature sensitivity, and has a positive effect on the high and low temperature performance of the bitumen. In addition, it has been found that the copolymer has an improving effect on the stability, moisture damage and permanent deformation resistance of bituminous hot mixes.

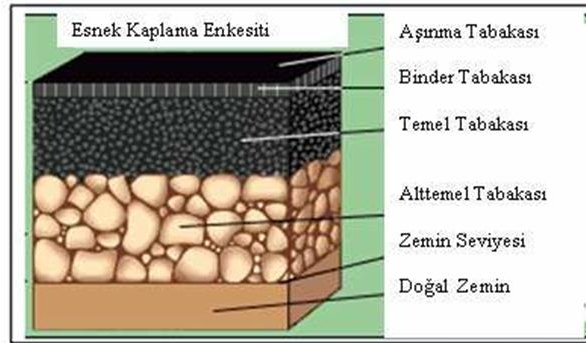
KEYWORDS: Bitumen, Polypropylene, Methyl Methacrylate, Graft Copolymer, Modified Bitumen, Hot Mix Asphalt

1. GİRİŞ

Ulaşım ihtiyacının farklı sistemlerle sağlandığı günümüz dünyasında, aktivitesi en yüksek ulaştırma sistemini karayolları oluşturmaktadır. Bu nedenle karayolu ulaştırma inşası hem kentsel hem de kırsal alanlarda sürekli bir talep oluşturmaktadır.

Üzerinde her türlü taşıt ve yayanın güvenli ulaşımını sağlamak için inşa edilen yapılar olarak tanımlanan karayolu yapısı; yarma ve dolgulardan oluşan yol alt yapısı ile trafik yüklerini taşıyan ve bu yükleri en üst katmandan alt katmana kadar azaltarak ileten çok katmanlı yol üstyapısı olmak üzere iki farklı kısımdan oluşmaktadır (Ilıcalı ve diğ. 2001). Yol üstyapısı ise kaplama tabakasında kullanılan bağlayıcı malzeme türüne göre rijit kaplamalı ve esnek kaplamalı yollar olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadırlar. Rijit yol üstyapılarında portland çimento, esnek yol üstyapılarında ise değişik kökenli (hidrokarbonlu) bitümlü bağlayıcılar kullanılmaktadır (Orhan 2006; Aslan ve Sarıışık, 2018).

Rijit üstyapılar, en üstte tek tabakalı beton bir plak (sürekli donatılı veya kesikli donatılı) ve altında da daha çok granüler bir alt temeli olacak şekilde inşa edilmektedir. Esnek üstyapılar ise tabakalı bir üstyapı tipi olup, kaplama tabakası (aşınma ve binder tabakaları) agrega ile bitümlü bağlayıcı malzeme karışımından, temeli bitümlü veya granüler malzemedan, alttemeli de granüler veya kırma malzemedan oluşmaktadır (Terzi, 2000; Giriş, 2007; Özcan, 2008). Şekil 1.1’de tipik bir esnek üstyapı enkesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Esnek Üstyapı Enkesiti (Anonim, 2018)

Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de karayolları en çok esnek üstyapı şeklinde projelendirilip uygulanmaktadır. Türkiye’de 2020 yılı itibarıyla Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) sorumluluğunda bulunan yol ağı uzunluğunun yol sınıfı ve satıh cinsine göre dağılımı Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1: Türkiye’deki yol ağı uzunluğunun satıh cinsine göre dağılımı (km) (Anonim, KGM, 2018)

SATI H CİNSİNE GÖRE YOL AĞI (KM)							
	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer Yollar	TOPLAM
Otoyol (*)	3 060	-	-	-	-	-	3 060
Devlet Yolları	17 991	12 654	56	27	-	278	31 006
İl Yolları	4 689	26 163	243	453	440	2 177	34 165
TOPLAM	25 740	38 817	299	480	440	2 455	68 231

Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere Türkiye’deki otoyollar, devlet yolları ve il yollarının toplam uzunluğu 68231 km olup bunun 25740 km’si yüksek standartlı esnek üst yapı, 38817 km’si düşük standartlı üst yapı türünden olup yolların yaklaşık %95’i bitümlü karışımlarla inşa edilmiştir. Bitümlü karışımların kütlece %93-95’i agregalardan ve %5-7’si bitümlü bağlayıcılardan oluşmaktadır. Karışımdaki bitümlü bağlayıcının temel görevi adezyonu sağlayarak agregata taneciklerini birbirine bağlamak ve tekrarlı ve değişken trafik yükleri altında agregaların dağılması/ayrışmasını önlemektir. Agregalar ise içsel sürtünmeyi ve hacimsel stabiliteyi sağlamaktadır (Gökalp ve diğ., 2019). Mineral agregalar, bitümlü bağlayıcı ve hava boşluklarından oluşan esnek üst yapı kaplama tabakası, araçların ve insanların hareketinin gerçekleştiği yüzeyi oluşturur. Kaplama bileşenlerinin (bağlayıcı, agregata) kalitesi (özellikleri) ve karışımdaki oranı kaplama performansını doğrudan etkilediği için araçların ve yolcularının seyahat güvenliği ve konforunu sağlamada büyük bir önem taşımaktadır. Agregata malzemesine göre bitümlü bağlayıcı malzeme çok pahalı olup yol yapımında genellikle kaplamada kullanılmaktadır. Kaplama imalatında agregata arasında bir bağlayıcı olarak kullanılan bitüm dünyada birbirinden farklı kalitelere sahip ham petrolün rafine edilmesinden elde edilmektedir. Bunlardan da kalite ve verim açısından çok azı bitüm üretimi için uygun bulunmuştur (Avcı ve diğ., 2009).

Özellikle karayolları başta olmak üzere farklı mühendislik uygulamalarında bağlayıcı malzeme olarak kullanılan bitüm sıcak hava koşullarında veya statik yükler altında viskoz bir sıvı gibi davranır. Ancak soğuk iklimlerde veya hızla uygulanan yükler altında ise elastik bir katı özelliği göstermektedir. Bitüme ait bu iki özellik bitümle imal edilen esnek üstyapı

kaplamalarında sıcak iklim koşulları ve yoğun trafik yükleri altında tekerlek izi, düşük sıcaklık koşullarında ise termal çatlaklar gibi kalıcı deformasyonların oluşumuna neden olmaktadır (Gershkoff vd., 1999; Isacson ve Lu, 1999; Ilıcalı vd, 2001; Perez-Lepe vd., 2003; Çubuk, 2007; Ahmedzade vd., 2014; Görkem, 2014; Ahmedzade vd., 2015; Ahmedzade vd.,2016). Kalıcı deformasyonlar, esnek kaplamalardaki en büyük sorundur. Bu durum, sürüş kalitesini azaltarak taşıt araçlarının işletme maliyetlerinde artışa ve kaplamalarda sık sık bakım müdahalesinin yapımına yol açmaktadır (Işıkyakar, 2009).

Dünya genelinde ulaşım yolları inşası yaşanan bu sorunlarla birlikte devam ederken, kaliteli sürdürülebilir kaplama ihtiyacına olan talepler ulaşım uzmanları ve mühendislerini, bitümün karakteristiklerinin polimerik olan ve olmayan çeşitli modifiyer katkı maddeleriyle iyileştirilerek kaplamaların özelliklerinin geliştirilmesinde uygulanan bitüm modifikasyonuna odaklanmıştır. Çünkü kaplamanın viskoelastik özellikleri, bağlayıcı tarafından belirlenir ve bu nedenle, bitüm kalitesi, deformasyonlara karşı direncini belirlemede önemli bir rol oynar. Bitüm modifikasyonunda temel amaç, kaplamaların yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olmasını sağlamaktır (Whiteoak, 2004; Işıkyakar, 2009). Kaplamaların özelliklerinin geliştirilmesinde başvurulan bu yöntemde genel olarak; dolgu maddeleri (taş tozu, kireç, uçucu kül vb.), ekstender (kükürt, lignin), polimer (elastomer, plastomer), fiber (asbest, taş yünü, fiberglas vb.), oksidan (manganez tuzu), antioksidan (kurşun karışımları, karbon vb.) gibi katkı maddeleri kullanılmaktadır (Görkem, 2014).

Bitümlü bağlayıcıların ve karışımların modifikasyonunda kullanılan en önemli katkı maddesi grubu polimer katkılardır (Çubuk, 2007). Son yıllarda yapılan araştırmalar bitüme, bitümle uyumlu bazı polimerlerin eklenmesinin bitümün reolojik davranışını etkilediğini, özelliklerini iyileştirdiğini ve bitüme üstün özellikler kazandırdığını ortaya koymuştur. Bitüme polimer ilavesinin ana amacı, bitümün viskoelastik davranışını iyileştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı duyarlılığını azaltmaktır (Görkem, 2014). Polimer modifiye bitümler güçlü adezyon yetenekleri ile suyun bitümlü bağlayıcı ve agrega arasına girmesini önlemekte, asfalt kaplamanın sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini azaltmakta ve sonuç olarak karışımın kalıcı deformasyonlara (oluklanma) ve yorulma çatlaklarına karşı direncini gözle görülür bir biçimde arttırmaktadır (Özcan, 2008). Ancak, bu katkı maddelerinin birçoğu yurtdışından temin edilmekte ve son derece pahalıdır. Ülkemizde, esnek üstyapı inşaatında kullanılan SBS polimeri tümüyle ithal edilmekte ve yol yapım maliyetlerini önemli ölçüde

arttırmaktadır. Dolayısıyla alternatif katkı maddelerinin üretilmesi için gerekli araştırma çalışmalarının yapılması büyük bir önem taşımaktadır.

Dünya çevresel atık sorunlarıyla karşı karşıyadır. Özellikle her geçen gün artış gösteren katı atıklardan biyobozunur olmayan yapıya sahip atıkların yıllarca ekosistemde kalıcılığı büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu bağlamda; hammadde kaynağı petrol olan polimer esaslı plastik atık maddelerin geri kazanımı oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Bu alternatif, her geçen gün büyük miktarda üretilen bu atığın nerede ve nasıl bertaraf edileceği sorununu çözebileceği gibi hem malzeme hem de enerjiyi korur ve toplam katı atık miktarında önemli bir azalma sağlar (Çubuk, 2007). Polimerik atıklar içerisinde biyobozunur/biyodönüşür olmayan termoplastikler yüksek bir oran teşkil etmekte ve bu oran her geçen gün artarak ciddi çevresel problemlere sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu atıkların faydalı ürünlere dönüştürülmesi, bu krizin en sürdürülebilir çözümlerinden biri olarak kabul edildiği için yeni ve yenilikçi kullanımlarına yönelik araştırmalar sürekli olarak ilerlemektedir (Özcan, 2008).

Plastik atıkların çevresel etkilerini azaltmak için atık yönetiminde hiyerarşik bir yaklaşım amaçlanmış ve bu doğrultuda atık minimizasyonu, yeniden kullanım, kimyasal geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve depolama yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler içerisinde kimyasal geri dönüşüm yöntemi hem sürdürülebilir hem de bu yöntemle elde edilen ürünler hammadde olarak kullanılabilir. Bu nedenle kimyasal yöntemlerle geri dönüşümü mümkün olan termoplastiklerin hammadde olarak kullanılması halinde, hammadde ihtiyacının azalması, doğal dengenin korunması, atıkların çevreyi kirletmelerinin önlenmesi, atık kullanımı ile enerji tasarrufunun sağlanması açısından önemlidir. Ayrıca, bakir bitüm, bakir plastiklerin kaynağı olan polimerlerin uygulanmasıyla modifiye edildiği için, atık plastik veya polimerlerin alternatif ürünleri bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği şüphesiz hem uluslararası hem de ulusal düzeyde özellikle daha ekonomik olacaktır (Gökkaya, 2013).

Bu çalışmada, bitüm ve bitümlü karışımların sıcaklık değişimlerine ve trafik yüklerine karşı dayanımını arttırmak için çoğu yurt dışından ithal edilen oldukça pahalı polimer modifiyerler yerine çevre ve canlı sağlığını korumak amacıyla geri kazanılabilir termoplastik atıklardan daha ucuz alternatif yerli bir modifiyer geliştirmek ve dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda;

- Kimya ve diğer mühendislik bilim dallarından oluşan bir ekip ile bitümün fiziksel ve kimyasal yapısına uygun, termoplastik özelliğe sahip atık polimerlerden (polipropilen

(PP) ve Meta metilkrilat (MMA veya HEMA)) termal ve kimyasal işlemlerle özgün polipropilen esaslı graft kopolimer sentezlemek,

- Sentezlenen özgün polimer ile bitümü modifiye etmek ve
- Bu özgün polimerin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) özellikleri üzerine etkilerinin deneysel yöntemlerle açıklığa kavuşturulması amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda tezin ikinci bölümünde esnek üst yapı kaplamalarını oluşturan malzemeler (agrega ve bitüm) ile bitümlü sıcak karışımlar (BSK) ve bunlara uygulanan deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümünde ise modifikasyonun amacı, modifikasyon işleminde kullanılan malzemeler ve polimerler hakkında genel bilgiler ile daha önce yapılan çalışmalar verilmiştir.

Dördüncü bölümünde ise uygulanan deneyler ve kullanılan deney cihazları, deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve numunelerin hazırlanması alt başlıklarda detaylı olarak verilmiştir. Daha sonra yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Beşinci bölümünde ise yapılan tüm deneysel çalışmalar değerlendirilip genel olarak yorumlanmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Sıcak karışım asfalt olarak da adlandırılan bitümlü sıcak karışımlar (BSK), 145-160°C sıcaklıkta kurutulmuş ve ısıtılmış agregayla, yaklaşık aynı sıcaklığa kadar ısıtılarak viskoz sıvı hale getirilmiş bitümün belirli bir oranda plentte karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Karışımdaki agrega ve bitüm oranları karışımın kullanılacağı tabakaya ve özelliğine bağlı olarak değişmekle birlikte karışımın yaklaşık %95'i agrega %5'i bitümdür. Kullanılan agrega, kırmataş, kırma çakıl veya bunların karışımından ibaret olup şartnamesinde belirtilen kriterleri sağlaması gerekmektedir. Agregaya kaba, ince ve mineral filler içerecek şekilde en az üç ayrı tane boyutu grubunun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Karışımda B 50/70, B 70/100, B 100/150 ve B 160/220 penetrasyonlu bitümler kullanıldığı gibi modifiye bitümler de kullanılmaktadır (Bilim etiği, 2020).

BSK'lar genel olarak yüksek standartlı yol üst yapısında aşınma, binder ve bitümlü temel tabakalarında kullanılmaktadır. BSK ile imal edilen esnek üstyapı kaplamaları, kaplamayı meydana getiren unsurların özelliklerini taşımaktadır. Bu nedenle BSK'da kullanılacak agregaların ve bitümün özelliklerinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir (Bakış, 2018).

2.1 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agregalar

Yol üst yapı hammaddesi olan agrega, bağlayıcısız temel ve alt temel tabakalarının tamamını, BSK'ın ise ağırlıkça %90-95'i ve hacimce %80-85'ini oluşturur. Yola etkileyen yüklerin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bakımdan agregaların karakteristik özelliklerinin bilinmesi, yolların projelendirilmesinde önem taşımaktadır (İsfalt, 2001). Karışımda kullanılacak agreganın boyutu, mineralojik yapısı, biçimi, yüzeyi, porozluluğu, gradasyonu, özgül ağırlığı, yüzey alanı ve boşluk oranı gibi yapısal özellikleri karışım için uygun olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir (Tunç, 2004).

2.1.1 Agregaların özellikleri

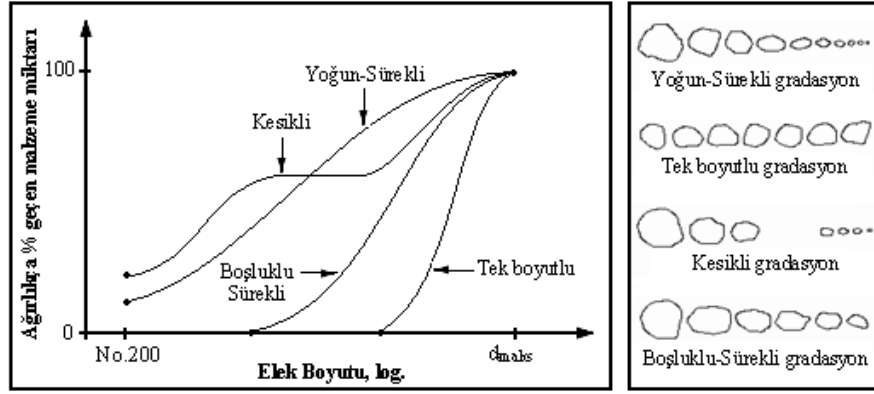
Yollarda kullanılan agregalar doğal ve yapay olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Doğal agregalar, doğal kayalardan fiziksel yollarla elde edilirler. Yapay agregalar ise diğer bir tabir ile sanayi ürünü uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırılmış veya kırılmamış yoğun yapılı agregalardır (Güneş, 2019).

Agregalar jeolojik özelliklerine göre püskürük (magmatik), sedimanter (tortul) ve başkalaşmış (metamorfik) olarak üçe ayrılır. Püskürük kayalar, yeryüzeyene fişkırmış magmanın yüzeyde soğuyup kristalleşmesi sonucu oluşur. Magmanın derinlerde yerleşip yavaş soğuması plütonik (derinlik), yüzeye ulaşip hızla soğuması volkanik (yüzey) bu iki ortam arasında yerleşip katılaşması ise damar (yarı derinlik) kayaları oluşturur (Tunç, 2004). Tortul kayalar, kayaların aşınması ve parçalanması sonucu dağılan parçaların su ve rüzgâr gibi etkilerle sedimentasyon havzalarında (deniz ya da göl gibi) tortullaşması ve daha sonra katılaşmasıyla oluşan klasik, kimyasal ve organik tortul kayalar olarak üçe ayrılırlar. Metamorfik kayalar, püskürük ve tortul kayaların yüksek sıcaklık ve basınç altında değişikliğe uğramasıyla meydana gelen kayalardır (Güneş, 2019).

Agregalar boyutsal özellikler bakımından kaba agrega, ince agrega ve mineral filler olarak üç sınıfa ayrılır. Agreganın No.4 (4.75 mm.) elek üzerinde kalan kısmına kaba agrega, No.4-No.200 (4.75-0.075mm) elekler arasında kalan kısmına ince agrega ve en az %65'i, No.200 (0,075 mm) eleği geçen agregaya mineral filler denir (Güneş, 2019). Karışımın ana iskeletini kaba agrega oluştururken bu iskeletin arasındaki boşlukları ince agrega ve filler doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmektedir (Tunç, 2004).

2.1.1.1 Gradasyon

Agregalar kesikli, yoğun-sürekli, boşluklu-sürekli ve tek boyutlu gradasyon olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılır. Bu gradasyon tipleri Şekil 2.1'de elek analiz grafiğinde görüldüğü gibi farklı özelliklere sahiptir (Geçkil, 2008).



Şekil 2.1: Agrega Gradasyon Tipleri ve Görsel Dağılımı (Tunç, 2004)

Kesikli gradasyona sahip agregalar, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediklerinden boşluk miktarlarının fazlalığından dolayı yol yapımında kullanılmamaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince malzeme ihtiva etmediğinden boşluk oranı yüksektir ve sıcak karışımlarda kullanılmazlar. Tek boyutlu gradasyonda hemen hemen aynı boyuttaki agregalar ihtiva ettiklerinden düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Yoğun-sürekli gradasyonda, en kaba malzemedan en ince malzemeye kadar olan agrega boyutları uygun oranlarda olduğundan karışımın boşluk muhtevası düşük, dolayısıyla yoğunluğu artmaktadır. Bu nedenle, sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların, yoğun-sürekli gradasyona sahip olması istenmektedir (Geçkil, 2008).

2.1.1.2 Biçimsel özellikler

Agrega daneleri 2 ve 3 boyutlu olarak sınıflandırılmaktadır. 2 boyutlu olarak yarı açısallı (yarı köşeli), açısallı (köşeli), yarı-dairesel ve dairesel biçimli olarak adlandırılmaktadır. Dairesel biçimliler işlenebilirlik özelliği, köşelilere göre daha yüksektir. Köşeliler baskılara karşı gösterdiği direnç bakımından dairesel biçimlilere kıyasla daha iyidir. Bu nedenle yuvarlak biçimli olanlar beton yapımında (işlenebilirliğinin yüksek olması ve kolay sıkışabilmesi nedeniyle), köşeli olanlar ise yol yapım ve BSK malzemesi olarak (sıkıştırdıktan sonra yüksek stabilite özelliği gösterdiğinden) tercih edilmektedir (Tunç, 2004). 3 boyutlu olarak yassı, küresel, kübik, ince-uzun biçimli olarak adlandırılmaktadır. Yassı ve ince-uzun özellikliler işlenebilirlik ve stabilite özelliğini azalttığından beton ve yol yapım malzemesi olarak kullanılmamaktadır. Dane biçimleri, yol kaplama karışımlarının sıkışma direnci, işlenebilirliği, yoğunluğu, stabilitesi, içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti özelliklerine etki eder. Yuvarlak biçimli agregaların açısallı (köşeli) biçimli agregalara

nazaran işlenebilirlik özelliği daha yüksek iken deformasyona karşı gösterdiği direnç yönünden köşeli agregalar daha üstündür (Tunç, 2007).

2.1.1.3 Yüzey yapısı

Agregaların yüzey yapısı, sahip oldukları düzgün yahut pürüzlü yapı sayesinde bağlayıcı ile güçlü bağ kurabilmeleri yani bir kenetlenme meydana getirmesi açısından büyük bir önem taşır. Çünkü güçlü bir bağ ile iyi bir karışım oluşturabilirler. Eğer yüzey pürüzlülüğü fazla ise karışımın işlenebilirliği azalmakta fakat stabilite, içsel sürtünme açısı, kayma direnci ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak buna karşın karışımın boşluk hacmi ve sıkışmaya karşı direnci gibi olumsuz özellikler de artmaktadır (Tunç, 2007).

2.1.1.4 Porozite

Porozite, agrega danelerindeki toplam boşlukların hacminin, agrega danesi hacmine oranı olup, absorpsiyon oranına etki etmektedir. Agregada danelerinde su emmeye sahip boşlukların miktarının sıcak asfalt karışımlarda %0,5-1,5 arasında olması istenmektedir. Agregada taneleri gerekli standartlarda poroziteye sahip ise bitüm emilmesini sağlayacağından agrega ile bağlayıcı arasında adezyonun ve suyun etkisiyle oluşacak soyulmaya karşı direncin artmasına yol açar. Aşırı poroz yapıya sahip agregalarda ise özgül ağırlıklarının az olması ve boşlukların fazla olması nedeniyle daha fazla bitüm kullanılması gerekmekte bu durum sıcak havalarda terleme veya kasma problemlerini meydana getirmektedir (Güneş, 2019).

2.1.1.5 Özgül ağırlık

Agregalar 3 farklı özgül ağırlığa sahiptir. Bunlar doymuş yüzey özgül ağırlık (yaş hacim), hacim özgül ağırlık ve zahiri (görünür) özgül ağırlıktır. Agregaların özgül ağırlığı laboratuvar deneylerinden tespit edilerek karışım hesaplamaları yapılırken bu değişkenlerden yararlanır (Güneş, 2019).

2.1.2 Agregalara uygulanan deneyler

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak agregaların uygunluğunu belirlemek amacıyla dane boyutu (elek analizi), Los Angeles (aşınma), hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma, su tesirine karşı dayanıklılık, özgül ağırlık ve yassılık indeksi tayini deneyleri yapılmaktadır (KTŞ, 2013).

2.1.2.1 Elek analizi deneyi (ASTM C131 – TS 1900)

Farklı dane boyutlarına sahip agregaların karışım içerisindeki dağılımını tespit etmek amacı ile elek analizi yapılır. Elek analizi, agrega numunesini eleklerde en az 2 dakika sarsmak ve her elek üzerinde kalan agregayı tartmak suretiyle yapılmaktadır. Elekten geçen miktar tartılıp numunenin bütün ağırlığına bölünerek karışımdaki yüzdesi tespit edilmektedir. Her bir elek üzerinden geçen malzeme yüzdelerine göre agrega karışımının granülometri eğrisi çizilmektedir (İSFALT, 2001).

2.1.2.2 Aşınma (Los Angeles) deneyi (TS EN 1097-2 - AASHTO T96)

Bu deney agregaların sağlamlığını saptamak amacıyla yapılır. Deneyde kullanılacak agreganın maksimum dane boyutuna bağlı olarak 1250, 2500 veya 5000 gr. malzeme ve yeterli miktarda bilye (genellikle 11 adet), çelik silindir tamburun içerisine bırakılır. Kullanılan malzeme miktarına göre tambur yatay eksen etrafında 500 veya 1000 devir döndürülür. Tamburdan çıkarılan malzeme 1,7 mm. den daha büyük açıklıklı bir elekte elenir. Daha sonra 1,7 mm. açıklıklı elekte elenir. Eleme sonucu elek üzerinde kalan malzeme yıkanıp kurutulur. Kayıp malzeme miktarı ilk ağırlığa bölünerek aşınma oranı tespit edilir (İSFALT, 2001). Bitümlü sıcak karışımlarda aşınma tabakasında kullanılacak agregaların aşınma oranı %30'u aşmamalıdır (KTŞ, 2013).

2.1.2.3 Özgül ağırlık deneyi (TS EN 1097-6)

Agregaların hacimsel değerlendirmesine bağlı olarak üç tip özgül ağırlık tanımı yapılmıştır. Bunlar;

Zahiri özgül ağırlık (SG_z)

Hacim özgül ağırlık (SG_H)

Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (SG_{DKY})'dir.

Agregalarda hava ile temas halindeki boşluklar ve hava ile temas halinde olmayan katı hacmin içerisindeki boşluklar bulunmaktadır. Bunlar su absorbe edebilen ve edemeyen boşluklar olarak tanımlanmaktadır. Hava ile temas edebilen boşluklara su dolduğu zaman agrega danesinin ağırlığı dolan suyun ağırlığı kadar artış gösterir. Bu nedenle agregalarda iki tip ağırlık ve üç tip hacim ağırlık hesaplanabilir. Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3 yardımıyla agrega danelerinin özgül ağırlıkları, Denklem 2.4 yardımıyla da su absorpsiyonu hesaplanır (Tunç, 2004).

$$SG_z = (\text{Kuru agreg a ağırlığı}) / (\text{Katı ve geçirgen olmayan boşlukların hacmi}) \quad (2.1)$$

$$SG_H = (\text{Kuru agreg a ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.2)$$

$$SG_{DKY} = (\text{Doygun kuru yüzey ağırlığı}) / (\text{Tüm hacim}) \quad (2.3)$$

$$\% \text{ Absorbsiyon (Su Emme)} = [(B-A) / A] \times 100 \quad (2.4)$$

A: Agreganın etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı

B: 24 saat su içinde bekletilen agreganın kuru yüzey doygun ağırlığı

2.1.2.4 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi (TS EN 1367-1, AASHTO T104)

Agregaların hava etkileriyle donarak ufalanmasına karşı dirençlerinin tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Etüvde önceden kurutulmuş numune, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) eriyiğı içerisinde daldırılıp oda sıcaklığında 16-18 saat bekletilir. Bu süre sonunda çıkarılan numune 15 dakika süzölmeye bırakılır ve 110 °C sıcaklıkta sabit sıcaklığa kadar kurutulur. Bu işlem 5 kez tekrarlanır. 5. devre sonunda etüvden çıkarılan malzeme soğutulur, yıkanır ve kurutulur. Eleme işlemi yapılarak donma kaybı tespit edilir. Numunede görölen değışikliğın, tabii koşullardaki yaklaşık 500 donma ve çözölmeye olayına karşılık geldiğı varsayılır (İSFALT, 2001).

2.1.2.5 Cilalanma deneyi (TS EN 1097-8)

Agregaların, karayolunda seyreden taşıtların lastikleriyle sürtünmesi sonucunda aşınarak cilalanması oranının tespiti amacıyla yapılan bir deneydir. Cilalanma makinesinin alt tekerleğine 14 adet numune sabitlenir. Üstteki teker 6 saat süre ile bu agregalara temas eder. Tekerlek ile agregalar arasına ince aşındırıcı maddeler eklenir. Deney sonucunda elde edilen cilalanma miktarı, yoğun trafikli yolların birkaç ayda, az yoğunluklu yolların ise birkaç yılda ulaşabileceğı aşınmaya tekaböl etmektedir. Deney sonucunda ölçölen kayma direnci, ilk kayma direncine oranlanarak cilalanma katsayısı tespit edilir (İSFALT, 2001). BSK aşınma tabakalarında minimum cilalanma katsayısının %50 olması gerekmektedir (KTSŞ, 2013).

2.1.2.6 Su tesirine karşı dayanıklılık (Soyulma) deneyi (ASTM D 1664)

Soyulma; bağlayıcının, hem suyun hem de trafiğın etkisi sonucunda agreg a üzerinden ayrılması olayıdır. Karayolları genel müdürlüğü teknik şartnamesine uygun olarak yapılan deneyde agregaların soyulmaya karşı dayanımını belirlemek amacıyla belirli miktarda malzeme alınarak yıkanır ve etüvde kurutulur. Bu malzemeye bağlayıcıya eklenir ve tamamen kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım, 24 saat 60 °C etüvde bekletilir. Daha sonra

karışım ısıtılarak daha geniş bir kaba aktarılır ve yine 60 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilir. Deneysel sonunda soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye oranı soyulmaya karşı dayanımı göstermektedir (İSFALT, 2001). Bu oran aşınma tabakasında minimum %50 olmalıdır (KTŞ, 2013).

2.1.2.7 Yassılık ve ince-uzunluk indekslerinin tayini deneyi (BS 812)

Yassı ve ince uzun daneler, yük altında daha kolay kırılarak bitümlü sıcak karışımın daha düşük dayanım göstermesine ve gerçek gradasyonun bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle agrega danelerinin şekil olarak yassı ve ince uzun olmaması veya sınırlı miktarda olması gerekmektedir. Bunun tespiti için yassılık indeksi deney aparatı kullanılmaktadır. En büyük boyutunun en küçük boyutuna oranı 5'ten büyük olan agregalar yassı ve ince uzun daneler olarak kabul edilmektedir (Tunç, 2004).

2.2 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

Bitüm, "American Society for Testing and Materials" (ASTM) (Amerika Malzeme ve Test Birliği) tarafından, esas olarak asfaltlar, katranlar, ziftler ve asfaltitler gibi yüksek moleküllü ağır hidrokarbonlardan oluşan, doğal ya da üretilmiş, siyah veya koyu renkli, katı, yarıkatı veya viskoz bağlayıcı madde olarak tanımlanır. Bitümler, katran ve asfalt bağlayıcı olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Lavin, 2003).

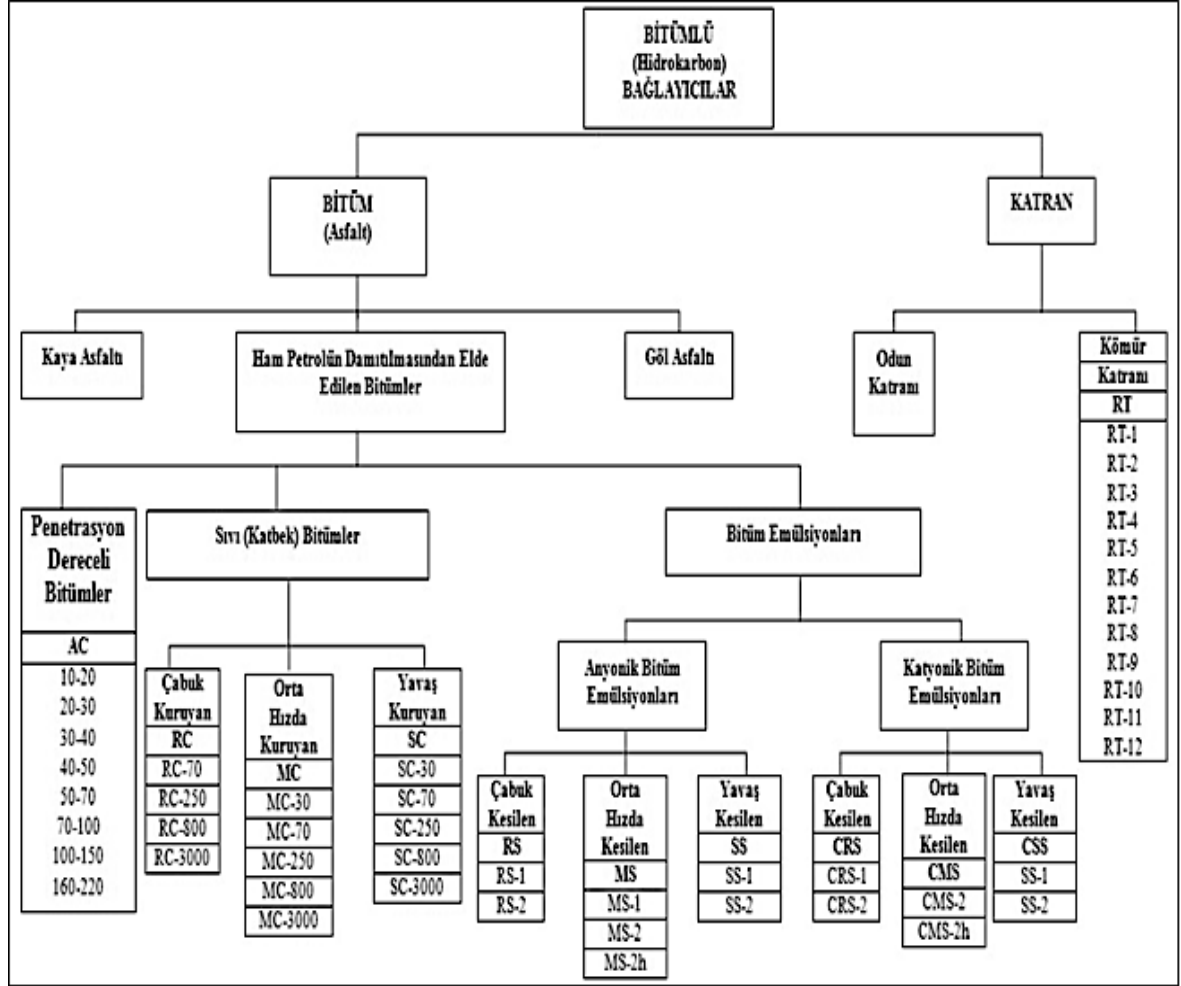
Katranlar, odun ve kömürün damıtılması ile ham katran olarak elde edilirler ve yol inşaatında kullanılabilmesi için ikinci bir damıtma işleminden geçirilirler (Umar ve Ağar, 1991). Katranlar daha ziyade arıtıldıktan sonra kullanılırlar. Üstyapı tabakalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir (Tunç, 2001; Ilıcalı ve diğ., 2001).

Asfaltlar ise ASTM tarafından rengi koyu kahve ile siyah arasında değişen, ana maddesi bitüm olan, doğal kökenli veya petrolün rafinerilerde işlenmesiyle elde edilen bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilmektedir. "Asfalt", "asfalt çimentosu", "bitüm" ve "asfalt bağlayıcı" terimleri asfalt kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılabilir (Lavin, 2003).

Yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, ham petrolün rafinerilerde damıtılması ile katı veya yarı katı olarak elde edilen ve asfalt çimentosu (AC) olarak isimlendirilen petrol asfaltlarıdır. Tabiiatta doğal halde bulunan kaya ve göl asfaltları

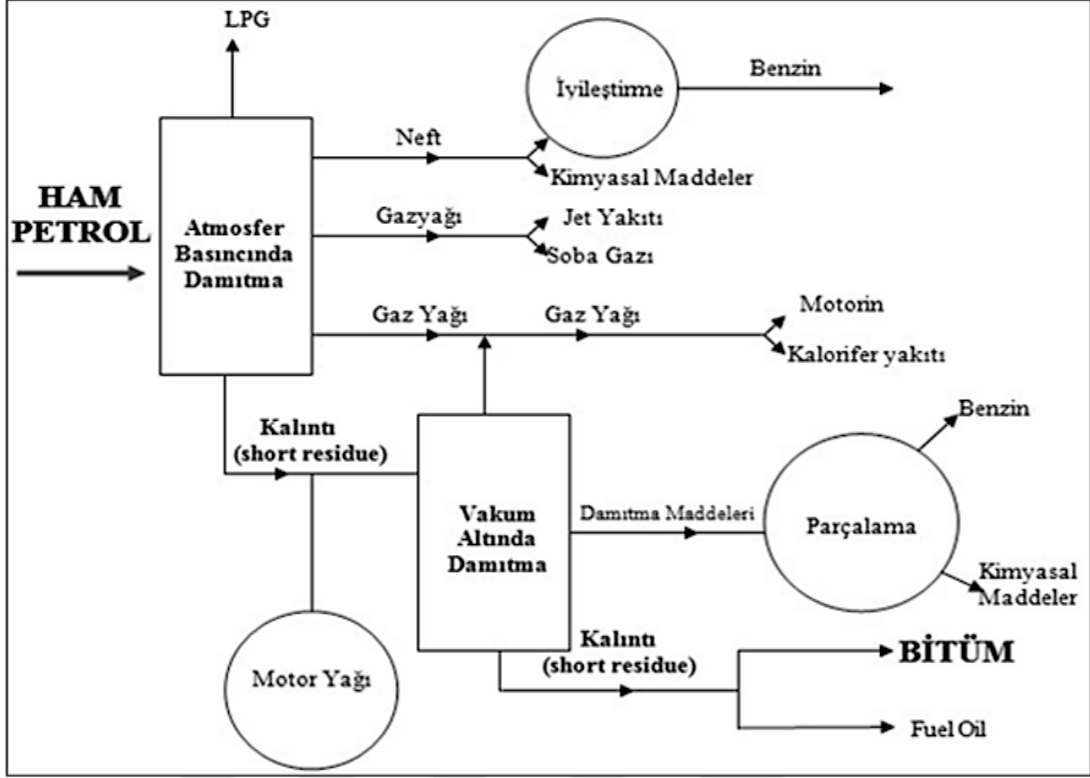
birtakım ayrıştırma işlemlerinden geçtikten sonra kullanıma hazır hale gelirler (Kurtis, 2003).

Yol üstyapısında kullanılan bitümlü bağlayıcıların sınıflaması Şekil 2.2’de verilmiştir (Kaya, 2011).



Şekil 2.2: Bitümlü Türler (Kaya, 2011)

Asfaltlar, doğal ve yapay asfaltlar olarak iki grup olarak sınıflandırılabilir. Doğal asfaltlar petrolün yeryüzüne çıkması ve zamanla distile olmasından meydana gelen asfalttır. Kaya asfalt, gilsonit asfalt ve göl asfaltı doğal olarak bulunan asfalt türleridir. Ham petrolün damıtılmasıyla da yapay asfaltlar elde edilir (Keçeciler ve diğ., 1979). Şekil 2.3’te ham petrolden bitüm üretiminin basit bir şematik gösterimi verilmektedir.

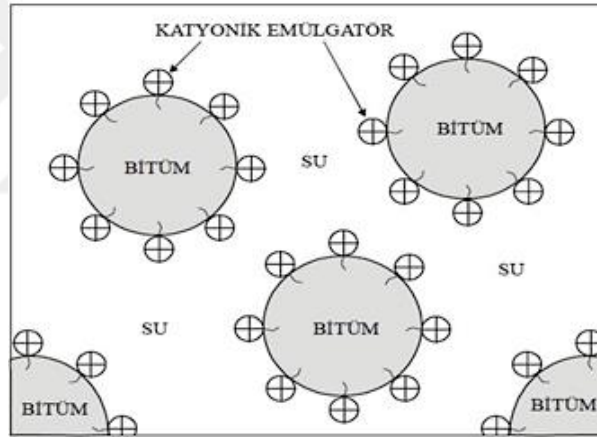


Şekil 2.3: Petrolün İşlenmesi ve Bitümlü Bağlayıcının Elde Edilişi (Whiteoak,2004)

Rafineride petrolün distilasyonu (ayrışması) ile elde edilen yapay asfaltlar, asfalt çimentoları, okside asfalt, sıvı petrol ve asfalt emülsiyonlarına ayrılır (Tunç, 2007).

- **Asfalt çimentoları**, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar. Asfalt çimentoların kıvamlılığını belirleyen penetrasyonu 10-300 arasında değişir (İlcalı ve diğ., 2001).
- **Okside asfaltlar** ise düşük penetrasyonlu oldukları için genellikle kaplamalarda kullanılmaz. Daha özel amaçlar için yalıtım işlerinde, elektrik, otomobil veya boya sanayisinde kullanılır (Keçeciler ve diğ., 1979).
- **Sıvı petrol asfaltlar** ısıtılmış asfalt bağlayıcıya benzin, gazyağı ya da yağ karıştırılmasıyla üretilirler. Asfalt bağlayıcıya benzin katılmasıyla çabuk kür olan RC sıvı petrol asfaltları, gazyağı ilavesiyle orta hızda kür olan MC sıvı petrol asfaltları ve yağ ilavesiyle yavaş kür olan SC sıvı petrol asfaltları üretilir. Sıvı petrol asfaltlar türlerine göre, astar tabakası, yapıştırma tabakası, sathi kaplama ya da soğuk karışımlarda kullanılırlar (Orhan, 2005).

- **Bitüm emülsiyonları**, bitümün su içerisinde çok küçük parçacıklar halinde (çapları genellikle 1 ila 5 mikron (1mikron = 0.001mm) arasında değişmekte) dağılmış halidir. Bitüm emülsiyonu; üç bileşenden (bitüm, su ve emülgatör) oluşur. Yol yapımında kullanılan emülsiyon Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, dış faz olarak su ve iç faz olarak bitüm içermektedir. Bitüm parçacıkları, emülgatör olarak adlandırılan "sümfaktan" yardımıyla süspansiyon halinde bulunurlar. Bitüm emülsiyonunun özellikleri, büyük ölçüde emülgatör olarak kullanılan kimyasallara bağlıdır. Bu kimyasallar, genellikle sümfaktan (kapiler aktif madde) olarak adlandırılan yüzey aktif maddelerdir. Bu maddeler, emülsiyonun anyonik, katyonik veya noniyonik olmasını belirleyen faktördür. Ayrıca emülgatörler, bitüm parçacıklarını stabil süspansiyon halinde tutar ve bitümün agrega yüzeyinde uygun zamanda birikmesini sağlar. Anyonik asfalt emülsiyonları, kesilme hızlarına göre başlıca bu harf guruplarıyla belirtilirken katyonik asfalt emülsiyonları aynı harf guruplarının başında katyonik olduklarını belirtmek üzere C harfinin de kullanmasıyla ifade edilmektedir (Arslan, 2010).



Şekil 2.4: Bitüm Emülsiyonun Şematik Gösterimi (Arslan, 2010)

Asfalt ve katranlar organik temellidir ve yüksek moleküllü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilmektedirler. Asfaltlar katranlara göre daha karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir (Arslan, 2010).

2.2.1 Bitümün kimyasal bileşimi, yapısı ve reolojisi

2.2.1.1 Bitümün kimyasal bileşimi

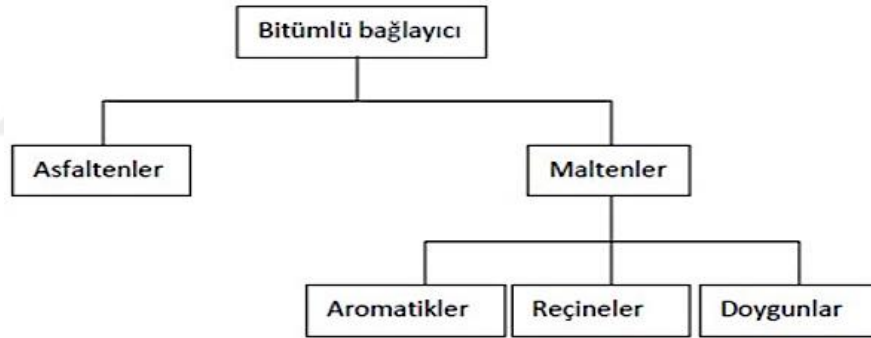
Bitüm, hidrokarbon molekülleri ile yapısal olarak benzer heterosiklik türler ve oksijen, kükürt ve azot atomları içeren fonksiyonel grupların kompleks bir kimyasal karışımıdır. Ek olarak çok az miktarda oksitler ve inorganik tuzlar ya da nikel, kalsiyum, vanadyum, demir

ve magnezyum gibi metaller de içermektedir. Ham petrolerden elde edilen bitümlerin analiz sonuçları genel olarak aşağıdaki elementleri içermektedir (Whiteoak, 2004).

Karbon	%82-88
Hidrojen	%8-11
Kükürt	%0-6
Oksijen	%0-1.5
Azot	%0-1

Bitümün kompozisyonu, ham petrolün elde edildiği kaynağa ve daha sonra imalat esnasında yapılan işlemler (hava üfleme ve diğer modifiye işlemleri) ile ardından kullanım süresince meydana gelen oksitlenmeye/yaşlanmaya göre değişiklik göstermektedir (Whiteoak, 2004).

Bitümlü bağlayıcıları Şekil 2.5'te görüldüğü üzere asfaltenler ve maltenler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Maltenler kendi aralarında aromatikler, reçineler ve doymuşlar olarak alt gruplara ayrılırlar (Whiteoak, 2004).



Şekil 2.5: Bitümlü Bağlayıcının Yapısını Oluşturan Ana Unsurlar (Tunç, 2004)

Bitümün n-heptanda çözülmeyen kısmına asfalten, çözülen kısmına ise malten adı verilir. Bitümün %5-25'ini asfaltenler ve %40-65'ini ise maltenler oluşturur. Maltenler ise aromatikler başta olmak üzere reçineler ve doymuş hidrokarbonlardan oluşmaktadır (Whiteoak, 2004).

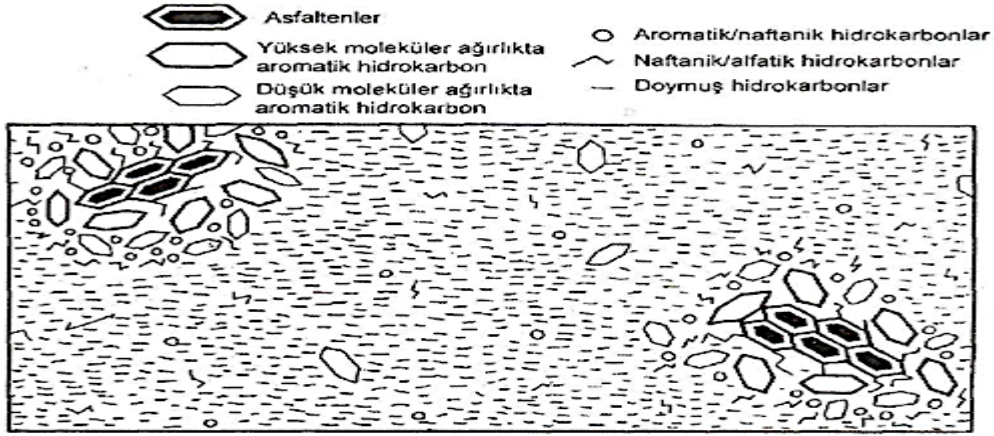
- **Asfaltenler**, karbon ve hidrojenlerden oluşan ve bir miktar azot, kükürt ve oksijen içeren, n-heptan içerisinde çözünmeyen oldukça yüksek molekül ağırlığına sahip, polar (elektriksel yüklere sahip) siyah veya kahverengi amorf katılardır. Asfaltenler bitümün %5 ile %25'ini oluşturmakta ve miktarı bitümün reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir (Whiteoak, 2004).

- **Reçineler**, n-heptan içerisinde çözünen, asfaltlenler gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşmuş ve az miktarda oksijen, kükürt ve azot içeren maddeler olup, koyu kahverengi renkte katı ya da yarı katılardır. Reçinelerin elektriksel olarak oldukça yüklü olmaları, reçinelerin güçlü bir yapışkan olmalarını sağlamaktadır (Whiteoak, 2004).
- **Aromatikler** bitüm içerisinde en düşük molekül ağırlıklı naftanik aromatik bileşenlerden oluşur. Aromatikler, bitümün %40 ila %65'ini oluşturan koyu kahverengi, viskoz sıvılar olup, doymamış halka sistemlerin hakim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşurlar (Whiteoak, 2004).
- **Doymuş hidrokarbonlar**, alkil-naftenler ve bazı alkil-aromatikler ile birlikte düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır. Bunlar saman veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlar olup, hem parafinik hem de naftanik yağ halkalarını içerir. Bitümün %5 ila %20'sini oluşturmaktadır (Whiteoak, 2004).

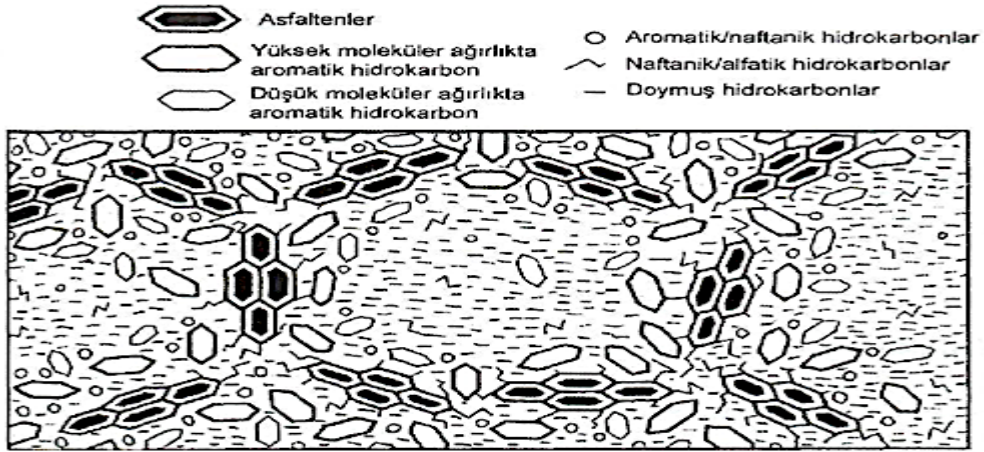
Aromatik ve doymuş hidrokarbonlar viskoz sıvılar olup bitüme bağlayıcılık özelliğini sağlayan reçineler ise yarı-katı, polar malzemelerdir (Lavin, 2003).

2.2.1.2 Bitümün yapısı

Bitüm, yüksek moleküler ağırlığa sahip asfaltlenlerin düşük moleküler ağırlığa sahip yağlar olan maltenler içerisinde çözünmemiş halde bulunması sebebiyle kolloid bir sisteme sahiptir. Asfaltlen damlacıkları, asfaltlenlerin etrafını bir kılıf gibi çeviren yüksek molekül ağırlıklı aromatik reçinelerden oluşmaktadır. Damlacıkların merkezinden uzaklaştıkça, daha az düzeyde elektriksel yüklere sahip aromatik reçineler karşımıza çıkmaktadır. Yeterli düzeyde reçine ve aromatikler varsa ve bu reçine ve aromatikler asfaltlenleri çözebilecek kapasiteye sahipse bu durumda Şekil 2.6'da görülen SOL tipi bitümler meydana gelmektedir. Reçine ve aromatikler yeterli seviyede değilse ve aynı zamanda asfaltlenleri çözebilme kapasitesine sahip değilse bu durumda ise Şekil 2.7'de görülen JEL türünde bitümler türetilmektedir. Asfaltlenlerin kolloid davranışı bitüm içindeki kümeleşme veya petekleşmeye bağlı olarak değişir ki bu da bitümün viskozluğu üzerinde önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır (Whiteoak, 2004).



Şekil 2.6: Sol Tipi Bitüm (Tunç, 2004)



Şekil 2.7: Jel Tipi Bitüm (Tunç, 2004)

Yeterli miktarda aromatik ve reçine bileşenleri mevcut değilse ya da bu bileşenler yeterli çözücü güce sahip değilse asfaltenerler birbirleriyle daha da ilişkili olabilmektedir. Bunun sonucunda damlaların birbirleriyle bağlantılı olduğu ve içlerindeki boşluklarda diğer maddelerden (doymuş hidrokarbonlar vs.) oluşan sıvıyla dolmuş bir yapı meydana gelir. Bu bitümler ise jelinli veya JEL tipi bitümler olarak adlandırılmaktadır. Bunlara en iyi örnek, çatı kaplamalarında kullanılan oksitlendirilmiş bitümler verilebilir (Whiteoak, 2004).

Asfaltenerlerin kolloidal davranışı, bitüm içindeki kümeleşme veya petekleşmeye bağlı olarak değişir. Bunların sistem içerisindeki yayılma dereceleri malzemenin viskozitesini belirgin derecede etkilemektedir. Bu tür etkiler sıcaklıkla azalma göstermekte ve belirli bitümlerin jel karakterleri yüksek sıcaklıklara dek ısıtıldığında kaybolabilmektedir (Tunç, 2004).

Doymuşların, aromatiklerin ve reçinelerin viskoziteleri moleküler ağırlık dağılımlarına bağlı olup, moleküler ağırlık arttıkça viskozite de artmaktadır (Whiteoak, 2004).

Maltenlerin viskozitesi, bitüme dağılmış fraksiyonun yani asfaltın varlığı sayesinde artış göstererek doğal bir viskozite, yapışkanlık kazandırmaktadır. Doygun kısımlar asfaltın belirli derecede kümelenmelerine yol açtığından, maltenlerin asfaltın çözme yeteneklerini azaltmaktadır. Bu nedenle, bitümlerin jel özelliğindeki artış ve sıcaklık bağımlılıklarının düşmesi sadece asfaltın içeriğinden değil aynı zamanda doymuş içeriğinden de kaynaklanmaktadır (Whiteoak, 2004).

2.2.1.3 Bitümün reolojisi

Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunu sadece maddeye uygulanan yüke değil ayrıca bu yükün uygulanma süresini dikkate alarak belirlemeye çalışan bir bilimdir. Bitüm, reolojik bir malzeme olduğu için yük altında davranışı, üzerine uygulanan yüke ve bu yükün uygulanma süresine bağlıdır. Ayrıca, bitüm termoplastik bir malzemedir ve bu yüzden sıcaklık değişimlerine karşı da duyarlıdır. Dolayısıyla, bitümün davranışı, üzerine uygulanan yüke, yükün uygulanma süresine ve bitümün bu esnadaki sıcaklığına bağlıdır (Tunç, 2007).

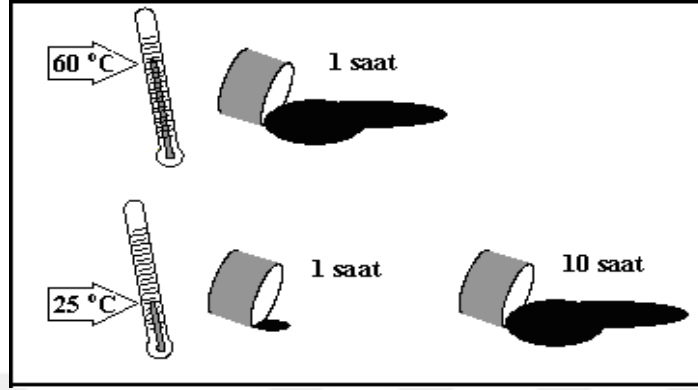
Bitümün tüm bu özellikleri, katıldığı sıcak karışıma geçer ve bundan dolayı bitümlü karışımlar da viskoelastik ve termoplastik malzemelerdir. Yaz aylarındaki sıcak havalarda ya da yavaş hareket eden ağır taşıtların altında bitümlü kaplamalar, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı viskoz sıvılar gibi hareket ederek akarlar. Eğer akmaya karşı direnimsiz ise, kaplamada ağır yük ve/veya yüksek ısıdan dolayı tekerlek izi oluşabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise termoplastik özelliklerinden dolayı bitümlü kaplamalar, çok sert veya kırılabilir hale gelebilmekte ve kaplamada çatlaklar oluşabilmektedir (Sybilski, 1994).

Viskozitenin belirlenmesi, reoloji biliminin temel konusudur. Viskozite, iki molekül tabakası arasında, birinin diğerinin üzerinde hareketi esnasında bu harekete engellemeye çalışan direnimsiz olarak da düşünülebilir. Bitümün kimyasal yapısı, bitümlü karışımların reolojisini etkilediği için, bitümlü karışımların esas elemanlarından biri olan bitümün, viskozite-sıcaklık ilişkilerinin belirlenmesi gerekir (Çubuk, 2007).

2.2.2 Bitümün davranışı

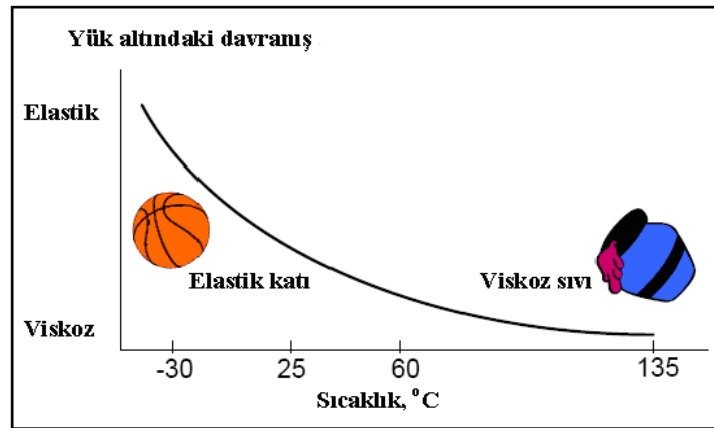
Esnek yol kaplamasının ana malzemelerinden biri olan bitüm, visko-elastik davranış gösteren termo-plastik bir malzeme olup, trafik yükleri altında yükün şiddetine, yükleme zamanına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı davranışlar gösterir. Bitümün davranışı sıcaklık ve yükleme zamanına bağlı olduğu için, aynı yük farklı sürelerde uygulandığında asfalt farklı özellikler sergiler. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi asfaltın 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği

akış miktarı ile 25 °C’de 10 saatte gösterdiği akış miktarı aynı olmaktadır. Bu davranış, sıcaklık ve yükleme süresinin bitüm üzerindeki etkilerinin benzer olduğunu ifade eder. Yani, asfaltın yüksek sıcaklıkta ve kısa sürede yaptığı davranış, düşük sıcaklıkta ve daha uzun sürede yaptığı davranış ile eşdeğerdir (Geçkil, 2008).



Şekil 2.8: Bitümün Farklı Sıcaklık ve Zamanlara Göre Davranışı (McGennis vd., 1995; Altaş, 2002)

Bu tür malzemeler yüksek yükleme hızlarında (hızlı taşıtlar) elastik, düşük yükleme hızlarında (yavaş ya da duran taşıtlar) viskoz, orta yükleme hızlarında orta elastik ve viskoz davranış gösterir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıklarda elastik davranış ve yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda ise viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler (Şekil 2.9). Bu nedenle yükleme süresi ve sıcaklık, asfalt çimentosunun ve bitümlü sıcak karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir (Uluçaylı, 1998; Kuloğlu, 2000; Geçkil, 2008).

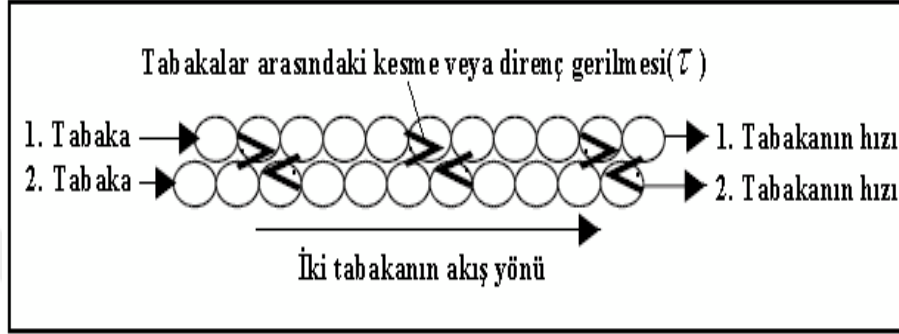


Şekil 2.9: Bitümün Sıcaklık Hassasiyeti (McGennis vd., 1995; Alshamsi, 2006)

2.2.2.1 Yüksek sıcaklık davranışı

Çöl iklimi gibi sıcak koşullarda ya da yavaş hareket eden veya park halindeki ağır araçların neden olduğu sürekli ve değişmeyen yükler altındaki yollarda, asfalt çimentosu viskoz davranır. Bu koşullarda sıcak asfalt karışımın yük taşıyan bileşeni sadece agregadır.

Viskozite, sıvının akmaya karşı dayanımını ifade eden malzemenin fiziksel özelliğidir. Eğer sıcak asfalt çimentosunun yavaş akış hareketi güçlü bir mikroskop altında incelenirse, molekül tabakalarının birbiri üzerindeki kaymaları görülebilir (Şekil 2.10). Tabakalar arasındaki kayma direnci kuvveti ya da sürtünme, birbirleri üzerinde kayan tabakaların bağlı hızı ile ilgilidir. Üstteki tabaka alttaki tabakayı ileri doğru çekmeye çalışırken alttaki tabaka üsttekini yerinde tutmaya çalışır. Direnç kuvveti ve bağlı hız arasındaki ilişki değişik sıvılar için oldukça farklılık göstermektedir (Dinç, 1999; Altaş, 2002; Geçkil, 2008).



Şekil 2.10: Bitümün Moleküler Düzeyde Akışı (Fitzgerald, 2000; Berkers, 2005)

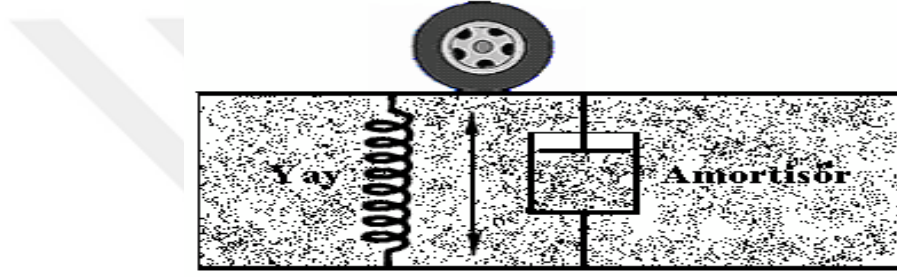
Sıcak bitüm gibi viskoz sıvılar, akmaya başladıklarında, soğuma olsa bile hiçbir zaman eski (orijinal) durumlarına gelmedikleri için plastik olarak nitelendirilirler. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda, bitümlü sıcak karışımların daha düşük stabiliteye sahip olduğunu açıklar ve tekrar eden tekerlek yükleri nedeniyle düşük stabiliteye sahip olan sıcak karışım kaplamalarda tekerlek izleri oluşur. Bununla birlikte, üstyapıda oluşan tekerlek izi, bünyesindeki agrega özellikleri ile de yakından ilgilidir (Geçkil, 2008).

2.2.2.2 Düşük sıcaklık davranışı

Soğuk iklim şartlarında veya hızlı hareket eden araç trafiğinin sebep olduğu kısa süreli yükler altında, asfalt çimentosu elastik bir katı gibi davranış gösterir. Kauçuk ve benzeri elastik katılar yüklendiklerinde şekil değiştirirler, ancak üzerindeki yük kaldırıldığında önceki (orijinal) hallerine geri dönme yeteneğine sahiptirler. Bu malzemelere taşıma kapasitesinden daha fazla yükleme yapıldığında, malzeme bünyesinde kırılma, çatlama veya kopma meydana gelir. Asfalt çimentosu düşük sıcaklıklarda her ne kadar elastik bir katı ise de aşırı yüklendiğinde kırılabilir ve çatlayabilir. Bu yüzden asfalt kaplamalarda soğuk havalarda düşük sıcaklık çatlakları (termal çatlaklar) görülür. Bu duruma, düşük sıcaklık nedeniyle kaplama yüzeyinin büzülme çabasının ortaya çıkardığı iç gerilmeler sebep olur (Dinç, 1999; Altaş, 2002; Geçkil, 2008),

2.2.2.3 Orta sıcaklık davranışı

İklim ve çevre koşulları genellikle aşırı sıcak ile aşırı soğuk arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde bitümlü bağlayıcı hem kıvamlı sıvı ve hem de elastik katı özelliklerini sergiler. Bu malzeme ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkân tanıyan bir bağlayıcı veya kayganlaştırıcı gibi davranır. Soğuduğunda ise agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Bu davranış, yani sıcaklık ve yüke bağlı olarak hem elastik hem de viskoz özellik göstermesi, onun viskoelastik bir malzeme olması ile ilgilidir (Dinç, 1999; Altaş, 2002; Geçkil, 2008). Bitümün yük etkilerine karşı gösterdiği bu davranış kavramsal olarak Şekil 2.11’de gösterildiği gibi “yay-amortisör” modeliyle açıklanabilir.



Şekil 2.11: Viskoelastik Davranış ve Yay-Amortisör Modeli (Dinç, 1999; Altaş, 2002).

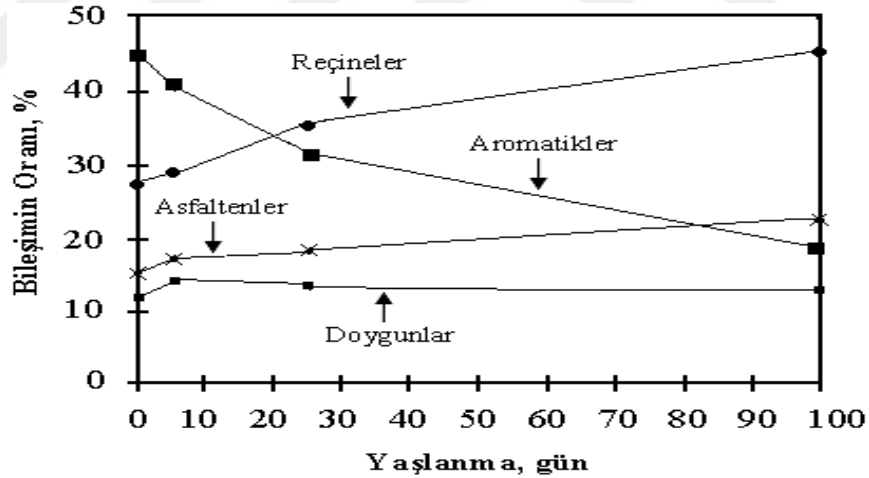
Bitüme uygulanan herhangi bir kuvvet yay ve amortisörde paralel bir tepkiye neden olur. Yük etkileyen bir bitümlü sıcak karışımda yay, bitümün ilk elastik tepkisini, amortisör ise asfaltın özellikle daha sıcak havalardaki daha yavaş viskoz tepkisini sembolize eder. Bitüm bazı durumlarda plastik davranış gösterse de çoğu durumda yüklemelere elastik veya viskoelastik olarak tepki verir. Yani deformasyonlar, etkileyen yüklerin şiddetine göre zamanla eski durumuna gelir veya kısmen kaybolur (Dinç, 1999; Altaş, 2002; Geçkil, 2008).

2.2.2.4 Yaşlanma (sertleşme) davranışı

Bitümlü kaplama tabakalarının hizmet ömrünü bozulmadan tamamlamaları için depolama, üretim ve hizmet ömrü boyunca bitümün aşırı derecede sertleşmemesi gerekir. Organik bir malzeme olan bitüm, atmosferik dış etkiler olan oksijenden, ultraviyole ışıklardan ve sıcaklık değişimlerinden etkilenecek şekilde sertleşme eğilimi göstermektedir. Birçok organik maddede olduğu gibi bitüm de hava ile temas ettiğinde yavaşça oksidasyona uğrar. Bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha az esnek yapan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağlıdır (Geçkil, 2008).

100 °C'nin üzerindeki her 10 °C'lik artış oksitlenme veya oksidasyon oranını iki katına çıkarmaktadır. En önemli yaşlanma nedeni olan oksidasyon, asfalt çimentosunun daha kırılğan olmasını sağlar ve yaşlanma sertleşmesi sürecini başlatır. Bu sertleşme nedeniyle eski asfalt kaplamalar çatlamaya karşı daha hassas olurlar (Dinç, 1999; Whiteoak, 2004; Geçkil, 2008).

Bitümlü bağlayıcıdaki uçucu bileşenlerin, sıcaklık etkisi ve havayla temas ederek buharlaşması ile içindeki bileşenlerin oranları da değişmektedir. Asfalt çimentosunun 85 °C sıcaklıkta 100 günlük süre içerisinde yaşlandırılması esnasında, farklı sürelerde alınan numunelerdeki bileşenlerinin % olarak miktarları Şekil 2.12'de verilmiştir. Yaşlanma süresince, bitümün bünyesindeki asfaltten ve reçinelerin yüzdeleri artarken, aromatikler azalmakta ve doygunlar ise yaşlanma süresince fazla etkilenmemektedir. Ayrıca bitüm, ortam sıcaklığında kaldığında fiziksel sertleşme oluşur ve bu sertleşme genellikle bünyesindeki moleküllerin yeniden yerleşmelerine ve petrol mumlarının yavaş kristalleşmesine bağlanır. Ancak, bitüm yeniden ısıtıldığında orijinal viskozitesini tekrar kazanır. Fiziksel sertleşme daha çok 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda görülür ve asfalt çimentolarını düşük sıcaklıklarda teste tabi tutarken dikkate alınmalıdır (Geçkil, 2008).



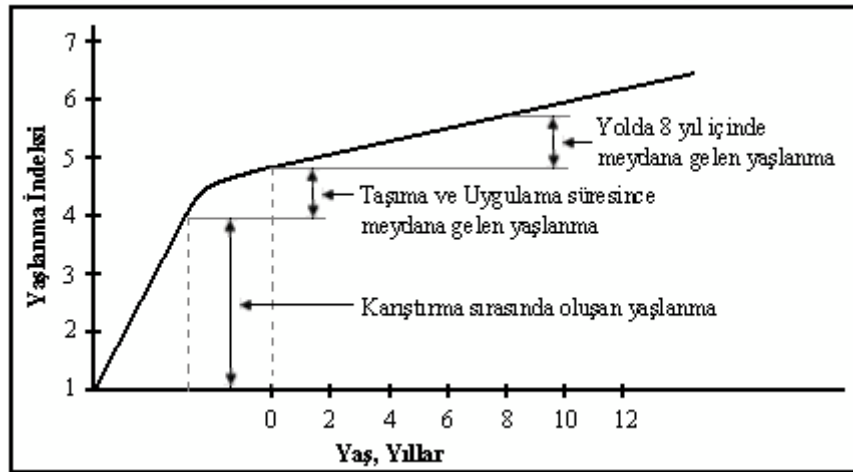
Şekil 2.12: Bitümdeki Bileşenlerin Yaşlanma Sonucunda Değişimi (Zeng ve Isacson, 1997)

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

elverişlidir. Karıştırma işlemi süresince asfalt yaklaşık bir Penetrasyon sınıfı sertleşmektedir (İlcalı vd., 2001; Whiteoak, 2004; Geçkil, 2008).

Bitümün sertleşmesi, aynı zamanda olumsuz koşullar altında yol üzerinde de meydana gelebilir ve bunun ana nedeni karışımın boşluk oranıdır. Hatalı veya yetersiz sıkıştırma işlemi, uygulanan kaplamalar içerisinde birbiriyle bağlantılı hava boşluklarına sebep olur ve havanın karışım içine daha fazla nüfuz etmesine izin verir. Yapılan çalışmalarda, %5'in altındaki boşluk oranlarında, hizmet aşamasında çok küçük miktarlarda sertleşme meydana geldiği ancak %9'dan yüksek boşluk oranlarında ise, bitümün penetrasyon değerinin 70 düzeyinden 25'in altına düştüğü tespit edilmiştir (İlcalı vd., 2001; Whiteoak, 2004; Geçkil, 2008).

Kısa süreli yaşlanma olarak kabul edilen süreçte (karıştırma, depolama, taşıma ve uygulama süresinde yaşlanma) meydana gelen yaşlanma, toplam yaşlanmanın yaklaşık %70 düzeyindedir ve bu süreçte yaşlanmış bitümün viskozitesi orijinal viskozitesine göre yaklaşık beş kat yüksektir. Ancak, uzun süreli yaşlanma olarak adlandırılan süreçte, 8 yıllık hizmet süresinden sonra oluşan yaşlanma, toplam yaşlanmanın %30'u kadardır (Whiteoak ve Read 2003; Balta, 2004; Geçkil, 2008). Bitümün karıştırma, depolama, taşıma, uygulama ve hizmet süresindeki yaşlanması Şekil 2.13'de görülmektedir.



Şekil 2.13: Bitümün Karıştırma, Depolama, Taşıma, Uygulama ve Hizmet Süresinde Yaşlanması (Asphalt Institute, 1996; Whiteoak, 2004)

2.2.3 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan geleneksel deneyler

Esnek üstyapı kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların özelliklerini belirlemek amacıyla dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan çok sayıda geleneksel standart test yöntemleri bulunmaktadır (Çizelge 2.1).

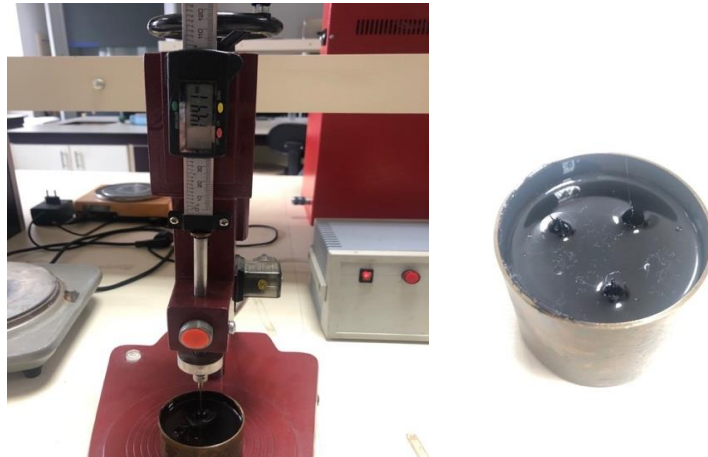
Çizelge 2.1: Geleneksel Bağlayıcı Test Yöntemleri

Test Tipi	Standart Koşullar	Referans
Penetrasyon, 0,1 mm	25 °C, 5sn, 100 gr	ASTM D5-AASHTO T49-EN 1426-TS 118
Yumuşama Noktası, °C	-	ASTM D36-EN 1427-TS 120
Parlama Noktası, °C	-	ASTM D92-AASHTO T5-TS 119
Düktilite	25°C,5cm/dak	ASTM D113-AASHTO T5-TS 119
Özgül Ağırlık	25 °C	ASTM D70-TS 1087
Çözünürlük	-	ASTM D2042-AASHTO T44-TS1090
Özgül Ağırlık	25 °C	ASTM D70-TS 1087

2.2.3.1 Penetrasyon deneyi (ASTM D5)

Oda sıcaklığında katı halde bulunan asfaltların sertlik veya kıvamını belirlemek için uygulanan deneydir. Penetrasyon değeri bitümün kıvamıyla ters orantılıdır, penetrasyon değeri yükseldikçe bitüm yumuşamaya başlar (İnce, 2019).

Asfalt numunesi aşırı ısıtılmadan, yalnızca akışkanlığı sağlandıktan sonra, penetrasyon kabının işaretlenmiş yüzeyini dolduruncaya kadar dökülür. Dökülen numune kabın içerisinde hava boşluğu kalmaması için bir miktar karıştırılır ve oda sıcaklığında soğuması için tozdan etkilenmemek üzere ağzı kapalı bir şekilde bekletilir. Numuneyi 60-90 dakika aralığında soğuttuktan sonra, sıcaklığı önceden sabitlenmiş 25 °C'lik su banyosuna bütün yüzeyi su içinde kalacak şekilde bırakılır (Çubuk, 2007). Bu su banyosunda da 60-90 dakika aralığında bekletilir. Yüzeyi düzgün bir yere yerleştirilen penetrasyon cihazında gösterge sıfıra ayarlanır. Yeterli süre boyunca suda bekletilmiş numune sudan alınarak penetrasyon cihazına yerleştirilir. Penetrasyon deney aleti Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14: Penetrasyon Cihazı ve Ölçüm Yapılmış Penetrasyon Kalıbı

100 gr ağırlıkla yüklenen standart penetrasyon iğnesi, numunenin yüzeyine batmadan temas edecek şekilde ayarlanır. İğne serbest bırakıldıktan sonra 5 sn boyunca asfalta batar ve bu süre boyunca gerçekleşen batma miktarı penetrasyon değerini verir. Penetrasyon kabının kenarından ve iğnenin asfalta değmiş olduğu noktadan 1'er cm uzaklıkta bulunmak kaydıyla en az 3 kez aynı şekilde okuma yapılır. Bu okumalar, numunenin sıcaklığının değişmemesi adına en kısa zamanda arka arkaya yapılır. Penetrasyon iğnesi her batmadan sonra, üzerine bitüm çözücü damlatılan bir bez yardımıyla silinir (Tanzadeh, R. ve Shafabakhsh, G., 2020). Her 0,1 mm batma miktarına bir penetrasyon değeri denilir ve okunan penetrasyon değerlerinin ortalaması alınarak penetrasyon elde edilir.

2.2.3.2 Yumuşama noktası deneyi (ASTM D36)

Sıcaklık artışına bağlı olarak şekil değiştirip yumuşamaya başlayan bitümlerin, yumuşamaya karşı hassasiyetlerinin tayini için uygulanan deneydir. Bu deneyde, içerisine aşırı ısıtılmadan akışkan hale getirilen bitüm doldurulan standart yumuşama halkaları (yüzükleri) kullanılır. Halkaların içerisine doldurulan bitüm taşacak şekilde dökülür. Biraz soğutulup yerleşmesi sağlandıktan sonra, halka yüzeyinin üzerinde kalan kısım ısıtılmış bir maket bıçağı yardımıyla kesilerek alınır (Çubuk, 2007). Yüzeyi düzeltilmiş halka üzerine, standart bir çap ve ağırlığa sahip olan bilye bırakılır. İçi su dolu deney düzeneğinde bilye yüklü halkalar yerlerine bırakılır ve başlangıç sıcaklığı 5°C olan deney başlatılır. Sıcaklık dakikada 5°C arttırılır (TS EN 1427). Bitüm dolu yüzük içerisine bırakılan bilyenin oluşturduğu ağırlıkla, bitüm her sıcaklık artışında yumuşamaya ve akmaya başlar. Akan bitümün deney düzeneğinin tabanına değdiği esnada ölçülen sıcaklık değeri yumuşama noktası olarak kabul edilir. Cihazın sağına ve soluna yerleştirilen numuneler için aynı işlem uygulanır ve her iki ölçümden elde edilen değerlerin ortalaması alınır. Bu deneyde kullanılan cihaz Şekil 2.15'te görülmektedir.



Şekil 2.15: Yumuşama Noktası Cihazı

2.2.3.3 Düktilite deneyi (ASTM D113)

Düktilite deneyi ile bitümlere uygulanan çekme kuvveti ile uzaması gözlemlenir. Düktilite deneyi için özel olarak üretilen kalıp içerisine akışkan hale getirilmiş bitüm doldurulur. Kalıp kenar yüzeyleri ve kalıbın alt yüzeyi bitümün yapışmasını önlemek amacıyla yağlanır. Oda sıcaklığında soğutulan bitüm kalıptan çıkarılarak, 25 °C sıcaklıkta dakikada 5 cm çekme hızıyla kopuncaya kadar çekme kuvvetine maruz bırakılır ve kopma başladığı anda bitümün uzama miktarı düktiliteyi verir (Torun, 2015).

2.2.3.4 Parlama noktası deneyi (ASTM D92)

Bitümün tehlike yaratmayacak bir şekilde ısıtılacağı sıcaklığı belirlemek amacıyla tespit edilmesi gereklidir. Parlama noktası ısınan bitüm buharının alev ile temasında geçici olarak parladığı, fakat yanmaya başlamadığı en düşük sıcaklıktır (Kaya, 2011). Kullanımı esnasında bitümün yanmadan emniyet içerisinde hangi sıcaklığa kadar ısıtılacağı belirlenmesi amacıyla parlama noktası deneyi yapılmaktadır. Parlama noktası cihazı ve deney düzeneği Şekil 2.16’da görülmektedir.



Şekil 2.16: Parlama Noktası Cihazı

2.2.3.5 Özgül ağırlık tayini (ASTM D70)

Deneye başlamadan önce içine bitüm konulacak olan şişe ve kapağı tartılır, damıtık ve kaynatılıp soğutulmuş olan su ile ağzına kadar doldurulup 25°C’de 1saat civarında su banyosunda bekletilip kapağı kapatılır. Ardından su banyosundan çıkarılır ve tartılır. Özgül ağırlık şişesi ve kapağı kurutulurken bitümde akıcı hale gelene kadar etüvde ısıtılır. Şişenin 1/3’ü bitümle dolacak şekilde bitüm boşaltılır ve şişenin kapağı kapatılarak tartılır. Özgül ağırlık şişesi yarısına kadar su ile doldurulduktan sonra kapağı kapatılarak hava kabarcığı

kalmayana kadar şişe içerisindeki hava çıkartılır. Ardından 25°C’de 1saat civarında su banyosunda bekletilip kapağı kapatılır ve su banyosundan da çıkarılarak kurulandıktan sonra ölçüm alınır (Umar ve Ağar, 1991).

2.2.4 Bitümlü bağlayıcılara uygulanan Superpave deneyleri

Yüksek performanslı asfalt kaplama (SUPERPAVE) bitüm deneyleri, malzemenin doğrudan arazi şartlarındaki performansı ile ilgili özelliklerini ölçmektedir. Bu deneyler asfaltın; yaşlanma, işlenebilirlik, oluklanma, yorulma ve termal etkilere karşı performanslarının belirlendiği bir deneyler grubudur (Kaya, 2011).

Bu yöntem ile kaplamanın maruz kalabileceği fiziki şartlar üretilen numunelere etki ettirilerek doğal şartların etkisi laboratuvarında oluşturulmuş olur. Superpave adı verilen bu yöntemin en kritik özelliği değişken sıcaklıklar göz önünde bulundurularak bağlayıcının performansının en yüksek olduğu değerin tespiti ve kaplamanın uygulanacağı bölgenin iklim koşulları ve sıcaklık değişimleri dikkate alınarak tasarlanmasıdır. Bu yöntem hem saf hem de modifiye edilmiş asfaltların dizaynında rahatlıkla kullanılabilir (Zaniewski ve Padula, 2003).

Superpave deneyleri, bağlayıcı ile üstyapı karışımının performansı arasındaki ilişkiyi daha doğru bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla, Amerika’da SHRP tarafından, üstün performanslı bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. Amerika’da SHRP asfalt araştırma gurubu tarafından 1988 ile 1993 yılları arasında yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilen Superpave karışım dizayn yöntemi, trafik yükü ve iklim koşulları altında meydana gelen kalıcı deformasyon, yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlaklarını sınırlandırarak, uygulama bölgesindeki çevre koşullarını dikkate alarak kaplama performansını arttırmak amacıyla, kullanılacak bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesini içermektedir. Superpave karışım dizayn prosesine göre üretilen kaplama performansı ve kalitesinin kabul edilebilmesi için yapım sonunda aşağıda belirtilen temel özelliklerin sağlanması gerekir (Zaniewski ve Padula, 2003; Geçkil, 2008; Atasağun, 2009).

Superpave’in üç ana bileşenini; bağlayıcı şartnamesi, karışım dizaynı ile analiz ve bilgisayar yazılım sistemleri oluşturmaktadır (Asphalt Institute, 1996).

- Kalıcı deformasyon direnci; kaplama, trafik etkisiyle bozulmamalıdır.
- Yorulma direnci; kaplama, tekrarlı yükler altında kırılmamalıdır.
- Düşük sıcaklık çatlağı direnci; uygun bağlayıcı seçimi ile kaplama oluşturulmalıdır.

- Durabilite; sıcak karışımda agrega tanelerini saracak olan asfalt çimentosu, servis ömrü süresince yaşlanması da göz önüne alınarak yeterli miktarda kullanılmalıdır.
- Nem hasarı direnci; asfalt bağlayıcı ve agrega yüzeyi arasındaki adezyon kaybını önleyecek agregalar kullanılmalıdır.
- Kayma direnci; karışım, normal dönme ve kırılma hareketleri süresince kaymaya karşı uygun direnç gösterecek şekilde dizayn edilmelidir.
- İşlenebilirlik; karışım, kabul edilebilir düzeyde yerleştirme ve sıkıştırma yeteneğine sahip olmalıdır.

Superpave yönteminde kullanılan bağlayıcı deneyleri ve kullanım amaçları Çizelge 2.2’de verilmiştir (Geçkil, 2008). Superpave yönteminde bağlayıcılar simgesel olarak PG ile gösterilir ve değişken sıcaklık şartlarında gösterdikleri performansa göre isimlendirilir. Örneğin; PG 52-16 ile gösterilen performans bağlayıcı için ilk sayı olan 52 “yüksek sıcaklık derecesi” olarak tanımlanırken, ikinci sayı olan -16 ise “düşük sıcaklık derecesi” olarak tanımlanır (Geçkil, 2008).

Modifiye edilmiş ve saf asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave bağlayıcı şartnamesi Çizelge 2.3’de verilmiştir (Geçkil, 2008).

Çizelge 2.2: Superpave Bağlayıcı Deneyleri ve Kullanım Amaçları (Geçkil, 2008)

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

Çizelge 2.3: Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO MP1) (Zaniewski ve Pumphrey, 2003; Kennedy ve diğ., 1994, Cominsky ve diğ., 1994)

PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-				PG 58-				PG 64-									
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52				< 58				< 64									
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	>-34	>-40	>-46	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
ORJİNAL BAĞLAYICI																					
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																				
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52				58				64									
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52				58				64									
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Dene Sıcaklığı, °C	90			90				100				100									
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme, Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	Rapor																				
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1,0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	-12	-18	-24	-30	-36	- 6	- 12	- 18	- 24	-30	0	- 6	-12	-18	-24	-30

Çizelge 2.3 (devam): Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO MP1) (Zaniewski ve Pumphrey, 2003; Kennedy ve diğ., 1994, Cominsky ve diğ., 1994)

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

2.2.4.1 Dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) (ASTM D2872)

RTFOT deneyi ile bitümlü bağlayıcılarda karışımların karıştırılma süresi boyunca yaşlanma olayının laboratuvar ortamında analiz edilmesi ve incelenmesi sağlanır. Bağlayıcının karıştırma esnasında yaşadığı sertleşmeyi temsilen, özel bir cam şişe içerisine doldurulan bitümün ince bir film halinde şişe iç yüzeylerine dağılması sağlanır, aynı zamanda deney cihazının uygulamış olduğu sıcaklık ve hava üfleme etkisiyle bitümler yaşlanma olayına tabi tutulur. Bu deney ile bağlayıcılarda ısınma ile birlikte meydana gelen uçucu partiküllerin kaybı incelenir. Bununla birlikte uygulanan sıcaklık ve hava üflenmesinin etkisiyle, bağlayıcıda meydana gelen fiziksel değişimler tesbit edilebilmektedir (Yılmaz, 2011).

RTFOT deneyinde, deneye özel üretilmiş 8 adet şişenin her birinin içerisine 35 gram ağırlığa sahip bitüm hassasiyetle doldurulur ve deney cihazının içerisindeki dönel tablasına yerleştirilmesi sağlanır. Düzenek düşey doğrultuda dönme hareketi yapacak şekilde çalışır ve 15 dev/dak hızında 75 dakikalık süre zarfında 163 °C sıcaklığa maruz bırakılarak deney prosedürü uygulanır. Deney düzeneğinde şişe iç yüzeylerine gelecek şekilde konumlandırılmış bir hava üfleme aparatı bulunur, bu aparat sayesinde şişe içlerine 4000 ml/dak düzeyinde hava püskürtme işlemi uygulanır. Dönme ve sıcaklık etkisi ile birlikte şişelerin içerisinde bulunan bitümler tüm iç yüzeye ince bir film şeklinde yayılarak yaşlanma etkilerine tabi tutulmuş olur. Önceden işaretlenmiş ve darası alınmış iki şişe deney bitiminde tartılır ve uğramış oldukları kütle kaybı tespit edilir. Deneyden elde edilen yaşlanmış bağlayıcılar ağzı kapalı bir kaptaki saklanacak şekilde PAV ve çeşitli Superpave deneylerine de tabi tutulmak üzere muhafaza edilir. Şekil 2.17’de RTFOT cihazı ve RTFOT için kullanılan özel kaplara doldurulan bitümler gösterilmiştir (İnce, 2019).



Şekil 2.17: RTFOT Cihazı ve RTFOT numuneleri

2.2.4.2 Basınçlı yaşlandırma kabı deneyi (PAV) (ASTM D6521)

Bitümlü bağlayıcıların uzun süreli yaşlanmasının belirlenmesi amacıyla uygulanan PAV deneyinde, asfalt kaplamada hizmet süresi boyunca oluşacak sertleşme eğilimleri incelenir. RTFOT deneyine tabi tutularak muhafaza edilen yaşlandırılmış bitümler ısıtılarak, PAV deneyi için özel üretilen yatay silindirik kap yüzeyine 50 gr ağırlığında tartılarak bırakılır. Kullanılan bağlayıcının cinsine göre değişiklik gösteren (90,100 veya 110 °C) sıcaklıkta deney cihazı içerisine bırakılan kaplar, 20 saatlik süre boyunca 2070 kPa değerinde basınca maruz bırakılır. Deney süresinin tamamlanmasıyla elde edilen yaşlandırılmış bitümler, hava kabarcıkları alınarak ağzı kapalı bir kaptaki saklanır ve Superpave deneylerine tabi tutulmak üzere muhafaza edilir (Kaya, 2011). PAV cihazı ile PAV deneyine tabi tutulmak üzere kaplara doldurulan bitümler Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18: PAV Cihazı ve PAV Numuneleri

2.2.4.3 Dönel viskozimetre deneyi (RV) (ASTM D2196)

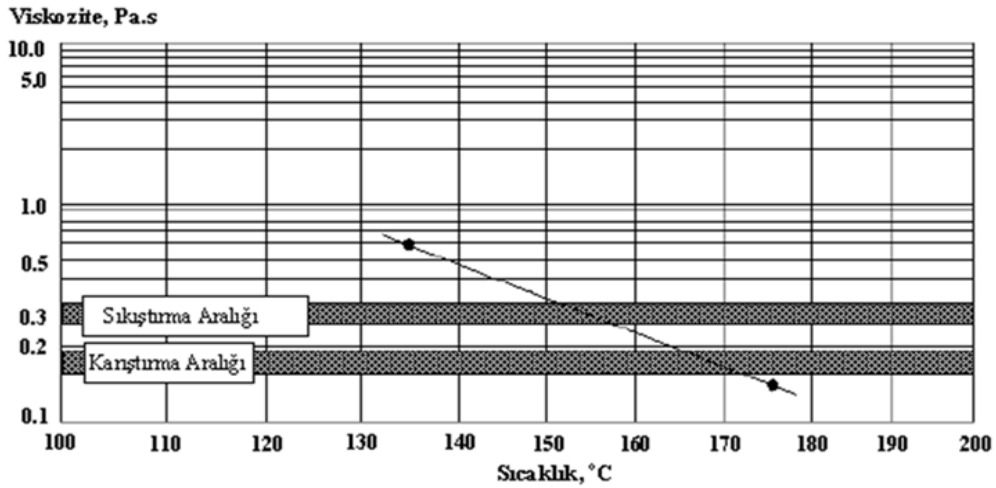
RV deneyi ile bitümlerin hizmet süresince karşılaşacağı yüksek sıcaklık etkilerinde göstereceği viskozite değerleri, pompalanabilirlik ve karışım esnasında göstereceği işlenebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi için akma karakteristikleri incelenir (Dinç, 1999; Dinç ve Yazıcı, 2000). Deney öncesinde asfalt bağlayıcı akışkan hale getirilir. Akışkan hale gelmiş bağlayıcıdan alınan yaklaşık 10,5-11 gr ağırlığındaki numuneler RV tüplerine tartılarak dökülür. Deneyde Brookfield Viskozimetresi cihazı kullanılır ve bu cihaza takılan silindirik yapıdaki bir mil, belirli bir sıcaklığa (135°C ve 165°C) maruz bırakılan bitüme temas ettirilir ve 20 rpm hızında çevrilme hareketi uygulanarak bitümün mile karşı uyguladığı direnç ve viskozite değeri ölçülür. Katkısız saf bitümlere uygulanan bu deneyde, bitümün 135°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinin 3 Pa.s'nin (3000 cP) üzerinde

bulunmaması istenmektedir. Deney sonucunda elde edilen neticelere göre kullanılan bitümlü bağlayıcıların viskozite değerleri kullanılarak bir sıcaklık-viskozite grafiği çizilir ve bu grafik yardımıyla bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilir (Dinç, 2000).

Şekil 2.19'da RV cihazı ile numunelerin doldurulduğu tüpler, Şekil 2.20'de ise sıcaklık-viskozite grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.19: RV Deney Tüpleri ve Cihazı



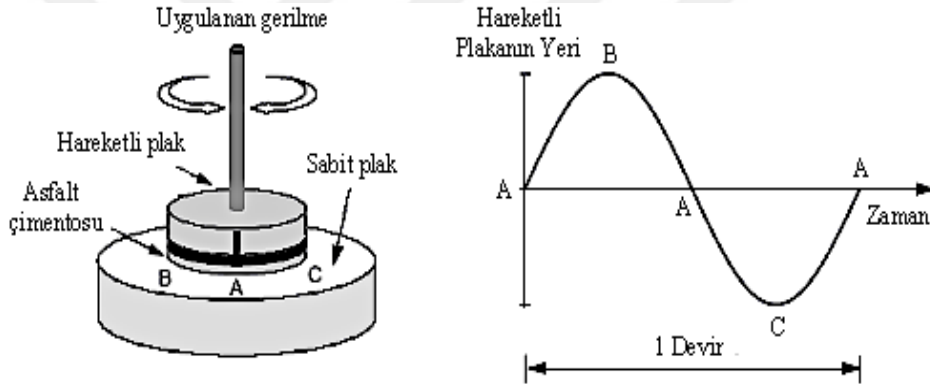
Şekil 2.20: Asfalt Bağlayıcı İçin Tipik Viskozite Eğrisi (Geçkil, 2008)

Sıcak karışımların hazırlanmasında, bitümün agrega ile karıştırılırken ve yolda sıkıştırılırken belirli bir sıcaklık aralığında olması gerekmektedir. Sıcak karışımların karıştırılmasında 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması beklenmektedir. Bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarını belirleyebilmek için 135 ve

165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinden yararlanarak tipik viskozite eğrisi çizilmektedir (İnce, 2019).

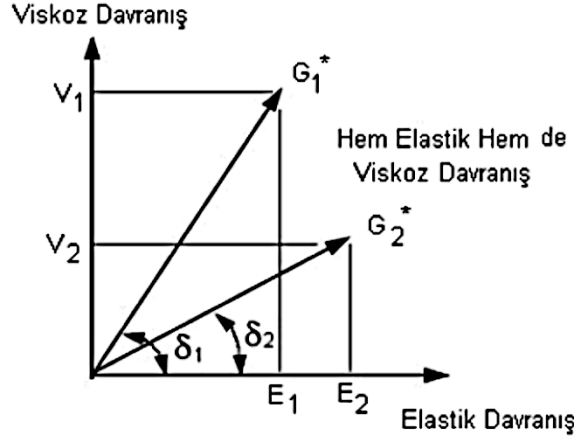
2.2.4.4 Dinamik kayma reometresi deneyi (DSR) (ASTM D7552)

DSR deneyi ile bitümler sinüs eğrisi şeklinde yatay salınımlı bir tepkiye maruz bırakılır ve bu sayede bitümün viskoelastik özellikleri incelenir. Bu deney yöntemi ile yorulma davranışını belirlemek amacıyla 8 mm çapa sahip 2000 µm yükseklikte olan, tekerlek izi oluşumuna karşı davranışı belirlemek amacıyla da 25 mm çapa sahip 1000 µm yüksekliğinde hazırlanmış bitümler, bir tanesi sabit olan diğeri ise hareket eden plakaların arasına yerleştirilir ve belirli sıcaklık altında hareket halindeki plakaya 1,59 devir/saniye'lik bir frekansta önce ön koşullandırma için, ardından deney başlangıcı için 10 devir yaptırılır (İnce, 2019). Deneyin yapıldığı düzeneğin şekli ve numunelerin karşılaştığı deformasyonlar Şekil 2.21'deki gibidir.



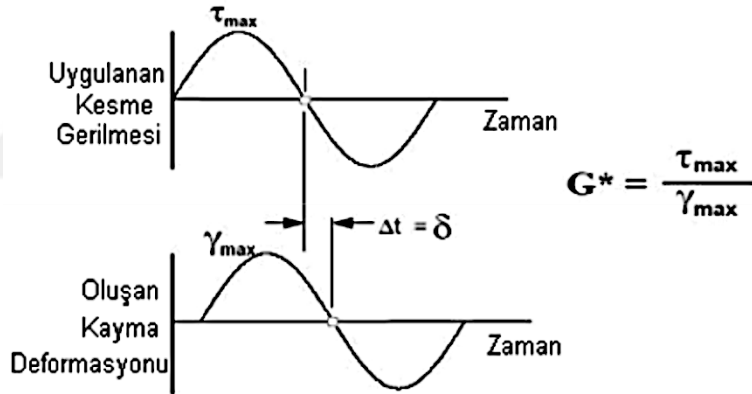
Şekil 2.21: DSR Deney Düzeneği ve Numunelerin Karşılaştığı Deformasyon Yönleri (Yelken, F., 2009)

DSR deneyi ile bitümlü numunelerin viskozluk ve elastiklik özelliklerini tespit etmek amacıyla karmaşık kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) bulunur. G^* , tekrarlı kayma gerilmelerinin oluşturmuş olduğu etkilere karşı bitümlü numunelerin sergilemiş olduğu toplam dirençtir (McGennis vd., 1994). Yatay eksendeki elastik davranış, düşey eksen ise viskoz davranış özellikleri Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Bitümlü numunelerin aynı olmaması ve viskoelastik özellik göstermesi sebebiyle 1 ve 2 numaralı bitümlü numunelerin viskoz ve elastik faktörleri de birbirinden farklı olmaktadır. Viskoelastiklik, faz açısı ve kayma modülüne bağlı olmalıdır (Tunç, 2007).



Şekil 2.22: Bitümlü numunenin viskoelastik davranışı (McGennis vd., 1994)

Faz açısı (δ)'nın, gerilme ve deformasyon zaman aralığına (Δt) eşit mesafede olması gerekir. Gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 2.23'te gösterilmiştir (McGennis vd., 1994).



Şekil 2.23: Viskoelastik malzemenin gerilme-deformasyon ilişkisi (McGennis vd., 1994)

Bitümlü numuneler yüksek sıcaklıklarda viskoz özellik, düşük sıcaklıklarda ise elastik özellik gösterir. $\delta = 90^\circ$ için aşırı ısılarda asfalt yalnızca dikey ekseninde (viskoz davranış) gösterirken, G^* değeri yatay ekseninde okunmayacaktır. Aşırı düşük sıcaklıklarda ise elastik deformasyon gösteren asfaltın yalnızca yatay ekseninde okunacaktır. Bu nedenle G^* değeri $\delta = 0^\circ$ olacaktır. Asfalt bağlayıcı numuneleri viskoelastik özellikte olması ve her bir numunenin birbirinden farklı olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı asfaltlar yükleme altında viskoz ve elastik özellikleri farklı olur (İnce, 2019).

DSR deneyi ile belirlenen $G^*/\sin \delta$ değeri neticesinde, bağlayıcının tekerlek izine karşı direnci tespit edilir. Elde edilen bu değer Superpave bağlayıcı şartnamesine göre

yaşlandırılmamış bağlayıcılar için min. 1000 Pa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için min. 2200 Pa olması istenir (McGennis vd., 1994).

DSR deneyi ile belirlenen $G^* \cdot \sin \delta$ değeri, asfalt kaplamalarda orta sıcaklıklarda oluşan yorulma çatlaklarının belirlenmesinde kullanılır. Elde edilen $G^* \cdot \sin \delta$ değerinin PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için max 5000 kPa olması istenir (McGennis vd., 1994).

DSR deneyinde sıcaklıklar yaşlandırılmamış bağlayıcılar ile kısa süreli yaşlandırılmaya tabi tutulan bağlayıcılara 46-82°C aralığında, uzun süreli yaşlandırılmaya tabi tutulan bağlayıcılara ise 4-40°C aralığında uygulanmaktadır. DSR deneyi ile birlikte asfalt bağlayıcılara ait kompleks kayma modülü ve faz açısı belirlenmiş olur. Şekil 2.24'te DSR cihazı ve deney için hazırlanmış olan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.24: DSR Cihazı ve DSR Numuneleri

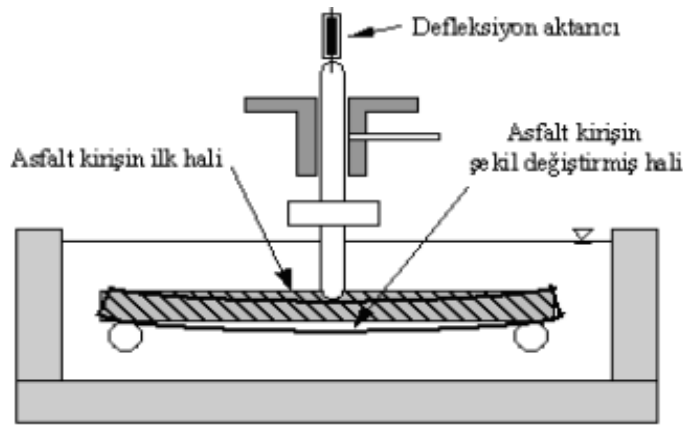
2.2.4.5 Kiriş eğme reometresi deneyi (BBR) (ASTM D6648)

BBR deneyi, bitümün düşük sıcaklık koşullarında yaşayacağı sertleşmenin ve termal değişkenlerden ötürü yaşayacağı çatlaklara karşı direncinin değerlendirilebilmesi amacıyla yapılır. PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırmaya tabi tutulan bitümler bu deneyde kullanılmak üzere 150 °C sıcaklıkta ısıtılır. Deney için 6,25x125x12,5 mm boyutlara sahip alüminyum kaplara kiriş biçiminde bitüm numuneler dökülür, daha sonra numuneler alüminyum kalıplardan çıkarılarak deney cihazında önceden sıcaklığı ayarlanmış özel sıviya bırakılarak düşük sıcaklıklarda (-12, -18, -24°C gibi) koşullandırılmaktadır (Dinç, 2000). Deney süresince, alüminyum kaplara dökülen kiriş şeklindeki numuneler bağlayıcının sınıfı göz önünde bulundurulmak kaydıyla düşük sıcaklık derecelerine maruz bırakılmaktadır. Kiriş şeklinde hazırlanmış numunenin orta kısmı 240 saniye süresince 980 mN büyüklüğünde bir yüke maruz bırakılmaktadır. Uygulanan yük ve dışa doğru bükülme

hareketinin değerleri, bitümün sünme sertliğini $S(t)$ ve sünme oranını (m-değeri) belirleyebilmek amacıyla kullanılır. Sünme sertliği, kullanılan bitümün sabit sünme kuvvetlerine karşı direncini gösterir. Sünme oranı, sünme sertliğinde meydana gelen değişiklikler ile yüklenen yükün süresi arasındaki orantıyı belirtmektedir. Uygulanan yüke ve dışa doğru bükülme hareketi neticesinde sünme sertliği değeri tespit edilir. Bu değerin zamana bağlı değişimini ifade eden grafikte, eğriye teğet geçen doğruya ait eğim hesaplanır ve bulunan bu değer sünme oranını (m-değeri) ifade eder. BBR deneyinde sünme sertliği en fazla 300 Mpa, sünme oranı ise en az 0,300 olması istenir (İnce, 2019). şekil 2.25'te BBR deney cihazı ve hazırlanan deney numuneleri, şekil 2.26'da ise kiriş eğme reometresi (BBR) deneyinde kirişe uygulanan defleksiyon gösterilmiştir.



şekil 2.25: BBR Deney Cihazı ve BBR Numuneleri



şekil 2.26: Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi (McGennis ve diğ., 1994)

2.3 Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

2.3.1 Stabilite

Taşıt trafiğinin yol platformu üzerinde oluşturmuş olduğu yükler ve taşıtların hızlanması veya yavaşlaması sırasında tekerlek etkileri ile oluşan basınç, çekme ve kesme kuvvetine karşı bitümlü kaplamanın göstermiş olduğu dirençtir. Bitüm ve agreganın karakteristiklerinin stabilite üzerindeki etkileri, karışımın bileşimi kadar önemlidir. Karışımın stabilitesine etki eden diğer bir faktör ise kullanılan bitümün sertliği, bir başka ifade ile penetrasyonudur. Kullanılması gerekenden daha farklı penetrasyona sahip bir bitümlü bağlayıcı kullanıldığı zaman, kaplamanın stabilite değerinin bu seçimden etkileneceği düşünülebilir. Kaplamanın stabilitesi için yolda görülebilecek en büyük sıcaklık derecesi dikkate alınmalıdır. Bu da ülkemiz için 60°C olarak belirlenmiştir. Bunların sonucu olarak, trafik, iklim ve zemin durumu gibi koşullar da göz önünde bulundurularak istenen stabilite farklı agreganın granülometrisi ve bitüm kullanılarak sağlanabilir (Kahramangil ve Önal, 1993).

2.3.2 Dayanıklılık (durabilite)

Bir BSK'nın durabilitesi, su, hava ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin ve trafiğe bağlı değişimlerin neticesinde, kaplamanın karşılaştığı aşınma etkilerine karşı göstermiş olduğu dirençtir. Yüksek durabilitenin elde edilmesi, yoğun granülometrilili ve soyulma direnci yüksek agreganın uygun oranda belirlenen bir bitüm yüzdesi kullanılarak karışımın yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn edilip sıkıştırılması ile mümkündür (Önal ve Kahramangil, 1993).

2.3.3 Esneklik (fleksibilite)

Kaplamanın altında kalan taban zemininde meydana gelen oturma ve hareketlere, çatlama karşı koyabilme (uyum sağlayabilme) yeteneğidir. Esneklik yetersizliği, yol yüzeyinde çatlamalara sebep olur. Agregaların gradasyonu, bitümün oranı, kıvamı ve sıcaklığa karşı duyarlılığı esnekliğe etki eden faktörlerdir (Orhan, 2009).

2.3.4 İşlenebilirlik

Serime hazır yol karışımının istenilen kıvamda, sahip olması gereken dağılımda olması gerekir. Uygun kıvama ve dağılıma sahip malzemelerden oluşmuş bu yol karışımının serim ve sıkıştırma esnasında gösterdiği kolaylığa "İşlenebilirlik" adı verilir. Fazla oranda kaba agreganın içeren karışımlar kolay işlenebilirlik özelliği göstermezler. Serime hazır yol

karışımında filler yüzdesinin düşük olması geçirgenliğe sebebiyet verir. Filler yüzdesinin yüksek olması ise, karışımın dayanıklılığının (durabilitesinin) düşük olmasına ve işlenebilirliğinin oldukça zor bir hale gelmesine sebebiyet verir (Uluçaylı, 1998).

2.3.5 Geçirimsizlik

Karışım dizaynında boşluk yüzdesinin yüksek olması, su ve havanın kolaylıkla karışım içerisine girerek, oksidasyona ve agregaların ayrışmasına neden olur. Ayrıca karışımdaki boşluklardan ötürü meydana gelecek donma-çözülme olayları ile yol yapısında önemli deformasyonlar oluşur. Bu gibi sebeplerden ötürü, yol karışımındaki hava boşluğu yüzdesi geçirimsizliği belirleyen ana faktördür. Karışımdaki boşlukların birbiri ile bağlantılı olması ve boşlukların yüzeyle irtibatlı olması geçirimsizliği etkileyen başlıca etkenlerdir (Kurtis, 2003).

2.3.6 Yorulmaya karşı direnç

Yol kaplamasının trafik yüklerinin oluşturmuş olduğu bozulmalara ve deformasyonlara karşı göstermiş olduğu dirençtir. Yorulmaya karşı direnci karışımın boşluk yüzdesi, viskozite, kullanılan bitüm sınıfı ve yüzdesi gibi etkenler etkilemektedir (Torun, 2015).

2.3.7 Kaymaya karşı direnç

Trafikte seyir halindeki araçların fren yaptıkları esnada emniyetli ve güvenli bir biçimde durabilmeleri için, araç lastiği ile kaplama yüzeyinin sürtünmesi gerekir. Araç lastiği ile kaplama arasında görülen bu sürtünme direncine kaymaya karşı direnç adı verilir. Yollarda sıkça rastlanılan cilalanma sorunları, kayma direnci açısından büyük problemler yaşandığını gösterir (Tunç, 2004).

2.4 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

Yol üstyapılarında sıklıkla görülen bozulmaların temel nedenleri; yolun yapımı ve bakımı esnasında karşılaşılan işçilik hataları, karışımda kötü malzemelerin tercih edilmesi, tasarımsal hatalar, çevresel faktörleri (iklim, sıcaklık, yağış vb.) göz önüne almadan malzemenin seçilmesi ve yola ait proje tasarımının yapılması, aşırı yüklü bir şekilde trafikte seyreden taşıtların bulunması gibi olaylardır. Bütün bu sebeplere bağlı olarak, yol kaplamasında karşılaşılan deformasyonlar (tekerlek izi oluşumu), çeşitli çatlaklar (yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlakları) ve ayrışmalar (kasma) meydana gelmektedir (Tunç, 2004).

2.4.1 Tekerlek izi oluşumu

Tekerlek izi oluşumu, özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık karşılaşılan, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir. Yetersiz sıkıştırma, yetersiz temel tabakası kalınlığı ve zemin mukavemeti, yuvarlak dere malzemesi kullanımı, aşırı asfalt ve filler yüzdesi veya filler/bitüm yüzdesi, yüksek hava sıcaklığı ve düşük viskoziteli asfalt, ağır trafik yükü ve tekrür sayısının fazlalığı ve ağır taşıtların hızı tekerlek izi oluşumuna neden olan durumlardır (Geçkil, 2008).

2.4.2 Yorulma çatlakları

Yorulma çatlakları, ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle oluşmaktadır. Genellikle timsah sırtı deseni şeklinde görülen bu çatlaklar kaplama yüzeyinde belirli bir alanda görülürler (Geçkil, 2008).

2.4.3 Düşük sıcaklık çatlakları

Düşük sıcaklık çatlakları, trafiğin etkilerinden çok, soğuk iklim koşullarında asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu, trafik akışına dik olarak oluşan enine doğrultudaki çatlaklardır. Kış şartlarında büzülmeye çalışan kaplama yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşur ve bu tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme mukavemetini aştığında yüzeyde çatlaklar oluşur (Zeng, 1997).

2.4.4 Kuma

Karışımdaki asfaltın sıcaklık etkisi ile veya çok ağır dingil yükleri altında basınçla ya da karışımda boşluk yüzdesinin çok düşük olması ile yüzeye çıkması ve yüzeyde kalın bir film oluşturması olayı kuma olarak tanımlanır. Kuma olayı neticesinde karışımdaki asfalt ve agregalar birbirinden yüksek oranda ayrışır. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kumaya sebebiyet verebilir (Avcı ve diğ., 2009).

2.5 Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

2.5.1 Marshall dizayn yöntemi

BSK tasarımında Marshall Dizayn Yöntemi ülkemizde ve dünyada 1939 yılında Bruce Marshall tarafından keşfedilen ve en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Whiteoak 2004).

Bu metod, laboratuvar ortamında yürütülen çalışmalarla bitümün optimum yüzdesinin hesaplanması amacıyla kullanılır. Marshall metodu, bitümlü sıcak karışımlarda dane çapının max. 25 mm ve daha küçük boyutlardaki agregalara uygulanır. Bitümün optimum yüzdesinin bulunmasında, şartnamede verilen değerlere göre uygun bir gradasyon seçilir ve uygun bir bitüm sınıfı tercih edilir. Belirli bitüm yüzdelere sahip deney numuneleri hazırlanır ve bu numuneler yüksekliği 63,5 mm, çapı 4 inç (101,6 mm) olan standart numune kalıpları içerisine yerleştirilir. Optimum bitüm yüzdesini belirlerken en doğru sonucu bulabilmek için her numuneden 3 farklı briket numunesi hazırlanmalıdır. Laboratuvarda kalibrasyonu kontrol edilen Marshall Test Cihazına hazırlanan briket numuneler sırasıyla yerleştirilerek yük uygulanır ve cihazdan stabilite ve akma değerleri okunur. Düzeltme faktörüne göre stabilite değerinin hesabı yapılarak bulunur. Akma değeri ise cihaz ekranından direkt olarak okunur. Marshall dizayn metodunda Stabilite- Akma ile birlikte Yoğunluk – Boşluk değerleri bu metodun iki ana prensibini oluşturur. Bu deneyden elde edilen sonuçlara göre Bitüm Yüzdesi – Agregalar Arası Boşluk (VMA), Bitüm Yüzdesi – Pratik Özgül Ağırlık, Bitüm Yüzdesi – Hava Boşluğu Yüzdesi (Vh), Bitüm Yüzdesi – Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vf), Bitüm Yüzdesi – Akma ve Bitüm Yüzdesi – Stabilite grafikleri çizilir. Bulunan stabilite ve yoğunluk grafiklerinin max. olduğu yerlere karşılık gelen bitüm yüzdesi, %70 bitümle dolu boşluk yüzdesi ve %4 hava boşluğu yüzdesine denk gelen bitüm yüzdeleri belirlenir ve bunların aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmiş olur. Bu değerlerin standartlara uygunluğunun tespit edilmesi için şartname değerleriyle kontrol edilir (İSFALT, 2002; Önal ve Kahramangil, 1993).

2.5.2 Superpave dizayn yöntemi

Superpave olarak adlandırılan bu dizayn yöntemi ile elde edilen kaplamaların yüksek performans özellikleri göstermesi amaçlanmıştır. Amerika'da bulunan SHRP araştırmacıları tarafından geliştirilen bu yöntem, 1987 yılında kullanılmaya başlanmıştır (Harman ve diğ., 2002). Superpave dizayn yöntemi ile esas amaçlanan, Marshall dizayn yöntemiyle oluşturulmuş kaplamalara göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir direnç sergilemesi ve ayrıca ağır taşıt yüklerine karşı daha iyi performans gösterebilmesidir (Kaya ve Topal, 2016). Superpave yönteminde uygulama yapılacak olan bölgeye ait uzun vadeli iklim bilgileri ve coğrafi konumu göz önünde bulundurularak belirli sıcaklık derecelerinde farklı bağlayıcı deneyleri ile yorulma, tekerlek izi ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı performansları analiz edilmektedir (Ahmedzade ve diğ., 2008).

Marshall dizayn yönteminde briket numuneleri bir tokmak yardımıyla sıkıştırılmaktadır ve bu durum tekerlek yüklerini tam olarak yansıtmamaktadır. Ayrıca Marshall dizayn yöntemiyle hazırlanan numunelerde bulunan agregalarda tokmakla yapılan sıkıştırma sebebiyle kırılma gibi etkiler oluşmaktadır. Bu gibi etkilerden kaçınmak için Superpave dizayn yönteminde yoğurmalı pres metodu kullanılmaktadır. Yoğurmalı pres metoduyla birlikte hazırlanan numuneler dikey yönlü basınca maruz bırakılarak sabit oranlı eğilme açısıyla geometrik bir şekil olan koniye benzeyecek biçimde hareketlerle jirasyon hareketi uygulanmaktadır. Jirasyon hareketi ile hazırlanan numunelerin içinde çeşitli kayma gerilmeleri etkileri oluşmaktadır ve bunun neticesinde yoğurma hali meydana gelmektedir. Oluşan bu etki, Marshall dizayn yöntemi ile hazırlanan numunelerde bulunan agrega kırılması olayını ortadan kaldırmakta ve ezilmeye etkilerinden uzak bir şekilde sıkışma işlemini gerçekleştirmektedir (Öztürk ve Çubuk, 2004).

Superpave dizayn yönteminde, %4 oranındaki hava boşluğu miktarına karşılık gelen bitüm oranı optimum bitüm oranı olarak belirlenir. Boşluk oranı %4'e düşürüldüğünden dolayı kullanılan bitüm miktarı artmış olacak ve buna bağlı olarak da kaplamaların servis ömrü uzayacaktır (Orhan, 2000).

2.6 Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımlara ait performans etkilerinin hesaplanabilmesi amacıyla elde edilen numunelere Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), Modifiye Lottman deneyi, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deneyi ve dolaylı çekme yorulma deneyi ve sünme deneyi uygulanmaktadır.

2.6.1 Marshall stabilite ve akma deneyi (TS EN 12697-34)

Karışım numuneleri üzerinde uygulanan bu deney oluşabilecek deformasyona karşı en yüksek dayanımı (stabilite) ve en yüksek yüke ulaşılan seviyede numune üzerinde meydana gelebilecek düşey yöndeki deformasyonları (akma) bulmak için yapılmaktadır. Kalıp içerisinde sıkıştırılmış ve kalıptan çıkarılmış numunelerin yükseklik değerleri ölçülerek 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosu içerisine 40-60 dak bekletilir. Daha sonra sudan çıkarılan numune yaklaşık 40 sn içerisinde cihazın kırma çenesi içerisine yerleştirilir ve 50 ± 2 mm/dak hızla yükleme işlemi gerçekleştirilerek kırılır. Deney sonucu olarak akma ve stabilite değerleri kaydedilerek stabilite düzeltme katsayıları farklı yüksekliklere sahip numuneler için eşitlik (2.6) yardımıyla hesaplanır (Yamaç, 2015).

$$c = 5.24 \times e^{(-0.0258xh)} \quad (2.6)$$

Deney sonucunda bulunan stabilite ve akma sonuçlarının ortalama değerleri alınarak akma ortalamasından %20 farklı ve stabilite ortalamasından %15 farklı stabilite değerine sahip olan numuneler değerlendirilmeyecektir. Daha sonra kalan numunelerin ortalaması alınır. Akma için %20 ve stabilite için %15 sapma olan numuneler varsa iptal edilir ve yeni numuneler üzerinde deney tekraren yapılacaktır (Yamaç, 2015).

Karışımın sertliğinin ve deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle bulunur (Whiteoak, 2004).

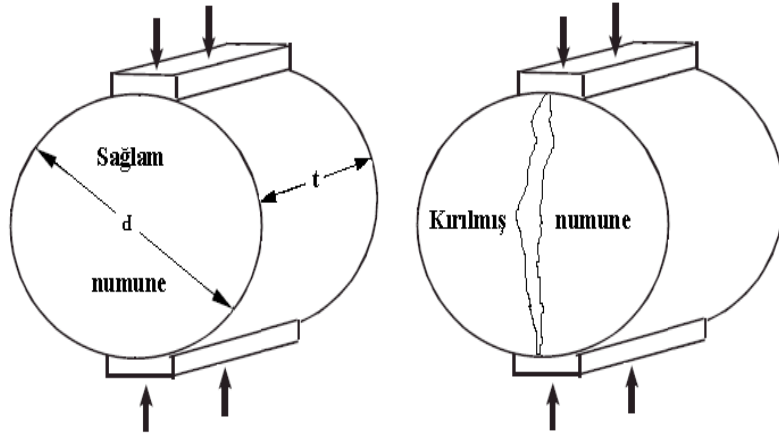
2.6.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS)

Karışım numunelerinin nem hasarına karşı dayanıklılıklarını bulmak için kalıcı Marshall stabilitesi deneyi uygulanmaktadır. Bu deneyde biriket numuneleri 60±1 °C sıcaklığındaki su havuzunda 24 saat süreyle kür edildikten sonra Marshall deneyi uygulanır. 24 saat süre zarfında 60°C suda kür edilen biriket numunelerinin stabilite değerinin normal koşullardaki stabilite değerine oranı Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) değerini vermektedir. Bu değerin yüksek olduğu karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının yüksek olması öngörülmektedir (Hınıslıoğlu ve Ağar, 2004; Zoorob ve Suparma, 2000).

2.6.3 Dolaylı çekme mukavemeti deneyi (ITS) (ASTM D4867)

Asfalt karışım numunelerinin su etkilerine karşı kabiliyetini tespit etmek için kullanılan bu deney aynı zamanda karışımın orta sıcaklıklardaki durabilite ve sertliğini değerlendirmek için de kullanılır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, yoğurmalı veya Marshall pres cihazı ile üretilmiş numunelere uygulanır. Bağlayıcının kohezyon özelliğini doğrudan etkileyen ITS değeri karışımın kohezyon kuvvetine bağlı olup artmasıyla kohezyon artmaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi karışım numunelerinin çekme mukavemetlerinin bulunmasında aynı zamanda sıcaklık ve yorulma sebebiyle gerçekleşen çekme gerilmelerinin karakterizasyonunda da kullanılmaktadır (İSFALT, 2001).

Bu deney dolaylı çekme gerilmesi deney aparatları ve Marshall stabilite cihazı ile yapılır. Silindir şeklindeki biriket numunesi düzleme paralel şekilde cihaza yerleştirilir ve 50 mm/dak hız ile sabit basınçta uygulanarak kırılır. Numune üzerine gelen en büyük yük kayıt altına alınır (Geçkil, 2008; İSFALT, 2001). Numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu Şekil 2.27’de gösterilmiştir.



Şekil 2.27: ITS Deneyinde Numune Yüklenmesi ve Kırılması

Dolaylı çekme mukavemeti (2.7) bağıntısı ile hesap edilmektedir (Geçkil, 2008).

$$ITS = [(2P_{max} / \pi h d) \times 100] \quad (2.7)$$

ITS: Dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

Pmaks: Maximum yük (kN)

h: Numune yüksekliği (mm)

d: Numune çapı (mm)

2.6.4 Modifiye lottman deneyi (AASHTO T-283)

Bu deney bitümlü sıcak karışım numunelerinin su tesirlerine karşı hassasiyetinin bulunması için yapılır. Böylelikle karışım içerisinde su tesirlerinden ötürü oluşan mukavemet azalışı tesbit edilir. Modifiye Lottman Deneyi sonucunda bulunan parametreler ile sıcak karışımların soyulmaya karşı dirençlerinin ve uzun dönem hizmet sürelerinin bulunmasında kullanılır (Geçkil, 2008).

Hazırlanan numunelerin dayanım kaybı belirlenirken kuru (şartlandırılmamış) ve yaş (şartlandırılmış) olmak üzere iki gruba ayrılır. Sıcak karışım aşınma tabakalarında sürekliliğin sağlanması için çekme dayanımı, önemli bir parametre olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu deneyde çekme dayanımının az olması durumunda kaplama tabakası, çevre ve trafik etkenleri ile oluşabilecek çekme gerilmelerine maruz kalacak ve tabakada bozulmalar oluşacaktır (Alshamsi, 2006).

Deneyde her seriden 3'er adet kuru (şartlandırılmamış) ve yaş (şartlandırılmış) olarak toplam en az 6 numune hazırlanır. Hazırlanan numuneler oda koşullarında 2 saat bekletilerek soğuma işlemi yapıldıktan sonra 60 °C etüvde 16 saat boyunca bekletilir. Sıkıştırma ısısında

2 saat süreyle bekletildikten sonra numuneler %6-8 hava boşluğu olacak şekilde sıkıştırılır ve 24 saat oda koşullarında bekletilir. Şartlandırma yapılmayan kuru numuneler 25 °C'deki su havuzunda ortalama 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyi ile kırılır. Şartlandırılmış numuneler ise 13-67 kPa emme basıncı ile 5-10 dakika süre vakum uygulanarak %70-80 suya doymun hale getirilir. Doymun hale gelen numuneler -18 °C dondurucu içerisine koyularak 16 saat süre ile bekletilir. Daha sonra dondurucudan çıkarılan numuneler 60 °C sıcaklıktaki su havuzunda 24 saat boyunca bekletilmektedir. Çıkarılan numuneler 25 °C'deki su havuzunda 2 saat boyunca bekletilerek dolaylı çekme deneyi tatbik edilir. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin (ITS_{yaş}), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı (2.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Geçkil, 2008; Lavin, 2003; Ahmedzade ve diğ., 2007).

$$ITSR = (ITS_{yaş}/ITS_{kuru}) \times 100 \quad (2.8)$$

ITSR: Dolaylı çekme mukavemeti oranı (%),

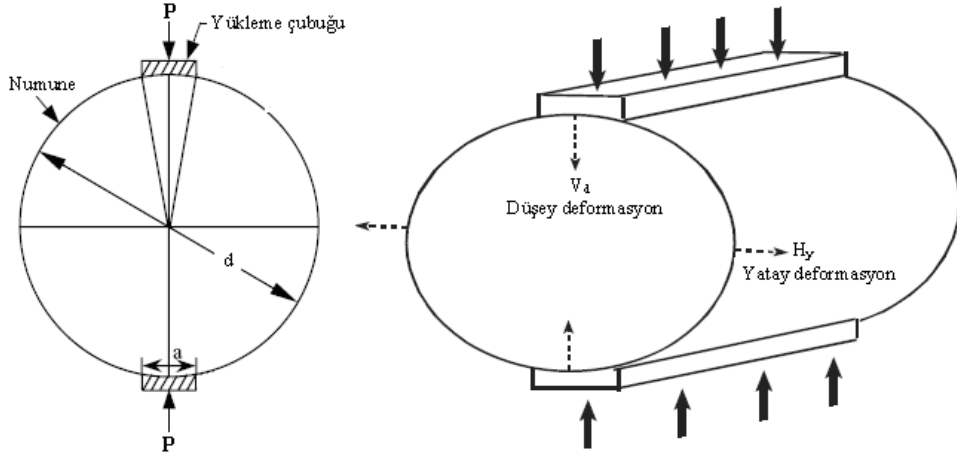
ITS_{yaş}: Şartlandırılmış (yaş) numunelerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

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

Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dirençli kabul edilebilmeleri için ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir (Geçkil, 2008).

2.6.5 Dolaylı çekme esneklik modülü deneyi (ITSM) (BS DD213)

BSK numunelerinin dinamik yüklere maruz kaldığı andaki esnekliği bulmak için yapılan bu deneyde bulunan esneklik modülü kaplamasının performansını ve yükü dağıtma yeteneğinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Esneklik modülü maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır ve tek eksenli yükleme altında yapılır. Dolaylı çekme esneklik modülü deneyinde değişik ısılarda ve yüklemelerde numunelere ait esneklik modülü belirlenmekle beraber numune üzerine sünizoidal olarak düşey yönde bir basınç yükü tekrar eden darbeler ile yapılmaktadır (İnce, 2019). Şekil 2.28'de ITSM deneyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.28: ITSM Deneyi Şeması

Deney sonucunda, numunelere tatbik edilen dinamik yükleme, toplam deformasyon ölçülerek kaydedilir ve poisson oranı alınarak esneklik modülü denklem (2.9) yardımıyla hesaplanır (Geçkil, 2008; İSFALT, 2001)

$$Em = \frac{P \times (v+0.2734)}{Hy \times h} \quad (2.9)$$

Em: Esneklik modülü (Mpa),

P: Maksimum yük (N),

Hy: Toplam yatay deformasyon (mm),

h: Numune kalınlığı (mm),

v: Poisson oranı

Esneklik modülünü yükleme hızı, sıcaklık ve hava boşluğunu önemli oranda etkilemektedir. Bununla birlikte yüksek yükleme hızı ve düşük sıcaklık gibi etkenler esneklik modülünü artırır (Geçkil, 2008).

2.6.6 Sünme deneyi

Sünme deneyi dinamik ve statik olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Dinamik sünme deneyi BSK numunelerinin dinamik yükleme altındaki mukavemetini bulmak amacıyla yapılmaktadır. Deneyde numunelere yük uygulanarak oluşabilecek deformasyon ölçülmektedir (Whiteoak, 2004). Deneyin tatbik edilme ısısı 40 °C olmasına rağmen farklı sıcaklık bölgeleri için daha yüksek sıcaklıklarda da yapılmaktadır (Ahmedzade ve diğ., 2007). Yük tekrür oranına bağlı olarak meydana gelen deformasyonların oluştuğu deneyde numuneler bozuluncaya kadar yüklemeler devam edecektir. Dinamik sünme deneyi

sonucunda oluşan sünme değeri, kaplama sertliği hesabında ve tekerlek izi hesabında da kullanılmaktadır (İSFALT, 2001).

Statik sünme deneyi ise statik yüklemeler altındaki dayanımın bulunması amacıyla yapılmaktadır. BSK numunesi üzerine yük uygulanıp daha sonra kaldırılarak oluşan kalıcı deformasyon değeri kaydedilir. Bu deney sonucunda bulunan sünme modülü değeri, ısı ve dingil yüklerine maruz kalan karışımların tekerlek izi hesaplanmasında ayrıca düşük sıcaklıktaki sertlik hesabında kullanılmaktadır (Geçkil, 2008).

Statik sünme deneyinde, deneye başlamadan önce numuneler, deney sıcaklığında (50°C) en az 3 saat boyunca şartlandırılır (bekletilir). Sonrasında numuneler yükleme plakası ile alt tabla arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler plakanın sağına ve soluna yerleştirilerek ayarlanır. Gerekli olan deney verileri programa girildikten sonra cihaz kabini içindeki referans numunesinin içerisinde ve yüzeyinde bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı sıcaklık değerini gösterdiği anda deneye başlanır. Numunelere ilk 10 dk. boyunca 10 kPa'lık ön yükleme yapılır. Ön yüklemeden sonra 60 dk. boyunca 100 kPa'lık yükleme yapılır. Deney bitiminden sonra birim deformasyon-zaman, rijitlik modülü-zaman grafikleri otomatik olarak elde edilir (Geçkil, 2008).

Deney uygulanırken 1 saat süresince eksenel gerilme (σ) uygulanır ve zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülür. Sünme modülü (E_{cq}) değeri (2.11)'deki gibi hesaplanır.

$$E_{cq}(t) = \sigma / \epsilon_c(t) \quad (2.11)$$

$E_{cq}(t)$: t anındaki sünme modülü (MPa)

σ : Uygulanan gerilme (Mpa)

$\epsilon_c(t)$: t anında oluşan toplam kalıcı deformasyon (mm/mm)

2.7 Malzemelerin Karakterizasyonu

Deneylerde kullanılacak bağlayıcı ve katkı malzemelerinin kimyasal karakteristik özelliklerinin belirlenmesi, yüzeylerine ait gözlemlenmelerin yapılması, gözenek oluşumları, kimyasal bağlarına ait bilgiye erişilmesi ve kristalize yahut amorf yapıda olup olmadıklarının kontrol edilebilmesi için çeşitli görüntüleme teknikleri ile analizler yapılır. Bu amaçla FT-IR, SEM ve XRD gibi yöntemler kullanılarak malzemelerin kimyasal yapısı ve karakterizasyonu hakkında bilgi edinilir (İnce, 2019).

2.7.1 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FT-IR)

FT-IR analizi, organik bileşiklere ait moleküler bağ karakterizasyonunun tespit edilmesi amacıyla yaygın olarak tercih edilen bir görüntüleme tekniğidir. Bu görüntüleme tekniği ile çeşitli faz hallerindeki organik bileşikler arasında kurulmuş olan bağların türü, vaziyeti, bağlanma noktaları gibi bilgiler edinilebilmektedir (İnce, 2019). FT-IR deney cihazı Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29: FT-IR Cihazı

2.7.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

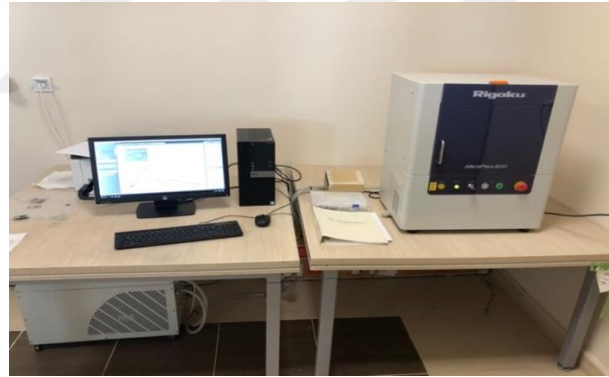
SEM görüntüleme tekniği ile malzemeye ait mikro düzeyde yüzey görüntüleri elde edilir. Kullanılan malzemenin yüzey yapısı ve sahip olduğu bileşenlerinin dağılımını göstermekte yardımcı olduğu için yaygın olarak kullanılır. Yüzey görüntüsünün net olarak alınamadığı durumlarda, malzemenin yüzeyi altın tozu ile kaplanarak görüntü elde edilmeye çalışılır. Katkı malzemesi kullanılarak elde edilen bitümlerde katkı dağılımını incelemek, bitümlerin özellikle sıcaklık değişimlerinden ötürü maruz kaldığı yaşlanma etkilerinin gözlemlenebilmesini sağlaması amacıyla kullanılır (Geçkil, 2019). Şekil 2.30'da SEM görüntüleme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.30: SEM Görüntüleme Cihazı

2.7.3 X-ışını difraktometresi (XRD)

XRD yöntemi ile katı halde bulunan malzemelerin kristalize ve amorf yapı durumları incelenir. Malzemelerin karakteristik ve yapısal özelliklerini incelemek için, malzemeler az miktarda cam bir yüzeye bırakılarak XRD cihazının içine yerleştirilir. Katkı malzemesi kullanılarak modifiye edilen bitümlere ait kristalit parametreleri bu yöntem ile tespit edilir (Geçkil, 2019). Şekil 2.31’de XRD görüntüleme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.31: XRD Görüntüleme Cihazı

3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU

Modifikasyon, yol üstyapılarında kullanılan bağlayıcının veya karışımın performansını arttırmak amacı ile bağlayıcının içine çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda ve şartlarda karıştırılması olarak tanımlanmaktadır (Malkoç, 2002).

Herhangi bir katkı malzemesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilir olması için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekir. Bu özellikler, katkı malzemesinin;

- Kolay ve ucuz elde edilebilmesi,
- Karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemesi,
- Karışım ve serme sıcaklığında yeterince viskoz, yüksek hava sıcaklıklarında kalıcı deformasyonlara karşı dirençli ve düşük hava sıcaklıklarında aşırı rijit ve kırılğan olmaması,
- Bitüm ile homojen olarak karışabilmesidir (Tunç, 2001).

Bitümün modifiye işlemleri genel olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlar;

1. Katkı maddesi bitüme katılır ve modifiye bitüm elde edilir (ıslak karışım).
2. Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan bitümlü sıcak karışıma katılarak modifiye karışım elde edilir (kuru karışım).

Modifiye bitümleri elde etmek için kullanılan çok sayıda katkı malzemesi bulunmaktadır. Bitüm katkı maddelerinin genel bir sınıflandırması Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Bunların içinde en yaygın olanları Çizelge 3.2'de görülmektedir. Kullanılan katkıları gerek cins gerekse miktar olarak farklı bitümlerde farklı sonuçlara neden olmaktadır. Aynı bitüme farklı oranlarda katkı malzemesi katıldığında farklı sonuçlar alınmaktadır. Bu yüzden katkı malzemesinin miktarı son derece önemlidir (Tunç, 2001; Özcan, 2008).

Çizelge 3.1: Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması (İlıcılı ve diğ., 2001)

Tip	Özellikler	Modifiyerin Bağlayıcı Kıvamına Etkisi
1. Filler	Mineral Filler Taş Tozu Kireç Portland Çimentosu Uçucu Kül Karbon Siyahı	Sertleştirme
2. Genleştirici (Ekstender)	Sülfür Lignin (Odun Özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal Lateks b. Yapay Lateks c. BlokKopolimer d. İşlenmiş Kauçuk	Doğal Kauçuk SBR SBS Dönüştürülmüş Kauçuk	-
4. Plastik	POLİMERLER Polietilen Polipropilen EVA PVC	Sertleştirme
5. Bileşim	3 ve 4' deki polimerlerin karışımları	-
6. Fiber	Doğal: Asbest TaşYünü Yapay: Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	Manganez Tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	Kurşun Karışımları Karbon Kalsiyum Tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	Yeniden Kullanma ve Gençleştirme Yağları Doğal Asfaltlar	Yumuşatma ve Sertleştirme
10. Soyulma Önleyici	Aminler Kireç	Yumuşatma

Çizelge 3.2: Modifiye bitümler için en yaygın katkı maddeleri (Tunç, 2001)

KATKI TİPİ	AMAÇ
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve Marshall direncini arttırmak
Kauçuk (Rubber-Lastik)	Viskozluğu arttırmak (polibütadien, poliizopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, stiren- bütadien kauçuğu vs.)
Termoplastik Polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek, viskozluğu arttırmak (polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistren ve etilen vinil asetat)
Termoplastik Kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek, bir miktar elastikliği arttırmak, adezyonu arttırmak (poliüretan, polieter-poliester kopolimeri, olefinik kopolimerleri ve stirenik blok kopolimerleri)
Termoset Polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu arttırmak
Organo-Manganez Bileşikleri	Mukavemeti arttırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek
Doğal Asfaltlar (Göl ve Kaya Asfaltları)	Isıya duyarlılığı iyileştirmek, aşınma direncini arttırmak
Epoksi Reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Gilsonit (Tabii Asfalt)	Kalıcı deformasyon direncini arttırmak
Siyah Karbon	Asfaltın dayanımını ve karışımın deformasyon direncini arttırmak

Bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinden polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. “Poli” Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Polimerler, özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlardan biri oluşum yöntemleridir ve iki türdür:

- Ekleme polimerizasyonu: A monomerin “n” defa tekrarlanması ile oluşan polimerlerdir. Örnek olarak polietilen, polistren ve polibütadiyen gösterilebilir.

- Yoğunlaşma polimerizasyonu: Alkoller ve aminler gibi kimyasal reaksiyona giren grupları içeren monomerlerden oluşurlar (poliester, poliamidler, poliüretan) (Uluçaylı, 1998).

Polimerler, homopolimerler ve kopolimerler olmak üzere de ikiye ayrılırlar (Tunç, 2001).

- Hepsi aynı kimyasal kompozisyonda tek monomerin tekrarı ile oluşanlara homopolimerler denir.
- Kopolimerler ise kimyasal kompozisyonu farklı iki ya da daha fazla monomerin kompozisyonundan oluşur.

Polimerler fiziksel açıdan tek boyutlu veya lineer polimerler olarak iki gruba ayırabiliriz: Tek boyutlu veya lineer polimerler, adından da anlaşılacağı gibi, monomerlerin lineer zincir halinde birleşmiş olduğu polimerler olup kimyasal ve reolojik özellikleri bakımından ikiye ayrılırlar (Ertekin, 2003).

- Birincisi termoplastik veya plastomerik olanlardır. Normal sıcaklıklarda katı haldedirler. Isıtılınca erirler. Eritme malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemez.
- İkincisi ise elastomerik olanlardır. Bunlar da elastisiteyi sayesinde gerilme ve sıcaklık altında meydana gelen deformasyonları geri kazanabilirler.

Polimerlerin sınıflandırılması Çizelge 3.3’de görülmektedir.

Çizelge 3.3: Polimerlerin sınıflandırılması (Choquet, 1994)

KISALTMA	İSİM	SINIF
SBS	Stiren – Bütadiyen – Stiren	Elastomer
SBR	Stiren – Bütadiyen Kauçuk	Elastomer
EPDM	Dipolien – Propilen ve Etilen Terpolineri	Elastomer
NR	Tabii Kauçuk	Elastomer
PE	Polietilen	Plastomer
PP	Polipropilen	Plastomer
APP	Ataktik Polipropilen	Plastomer
IPP	İsotaktik Polipropilen	Plastomer
PVA	Polivinil Asetat	Plastomer
EVA	Etilen Vinil Asetat	Elastomer
EMA	Etilen Metil Akriolat	Plastomer
PIB	Poliisobutilen	Elastomer
PVC	Polivinil Klorür	Plastomer
PS	Polistiren	Plastomer
SIS	Stiren - İsoopren - Stiren	Elastomer

Elastomerler; bitümlü karışımın ağır yükler altında kırılmadan esneyebilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir. Elastomerler, bitümlü karışımlara daneli halde veya sıvı hidrokarbona çözelti halinde katılabilmektedir (Ertekin, 2003).

Plastomerler (termoplastikler), mekanik açıdan bitümü sert hale getiren ve böylece bitümlü karışımın fazla esnemenen büyük yüklere dayanabilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir. Plastomerler ısıtıldıklarında yumuşar ve akarlar. Soğutuldukları zaman ise tekrar sertleşirler. Bitüm modifikasyonunda kullanılan başlıca plastomerler, polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) olarak verilebilir. Bu malzemeler bitümle karıştırıldıkları zaman, normal servis sıcaklıklarında bitümün viskozitesini ve sertliğini arttıırırlar (Ertekin, 2003).

Termosetler, erimeyen ve akmayan sentetik polimer katkı maddeleridir. Isıtılmaları halinde sert bir yapıya kavuşurlar ve bu sertleşme hali süreklilik gösterir. Termosetlerde ısıtma işlemi, kimyasal bir reaksiyonun sonucunda ağlaşmaya ve geri dönülmez bir değişimin oluşmasına neden olmaktadır. En önemli termosetler, alkidler, amino ve asitfonik reçineler, epoksiler, doymamış poliesterler ve poliüretanlardır. Bu polimerler bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılabilmelerine rağmen, çok yüksek olan maliyetleri nedeniyle tercih edilmemektedirler (Ertekin, 2003).

Yukarıda verilen sınıflandırma göz önüne alındığında iki tip polimer kullanılmaktadır: Plastomerler ve elastomerler. Aşağıda bu polimerlere ait kullanım alanları verilmektedir.

Plastomerler:

- Sathi kaplama amaçlı, saf bitüm ya da katbek ile yapılan emülsiyonların modifikasyonunda,
- Geçirimli asfaltta (yüksek boşluk oranı, düşük temas noktaları nedeni ile),
- İnce veya çok ince (1.5-4 cm) serilebilen aşınma tabakalarında (sıcak karışım),
- Soğuk karışımlarda (emülsiyon halinde),
- Çok deforme olabilen alt tabakalar üzerindeki satih tabakalarında,
- Su yalıtım örtülerinde ve yerinde sıcak serme yalıtım karışımlarında kullanılmaktadırlar (Choquet, 1994)

Elastomerler:

- Sathi kaplama amaçlı, saf bitüm ya da katbek ile yapılan emülsiyonların modifikasyonunda,
- Yüksek trafikli yollarda sathi kaplama yapımında,
- Kalın sathi kaplama yapımında,
- Su yalıtımı veya yansıma çatlaklarını önleme amaçlı gerilme emici ara membranlarda,
- Geçirimli asfaltta,
- İnce ve çok ince serilebilen aşınma tabakalarında,
- İnce serilebilen aşınma tabakalarının altında yapıştırma tabakası olarak,
- Su yalıtım sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Choquet, 1994).

Bitüme polimer ilavesinin amacı, bitümün viskoelastik davranışını iyileştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmaktır (Choquet, 1994). Çünkü bitümün, viskoelastik ve termoplastik davranış göstermesi; bitümü düşük sıcaklıklarda kırılğan, yüksek sıcaklıklarda ise sıvı hale getirir (Anonim, PMB, 2018).

Modifiye bitüm yol kaplamalarının yorulma ve oluklanmaya karşı mukavemetini arttırmaktadır.

Polimer Modifiye Bitüm Kullanım Amaçları;

- Asfalt çimentosunun reolojik ve mekanik özellikleri değişmekte, kalıcı deformasyona ve kırılmaya karşı mukavemeti artmaktadır.
- Yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı kaplamaların mukavemeti artmaktadır.
- Asfalt çimentosunun servis sıcaklık aralığı genişlemektedir.
- Asfalt çimentosunun sıcaklık değişimlerine hassasiyeti azalmakta, yumuşama noktası değeri yükselmekte, Fraass kırılğanlık noktası değeri düşmektedir.
- Yaşlanma yavaşlamaktadır.
- Adezyon iyileşmektedir (Anonim, PMB. 2018).

PMB Kullanımının Sağladığı Yararlar;

- Yansıma çatlaklarının ve tekerlek izi oluşumunun önlenmesi,
- Yorulmaya ve soyulmaya karşı direncin kazandırılması,

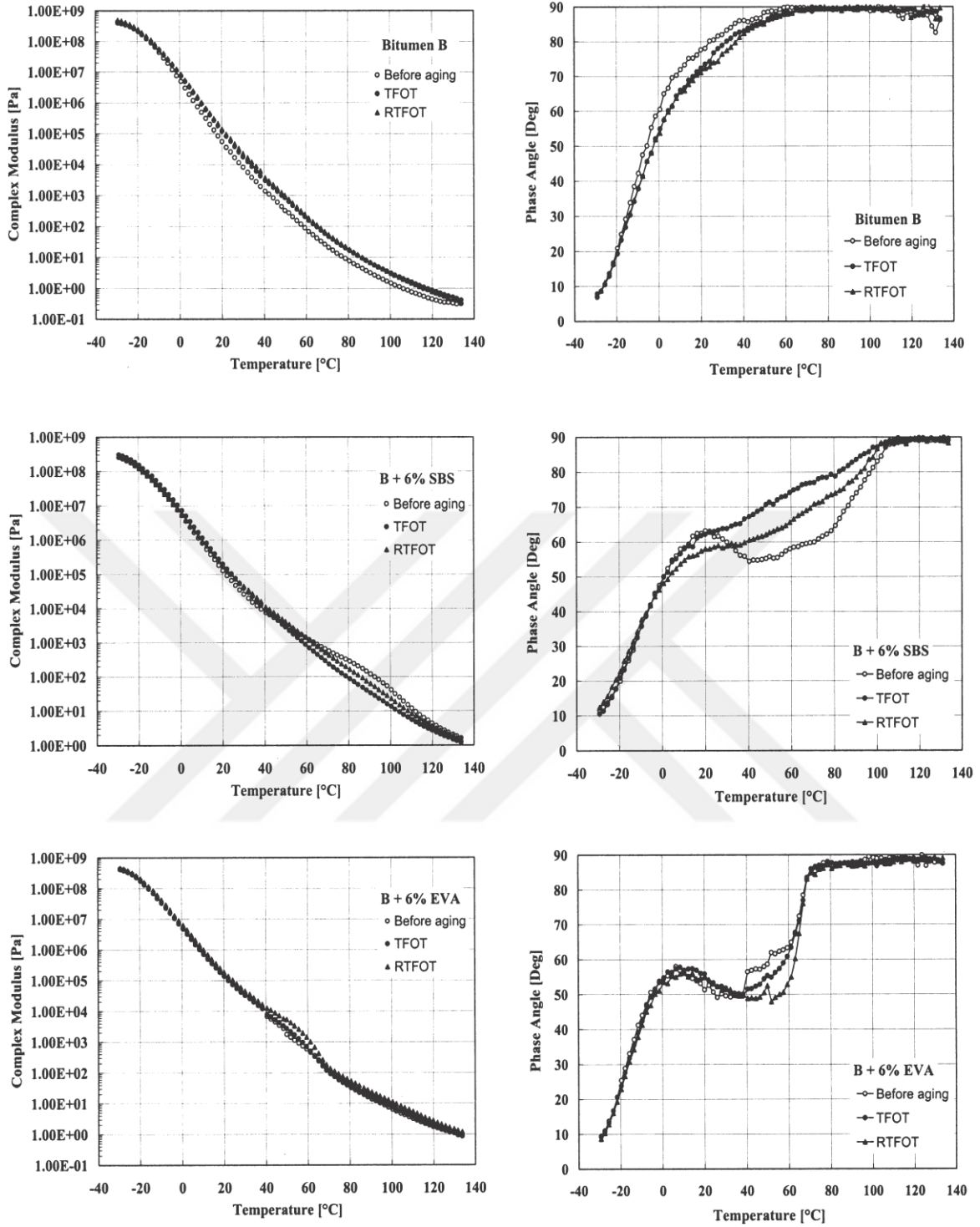
- Yüzey pürüzlülüğünün sağlanması,
- Yapım mevsiminin uzatılması,
- Emilim kapasitesinin minimize edilmesi,
- Tabaka alanlarının azaltılması,
- Su yalıtımının sağlanması,
- Açık gradasyonlu asfaltın betona yapıştirılması amacıyla kullanılmaktadır (Anonim, PMB, 2018).

Polimerler, kendi ağırlıklarının 9 misline kadar bitüm bileşenlerini içine katarak hacim yönünden 10 misline kadar çıkabilirler. Bundan dolayı bitüm içinde polimer malzemenin çok iyi şekilde ve homojen olarak karıştırılması gerekmektedir (Anonim, PMB, 2018).

3.1 Literatür Özeti

Polimerinin, bitümde kullanımı uzun yıllardır devam etmekte olup, bitüm üzerindeki etkilerini inceleyen literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

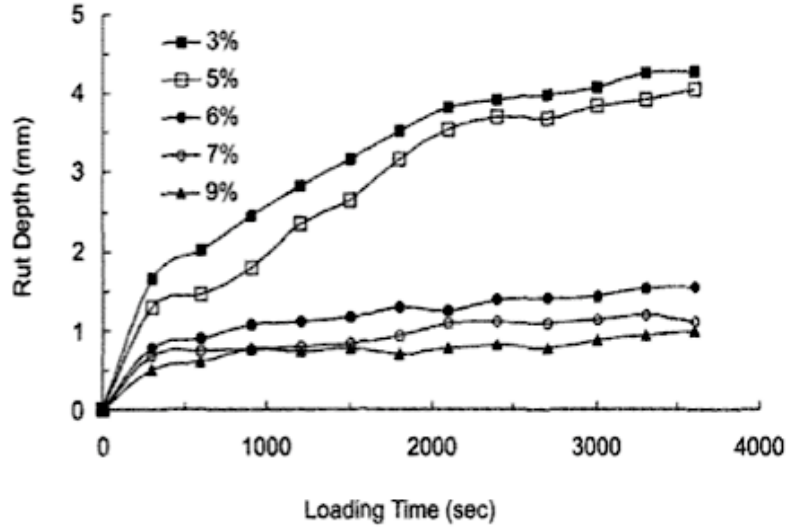
Lu ve Isacson (2001)'de bitümün modifiyesinde çeşitli termoplastik elastomerleri (SBS, SEBS, EVA, EBA) kullanmışlardır. Elde ettikleri ürünlerin temel özelliklerini (morfoloji, reoloji, yaşlanma) floresans mikroskopisi, dinamik mekanik analiz, sünme testi ve jel permeasyon kromatografisini kullanarak çalışmışlardır. Modifiye bitümlerin morfolojik ve reolojik özelliklerinin polimer karakteristiği ile miktarından ve bitümün yapısından etkilendiğini bildirmişlerdir. Yeterli miktarda polimer içeriği kullanılarak (yaklaşık %6) sürekli polimer fazı oluşturulduğunda, karışımların reolojik özelliklerinin belirgin bir şekilde geliştiğini gözlemlemişlerdir. Belirli bir polimer miktarında, SBS ve SEBS içeren karışımların EVA ve EBA içeren karışımlara göre oldukça farklı reolojik davranışlarda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Yaşlanma özelliğinin de kullanılan polimer çeşidinden kuvvetlice etkilendiği belirttikleri sonuçlar arasındadır. Yaşlanma esnasında gerçekleşen reolojik değişimleri bitümün oksitlenmesine ve/veya polimerin bozulmasına bağlamışlardır. Ayrıca, yaşlanma etkisinin test koşullarından (örneğin sıcaklık) etkilendiğini rapor etmişlerdir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Bağlanma Reolojisinde Yaşlanmanın Etkisi

Chen vd. (2003)'de, stiren-bütadien-stiren (SBS) kopolimeri ile yaptıkları bitüm modifikasyonu çalışmalarında, PMB'nin viskoelastik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemek için depolama stabilite testi, dinamik kesme reometresi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) içeren testler yapılmıştır. Polimerlerin eklenmesiyle bitümün viskozitesini, yumuşama noktasını, sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir. SEM sonuçları,

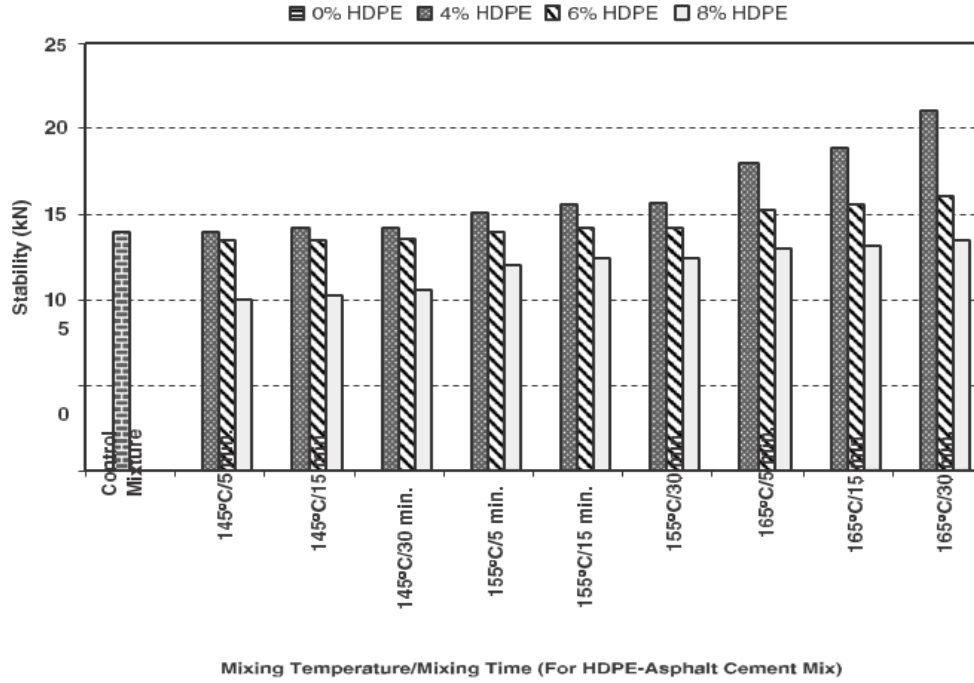
polimer içeriği arttıkça, SBS'nin PMB'nin mekanik özelliklerinde bir artışa yol açan baskın faz haline geldiğini göstermiştir. Tekerlek izi deneylerinde %6 oranında SBS miktarının optimum şartları sağladığı bulunmuştur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: SBS ile Karıştırılan Bitümün Tekerlek İzi Testinden Elde Edilen Rut Derinliği

Iqbal (2004), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), etil-vinil-asetat (EVA) ve akrilat polimerler kullanılarak yapılan bir çalışmanın sonucunda, asfaltın reolojik özelliklerinin iyileştiği, EVA ve akrilat polimerler kullanıldığında sıcaklık hassasiyetinde azalma olduğu, özellikle EVA'nın asfaltı sertleştirdiği ve akrilat polimerlerin yüksek sıcaklıklarda LDPE'den daha sert olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu maddeler özellikle LDPE, asfalt modifikasyonunda kullanıldıkları zaman iyi depolama stabilitesine sahip oldukları tespit edilmiştir. Aynı maddelerin karışımında kullanılması durumunda LDPE'nin tekerlek izi direncinin düşük olduğu, en iyi tekerlek izi direncine sahip karışımın ise akrilat polimer kullanılan karışımlar olduğu belirtilmiştir.

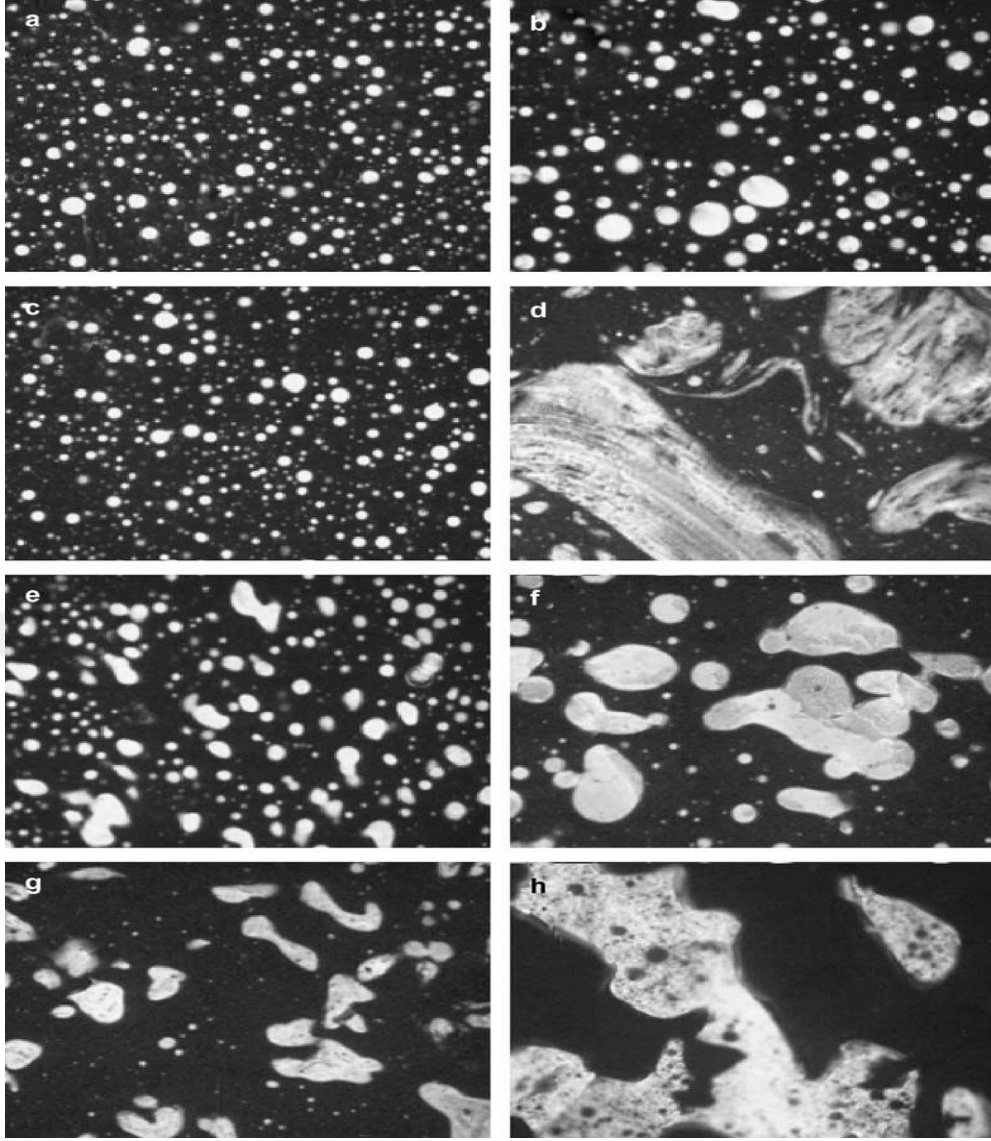
Hınıslioğlu ve Ağar (2004), atık yüksek yoğunluklu polietileni katkı olarak kullandıkları çalışmalarında Marshall cihazı kullanılarak çeşitli yüzdelerdeki HDPE katkılı bağlayıcıların dayanım değerleri tayin edilmiştir. Araştırmada %4 oranındaki polimer katkısının orijinal bitümün dayanım değerini 14kN'dan 21kN'a yükselttiği bildirilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Karışım Sıcaklığı/Karıştırma Süresi ve Akış

Yousufi (2004), PE'nin bitüm içindeki dağılımını ve polimerin yapısal parametrelerinin etkilerini incelediği çalışmada %3 ve %5 oranlarında LDPE, LLDPE, HDPE gibi polimerler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklarda polimerin erime-akış indeksi (MFI) azalırken bitümün mekanik performansının arttırdığını, düşük sıcaklık performansını ise olumsuz etkilediğini bildirmiştir.

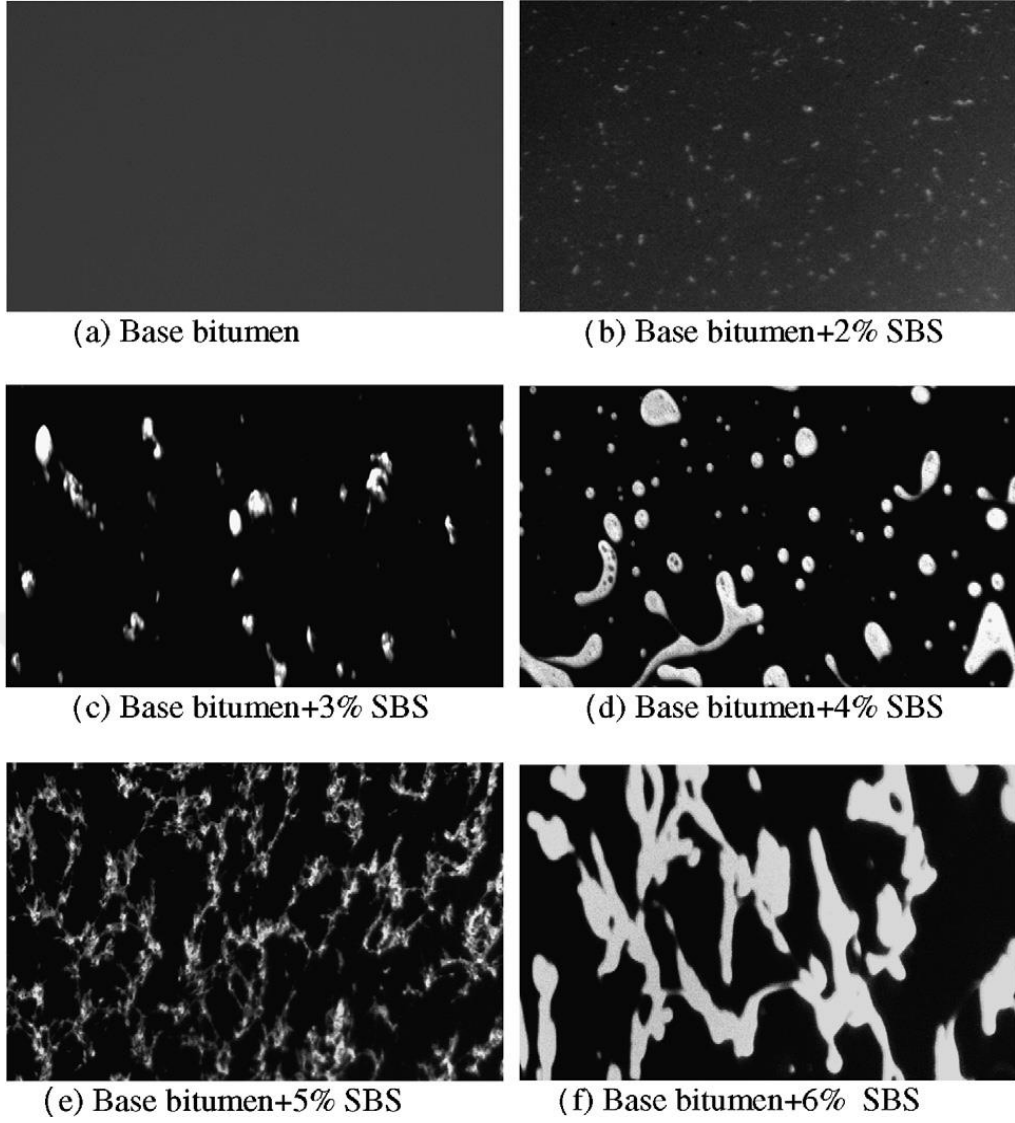
Polacco vd., (2005), Penetrasyonu 70/100 olan bitümlü bağlayıcının farklı polietilenlerin %6'sı (ağırlıkça) ilavesiyle modifiye edilmiştir. Tipik karıştırma prosedürü şu şekildedir: yaklaşık 500 cc'lik alüminyum kutular 250-260 g asfalt ile doldurulmuş ve bir termoelektrik ısıtıcıya konulmuştur. Asfalt sıcaklığı 180°C'ye ulaştığında, yüksek bir kesme mikseri kutuya daldırılmış ve 4000 rpm'ye ayarlanmıştır. Polimer ilave edilirken (yaklaşık 5 g / dak) sonra 2 saat karıştırma esnasında sıcaklığı 180 ± 1 ° C arasında tutulmuştur. Son olarak, elde edilen PMA, karakterizasyon için örneklerin hazırlanması için uygun miktarlarda bölünmüştür. Numuneler 20°C'de buzdolabında saklanmıştır. Atık polietileni katkı malzemesi olarak kullandıkları çalışmada, polietilenin bağlayıcının mekanik özelliklerinin arttırdığı ve bitüm içerisinde iyi dağılım gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: (a) M1 30 dak, (b) M2 30 dak, (c) M4 30 dak, (d) M4 24 sa, (e) M7 30 dak., (f) M7 24 saat kürlenme, (g) M7 48 saat kürlenme ve (h) M8 2 saat karıştırma

Garcia-Morales vd. (2006), çalışmalarında penetrasyonu 60/70 olan bitümlü bağlayıcıya geri dönüşüm ile kazanılmış EVA ve LDPE'yi bir arada ağırlıkça %2.5, 3.5, 4.5, 5 ve 6 oranlarında katkı olarak kullanmışlardır. Farklı konsantrasyonlarda bitüm ve polimer karışımları, karıştırma cihazı kullanılarak hazırlanmıştır. Numuneler, 6 saat süreyle, 180°C'de ve 1200 rpm'lik çalkalama hızında, ısıtma sıvısı olarak silikon yağı kullanılarak işlem görmüştür. Çalışmada yüksek sıcaklıklarda EVA+LDPE katkılı bitümün orijinal bitüme oranla mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu bildirilmektedir. Ayrıca %3,5 oranında kullanılan geri dönüştürülmüş EVA+LDPE katkısının bitümün elastik davranış gösterdiği sıcaklık aralığını genişlettiği ortaya konmuştur.

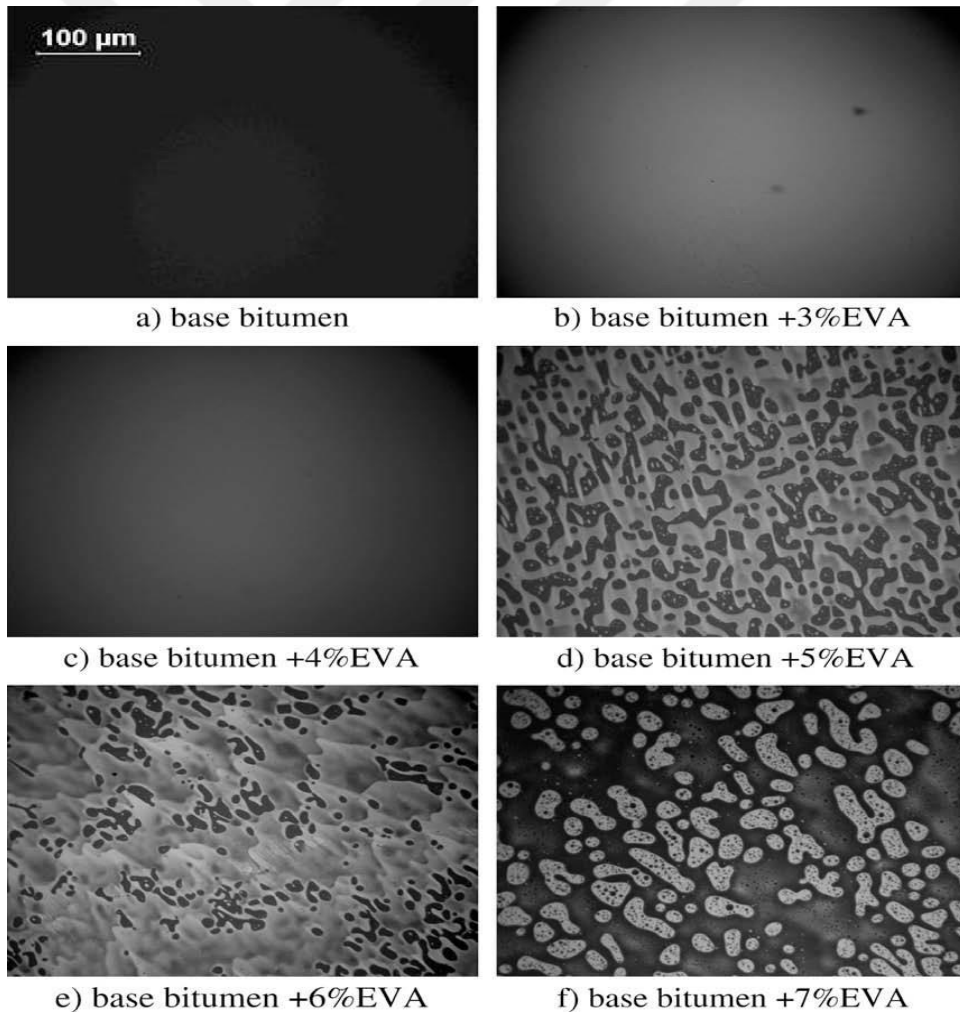
Sengöz ve Işıkyakar (2008), modifiye edilmiş bitüm içeren stiren-bütadien-stiren (SBS) ve etilen vinil asetat (EVA) kopolimerleri üzerinde bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. Polimer modifiye bitüm (PMB) numuneleri, polimerin türüne bağlı olarak çok amaçlı bir laboratuvar karıştırıcısı vasıtasıyla hazırlanmıştır. 50/70 penetrasyon dereceli saf (modifiye edilmemiş) bitüm, farklı oranlarda SBS (ağırlıkça %2-6) ve EVA (%3-7) polimerleri ile karıştırılmıştır. SBS ve EVA modifiye bitüm örnekleri, sırasıyla 1100 rpm'de ve 125 rpm'de dönen yüksek ve düşük kesmeli bir laboratuvar tipi karıştırıcı vasıtasıyla hazırlanmıştır. Hazırlamada, saf bitüm sıvı haline (180-185 °C) ısıtılmış ve 2000 ml'lik küresel bir şişeye dökülmüştür. SBS ve EVA polimerler daha sonra saf bitüme yavaşça eklenmiştir. 185° C sıcaklığa ulaşıldığında, sıcaklık sabit tutulmuş ve karıştırma işlemi 2 saat sürdürülmüştür. Saf bitümdeki SBS ve EVA dispersiyonunun homojenliği, karışımın bir ASTM 100 mm'lik elek içinden geçirilmesiyle doğrulanmıştır. Tamamlandıktan sonra, numuneler şişeden çıkarılmış ve alüminyum folyo ile kaplanmış ve test için saklanan küçük kaplara ayrılmıştır. Örneklerin özellikleri ve morfolojisi, geleneksel ve ampirik test yöntemleri ve floresan mikroskopu kullanılarak belirlenmiş ve karakterize edilmiştir. SBS ve EVA PMB içeren sıcak karışım asfalt (HMA)'nın mekanik özellikleri de analiz edilmiş ve saf bitüm içeren HMA ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, modifiye edilmiş bitümlerin morfolojisinin ve özelliklerinin yanı sıra polimer modifiye HMA'nın mekanik özelliklerinin, polimer ve polimer içeriğinin türüne bağlı olduğunu göstermiştir. Düşük polimer muhtevasında, numuneler sürekli bir bitüm fazında dağılmış polimer parçacıklarının varlığını ortaya çıkarırken, yüksek polimer içeriklerinde sürekli bir polimer fazı gözlemlenmiştir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, görüntüler polimer içeriği arttıkça SBS modifiye PMB'lerin morfolojisinde belirgin bir değişim göstermektedir. Polimer modifikasyonu, saf bitümün; penetrasyon, yumuşama noktası, ısıya duyarlılık, vb. Ayrıca, Marshall stabilitesi gibi SBS PMB numuneleri ile hazırlanan HMA'nın mekanik özelliklerinin artan polimer içerikleri ile arttırıldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: 100'lük Büyütme ile SBS PMB Örneklerinin Flüoresan Görüntüleri

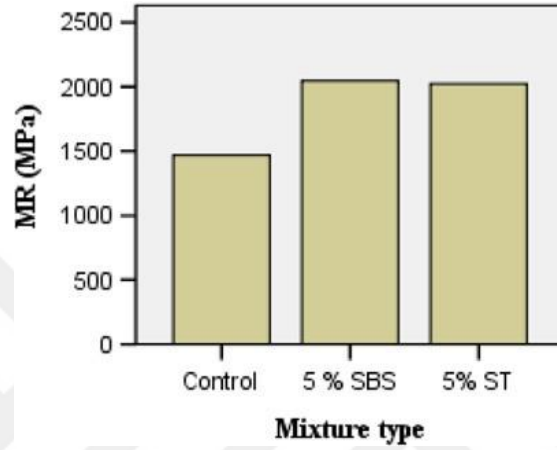
Şengöz vd. (2009), stiren bütadien stiren (SBS), Etilen vinil asetat (EVA) ve etilen bütül akrilat (EBA) esaslı polimer modifiye bitüm örnekleri (PMB'ler) ile ilgili bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. PMB'ler, 50/70 penetrasyon dereceli, modifiye edilmemiş (saf) bitümün, kopolimerlerle farklı oranlarda (%0, 2, 3, 4, 5, 6, 7) karıştırılmasıyla üretilmiştir. Evatane® 2805 ve Elvaloy® 3427 AC modifiye bitüm örnekleri, 1000–1200 rpm'de dönen yüksek kesmeli bir karıştırıcı ile hazırlanmıştır. Hazırlamada, saf bitüm sıvı haline (180-185°C) ısıtılıp 2000 ml'lik silindirik bir şişeye dökülmüştür. Polimerler daha sonra saf bitüme yavaşça eklenmiştir. 185°C'lik sıcaklığa ulaşıldığında, sıcaklık sabit tutulup homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Ana bitümdeki EVA ve EBA polimerlerinin dispersiyonunun homojenliği, numune karışımının bir ASTM 100 gözenekli elekten geçirilmesiyle doğrulanmıştır. Tamamlandıktan sonra, numuneler şişeden çıkarılmış, alüminyum folyo ile kaplanmış ve test için saklanan küçük kaplara

ayrılmıştır. PMB'lerin temel özellikleri geleneksel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin morfolojisi ve saf bitüm boyunca polimerlerin alan dağılım yüzdesi, sırasıyla floresan ışık optik mikroskopi ve Qwin-Plus görüntü analizi yazılımı ile tanımlanmış ve belirlenmiştir. Yapılan konvansiyonel deneyler ve elektron mikroskobu görüntüleri ertesinde, modifiye edilmiş bitümlerin ana özellikleri ve morfolojilerinin polimer tipine ve miktarına bağlı olduğunu belirtmişler, polimer modifiyesinin penetrasyon, yumuşama noktası ve sıcaklık hassasiyeti gibi konvansiyonel özelliklerini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Son olarak ise polimer oranıyla polimerlerin yüzdece dağılma alanları arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 3.6'da belirtildiği gibi, morfolojide, özellikle %5'in altındaki polimer muhtevalarında EVA PMB'lerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Polimerlerin dağılımı %5'lik polimer içeriği ile başlar. Bununla birlikte, %6-7'lik polimer içeriğinde, dağılmış bir bitüm fazına sahip sürekli bir polietilen faz gözlenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: 100'lük Büyütme ile EVA PMB Örneklerinin Flüoresan Görüntüleri

Al-Hadidy A. ve Tan (2009) PMB'ler üzerinde yaptıkları çalışmalarında taş mastik asfalt (SMA) karışımlarında bir katkı maddesi olarak %5 oranında nişasta (ST) ve stiren-bütadien-stiren (SBS) kullanarak Marshall dizayn metoduyla yapılan stabilite deneylerinde dayanım değerlerini sırasıyla %11 ve %8 arttırdığı tespit edilmiştir. Aynı çalışmada 25 °C sabit sıcaklıkla SBS modifiye bitümün kontrol numunesine göre daha büyük esneklik modülüne (RM) sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: SBS ve ST'nin Esnek Modül Üzerindeki Etkileri

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2009), Polipropilenin katkı malzemesi olarak kullanıldığı çalışmada, polimerin bitümün mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. %7 olarak ilave edilen PP, 51 olan orijinal bitüm penetrasyon değerini 26,3'e düşürmüştür. Katkı olarak ilave edilen PP oranı arttıkça penetrasyon indeksi sürekli olarak artış gösterirken duktilite azalmıştır. Marshall stabilite deneyi ile yapılan ölçümlerde %5 oranında ilave edilen PP, dayanımı 7,412 kN değerinden 10,876 kN değerine yükseltmiştir. Aynı çalışmada araştırmacılar sıcaklık hassasiyetinin PP ilave edilmesiyle azaldığını bildirmişlerdir (Şekil 3.8).

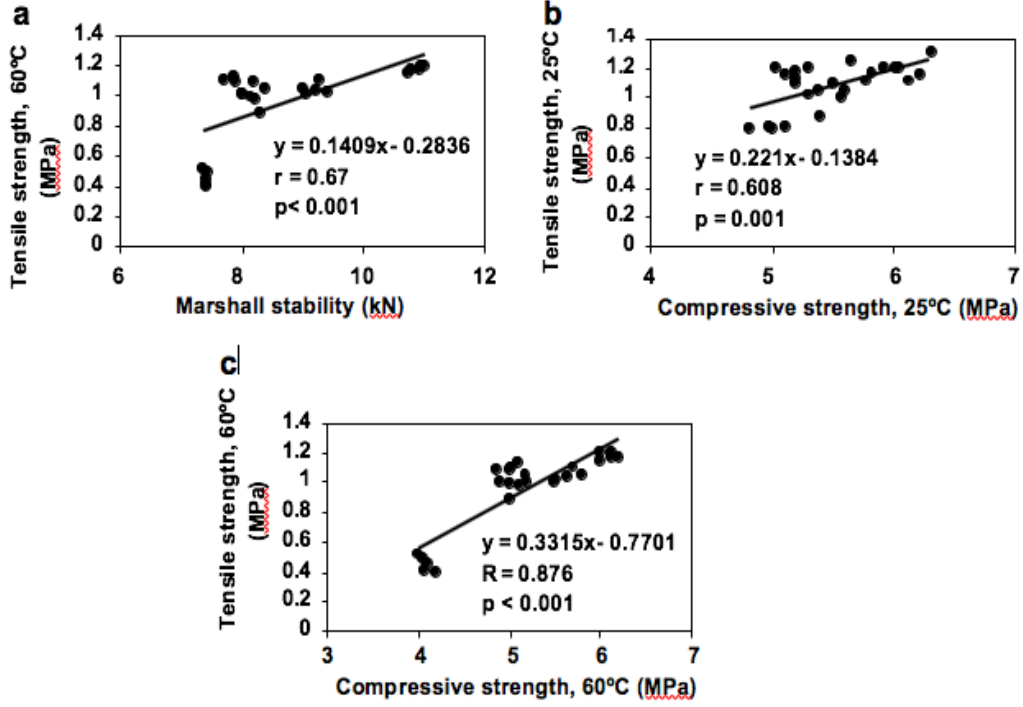
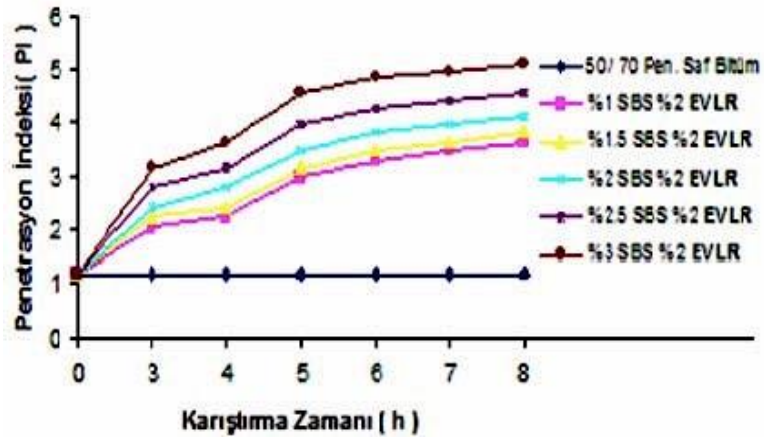


Fig. 8. Linear relationships between the performance tests of PP modified SMA mixture.

Şekil 3.8: PP Modifiye Edilmiş SMA Karışımının Performans Testleri Arasındaki Doğrusal İlişkiler

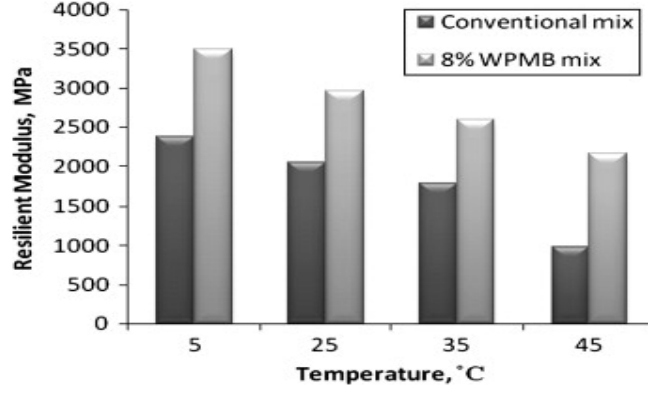
Keyf (2010)'da yaptıkları çalışmada, 50/70 AC li bitüm 2- 3 kg arası tartılmış olan bitüm 220°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra %1-5 aralığındaki oranlarda katkı maddesi ekleyerek 90 devir/dk devirde sürekli karıştırıp yeni asfalt bileşimi oluşturmuşlardır. Katkı malzemesi olarak elastomerik reaktif terpolimer olan ELVALOY RET ve SBS'nin bitüme ilave edilmesiyle son üründe saf bitümlü bağlayıcıya göre penetrasyon değerinin azaldığı, penetrasyon indeksinin arttığını belirtmişlerdir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: SBS ve Elvaloy RET (EVL) ile Modifiye Edilen 50/70 Bitüme Ait Penetrasyon İndeksi Grafiği

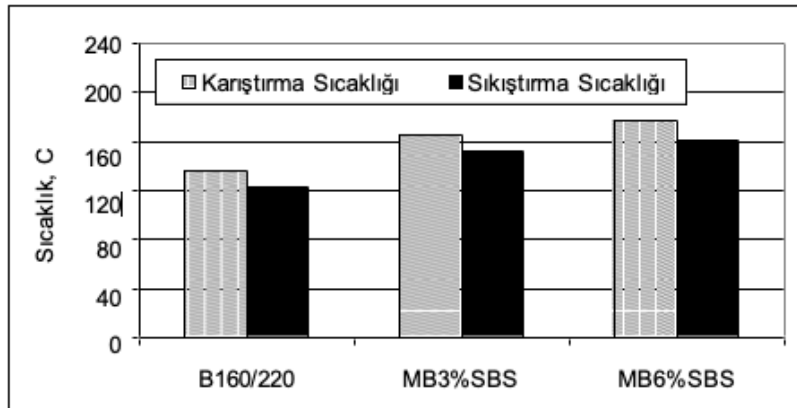
Çubuk vd., (2011)'deki çalışmada termoplastik polimerlerden ticari adıyla teflon olarak bilinen politetrafloretillen (PTFE) bitüme ilave edilerek bitümün modifiye edilmesi ve bu katkı maddesinin bitümün reolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 50/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Bitüm önceden 150°C fırında 1 saat süre ile ısıtılmış ve sonra hemen karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma için sıcaklığı önceden 150 °C'a ayarlanmış yağ banyosu kullanılmıştır. 4 pervaneli mikser önce düşük hızda (400 rpm) çalıştırılmıştır. Sonra karıştırma işlemine hemen başlanılmış ve ağırlıkça %3 olarak belirlenen miktarlarda PTFE ilave edilmiştir. Mikser hızlandırılarak (1300 rpm) 1 saat karıştırma yapılmıştır. Sonra hazırlanan modifiye bitüm 1 saat 150°C'lık etüvde bekletilmiştir. Karışım etüvden çıkartılarak sıcaklığı, oda sıcaklığına ulaştığında ağzı kapatılarak viskozite ve diğer deneyler için muhafaza edilmiştir. Bitümün reolojik özelliklerini belirleyebilmek için orjinal ve modifiye edilmiş bitüme viskozite, penetrasyon, yumuşama noktası, dinamik kesme reometresi (DSR), döner ince film etüvü (RTFOT), basınçlı oksidasyon kabı (PAV) ve çubuk eğme reometresi (BBR) testleri ve performanslarına ilişkin ise Marshall stabilitesi ve soyulma deneylerini uygulamışlardır. Katkının bitümün camsı geçiş sıcaklığına etkisi fark taramalı kalorimetre (DSC), yüzey enerjisine etkisi ise diferansiyel yüzey analizi (DSA) ile tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda katkının, bitümün tekerlek izi oluşumunu yaklaşık %54 oranında azalttığı, karıştırma prosesi sonrası yaşlanmış bitümün tekerlek izi oluşumunu ise yaklaşık %29 oranında azalttığı belirtilmiştir.

Sangita vd., (2011), çalışmalarında atık polietilen ve lastik kırıntıları 4:1 oranında karıştırarak oluşturdukları polimer karışımı bitümde katkı malzemesi olarak kullanmışlardır. Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre polimer katkılı bitümün bozulma sıcaklığı 230 °C olarak ölçülmüştür. Karışımın Marshall deneyi ile stabilite değerleri belirlenmiş, %8'lik polietilen+tekerlek kırıntısı katkının en yüksek değerleri verdiği belirtilmiştir. Buna göre %8'lik polimer katkısı bitümün stabilite değerini yaklaşık %40 mertebesinde arttırmıştır. Hem geleneksel hem de WPMB karışımı için esnek modül testlerinin sonuçları (%8 modifiyer), Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



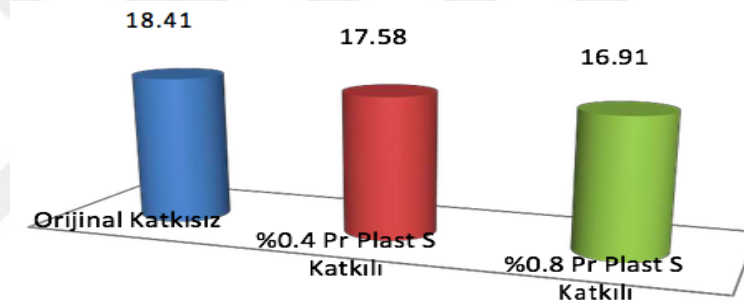
Şekil 3.10: Konvansiyonel ve %8 Atık Polimer Modifiye Bitümlü (WPMB) Karışım İçin Esnek Modül Değerleri

Alataş ve Kizirgil (2012)'deki çalışmalarında, saf ve iki farklı oranda SBS içeren bitümlü bağlayıcıları değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında 160/220 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Bitüme ağırlığının %3 ve %6'sı kadar katkı maddesi olarak SBS kullanılmıştır. SBS ve saf bitüm mikserde karıştırılarak SBS modifiyeli bitüm elde edilmiştir. Karıştırma işlemi 180°C'de dakikada 1000 devirde ve 60 dak süreyle uygulanmıştır. Saf ve modifiye bitümlere kısa dönem yaşlanmadan önce ve sonra penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulamışlardır. Böylece SBS katkı maddesinin bitümlü bağlayıcının kıvamı ve ısı hassasiyeti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Daha sonra saf ve SBS modifiyeli bağlayıcıların agregayla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, AASHTO TP48 standardına göre belirlenen dönel viskozimetre deney sonuçlarından faydalanılarak tespit edilmiştir. Dönel viskozimetre deneyleri sonucunda SBS içeriği arttıkça hem 135 °C sıcaklıkta hem de 165 °C sıcaklıkta bağlayıcıların viskozite değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Viskozite değerlerine bağlı olarak bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları

Torun (2015), Bitümlü sıcak karışımlarda Pr Plast S katkı maddesiyle yaptıkları çalışmanın ilk bölümünde %3.0 - 3.50 - 4.0 - 4.5 - 5.0 - 5.5 - 6.0 bağlayıcı oranlarında orijinal katkısız, %0.40 Pr Plast S katkılı ve %0.80 Pr Plast S katkılı üç grup numuneden toplamda 84 adet Marshall briketi üretilmiştir. Marshall Tasarım Yöntemi ile üç grup karışım için optimum bitüm miktarları tespit edilerek mühendislik özellikleri karşılaştırılmıştır. Katkı maddesinin optimum bitüm miktarını arttırmakla birlikte karışım özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde Hamburg Tekerlek İzi Deneyi için yoğurmalı sıkıştırıcı kullanılarak optimum bitüm oranlarında katkılı ve katkısız numuneler üretilmiştir. Tekerlek izi deneyleri sonucu en yüksek tekerlek izi deformasyonları orijinal katkısız numunelerde, en düşük tekerlek izi deformasyonları ise %0,80 Pr Plast S katkılı numunelerde görülmüştür. Pr Plast S katkı maddesinin tekerlek izi oluşumuna karşı direnci arttırdığını belirtmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Katkılı ve Katkısız Bitüm Numunelerinin Ortalama Tekerlek İzi Derinlikleri (mm)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, atık Polipropilen (PP) ve atık Metil Metakrilat (MMA) polimerlerinin çeşitli kimyasal işlemlerden geçirilmesiyle sentezlenmiş olan kopolimerin bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, ilk olarak saf bitümün özellikleri belirlenmiş ve kopolimer sentezi yapılmış, ayrıca karışım tasarımı için agreganın fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra saf bitüme ağırlıkça %3, 4, 5 ve 6 oranlarında kopolimer eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite gibi geleneksel testlerle, reolojik özellikleri dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve giriş eğme reometresi (BBR) deneyleri ile, kimyasal karakterizasyonu ise taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve floresan kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri ile belirlenmiştir. Kopolimerin BSK'ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla saf ve modifiye bitümler kullanılarak, Marshall dizayn yöntemi ile karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler 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 Bağlayıcının Seçilmesi

Çalışmada Elazığ Karayolları 82. Şube Müdürlüğü asfalt şantiyesinden temin edilmiş olan saf B100/150 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bitüme ait fiziksel özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Saf B 100/150 bitümün fiziksel özellikleri

Özellikler	Standart	B 100/150	
		Limit	Sonuç
Penetrasyon (0,1mm)	TS EN 1426	100-150	122,6
Yumuşama Noktası (°C)	TS EN 1427	39-47	42,45
Düktilite (cm)	ASTM D113	min.100	>100
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	min.230	273
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0 - 1,1	1,012
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	maks.0,8	0,38
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	-	-1,002

4.2 Kopolimer Sentezi

Çalışmada, polimer sentezinde yüksek oranda atık polipropilen (PP) kullanılmıştır. Atık PP, Pistonsan Plastik A.Ş.'den temin edilmiştir. PP'ler gri renkte olup, atık taşıma kasalarının sulu kırma aletiyle öğütülüp 10 No'lu elekten (2 mm) elenmesi ve bu malzemenin ekstrüderden geçirilmesiyle geri kazanılmıştır. Atık PP'e ait fiziksel özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Atık PP'in Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Atık PP
Erime Akış Hızı (g/10d)	4.0 - 6.0
Kirlilik (100 g)	8 (maks.)
Balık Gözü (ad/g)	8 (maks.)
Gerilme Dayanımı (kg/cm ²)	365
Kopma Noktası (kg/cm ²)	440
Renk	Gri
Form	Granül

Kopolimer sentez işlemlerinde düşük oranlarda kullanılan maleik anhidrit (MAH) hammaddesi Sinerji Laboratuvar ve Ürünleri Tic. San. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Bu malzemeye ait fiziksel özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Atık MAH'in Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değerler
Erime Noktası, °C	52,8
Kaynama Noktası, °C	202
Yoğunluk (g/cm ³)	1,48
Görünüm	Kristal
Renk	Beyaz

Çalışmada, graft kopolimer sentezi yapabilmek amacıyla atık bir malzeme olan ve öğütülerek küçük parçacıklar haline getirilmiş olan, ayrıca ticari yaygın bir malzeme olan polimetilmetakrilat (PMMA) temin edilmiştir. PMMA'ya ait fiziksel özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4: Atık PMMA'nın Fiziksel Özellikleri

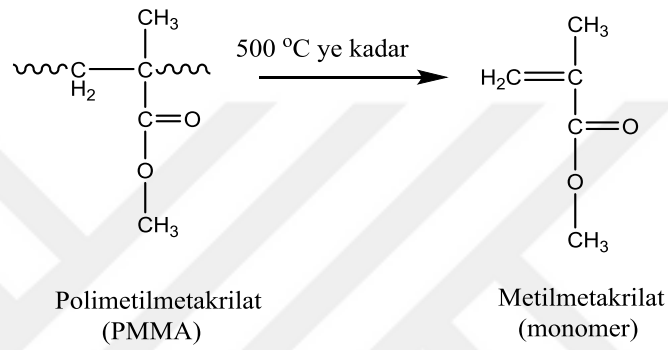
Fiziksel Özellikler	Değerler
Sertlik Değeri, Knoop	17-21
Çekme Dayanımı, Mpa	58
Elastiklik Modülü, Mpa	2300
Özgül Ağırlığı, g/ml	1,21
Renk	Saydam

Polimetilmetakrilat (PMMA)'dan metilmetakrilat (MMA)'ya dönüşümün termal degradasyonu Şekil 4.1'de programlanabilir fırın ile yapılmıştır.

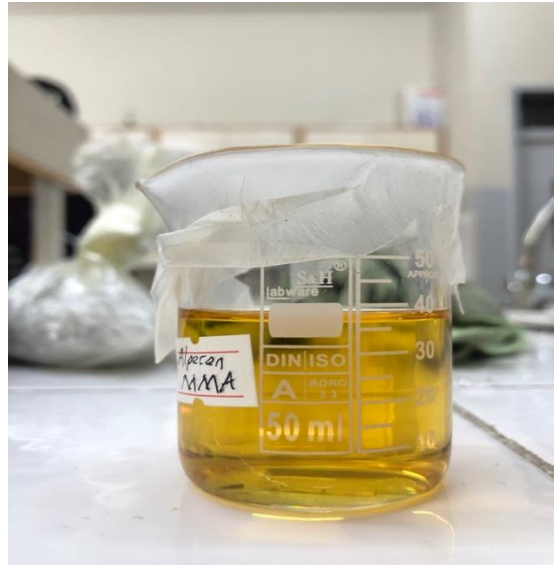


Şekil 4.1: MMA Monomeri Hazırlamak İçin Kurulan Deney Düzeneği

Bu amaçla, ilk olarak fırın içerisine konulan cam balona 100 gram PMMA koyuldu ve 10 °C/dk ısıtma hızıyla 500 °C ye kadar vakum altında ısıtılarak degradasyon ürünü -196 °C toplandı. Termal bozunma sıcaklığı 226 °C de başlayan ve 500 °C ye kadar ısıtılan PMMA depolimerizasyona uğrayarak, buradan yaklaşık %98 oranda metilmetakrilat (MMA) monomerinin oluştuğu, FT-IR ve 1H-NMR spektrumlarıyla karakterize edildi. Yapısı aydınlatılan MMA monomeri ekonomik değer taşıdığından, bitüm modifikasyonunda kullanılabilmesi amacıyla polipropilenin graflaştırılmasında kullanıldı. PMMA'nın degradasyon mekanizması Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Elde edilen MMA monomeri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

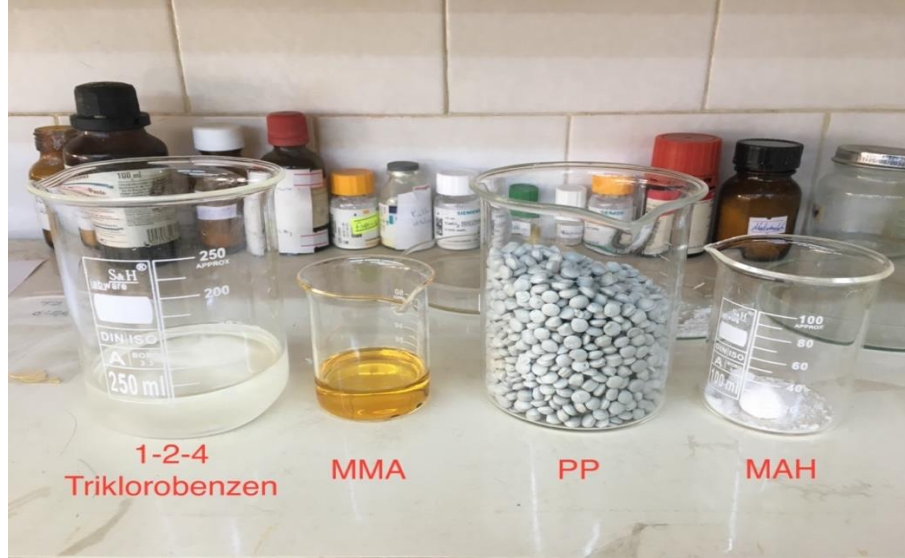


Şekil 4.2: Atık Polimetilmetakrilat (PMMA)'ın 500 °C'ye Kadar Isıtıldığında Metil Metakrilat (MMA) Monomerine Dönüşüm Reaksiyonu



Şekil 4.3: MMA Monomeri

Polipropilenin graflaştırılması (Polipropilen-g-(metilmetakrilat-ko-maleik anhidrit)) aşamasında ise, ilk olarak atık hale gelen polipropilenden 3.0 mol, maleik anhidritten 0.0275 mol ve metilmetakrilat monomerinden 0.01 mol tartıldı. Şekil 4.4'te kopolimer sentezi için uygun oranlarda alınmış deney bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Polipropilen-graft- (MMA-co-MA) Bileşenleri

Kapalı bir kaptaki 170-180 °C'de argon inert gaz akışında, 1,2,4-triklorobenzen (polipropilen için iyi çözücüdür) çözücüsü ve başlatıcı olarak da 2,2'-azobisisobutyronitril kullanılarak graft kopolimerizasyon gerçekleştirildi. Reaksiyonun tamamlanması üzerine çözelti biraz soğutulduktan sonra etil alkole yavaş yavaş aktarılarak çöktürüldü. Çökelti süzülme işlemi tamamlandıktan sonra önce oda sıcaklığında, sonra 40 °C'de vakum altında kurutuldu. Şekil 4.5'te deney sonrasında elde edilen kopolimerin çöktürme, süzülme ve kurutulma işlemleri gösterilmiştir.

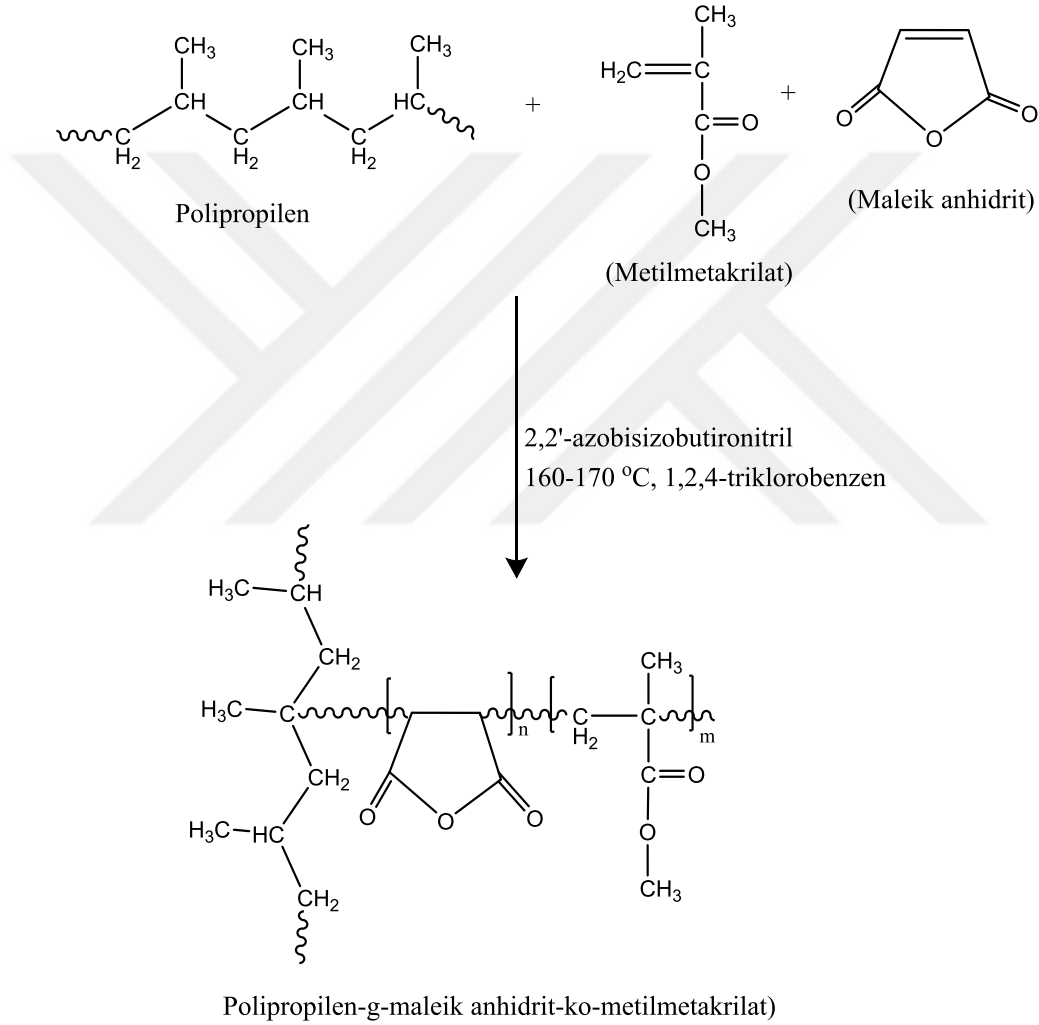


Şekil 4.5: Hazırlanan Graft Kopolimerin Çöktürme – Süzülme ve Kurutulması

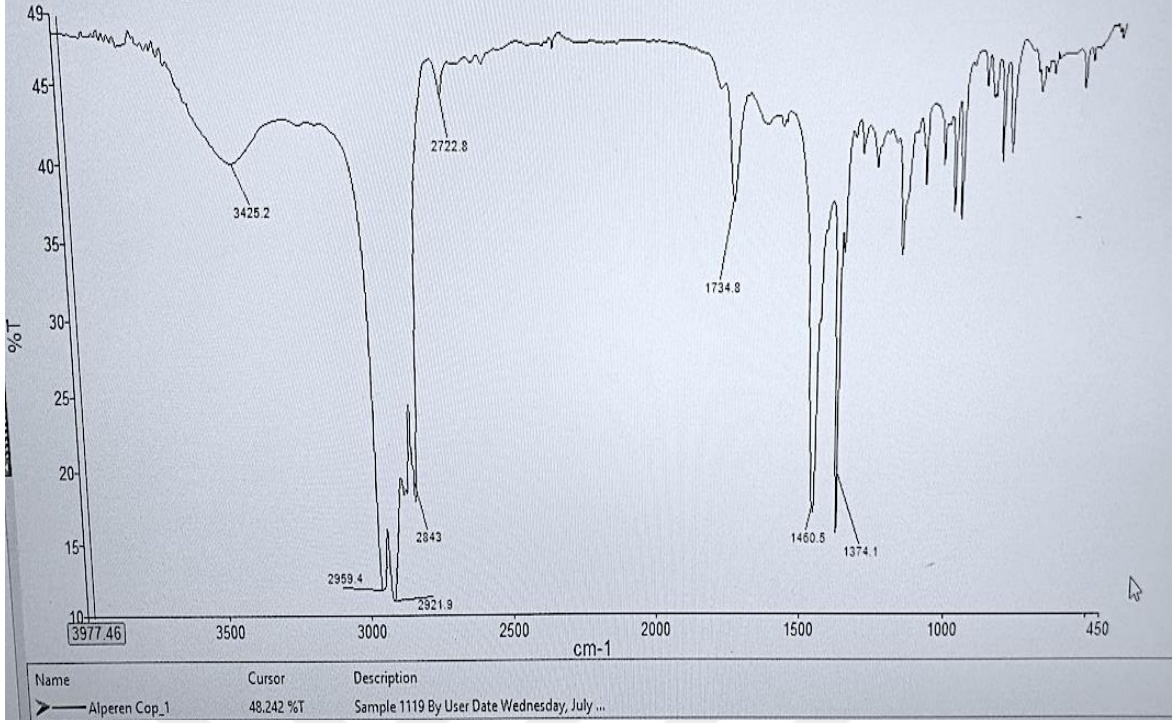
Çalışmada, bitüm modifikasyonunda kullanılmak üzere sentezlenen kopolimerin fiziksel özellikleri Çizelge 4.5'te, kimyasal yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir. Graft kopolimer yapısı FTIR ile karakterize edilmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir. Ayrıca FTIR'da elde edilen kopolimer bantları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5: Polipropilen-g- (MMA-co-MA)'nın Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değerler
Erime Noktası, °C	160
Yoğunluk (g/cm ³)	0,897
Form	Toz
Yapısı	Elastik
Renk	Gri



Şekil 4.6: Polipropilen-g- (maleikanhidrit-ko-metilmetakrilat)'ın Sentezi



Şekil 4.7: Polipropilen-g- (MMA-co-MA)'in FT-IR Spektrumu

Çizelge 4.6: Polipropilen-g- (MMA-co-MA)'in FT-IR Bandları

Dalga sayısı (cm ⁻¹)	Band türü
2959, 2922, 2875 ve 2843	CH ₃ -, -CH ₂ - ve CH- gruplarına ilişkin C-H gerilmeleri (propilen ana zincirindeki)
1460	PP'deki CH ₂ eğilmesi
1374	PP'deki CH ₃ (C-H) eğilmesi
1167	(CH ve CH ₃ -) yapıdaki C-H eğilme (sallanma) titreşimleri
1735	MMA birimindeki ester C=O bandı
1782	MA'deki asimetrik C=O gerilmesi

Elde edilen kopolimerin bağ yapısı FT-IR spekturumu ile incelendiğinde, yapısında bulunan PP'nin dalga sayısı 1374 cm⁻¹ iken CH₃ (C-H) eğilmesi, dalga sayısı 1167 cm⁻¹ iken ise (CH ve CH₃-) yapıdaki C-H eğilme (sallanma) titreşimleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Dalga sayısı 1735 cm⁻¹ olduğunda MMA birimindeki ester C=O (karbonil) bandı, 1782 cm⁻¹ olduğunda ise MA'deki asimetrik C=O (karbonil) gerilmesi gözlemlenmektedir.

4.3 Agreganın Seçilmesi

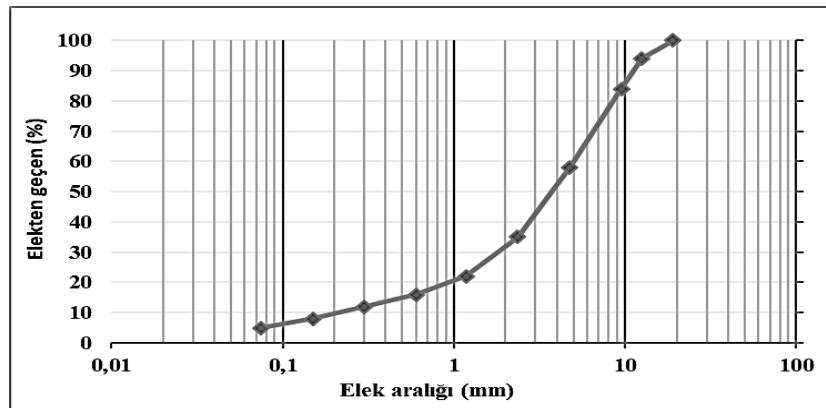
Çalışmada Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 4.7'de, agrega gradasyonu Çizelge 4.8'de, gradasyon eğrisi ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7: Seçilen Agreganın Fiziksel Özellikleri

Deney	Standart	Limit	Sonuç
Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,70
Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 127	-	2,67
Kaba agrega su emme yüzdesi		maks. 2	0,47
İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)		-	2,75
İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM C 128	-	2,63
İnce agrega su emme yüzdesi		maks. 2	1,66
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm ³)	ASTM D 854	-	2,85
Aşınma Kaybı (Los Angeles) (%)	ASTM C131	maks. 30	27
Donma Kaybı (MgSO ₄) (%)	ASTM C88	maks. 10	5
Yassı ve uzun parçalar (%)	ASTM D4791	maks. 10	5

Çizelge 4.8: Agrega Gradasyonu

Elek	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075	Filler
Boyutu(mm)	3/4	1/2	3/8	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200	-
Geçen (%)	100	94	84	58	35	22	16	12	8	5	0



Şekil 4.8: Agrega Gradasyon Eğrisi

4.4 Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada, modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf B 100/150 bitüm 160 °C'de yaklaşık 40 dakika kadar bekletilerek akışkan hale getirilmiştir. Daha sonra, bitüme ağırlıkça %3, 4, 5 ve 6 oranlarında kopolimer katkısı eklenerek aynı sıcaklıkta 500 devirde 120 dakika boyunca karıştırma işlemi yapılmıştır. Tüm modifiye bitümler aynı işlem sırasında hazırlanmıştır. Çalışmada saf ve modifiye bitümler aşağıdaki gibi kodlandırılmıştır.

B 100/150 = B

B 100/150 +%3 ko PP = B+%3koP

B 100/150 +%4 ko PP = B+%4koP

B 100/150 +%5 ko PP = B+%5koP

B 100/150 +%6 ko PP = B+%6koP

Modifikasyon işlemi için kullanılan karıştırma cihazı ve kopolimerin bitüme eklenmesi Şekil 4.9'da verilmiştir.



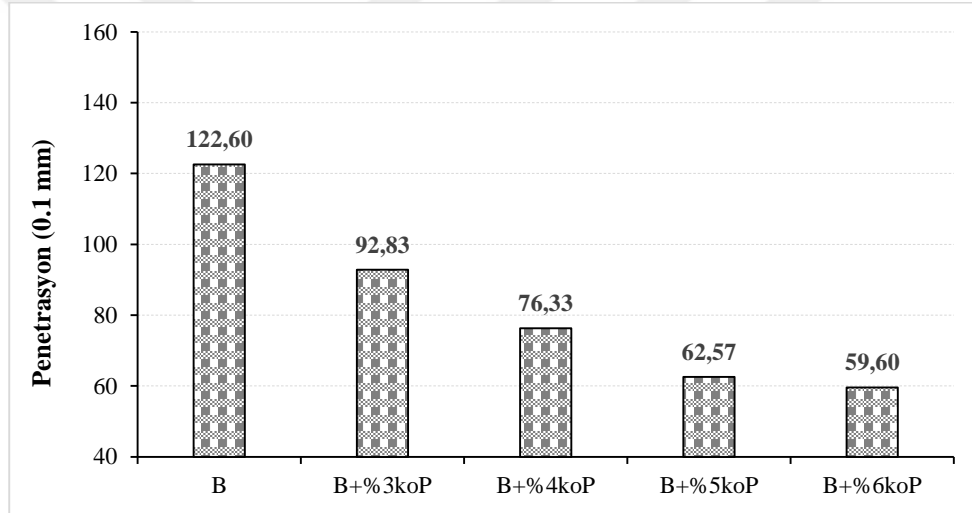
Şekil 4.9: Karıştırma Cihazı ve Kopolimerin Bitüme Eklenmesi

4.5 Modifiye Bitümlerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin bir ölçüsü olan penetrasyon indeksi değerleri de hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9’da, bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.9: Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Özellikleri

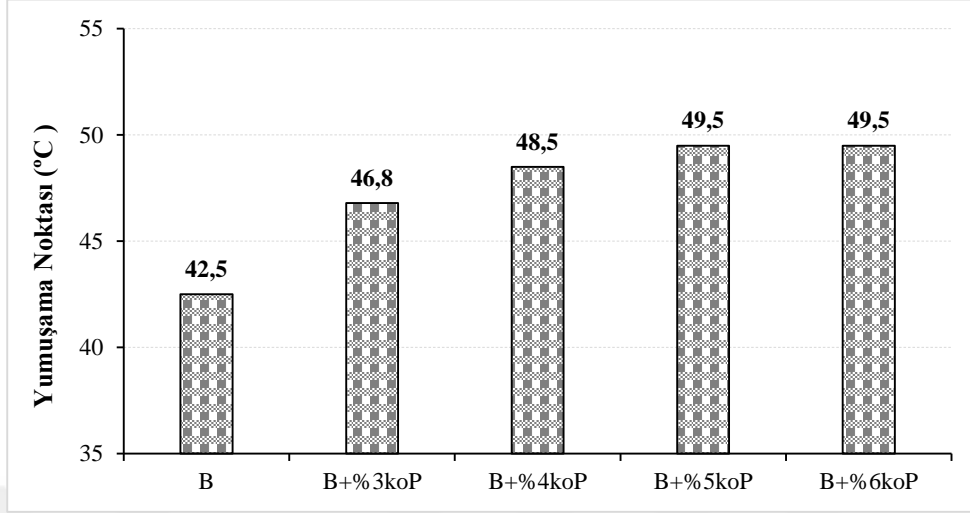
Deneyler	Bağlayıcı Türü				
	B	B+%3koP	B+%4koP	B+%5koP	B+%6koP
Penetrasyon	122,6	92,83	76,33	62,57	59,6
Yumuşama Noktası	42,5	46,8	48,5	49,5	49,5



Şekil 4.10: Bağlayıcıların Penetrasyon Değerlerindeki Değişimler

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi, kopolimer katkı miktarının artışı ile bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf bitüme kıyasla sırasıyla %24,3; %37,7; %49 ve %51,4 azalma şeklindedir. Bu sonuçlara göre, kopolimer ilavesi ile modifiye bitümlerin giderek sertleşmeye başladığını söylemek mümkündür. Ayrıca, penetrasyon değerindeki azalma sonucunda saf bitümde B 100/150 olan bağlayıcı sınıfı, %3koP ve %4koP katkılı bitümlerde B 70/100 sınıfı, %5koP ve %6koP katkı oranında ise bağlayıcı sınıfı B 50/70 sınıfı olarak değişmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, kopolimer ilavesiyle bağlayıcıların sertleşme eğiliminin arttığı ve bitümden kaynaklı kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca katkı miktarına bağlı olarak bitüm sınıfının değişim göstermesinde %5koP oranının kritik bir seviye olduğu da görülmektedir.

Bağlayıcıların katkı oranı artışıyla yumuşama noktası değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değerlerindeki Değişimler

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, kopolimer katkı oranının artışıyla bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler, saf bitüme kıyasla sırasıyla %10,2; %14,1; %16,6 ve %16,6 artış şeklindedir. En yüksek yumuşama noktası değeri %6koP katkıli bağlayıcıdan elde edilmiştir. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının penetrasyon sonuçları ile uyumluluk gösterdiğini de ifade etmek mümkündür. Bu sonuçlara göre, düşük penetrasyon ve yüksek yumuşama noktası değerine sahip olan %5koP ve %6koP katkıli bağlayıcıların sıcak bölgelerde kullanılabileceği ifade edilebilir.

Çalışmada ayrıca bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak kabul edilen penetrasyon indeksi değerleri formül (4.1) ve (4.2) yardımıyla hesaplanmıştır (Geçkil, 2019)

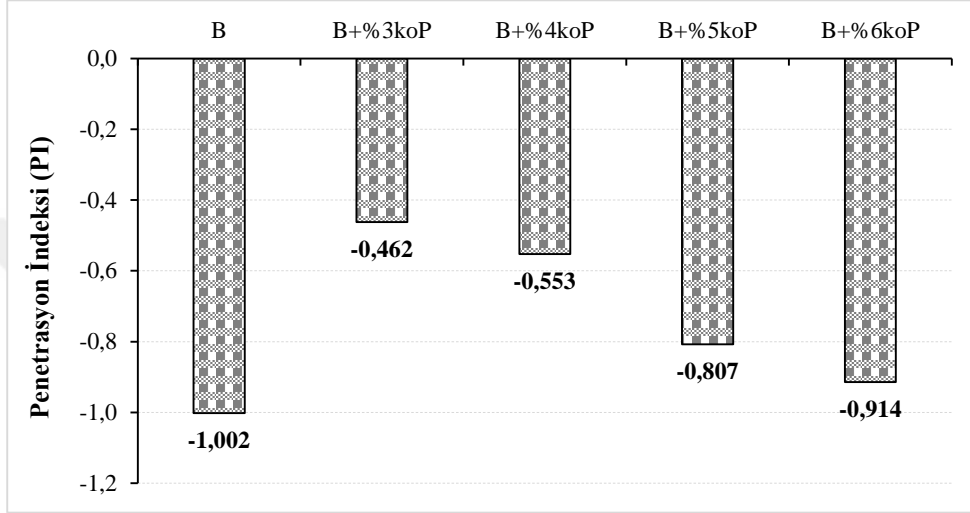
$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (4.1)$$

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

Formülde yer alan P_{25} , bitümün 25°C sıcaklık anındaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise 25°C sıcaklık anındaki yumuşama noktası değerini göstermektedir. PI değeri -2’den küçük olursa bitüm ısıya karşı çok duyarlı, +2’den büyük olursa ısıya karşı az duyarlı davranış gösterir. (Geçkil, 2019). Bağlayıcıların PI değerleri Çizelge 4.10’da, katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.10: Bağlayıcıların PI değerleri

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B	-1,002
B+%3koP	-0,462
B+%4koP	-0,553
B+%5koP	-0,807
B+%6koP	-0,914



Şekil 4.12: PI Değerinin Katkı Oranına Göre Değişimi

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.12 incelendiğinde, katkı oranının artışıyla modifiye bağlayıcıların PI değerlerinde saf bitüme kıyasla artışlar meydana gelmiştir. PI değerlerindeki bu artışlar, bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, sıcaklık hassasiyeti en az olan %3koP katkılı bağlayıcı olduğu görülmektedir.

4.6 Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Kısa Süreli Yaşlandırılması

Çalışmada, saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların bünyelerindeki uçucu madde kaybını tespit etmek amacıyla, bağlayıcılar dönel ince film halinde ısıtma kaybı (RTFOT) deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra RTFOT ile yaşlandırılan bağlayıcılara penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır.

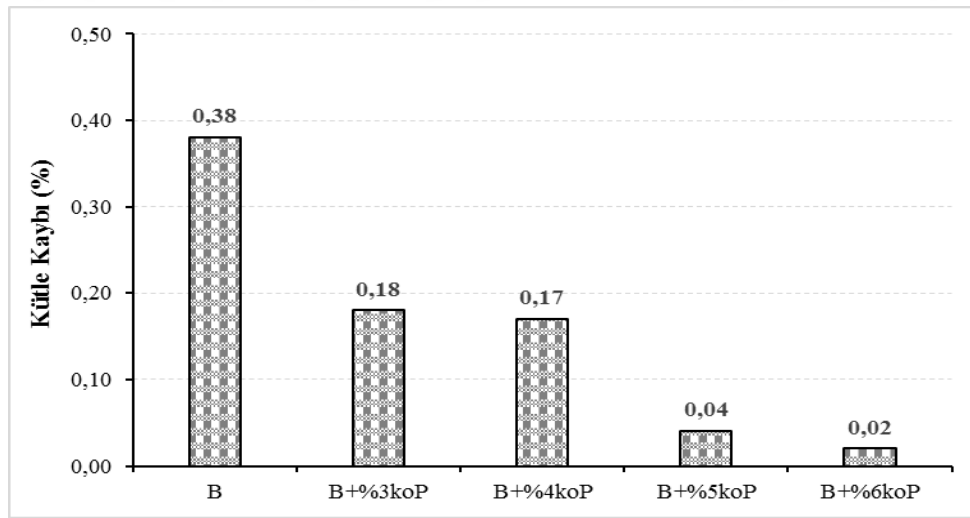
Bu amaçla, ilk olarak tüm bağlayıcılar 150 °C sıcaklıkta ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Daha sonra deneye özgü olan 8 tane şişe içerisine yaklaşık 35±0,5 gr. bitüm doldurulmuş ve bu şişeler 163 °C sıcaklığa ayarlanmış olan RTFOT deney cihazının içindeki dönel tablaya yerleştirilmiştir. Deneyde tabla 15 dev/dk hızında dönecek şekilde ayarlanmış ve deney süresi 75 dakika olarak tutulmuştur. Deney tamamlanınca kütle kayıplarının hesabı için,

önceden darası alınmış ve tartılmış olan 2 şişe, yaşlandırma işleminden sonra tartılarak kütle kayıpları hesaplanmıştır. Geriye kalan 6 şişe ise diğer performans deneylerinde kullanılmak üzere başka kaplara alınarak saklanmıştır.

Saf ve modifiye bağlayıcılara ait kütle kayıp miktarları Çizelge 4.11’de, bağlayıcılara ait kütle kayıp miktarlarındaki değişim ise Şekil 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.11: Saf ve Modifiye Bağlayıcılara Ait Kütle Kayıpları

Bağlayıcı Türü	Şartname Sınırı	No	Şişe Dara (gr)	M1 (İlk ağırlık)	M2 (Son ağırlık)	Kütle Kaybı	Ortalama %
B		1	165,98	200,96	199,97	0,493	0,38
		2	154,88	189,90	189,38	0,274	
B+%3koP		1	151,88	186,91	186,68	0,123	0,18
		2	153,40	188,42	187,98	0,234	
B+%4koP	maks. 0.8	1	153,42	188,38	187,92	0,244	0,17
		2	151,90	186,86	186,66	0,107	
B+%5koP		1	165,75	200,73	200,7	0,015	0,04
		2	151,90	186,91	186,8	0,059	
B+%6koP		1	165,83	200,83	200,8	0,015	0,02
		2	151,97	186,98	186,94	0,021	



Şekil 4.13: RTFOT ile Yaşlanan Bağlayıcıların Kütle Kayıp Oranları

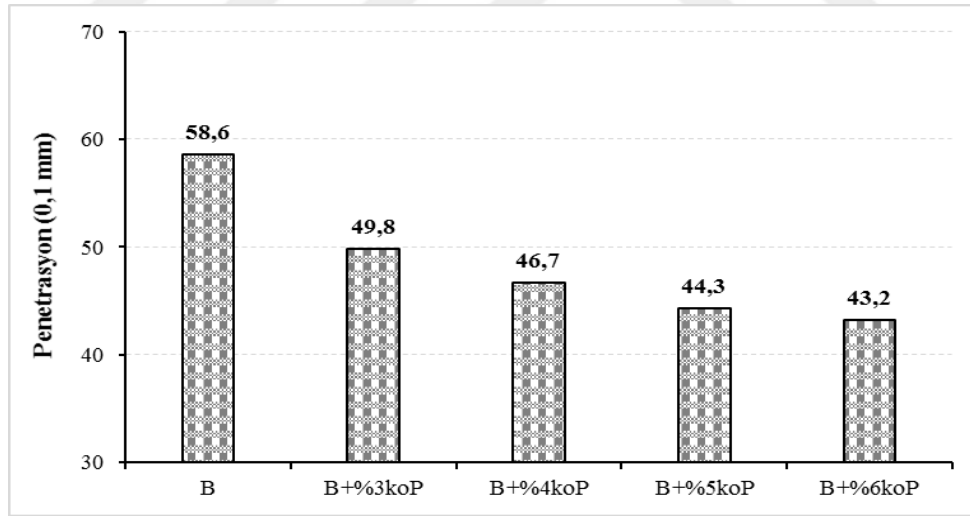
Çizelge 4.11 ve Şekil 4.13 incelendiğinde, saf B 100/150 penetrasyon sınıfı bitüme kopolimer eklenmesiyle bağlayıcıların kütle kaybında değişimler meydana gelmiştir. Katkı oranı artışıyla modifiye bağlayıcıların kütle kayıpları azalmış ve en düşük kütle kaybı %6koP bağlayıcısında elde edilmiştir. KTS’ye göre kütle kaybı maks. 0,8 istenmektedir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, bağlayıcıların kütle kayıplarının şartnamenin oldukça altında kaldığı ve dolayısıyla kopolimer katkısıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve oksidasyona karşı oldukça direnç gösterdikleri söylenebilir.

Çalışmada ayrıca bağlayıcılar, RTFOT sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.12’de, bağlayıcıların katkı oranı ile penetrasyon değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.14’te, yumuşama noktası değerlerinde meydana gelen değişimler ise Şekil 4.15’te verilmiştir.

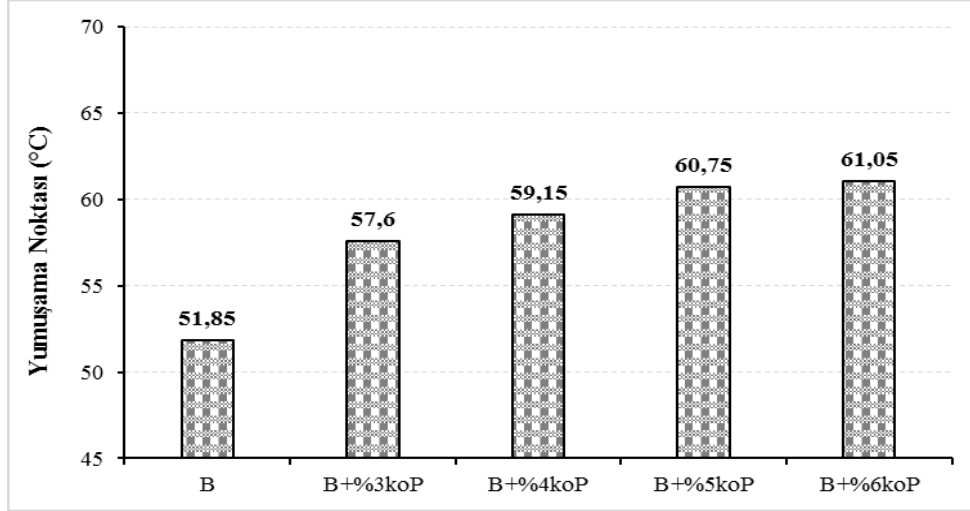
Çizelge 4.12: RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Geleneksel Deney Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon	Yumuşama Noktası
B	58,6	51,85
B+%3koP	49,8	57,6
B+%4koP	46,7	59,15
B+%5koP	44,3	60,75
B+%6koP	43,2	61,05



Şekil 4.14: RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Penetrasyon Değerleri

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.14’de görüldüğü gibi, RTFOT sonrası saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde, büyük oranda azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca saf bitüme kıyasla kopolimer katkılı bağlayıcıların, yaşlanma sonrası daha fazla sertleştiği de görülmektedir. Bu durum, kopolimer katkılı kaplamaların saf bitüm ile yapılmış olan kaplamalara kıyasla, kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olabileceğini göstermektedir.



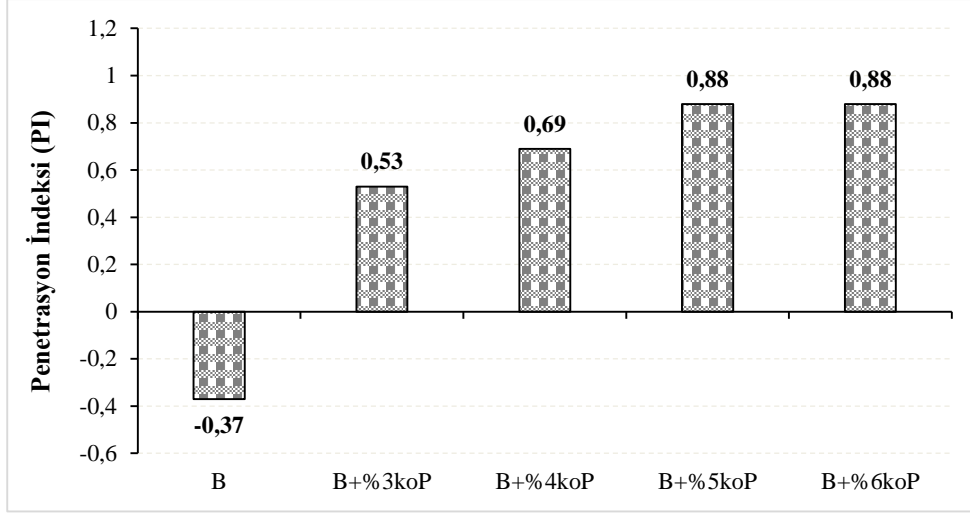
Şekil 4.15: RTFOT Sonrası Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değerleri

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri, saf bitüme kıyasla artış göstermiştir. Ayrıca saf bitüme kıyasla, kopolimer katkıli bağlayıcıların, yaşlanma sonrasında daha fazla sertleştiği ve dolayısıyla penetrasyon değerleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, kopolimer katkıli kaplamaların saf bitüm ile yapılmış olan kaplamalara kıyasla, tekerlek izi oluşumlarına karşı dirençli olabileceğini göstermektedir.

Çalışmada ayrıca RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 4.13’de, PI değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.13: RTFOT ile Yaşlandırılan Bağlayıcıların PI Değerleri

Bağlayıcı Türü	PI
B	-0,37
B+%3koP	0,53
B+%4koP	0,69
B+%5koP	0,88
B+%6koP	0,88



Şekil 4.16: RTFOT Sonrası Bağlayıcıların PI Değerleri

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.16 incelendiğinde, kopolimer katkısıyla bağlayıcıların saf bitüme kıyasla PI değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumda, kopolimer katkılı bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin azaldığı ve en az sıcaklık hassasiyetinin %5koP ve %6koP katkılı bağlayıcılara ait olduğunu söylemek mümkündür.

4.7 Saf ve Modifiye Bağlayıcıların Performans Deneyleri

Çalışmada, saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklıklardaki performans özelliklerini belirlemek amacıyla bağlayıcılar Superpave bağlayıcı şartnamesine göre dönel viskozimetre (RV) , dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneylerine tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların plentte karıştırma ve yolda sıkıştırma esnasındaki sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla yaşlandırılmamış (orijinal) bağlayıcılar RV deneyine tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncini belirlemek amacıyla orijinal ve RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar, orta sıcaklıklardaki yorulma direncini tespit etmek amacıyla PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde DSR deneyi uygulanmıştır. Bağlayıcıların düşük sıcaklıklarda termal çatlamalara karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla saf ve kopolimer katkılı bağlayıcılar BBR deneyine tabi tutulmuştur.

4.7.1 Dönel viskozimetre (RV) deneyi

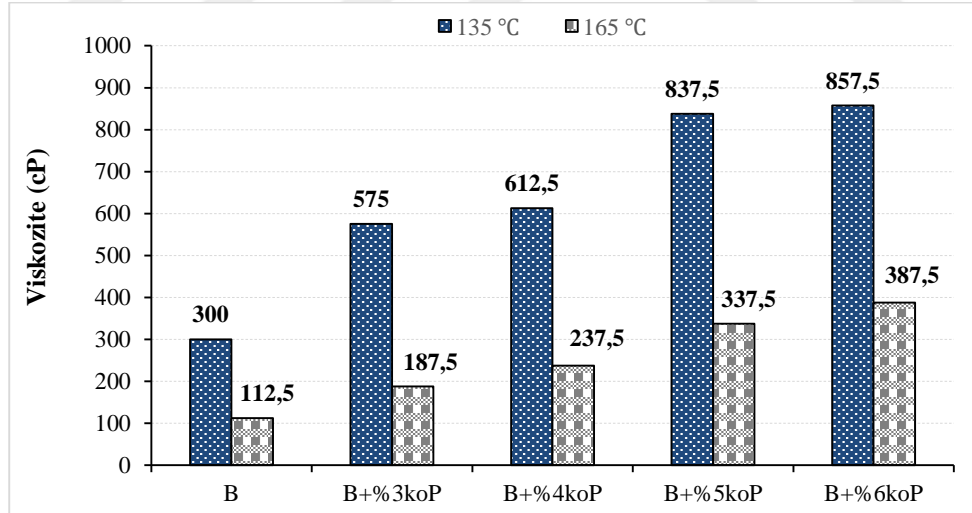
Saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek için, bağlayıcılar RV deneyine tabi tutuldu. Çalışmada Brookfield Viskozimetre Cihazı kullanılarak AASHTO TP48 standardına göre RV deneyi

gerçekleştirildi. Deneyde, saf ve kopolimer katkılı bitümler 135 °C ve 165 °C sıcaklıkta RV deneyine tabii tutuldu. Bağlayıcılar, bu amaçla ilk olarak 150 °C de ısıtıldı ve yaklaşık 11 gr. kadar viskozite kabına doldurularak kap deney cihazına yerleştirildi. Belirlenen deney sıcaklığına gelen viskozimetre cihazı sıfırlandı ve 20 rpm. hızına ayarlı cihaza no:27 mili takılarak deney başlatıldı. Deney sırasında sabit sıcaklığa gelen bağlayıcıların viskozite değerleri cihaz tarafından otomatik olarak elde edildi.

Bağlayıcıların deney sonucunda elde edilen RV sonuçları Çizelge 4.14’te verilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14: Bağlayıcıların RV Deneyi Sonuçları

Özellik	Bağlayıcı Türü				
	B	B+%3koP	B+%4koP	B+%5koP	B+%6koP
Viskozite (cP, 135°C)	300	575	612,5	837,5	857,5
Viskozite (cP, 165°C)	112,5	187,5	237,5	337,5	387,5

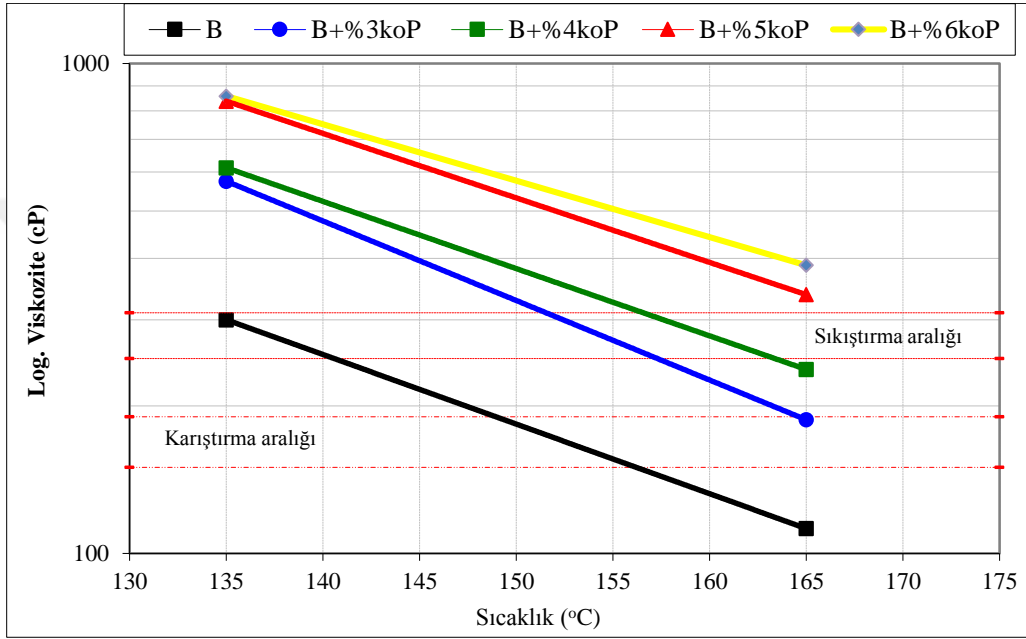


Şekil 4.17: Bağlayıcıların 135 ve 165 °C Sıcaklıktaki Viskoziteleri

Çizelge 4.14 ve Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, kopolimer katkı oranı artışıyla bağlayıcıların 135°C ve 165°C sıcaklıkta viskozite değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler 135°C sıcaklıkta saf bitüme kıyasla sırasıyla %91,6; %104,2; %179,2 ve %185,8; 165°C sıcaklıkta ise %66,7; %111; %200 ve %244,4 artış şeklindedir. Elde edilen bu

sonuçlara göre, kopolimer katkıli bağlayıcıların işlenebilirlik özelliğinin saf bitüme kıyasla azaldığı ifade edilebilir.

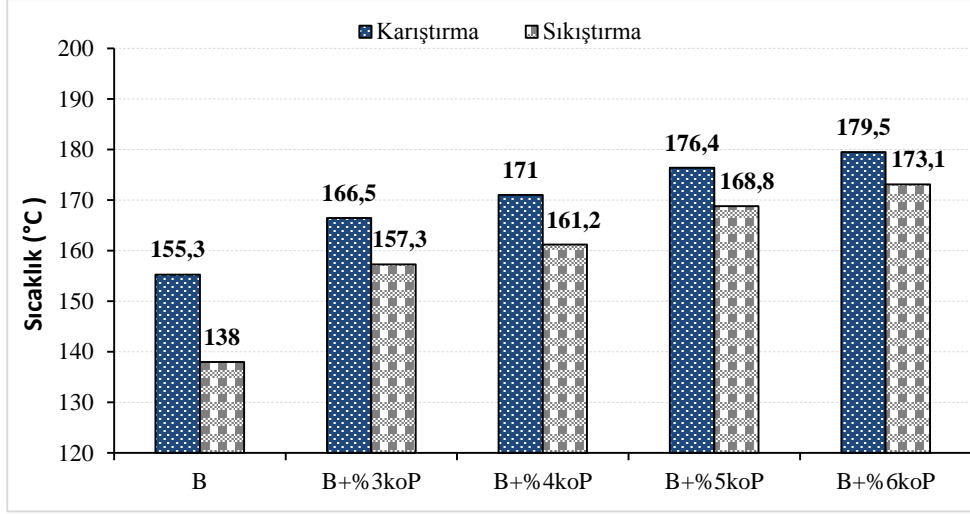
Saf ve kopolimer katkıli bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi için elde edilen viskozite-sıcaklık grafikleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Viskozite-sıcaklık grafiği vasıtasıyla elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 4.15’te, bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.18: Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi

Çizelge 4.15: Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Değerleri

Özellik	Bağlayıcı Türü				
	B	B+%3koP	B+%4koP	B+%5koP	B+%6koP
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	155,3	166,5	171	176,4	179,5
Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	138	157,3	161,2	168,8	173,1



Şekil 4.19: Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıkları

Şekil 4.19 incelendiğinde, saf B 100/150 penetrasyon sınıfı bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 155,3 °C ve 138 °C olarak belirlenmiştir. Saf bitüme artan oranlarda kopolimer eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıklarında saf bitüme göre sırasıyla %7,2; %10,1; %13,6 ve %16,6 artış meydana gelmiştir. Modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklıklarında ise saf bitüme göre sırasıyla %14; %16,8; %22,3 ve %25,4 artış meydana gelmiştir. Elde edilen tüm bu sonuçlara göre, saf bitüme kopolimer eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin kıvamının sertleşmesiyle birlikte, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı ve bu sebeple kopolimer katkılı bağlayıcıların saf bitüme kıyasla plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma esnasında daha fazla enerji harcanabileceği söylenebilir.

4.7.2 Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi

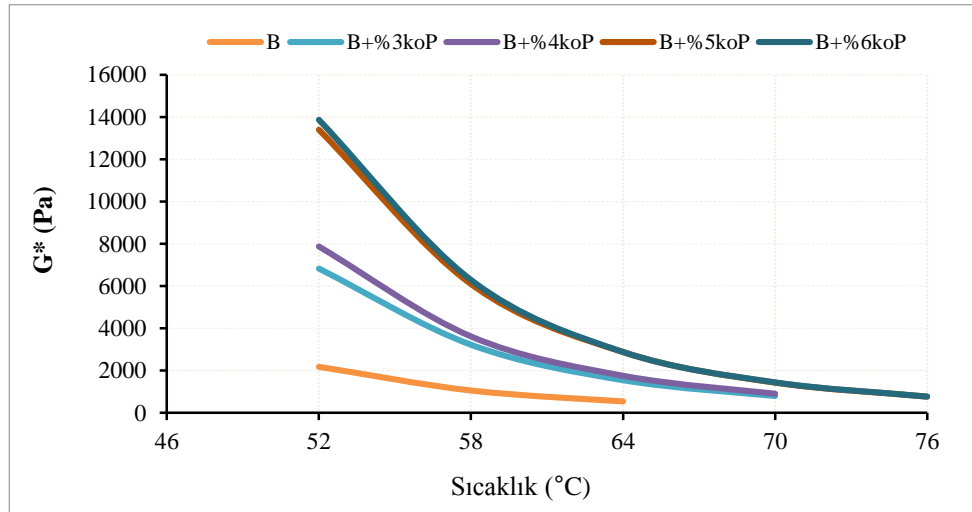
Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi direnci ve orta sıcaklıklardaki yorulma çatlaklarına karşı göstereceği direnç DSR deneyi ile belirlenmiştir.

Bu çalışmada, yaşlandırılmamış (orijinal), RTFOT ile yaşlandırılmış ve PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde DSR deneyi uygulanmıştır. DSR deneyi, Bohlin DSR II cihazı kullanılarak AASHTO TP5 standardına göre yapılmıştır. Deney, orijinal bağlayıcılar üzerinde 52 °C, 58 °C, 64 °C, 70 °C ve 76 °C sıcaklıklarda, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde 58 °C, 64 °C ve 70 °C sıcaklıklarda, PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde ise 19°C, 22°C, 25°C, 28°C ve 31°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırılmamış saf ve özgün kopolimer katkılı bitümlere uygulanan DSR deneyi ile elde

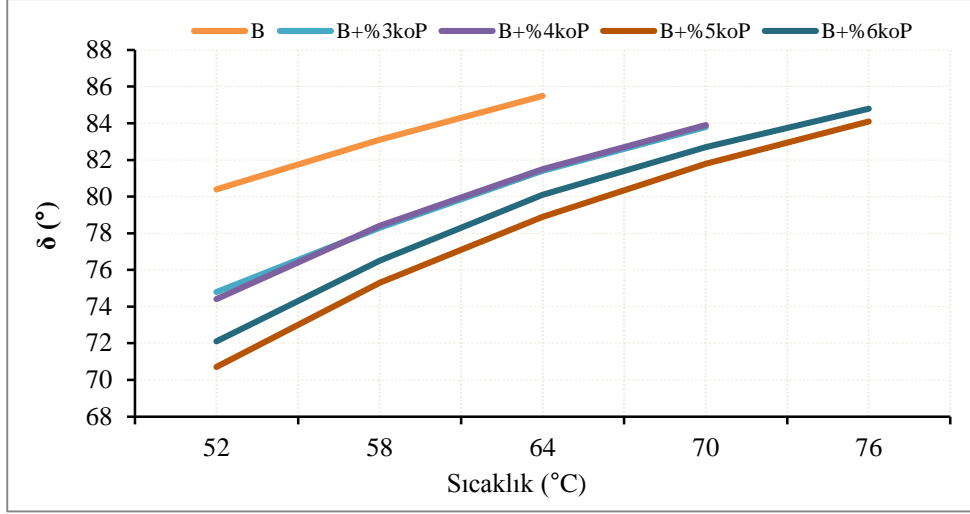
edilen sonuçlar Çizelge 4.16’da, bitümlerin kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri sırayla Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.16: Yaşlandırılmamış Bitümlere Ait DSR Deney Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin \delta$ (Pa)	Şartname limiti	Performans sınıfı
B	52	2172,3	80,4	2203,09	≥ 1000	PG 58-Y
	58	1058,6	83,1	1066,32		
	64	547,4	85,5	551,79		
B+%3koP	52	6829,7	74,8	7077,62		PG 64-Y
	58	3225,5	78,3	3293,34		
	64	1546,7	81,4	1564,37		
	70	800,8	83,8	805,54		
B+%4koP	52	7877,9	74,4	8179,2		PG 64-Y
	58	3614,6	78,4	3690,1		
	64	1749	81,5	1768,42		
	70	898,33	83,9	903,48		
B+%5koP	52	13403	70,7	14204,6		PG 70-Y
	58	6098,3	75,3	6304,95		
	64	2876,9	78,9	2931,85		
	70	1430,5	81,8	1445,13		
	76	770,26	84,1	774,42		
B+%6koP	52	13871	72,1	14580,7	PG 70-Y	
	58	6292,1	76,5	6470,08		
	64	2884,5	80,1	2928,55		
	70	1443,7	82,7	1455,37		
	76	769,8	84,8	773,04		



Şekil 4.20: Yaşlandırılmamış Bitümlerin G^* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi



Şekil 4.21: Yaşlandırılmamış Bitümlerin δ° Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

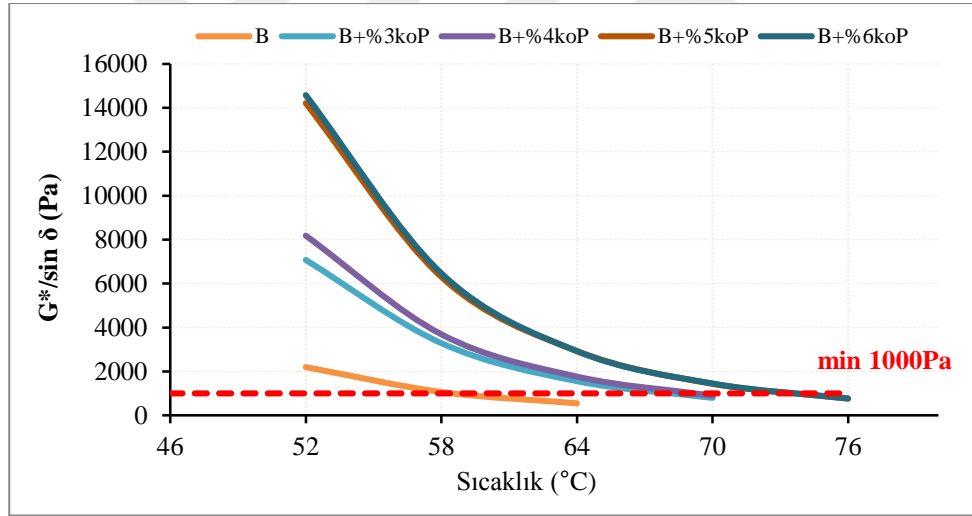
Çizelge 4.16 ve Şekil 4.20’de bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla tüm bağlayıcıların G^* değerlerinin azaldığı görülmektedir. G^* , bağlayıcının tekrarlı kayma gerilmeleri altında deformasyonlara karşı gösterdiği toplam direncin ölçüsüdür. Bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklığın artışıyla azalması, deformasyonlara karşı göstereceği direncin azaldığını göstermektedir. Ancak, aynı sıcaklıktaki G^* değerleri dikkate alındığında kopolimer ilavesiyle bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı dirençlerinde çok önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. Örneğin, saf bağlayıcının 52 °C sıcaklıktaki G^* değeri 2172,3 Pa iken kopolimer artışı ile bu değer sırasıyla 6829.7, 7877.9, 13403 ve 13871 Pa seviyelerine ulaşmıştır. Bu artış saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla 3.14, 3.63, 6.16 ve 6.38 kat şeklinde meydana gelmiştir. Benzer şekilde 58 °C sıcaklıktaki değerler sırasıyla 1058.6, 3225.5, 3614.6, 6098.3, 6292,1 ve 3.04, 3.41, 5.76, 5.94 kat; 64 °C sıcaklıktaki değerler ise 547.4, 1546.7, 1749, 1430.5, 1443.7 ve 2.83, 3.2, 2.61, 2.64 kat şeklinde oluşmuştur. Ancak 70°C ve üstü sıcaklıklarda %3 ve %4 katkılı bitümler ile %5 ve %6 katkılı bitümlerin G^* değerleri kendi aralarında birbirlerine yakın elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %5 kopolimer katkısının kayma gerilmeleri bakımından kritik bir değer olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16 ve Şekil 4.21 incelendiğinde, sıcaklık artışıyla saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların faz açısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. δ° değerinin artan sıcaklıkla birlikte artış göstermesi, bağlayıcının viskozluğunun arttığını ve yüksek sıcaklıklardaki yükleme etkisiyle daha fazla deformasyon yapacağını ifade etmektedir. Ancak aynı sıcaklıklardaki δ° değerleri incelendiğinde kopolimer artışıyla modifiye bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla çok daha elastik bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Örneğin, saf

bağlayıcının 58 °C sıcaklıktaki faz açısı değeri 83,1 iken polimer ilavesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların faz açıları sırasıyla 78.3,78.4,75.3 ve 76.5 değerlerine düşmüştür. Bu sonuca göre, kopolimer ilavesi ile bağlayıcıların oldukça elastik kıvama geldiği gözlemlenmektedir. Bununla birlikte %3 ve %4 kopolimer katkılı bağlayıcıların δ° değerleri incelendiğinde benzer elastik davranış sergiledikleri görülmektedir. Ayrıca %5 katkılı bağlayıcının %6 katkılı bağlayıcıdan daha düşük δ° değerine sahip olması, bu katkı oranının kritik bir değer olduğunu göstermektedir.

Bağlayıcıların G^* ve δ° değerleri birlikte değerlendirildiğinde katkı artışı ile G^* değerlerinin arttığı, δ° değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Yüksek G^* ve düşük δ° değerleri kopolimer katkısı ile bağlayıcı sertliğinin artmasına rağmen elastik bir katı gibi davranış gösterdiğini ifade etmektedir.

Yaşlandırılmamış saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



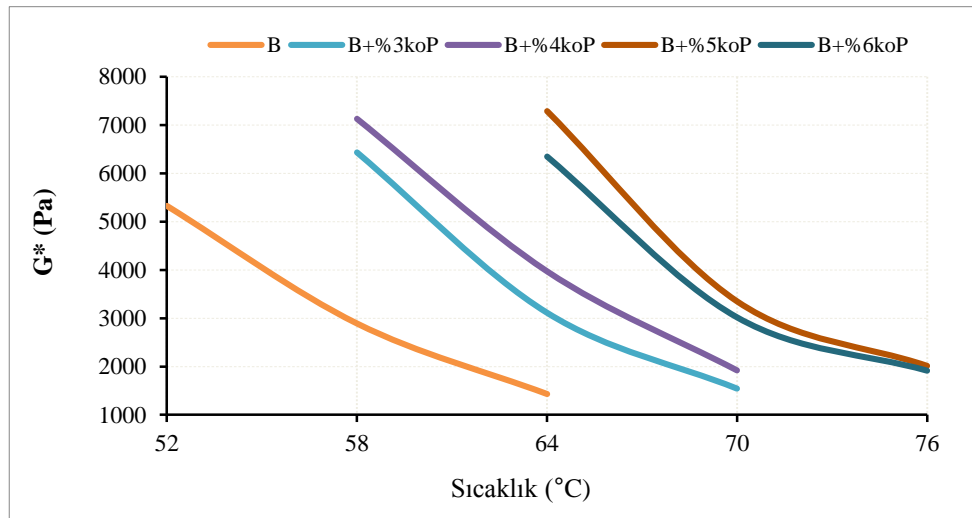
Şekil 4.22: Yaşlandırılmamış Bitümlerin $G^*/\sin \delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.22 incelendiğinde yaşlandırılmamış saf ve katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri olan $G^*/\sin \delta$ limit değerini (min. 1000 Pa) sırasıyla 58.5, 68.5, 68.5, 74 ve 74 °C sıcaklıklarda sağladığı görülmektedir. Ancak Superpave sıcaklıkları göz önüne alındığında bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans sınıflarının sırasıyla 58, 64, 64, 70 ve 70 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre %3 ve %4 ile %5 ve %6 katkılı bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri bakımından özellikle yüksek sıcaklıklarda kendi aralarında benzerlik gösterdiği ve bu sebeple %5 katkı oranının kritik bir değer olduğu görülmektedir.

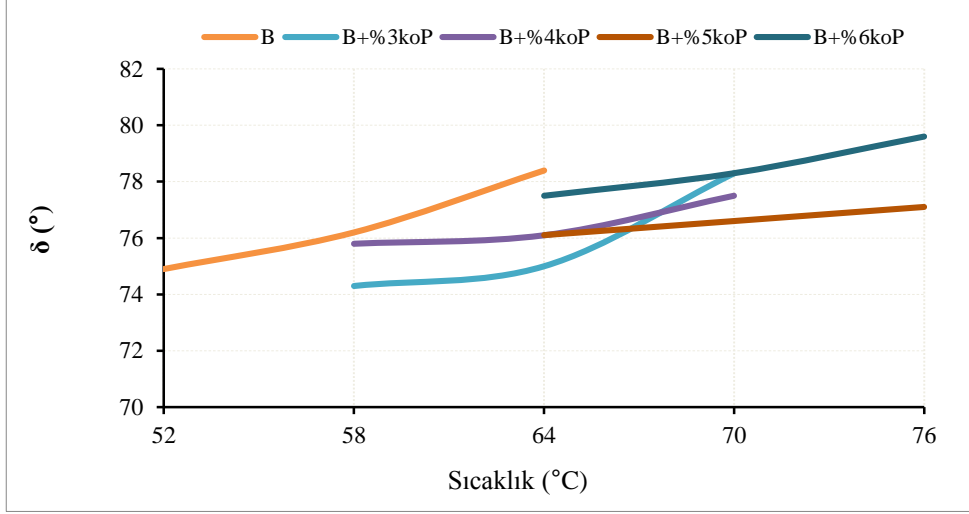
RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve kopolimer katkılı bağlayıcılar 58 °C, 64 °C, 70 °C ve 76°C sıcaklıkta DSR deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17’de, tüm bağlayıcıların G^* ve δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de verilmiştir.

Çizelge 4.17: RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlere Ait DSR Deney Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	Şartname limiti	Performans sınıfı
B	52	5325,8	74,9	5516,3		PG 58-Y
	58	2892,4	76,2	2978,5		
	64	1433,5	78,4	1463,3		
B+%3koP	58	6433,5	74,3	6682,8		PG 64-Y
	64	3116,1	75,0	3226,0		
	70	1545,8	78,3	1578,6		
B+%4koP	58	7125,3	75,8	7349,9	≥ 2200	PG 64-Y
	64	3972,1	76,1	4092,81		
	70	1923,4	77,5	190,1		
B+%5koP	64	7284,7	76,1	7504,5		PG 70-Y
	70	3347,6	76,6	3441,57		
	76	2013,4	77,1	2065,5		
B+%6koP	64	6344,2	77,5	6498,2		PG 70-Y
	70	3017,7	78,3	3077,61		
	76	1915,4	79,6	1947,3		



Şekil 4.23: RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin G^* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

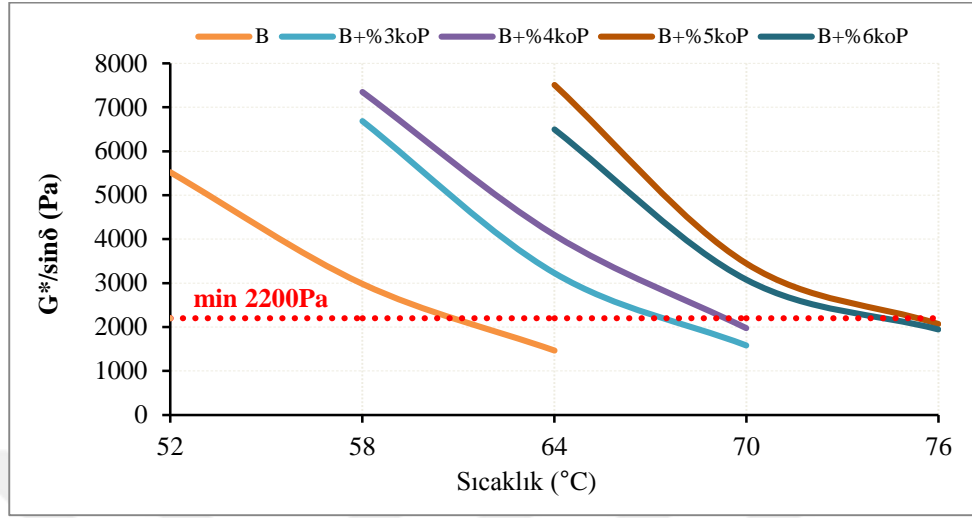


Şekil 4.24: RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin δ° Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların G^* değerleri sıcaklık arttıkça azalmaya başlamıştır. Ancak kopolimer katkı oranı arttıkça, aynı sıcaklıklarda modifiye bağlayıcılar için G^* değerleri artmaya başlamıştır. Örneğin, bağlayıcıların 64 °C sıcaklıklardaki G^* değerleri incelendiğinde, saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla 1.08, 1.37, 2.52, ve 2.19 katlık artışlar meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, kopolimer ilavesiyle bağlayıcıların kayma gerilmelerine karşı gösterdikleri direncin büyük ölçüde arttığını ifade etmektedir. Bununla birlikte, %6 katkılı bağlayıcıdaki artış miktarının %5 katkılı bağlayıcıdan daha düşük elde edilmiş olması, %5 oranının kritik bir değer olduğunu ve bu oranın üzerindeki katkının bitümle reaksiyon göstermediğini, dolayısıyla optimum bir değer olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.24 incelendiğinde RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların δ° değerlerinin sıcaklık artışı ile birlikte doğal olarak artış eğilimi gösterdikleri görülmektedir. Ancak bu artış eğilimlerinin %5 ve %6 katkılı bağlayıcılarında daha az meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuca göre katkı içeriği ile bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin düşmesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir. Katkı oranına bağlı olarak δ° değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde aynı sıcaklıklardaki faz açılarında değişkenlik olmakla birlikte genel olarak bir düşüşün yaşandığı gözlemlenmektedir. Şekilde, özellikle %5 katkılı bağlayıcının istikrarlı bir gidiş sergilediği ve faz açısının hemen hemen bütün sıcaklıklarda saf bitüme kıyasla düşük seviyede olduğu görülmektedir. Özellikle bu orandaki bağlayıcının %6 oranındaki bağlayıcıdan daha düşük seviyede bir faz açısına sahip olması, %5 oranının kritik bir oran olduğunu ve bu orandaki bağlayıcının oldukça elastik bir kıvama sahip olduğunu göstermektedir.

RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25: RTFOT ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $G^*/\sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

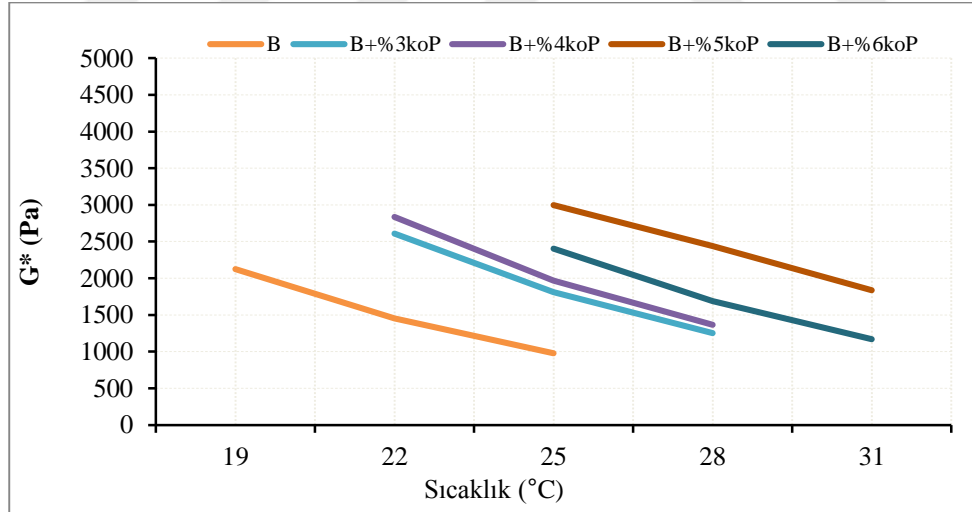
Şekil 4.25’de RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri olan $G^*/\sin\delta$ değerleri incelendiğinde, bağlayıcıların sınır şartını (min. 2200 Pa) sırasıyla yaklaşık 61, 67, 69, 75 ve 74 °C sıcaklıklara kadar sağladığı görülmektedir. Superpave şartname sıcaklıkları göz önüne alındığında bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarının sırasıyla 58, 64, 64, 70 ve 70 °C olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre kopolimer ilavesi ile bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi veya kalıcı deformasyon direncini önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Ancak bu artışlara rağmen %3 ve %4 ile %5 ve %6 katkı oranındaki bağlayıcıların hemen hemen aynı performansı gösterdikleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, %6 katkı oranındaki bağlayıcı performansının %5 katkı oranındaki bağlayıcı performansından daha düşük elde edilmiş olması, %5 katkı oranının optimum bir değer olduğunu ifade etmektedir.

Tekerlek izi parametresi yaşlandırılmamış ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansları birlikte değerlendirildiğinde, bağlayıcı sınıflarının sırasıyla PG 58-Y, PG 64-Y, PG 64-Y, PG 70-Y ve PG 70-Y olduğu tespit edilmiştir.

PAV ile yaşlandırılmış saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma dirençlerini belirlemek amacıyla 19 °C, 22 °C, 25 °C, 28 °C ve 31 °C sıcaklıklarda yapılan DSR deney sonuçları Çizelge 4.18’de, bağlayıcıların G^* ve δ değerlerinin sıcaklıkla değişimi ise Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’ de verilmiştir.

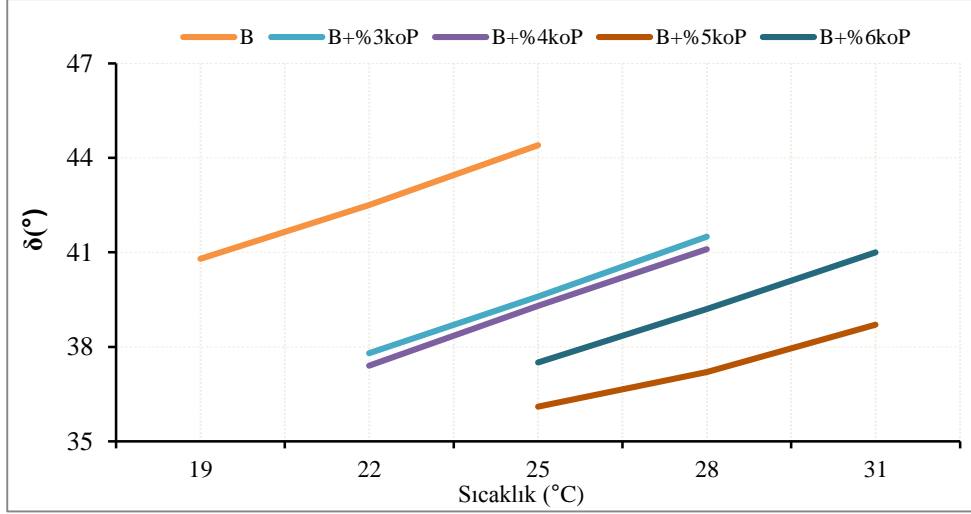
Çizelge 4.18: PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlere Ait DSR Deney Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G*. sin δ	Şartname Limiti
B	19	2123	40,8	1387,2	≤ 5000
	22	1455	42,5	982,9	
	25	977	44,4	683,5	
B+%3koP	22	2608	37,8	1598,4	
	25	1809	39,6	1153,1	
	28	1254	41,5	830,9	
B+%4koP	22	2838	37,4	1723,7	
	25	1968	39,3	1246,5	
	28	1364	41,1	896,7	
B+%5koP	25	2997	36,1	1765,8	
	28	2439	37,2	1474,6	
	31	1838	38,7	1149,2	
B+%6koP	25	2402	37,5	1462,2	
	28	1687	39,2	1066,2	
	31	1171	41	768,2	



Şekil 4.26: PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin G* Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

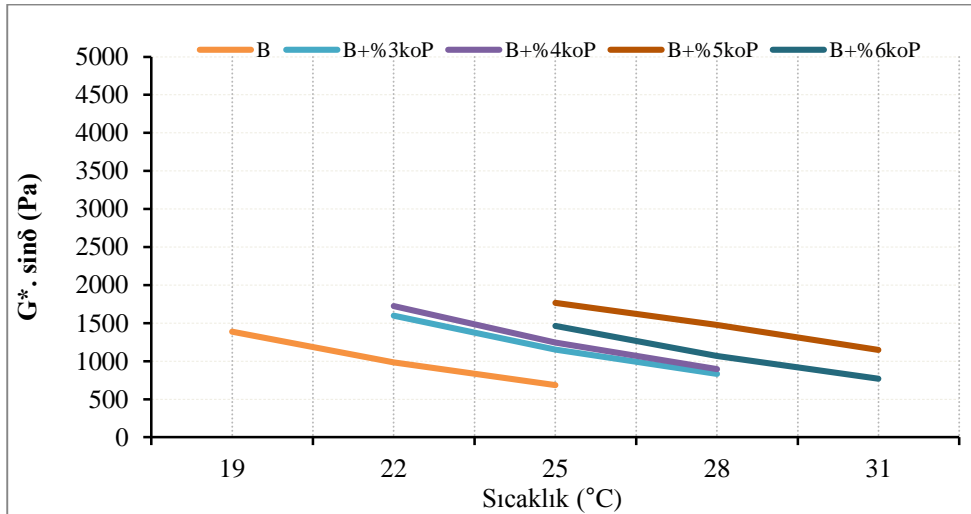
Şekil 4.26’da PAV ile yaşlandırılmış bağlayıcıların sıcaklık artışıyla birlikte G* değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, kopolimer katkı oranının artışıyla birlikte bağlayıcıların aynı sıcaklıklardaki G* değerleri kopolimer katkı artışı ile saf bitüme kıyasla artış göstermiştir. Bu durum, kopolimer katkılı bağlayıcıların saf bitüme göre kayma deformasyonu bakımından daha dirençli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.27: PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $\delta(^{\circ})$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.27 incelendiğinde, tüm bağlayıcıların δ değerlerinin, saf bitüme kıyasla azaldığı görülmektedir. Sıcaklık artışıyla, δ değerlerinin azalma göstermesi, bağlayıcıların viskoz davranışının azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla kopolimer katkısının, PAV kalıntısı bağlayıcıların G^* ve δ değerleri birlikte değerlendirildiğinde, %5 katkı oranından daha fazla kopolimer kullanılan bağlayıcının özellikleri üzerinde daha fazla bir değişime sebep olmadığı görülmektedir. Bunun sebebinin, %5 katkı miktarından fazla katkının bitüm ile reaksiyona girmemesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir.

PAV ile yaşlandırılmış kopolimer katkılı bağlayıcıların yorulma parametresi olan $G^* \cdot \sin\delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28: PAV ile Yaşlandırılmış Bitümlerin $G^* \cdot \sin\delta$ Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.28 incelendiğinde, tüm sıcaklıklarda bağlayıcıların yorulma parametresi değerlerinin şartname limiti olan maks. 5000 kPa altında kaldığı görülmektedir. Kopolimer katkı oranının

artışıyla birlikte bağlayıcıların yorulma parametresi değerlerinin artış göstermiş olması ancak maksimum değer sınırının altında kalması, kopolimer katkısının bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki sertliğini arttırarak, onların yorulma direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, kopolimer artışıyla bağlayıcıların sertliğinde artış meydana gelmesine rağmen elastikiyetini koruduklarını ve elastik bir katı gibi davrandıkları şeklinde yorumlanmaktadır.

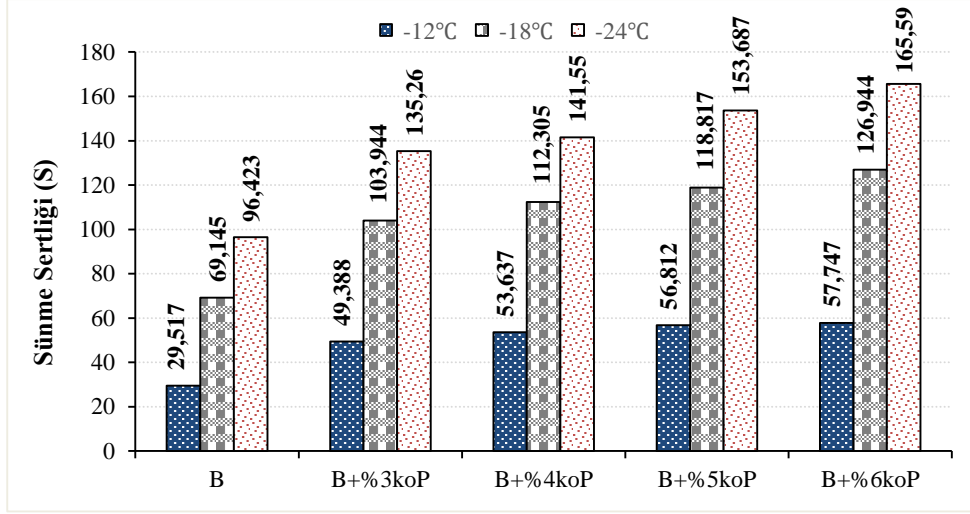
4.7.3 Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi

Bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklıklar altındaki rijit davranışları sebebiyle meydana gelen termal çatlaklara karşı gösterdiği direnç BBR deneyi ile tespit edilmektedir. Çalışmada, AASHTO T313 standardına göre bağlayıcılar üzerinde BBR deneyi uygulanmıştır. PAV deneyi ile yaşlandırılmış saf ve kopolimer katkılı bağlayıcılar, yaklaşık 150 °C sıcaklıkta ısıtılıp, alüminyum kaplara dolduruldu ve soğuması için bekletildi. Daha sonra numuneler alüminyum kalıplardan çıkarılarak deney cihazında önceden sıcaklığı ayarlanmış sıvıya bırakıldı. Bağlayıcılar -12°C, -18 °C ve 24 °C sıcaklıklarda koşullandırıldı. Son aşamada ise kiriş şeklindeki numuneler cihaz mesnetleri arasına yerleştirilerek deney başlatıldı ve 240 saniye süreyle kiriş numuneye 980±5mN (100±5gr) yük uygulandı. Deney bitiminde, bağlayıcıların sünme sertliği (S) değeri ve m-değeri cihaz yazılımı tarafından otomatik olarak belirlenmiş oldu.

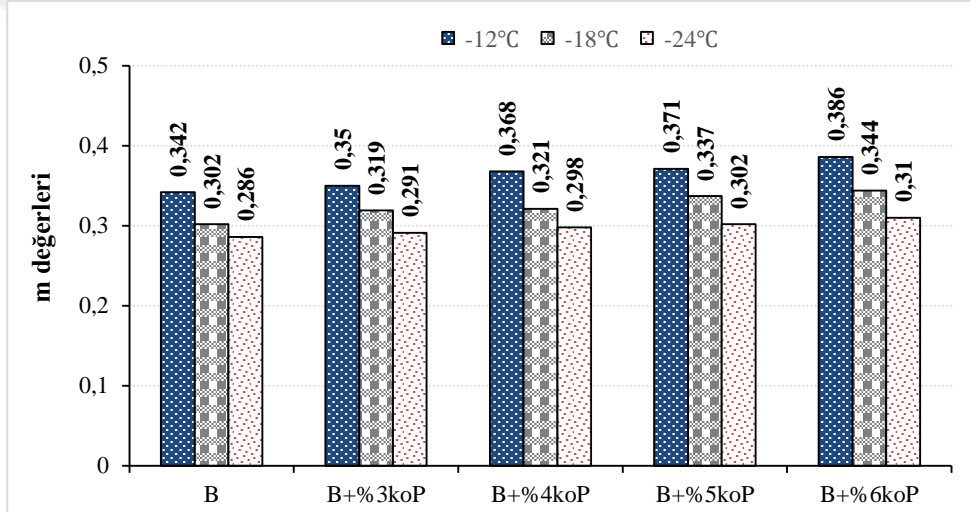
Saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların S değeri ve m-değeri sonuçları Çizelge 4.19'da, bu değerlerin katkı oranı ve sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir

Çizelge 4.19: Bağlayıcıların BBR Deneyi Sonuçları

Sıcaklık (°C)	B	B+%3koP	B+%4koP	B+%5koP	B+%6koP
-12	29,517	49,388	53,637	56,812	57,747
-18	69,145	103,944	112,305	118,817	126,944
-24	96,423	135,26	141,55	153,687	165,59
m-değer (Min 0.300)					
-12	0,342	0,350	0,368	0,371	0,386
-18	0,302	0,319	0,321	0,337	0,344
-24	0,286	0,291	0,298	0,302	0,310



Şekil 4.29: Bağlayıcıların Sünme Sertliği Değerleri



Şekil 4.30: Bağlayıcıların m-değerleri

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.29'a göre, kopolimer katkı oranının artışıyla bağlayıcıların sünme sertliği değerleri saf bağlayıcıya kıyasla önemli ölçüde artış göstermiştir. Superpave bağlayıcı şartnamesine göre bağlayıcının rijitlik değeri yani sünme sertliği değerinin maks. 300MPa olması istenmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, bağlayıcıların sıcaklık azalışıyla birlikte kıvamlarında meydana gelen sertleşmeye rağmen şartname limitlerini sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.30'da saf ve kopolimer katılı bağlayıcıların m-değer sonuçları incelendiğinde, sıcaklığın azalmasıyla m-değerlerinin doğal olarak azaldığı görülmektedir. Superpave şartnamesine göre bağlayıcıların m-değerlerinin min. 0,300 olması istenmektedir. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde saf ve kopolimer katılı bağlayıcıların düşük sıcaklık performans dereceleri sırasıyla PG X-18, PG X-18, PG X-18, PG X-24 ve PG X-24

olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, kopolimer ilavesiyle bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana gelmesine rağmen düşük sıcaklıklarda elastik özellik gösterdikleri veya elastik bir katı gibi davrandıkları ifade edilebilir.

Saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performansları birlikte değerlendirildiğinde, bağlayıcı performansı sınıflarının sırasıyla PG 58-18, PG 64-18, PG 64-18, PG 70-24 ve PG 70-24 olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, kopolimer katkısının bağlayıcıların hem yüksek hem de düşük sıcaklık performansı üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.

4.8 Saf ve Kopolimer Katkılı Bağlayıcıların Karakterizasyonu

Çalışmada, saf ve kopolimer katkılı bağlayıcıların kimyasal yapılarında meydana gelen değişimler SEM, XRD ve FTIR spektroskopisi analizleri ile belirlenmiştir. Bağlayıcıların faz yapılarında meydana gelen değişimler SEM, morfolojik yapılarındaki değişimler XRD, fonksiyonel gruplarında meydana gelen değişimler ise FTIR spektroskopisi ile belirlenmiştir.

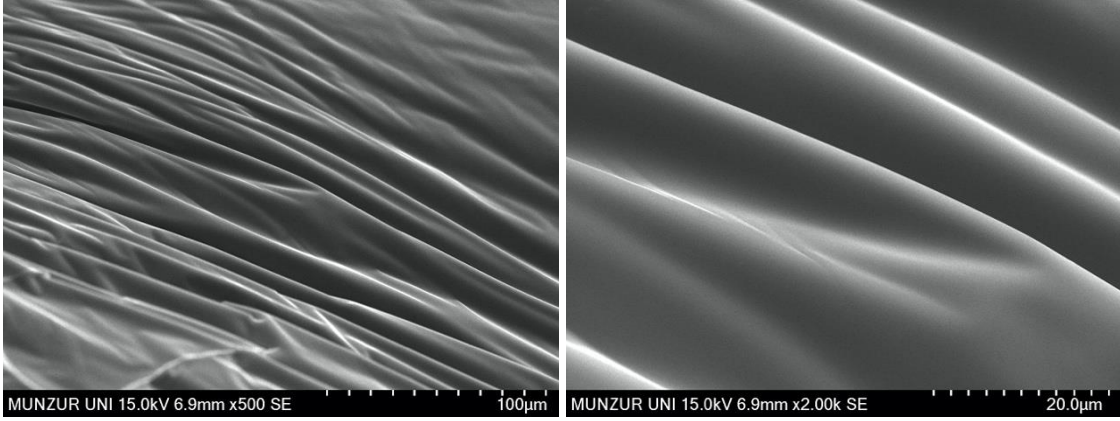
4.8.1 Saf ve katkılı bağlayıcıların SEM analizleri

Saf ve kopolimer modifiyeli bağlayıcıların mikro düzeyde yapısını incelemek, kopolimer katkısının bitüm içerisindeki dağılımını gözlemlemek, süreksiz ve sürekli faz yapısını belirleyebilmek için bağlayıcılar SEM analizine tabi tutulmuştur. SEM analizleri, Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Malzeme Karakterizasyonu Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. SEM analizi öncesinde bağlayıcılara ait yüzey görüntüsünün daha iyi anlaşılabilmesi için bağlayıcı yüzeyleri altın tozu ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi ve cihazına dair görüntüler Şekil 4.31'de verilmiştir.

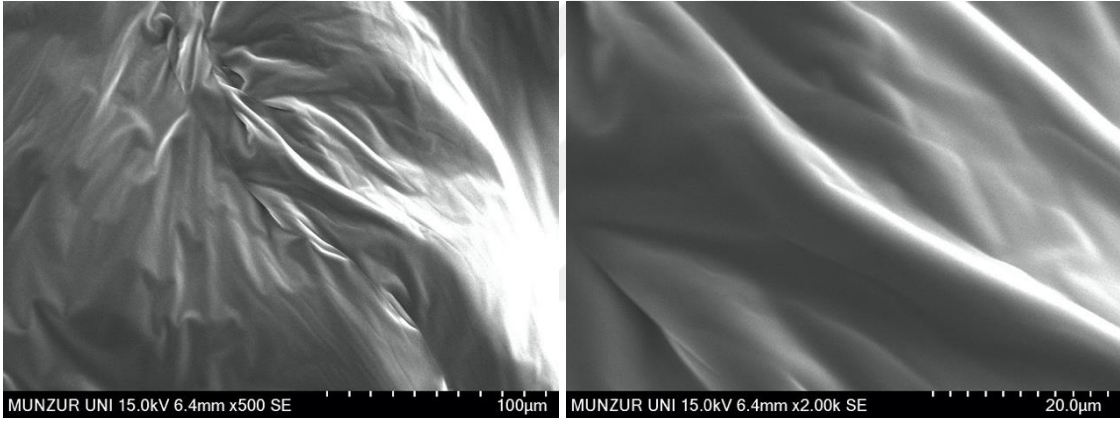


Şekil 4.31: Bağlayıcıların altın tozu ile kaplanması ve SEM cihazı

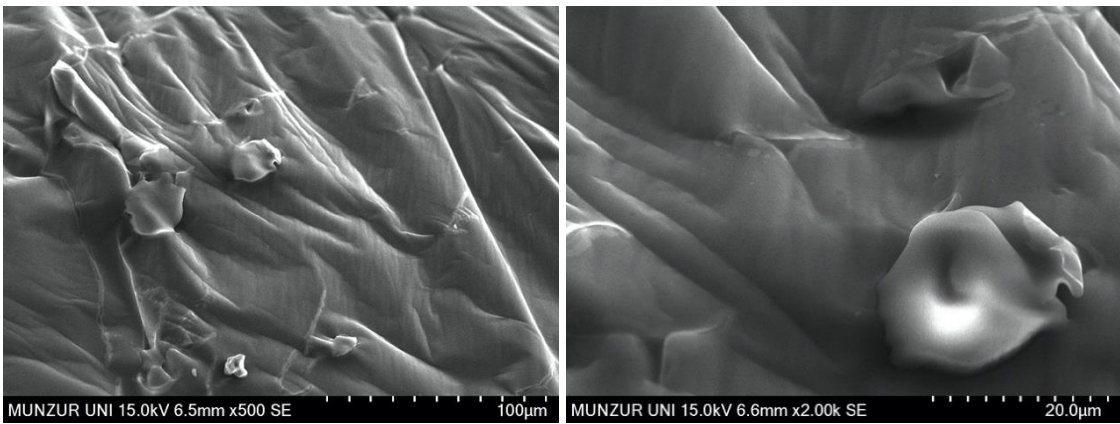
Daha sonra, yüzeyi altın tozu ile kaplanan numuneler SEM analizine tabi tutulmuş ve elde edilen görüntüler Şekil 4.32-4.36’da verilmiştir.



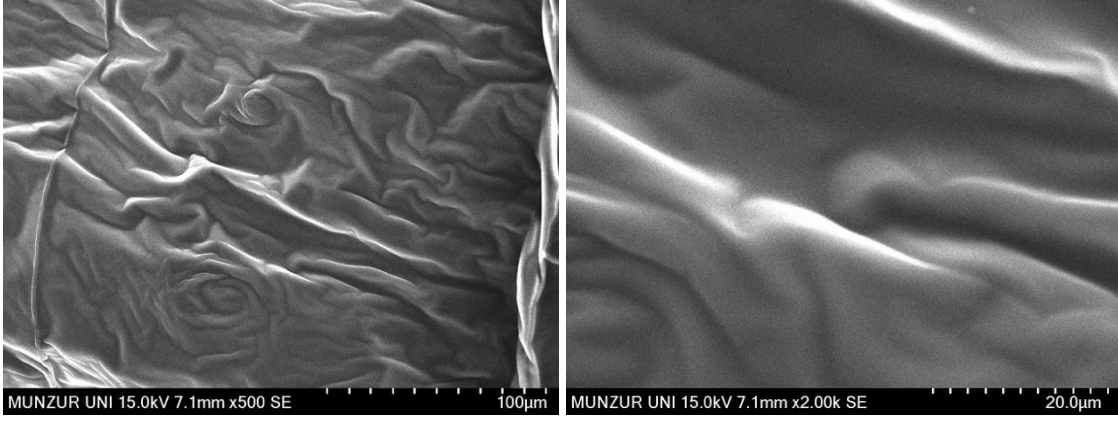
Şekil 4.32: Saf Bitüme Ait SEM Görüntüleri



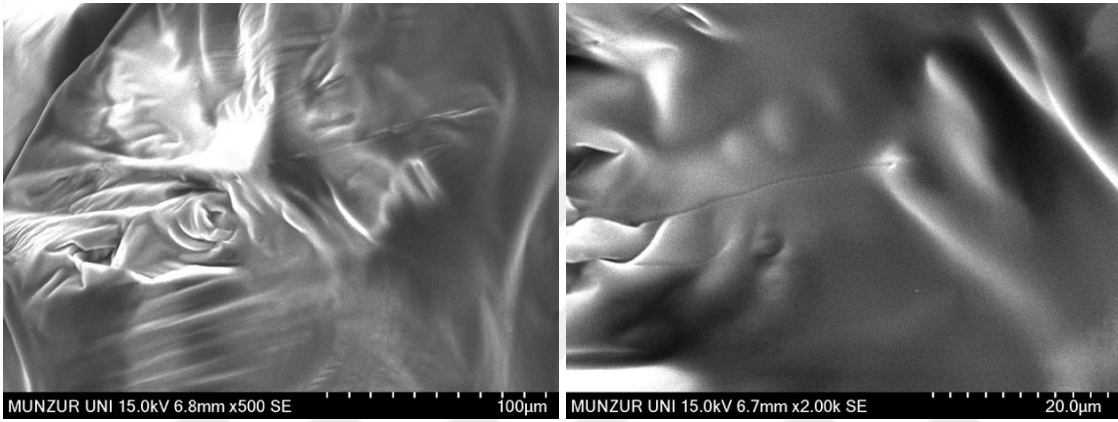
Şekil 4.33: B+%3koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri



Şekil 4.34: B+%4koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri



Şekil 4.35: B+%5koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri

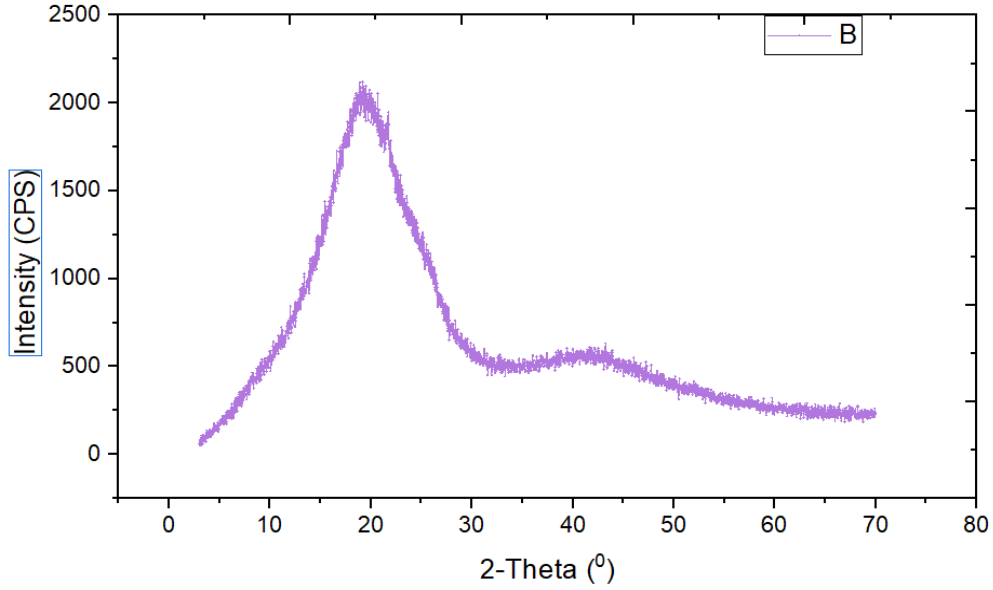


Şekil 4.36: B+%6koP Katkılı Bitüme Ait SEM Görüntüleri

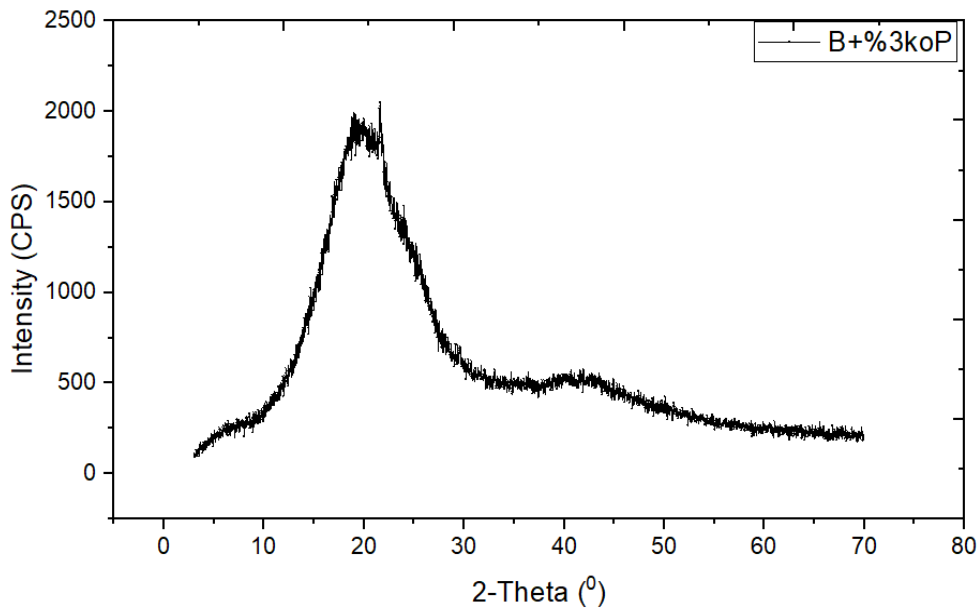
Sentezlenen saf ve özgün kopolimer katkıli bitümün mikro-morfolojik yapısının gözlemlenmesinde kullanılan SEM analiz yönteminden elde edilen görüntüler, bitüm-polimer uyumluluğunu ve yaşlanma sırasında meydana gelen hasarı belirleyebilmek açısından öneme sahiptir (Geçkil, 2019). Şekil 4.32’de verilen saf bitüme ait SEM görüntülerine göre malzemenin yüzey morfolojisinin oldukça homojen ve grafitik bir yapıda olduğu açıkça gözlenmektedir. Şekil 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36’da verilen SEM görüntüleri, sırasıyla B+%3koP, B+%4koP, B+%5koP ve B+%6koP katkıli bitüme aittir. Bu görüntüler incelendiğinde oda şartlarında meydana gelen soğuma esnasında, düzlemsel grafitik yapısı nedeniyle, numunelerde yapısal gerilmeler sonucunda büzölmeler meydana gelmiştir. Büzölmeler arasındaki düzensizlikler, yapıda kristalin bölgelerin varlığını ifade etmektedir. Daha belirgin şekildeki büzölmelerin varlığı, kopolimer-bitüm arasındaki etkileşimin gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Özellikle bu etkileşme sonucu grafitik yapının ortaya çıkması, kopolimerin bitüm içerisinde çözölerek homojen bir dağılım göstermesi ve büzölmelerin homojenliği, elde edilen bitümlü malzemelerin mekaniksel özellikleri üzerinde olumlu bir etki oluşturabileceğini göstermektedir.

4.8.2 Saf ve katkılı bağlayıcıların XRD analizleri

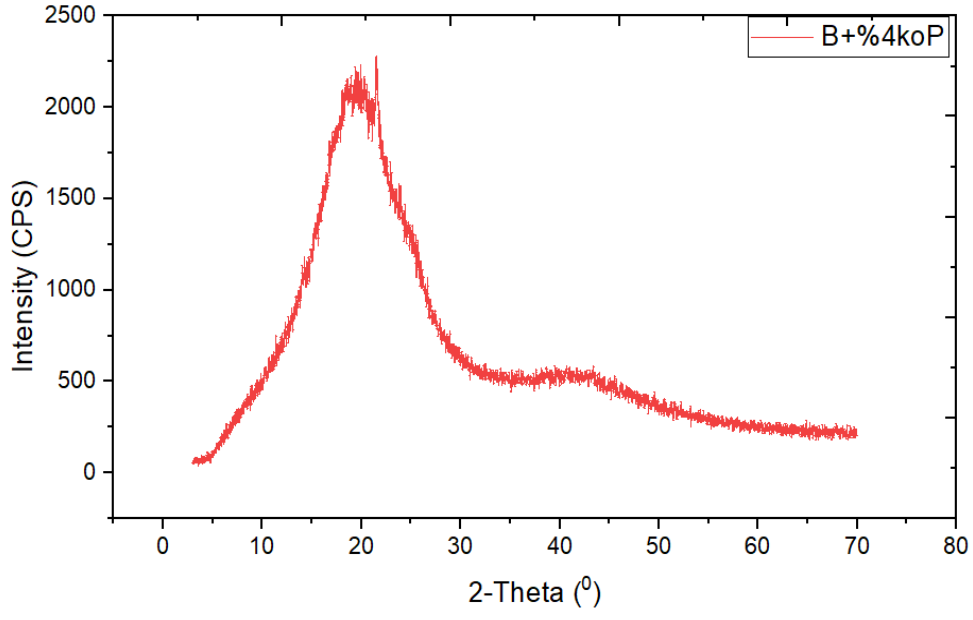
Saf bitüm ile kopolimer katkılı bitümlere ait morfolojik yapının incelenmesi için bağlayıcılar üzerinde XRD analizi uygulanmıştır. XRD analizi, Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Malzeme Karakterizasyonu Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Bağlayıcılara ait elde edilen XRD analizi sonuçları Şekil 4.37-4.41'de verilmiştir.



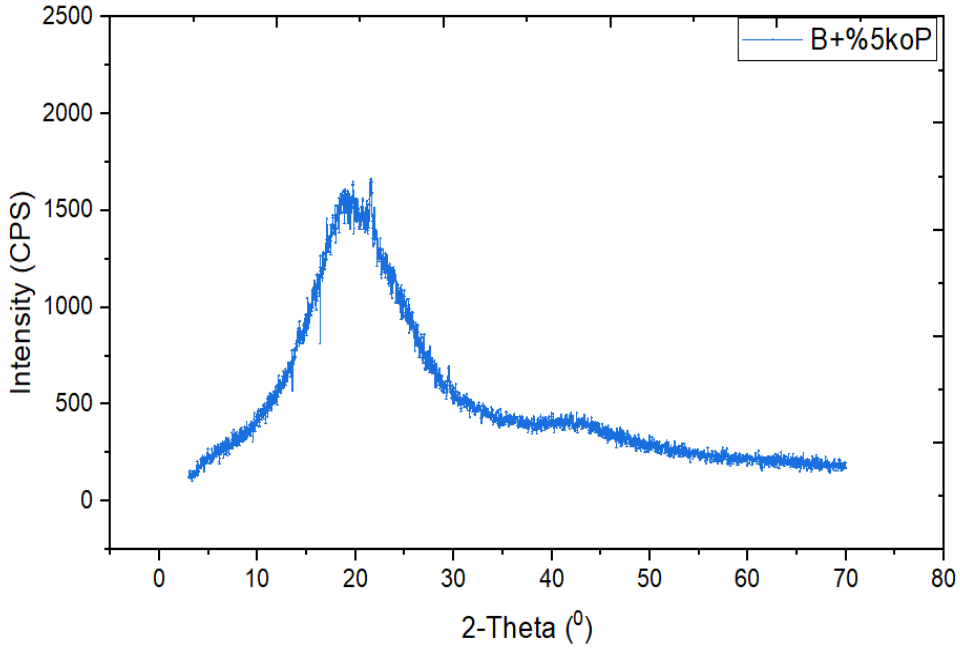
Şekil 4.37: Saf Bitüme Ait XRD Görüntüsü



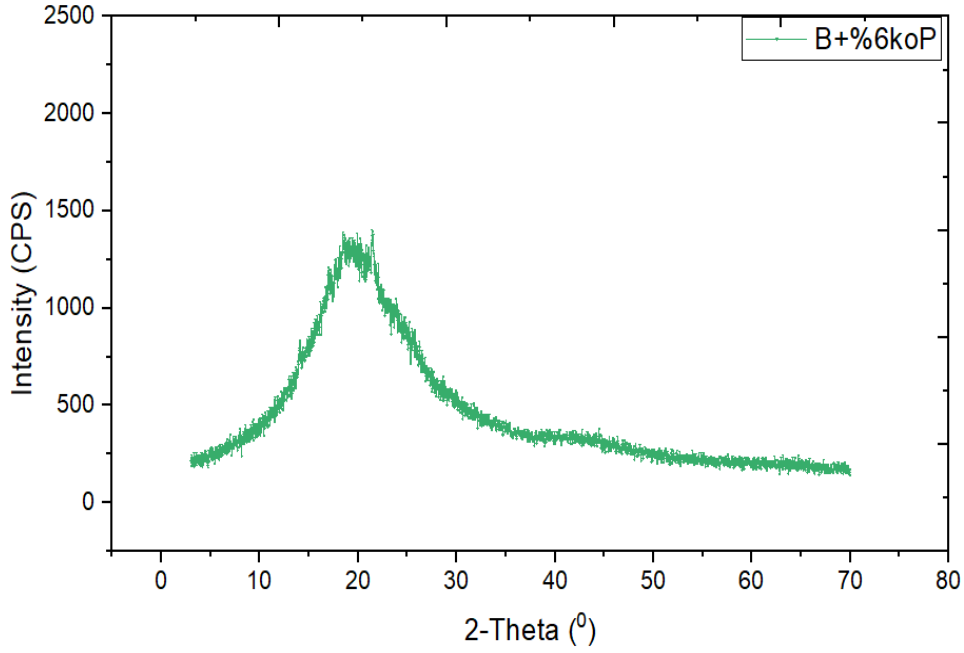
Şekil 4.38: B+%3koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü



Şekil 4.39: B+%4koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü



Şekil 4.40: B+%5koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü

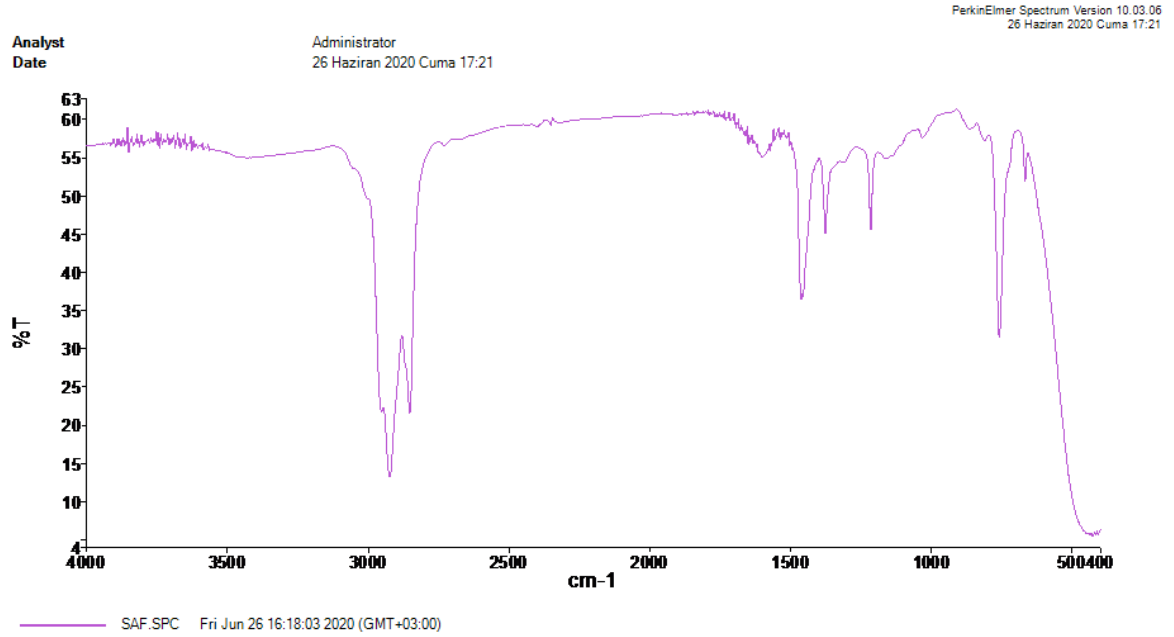


Şekil 4.41: B+%6koP Katkılı Bitüme Ait XRD Görüntüsü

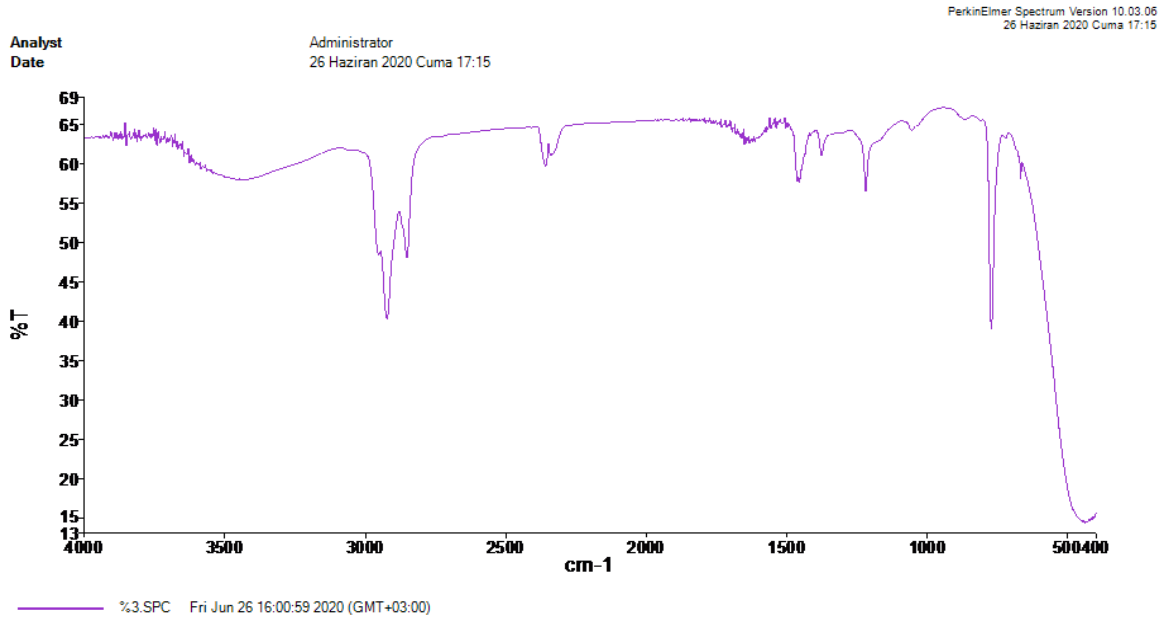
Saf ve özgün kopolimer katkılı bitümlerin kristal fazlarını tanımlamak ve bu fazların yapısal özelliklerini belirleyebilmek amacıyla XRD analiz yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4.37’de verilen saf bitüme ait XRD spektrumu incelendiğinde $2\theta \approx 20^\circ$ ’de gözlenen pik şiddetinin, katkılı bitümlerin XRD spektrumlarında gözlenen piklere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma kısmen kristalin bölgelerin mevcut olduğu sebep olarak gösterilmektedir (Geçkil ve diğ., 2020). Ayrıca bu şekilde iki farklı makromoleküler yapı mevcuttur. Bunlardan ilk pik maksimumu $2\theta \approx 20^\circ$ ’de geniş ve yayvan bir şekilde, amorf yapıyı temsil eden ikinci pik ise $2\theta \approx 43^\circ$ ’de daha dar ve daha düşük bir şiddette gözlenmiştir. Şekil 4.38, 4.39, 4.40 ve 4.41’de ise sırasıyla B+%3koP, B+%4koP, B+%5koP ve B+%6koP malzemelerine ait XRD spektrumları verilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde özgün kopolimer katkı yüzdesi arttıkça $2\theta \approx 20^\circ$ ’de gözlenen pik şiddetinin, Şekil 4.37’dekine göre daha azaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, katkı yüzdesi arttıkça kristalin bölgelerin azaldığı, özgün kopolimerin asfalt ile kimyasal reaksiyona girdiği ve yapıyı amorflaştırıldığı şeklinde izah edilebilir. Katkı maddesinin bazik yapısı asfaltı parçalayıp malzemedeki fonksiyonel gruplar ile reaksiyona girerek yapıyı, amorf yapıya dönüştürmüştür.

4.8.3 Saf ve katkıli bağlayıcıların FT-IR analizleri

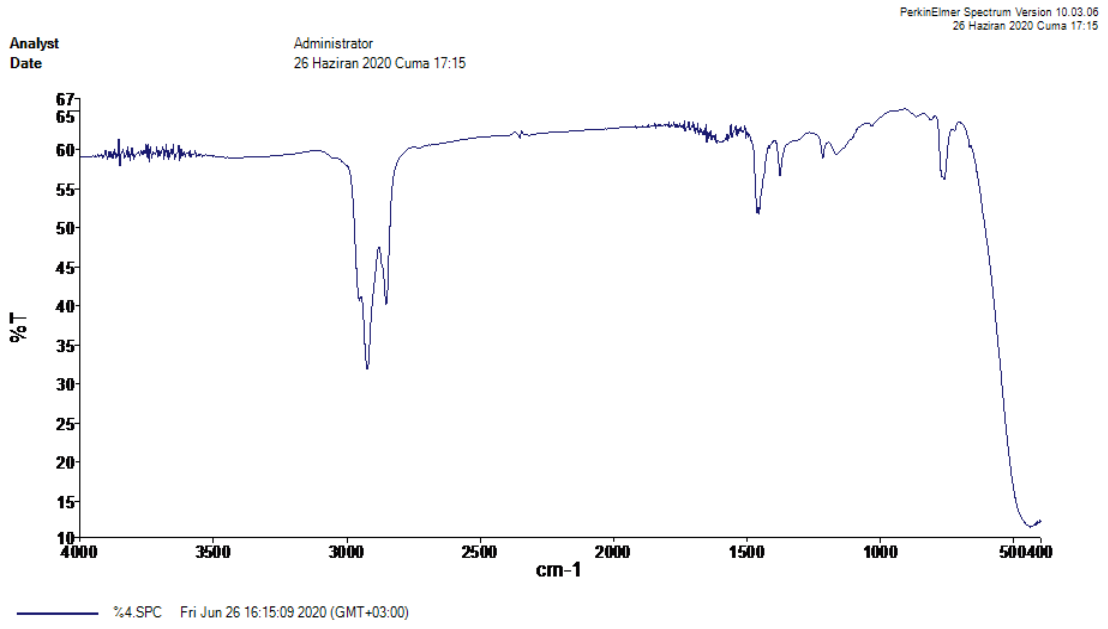
Çalışmada saf ve kopolimer katkıli bitümlerin fonksiyonel grupları ve bağ yapılarında meydana gelen değişimler ise FTIR spektroskopisi ile belirlenmiştir. Analiz için Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Enstrumental Analiz Laboratuvarı kullanılmıştır. Bağlayıcılara ait FTIR spektroskopisi analiz sonuçları Şekil 4.42-4.46'da verilmiştir.



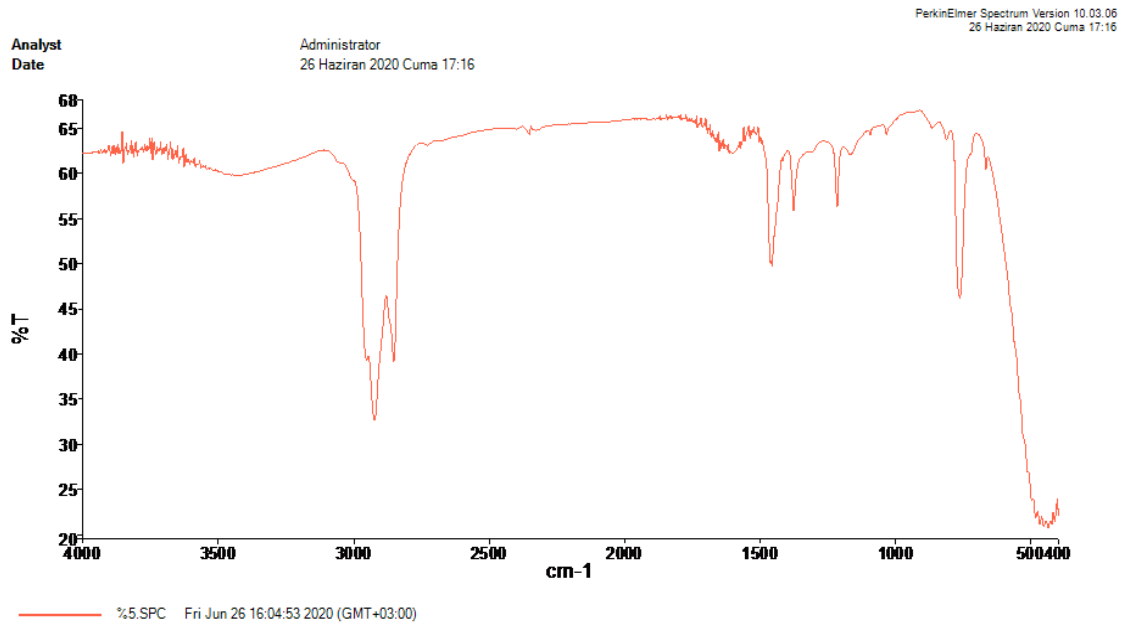
Şekil 4.42: Saf Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri



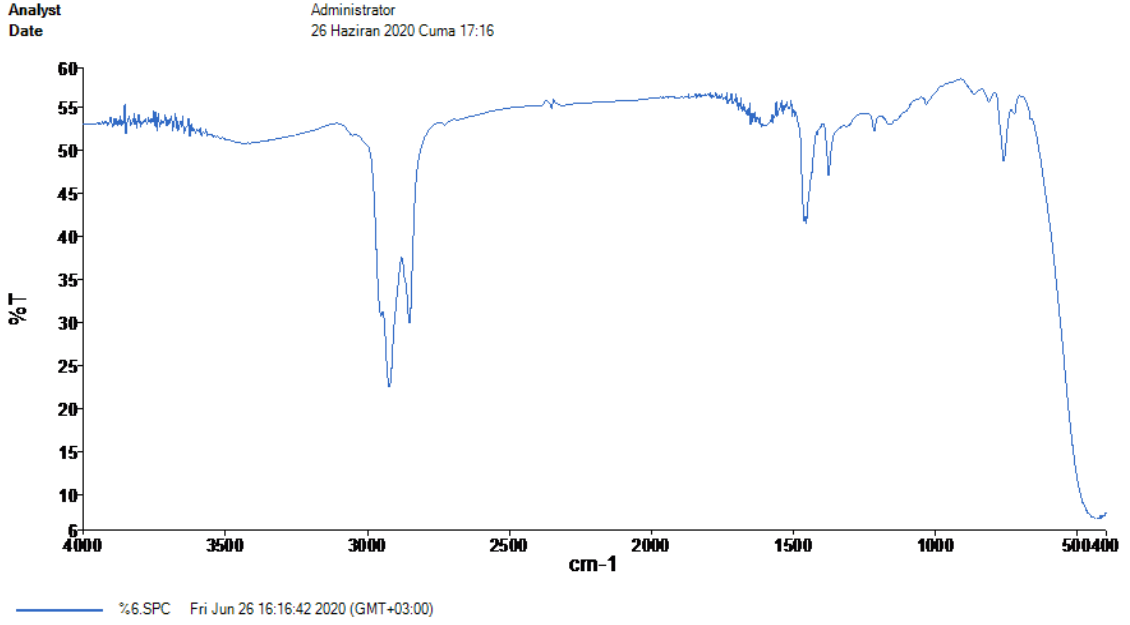
Şekil 4.43: B+%3koP Katkıli Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri



Şekil 4.44: B+%4koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri



Şekil 4.45: B+%5koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri



Şekil 4.46: B+6%koP Katkılı Bitüme Ait FT-IR Görüntüleri

Saf bağlayıcının FT-IR sonuçları incelendiğinde, 1855 cm^{-1} 'deki sinyalin 1890 cm^{-1} 'ye kaydığı sonucuna varılmıştır. Bu 35 cm^{-1} 'lik kayma yüksek enerjili bölgeye doğru gerçekleştiği için, anhidrit yapıya sahip graft kopolimerdeki simetrik gerilme titreşiminden ötürü meydana geldiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu bulgu, özgün graft kopolimerin saf bitümlle karıştırılması esnasında kimyasal olarak da etkileşim gerçekleştirdiğini göstermektedir. Kopolimer MAH'ın saf bitümlle gösterdiği reaksiyon sonucunda kimyasal bağ kurması hayli önemli bir gelişmedir. Kimyasal bağ kurulması, tek faza sahip olan homojen modifikasyon işlemi sağlamakta, böylelikle depolama esnasında polimer yahut kopolimer katkılı bitümlerde çoğunlukla meydana gelen karakteristik ayrışma sorununa karşı önemli ölçüde iyileşme yaşanacağı gözlemlenmiştir.

4.9 Bitümlü Sıcak Karışımların Hazırlanması

Çalışmada, atık polimerlerden sentezlenmiş olan kopolimerin BSK kaplamalar üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla %3, %4, %5 ve %6 oranlarında hazırlanan modifiye bitümler kullanılarak, Marshall karışım tasarım yöntemine göre modifiye karışım numuneleri hazırlanmıştır. Saf ve modifiye karışım numunelerinin özellikleri performans deneyleri ile belirlenmiştir.

4.9.1 Marshall tasarım yöntemine göre karışım numunelerinin hazırlanması

Marshall yöntemine göre hazırlanan numunelerde, öncelikle kullanılacak olan bitümlü bağlayıcı miktarı, kuru agreganın ağırlığının yüzdesi (%3,5; %4; %4,5; %5; %5,5; %6; %6,5) üzerinden belirlendi. Daha sonra, agreganın numuneleri 165 °C sıcaklıkta, bitümlü bağlayıcı ise daha önceden belirlenmiş olan karıştırma sıcaklığında ısıtıldı. Isıtılan agreganın karıştırma kabına döküldü ve orta kısmında bir çukur açıldı. Çukur içerisine ısıtılan bağlayıcı belirli miktarda buraya döküldü. Şekil 4.47’de agreganın numunelerinin etüvde ısıtılması ve kalıpların bitüm ile birlikte ısıtılması verilmiştir.



Şekil 4.47: Agregaların Etüvde Isıtılması ve Kalıplar ile Bitümün Isıtılması

Agregaların tamamı bitümlü bağlayıcı ile kaplanıncaya kadar karıştırma cihazında yaklaşık 1-2 dakika kadar karıştırıldı. Bu aşamadan sonra, önceden temizlenip hafif yağlanmış olan ve yaklaşık 155-160°C ısıtılmış olan kalıpların içerisine kalıp çapına uygun olacak şekilde kesilmiş olan aydın kâğıdı koyuldu ve malzeme kalıp içerisine kürek yardımıyla yerleştirildi. Şekil 4.48’de kullanılan karıştırma cihazı verilmiştir.



Şekil 4.48: Karıştırma Cihazı

Kalıp içerisinde malzemenin, zaman kaybı olmadan hızlıca 15 kenar ve 10 orta kısım olmak üzere toplam 25 defa sıcak cam çubuk ile şişleme işlemi yapıldı. Şişlenen malzeme üzerine tekrar aydınge kâğıdı koyularak sıkıştırma için Marshall tokmağına yerleştirildi. 457 mm. yükseklikten serbest olarak bırakılan tokmak, numuneye 75 ön yüz, 75 arka yüz olmak üzere toplam 150 vuruş yapıldı. Tüm işlem adımları aynı sırada takip edilerek her yüzde en az üç numune hazırlandı. Karışım numunelerinin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.49'da verilmiştir.



Şekil 4.49: Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall Tokmağı

Numunenin her iki yüzeyinde bulunan aydınge kâğıtları bir spatula yardımıyla numuneye zarar vermeden çıkarıldı. Kalıp içerisinde sıkıştırma işlemi tamamlanıp soğumaya bırakılan numuneler, 24 saat süre bekletildikten sonra bir kriko yardımıyla kalıptan çıkarıldı. Daha sonra, numunelerin alt ve üst yüzeyi temiz bir spatula yardımıyla temizlendi. Yüzeyi düzeltilmiş numunelerin yükseklikleri kumpas yardımıyla en az üç yerden ölçülerek kaydedildi. Hazırlanan karışım numuneleri ve kumpas yardımıyla numunelerin yüksekliklerinin ölçülmesi Şekil 4.50'de verilmiştir.



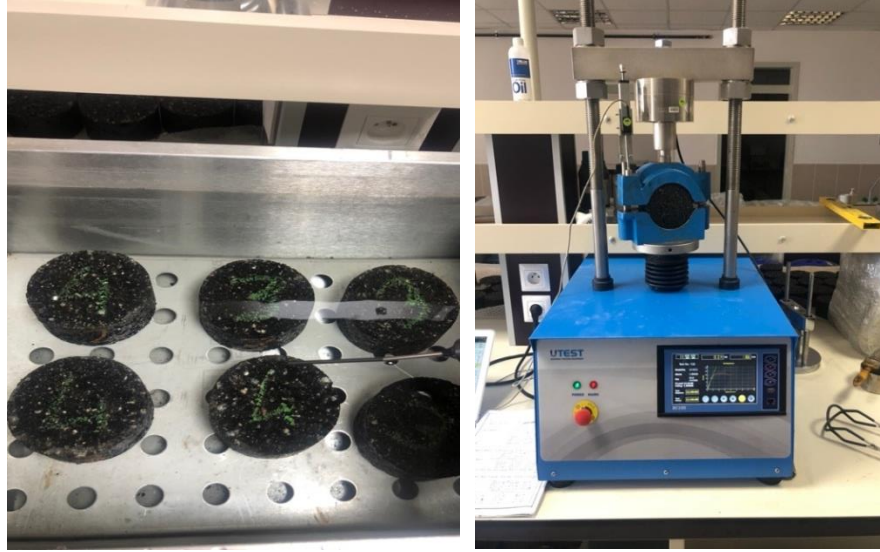
Şekil 4.50: Hazırlanan karışım numuneleri ve kumpas ile yüksekliklerinin belirlenmesi

Hazırlanan karışım numunelerinin havadaki kuru ağırlıkları tartılarak kaydedildi. Ardından, Arşimet terazisi yardımıyla numunelerin sudaki ağırlıkları ve doymun kuru yüzey ağırlıkları belirlendi, daha sonra bulunan tüm ağırlıklar kaydedildi. Arşimet terazisinde yapılan tartılma işlemi Şekil 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.51: Arşimet terazisi

Hazırlanan karışım numunelerinin stabilite ve akma değerlerinin belirlenebilmesi için, numuneler yaklaşık 40 dk boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletildi. Sudan çıkarılan numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirildi ve 50,8 mm/dak yükleme hızıyla yüklemeye başlandı. Numuneye uygulanan en yüksek yükleme değeri ve buna karşılık gelen akma değeri cihaz tarafında otomatik olarak belirlendi ve kaydedildi. Numunelerin su banyosunda bekletilmesi ve Marshall stabilite cihazı Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52: Numunelerin su banyosunda bekletilmesi ve Marshall stabilite deneyine tabi tutulması

4.9.2 Optimum bitüm yüzdesinin tespit edilmesi

Optimum bitüm oranının tespit edilmesinde, karışımda kullanılacak olan agrega miktarı sabit tutularak, 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 doymun ağırlıkları belirlenip hacimleri ve birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra formül 4.3- 4.16 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 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.

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

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

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

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

$$W_b = [(W_B / W_A + W_B)] \times 100 \quad (4.7)$$

$$G_{sb} = 100 / [(\%K / G_k - h) + (\%I / G_i - h) + (\%F / G_f - z)] \quad (4.8)$$

$$G_{sa} = 100 / [(\%K / G_k - z) + (\%I / G_i - z) + (\%F / G_f - z)] \quad (4.9)$$

$$D_t = 100 / [(100 - W_b / G_{se}) + (W_b / G_b)] \quad (4.10)$$

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

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

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

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

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

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

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 : Doygun-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

V_a : Numunedeki agregaya hacmi %'si

V_{ma} : Agregalar arasındaki boşluk %'si

V_f : V_{ma} 'nın bitümle dolu boşluk %'si

P_{be} : Agregaya ağırlığına göre efektif bitüm %'si

G_{sb} : Agregaya hacim özgül ağırlığı

G_{sa} : Agregaya zahiri özgül ağırlığı

G_{se} : Agregaya efektif özgül ağırlığı

%K : Karışımdaki kaba agregaya %'si

%İ : Karışımdaki ince agregaya %'si

%F : Karışımdaki filler %'si

Hazırlanan deney numunelerinden %3,5 bitüm içeren ilk numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Kaba agregası} = \%42 \quad , \quad G_{k-h} = 2,691 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{İnce agregası} = \%53 \quad , \quad G_{i-h} = 2,638 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Filler} = \%5 \quad , \quad G_{f-z} = 2,733 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Bitüm oranı} = \%3,5 \quad , \quad G_b = 1,012 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Agrega toplam ağırlığı} = 1200 \text{ gr}$$

$$W_a = (42/1200) \times 100 = 3,5$$

$$W_b = (42/(42+1200)) \times 100 = 3,38$$

$$V = 1243,8 - 716,3 = 527,5 \text{ cm}^3$$

$$D_p = 1233,5 / 527,5 = 2,338 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_{\text{ort}} = (2,338 + 2,346 + 2,337) = 2,340 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sb} = 100 / [(42/2,691) + (53/2,638) + (5/2,741)] = 2,665 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{sa} = 100 / [(42/2,733) + (53/2,738) + (5/2,741)] = 2,736 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_t = 100 / [(100-3,38) / 2,701 + (3,38/1,012)] = 2,557 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{se} = (2,665 + 2,736) / 2 = 2,701 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_h = [(2,557 - 2,340) / 2,557] \times 100 = 8,47$$

$$V_b = (3,38 \times 2,340) / 1,012 = 7,82$$

$$V_a = (100 - 3,38) \times 2,340 / 2,665 = 84,85$$

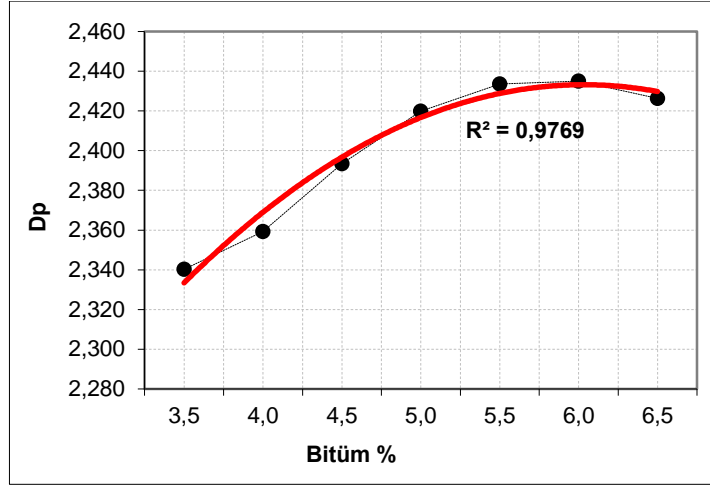
$$V_{ma} = 100 - 84,85 = 15,15$$

$$V_f = 100 \times (15,15 - 8,47) / 15,15 = 44,10$$

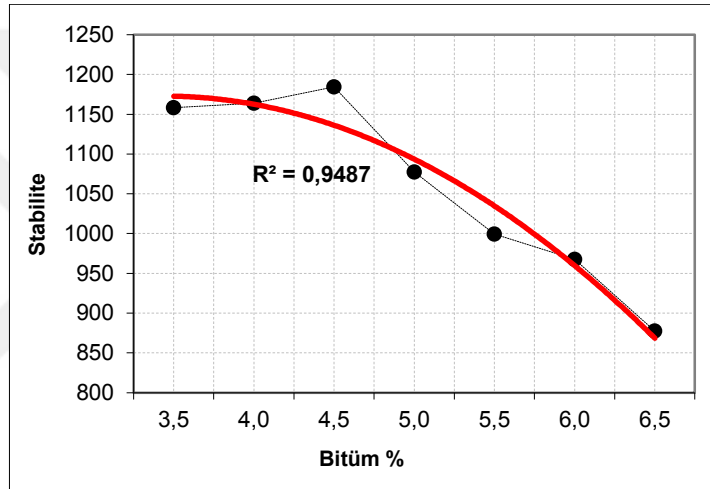
Her bitüm yüzdesi ve her numune için aynı hesaplamalar yapılmış olup tüm sonuçlar Çizelge 4.20'de verilmiştir. Karışımların stabilite, D_p , akma, V_h , V_{ma} , V_f ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.53- Şekil 4.58' de verilmiştir.

Çizelge 4.20: Optimum Bitüm Oranını Belirlemek İçin Kullanılan B100/150 Saf Bitüme Ait Deney Sonuçları

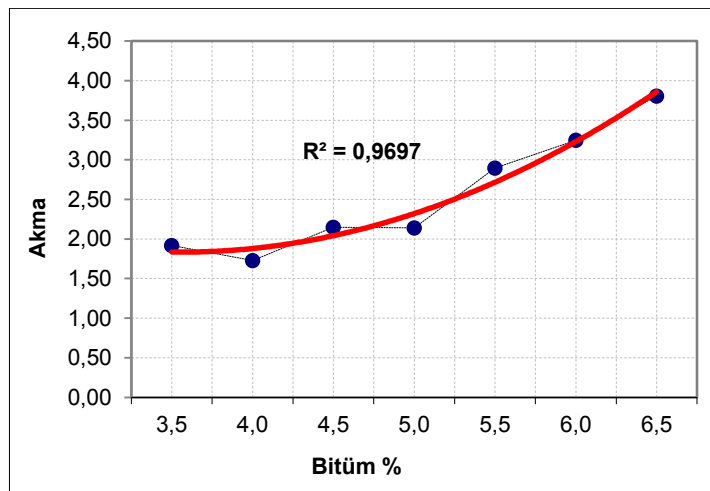
No	Wa	Wb	WB	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava)	C (su)	B (doy.)	V	Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vf	Akma	Stb.	Dz.Fak.	Dz.Stb
	(%)	(%)	(gr)	1	2	3	Ort	(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)
1	3,5	3,38	42,00	66,0	66,3	67,1	66,48	1233,5	716,3	1243,8	527,5	2,338							1,95	12,67	0,936	1186
2				65,9	65,9	66,6	66,15	1232,1	716,1	1241,4	525,3	2,346							1,81	12,38	0,934	1156
3	3,50	3,38		67,2	66,6	66,3	66,72	1236,1	717,7	1246,6	528,9	2,337							1,99	12,19	0,930	1133
ORTALAMALAR												2,340	2,557	8,47	7,82	84,85	15,15	44,10	1,917			1158
4	4,0	3,85	48,00	66,9	66,4	67,1	66,78	1238	721,3	1249,1	527,8	2,346							1,87	11,95	0,928	1109
5				66,0	66,0	66,5	66,18	1241,9	724,1	1249,9	525,8	2,362							1,69	12,02	0,943	1133
6	3,49	3,36		65,4	66,1	65,9	65,77	1243,2	725,2	1249,7	524,5	2,370							1,63	13,11	0,953	1249
ORTALAMALAR												2,359	2,538	7,05	7,82	85,13	14,87	52,60	1,73			1164
7	4,5	4,31	54,00	65,1	65,8	65,8	65,58	1246,8	727,9	1248,9	521	2,393							1,9	11,69	0,958	1119
8				65,3	64,9	65,6	65,3	1246,6	729,2	1249,1	519,9	2,398							2,12	13,4	0,964	1292
9	3,99	3,82		65,1	65,8	65,1	65,32	1243	725,8	1246	520,2	2,389							2,42	11,84	0,964	1142
ORTALAMALAR												2,393	2,520	5,02	9,03	85,95	14,05	64,26	2,147			1184
10	5,0	4,76	60,00	65,2	64,7	65,0	64,95	1253,5	738,6	1256,7	518,1	2,419							1,93	11,21	0,973	1091
11				64,6	64,1	64,4	64,4	1255,6	743,1	1256,5	513,4	2,446							2,37	12,12	0,987	1196
12	4,49	4,28		65,5	65,1	65,5	65,35	1250,1	730,4	1252,5	522,1	2,394							2,12	9,822	0,963	946
ORTALAMALAR												2,420	2,502	3,29	10,22	86,48	13,52	75,63	2,14			1078
13	5,5	5,21	66,00	65,4	64,7	65,5	65,17	1263,4	746	1263,7	517,7	2,440							3,25	9,979	0,967	965
14				65,2	65,6	64,8	65,2	1258,3	743,3	1260,8	517,5	2,431							2,87	10,38	0,967	1004
15	4,99	4,73		65	64,6	64,7	64,76	1258,9	741,9	1260,2	518,3	2,429							2,57	10,52	0,978	1029
ORTALAMALAR												2,434	2,485	2,06	11,37	86,56	13,44	84,64	2,897			999
16	6,0	5,66	72,00	65,1	64,6	64,3	64,65	1258,7	740,5	1260,1	519,6	2,422							2,84	9,594	0,981	941
17				64,8	65,5	65,0	65,1	1270,6	749,9	1271,2	521,3	2,437							3,85	10,64	0,970	1032
18	5,49	5,18		64,8	64,4	64,9	64,71	1259,2	742,7	1262,9	520,2	2,421							3,05	9,495	0,979	930
ORTALAMALAR												2,427	2,468	1,67	12,42	85,91	14,09	88,16	3,247			968
19	6,5	6,10	78,00	64,8	65,1	64,6	64,81	1261,3	741,9	1261,8	519,9	2,426							3,69	8,885	0,977	868
20				65,4	66,0	65,2	65,5	1270,9	747,9	1272,1	524,2	2,424							4,16	8,848	0,960	849
21	5,99	5,62		65,3	64,9	64,8	65	1263,7	743,7	1264,1	520,4	2,428							3,56	9,418	0,972	915
ORTALAMALAR												2,426	2,451	1,02	13,48	85,49	14,51	92,94	3,803			878



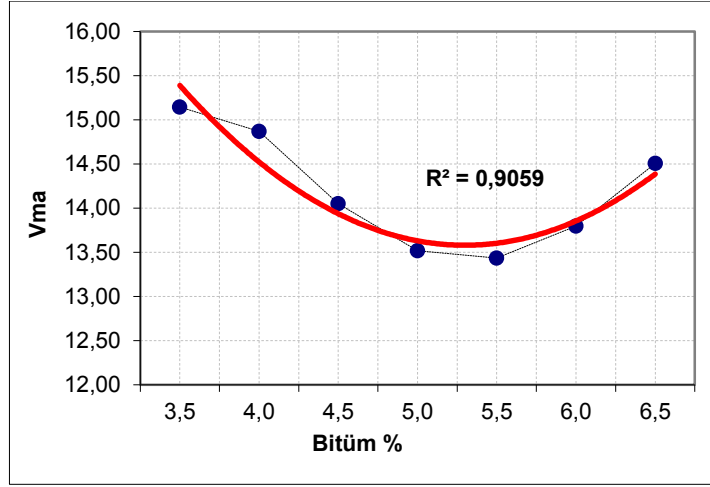
Şekil 4.53: Dp-%Bitüm



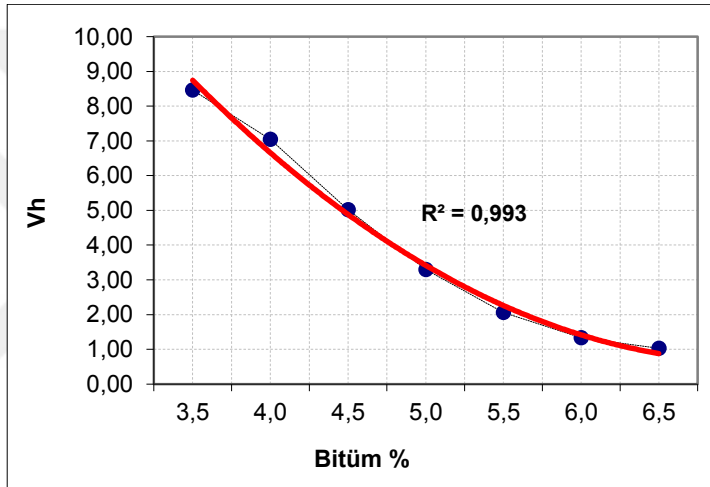
Şekil 4.54: Stabilite-%Bitüm



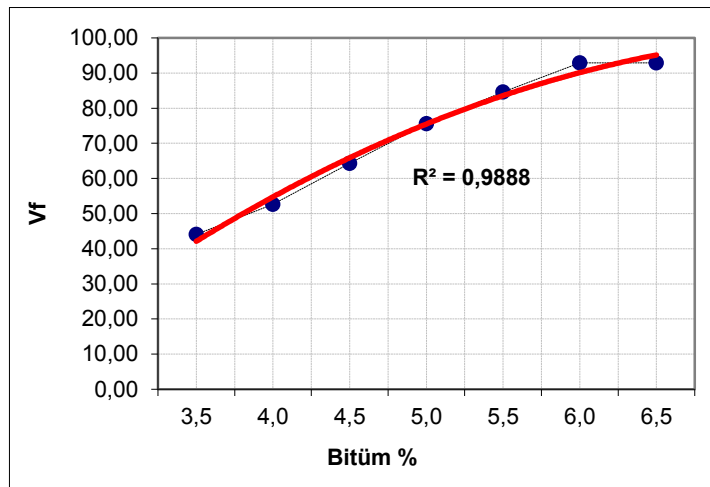
Şekil 4.55: Akma-%Bitüm



Şekil 4.56: VMA-%Bitüm



Şekil 4.57: Vh-%Bitüm



Şekil 4.58: Vf-%Bitüm

4.9.3 Marshall karışım numunelerine uygulanan performans deneyleri

Çalışmada, hazırlanan saf ve kopolimer katkılı karışımların performans özellikleri Marshall stabilite ve akma deneyi, kalıcı Marshall stabilitesi deneyi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti deneyi (ITS), dolaylı çekme esneklik modülü deneyi (ITSM) ve statik sünme deneyleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm bu deneylere tabi tutulmak amacıyla hazırlanan numune sayıları Çizelge 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.22: Performans Deneyleri İçin Üretilen Numune Sayıları

Karışım Türü	Uygulanan Performans Deneyleri				
	Marshall Stabilite ve Akma	RMS	ITS	ITSM	Sünme
B	3	3	6	3	3
B+%3koP	3	3	6	3	3
B+%4koP	3	3	6	3	3
B+%5koP	3	3	6	3	3
B+%6koP	3	3	6	3	3
Toplam	15	15	30	15	15

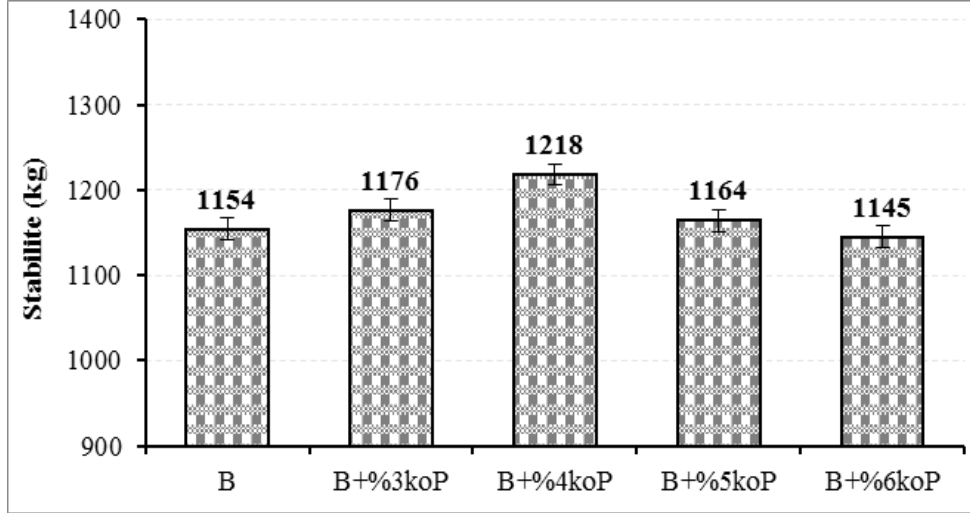
Toplam Numune: 90

4.9.3.1 Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları

B 100/150 penetrasyon sınıfı saf bitüm ve %3, 4, 5 ve 6 oranlarında kopolimer katkılı modifiye bitümler kullanılarak optimum bitüm içeriğinde (%5) hazırlanan numuneler üzerinde ASTM D 1559 standardına göre Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. Sıcak karışım numuneleri yaklaşık 40 dakika kadar 60 °C sıcaklıktaki suda bekletilerek daha sonra deneye tabi tutulmuştur. Kopolimer katkılı karışım numunelerinin stabilite ve akma sonuçları Çizelge 4.23’te verilmiştir. Elde edilen stabilite değerlerinin kopolimer katkı oranı ile değişimi Şekil 4.60’ta, akma değerlerinin kopolimer katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.61’de verilmiştir.

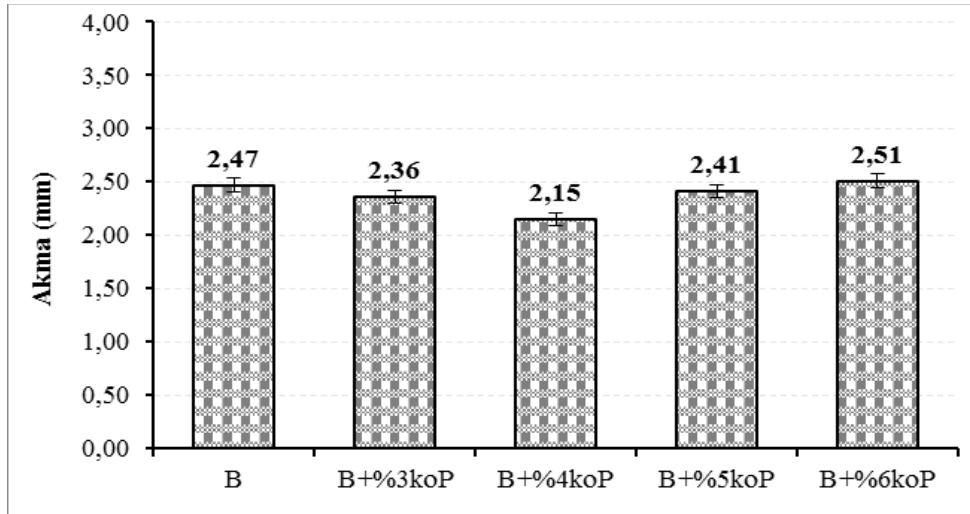
Çizelge 4.23: Numunelere Ait Marshall Stabilite ve Akma Deneyi Sonuçları

No	Wa (%)	Wb (%)	WB (gr)	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava) (gr)	C (su) (gr)	B (doy.) (gr)	V (cm ³)	Dp (gr/cm ³)	Dt (gr/cm ³)	Vh (%)	Vb (%)	Va (%)	Vma (%)	Vf (%)	Akma (mm)	Stb. (kN)	Dz.Fak.	Dz.Stb (kG)	KARIŞIM TÜRÜ
				1	2	3	Ort																
1	5,0	4,76	60,00	65,6	65,22	66,1	65,64	1245,6	727,2	1247,3	520,1	2,395							2,31	11,545	0,956	1104	B
2				65,0	64,9	65,3	65,04	1246,8	731,7	1250,1	518,4	2,405							2,57	12,198	0,971	1184	
3	4,49	4,28		64,93	65,4	65,5	65,26	1253,7	735,7	1256,2	520,5	2,409							2,53	12,16	0,966	1175	
ORTALAMALAR											2,403	2,502	3,97	10,15	85,88	14,12	71,88	2,47			1154		
4	5,0	4,76	60,00	65,0	64,61	64,5	64,69	1245,9	733,4	1250,7	517,3	2,408							2,25	11,949	0,963	1151	B+%3koP
5				65,2	65,4	64,9	65,18	1251,9	736,1	1256,2	520,1	2,407							2,35	12,744	0,966	1231	
6	4,49	4,28		65,31	65,1	65,8	65,41	1249,1	733	1254,3	521,3	2,396							2,48	11,879	0,964	1145	
ORTALAMALAR											2,404	2,502	3,93	10,16	85,91	14,09	72,09	2,36			1176		
7	5,0	4,76	60,00	65,3	65,68	65,1	65,35	1246,3	730	1251,3	521,3	2,391							2,12	13,64	0,985	1344	B+%4koP
8				65,5	64,7	65,6	65,26	1244	727,4	1249,7	522,3	2,382							2,19	12,09	0,968	1170	
9	4,49	4,28		65,61	64,8	65,6	65,32	1245,5	727,7	1249,4	521,7	2,387							2,13	11,85	0,962	1140	
ORTALAMALAR											2,387	2,502	4,62	10,08	85,30	14,70	68,58	2,15			1218		
10	5,0	4,76	60,00	65,8	65,53	65,0	65,44	1245,9	728,3	1249,9	521,6	2,389							2,51	11,722	0,961	1126	B+%5koP
11				64,7	64,4	65,2	64,73	1249,4	735,3	1253	517,7	2,413							2,60	12,769	0,979	1250	
12	4,49	4,28		65,16	64,8	65,5	65,17	1245,3	729,3	1248,5	519,2	2,398							2,13	11,512	0,968	1114	
ORTALAMALAR											2,400	2,502	4,08	10,14	85,78	14,22	71,31	2,41			1164		
13	5,0	4,76	60,00	66,0	65,13	66,0	65,71	1246,8	728,5	1251,3	522,8	2,385							2,46	11,476	0,954	1095	B+%6koP
14				65,0	65,9	64,7	65,18	1249,3	732,8	1252,7	519,9	2,403							2,61	12,688	0,968	1228	
15	4,49	4,28		66,25	65,9	66,1	66,08	1247,9	726,1	1252,9	526,8	2,369							2,45	11,777	0,945	1113	
ORTALAMALAR											2,386	2,502	4,66	10,08	85,26	14,74	68,37	2,51			1145		



Şekil 4.60: Karışımların Stabilite Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.60 incelendiğinde, kopolimer katkı oranı artışı ile (%3, 4, 5 ve 6) karışımların stabilite değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %2; %5,5; %1 artış ve %0,8 azalma şeklindedir. Elde edilen bu sonuçlara göre en yüksek stabilite değeri %4koP katkılı karışım numunesinde görülmüştür. Kopolimer katkısıyla stabilitenin artış göstermesi, BSK kaplamada meydana gelecek deformasyonlara karşı direncin arttığını göstermektedir.

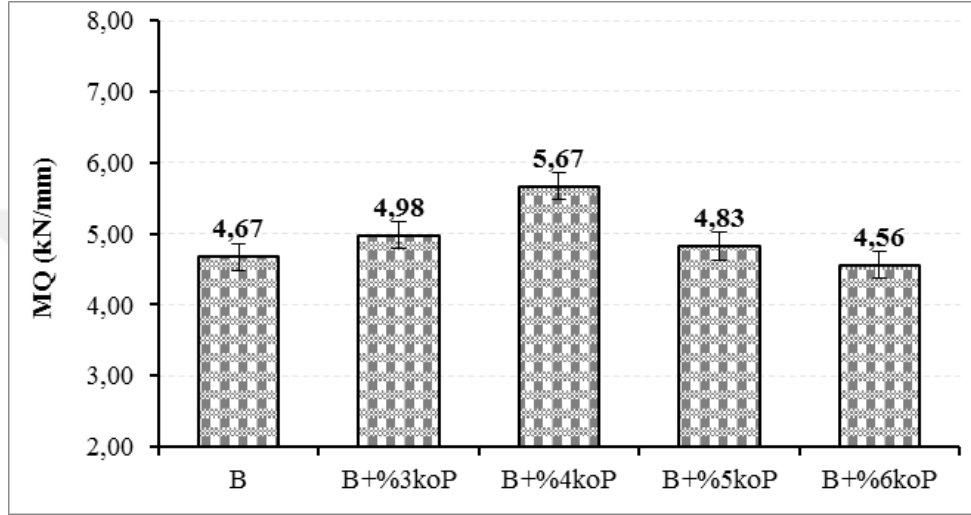


Şekil 4.61: Karışımların Akma Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.61’de kopolimer katkı oranının artışı ile karışımların akma değerlerinde meydana gelen değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %4,5; %13; %2,4 azalma ve %2 artış şeklindedir. Akma değeri, kaplamanın trafik yükleri altındaki plastiklik veya esneklik davranışını ifade etmektedir. Kopolimer oranı arttıkça karışımdaki akma değerlerinde meydana gelen bu artış ve azalmalar saf karışıma kıyasla çok az olduğu için saf karışım ile hemen hemen aynı düzeyde

olduğu kabul edilebilir. Bu durumda, kopolimer katkısıyla akma miktarının aynı düzeyde kalması, kaplamanın kırılma anındaki davranışının hemen hemen aynı kaldığını göstermektedir.

Saf ve kopolimer katkılı karışım numunelerinin stabilite değerlerinin akma değerlerine oranlanmasıyla Marshall oranı (MQ) değerleri de hesaplanarak sonuçlar Şekil 4.62’de verilmiştir.



Şekil 4.62: Karışımların MQ Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.62’de saf ve kopolimer katkılı karışımların MQ değerleri incelendiğinde, katkı oranının artışıyla (%3, 4, 5 ve 6) MQ değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %6,6; %21,4; %3,4 artış ve %2,4 azalma şeklindedir. MQ değeri, BSK kaplamaların kayma gerilmelerine karşı direncinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, en yüksek MQ değeri %4koP katkılı karışımda elde edilmiş ve dolayısıyla kopolimer katkısıyla kaplamaların kayma gerilmelerine karşı en dirençli olduğu oranının %4koP olduğunu söylemek mümkündür.

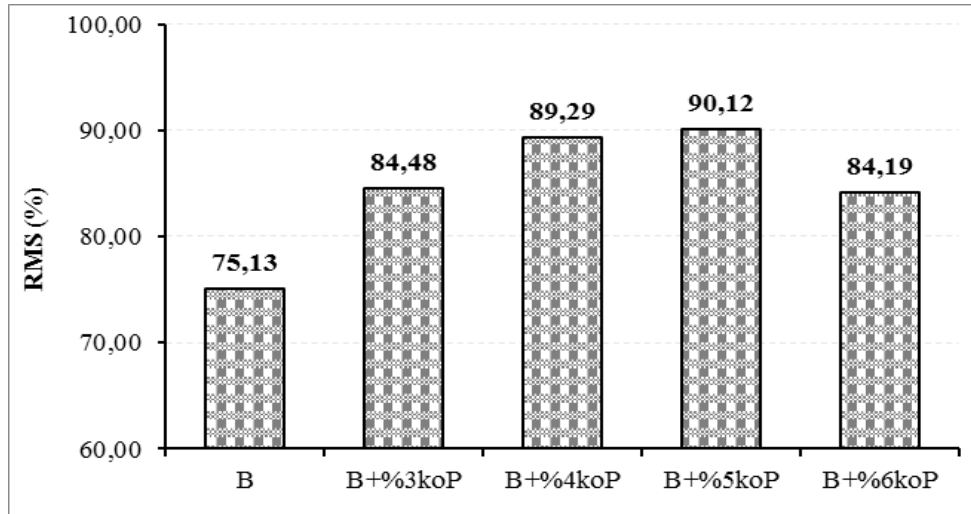
4.9.3.2 Kalıcı marshall stabilitesi (RMS) deney sonuçları

Sıcak karışımların, suya karşı hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla uygulanan RMS deneyinde, saf ve kopolimer katkılı karışım numuneleri 60 °C sıcaklıktaki suda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuştur. Çalışmada, 24 saat suda bekletilen numuneler ‘Şartlanmış’, 40 dakika bekletilen numuneler ise ‘Şartlanmamış’ olarak ifade edilmiştir. RMS değeri, şartlanmış numunenin stabilite değerinin şartlanmamış numunenin stabilite değerine

oranlanmasıyla elde edilmektedir. Karışım numunelerinin RMS değerleri Çizelge 4.24'te, elde edilen bu değerlerin kopolimer katkı oranına göre değişimi ise Şekil 4.63'te verilmiştir.

Çizelge 4.24: RMS Deneyi Sonuçları

Karışım Türü	Numune No	Şartlandırılmış (kN)	Ortalama	Şartlandırılmamış (kN)	Ortalama	RMS (%)
B	1	8,29	8,67	11,04	11,54	%75,13
	2	9,62		11,84		
	3	8,11		11,75		
B+%3koP	1	9,49	10,04	12,44	11,82	%84,48
	2	10,29		11,94		
	3	10,33		11,28		
B+%4koP	1	10,56	10,63	11,51	11,76	%89,29
	2	10,72		12,31		
	3	10,62		11,45		
B+%5koP	1	10,30	10,49	11,26	11,64	%90,12
	2	11,06		12,50		
	3	10,10		11,14		
B+%6koP	1	9,48	9,64	10,95	11,45	%84,19
	2	9,68		12,28		
	3	9,76		11,13		



Şekil 4.63: Karışımların RMS Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.63 incelendiğinde, saf ve kopolimer katkıli karışımların, suya karşı dayanımlarının %70-90 aralığında olduğu görülmektedir. En yüksek RMS değeri ise %5 koP katkıli karışımda görülmektedir. Kopolimer katkısıyla RMS değerinin artış göstermesi, kopolimerin agrega ve

bitüm arasındaki adezyon ve karışımın kohezyon kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4.9.3.3 Dolaylı çekme mukavemeti (ITS) deney sonuçları

Saf ve kopolimer katkılı karışımların nem hasarına karşı dayanımları ASHTO T 283 standardına göre ITS deneyi ile belirlenmiş ve ayrıca bu karışımların çekme mukavemeti oranları (ITSR) da hesaplanmıştır. ITS deneyi için her bir karışımdan toplam 6 numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden üç tanesine vakum uygulanarak boşluk oranlarının %70-%80'nin suyla dolması sağlanmıştır. Vakumlama işlemi biten numune hemen streç film ile sarılarak 16 saat boyunca -18°C sıcaklıktaki dondurucuda bekletilmiştir. Vakum cihazı, numunelerin streç filmle sarılması ve dondurucuya bekletilmesi Şekil 4.64'te verilmiştir.



Şekil 4.64: Vakum Cihazı, Numunelerin Streç Filmle Sarılması ve Dondurucuda Bekletilmesi

Dondurucudan çıkarılan numuneler 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletilmiştir. 24 saat sonunda su banyosundan çıkarılan numuneler son olarak 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall cihazında kırılmıştır. Çalışmada bu numuneler 'Şartlandırılmış' olarak adlandırılmıştır. Su banyosunda bekletilen numuneler, ITS deneyi ve deney bitimindeki kırılmış numuneler Şekil 4.65'te verilmiştir.



Şekil 4.65: Su Banyosunda Bekletilen Numuneler, ITS Deneyi ve Kırılan Numuneler

Çalışmada ‘Şartlandırılmamış’ numuneler ise sadece 2 saat boyunca 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda bekletildikten sonra kırılmıştır. Deney boyunca tüm karışım numuneleri üzerinde 50,8 mm/dak’lık sabit yükleme uygulanmıştır.

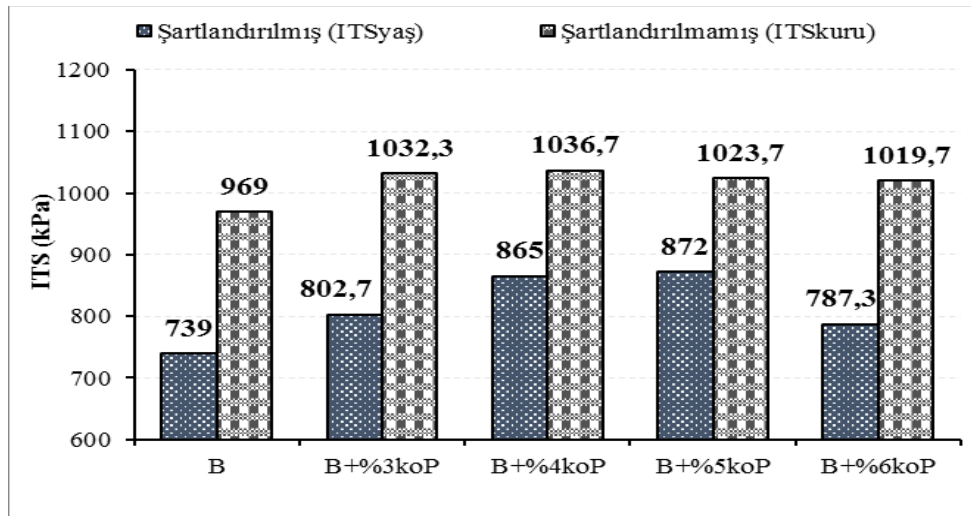
ITS deneyine tabi tutulan şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri “ $ITS_{yaş}$ ”, şartlandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri “ ITS_{kuru} ” olarak ifade edilmiştir. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) formül (4.17) ile hesaplanmıştır.

$$ITSR = (ITS_{yaş}) / (ITS_{kuru}) \quad (4.17)$$

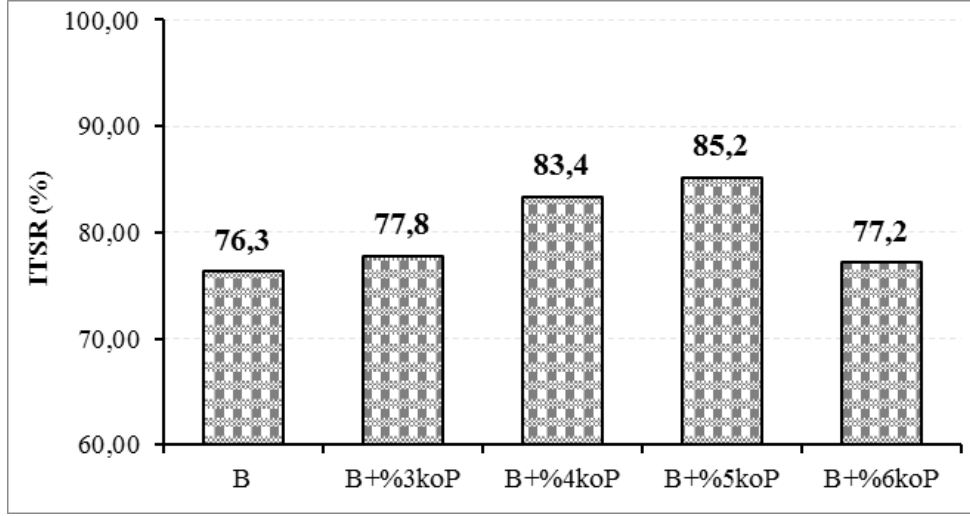
Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.25’te, ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.66’da, karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 4.67’de verilmiştir.

Çizelge 4.25: ITS Deneyi ile Elde Edilen Sonuçlar

Karışım Türü	Numune No	Şartlandırılmış			Şartlandırılmamış			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{yaş} (kPa)	Yükseklik (mm)	P _{maks} (kN)	ITS _{kuru} (kPa)	
B	1	65,01	7,67	750	64,19	9,43	921	76,3
	2	64,66	7,42	728	64,94	10,05	970	
	3	65,02	7,54	738	64,55	10,48	1017	
	Ortalama			739			969	
B+%3koP	1	65,66	7,60	740	65,71	10,58	1009	77,8
	2	65,79	8,54	835	65,11	10,91	1054	
	3	65,34	8,52	833	65,34	10,78	1034	
	Ortalama			802,7			1032,3	
B+%4koP	1	65,69	8,28	808	64,86	10,35	1000	83,4
	2	65,45	9,09	892	64,62	10,52	1023	
	3	65,91	9,15	895	65,24	11,28	1087	
	Ortalama			865			1036,7	
B+%5koP	1	65,21	9,27	910	65,35	10,78	1038	85,2
	2	65,08	8,97	879	65,68	10,54	1010	
	3	65,24	8,75	827	65,51	10,66	1023	
	Ortalama			872			1023,7	
B+%6koP	1	65,01	8,72	859	65,08	10,34	1003	77,2
	2	65,24	7,85	760	65,78	10,81	1034	
	3	66,11	7,62	743	65,17	10,74	1022	
	Ortalama			787,3			1019,7	



Şekil 4.66: Karışımların ITS Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi



Şekil 4.67: Karışımların ITSR Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Çizelge 4.25 ve Şekil 4.66 incelendiğinde, kopolimer katkı oranı artışıyla (%3, 4, 5 ve 6) ITSyaş ve ITSkuru değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla ITSyaş numunelerinde sırasıyla %8,6; %17,1; %18 ve %6,5 artış şeklindedir. ITSkuru numunelerinde meydana gelen değişimler ise saf karışıma kıyasla sırasıyla %6,5; %7; %5,6 ve %5,2 artış şeklindedir.

Şekil 4.67’de saf ve kopolimer katkılı karışımların ITSR değerleri incelendiğinde ise, karışımlarda kopolimer katkı oranı artışıyla karışımların ITSR değerlerinde sırasıyla %2; %9,3; %12 ve %1,2 artışlar görülmüştür. Bu sonuçlara göre, en yüksek ITSR değeri ise %5koP katkılı karışımda görülmüştür. Karışım numunelerinin ITSR değerlerinin %80’in üzerinde olması, sıcak karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca bu durumda, kopolimer katkılı karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğu söylenebilir. Elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kopolimer katkılı karışımların bitüm ile agrega arasında iyi bir adezyon ve koheziona sahip olduğu söylenebilir.

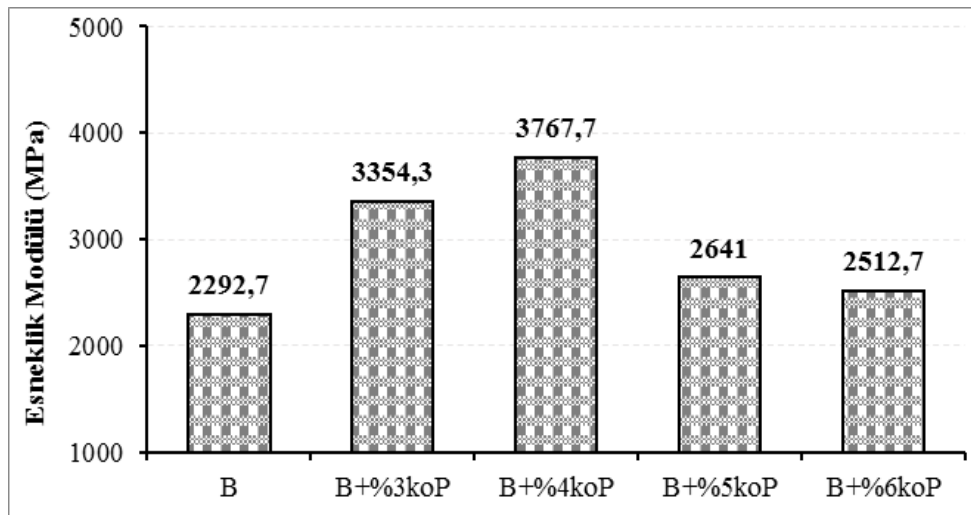
4.9.3.4 ITSM deney sonuçları

Saf ve kopolimer katkılı karışımlar BS D213 standardına göre ITSM deneyine tabi tutulmuştur. Deneyde, UTM cihazı kullanılarak karışım numuneleri üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonra 5 adet deney yüklemesi yapılarak karışımların dinamik yükler karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde ortam sıcaklığı 25 °C, yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0,35; hedef deformasyon ise 5 µm olarak belirlenmiştir. Deney cihazında yatay ekseninde 5 µm deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmektedir.

Numuneye uygulanan 5 vuruş sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda otomatik olarak elde edilmiştir. ITSM deney sonuçları Çizelge 4.26’da verilmiştir. ITSM değerlerinin katkı oranı ile değişimi Şekil 4.68’de verilmiştir.

Çizelge 0.26: Karışımların ITSM Deney Sonuçları

Karışım Türü	Numune no	Yükseklik (mm)	ITSM (Mpa)	Ortalama
B	1	65,5	2214	2292,7
	2	65,3	2352	
	3	65,8	2312	
B+%3koP	1	66,3	3400	3354,3
	2	66,1	3325	
	3	65,7	3338	
B+%4koP	1	65,2	3758	3767,7
	2	66,3	3785	
	3	65,8	3760	
B+%5koP	1	66,1	2632	2641,0
	2	66,3	2647	
	3	65,7	2644	
B+%6koP	1	65,4	2499	2512,7
	2	65,8	2504	
	3	65,6	2535	

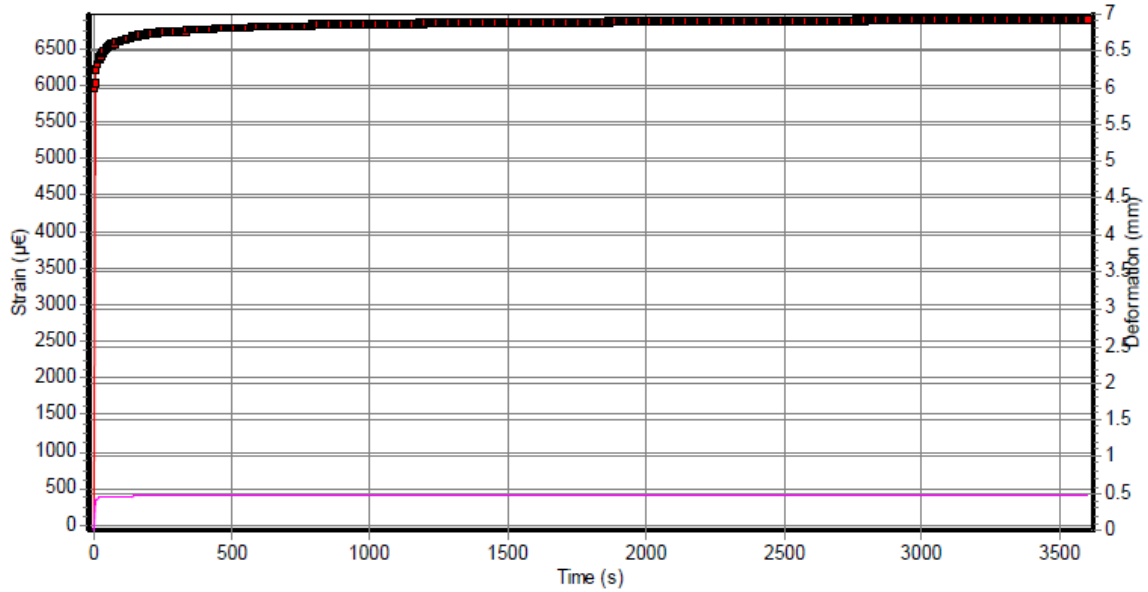


Şekil 4.68: ITSM Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

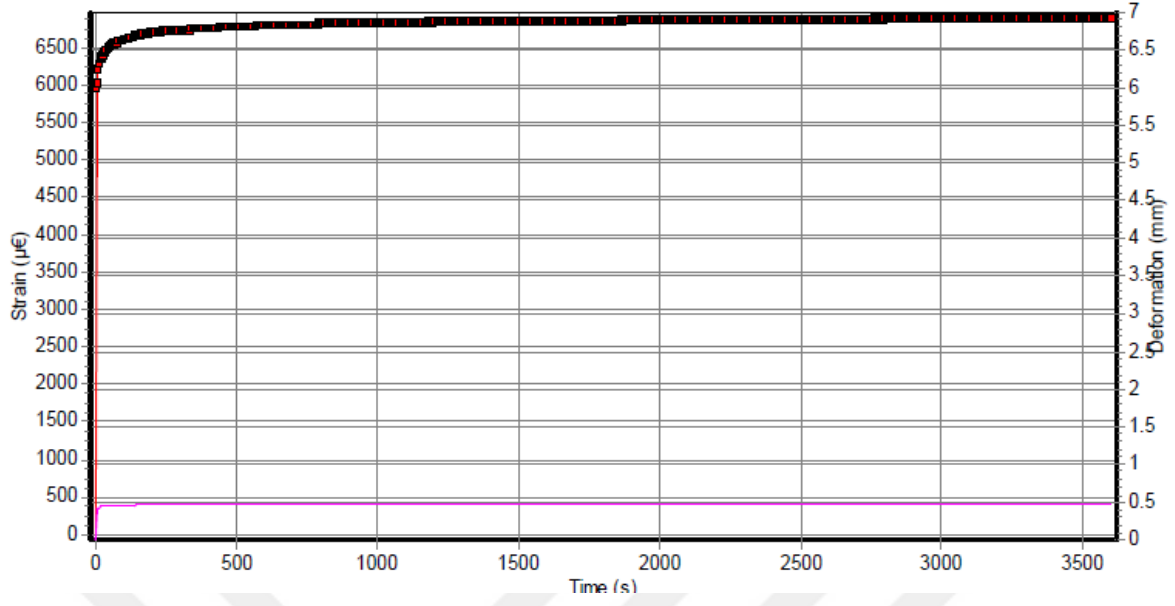
Şekil 4.68 incelendiğinde, kopolimer katkı oranı artışı ile ITSM değerlerinde saf karışıma kıyasla önemli değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler saf karışıma kıyasla sırasıyla %46,3; %64,3; %15,2 ve %10 artış şeklindedir. Bu durumda, kopolimer katkısıyla karışımların sertliğinde önemli artışların meydana geldiği ve en yüksek ITSM değerinin B+%4 koP katkılı karışımlarda meydana geldiği ifade edilebilir. ITSM değerlerindeki bu artış, kopolimer katkılı karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir.

4.9.3.5 Statik sünme deney sonuçları

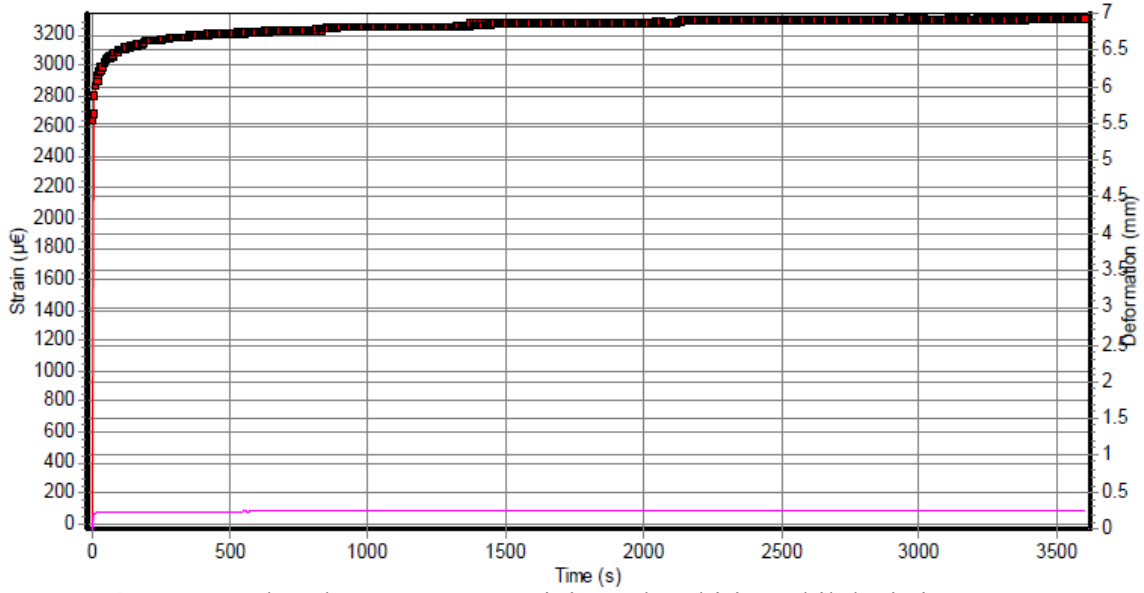
Saf ve kopolimer katkılı karışımlar üzerinde gerçekleştirilen statik sünme deneyi UTM cihazıyla, EN12697-25 standardına göre 50 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde karışım numuneleri ilk önce 3 saat boyunca deney sıcaklığında şartlandırılmıştır. Şartlandırma sonunda numune üzerinde 10 dakika boyunca 20 kPa gerilme oluşturacak şekilde ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanarak gerilme değeri 200 kPa'a çıkartılmış ve deney için 1 saat boyunca yükleme yapılmıştır. Deney süresince, cihaz yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplayarak sonuçları vermektedir. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman – deformasyon sonuçları Şekil 4.69-4.73'te verilmiştir.



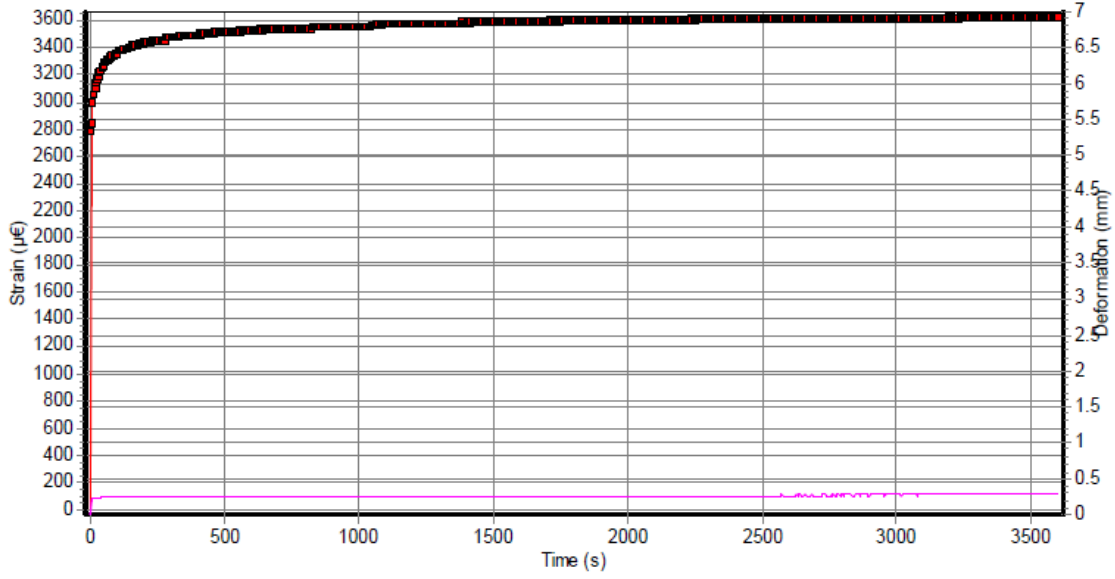
Şekil 4.69: Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği



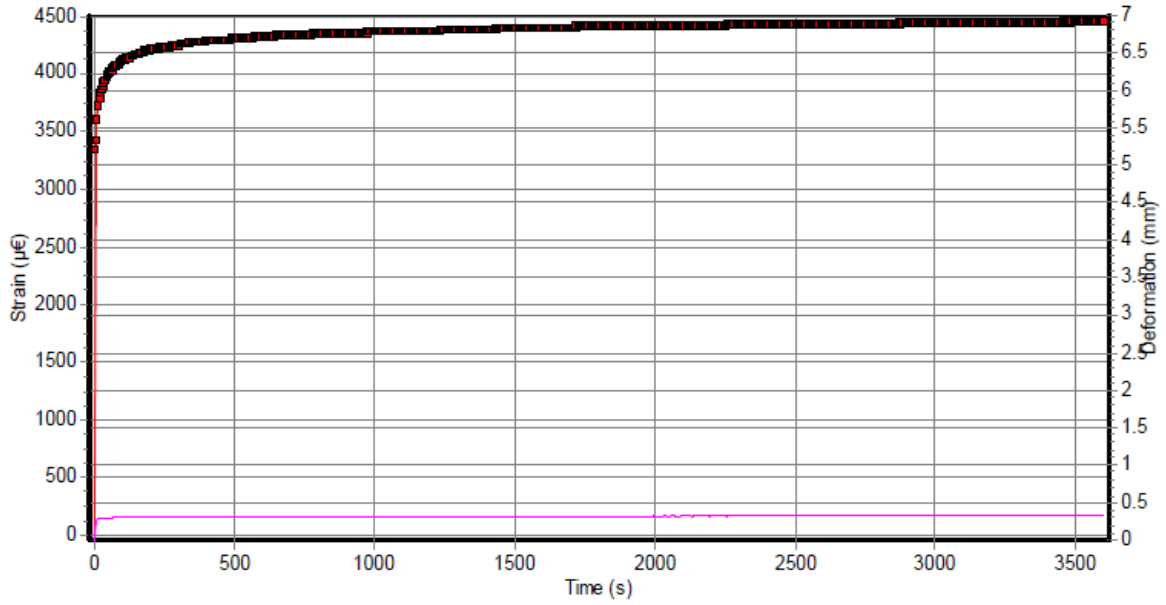
Şekil 4.70: B+%3koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği



Şekil 4.71: B+%4koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği

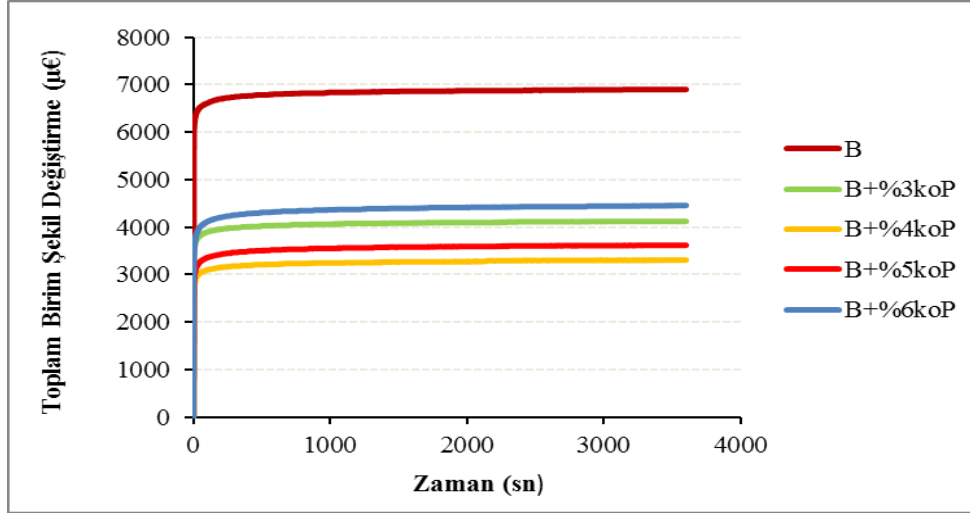


Şekil 4.72: B+%5koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği



Şekil 4.73: B+%6koP karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman - deformasyon grafiği

Saf ve kopolimer katkıli karışım numunelerinin toplam birim şekil değiştirme- zaman-deformasyon grafikleri değerlendirildiğinde, kopolimer katkısıyla numunelerin sabit yükleme altında daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. Tüm numunelere ait toplam birim şekil değiştirme - zaman grafiği Şekil 4.74'te verilmiştir.



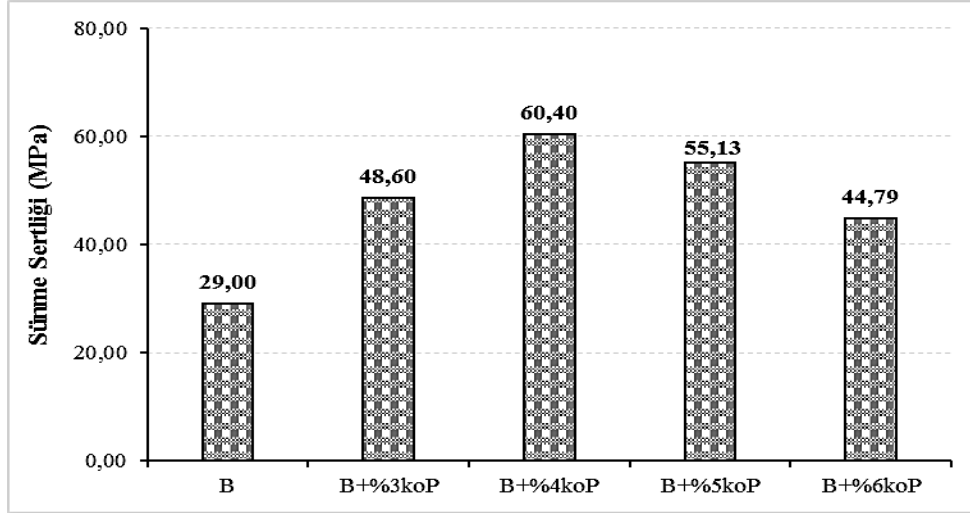
Şekil 4.74: Karışım numunelerin toplam birim şekil değıştirme- zaman grafiği

Şekil 4.74 incelediğinde kopolimer katkısı ile hazırlanan sıcak karışım numunelerinin saf karışıma kıyasla toplam birim şekil değıştirme değeri azaldığı ve daha az deformasyon yapacak şekilde sünme özellikleri gösterdiği görülmektedir.

Karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (R_m) değeri Çizelge 4.27’de, sünme değeri katkı oranı ile değışimi ise Şekil 4.75’te verilmiştir.

Çizelge 4.27: Karışım Numunelerinin R_m Değeri

Karışım	Numune No	Yükseklik (mm)	Sünme Sertliği (R_m)	Ortalama R_m
B	1	65,5	29,46	29,00
	2	65,3	28,75	
	3	65,8	28,78	
B+%3koP	1	66,3	48,23	48,60
	2	66,1	47,98	
	3	65,7	49,59	
B+%4koP	1	65,2	60,87	60,40
	2	66,3	60,43	
	3	65,8	59,91	
B+%5koP	1	66,1	55,34	55,13
	2	66,3	55,62	
	3	65,7	54,43	
B+%6koP	1	65,4	44,71	44,79
	2	65,8	45,06	
	3	65,6	44,60	



Şekil 4.75: Sünme Değerlerinin Katkı Oranı ile Değişimi

Şekil 4.75'e göre, daha sert ve kıvamlı olan kopolimer katkıli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların, B 100/150 bitümlle hazırlanan saf karışıma kıyasla, daha yüksek sünme sertliği değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Kopolimer ilavesi ile modifiye karışım numunelerinin sünme sertliği değeri genel olarak artış göstermiştir. Meydana gelen artış oranları saf karışıma göre sırasıyla %67,6; %108,3; %90,1 ve %54,4 şeklindedir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek sünme sertliği değerine %4koP karışım numunesinde ulaşılmıştır. Kopolimer katkı artışına bağlı olarak, kopolimer katkıli karışım numunelerinin sünme sertliği değerlerinin saf karışıma kıyasla oldukça yüksek çıkması, modifiye karışımların yüksek sıcaklıklardaki tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin çok daha yüksek olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, atık polimerlerden elde edilmiş olan kopolimerin bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılarak sonuçları aşağıda verilmiştir:

1. Saf bitüme kopolimer eklenmesiyle, bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin düzenli olarak azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise düzenli olarak artış gösterdiği görülmüştür. Bağlayıcıların PI değerlerine bakıldığında, %3koP bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığın en az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, kopolimer ilavesi ile bağlayıcıların sertliğinin ve bitümden kaynaklı kalıcı deformasyona karşı direncinin arttığını göstermektedir.

2. RV sonuçlarına göre, kopolimer katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya kıyasla karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında artışlar meydana geldiği ve dolayısıyla plentte karıştırma ve yolda sıkıştırma esnasında daha fazla enerji sarfiyatının olacağı görülmüştür.

3. DSR sonuçlarına göre, kopolimer katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, kopolimer katkısıyla saf bitümün performans derecesinin özellikle %5koP oranında 12 °C yükselerek performans sınıfının PG 58-Y'den PG 70-Y'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, kopolimer katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki kalıcı deformasyon direncini arttırdığını göstermektedir.

4. BBR sonuçlarına göre, kopolimer katkısıyla bağlayıcıların düşük sıcaklık performans derecesi %5koP oranında -6 °C düşmüş olup, performans sınıfı PG X-18'den PG X-24'e ulaşmıştır. Bu durum, kopolimer katkısıyla bağlayıcıların düşük sıcaklıklardaki termal çatlamalara karşı direncinin arttığını göstermektedir.

5. Bağlayıcıların SEM, XRD ve FTIR kimyasal karakterizasyon sonuçları değerlendirildiğinde, kopolimer katkısının bitüm içerisinde homojen olarak dağıldığı ve bitüm ile kopolimer katkısı arasında kimyasal bir etkileşim meydana geldiği görülmüştür

6. Marshall stabilite deney sonuçlarına göre, en yüksek stabilite değerlerine %4koP katkılı karışım numunelerinde ulaşılmıştır. Bu durum, kopolimer katkılı BSK kaplamaların kalıcı deformasyona karşı dirençli olduğunu göstermektedir.

7. RMS deney sonuçlarına göre, kopolimer katkısı ile karışımların nem hasarı dayanımının arttığı ve nem hasarı dayanımının en yüksek olduğu karışımların %5koP katkılı karışımlar olduğu görülmüştür. Bu durumda, kopolimer katkısının bitüm ile agrega arasındaki adezyon kuvvetini üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu ve bu sebeple nem hasarı direncinde ciddi bir artışa sebep olduğu söylenebilir.

8. ITS ve AASHTO T283 deney sonuçlarına göre en yüksek ITSR değeri %5koP katkılı karışımda görülmüştür. Bu durumda kopolimer katkılı karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu ve nem hasarına karşı dirençli olduğu söylenebilir.

9. ITSM deney sonuçlarına göre, kopolimer katkısıyla karışımların sertliğini arttırarak kalıcı deformasyonlara karşı direncini arttırdığı ve direnci en yüksek karışımın %4koP katkılı karışımlar olduğu tespit edilmiştir.

10. Statik sünme deneyi sonuçlarına göre, kopolimer katkılı karışımların saf karışıma kıyasla sünme sertliği değerlerinin büyük oranda arttığı ve en yüksek değer %4koP katkılı karışım numunesinde olduğu görülmüştür. Bu durumda, kopolimer katkılı karışımların tekerlek izi deformasyonlarına karşı oldukça dirençli olduğunu söylenebilir.

Sonuç olarak, atık polimerlerden sentezlenmiş olan kopolimer katkısının bitüm ve karışım modifikasyonunda kullanılmasının bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özelliklerini, karışımların ise mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Kopolimer'in karayolu mühendisliğinde bir katkı malzemesi olarak kullanımının, atık polimerlerin çevreye vermiş olduğu zararı minimuma indirebileceği ve ayrıca ülke ekonomisine bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T. ve Grigoryeva O. (2016). Geri Dönüştürülmüş Atık Polipropilenin Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılması. İMO Teknik Dergi, 2016 7497-7513, Yazı 456
- Ahmedzade P., Fainleib A., Günay T., Kultayev B., Starostenko O., Yüzey Aktivasyonlu Geri Dönüştürülmüş Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 29 (4): 807-816, 2014
- Ahmedzade, P. ve Yılmaz, M. (2007). Stiren-Bütadien-Stiren Modifikasyonunun Bitümlü Bağlayıcıların Isı Duyarlılığı, Rijitlik ve Yaşlanma Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11-3 232-238.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M. ve Yılmaz, M., (2007), Epoksi reçine ile modifiye edilen bitümlerin fiziksel özellikleri üzerinde yaşlanmanın etkisi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2), 147-154.
- Ahmedzade, P., Alataş, T. and Geçkil, T. (2007). The Effect of Carbon Black on The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 25:2 179-189.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., Geçkil, T., (2008). SUPERPAVE Sistemine Göre Uygulama Bölgesine Uygun Bağlayıcı Seçimi: Bingöl Örneği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, Cilt 25, Sayı 4, 338-348.
- Alataş, T. ve Kizirgil, M.E., (2012), Saf ve polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(3), 249-256.
- Al-Hadidy, A. I. ve Tan, Y. Q. (2009). Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements, Construction and Building Materials, 23(8), 2941-2950.
- Al-Hadidy, A.I. ve Yi-qiu, T. (2009). Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements. Materials Design, Vol. 30, Issue 4, 1133-1140.
- Alshamsi, K.S., (2006), Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures, Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, United Kingdom.
- Altaş, Ö.Y., (2002), Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Anonim (2018), PMB- Polimer modifiye bitüm. https://okurmakina.com.tr/download_manager/file/polimer-modifiye-bitum-tesisi-tr
- Anonim (2018), KGM-Karayolları Genel Müdürlüğü “Yol Ağı Bilgileri” İnternet: <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (Ekim 2018).].
- Arslan, D. (2010). Esnek Üstyapıların Performans Özelliklerinin Sentetik Metal ve Polibor Katkı Maddeleriyle Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Asphalt Institute, (1996), Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2, SP-2, Kentucky, USA.
- Atasağun, N., (2009), Piroiliz Yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış çörekotu küspesi ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 12-13.
- Avcı, E., Tıgdemir, M., Özdemir, T., (2009), Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Esnek Üstyapı Kaplama Tabakalarında Performans Araştırması, İzmir Ulaşım Sempozyumu.
- Balta, İ., (2004), Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Berkers, R.F.A., (2005), Influence of Chemical Composition on the Performance of Bitumen, Master’s Degree in Technology Engineering: Civil in the Department of Civil Engineering Tswane University of Technology
- Bilim etiği. (t.y.). Erişim: 07.08.2020 saat 11.30, <http://www.asnud.org.tr/asfalt.php?sayfa=29>
- Chen, J.S., Liao, M.C. and Lin, C.H., (2003), Determination of polymer content in modified bitumen, Materials and Structures, 36, 594-598.
- Choquet, F., (1994). Polymer-modified binder, Belgian Road Research Center, Brüksel,
- Chunfa, O., Shifeng, W., Yong, Z., Yinxi, Z., (2006). Improving the aging resistance of asphalt by addition of Zinc dialkyldithiophosphate, Fuel, 85: 1060–1066
- Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M., (1994), The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays, SHRP-A-407, National Research Council, Washington, DC.
- Çubuk, M., (2007). Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Çubuk, M., Gürü, M. ve Çubuk, M.K., (2011), Politetrafloretilen bileşiğinin bitümün reolojik özelliklerine etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(3), 623-630.
- Dinç, E., (1999), Performans Sınıfı Asfaltlar, Bağlayıcı Özellikleri ve Deneyleri, T.C.K. 16. Bölge Müdürlüğü, Sivas.
- Dinç, E., ve Yazıcı, A., (2000), Superpave Bitüm Deneyleri ve Agregada Gradasyonu, 3. Asfalt Sempozyumu, 16-17 Kasım, Ankara, 161-172.

- Doğan, M., (2006). Effect of Polymer Additives on The Physical Properties of Bitumen Based Composites. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ertekin, S.B., (2003). Polyolefin katkıların asfaltların kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Farzarian S. A. (2013). Polietilen Tereftalat Atıklarının Polimerizasyon İle Elde Edilen Ürünlerinin Asfalt Betonlarında Kullanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Fitzgerald, R.L., (2000), Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Pre-forms, The Degree of Master of Science in Chemical Engineering Michigan Technological University, 70p.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, FJ., Gallegos. C., (2006), Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, Fuel, Vol. 85, Issues 7-8, pp. 936-943.
- Geçkil T., (2008). Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Geçkil, T., (2019). Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer- Modified Bitumen, Materials, 12;6, 921.
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C. B., (2020), Atık PET ile Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Nem Direnci, Politeknik Dergisi, 24(2): 461-471.
- Gershkoff, D. R., Carswell, J., Nicholls, J. C., (1999). Rheological Properties of Polymer-Modified Binders for Use in Rolled Asphalt Wearing Course. Crowthorne: Transport Research Laboratory, Thomas Telford, London, UK.,
- Giriş, Ü., (2007). Esnek Üstyapılar ile Rijit Üstyapıların Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Görkem, İ. Ç., (2014). Orta sıcaklıktaki asfalt karışımlarının performanslarının değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Habib, N. Z., Kamaruddin, I., Napiah, M., Mohd Tan, (2010), Effect of thermoplastic copolymers on microstructure and viscoelastic behaviour of bitumen, In: Malaysians Universities Transportation Research Forum and Conferences, Malaysia,
- Harman, T., D'Angelo, J.A., Bukowski, J., (2002). Superpave: Asphalt Mixture Design Workshop. Federal Highway Administration: Washington D.C.
- Hınıslioğlu, S., Ağar, E., (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, Materials Letters, 58, 267-271.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K., (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- Isacsson, U., Lu, X. H., (1999). Laboratory Investigation of Polymer Modified Bitumens, Journal of the Association of Asphalt Paving Technology, Cilt 68, 35-63.

- Iqbal, M.H., (2004). Influence of Polymer Type and Structure on Polymer Modification of Saudi Asphalt, Master of Science Degree, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudia Arabia, 142s.
- İnce, C.B., (2019). Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (Pet)'in Bitüm Ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, (2001). Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 280s.
- Karakuzu, K. (2016). Bağlayıcı ve Çevresel Etkilerin Ilık Asfalt ve Bitümlü Sıcak Karışımların Maliyetleri Üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kaya, D. ve Topal, A., (2016). Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İrdelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(2), 289-302.
- Kaya, M., (2011) Türkiye Coğrafi Bölgeleri İçin Bitümlü Bağlayıcıların Performans Derecelerinin Belirlenmesi ve Sbs Katkılı Gözlem Yolu Yapılması. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., Gökçe, A.F., (1979). Bitümlü Malzemeler El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Daire Başkanlığı, Ankara,
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Quintus, H.V., Moulthrop, J.S., (1994), Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington, DC
- Keyf, S., (2010), SBS ve reaktif terpolimer ile modifiye edilmiş bitümde penetrasyon ve penetrasyon indeksinin incelenmesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 28, 26-34.
- KTŞ, (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kuloğlu, N., (2000), Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler, Tübitak, s.61-67.
- Kurtis, K., (2003), Asphalt and Asphalt Concrete, Scholl of Civil Engineering Georgia Institute Technology, Atlanta, Georgia, pp. 14-18.
- Lavin, P. G., (2003). Asphalt Pavements, Spon Press, London and New York, 2, 8, 21-27, 188.
- Lu, X. ve Isacson, U., (2001), Modification of road bitumens with thermoplastic polymers, 77-86.
- Malkoç, G., (2002), Yol üstyapılarında kullanılan modifiye asfaltlar ve modifiye bitüm şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U., (1994), Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington.

- McGennis, R.B., Anderson, R.M., Kennedy, T.W., Solaimanian, M., (1995), Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-95-003.
- Orhan, F., (2000). Asfaltın Geleceği Superpave, 3. Asfalt Sempozyumu, 16-17 Kasım, 146-160, Ankara.
- Orhan, F., (2005). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 10-24.
- Orhan, F., (2009), Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 23.
- Önal, M.A. ve Kahramangil, M., (1993), Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı, KGM Yayınları, Ankara,
- Özcan Ş., (2008) Polipropilen Fiber Katkısının Bitümlü Karışımların Statik Sünme Davranışına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir,
- Öztürk, E.A., Çubuk, M.K., (2004). Karayolu Esnek Üstyapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem: Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Cilt 19, Sayı 2, 175-184.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J. ve Gallegos, C. (2007). High temperature stability of different polymer-modified bitumens: A rheological evaluation, Journal of Applied Polymer Science, 103, 1166–1174.
- Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F. J., Gallegos, C., Gonzalez, O., Munoz, M. E., ve Santamaria A., (2003). Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-modified Bitumen, Fuel, Cilt 82, No 11, 1339-1348.
- Polacco G, Berlincioni S, Biondi D, Stastna J, Zanzotto L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers, Eur Polym J. 41(12), 2831-44.
- Sağlık A., (2009). Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı İçin Performans Sınıflarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Sangita, T., Alam K., Sabina, D.K. Sharma R. (2011). Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes, Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 10, 3841-3848.
- Sengöz B. ve Işıkyakar G. (2008), Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. Construction and Building Materials, 22 (9): 1897-1905
- Şengoz B., Topal A., Işıkyakar G., (2009). Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. Construction and Building Materials, 23 (5), 1986-1992
- Sybilski, D., (1994). Relationship between absolute viscosity of polymer modified bitumens and rutting resistance of pavement, Material and Structures, 27, 110-120
- Tanzadeh, R. ve Shafabakhsh, G. (2020). Surface free energy and adhesion energy evaluation of modified bitumen with recycled carbon black (micro-nano) from gases and petrochemical waste. Construction and Building Materials, 245, 118361.

- Tapkın, S., (1998), Improved asphalt aggregate mix properties by portland cement modification, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tapkın, S., Uşar, Ü., Tuncan, A., Tuncan, M., (2009), Repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures, Journal of Transportation Engineering, 204-249.
- Terzi, S., (2000), Mermer toz atıkların asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bil. Enstitüsü, Isparta.
- Torun S., (2015). Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Pr Plast S Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Tunç, A., (2001). Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas, İstanbul, Türkiye.
- Tunç, A., (2004). Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti, Ankara,
- Tunç, A., (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 840s.
- Uluçaylı, M., (1998). Modifiye bitüm ve modifikasyon katkılarının kullanımı, 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 15-29.
- Uluçaylı, M., (1998), Superpave ve Fransız Bitüm Şartnameleri, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, s.118-129.
- Umar, F., Açar, E., (1991), Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul
- Uşar Ü., (2007). Polipropilen Fiber Katkılı Yoğun Bitümlü Karışımların Tekrarlı Sünme Deneyindeki Reolojik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- Whiteoak, D., (2004), Shell Bitüm El Kitabı, Editörleri, Lav, A., H., Lav, M., A., İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.
- Whiteoak, D., Read, J., (2003), The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford Lti., London.
- Yamaç, Ö.E., (2015). Stiren-Butadien-Stiren Ve Gilsonit'in Birlikte Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yelken, F., (2009). Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yılmaz, M., Ahmedzade, P., (2008), Saf ve SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmadan sonraki özelliklerinin iki farklı yaşlandırma yöntemi kullanılarak incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(3), 569-575.
- Yousefi, A. A., (2004). Rubber-Polyethylene modified bitumens, Iranian Polymer Journal, 13(2), 101-112.
- Zaniewski, J.P., Nallamothe, S.H., (2003), Evaluation of Binder Grades on Rutting Performance, Asphalt Technology Program Department of Civil and Environmental Engineering Morgantown, West Virginia.

- Zaniewski, J.P., Padula, M., (2003), Automation of the Superpave Mix Design Process for the West Virginia Division of Highways, Asphalt Technology Program, West Virginia
- Zaniewski, J.P., Pumphrey, M.E., (2004), Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown.
- Zeng, H., Isacson, U., (1997), Relationships Between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behavior of Asphalt, Royal Institute of Technology, Elsevier PII: S0950- 0618(97) 00008-1, Stockholm, Sweeden, pp.4-9.
- 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, 233-242.



ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013,Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2021,İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

MESLEKİ DENEYİM:

2013-2014	Şantiye Şefi	HMC Yapı, Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü 82. Şube sınırları içerisindeki Yol Bakım ve Onarım İşleri'nin şantiye şefliğini yürüttüm. (Ticari (Özel))
2014-2015	İnce İşler Kısım Şefi	Çelikler Holding, Çelikler Holding uhdesinde Ankara/Çankaya'da yapılan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hizmet Binası projesinde İnce İşler Kısım Şefi olarak görev yaptım. (Ticari (Özel))
2017-Dev. Ed.	Öğretim Görevlisi	Munzur Üniversitesi/Çemişgezek Meslek Yüksekokulu/İnşaat Bölümü/İnşaat Teknolojisi PR.)
2018-Dev. Ed.	Bölüm Başkanı	Munzur Üniversitesi/Çemişgezek Meslek Yüksekokulu/İnşaat Bölümü
2020-Dev. Ed.	MYO Müdür Yardımcısı	Munzur Üniversitesi/Çemişgezek Meslek Yüksekokulu

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaller, Bildiriler, Patentler v.b.)

- Geçkil, T., Demirelli, K., Öbek, A. (2020, Aralık). Geri dönüşümlü polipropilen katkıli kopolimerin saf bitümün işlenebilirlik özelliklerine etkileri, 7. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Güncel Gelişmeler Kongresi Bildiriler Kitabı, 3. Cilt, pp. 227-237, Bakü.
- Öbek, A., Geçkil, T., Demirelli, K., İnce, C.B., (2021, Mart). Atık polipropilenden sentezlenen kopolimerin asfalt kaplamaların deformasyon direncine etkisi, 14. Uluslararası Matematik-Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi Bildiriler Kitabı, pp. 163-171, Macaristan.

