

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ KAZANILMIŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)'İN BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

CEREN BEYZA İNCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2019

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİ KAZANILMIŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)'İN BİTÜM VE
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

CEREN BEYZA İNCE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2019

Tezin Başlığı : ‘Geri Kazanılmış Polietilen Tereftalat (PET)’ın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması’

Tezi Hazırlayan : Ceren Beyza İNCE

Sınav Tarihi : 17.10.2019

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

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

İnönü Üniversitesi

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Yüksel ESEN

Fırat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ

İnönü Üniversitesi



Prof.Dr. Kazım TÜRK

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum başlıklı bu çalışmanın 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.

Ceren Beyza İNCE



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GERİ KAZANILMIŞ POLİETİLEN TEREFTALAT (PET)'İN BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

CEREN BEYZA İNCE

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

115+xvi sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL

Bu çalışmada; geri dönüşüm yoluyla elde edilmiş Polietilen Tereftalat (PET)'in bir katkı maddesi olarak bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla, B 70/100 penetrasyon sınıflı saf bitüme, bitüm ile PET arasında iyi bir etkileşim sağlamak amacıyla ilk olarak bitüm ağırlığının %2,5'i kadar Trietanolamin (TEO) ilave edilmiştir. Daha sonra bitüm ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında PET eklenerek modifikasyon işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen bağlayıcıların fiziksel özellikleri geleneksel testlerle, reolojik özellikleri ise dinamik kayma reometresi (DSR), kırılgan eğme reometresi (BBR) ve dönel viskozimetre (RV) deneyleri ile belirlenmiştir. Bağlayıcıların SEM, XRD ve FTIR Spektroskopisi analizleri incelenmiştir. Marshall karışım dizayn yöntemi ile bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde Marshall Stabilitesi, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Esneklik modülü (ITSM), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) ve Sünme sertliği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre; PET'in TEO yardımıyla bitümle reaksiyona girdiği, katkı miktarının artmasıyla belirli bir aşamada bitümü sertleştirdiği, ancak sonra tekrar yumuşamaya başladığı görülmüştür. PET katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre sertleşmelerine rağmen, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının önemli ölçüde değişmediği, yüksek ve düşük sıcaklık performans sınıflarının sabit kaldığı görülmüştür. Karışım testleri sonucunda Marshall stabilitesi ve ITSM değerleri %6PET katkılı karışımlarda en yüksek, RMS, dolaylı çekme dayanımı oranı ve sünme sertliği değerleri %8PET katkılı karışımlarda en yüksek bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Bitüm, Polietilen Tereftalat (PET), Modifiye Bitüm, Bitümlü Sıcak Karışım, Marshall Stabilitesi

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) ON PROPERTIES OF BITUMEN AND HOT MIX BITUMINOUS

CEREN BEYZA İNCE

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

115+xvi pages

2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tacettin GEÇKİL

In this study; the effects of polyethylene terephthalate (PET) obtained by recycling on bitumen and bituminous hot mixtures as an additive were investigated.

For this purpose, 2.5% Triethanolamine (TEO) by weight of bitumen was added to pure bitumen having penetration class B 70/100 in order to provide a good interaction between bitumen and PET. Subsequently, the modification was completed by adding 2%, 4%, 6%, 8% and 10% PET based on the weight of bitumen. The physical properties of the obtained binders were determined by conventional tests, rheological properties were determined by dynamic shear rheometer(DSR), beam bending rheometer(BBR) and rotational viscometer(RV) tests. SEM, XRD and FTIR Spectroscopy analyzes were investigated of binders. Samples were prepared by Marshall mix design method using modified binders. Marshall Stability, Permanent Marshall Stability (RMS), Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM), Indirect Tensile Strength (ITS) and Creep Stiffness tests were performed on the samples.

According to the results obtained; it has been observed that the PET additive reacts with bitumen with the help of TEO, and in the certain stage hardens bitumen with increasing amount of additive, but then softens again. Although the PET-added binders harden with respect to the pure binder, the mixing and compression temperatures did not change significantly and the high and low temperature performance classes

remained constant. As a result of the mixture tests, Marshall stability and ITSM values were found to be highest in 6% PET mixtures, RMS, indirect tensile strength ratio and creep stiffness values were highest in 8% PET mixtures.

KEYWORDS: Bitumen, Polyethylene Terephthalate (PET), Modified Bitumen, Bituminous Hot Mix, Marshall Stability,



TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmamın her aşamasında bana yol göstericilik yapan, maddi ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim danışman hocam Doç. Dr. Tacettin GEÇKİL'e ve ikinci danışmanım olan Doç. Dr. Yunus ÖNAL'a katkılarından dolayı gönülden teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emeği olan değerli aile büyüğüm Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye, deneysel çalışmalarımın bir kısmı için Fırat Üniversitesi ulaştırma laboratuvarını kullanmamı sağlayan ve çalışmalarımda yardımcı olan hocam Prof. Dr. Mehmet YILMAZ 'a, bugünlere kadar gelmemde desteğini esirgemeyen, bilgilerinden her daim yararlandığım abim İnş.Müh. Doğan İNCE'ye minnetlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımda yol göstericilik yapan laboratuvar teknisyeni İlhami Baysal'a, deneysel çalışmalarımdaki süreçte desteğini ve yardımını esirgemeyen arkadaşım İnş.Müh. Semih İSSİ'ye ve İnş.Müh. Fatma Zehra KIZILET'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yıllardır bana her konuda daima destek olan, dualarını esirgemeyen değerli anne ve babama sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ceren Beyza İNCE

Malatya - 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR.....	3
2.1 Bitümlü Sıcak Karışımda Kullanılan Agregalar.....	3
2.1.1. Minerolojik Yapı.....	3
2.1.2. Boyut.....	4
2.1.3. Gradasyon.....	4
2.1.4. Porozite.....	5
2.1.5. Yüzey Alanı ve Boşluk Oranı.....	5
2.1.6. Yüzey Yapısı ve Biçimi.....	5
2.2. Agregalara Uygulanan Deneyler.....	5
2.2.1. Elek Analizi Deneyi (ASTM C131, TS 1900).....	5
2.2.2. Aşınma (Los Angeles) Deneyi (AASHTO T96, TS EN 1097-2).....	6
2.2.3. Özgül Ağırlık Deneyi (TS EN 1097-6).....	6
2.2.4. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (AASHTO T 104).....	7
2.2.5. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8).....	7
2.2.6. Su Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (ASTM D 1664).....	7
2.2.7. Yassılık ve İncelik-Uzunluk Tayini Deneyi (BS 812).....	8
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımda Kullanılan Bağlayıcılar.....	8
2.3.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı.....	9
2.3.2. Asfaltın Reolojik Davranışı.....	11
2.4. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler.....	12
2.4.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118, TS EN 1426, ASTM D5).....	12
2.4.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120, TS EN 1427, ASTM D36).....	13
2.4.3. Düktülite Deneyi (TS 119, TS EN 12589).....	13
2.4.4. Parlama Noktası Deneyi.....	14
2.4.5. Dönel İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi (RTFOT).....	14
2.4.6. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV).....	15

2.4.7	Özgöl Ağırlık Deneyi (TS 187).....	15
2.5.	Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler.....	16
2.5.1.	Stabilite.....	16
2.5.2.	Durabilite.....	16
2.5.3.	Geçirimsizlik	16
2.5.4.	İşlenebilirlik.....	16
2.5.5.	Esneklik.....	17
2.5.6.	Yorulmaya Karşı Direnç	17
2.5.7.	Kaymaya Karşı Direnç.....	17
2.6.	Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar	17
2.6.1.	Tekerlek İzi Oluşumu.....	17
2.6.2.	Yorulma Çatlakları.....	18
2.6.3.	Düşük Isı Çatlakları.....	18
2.6.4.	Kusma.....	19
2.7.	Bitümlü Sıcak Karışımların Dizayn Yöntemleri	20
2.7.1.	Superpave Dizayn Yöntemi.....	20
2.7.1.1.	Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)	24
2.7.1.2.	Dinamik Kesme Reometresi Deneyi (DSR).....	25
2.7.1.3.	Kiriş Eğme Reometresi Deneyi (BBR)	27
2.7.1.4.	Doğrudan Çekme Deneyi (DDT)	29
2.7.2.	Marshall Dizayn Yöntemi.....	29
2.8.	Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler	30
2.8.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (TS EN 12697-34)	30
2.8.2.	Kalıcı Marshall Stabilesi (Retained Marshall) (RMS)	31
2.8.3.	Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi	31
2.8.4.	Modifiye Lottman Deneyi (AASHTO T 283)	33
2.8.5.	Dolaylı Çekme Esneklik Modülü Deneyi (ITSM).....	34
2.8.6.	Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi.....	35
2.8.7.	Sünme Deneyi.....	36
2.9.	Malzemelerin Karakterizasyonu.....	38
2.9.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	38
2.9.2.	X- Işını Kırınımı (XRD).....	39
2.9.3.	FTIR.....	39
3.	BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU.....	40

3.1.	Modifikasyonun Amacı.....	40
3.2.	Modifikasyon İçin Kullanılan Katkı Maddeleri	40
3.3.	Plastikler.....	41
3.4.	Geri Kazanım	42
3.5.	Polietilen Tereftalat (PET)	43
3.5.1.	PET' in Kimyasal Yapısı	44
3.6.	Literatür Çalışmaları.....	45
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI.....	49
4.1.	Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi.....	49
4.2.	Agrega Seçilmesi.....	50
4.3.	Kullanılan Katkı ve Kimyasal Madde	50
4.4.	Modifiye Bitümlerin Hazırlanması.....	51
4.5.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları	52
4.5.1.	Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	52
4.5.2.	Bağlayıcıların Yaşlandırılması	56
4.6.	Bağlayıcıların Performans Deneyleri.....	60
4.6.1.	Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi.....	60
4.6.2.	Dinamik Kesme Reometresi (DSR) Deneyi.....	64
4.6.3.	Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi.....	72
4.7.	Bitümlü Sıcak Karışımların Deney Sonuçları	73
4.7.1.	Marshall Numunelerinin Hazırlanması.....	74
4.7.2.	Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması.....	76
4.8.	Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri.....	83
4.8.1.	Marshall Stabilite ve Akma Deneyi.....	83
4.8.2.	Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS).....	86
4.8.3.	ITS Deneyi.....	88
4.8.4.	ITSM Deneyi.....	91
4.8.5.	Sünme Deneyi.....	93
4.9.	Bağlayıcıların Karakterizasyonu.....	99
4.9.1.	SEM.....	99
4.9.2.	XRD.....	101
4.9.3.	FTIR.....	105
5.	SONUÇLAR.....	110
6.	KAYNAKLAR.....	112
	Özgeçmiş.....	115

SİMGELER ve KISALTMALAR

BSK	: Bitümlü sıcak karışım
PET	: Polietilen Tereftalat
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 halinde ısıtma deneyi
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kaybı
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 katsayısı
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)

Wb	: Karışım içindeki bağlayıcı yüzdesi
Gb	: Bağlayıcının özgül ağırlığı
Dt	: Karışımın teorik özgül ağırlığı
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi
Vf	: VMA'nın bağlayıcıyla doluluk oranı
Gsa	: Agregaların zahiri özgül ağırlığı
Gse	: Agregaların efektif özgül ağırlığı
Sm	: Bitümlü sıcak karışımın rijitlik (sertlik) modülü
ITS	: Bitümlü sıcak karışımın dolaylı çekme dayanımı
G*	: Bitümlü bağlayıcı kompleks kayma modülü
δ	: Bitümlü bağlayıcı faz açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Agrega gradasyon tipleri.....	4
Şekil 2.2.	Elek analizi deney düzeneği.....	6
Şekil 2.3.	Ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen asfaltlar.....	9
Şekil 2.4.	Asfaltın yapısı ve bileşenleri.....	10
Şekil 2.5.	Bitümün farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi.....	11
Şekil 2.6.	Bitümün sıcaklıkla değişimi.....	11
Şekil 2.7.	Penetrasyon cihazı.....	12
Şekil 2.8.	Yumuşama noktası cihazı.....	13
Şekil 2.9.	Düktülite cihazı.....	13
Şekil 2.10.	Parlama noktası cihazı.....	14
Şekil 2.11.	RTFOT cihazı (a), PAV cihazı (b).....	15
Şekil 2.12.	Tekerlek izi.....	18
Şekil 2.13.	Yorulma çatlağı.....	18
Şekil 2.14.	Kaplamada meydana gelen gerilmeler ve düşük sıcaklık çatlakları...	19
Şekil 2.15.	Düşük ısı çatlaklarının büyümesi.....	19
Şekil 2.16.	Asfaltta kuma.....	19
Şekil 2.17.	Sıcaklık-Viskozite grafiği.....	24
Şekil 2.18.	RV cihazı (a), numunelerin doldurulduğu tüpler(b).....	24
Şekil 2.19.	DSR cihazı ve hazırlanan numuneler.....	25
Şekil 2.20.	DSR deneyinde numunelere uygulanan deformasyonlar ve yönleri	26
Şekil 2.21.	Bağlayıcının viskoelastik davranışı.....	26
Şekil 2.22.	Viskoelastik malzemenin gerilme-deformasyon ilişkisi.....	27
Şekil 2.23.	BBR cihazı, kalıplar ve hazırlanan numuneler.....	28
Şekil 2.24.	m değerinin belirlenmesi.....	28
Şekil 2.25.	Marshall Stabilite ve Akma Cihazı.....	31
Şekil 2.26.	(a) ITS deneyi yükleme durumu, (b) Kırılmış numune	32
Şekil 2.27.	(a) ITSM Deneyi, (b) Şematik görünüş.....	34
Şekil 2.28.	ITSM deney düzeneği.....	35
Şekil 2.29.	Sünme deneyi uygulanan numune	37
Şekil 2.30.	SEM cihazı.....	38
Şekil 2.31.	XRD cihazı.....	39
Şekil 2.32.	FTIR cihazı.....	39
Şekil 3.1.	Dünyada plastik sektörünün gelişimi.....	43

Şekil 3.2.	PET molekül yapısı	44
Şekil 3.3.	Dimetilentereftalat ve etilen glikol yöntemi.....	45
Şekil 4.1.	Karıştırma cihazı.....	51
Şekil 4.2.	Max. 0,3mm PET (a), Bitüme PET eklenmesi (b).....	52
Şekil 4.3.	Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri.....	53
Şekil 4.4.	Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri.....	54
Şekil 4.5.	Bağlayıcıların düktülite değişimleri.....	54
Şekil 4.6.	PI değerinin katkı oranı ile değişimi.....	56
Şekil 4.7.	Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim.....	57
Şekil 4.8.	RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimi.....	58
Şekil 4.9.	RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimi.....	58
Şekil 4.10.	RTFOT sonrası PI değerinin katkı oranı ile değişimi.....	59
Şekil 4.11.	Bağlayıcıların 135 C° ve 165 C° sıcaklıkla viskozitelerinin değişimi	61
Şekil 4.12.	Bağlayıcıların viskozite-sıcaklık ilişkisi.....	62
Şekil 4.13.	Bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri.....	63
Şekil 4.14.	Orijinal bağlayıcıların kayma modülün (G*) sıcaklıkla değişimi.....	65
Şekil 4.15.	Orijinal bağlayıcıların faz açısının (δ) sıcaklıkla değişimi.....	66
Şekil 4.16.	Orijinal bağlayıcıların G*/sin δ değerinin sıcaklıkla değişimi.....	67
Şekil 4.17.	RTFOT sonrası bağlayıcıların G*değerinin sıcaklıkla değişimi.....	68
Şekil 4.18.	RTFOT sonrası bağlayıcıların faz açısı değerinin sıcaklıkla değişimi	68
Şekil 4.19.	RTFOT sonrası bağlayıcıların G*/sin δ değerinin sıcaklıkla değişimi	69
Şekil 4.20.	PAV sonrası bağlayıcıların kayma modülünün sıcaklıkla değişimi...	70
Şekil 4.21.	PAV sonrası bağlayıcıların faz açısı değerinin sıcaklıkla değişimi...	71
Şekil 4.22.	PAV sonrası bağlayıcıların G*/sin δ değerinin sıcaklıkla değişimi....	72
Şekil 4.23.	Karıştırma cihazı.....	74
Şekil 4.24.	Marshall tokmağı.....	75
Şekil 4.25.	Numunelerin krikoyla çıkarılması.....	75
Şekil 4.26.	Marshall stabilite ve akma cihazı.....	76
Şekil 4.27.	Dp- Bitüm %'si.....	80
Şekil 4.28.	Stabilite-Bitüm %'si ilişkisi.....	80
Şekil 4.29.	Akma- Bitüm %'si.....	80
Şekil 4.30.	Vh- Bitüm %'si.....	81
Şekil 4.31.	VMA- Bitüm %'si.....	81
Şekil 4.32.	Vf- Bitüm %'si.....	81
Şekil 4.33.	Kontrol numunesine ait sonuçlar.....	82

Şekil 4.34.	Stabilitenin katkı miktarı ile değişimi.....	85
Şekil 4.35.	Akma- katkı miktarı değişimi.....	85
Şekil 4.36.	Karışımların MQ-katkı miktarı değişimi.....	86
Şekil 4.37.	RMS değerinin katkı oranına göre değişimi.....	87
Şekil 4.38.	Numunelere vakum yapılması (a), Streç film ile sarılması (b).....	88
Şekil 4.39.	Numunelerin su banyosunda bekletilmesi(a), kırılması (b).....	89
Şekil 4.40.	Karışımların ITS değerinin katkı oranı ile değişimi.....	90
Şekil 4.41.	Karışımların ITSr değerinin katkı oranı ile değişimi.....	91
Şekil 4.42.	Karışımların ITSM değerinin katkı oranı ile değişimi	93
Şekil 4.43.	Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	94
Şekil 4.44.	B+%2PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	94
Şekil 4.45.	B+%4PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	95
Şekil 4.46.	B+%6PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	95
Şekil 4.47.	B+%8PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	96
Şekil 4.48.	B+%10PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği.....	96
Şekil 4.49.	Numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği.....	97
Şekil 4.50.	Numunelerin sünme sertliği modülü değişimi.....	98
Şekil 4.51.	Bağlayıcıların SEM görüntüleri.....	100
Şekil 4.52.	B70/100 saf bitümün XRD görüntüsü.....	101
Şekil 4.53.	Saf+TEO XRD görüntüsü.....	102
Şekil 4.54.	Saf+TEO+%2PET XRD görüntüsü	102
Şekil 4.55.	Saf+TEO+%4PET XRD görüntüsü	103
Şekil 4.56.	Saf+TEO+%6PET XRD görüntüsü	103
Şekil 4.57.	Saf+TEO+%8PET XRD görüntüsü	104
Şekil 4.58.	Saf+TEO+%10PET XRD görüntüsü	104
Şekil 4.59.	Saf bitüm FTIR.....	105
Şekil 4.60.	Saf+ TEO FTIR.....	106
Şekil 4.61.	Saf+ TEO+ %2PET FTIR.....	106
Şekil 4.62.	Saf+ TEO+ %4PET FTIR	107
Şekil 4.63.	Saf+ TEO+ %6PET FTIR	107
Şekil 4.64.	Saf+ TEO+ %8PET FTIR	108
Şekil 4.65.	Saf+ TEO+ %10PET FTIR	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	100 penetrasyona sahip bitümün element içeriği.....	10
Çizelge 2.2.	Geleneksel asfalt bağlayıcı deney yöntemleri.....	12
Çizelge 2.3.	Superpave deneyleri ve kullanım amaçları.....	21
Çizelge 2.4.	Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi.....	22
Çizelge 3.1.	Modifiyer maddeleri.....	41
Çizelge 3.2.	Geri dönüşümde kullanılan kodlar.....	43
Çizelge 3.3.	PET kimyasal özellikleri.....	45
Çizelge 4.1.	B70/100 penetrasyonlu bitümün deney sonuçları.....	49
Çizelge 4.2.	Agrega gradasyonu.....	50
Çizelge 4.3.	Agrega fiziksel özellikleri.....	50
Çizelge 4.4.	PET'in özellikleri.....	51
Çizelge 4.5.	TEO'nun özellikleri.....	51
Çizelge 4.6.	Bağlayıcılara uygulanan geleneksel test sonuçları.....	53
Çizelge 4.7.	PI sonuçları.....	55
Çizelge 4.8.	Bağlayıcıların kütle kayıpları.....	57
Çizelge 4.9.	Yaşlandırılmış numunelerin penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları.....	58
Çizelge 4.10.	Yaşlandırılmış numunelerin PI değerleri.....	59
Çizelge 4.11.	Bağlayıcıların RV sonuçları.....	61
Çizelge 4.12.	Bağlayıcıların karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları.....	63
Çizelge 4.13.	Orijinal bağlayıcıların DSR sonuçları.....	65
Çizelge 4.14.	RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları.....	67
Çizelge 4.15.	PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları.....	70
Çizelge 4.16.	Bağlayıcıların BBR deney sonuçları.....	73
Çizelge 4.17.	B 70/100 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları.....	79
Çizelge 4.18.	Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler.....	82
Çizelge 4.19.	Performans deneylerinde kullanılan numune sayıları.....	83
Çizelge 4.20.	PET katkılı karışım numunelerinin Marshall stabilite ve akma değerleri.....	84
Çizelge 4.21.	Karışımların RMS değerleri.....	87
Çizelge 4.22.	Karışımların ITS ve ITSr değerleri.....	90
Çizelge 4.23.	Karışımların ITSM deney sonuçları.....	92
Çizelge 4.24.	Numunelerin sünme sertliği modülü değerleri.....	98

1. GİRİŞ

Doğal kaynakların tüketilmesi ve atık maddelerin giderek artmasıyla geri dönüşüm son yıllarda büyük önem kazanmaya başlamıştır. Doğrudan doğal kaynakları tüketmek yerine biriken atık maddeleri geri dönüşüme uğratarak tekrar kullanmak; hem çevre kirliliğini büyük oranda azaltacak, hem de maliyet açısından ülkemize büyük faydalar sağlayacaktır.

Geri dönüşüm işlemi günümüzde sadece kimya endüstrisinde değil inşaat sektöründe de kullanılmaya başlamıştır. İlerleyen teknolojiyle birlikte her gün yeni bir malzemenin üretilmeye çalışılması, teknolojik olarak ilerleme konusunda fayda sağlarken bu ürünlerin üretimi aşamasında oldukça maliyetli hesaplar da ortaya çıkarmaktadır. Gelişen teknoloji bizlere faydalar getirdiği gibi maddi açıdan da olumsuz yanları beraberinde getirmektedir.

Bir yol inşasında kullanılan malzemeler agrega ve asfalttır. Bu iki temel malzeme her ne kadar doğal şekilde elde edilse de, zamanla kaynakların tükenmeye başlaması bizleri alternatif yollar aramaya itecektir.

Tüketici bir topluma dönüşmemiz kirlilik gibi sorunları da beraberinde getirmeye başlamıştır. Şu aşamada hem kirliliğin önüne geçebilmek hemde doğal kaynakların daha yavaş tüketilmesinin önüne geçebilmede en büyük rol geri dönüşüm işinde başarılı bir yol alabilmekten geçmektedir.

Günümüz asfalt teknolojisinde geri dönüşüm malzemeleri uzun zamandır kullanılmaya başlamıştır. Bu amaçla yeni teknikler üzerinde çalışılmakta ve malzeme açısından da yenilikler ortaya konmaktadır [1].

Son yıllarda bitümlü sıcak karışımlara, hem maliyet hemde kalite açısından faydalı olduğu düşünülen katkı maddeleri eklenmektedir. Bu katkı maddelerinin kaplamada hizmet ömrünü, stabilitesi, performansını, işlenebilirliğini, her türlü hava koşullarındaki dirençlerine karşı gösterdikleri davranışı incelenmesi gereken en önemli konulardandır [2].

Bu tez çalışmasında, geri dönüşüm yoluyla elde edilmiş polietilen tereftalat (PET)'in bitüm ve bitümlü sıcak karışımların (BSK) özelliklerine etkisi araştırılmıştır. PET, modifikasyon işleminde polimer grubu bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Asfalta eklenen polimer maddeyle elde edilen modifiye asfaltta stabilite, hizmet ömrü ve maliyet mühendislik açısından dikkat edilen en önemli unsurlardır.

Bu amaçla; çalışmanın ikinci bölümünde yer alan bitümlü sıcak karışımlar ve bu karışımları oluşturan agrega ve bitümler hakkında geniş bir bilgi verilmiştir. Kaplamadan beklenen özellikler, istenilen performans, oluşan bozulmalar ve uygulanan deneylere değinilerek bitümlü sıcak karışımların önemi vurgulanmıştır. Ayrıca PET katkılı bağlayıcıların karakterizasyonuna da bu bölümde yer verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek modifiye maddeler, bunların etkileri ve genel olarak plastiklerden bahsedilmiştir. Plastiklerin günlük hayattaki kullanım alanları ve geri dönüşüm konularında da bahsedilerek çalışmada kullanılacak olan malzemeye geçiş yapılmıştır. Bu aşamadan sonra çalışmanın asıl konusu olan PET'in özelliklerine geçilmiş ve daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise uygulama kısmına geçilmiş olup; ilk olarak saf bağlayıcının fiziksel özellikleri belirlenmiş ve daha sonra seçilen agrega gradasyonu hakkında bilgiler verilmiştir. Katkı malzemesi olarak PET kullanılarak modifiye bağlayıcılar hazırlanması ve bağlayıcılara performans deneylerinin uygulanması alt başlıklarda detaylı olarak verilmiştir. Daha sonra Marshall dizayn yöntemi çerçevesinde yapılmış deneysel çalışmalar anlatılarak, optimum bitüm muhtevası bulunmuş ve bu aşamadan sonra karışım numuneleri hazırlanarak, numuneler üzerinde uygulanmış performans deneyleri ve deney sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise yapılan tüm deneysel çalışmalar değerlendirilip genel olarak yorumlanmıştır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Günümüzde ülkemiz karayolları kaplama yapımında en fazla kullanılan kaplama çeşidi esnek kaplamalardır. Esnek kaplamalar, yapımları daha kolay ve çabuk, yapım maliyetleri daha uygun ve her seviyedeki trafik hacmine hizmet verecek şekilde çok farklı tipte imal edilebilmesi sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir. Esnek kaplamalar alt temel, temel ve kaplama tabakası olarak inşaa edilmektedir. Esnek kaplamaların yapımında belirlenmiş olan agrega gradasyonu ve uygun oranda bitümlü bağlayıcı kullanılmaktadır. Asfalt plantinde 160⁰C'ye kadar ısıtılan agreganın bitüm ile karıştırılmasıyla bitümlü sıcak karışım (BSK) elde edilmektedir. Oluşan karışımlarda; agrega % 93- 95, bitüm ise %5- 7 aralığında bir oranda kullanılmaktadır [3]. BSK kullanılarak yapılan kaplamalarda, kaplama performansını doğrudan etkileyen agrega ve bitümün fiziksel özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. BSK'ların ağırlıkça %5- 7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturan bitümler, agrega daneleri ile birleştğinde birbirine bağlanarak ve düzgün kaplama yüzeyi oluşturarak yük altındaki kaplamanın dağılmasını önler, sürüş konforu sağlar ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliği sağlarlar [1].

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Agrega

BSK'ların ağırlıkça %90- 95 oranında oluşturan agregalar kırmataş, dere malzemesi, cüruf ve atıklardan oluşan taneli malzemelerdir. Kullanılan agreganın mekanik özellikleri kaplamanın performansını büyük oranda etkilemektedir. Karışımda kullanılacak agreganın fiziksel özelliklerinin bilinmesi kaplamanın yapısı hakkında birçok bilgi sunmaktadır. Agreganın boyutu, mineralojik yapısı, biçimi, yüzeyi, porozluluğu, gradasyonu, özgül ağırlığı, yüzey alanı ve boşluk oranı hakkında bilgi sahibi olmak agregaların yapısının karışım için uygun olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir [4].

2.1.1. Mineralojik Yapı

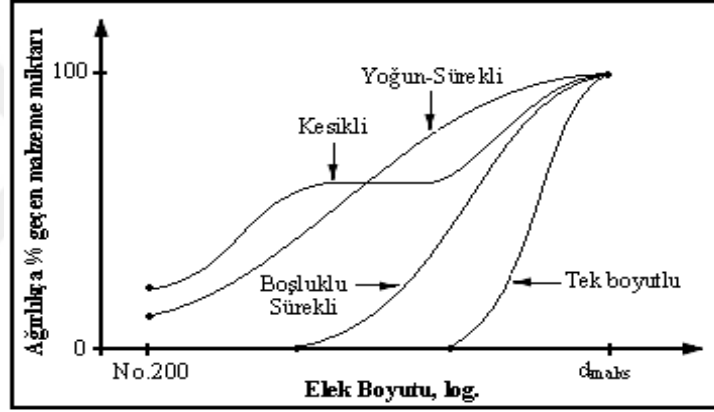
Agregalar genellikle kırmataş, dere malzemesi ve suni taşların kırılmasıyla elde edilmektedir. Dere malzemeleri çoğunlukla yol kaplamalarında kullanılmamaktadır. Bunun sebebi yüzey pürüzsüzlüğünden dolayı bitüm ile karıştırıldığında iyi bir aderans sağlayamamasıdır. Suni taşlar da genellikle yüksek fırın cürufundan elde edilir. Yol kaplamalarında kullanılabilecek agrega kayaların kırılması sonucu oluşan kırmataşlardır [4].

2.1.2. Boyut

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

2.1.3. Gradasyon

Agrega karışımındaki danelerin ebatlarına göre dağılımının gösterilmesine gradasyon denir. Agregada gradasyon olarak yoğun – sürekli, boşluklu – sürekli, tek boyutlu ve kesikli olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Agregada gradasyon tipleri şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Agregada Gradasyon Tipleri [5]

Kesikli gradasyon, belirli aralıktaki dane çaplarını ihtiva etmediğinden boşluk miktarı fazladır. Taş mastik asfalt yol kaplamalarında genel olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak aynı boyuttaki agregalardan meydana gelen tek boyutlu gradasyon ise sathi kaplama gibi düşük standartlı yol kaplamalarında kullanılmaktadır. Boşluklu-sürekli gradasyon, ince agrega ihtiva etmediğinden agrega karışımının boşluk oranı oldukça yüksektir. Bu tip, filtre ve drenaj malzemesi olarak kullanılabilir. Yoğun-sürekli gradasyon, maksimum yoğunluk ve minimum boşluk ihtiva eder. Bu tip, karışımın yoğunluğunu artırmanın yanında geçirimsizliğin azalmasını sağlamaktadır. Yoğun-sürekli gradasyon sınıfına giren agregalar bitümlü sıcak karışımlarda en çok kullanılan gradasyon sınıfıdır [5].

2.1.4. Porozite

Asfaltın emilmesini yeterince yapabilmesi için belirli bir poroziye sahip agregalardan oluşması gerekir. Yeterli porozitesi olan agregalar, soyulmanın azalmasını ve stabilitenin artmasını sağlar. Porozitenin yüksek olması düşük stabiliteye ve asfaltın terlemesine sebep olur [4].

2.1.5. Yüzey Alanı ve Boşluk Oranı

Danelerin yüzey alanlarının ve boşluk oranlarının toplamı karışıma etki eden durumlardır. Boşluk oranı ve yüzey alanlarının toplamı; gradasyona ve maksimum dane çapına bağlıdır [4].

2.1.6. Yüzey Yapısı ve Biçim

Yüzey yapısı, pürüzlülük ve cilalılıkla ilgilidir. Danelerinin pürüzlülüğü miktarı arttıkça işlenebilirlik oranı azalmaktadır. Bu yüzden cilalı agregalar BSK kaplamaları için uygun görülmemektedir.

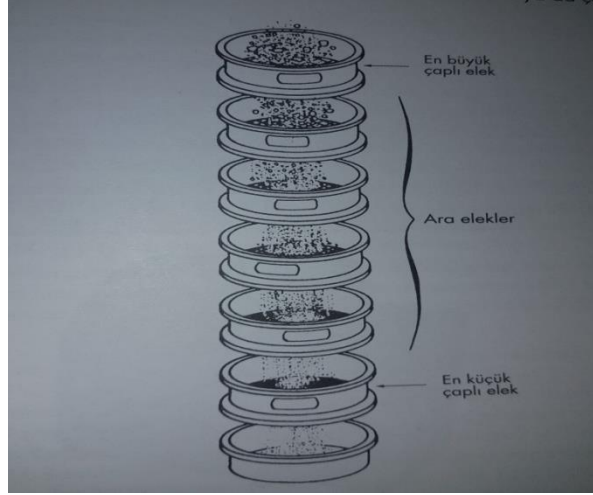
Dane biçimleri, işlenebilirliğe, yoğunluğa, stabiliteye, ve kayma mukavemetine etki eder. Dane biçimi olarak; yuvarlak, köşegen, düzensiz ve yassı, ince-uzun olarak sınıflandırılırlar. Yuvarlak biçimli agregaların işlenebilirliği köşelilerden daha fazla olmasına rağmen stabilite bakımından köşeli olanlar daha dirençli olmaktadır [4].

2.2. Agregalara Uygulanan Deneyler

BSK’larda kullanılacak olan agreganın uygunluğu hakkında bilgi sahibi olmak için bazı deneyler yapılmaktadır. Bunlar; özgül ağırlık, aşınma, elek analizi, yassılık indeksi, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, cilalanma ve su tesirlerine karşı dayanıklılıktır. [4]

2.2.1. Elek Analizi Deneyi (ASTM C131 – TS 1900)

Karışımında bulunan agreganın dağılımı hakkında bilgi sahibi olunmak için yapılan deneydir. Aşağıdan yukarıya doğru elek çapı artacak şekilde üst üste elekler dizilip en üstteki elekten karışık agrega bırakılır, sarsma tablası üzerinde en az 2 dk boyunca sarsılıp daha sonra her elek üstünde kalan agregalar tartılarak bunların toplam agrega kütlelerine göre yüzdesi hesaplanır. Bu şekilde elek üzerinde kalmış malzemenin yüzdesi hesaplanıp granülometri eğrisi çizilir [1]. Şekil 2.2’de elek analizi deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Elek Analizi Deney Düzeneği [1]

2.2.2. Aşınma (Los Angeles) Deneyi (TS EN 1097-2 - AASHTO T96)

Agregaların dayanıklılığını tespit etmek için yapılmaktadır. Deney agreganın maksimum boyutuna bağlı olarak 1250, 2500 yada 5000 gr. malzeme ve 11 adet bilyenin çelik tambur içerisine bırakılmasıyla başlatılır. Tambur 500 veya 1000 devir döndürülür. Tambur içerisinden çıkarılan malzeme 1.7mm elekten daha büyük bir elekten elenerek, elek üstünde kalan malzemeler yıkanıp kurutulur. Aşınma oranını bulmak için kayıp miktar ilk ağırlığa bölünür [1]. BSK’larda kullanılacak olan agreganın aşınma oranının %30’u geçmemesi istenir [6].

2.2.3. Özgül Ağırlık Deneyi (TS EN 1097-6)

Agrega danesinin hacim tanımlamasına bağlı olarak üç tür özgül ağırlık hesabı bulunmaktadır. Bunlar;

- Zahiri özgül ağırlık (SG_z)
- Hacim özgül ağırlık (SG_H)
- Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (SG_{DKY})’dır.

Agrega daneleri, su absorbe edebilen (hava ile temas halindeki boşluklar) boşluklar ile su absorbe edemeyen (hava ile temas halinde olmayan katı hacminin içindeki boşluklar) boşluklar içermektedir. Su absorbe edebilen boşluklar su ile dolu değilse sıfır ağırlığa sahip, su ile doluyken suyun ağırlığına sahiptirler. Bu sebeple agreg a daneleri iki tip ağırlık, üç tip hacim ağırlığına sahiptirler. Agreg a danelerinin özgül ağırlıkları denklem 2.1, 2.2 ve 2.3 yardımıyla hesaplanmaktadır. Agreg a danelerinin su absorbiyonu ise denklem 2.4 yardımıyla hesaplanmaktadır [3].

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

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

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

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

A: Agreganın etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı

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

2.2.4. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (TS EN 1367-1)

Agregaların hava etkileriyle donup ufalanmasına karşı dirençlerinin ölçülmesini tespit etmek için yapılmaktadır. Etüvde kurutulmuş olan numune magnezyum sülfat eriyiği içerisine daldırılıp oda sıcaklığında 16-18 saat bekletilir. Bu sürenin sonunda çıkarılan numune 15 dakika süzölmeye bırakılıp daha sonrasında 110 °C sıcaklıkta sabit sıcaklığa kadar kurutulur. Bu işlem 5 defa tekrarlanır ve 5. devre sonunda etüvden çıkarılan malzeme soğutulup, yıkanır ve kurutulur. Eleme işlemi yapılarak donma kaybı tespit edilir [1].

2.2.5. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)

Taşı lastiklerinin sürtünmesiyle agregaların aşınması sonucu cilalanma oranının tespit edilmesi için yapılan deneydir. Cihazın alt tekerleğine 14 numune sabitlenip üstteki tekerin 6 saat süre ile bu agregalara temas etmesi sağlanır. Tekerlek ile agregalar arasına ince aşındırıcı maddelerde eklenir. Sonuçta elde edilen cilalanma miktarı, yoğun trafikli yolların birkaç ayda, az yoğunluklu yolların ise bir kaç yılda ulaşabileceği aşınmaya denk gelmektedir. Tespit edilen kayma direnci ise, ilk kayma direncine oranlanarak cilalanma katsayısı hesaplanır [1]. BSK kaplamalarda kullanılacak agregaların aşınma tabakasında minimum cilalanma katsayısının %50 olması istenmektedir [6].

2.2.6. Su Tesirine Karşı Dayanıklılık (Soyulma) Deneyi (ASTM D 1664)

Soyulma; bağlayıcının, suyun ve trafiğin etkisiyle agreg ağırlığından ayrılmasıdır. KGM teknik şartnamesine göre, agregaların soyulmaya karşı dayanımını belirlemek için belirli miktarda malzeme alınarak yıkanır ve etüvde kurutulur. Bu malzemeye bağlayıcı eklenip tamamen kaplanıncaya kadar karıştırılır. Karışım 24 saat boyunca 60 °C etüvde bekletilir. Sonrasında karışım ısıtılıp daha geniş bir kaba aktarılır ve yine 60 °C

sıcaklıkta 24 saat bekletilir ve deney sonlandırılır. Soyulmaya karşı dayanım soyulmamış yüzeyin bütün yüzeye oranı olarak hesaplanır [1]. Bu oran aşınma tabakasında minimum %50 olmalıdır [7].

2.2.7. Yassılık ve İncelik-Uzunluk Tayini Deneyi (BS 812)

Yassı ve ince-uzun daneler, yük altında daha kolay kırılıp bitümlü sıcak karışımın daha düşük dayanım göstermesine ve gradasyonunun bozulmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden agrega danelerinin şekil olarak yassı ve ince-uzun olmaması gerekmektedir. Bunun için yassılık indeksi deney aparatı kullanılmaktadır. Maksimum boyutun minimum boyuta oranı 5'ten büyük ise agregalar yassı ve ince-uzun daneler olarak kabul edilmektedir [4].

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Bağlayıcılar

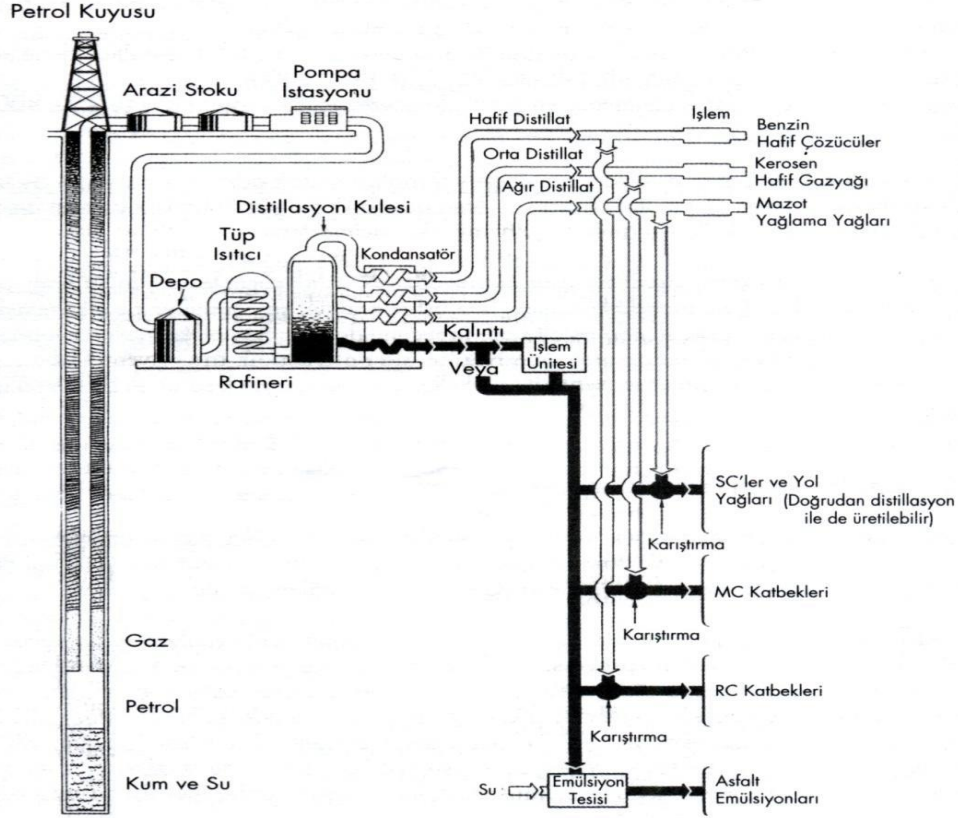
Bitümlü sıcak karışımların performansında önemli bir etkisi olan bitümlü bağlayıcılar, sıcak karışımların en önemli malzemesidir. BSK'ların ağırlıkça %5-7'sini, hacimce %13-15'ini oluşturarak agrega danelerini birbirine bağlayan bitümlü bağlayıcılar, trafik yükü altında kaplamanın dağılmasını önler. Bu sürüş konforunu sağlar, kohezyon ile kaplamanın stabilitesi artar ve geçirimsizlik sağlanır [3]. Bitümlü bağlayıcılar asfaltlar ve katranlar olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Asfalt; Koyu kahve ile siyah arasında rengi değişen, doğal kökenli veya petrolün damıtılmasıyla elde edilen bağlayıcı bir malzemedir. “Asfalt”, “asfalt çimentosu”, “bitüm” ve “asfalt bağlayıcı” terimleri esnek kaplamalarda aynı anlama gelecek şekilde birbirlerinin yerine kullanılmaktadır [5]. Asfaltlar, elde edilmelerine göre doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [1].

Doğal asfaltlar; tabiatta genellikle mineral maddeler ile karışmış formda bulunmaktadırlar. Bu asfaltların kullanılabilir hale getirilmesi için bir takım işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Göl asfaltı ve kaya asfaltı bu gruba girerler [1].

Yapay asfaltlar, ham petrolün arıtılması ile elde edilirler. Damıtma işleminde kolay uçan kısımlar damıtma kulesinin üst kısmından çıkıp ve soğutucularla yoğunlaştırılarak ayrılmış olur. Bun şekilde meydana gelenler hafif ürünler, daha az uçucu olanlar ise aynı şekilde orta ürünleri meydana getirir. En ağır uçanlarsa ağır ürünleri oluşturur. Kalıntılar da kulenin dibinde biriktirilir. Bu şekilde ham petrol; benzin, gaz yağı, dizel yağları, yağlama yağları ve ağır kalıntı maddeleri olmak üzere beş ana kısma ayrılmış

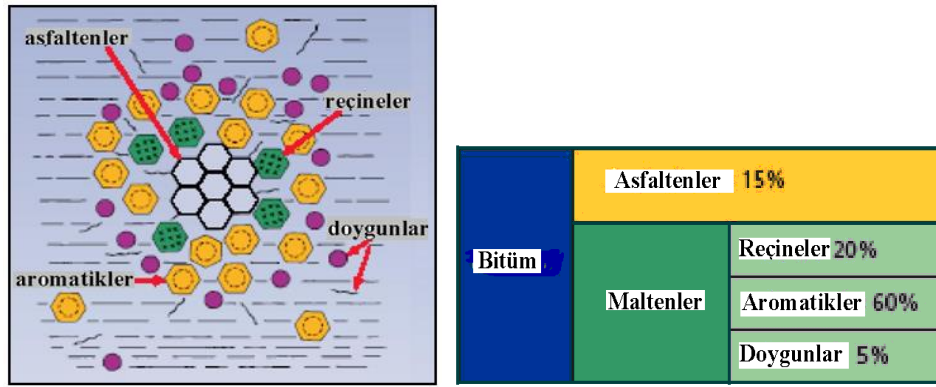
olur [1]. Bunların ürünleri gerektiğinde tekrar damıtılarak farklı petrol ürünleri elde edilir. Katran ise kömürün veya odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru şekilde damıtılması ile elde edilmektedir [8]. Şekil 2.3’de ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen asfaltlar gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Ham Petrolün Damıtılmasıyla Elde Edilen Asfaltlar [6]

2.3.1. Asfaltın Kimyasal Yapısı

Asfaltın kimyasal yapısı oldukça karmaşıktır. Bu yüzden tam olarak kimyasal analizi oldukça zahmetli olmakta ve analiz sonucunda çok veri ortaya çıkmaktadır. Ancak bitümü asfaltın ve maltenler grubu ayırmak mümkündür. Maltenler de kendi aralarında doymuşlar, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır [1,2]. Şekil 2.4’ de asfaltın yapısı ve bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Asfaltın Yapısı ve Bileşenleri [1]

Asfaltınler, esas olarak karbon ve hidrojenden oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren n-heptan içerisinde çözünmeyen siyah veya kahverengi kendine özgü biçimleri olmayan yapılardır. Genel olarak yüksek molekül ağırlığına sahip olan, polar yapılardır. Bitümün % 5-25'ini oluşturmaktadırlar [2].

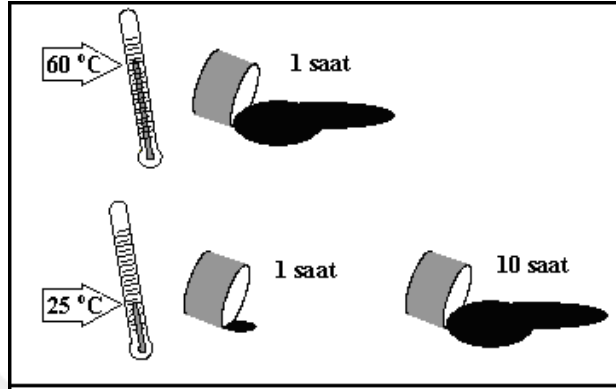
Maltenler, Bitümün n-heptanda çözölen kısmı olan maltenler üç alt gruba ayrılmaktadır [2]. İlk olarak reçineler n-heptanda çözölebilen yapılardır. Asfaltınler gibi yüksek miktarda hidrojen ve karbonla, küçük miktarda oksijen, sülfür, ve nitrojen içeriğinden oluşmaktadır. Aromatikler ise bitümün % 40-65'ini oluşturan yapılardır. Koyu kahve rengine sahip viskoz yağ şeklindedirler. Son olarak doyunlar genel olarak renksiz, yağlı yapıya sahip olup parafinik ve naftanik yağ halkalarını içeren yapılardır. Bitümün % 5-20'sini oluşturlar [1,2]. Çizelge 2.1'de 100 penetrasyonlu bir bitümün tipik bir element analizi sonucu verilmiştir.

Çizelge 2.1. 100 Penetrasyona sahip bitümün element içeriği [2]

Bitümdeki yapı grupları	Bitümdeki yapı grupları (%)	Karbon	Hidrojen	Nitrojen	Sülfür	Oksijen	Atomik oran H/C
Asfaltınler	5,7	82,0	7,3	1,0	7,8	0,8	1,1
Reçineler	19,8	81,6	9,1	1,0	5,2	-	1,4
Aromatikler	62,4	83,3	10,4	0,1	5,6	-	1,5
Doygunlar	9,6	85,6	13,2	0,05	0,3	-	1,8

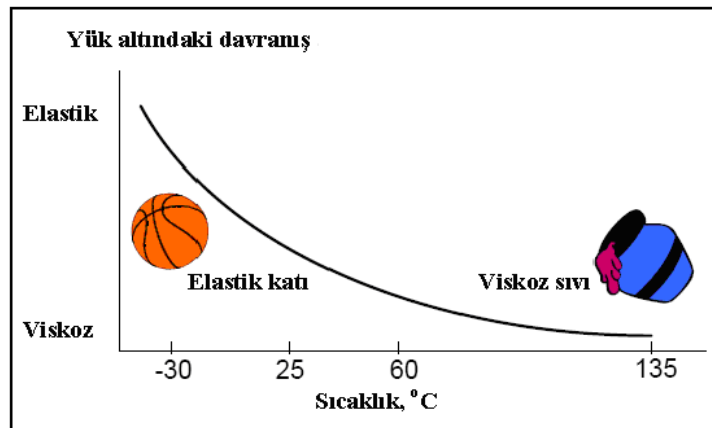
2.3.2. Asfaltın Reolojik Davranışı

Bitüm mühendislik özellikleri bakımından incelendiğinde viskoelastik bir davranış gösteren termoplastik bir malzeme olup trafik yükünün altında yükün şiddetine, zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak farklı davranışlar gösteren bir malzemedir. Şekil 2.5’de bitümün farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bitümün farklı sıcaklık ve zamana göre değişimi [5]

Şekilde görüldüğü gibi 60 °C sıcaklıkta 1 saatte gösterdiği akış ile 25 °C sıcaklıkta 10 saatte gösterdiği akış aynı olmaktadır. Bu da sıcaklık ile yükleme süresinin arasındaki ilişkinin benzer olduğunu göstermektedir. Böyle malzemeler düşük yük altında viskoz, orta yükleme altında orta elastik, yüksek yükleme hızında ise elastik özellik göstermektedir. Bitümün bu reolojik özelliği asfalt karışımların da viskoelastik özellik göstermesine sebep olmaktadır. Bu sebeple yükleme süresi ve sıcaklık karışımın rijitliğine doğrudan etki etmektedir [5]. Şekil 2.6’da bitümün sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bitümün sıcaklıkla değişimi [5]

2.4. Asfalt Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Asfalt bağlayıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli geleneksel deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama noktası, ısıtma kaybı ve özgül ağırlık deneyidir. Geleneksel asfalt bağlayıcı deney yöntemleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Geleneksel Asfalt Bağlayıcı Deney Yöntemleri [5]

Test Tipi	Standart Koşullar	Deney Standartı
Penetrasyon	25 °C, 5sn, 100gr	ASTM D5-AASHTO T49 EN 1426- TS 118
Yumuşama Noktası	-	ASTM D36- EN 1427- TS 120
Duktilite	25 °C, 5cm/dak	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Parlama Noktası	-	ASTM D113- AASHTO T5 TS 119
Çözünürlük	-	ASTM D2042- AASHTO T44 TS 1090
Kinematik Viskozite	135 °C	ASTM D2170- AASHTO T201 EN 12595
Isıtma Kaybı (TFOT)	163 °C, 5 saat	ASTM D1754- AASHTO T179
Isıtma	163 °C, 75 dak	ASTM D2872- AASHTO T240
Özgül Ağırlık	25 °C	TS 1087- ASTM D70

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

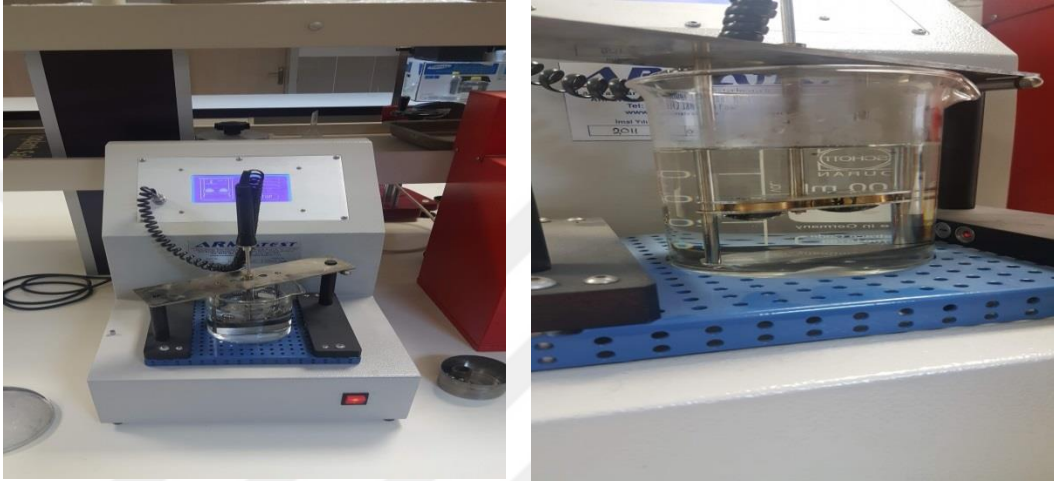
Bu deney bitümün sertlik derecesini belirlemek yada bir başka deyişle kıvamını belirlemek için yapılır. Standart penetrasyon aleti, 100gr ağırlığındaki bir iğnenin 25 °C sıcaklıkta, 5 saniye içerisinde bitüm içerisinde battığı düşey mesafe olarak tanımlanır. Deney birimi 10^{-1} mm dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılıdır. Şekil 2.7’de penetrasyon cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Penetrasyon Cihazı

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

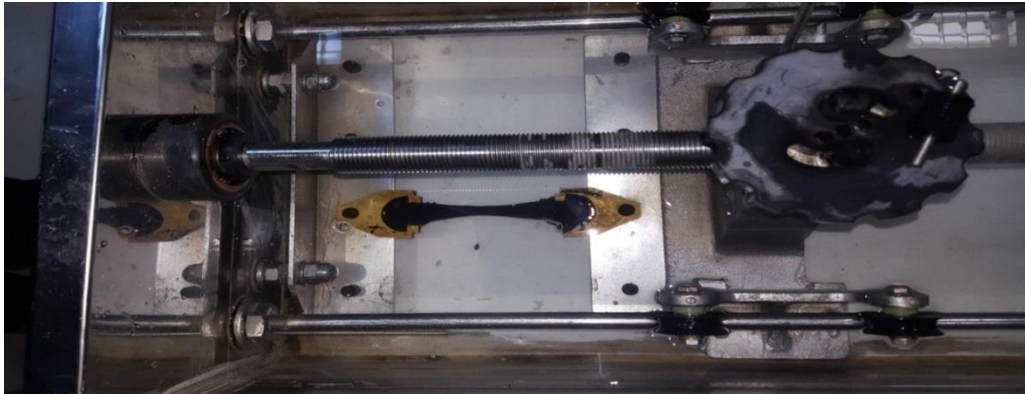
Bitümün yumuşama sıcaklığının tespit edilmesi için yapılmaktadır. Deneyde bitümle doldurulmuş olan iki yuvarlak halka deney düzeneğine yerleştirilir ve bu halkalar üzerine birer adet bilye koyulur. Deney için başlangıç sıcaklığı 5 °C'dir ve sıcaklık dakikada 5 °C artırılır. Bitümlü malzemenin düzenek tabanına değdiği anda cihaz otomatik olarak yumuşama değerini okumaktadır. Şekil 2.8'de yumuşama noktası cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yumuşama Noktası Cihazı

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

Bitümün kohezyon mukavemeti, düşük ısıdaki düktilitesi ile ölçülmektedir. Deney, standart kalıp içerisinde hazırlanmış bitümün, 25 °C sıcaklıkta ve 5 cm./dak. hızla çekilerek kopuncaya kadar uzadığı miktardır. Düktilite cihazı Şekil 2.9'da verilmiştir.



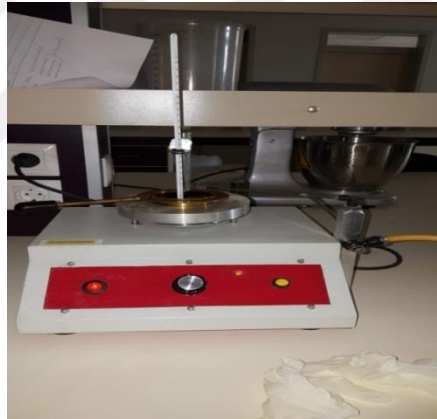
Şekil 2.9. Düktilite Cihazı

2.4.4. Parlama Noktası Deneyi

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

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

Şekil 2.10'da parlama noktası cihazı verilmiştir.



Şekil 2.10. Parlama Noktası Cihazı

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

Bu deney ince bir film halinde dönel tablada hareket eden bitümlerin, sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemenin fiziksel özelliklerindeki değişimi belirlemek amacıyla yapılmaktadır. TS EN 12607-1 standartlarına göre yapılan deney, 163 °C sıcaklıktaki cihaza 8 adet şişe yerleştirilerek yapılmaktadır. Deneyde her bir şişeye 35 gr. malzeme doldurulup düşey eksende 15 devir/dakika yapacak şekilde cihaza yerleştirilir ve 75 dakika süre başlatılır. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici bulunmaktadır. Bu üfleyici şişelere 4000 ± 200 mL/dak olacak şekilde hava verir. Sıcaklığın etkisiyle malzeme şişeleri tam olarak kaplar ve film tabakası oluşturur. Bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi daha basit hale getirilir [9].

Deney sonunda iki şişe kütle kaybını tayin etmek amacıyla cihazdan çıkarılınca ağırlıkları tartılır. Geri kalan altı şişe ise başka kaplara alınarak sonraki fiziksel özelliklerin tespiti için kaldırılır. (2.5) de verilen eşitlikte M_1 yaşlanmadan önceki ağırlık, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı göstermektedir. RTFOT cihazı Şekil 2.11 (a)'da gösterilmiştir.

$$\text{Kütle Kaybı (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \quad (2.5)$$

2.4.6. Basınçlı Yaşlandırma Kabı Deneyi (PAV)

Bu deney, kaplamada uzun dönemli yaşlanma özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilmiş yaşlanmış numuneler üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO PP1 standardına göre her numune kabına 50 gram numune koyulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90-100 ve 110 °C) belirli bir sıcaklıkta numunelere 20 saat süreyle 2070 kPa'lık basınç uygulanmaktadır [10]. PAV cihazı Şekil 2.11.(b)'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.11. RTFOT cihazı (a), PAV cihazı (b)

2.4.7. Özgül Ağırlık Deneyi (TS 1087)

Bağlayıcı için özgül ağırlık, belli bir hacim ağırlığının aynı hacimdeki sudaki ağırlığına oranıdır. Özgül ağırlık için piknometre metodu kullanılmaktadır. İlk olarak boş kap tartılır. Sonrasında su ile doldurulup tekrar tartılır. Kap içerisindeki su boşatılıp kap tekrar kurutulduktan sonra uygun miktarda bağlayıcı koyulup tekrar tartılır. Isıtılmış bağlayıcı kap içerisinde dökülürken hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilir.

Bağlayıcının üzerine kalan miktarda su koyularak tartım işlemi yapılır. Deneyde kullanılan suyun saf olması gerekir. Uygun deney sıcaklığı ise 25 °C'dir [11].

2.5. Bitümlü Sıcak Karışımlardan Beklenen Özellikler

BSK ile elde edilen kaplamaların kalitesi, sahip oldukları özelliklerine doğrudan bağlı olduğundan bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir. Bu yüzden karışımların dizaynları yapıldıktan sonra stabilite, işlenebilirlik, durabilite, geçirimsizlik, yorulmaya ve kaymaya karşı direnç ve esneklik özelliklerine sahip olup olmadıklarına bakılmalıdır [3,8].

2.5.1. Stabilite

Stabilite; trafik yükü, sıcaklık ve çevresel faktörlere karşı direnç göstermedir. Stabilite yetersizliği olan kaplamada çökme, tekerlek izi gibi deformasyonlar meydana gelir. Çok yüksek stabilite de istenmeyen bir durumdur ve bu durumlarda kaplamaların trafik yükleri altında çatladığı görülmektedir. Bu nedenle stabilitenin çok yüksek olması da istenmeyen bir durumdur [3,5].

2.5.2. Durabilite

Durabilite, karışımdaki asfaltın zamanla özelliklerinin değişmesine, agrega yüzeyinin soyulmasına ve agreganın kırılmasına karşı gösterdiği dayanımdır. Bunlar iklim ve trafiğin birleşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır [3].

2.5.3. Geçirimsizlik

Karışımın içindeki hava boşluğu yüzdesiyle belirlenmektedir. Düşük asfalt içeriği ve karışımdaki yüksek boşluk oranı tabakayı çok geçirimli yapar. Bu yüzden karışımlar belirli orandaki esnekliği sağlayacak boşluk yüzdesine göre tasarlanıp dizayn edilmelidir [3].

2.5.4. İşlenebilirlik

Karışımın hazırlanıp serilmesi ve sıkıştırılması sırasındaki kolaylık olarak açıklanabilir [3]. İşlenebilirlik, kaba agrega miktarı arttıkça, karışımın ısısı düştükçe,

asfalt katılaştıkça veya viskozluğu arttıkça ve mineral madde miktarı arttıkça azalmaktadır [5].

2.5.5. Esneklik

Kaplamanın geçici oturma ve hareketlerine karşı, herhangi bir çatlamaya, deformasyona sebep olmadan uyum göstermesidir. Karışımdaki bitümün yüzdesi ve agrega gradasyonu esnekliği etkileyen faktörlerdir [3].

2.5.6. Yorulmaya Karşı Direnç

Trafik yüklerinin neden olduğu deformasyona karşı dirençtir. Boşluk yüzdesi ve viskozite etkileyen faktörlerdir [3].

2.5.7. Kaymaya Karşı Direnç

Kaplamanın ve üzerinde bulunan taşıtların, her türlü hava koşullarında uygun mesafede durabilmesi için yeterli sürtünmeye sahip olması gerekmektedir. Bitüm yüzdesi fazla olan, yoğun gradasyonlu karışımlarda kayma direnci daha düşük olmaktadır [8].

2.6. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Meydana Gelen Bozulmalar

Yol üstyapılarında meydana gelen bozulmaların başlıca nedenleri; yapım ve bakım hataları, kötü malzeme seçilmesi, tasarım hataları, iklim koşullarını göz önünde bulundurmadan malzeme ve proje tasarımının yapılması, denetimsiz seyreden aşırı yüklü taşıtların kullanımudur. Bu sebeplerin sonucunda ise kaplamada deformasyonlar (tekerlek izi oluşumu), çatlaklar (yorulma çatlağı ve düşük sıcaklık çatlakları) ve ayrışmalar (kusma) meydana gelmektedir [5].

2.6.1. Tekerlek İzi Oluşumu

Özellikle sıcak havalarda ve ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda çok sık olarak görülen, kalıcı deformasyonlardan en yaygın olarak görülen şeklidir. Yüksek hava sıcaklığı, ağır trafik yükü, ağır taşıtların hızı yetersiz sıkışma, yetersiz temel tabakası kalınlığı ve aşırı asfalt filler yüzdesi tekerlek izi oluşumu sebeplerinin başlıcalarıdır [5]. Şekil 2.12’de kaplamada meydana gelen tekerlek izi deformasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Tekerlek İzi [1]

2.6.2.Yorulma Çatlakları

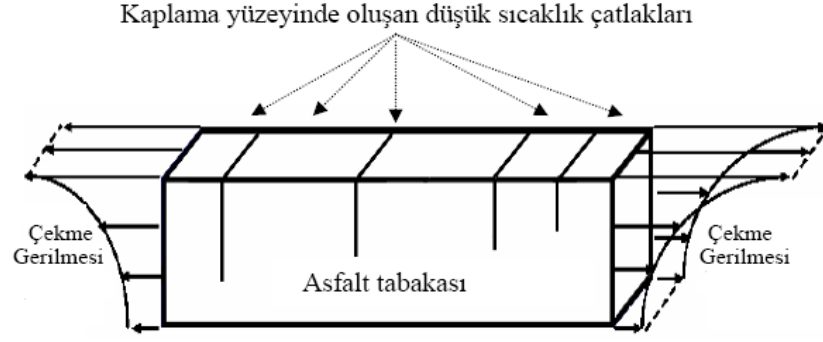
Ağır dingil yükleri ve fazla miktarda yük tekrarı, kaplama veya kaplama altındaki tabakaların kalınlığının yetersiz olması, tabakalardaki hacim değişiklikleri ve yetersiz drenaj gibi nedenlerle yorulma çatlakları meydana gelmektedir. Bu tip çatlaklar birbirleriyle bağlantılı olup timsah sırtı veya kümes teli görünümünde kaplamanın tamamında veya belirli bir kesiminde meydana gelirler [5]. Şekil 2.13’de kaplamada meydana gelen yorulma çatlağı gösterilmiştir.



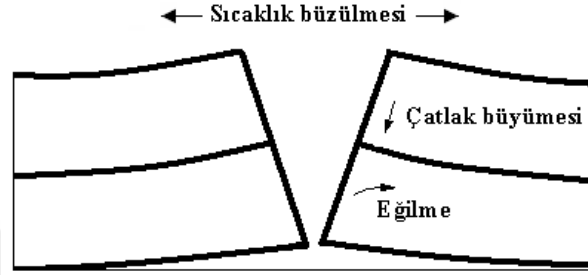
Şekil 2.13. Yorulma Çatlağı [1]

2.6.3. Düşük Sıcaklık Çatlakları

Soğuk iklimli havalarda asfalt kaplamanın büzülmesi sonucu meydana gelen düşük sıcaklık çatlakları, kaplamada artan çekme gerilmelerinin oluşturduğu trafik akışına dik olarak oluşan çatlaklardır. Kaplama yüzeyinde oluşan büyük gerilmeler ve tekrarlı çekme gerilmeleri, kaplamanın çekme kuvvetini aştığı zaman şekilde görüldüğü gibi çatlaklar oluşmaktadır [5]. Şekil 2.14’de kaplamada meydana gelen gerilmeler ve düşük ısı çatlakları, şekil 2.15’de düşük sıcaklık çatlağının büyümesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Kaplamada meydana gelen gerilmeler ve düşük ısı çatlakları [5]



Şekil 2.15. Düşük ısı çatlaklarının büyümesi [5]

2.6.4. Kuma

Asfaltın sıcaklık etkisiyle yükselerek yüzeye çıkması ve kaplama yüzeyinde kalın asfalt filmi meydana getirmesi olayı kuma olarak tanımlanmaktadır. Kuma sonucu kaplama yüzeyinde sürtünme katsayısı azalmaktadır. Yüksek sıcaklık, çok ağır dingil yükleri, çok kalın serilen astar tabakası kumaya sebep olmaktadır [12]. Şekil 2.16'da asfalt kaplamasında meydana gelen kuma gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Asfaltta Kuma [1]

2.7.Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Dizayn Yöntemleri

Bitümlü sıcak karışımlar dizayn edilirken bir çok yöntem kullanılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan dizayn yöntemleri Superpave ve Marshall dizayn metodudur [5].

2.7.1. Superpave Dizayn Yöntemi

Bitümlü sıcak karışımların dizaynında geleneksel yöntemlerle hazırlanan kaplamaların performanslarını tam olarak koruyamaması, laboratuvar koşullarının arazi koşulları ile tam olarak uyuşmaması sebebiyle Superpave dizayn yöntemi oluşturulmuştur. Superpave yönteminde kaplamada meydana gelecek olan deformasyonlar ve çatlaklar azaltılarak bağlayıcının performansının en yüksek olduğu değerin tespit edilip ölçülmesi hedef alınarak tasarlanmıştır. Bu dizayn yönteminin en önemli özelliği deney sıcaklıklarının standart olarak kabul edilmesi değil, kaplamanın uygulanacağı bölgenin iklim koşulları ve sıcaklık değişimlerinin dikkate alınarak tasarlanıp yapılmasıdır. Superpave dizayn yöntemi karışım dizaynı ve bağlayıcı şartnamesi olmak üzere iki kısımdan oluşturulmuştur. Superpave bağlayıcı şartnamesi hem saf hem de modifiye edilmiş asfaltların tasarım koşullarındaki performanslarını tespit etmek amacıyla geliştirilmiştir [5].

Şartnamede bağlayıcıların taşıma ve karıştırma esnasında oluşan, kısa süreli yaşlanmayı tespit eden ısıtma kaybı deneyi olan Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (RTFOT), uzun dönem yaşlanmayı tespit eden Basıncılı Yaşlandırma Aleti (PAV), bağlayıcının işlenebilir özelliğinin tespit edilmesi için Dönel Viskozimetre (RV), düşük ısı çatlaklarına karşı dayanımın belirlenmesi için Kiriş Eğme Reometresi (BBR) ve Doğrudan Çekme (DDT), yüksek sıcaklık dayanımlarının tespiti için yapılan Dinamik Kayma Reometresi (DSR) deneyleri uygulanmaktadır. Uygulanan bu deneyler ve kullanım amaçları çizelge 3.1’de verilmiştir [5].

Çizelge 2.3. Superpave deneyleri ve amaçları [5]

Deney Adı	Kullanım Amacı
Dönel İnce Film Isıtma Deneyi (RTFOT)	Kaplamanın kısa süreli yaşlanmasını belirlemek
Basınçlı Yaşlandırma Aleti (PAV)	Kaplamanın uzun süreli yaşlanmasını belirlemek
Dinamik Kesme Reometresi (DSR)	Bağlayıcının orta ve yüksek sıcaklıktaki özelliklerini belirlemek
Dönel Viskozimetre (RV)	Bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki özelliklerini tespit etmek
Kiriş Eğme Reometresi (BBR)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini tespit etmek
Doğrudan Çekme (DTT)	Bağlayıcının düşük servis sıcaklık özelliklerini tespit etmek

Superpave yönteminde bağlayıcılar PG ile gösterilir ve farklı sıcaklık koşullarında gösterdikleri performansa göre adlandırılır. Örneğin; PG 58-22 ile gösterilen performans bağlayıcı için ilk sayı olan 58 ‘yüksek sıcaklık derecesi’ olarak tanımlanırken, ikinci sayı olan -22 ise ‘ düşük sıcaklık derecesi’ olarak tanımlanır [5].

Hem modifiye edilmiş hem de modifiye edilmemiş asfalt bağlayıcılara uygulanan Superpave bağlayıcı şartnamesi çizelge 2.4’de verilmiştir [5].

Çizelge 2.4. Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi (AASHTO MP1) [10,13,14]

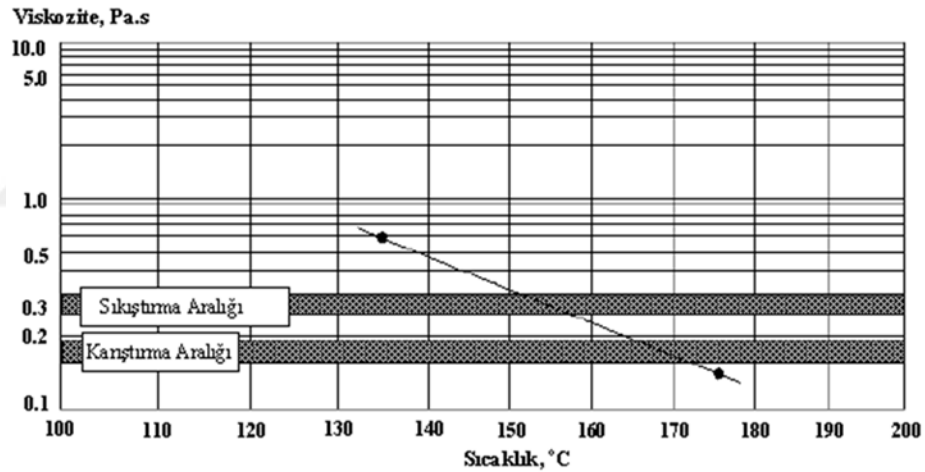
PERFORMANS SINIFI	PG 46-			PG 52-							PG 58-					PG 64-					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Ortalama 7 Günlük Maksimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	< 46			< 52							< 58					< 64					
Minimum Kaplama Dizayn Sıcaklığı, °C	> -34	> -40	> -46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
ORJİNAL BAĞLAYICI																					
Parlama Noktası, T48, Minimum, °C	230																				
Viskozite, ASTM D4402; Maksimum 3 Pa.s , Test Sıcaklığı, °C	135																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 1.00 kPa, 10 rad/s , Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
DÖNEL İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ (RTFOT) KALINTISI																					
Ağırlık Kaybı, Maksimum, %	1,00																				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, minimum, 2.20 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	46			52							58					64					
BASINÇLI YAŞLANDIRMA ALETİ (PAV) KALINTISI																					
PAV Deney Sıcaklığı, °C	90			90							100					100					
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fiziksel Sertleşme,	Rapor																				
Sünme Sertliği, TP1, S,Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	- 24	- 30	- 36	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	- 36	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30

Çizelge 2.4. (devamı) Superpave Performans Esaslı Asfalt Bağlayıcı Şartnamesi [10,13,14]

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 Deney Sıcaklığı, °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Dinamik Kayma, TP5, G*/sinδ, maksimum, 5000 kPa, 10 rad/s, Test sıcaklığı, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fiziksel Sertleşme,	Rapor															
Sünme Sertliği, TP1, S, Maksimum, 300 MPa, m-değeri, minimum 0.300, test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24
Direkt Çekme, TP3, minimum, %1.0 Test sıcaklığı, °C	0	- 6	- 12	- 18	- 24	- 30	0	- 6	- 12	- 18	- 24	0	- 6	- 12	- 18	- 24

2.7.1.1. Dönel Viskozimetre Deneyi (RV)

Bu deney bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık altındaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir [15]. Deney için etüvde ısıtılıp akışkan hale getirilen yaklaşık 11 gr. numune bölmesine doldurulur ve sıcaklık kontrolü olan kaba yerleştirilerek 15 dk sabit sıcaklıkta bekletilip deney başlatılır. Deneyde milin devamlı 20 rpm. hızla dönmesi sağlanır. Yaklaşık olarak birbirine yakın viskozite değerlerine ulaşılmca üç adet okuma yapılır ve bunların ortalamasından bağlayıcının viskozitesi hesaplanmış olur [10]. Bağlayıcıların 135 °C de 3000 cP'yi aşmaması istenmektedir [5]. Bu amaçla 135°C ve 165°C sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen değerler sıcaklık-viskozite grafiğinde yerine konularak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları elde edilmektedir. Şekil 2.17'de sıcaklık-viskozite grafiği, şekil 2.18 'de RV cihazı ve numunelerin doldurulduğu tüpler gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Sıcaklık-Viskozite Grafiği



Şekil 2.18. RV cihazı ve numunelerin doldurulduğu tüpler

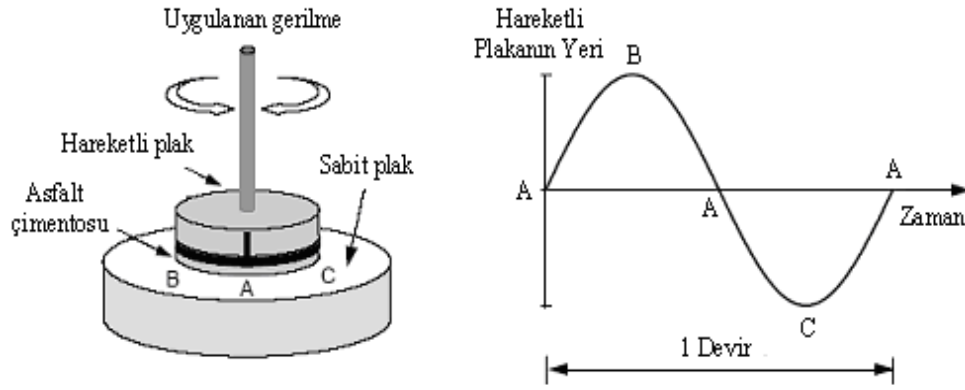
2.7.1.2. Dinamik Kesme Reometresi (DSR)

DSR deneyi, saf ve modifiyeli bağlayıcının yorulma ve tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını belirlemek için yapılır. Bu deneyde tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımların belirlenmesi için saf bitüm ve RTFOT kalıntısı numuneler; yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla da PAV kalıntısı numuneler kullanılır. Numune boyutları, tekerlek izi dayanımını belirlemek için 25 mm. çapında ve 1000 mikron yükseklikte, yorulma dayanımını belirlemek için ise 8 mm. çapında ve 2000 mikron yüksekliktedir [9]. DSR deney cihazı ve deney için hazırlanan numuneler ve Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



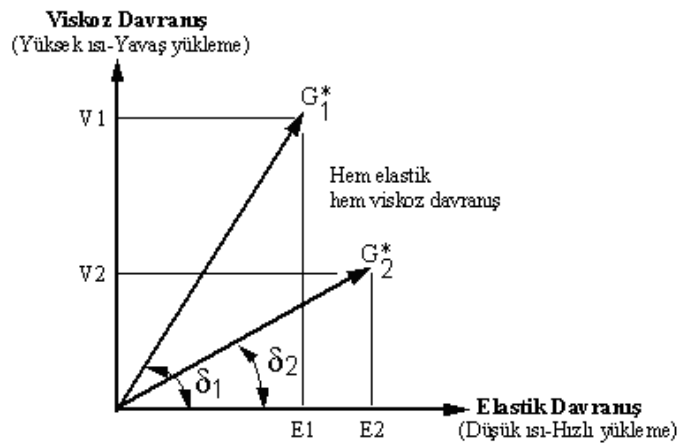
Şekil 2.19. DSR cihazı ve hazırlanan numuneler

Deney düzeneğinde sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına bağlayıcı numunesi yerleştirilir. Hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte ve geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denmekte ve deney boyunca tekerrür etmektedir. Plak dönme frekansı ise 1,59 devir/saniye’dir. Deneyde 10 devir ön koşullandırma yapılmaktadır. Bunun sebebi ortam koşullarını tam olarak yansıtabilmesidir. Koşullandırmadan sonra 10 devirlik standart döngü başlatılır [10]. Deney düzeneği ve numunelere uygulanan deformasyonlar şekil 2.20’deki gibidir.



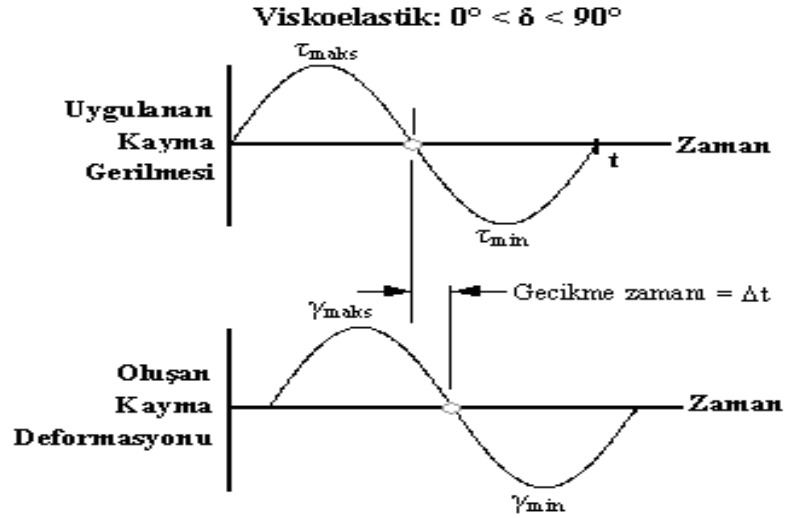
Şekil 2.20. DSR deney düzeneği ve numunelere uygulanan deformasyonlar ve yönleri [11]

DSR deneyinde ilk olarak bitüm ve bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) belirlenir. Buna göre bağlayıcının viskoz ve elastik davranışını hakkında bilgi sahibi olunur. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam dirençtir [16]. Şekil 2.21’de yatay eksen elastik davranışı, düşey eksen ise viskoz davranışı göstermektedir. Bağlayıcıların birbiriyle aynı olmaması ve viskoelastik özelliği sebebiyle 1 ve 2 numaralı bağlayıcıların viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklıdır. Viskoelastik özellik faz açısı ve kayma modülüne bağlıdır [3].



Şekil 2.21. Bağlayıcının viskoelastik davranışı [16]

Faz açısı (δ)’nın, gerilme ve deformasyon arasındaki zaman aralığına (Δt) eşit uzaklıkta olması gerekmektedir. Gerilme – deformasyon ilişkisi Şekil 2.22’de gösterilmiştir [16].



Şekil 2.22. Viskoelastik malzemenin gerilme-deformasyon ilişkisi [16]

Yüksek ısılarda asfalt viskoz davranış, düşük ısılarda elastik davranış göstermektedir. $\delta = 90^\circ$ için çok yüksek ısılarda asfalt sadece düşey ekseninde (viskoz davranış) gösterilirken, G^* değerinin yatay eksenini olmayacaktır. Çok düşük ısılarda ise tamamen elastik deformasyon gösteren asfaltın sadece yatay bileşeni olacaktır. Bu durumda G^* değerinin düşey bileşeni olmayacağından $\delta = 0^\circ$ olacaktır. Normal kaplama ısısı ve trafik yüklemesi için bağlayıcılar hem viskoz hem de elastik davranış gösterirler. Asfalt bağlayıcıların viskoelastik malzeme olması ve her bir asfaltın birbirinden farklı olması sebebiyle 1 ve 2 nolu asfaltlar yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri birbirinden farklı olacaktır. Şekil 2.22 de 2 nolu asfaltın δ açısı daha düşük olduğundan elastik bileşeni daha büyük olacak ve yük kalktığında deformasyon geri kalkacaktır. 1 nolu asfalt ise daha az elastik olup daha fazla kalıcı deformasyon yapacaktır. Her iki asfaltın G^* değerleri aynı olsa dahi δ açıları farklı olacağından farklı davranışlar göstereceklerdir. G^* , tek başına asfaltın davranışını açıklamamaktadır. Asfaltın davranışı G^* ve δ açısı değerleri ile birlikte ifade edilmelidir [3].

2.7.1.3. Kiriş Eğme Reometresi (BBR)

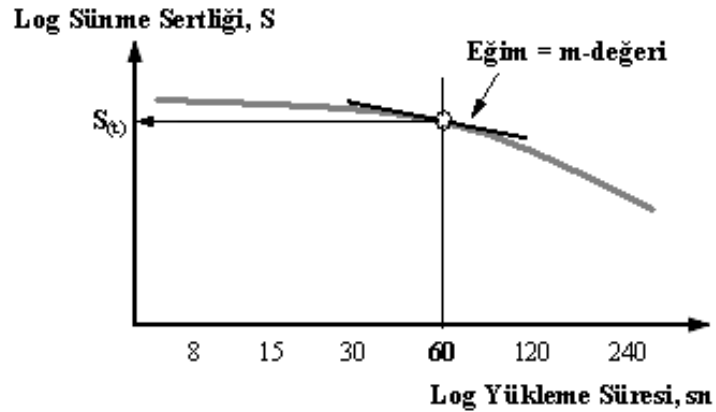
Bitümlerin düşük sıcaklıklardaki rijitlik ve mukavemet özellikleri arasındaki ilişkisi tam olarak belirlenemez. Bu deney belirli bir sıcaklıkta tutulan, sabit bir yük altında olan bağlayıcının ne kadar defleksiyon yapacağını tespit etmek için yapılmaktadır. Deney uzun süre yaşlandırılmış (PAV) numunelere uygulanmaktadır. Deney boyunca bitümlü bağlayıcı kiriş numunesi, bağlayıcı sınıfına göre sabit düşük bir sıcaklıkta

tutulmaktadır. Deney için 6,35x127x12,7 mm. ebatlarındaki kalıplar kullanılmaktadır [9,10]. Şekil 2.23’de BBR cihazı, kalıplar ve hazırlanan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.23. BBR cihazı, kalıplar ve hazırlanan numuneler

Deney AASHTO TP1 standardına göre yapılmaktadır. Asfalt kirişin orta noktasından 240 saniye sürede boyunca 980 mN’luk yük uygulanmaktadır. Deney sonucunda elde edilen yük ve defleksiyon, bağlayıcının sünme sertliğini ve sünme oranını bulmada kullanılmaktadır. Sünme sertliği, numunelerin sabit sünme yüklerine karşı dayanımıdır. Sünme oranı (m-değeri) ise sertlik ile yükleme süresi arasındaki orandır [10]. Sünme sertlik değeri belirlendikten sonra sünme sertlik değerlerinin zamanla değişimini gösteren bir grafik çizilir. Bu grafik yardımıyla m değeri belirlenmektedir [5]. Şekil 2.24’de m değerinin belirlendiği grafik verilmiştir.



Şekil 2.24. m değerinin belirlenmesi [9]

Şekil 2.24’de görüldüğü gibi eğriye teğet olan doğrunun 60. saniyedeki eğimi m-değerini vermektedir. Deney standardına göre sünme sertlik değeri max. 300 Mpa, sünme oranı ise min. 0,300 olması gerekir [9].

2.7.1.4. Doğrudan Çekme Deneyi (DDT)

Kiriş Eğme Reometresi deneyi ile belirlenen sünme rijitliği, malzemenin kopmadan önceki sünme kapasitesini tam olarak göstermemektedir. Bu deneyle sert ama yeterince sünme özelliği gösteren bağlayıcıların BBR deney sonuçlarının 300 ile 600 MPa. arasında ise bu deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Deney işlem görmemiş, RTFOT kalıntısı numuneler ve PAV kalıntısı numuneler üzerinde yapılmaktadır [9].

2.7.2. Marshall Dizayn Yöntemi

BSK dizaynı için Türkiye’de ve dünyada son yıllara kadar yaygın olarak kullanılan metot Marshall Dizayn Metodudur. Bu metot, 1939 yılında Bruce Marshall tarafından formüle edilmiştir [2].

Marshall dizayn yöntemi, BSK kaplamaların laboratuvar ortamındayken optimum bitüm yüzdesinin bulunmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem max. boyutu 25 mm veya daha küçük agrega içeren BSK kaplamalara uygulanmaktadır [6,17]. Marshall dizayn yöntemiyle karışımda kullanılacak optimum bitüm içeriğinin hesaplanmasında ilk olarak şartnameye uygun olan agrega gradasyonu ve uygun bitüm sınıfı seçilir. Değişik bitüm yüzdeleri seçilerek bir seri deney numunesi hazırlanır. Bu numuneler yaklaşık 63,5 mm yüksekliğinde ve 101,6 mm çapındadır. Deney numunelerinin hazırlanmasında önceden belirlenmiş yöntem uygulanmaktadır. Deney sonuçlarının sağlıklı olması için her bitüm yüzdesi için 3 numune hazırlanmaktadır. Hazırlanan numuneler Marshall test cihazında deneye tabii tutulur, stabilite ve akma değerleri belirlenir. Akma değeri cihazdan doğrudan okunan değer olarak kaydedilirken stabilite değeri düzeltme faktörü yardımıyla tekrar hesaplanır. Marshall dizayn yönteminin iki temel niteliği bulunmaktadır. Bunlar; deneye tabii tutulan numunelerin stabilite-akma testi ve yoğunluk-boşluk analizleridir. Deney sonuçlarında Bitüm Yüzdesi-Pratik Özgül Ağırlık, Bitüm Yüzdesi-Stabilite, Bitüm Yüzdesi-Akma, Bitüm Yüzdesi-Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (Vf), Bitüm Yüzdesi-Hava Boşluğu Yüzdesi (Vh), Bitüm Yüzdesi-Agregalar Arası Boşluk (VMA) yüzdesi ilişkilerini veren grafikler çizilmektedir. Elde edilen yoğunluk ve stabilite eğrilerinin max. değerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri, %4 hava boşluğu yüzdesine ve %70 bitümle dolu boşluk yüzdesine karşılık gelen bitüm

yüzdeleri toplanır ve bunların ortalamalarından optimum bitüm yüzdesi bulunmaktadır. Bulunan optimum değerin karşılık geldiği akma değerinin şartnameye uygun olup olmadığı kontrol edilir [6,17].

2.8.Bitümlü Sıcak Karışımlara Uygulanan Deneyler

Bitümlü sıcak karışımların performans özelliklerinin belirlenebilmesi için hazırlanan karışım numuneleri üzerinde genellikle Marshall stabilite ve akma, kalıcı Marshall stabilitesi (RMS), dolaylı çekme mukavemeti (ITS), Modifiye Lottman deneyi, dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi, dolaylı çekme yorulma deneyi ve sünme deneyi yapılmaktadır. Deney sonuçları değerlendirilerek numunenin performans özellikleri tespit edilmektedir.

2.8.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi (TS EN 12697-34)

Stabilite; deformasyona karşı maksimum dayanımdır. Akma; numunenin maksimum yüke ulaştığı anda meydana gelen düşey deformasyondur. Deney öncelikle sıkıştırılmış ve soğumuş numunelerin yükseklikleri ölçülerek kaydedilir. Daha sonra numuneler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30-40 dakika kadar, kırma çenesi ise 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika veya 60 ± 1 °C sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 1 saat kadar bekletilmelidir. Süre sonunda numune sudan çıkarılıp kırma çenesine ortalanacak biçimde yerleştirilir ve numuneye 50 ± 2 mm/dakika hızla yükleme yapılır. Deneyde, stabilite ve akma değerleri kaydedilir. Numune sudan çıkarıldıktan sonra en fazla 60 sn. içerisinde deney bitirilmiş olmalıdır. Deney için standart numune yüksekliği 63.5 mm kabul edilir. Farklı yüksekliklere sahip numuneler için ise stabilite düzeltme katsayıları eşitlik (2.6) yardımıyla hesaplanır [5].

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

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

için %20) olan numuneler varsa numune seri olarak iptal edilip yeni bir seri numune üzerinde deney tekrar yapılmalıdır [5].

Deney sonucunda ayrıca Marshall oranı (MQ) da değerlendirilmektedir. Marshall oranı (MQ) ise stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Marshall oranı, karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesidir [2]. Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 2.25’de gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Marshall Stabilite ve Akma Cihazı

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

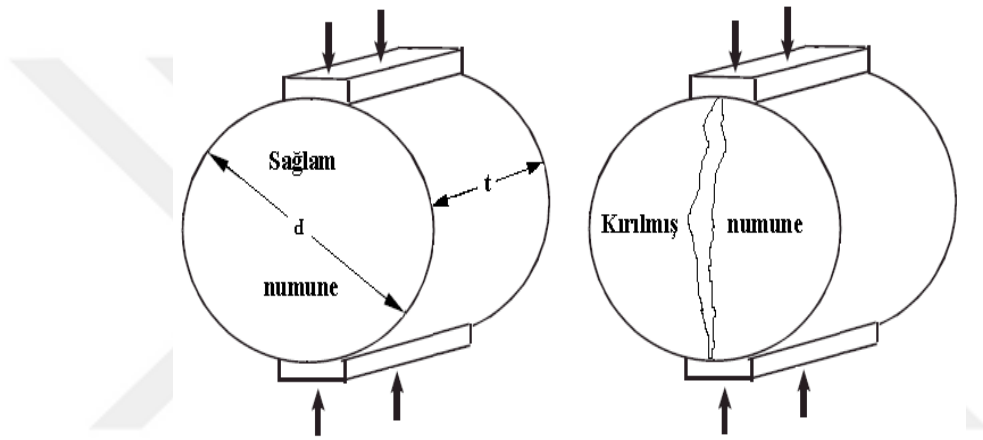
Bitümlü sıcak karışımların nem hasarına karşı dayanımlarını belirlemek için kalıcı Marshall stabilitesi deneyi yapılmaktadır. Kalıcı Marshall stabilitesinde numuneler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilip Marshall deneyine tabi tutulmaktadır. 60 °C suda 24 saat süre boyunca bekletilen numunelerin stabilite değerinin normal stabilite değerine oranlanmasıyla Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS) belirlenmektedir. Kalıcı Marshall Stabilitesi değeri yüksek olan karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının da yüksek olması beklenmektedir [18,19].

2.8.3. Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi

Bu deney asfalt karışımların kohezyon kuvvetini tespit etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca karışımın orta sıcaklıklardaki sertlik ve durabilitesini değerlendirmek için de kullanılmaktadır. Deney Marshall veya Yoğurmalı pres cihazlarıyla üretilen numunelere uygulanmaktadır. ITS değeri karışımın kohezyon kuvvetine bağlıdır. Bu değer arttıkça kohezyon artmaktadır. Bu sebeple bağlayıcının kohezyon özelliği ITS değerini doğrudan etkilemektedir. ITS deneyi sadece kohezyon kuvvetinin belirlenmesinde değil

bitümlü sıcak karışımların çekme mukavemetinin hesaplanmasında ve sıcaklık ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize edilmesinde de kullanılmaktadır [1].

Deney Marshall stabilite deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney ekipmanları kullanılarak yapılmaktadır. Silindirik asfalt numunesi çap düzlemi doğrultusuna paralel olacak şekilde düzeneğe yerleştirilir ve 50 mm/dakika hızda sabit bir basınç yükü uygulanarak numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilir. Numunenin aldığı en büyük yük değeri kaydedilir [1,5]. Numunenin deney başlangıcındaki ve sonrasındaki durumu Şekil 2.26’da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. ITS deneyi yükleme durumu ve kırılmış olan numune

Dolaylı çekme mukavemeti (2.7) bağıntısı ile hesap edilmektedir [5].

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

ITS : Dolaylı çekme mukavemeti (kPa)

Pmaks: Maximum yük (kN)

h : Numune yüksekliği (mm)

d : Numune çapı (mm)

2.8.4. Modifiye Lottman Deneyi (AASHTO T-283)

Sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışımların su etkilerine karşı hassasiyetinin belirlenmesi için yapılmaktadır. Böylece karışımda sudan dolayı meydana gelen dayanım kaybı tespit edilir. Deney sonuçları sıcak karışımların yol üzerindeki uzun dönem hizmet süreçlerinde ve soyulmaya karşı hassasiyetlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [5]. Sıkıştırılmış asfalt numuneler, kuru ve şartlandırılmış (yaş) olmak üzere iki guruba ayrılıp ve bu iki grup numune de dolaylı çekme deneyine tabi tutularak karışımın dayanım kaybı belirlenmektedir. Karışımın dolaylı çekme mukavemetinin alınmasının sebebi, sıcak karışım aşınma tabakaların sürekliliği için en önemli parametrenin çekme dayanımı olmasıdır. Çekme dayanımının düşük olması durumunda kaplama, trafik ve çevre etkileri ile oluşan çekme gerilmelerine karşı koyamayacak ve bozulmalar meydana gelecektir [20].

Deneye her test grubundan 3'er adet kuru ve şartlandırılmış olmak üzere en az 6 adet numune hazırlanmaktadır. Hazırlanan sıkıştırılmamış karışım numuneleri oda sıcaklığında 2 saat bekletilip soğutulduktan sonra, 60 °C'deki fırında 16 saat bekletilir. Sıkıştırma sıcaklığında 2 saat bekletildikten sonra karışım numuneleri %6-8 hava boşluklarında sıkıştırılır ve 24 saat oda sıcaklığında bırakılır. Şartlandırmayan kuru numuneler ise 25 °C'deki su banyosunda yaklaşık 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulup kırılır. Şartlandırılacak numunelere ise 13-67 kPa emme basıncı altında 5-10 dakika süreyle vakum uygulanarak %70-80 oranında suyla doygunlaştırılması sağlanır. Doygun numuneler -18 °C buzdolabına 16 saat süreyle bırakılır. Buzdolabından çıkarılan numuneler 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletilir. Çıkarılan numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra dolaylı çekme deneyine tabi tutulur [5,21]. Şartlandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetinin (ITS_{yaş}), şartlandırılmayan (kuru) numunelerin dolaylı çekme mukavemetine (ITS_{kuru}) oranı (2.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır [5,21,22].

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

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)

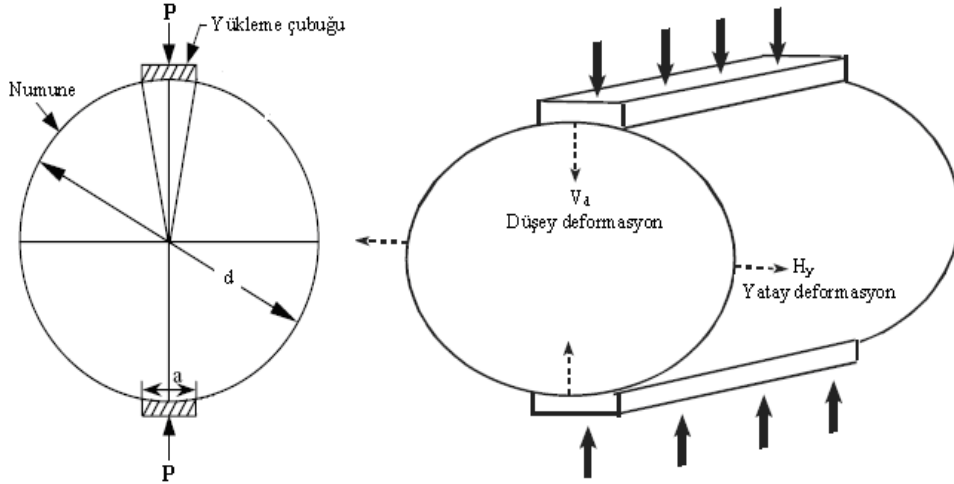
Superpave dizayn yöntemine göre karışımın su etkilerine karşı dayanıklı kabul edilebilmesi için ITSR değerinin en az %80 olması istenmektedir. Orijinal Lottman metoduna göre bu değer en az %70 olmalıdır. %80'den daha düşük ITSR değerine sahip sıcak karışımların yeterli dirence sahip olmadığı kabul edilerek karışımın suya karşı direncinin artırılması istenmektedir. Su etkilerine karşı direncinin artırılması için karışıma soyulma önleyici katkı maddeleri ilave edilir. Katkı kullanılarak modifiye edilen karışımlarda bu değer %85'ten az olmaması istenir [5,21].

2.8.5. Dolaylı Çekme Esneklik Modülü Deneyi (ITSM)

Bu deney BSK'ların dinamik yükler altındaki esnekliğini belirlemek için yapılır. Esneklik modülü, kaplamanın yük dağıtma yeteneği ve kaplamanın performans özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir ölçüttür [5]. Esneklik modülü tek eksenli yükleme altında tespit edilir ve maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır [1,5].

ITSM deneyi ile farklı sıcaklık ve yükleme süreleri altında numuneye ait esneklik modülü değeri belirlenmektedir. Bu deneyde numuneye yarı sünizoidal olarak, düşey yönde bir basınç yükü tekrarlı darbeler halinde uygulanmaktadır [1,5].

Şekil 2.27'de ITSM deneyinin şematik görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.27. ITSM deneyi ve şematik olarak görünüş

Deney bitiminde, numuneye uygulanan dinamik yük, toplam deformasyon ölçülüp kaydedilir ve poisson oranı alınarak esneklik modülü denklem (2.9) yardımıyla hesaplanır [1,5].

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

Em: Esneklik modülü (Mpa),

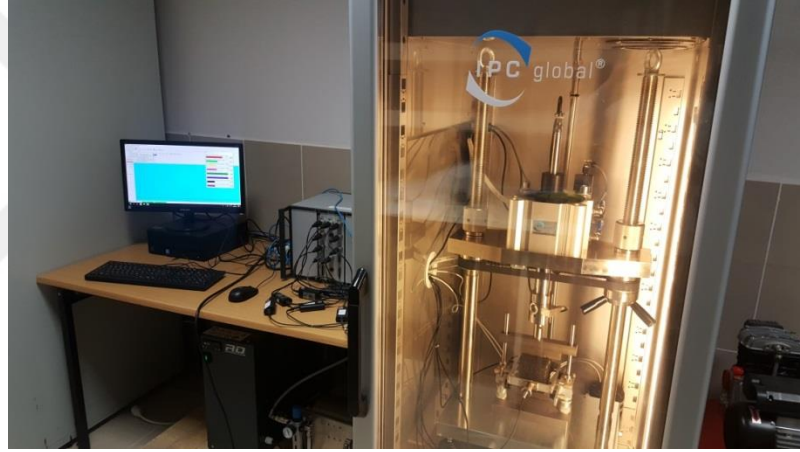
P : Maksimum yük (N),

Hy: Toplam yatay deformasyon (mm),

h : Numune kalınlığı (mm),

v : Poisson oranı

Esneklik modülünü sıcaklık, hava boşluğu ve yükleme hızı etkilemektedir. Düşük sıcaklık ve yüksek yükleme hızı esneklik modülünü artırır [5]. Şekil 2.28’de ITSM deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.28. ITSM deney düzeneği

2.8.6. Dolaylı Çekme Yorulma Deneyi

Yorulma çatlakları, BSK kaplamalarda en çok görülen bozulma türüdür. Tekrarlı yüklerin kaplamada meydana getirdiği çatlaklar zamanla artmaktadır [23]. Bu yüklerin sonucunda malzemenin rijitliği giderek azalmakta ve yorulmak çatlaklarını meydana gelmektedir [24].

Bu deneyde numune kırılıncaya dek tekrarlanan yük sayısı belirlenmektedir. Her numune farklı gerilme seviyelerinde deneye tabii tutulur ve farklı gerilmelerde kırılmaya sebep olan tekrarlı yük sayısı belirlenir. Deney sonucunda yorulma ömrü (N_f) ve gerilme (σ) arasındaki ilişki (2.10) bağıntısı ile belirlenir [9].

$$Nf = k_1 \times \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_2} \quad (2.10)$$

Nf : Yorulma ömrü

k_1, k_2 : Malzeme karakteristiği

σ : Gerilme (kPa)

Deney, numunelerin kolay elde edilebilmesi ve deneyin basitliği sebebiyle en çok yapılan deneylerden biridir. Silindirik şekilde üretilen numunelerine düşey düzlemde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yüklemeler yatay doğrultuda kısmen de olsa çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan gerilmeler numunenin ortasında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır [25].

Deney için standart sıcaklık 25 °C olarak kabul edilmektedir. Numuneler en az 2 saat iklimlendirme kabini içinde şartlandırılmaktadır. Numunenin yükseklikleri, yük sayısı ve periyodu, uygulanacak olan gerilme yazılıma girildikten sonra numune çerçevesine yerleştirilip düşey deformasyonu okuyacak olan LVDT (doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler) ayarlanıp deneye başlanır. Numuneler tam kırılıncaya kadar devam ettirilir. Deney bitiminde cihaz, yük tekerrür sayısı – deformasyon grafiğini çizmiş olur [9].

2.8.7. Sünme Deneyi

Dinamik sünme deneyi, BSK'ların dinamik yükler altındaki dayanımını belirlemek amacıyla yapılmakta ve deneyde numune üzerine yük uygulanarak, bu yük altında oluşan deformasyonun miktarı ölçülmektedir [2]. Deney sıcaklığı 40 °C olarak kabul edilmesine rağmen yüksek sıcaklık bölgeleri için daha yüksek değerlerde yapılmaktadır [5,22]. Deneyde, yük-tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelir ve numune bozuluncaya kadar deneye devam edilir. Bu deney sonucunda elde edilen sünme değeri, tekerlek izi hesabında ve kaplama sertliğinin hesabında kullanılmaktadır [1].

Statik sünme deneyi, BSK'ların statik yükler altındaki dayanımlarını tespit etmek amacıyla yapılmaktadır. Bu deney ile numune üzerine bir yük uygulayıp daha sonra yük kaldırılarak meydana gelen kalıcı deformasyonun ölçülmektedir. Statik sünme deneyi sonucunda elde edilen sünme modülü değeri, ısı ve dingil yükleriyle karşılaşan sıcak karışımların düşük sıcaklıktaki sertliğinin tahmininde kullanılmaktadır ayrıca, tekerlek

izinin hesaplanmasında da kullanılmaktadır [5]. Deneyde bir saatlik süre boyunca numuneye belirli bir statik eksenel gerilme (σ) uygulanır ve zamanın bir fonksiyonu olarak eksenel deformasyonlar ölçülmektedir. Sünme modülü (E_{cq}) değeri (2.11)'deki gibi hesaplanır.

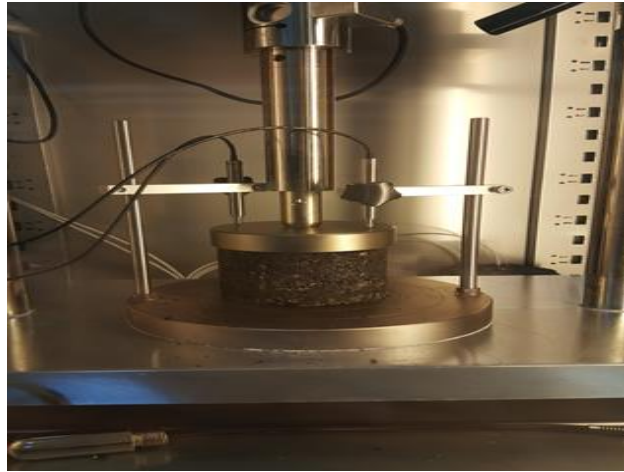
$$E_{cq}(t) = \sigma / \epsilon_c(t) \quad (2.11)$$

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

σ : Uygulanan gerilme (Mpa)

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

Statik sünme deneyi şekil 2.29'da gösterildiği gibi deney düzeneği kullanılarak yapılmaktadır. Deneye başlamadan önce karışım numuneleri, deney sıcaklığında (50°C) en az 3 saat bekletilir. Sonrasında numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek düşey deformasyonu ölçecek sensörler ayarlanır. Gerekli veriler bilgisayara 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 yüklemenden sonra 60 dk. boyunca 100 kPa'lık yükleme yapılır. Deney bitiminden sonra birim deformasyon-zaman, rijitlik modülü- zaman grafikleri otomatik olarak çizilmiştir [5].



Şekil 2.29. Sünme deneyi uygulanan numune

2.9. Malzemelerin Karakterizasyonu

Malzemelerin yüzey yapıları, gözenek boyutları, yüzey dağılımları, makromoleküler yapılarında bulunan bağların yapısı ve amorf yapıda olup olmadıkları enstrümental yöntemlerle belirlenmektedir. Bitümlü malzemelerin karakterizasyonu için son yıllarda birçok analiz teknik kullanılmaktadır. En fazla kullanılan analiz yöntemleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM), X- ışını kırınımı (XRD) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)'dır. Saf ve modifiye bağlayıcıların karakterizasyonu SEM, XRD ve FTIR analizleri ile belirlenmiştir [26].

2.9.1. Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM/Scanning Electron Microscopy)

SEM, malzemelerin mikro-morfolojik yapısının gözlemlenmesi ve analiz yapılmasını sağlayan karakterizasyon aracıdır. SEM, malzemenin yapısının ve homojenliğinin izlenmesine izin verdiği için polimer modifiyeli bitümün faz morfolojisini incelemeye önemli bir yöntemdir. SEM görüntüleri; bitüm-polimer uyumluluğunun anlaşılmasını sağlamada ve yaşlanma sürecinden kaynaklanan hasarı ortaya çıkarmada kullanılmaktadır. Bu görüntülerde bitüm bakımından zengin olan faz koyu veya siyah görülürken polimer faz açık renkte görülmektedir [26]. Şekil 2.30'da SEM cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.30. SEM cihazı [27]

2.9.2. X- Işını Kırınımı (XRD/X-Ray Diffraction)

XRD, katı malzemelerdeki kristal fazları tanımlamak ve bu fazların yapısal özelliklerini analiz etmek için kullanılan çok yönlü bir analiz yöntemidir. Modifiye bitümlerin kristalit parametreleri yaygın olarak XRD ile belirlenir. Bitümlü bağlayıcının yapısal parametrelerinin pik yoğunluğuna ve konumuna göre niceliksel yoğunluk eğrileri elde edilmektedir [26]. Şekil 2.31’de XRD cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.31. XRD cihazı [27]

2.9.3. FTIR (Fourier Transformation Infrared Spectroscopy) Spektroskopisi

FTIR, atık polimerlerin makromoleküler yapısında bulunan bağların ve fonksiyonel grupların belirlenmesinde FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) yöntemi kullanılmaktadır. FTIR spektroskopisinde belirli oluşan pikler yardımıyla dalga boyu aralıkları göz önünde bulundurularak fonksiyonel grup tayini yapılmaktadır [28]. Şekil 2.32’de FTIR cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.32. FTIR cihazı [27]

3. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU

Esnek kaplamaların stabilite ve performans yönünden nitelikli, uzun ömürlü ve bakım-onarım maliyetinin az olması asıl amaçlardandır. Kaplamaların bu özelliklere sahip olabilmesi için kalıcı deformasyonlarının, yorulma ve düşük ısı çatlaklarının, su etkisiyle soyulmasının ve düşük durabilitelerinin en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu sebeple modifiye işlemi gerçekleştirilerek gerek asfalt bağlayıcının gerekse karışımın performansı artırılmaya çalışılmaktadır.

Modifikasyon; bağlacının ve karışımın performansını artırmak amacıyla, modifiyer olarak kullanılacak katkıların belirli oranlarda ya asfalt içerisine ya da asfalt bağlayıcılı karışım içerisine katılarak yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen asfalta ‘Modifiye Asfalt (MA)’ ve karışıma ise ‘Modifiye Edilmiş Karışım’ denilmektedir [3].

3.1. Modifikasyonun Amacı

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmelerini genel olarak şu şekilde sıralanabilir [5]:

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

3.2. Modifikasyon İçin Kullanılan Katkı Maddeleri

Günümüzde modifiye bitüm veya modifiye karışım elde edilmesinde kullanılan katkı malzemeleri çok çeşitlilik göstermektedir. En yaygın olarak kullanılan modifiye maddeleri çizelge 3.1’de gösterilmiştir [3,4].

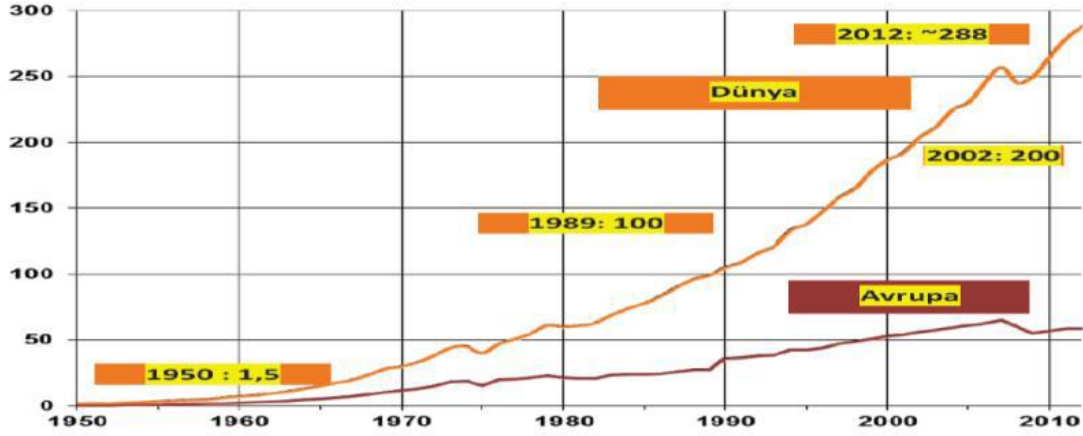
Çizelge 3.1. Modifiyer Maddeleri [3]

Katkı Tipi	Amaç
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve stabilitesini artırmak
Kauçuk (Rubber-Lastik)	Viskosluğu artırmak
Termoplastik Polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek, viskosluğu artırmak
Termoplastik Kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek,
Termosetling Polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu artırmak
Organo-Manganez Bileşikleri	Mukavemeti artırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek
Doğal Asfaltlar	Isıya duyarlılığını düzeltmek, aşınma direncini artırmak
Epoksi Reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direncini artırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direncini artırmak
Gilsonit (Tabii Asfalt)	Teker izi deformasyon direncini artırmak
Siyah Karbon	Asfaltın dayanımını ve karışımın deformasyon direncini artırmak
Yağ	Bağlayıcılığı artırmak penetrasyon ve yumuşama noktasını düşürmek,viskoziteyi düşürmek
Filler	Rijitliği artırmak, yumuşama noktasını artırmak
Elyafar	Çatlama direncini artırmak
APP ve EVA	Rijitlik, penetrasyon, frass kırılabilirlik, yumuşama noktası vb. özelliklerini iyileştirmek
SBS	Penetrasyon, yumuşama noktası, düşük ısı çatlakları, elastikiyet vb. özellikleri iyileştirmek
Çözücüler	Viskoziteyi artırma

3.3. Plastikler

Dünyada tüketimi hızla artmakta olan malzemelerin en önemli malzemelerin başında plastikler gelmektedir [6]. Plastikler; ambalaj, bina ve inşaat, otomotiv, elektrik ve elektronik, ev gereçleri uygulamaları gibi yaşamımızın birçok alanında kullanılmaktadır [29]. Gelişen plastik sanayi ile daha az miktarda ürün satın alınmasını sağlayacak ve daha dayanıklı nitelikte plastik malzemelerinin yapılması mümkün hale gelmiştir. Bu sayede plastiklerin son yıllarda önemi giderek artacak ve daha yaygın bir kullanım alanı bulacaktır [30].

Dünyada 1950–2012 yılları arasında toplam plastik üretiminde bileşik büyüme hızı % 8,7 iken, Türkiye de 2002-2012 yılları arasında ortalama büyüme hızı % 10,8 olmuştur. Şekil 3.1’de dünya plastik sektörü üretiminin gelişimi verilmiştir [31].



Şekil 3.1. Dünyada Plastik Sektörünün Gelişimi [31]

Türkiye’de zamanla plastik kullanımı artmaya başlamıştır. 1960’larda kişi başına 0,6 kg düşüyorken, 1977 yılında 5,25 kg, 1987 yılında 9,05 kg, 1989 yılında 9,65 kg, 1992 yılında 13,54 kg olmuştur [32].

Plastikler, yapıları bakımından ısıl sertleşir (termoset) ve ısıl yumuşar (termoplastik) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [30]. Isıl sertleşir plastikler ısıtıldıklarında çözünmez ve erimezler. Yeniden ısıtıldıklarında ise yumuşarlar ancak akışkan hale gelmezler. Fenolik reçineler, furan reçineleri, aminoplastlar, alkitler, doymamış asitler, poliesterler, epoksi reçineler, poliüretanlar ve silikonlar bu grupta yer alırlar [33].

Isıl yumuşar plastikler ise birçok kez yumuşatılıp sertleştirilebilirler. Soğuduklarında ise biçimlenmiş olurlar. Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE), Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), Polistiren (PS), Polipropilen (PP), Polietilen tereftalat (PET veya PETE), Polivinilklorür (PVC) bu grubun başlıcalarıdır [33].

3.4. Geri Kazanım

Kullanılan plastiklerin büyük çoğunluğunun bir defa kullanılıp atılması çevre kirliliğini de beraberinde getirmiştir. Plastikler doğal olarak ayrışmazlar ve bunların geri dönüşümü için alternatif yöntemlerin bulunması gerekmektedir [34]. Bu sorunun temel çözümü geri kazanımıdır. Geri kazanım olayı hem çevre kirliliğini önleyip hem de atık maddelerin değerlendirilmesi sonucu ekonomiye büyük katkılar sağlayacaktır [33].

1988 yılında yapılan uluslararası bir düzenlemede suların, yiyecek ve içeceklerin konduğu plastik kaplar birden yediye kadar numaralandırılmıştır. Bu numaralar üçgen şeklinde olup şişe tabanlarına geri dönüşüm ambleminin içine yazılmaktadır. Numaralar plastik şişenin hangi hammaddeden üretildiğini göstermektedir. Örneğin şişe tabanında PET veya PETE kısaltması görüldüğünde şişenin üretiminde polietilen tereftalat kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu maddeden üretilen şişeler 1 sayısı ile numaralandırılırlar. Numaraların anlamları çizelge 3.2. sıralanmıştır [32].

Çizelge 3.2. Geri Dönüşümde Kullanılan Kodlar [32]

No	Polimerler	Kullanım Alanları
1	Polietilen Tereftalat (PET)	Şişeler, filmler
2	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)	Çanta, şişe, taşıma malzemesi
3	Polivinil Klorür (PVC-V)	Çit malzemesi
4	Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE)	Ambalaj ve sera örtüsü
5	Polipropilen (PP)	Mutfak eşyası
6	Polistiren (PS)	Video kaset, yalıtım malzemesi
7	Akrilik, Polikarbonat, Naylon ve diğer	

Plastik atıkların geri kazanımı 4 yöntemle gerçekleştirilmektedir: Birincil geri dönüşüm yönteminde atık plastikler mekanik kıyıcılarla küçültülerek orijinal plastiklerle karıştırılıp tekrar işlenir. İkincil dönüşüm atık plastikten üretilen ürüne eşdeğer olmayan ikincil kalitede ürün üretimine yönelik geri kazanımlardır. Üçüncül dönüşüm kimyasal dönüşüm olarak tarif edilmektedir. Temel amaç atık plastiklerden çeşitli farklı kimyasal maddelerin üretilmesidir. Dördüncül dönüşüm ise plastik atıkları yakarak ısı enerjisi açığa çıkarmaktır [32].

3.5. Polietilen Tereftalat (PET)

Polietilen tereftalat (PET) termoplastik eriyik bir malzemedir [32]. Bu malzemeler günlük hayatta içme şişeleri, gıda ambalajları ve saklama kapları vb. şekilde yaygın kullanım alanlarına sahiplerdir [35]. Düşük ve yüksek viskoziteli olarak iki gruba ayrılmaktadır. “Staple PET” olarak isimlendirilen düşük viskoziteli olanlar reçine iplik, şişe, fotoğraf filmi üretimi gibi birçok alanlarda kullanılmaktadır. “Endüstriyel” veya “Heavy Denier” PET olarak isimlendirilen yüksek viskoziteli olanlar ise lastik kablo,

emniyet kemeri v.b. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır [32]. Polietilen Tereftalat (PET), dünya genelinde üretilen toplam polimerlerin %18'ini oluşturmaktadır [36].

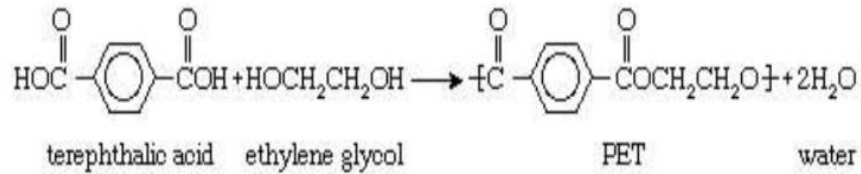
PET kaynaklı atıklar, dünyadaki katı atık miktarının ağırlıkça % 8 'ini ve hacimce % 12'sini oluşturmaktadır. PET'in geri dönüşüm oranının ülkelere göre dağılımı şu şekildedir [32]:

- Çin %70 – 85
- AB %35
- ABD %23
- Japonya % 64
- Diğer ülkeler %20-40.

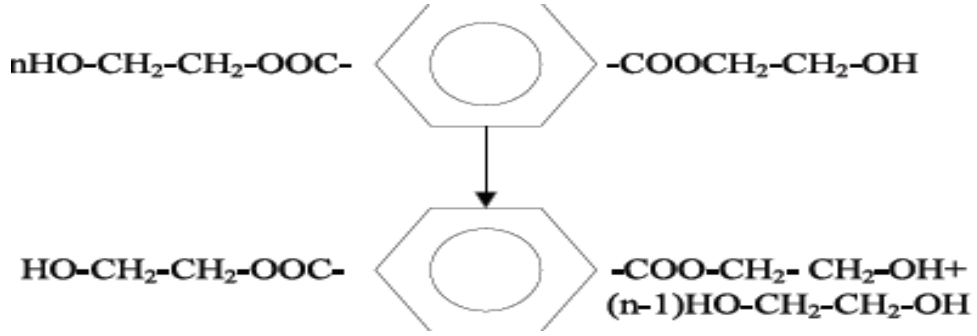
Türkiye’de yıllık 165 bin ton pet şişe üretilip, bunun sadece 40 bin tonu geri dönüşüme uğramaktadır. Her yıl doğaya karışan 125 bin ton pet şişenin maliyeti ortalama 70 milyon doları bulmaktadır. Ülkemiz sentetik elyafa yılda sadece 1,7 milyar dolar ödeme yapmaktadır. Bunun 1 milyar doları geri dönüşüm yoluyla kazanılan polyester elyafın ithal edilmesine harcadığına göre, geri dönüşüm konusuna yeterince önem verilip ülke kaynaklarını bu konuda değerlendirebilirsek 1 milyar dolar ülkemize kâr olarak kalacaktır [32].

3.5.1. PET’in Kimyasal Yapısı

Polietilen tereftalat (PET), tereftalik asit ve etilen glikolün poliesteridir ve dimetilentereftalat ve etilen glikolün çoklu tekrarıyla meydana gelmektedir. Plastik teşhis etme kodu ‘1’ dir [30]. PET’in molekül yapısı şekil 3.2’de, dimetilentereftalat ve etilen glikol yöntemi şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. PET molekül yapısı [30]



Şekil 3.3. Dimetilentereftalat ve etilen glikol yöntemi [32]

PET, kimyasal olarak kararlı, dayanıklı bir yapıya sahiptir. Hızlı yanan ve yanarken mum kokusu duman veren bir malzemedir [30,32]. Polietilen Tereftalat (PET)' in kimyasal özellikleri çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. PET kimyasal özellikleri [30]

Özellik	PET
Yoğunluk	1,33-1,38 gr/ml
Kullanılabilir Max. Sıcaklığı	60 °C
Sertlik Derecesi	Orta
Renk	Açık renkli
Erime Sıcaklığı	250 °C
Kalorifik Değeri	11060 Kkal/kg

3.6. Literatür Çalışmaları

PET günlük hayatta hemen her alanda kullandığımız polimer grubu bir malzemedir. Atık PET'in çevreye olan zararının en aza indirgenmesi ve maliyet açısından geri dönüşüm yoluyla tekrar kullanılması oldukça önemlidir. Atık PET ile yapılan yol kaplamalarının yorulma ömrünün iyileştiği, stabilitenin arttığı ve kalıcı deformasyonlara karşı direncin arttığı ayrıca PET'in kaplama maliyetini düşürdüğü görülmüştür [30,31,37-40].

Ahmadinia vd. (2011), PET şişelerin taş mastik asfaltta katkı olarak kullanımını araştırdıkları çalışmada PET'in, taş mastik asfalt karışımında kıyılmış PET içeren ve içermeyen numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre karışıma PET eklenmesiyle stabilitenin önemli derecede arttığı, daha sonrasında azalmaya başladığı sonucuna varmışlardır. PET ilavesiyle karışımın sertlik derecesinde

değişiklikler gözlemledikleri ve deformasyona karşı direncin de belirli bir noktaya kadar arttığı sonucuna varmışlardır [37].

Modarres vd. (2014), atık plastik şişelerin modifiye karışımlardaki rijitlik ve yorulma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Ayrıca çalışmada PET modifiyeli karışım ile stiren bütadien stiren (SBS)'i karşılaştırmışlardır. Karışıma PET eklenmesinin yorulma üzerinde faydalı etkilere sahip olduğu, SBS ile kıyaslama yapıldığında ise sertlik derecelerinin belirli bir sıcaklıkta benzer sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca her iki katkı malzemesinin de karışımda yorulma davranışını iyileştirdiği fakat PET'in SBS'e göre daha ucuz bir malzeme olduğu için daha çok tercih edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır [38].

Moghaddam vd. (2012), atık plastik şişeler içeren taş mastik asfalt (SMA) karışımların dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Karışıma PET ilavesi yaptıktan sonra karışımın sertliğinin değiştiği, PET ilaveli karışımların yorulma özelliklerinin SMA saf karışımlarının yorulma özelliklerine göre önemli derecede arttığı sonucuna varmışlardır [39].

Abdul Rahman vd. (2012), geri kazanılmış şişe atıkların (PET) uygun oranlarda agrega yerine kullanılarak modifiye edilmiş asfalt karışımlardaki kalıcı deformasyon ve sertlik davranışlarını incelemişlerdir. Çeşitli yüzdelerdeki çalışmaları sonucunda maksimum kalıcı deformasyonun %20 PET içerikli karışımda ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Ekonomik açıdan da geri dönüşümlü malzemenin yol malzemesinde katkı olarak kullanılmasının yol inşasının maliyetlerini düşüreceği sonucuna varmışlardır [40].

Hassani vd. (2005), PET' ten üretilen şişelerin kullanımı sonucu oluşan evsel atıkların ve çöp alanlarının fazla yer kaplaması düşüncesinden çıkarak bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada asfalt beton karışımında PET atıkları kullanılarak (plastipfalt) agrega yerine kullanılmıştır. Kaba agreganın belirli bir miktarı yerine PET ekleyerek plastipfalt karışımları oluşturmuş ve PET yüzdesindeki artış ile stabilitenin azaldığı, yoğunluğun arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca agrega yerine PET kullanıldığında doğal kaynakların bir kısmının korunduğuna ve hacim olarak çok fazla yer kaplamalara gerek kalmayacağı sonucuna varmışlardır [41].

Yaşmun (2009), PET lifi katkılı bitümlü sıcak karışımların dayanıklılık özelliklerini araştırmıştır. Ayrıca iri agrega yerine oromobil lastikleri ekleyerek de karışımlar yapıp numuneler hazırlamıştır. Yapılan deneyler sonucunda PET lifi katkılı karışımların

stabilite ve akmasında artışlar, otomobil lastiği katkılı numunelerde ise akmalarda artış stabilite de azalma gözlemlenmiştir [30].

İyınam vd. (2007), atık plastikler kullanarak bitümlü sıcak karışımlar hazırlayıp, bu şekilde oluşturulan kaplamaların fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dirençlerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda atık plastiklerle oluşturulan kaplamaların kullanımlarının sıcaklık, iklim ve trafik yüklerine göre belirlendiği takdirde ekonomiye faydalar sağlayacağı ve kaplamanın dirençli olacağı sonucuna varmışlardır [42].

Farzanian (2013), PET atıklarını polimerizasyon işleminden geçirdikten sonra elde ettiği ürünlerle asfalt betonu üretilen kaplamanın performansını artırmayı amaçladığı çalışmada katkı malzemesi olan atıkların asfaltın yaşlanmaya karşı direncini ve yorulma mukavemetini artırdığı, stabiliteyi iyileştirdiği sonucuna varmıştır [43].

Ziari vd. (2016), atık PET katkılı asfalt karışımların karışım üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Asfalt karışıma PET ilavesinin karışımın direncini artırdığı fakat bunun PET boyutu ile ilgili olduğu sonucuna varmışlardır [44].

Denghan vd. (2016), geri dönüştürülmüş PET elyaf ile üretilmiş sıcak karışımların yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada iki ayrı boyutta katkı çalışıp karşılaştırma yapmışlardır. Daha büyük ebatla koyduğu PET katkılı karışımın daha yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca iki malzeme ile ayrı ayrı üretilen karışımların saf malzemeye üretilen karışıma göre sertliklerinin daha düşük çıktığı, PET içerikleri arttıkça bu değerin daha da düştüğü sonucuna varmışlardır [45].

Moghaddam vd. (2014), PET modifiyeli karışımların ve modifiye edilmemiş karışımların kalıcı deformasyon özelliklerini araştırmışlardır. Bu doğrultuda PET ile modifiye edilmiş karışımların kalıcı deformasyon özelliklerinin daha dirençli olduğu sonucuna varmışlardır [46].

İnkaya (2016), atık plastiklerin karayolunda kullanımıyla ilgili bir çalışma yaparak çalışmada toz PET atıklarını bitüm yerine kullanmıştır. PET ile hazırlanan numunelerde Marshall stabilitesinin arttığı, bu durumda da PET 'in bitümlü bağlayıcı olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır [31].

Tuncan vd.(2003), çalışmalarında plastik, otomobil lastiği, mermer tozu uçucu kül gibi atıkların BSK'larda ince agrega ve filler malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Numuneler hazırlanırken atık plastiğin kullanılacağı miktar kadar ince agrega çıkarmış ve bu doğrultuda hazırladıkları numunelerde Marshall ve indirekt

çekme deneyleri yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda bu numunelerdeki dayanımların arttığı sonucuna varmışlardır [47].

Almeida e Silva vd. (2015), çalışmalarında asfalt bağlayıcıda mikronize PET'in etkilerini araştırmışlardır. Aşamalı PET ilavesinin bağlayıcının kıvamını sertleştirdiği, yumuşama noktasını artırdığını, ayrıca PET katkılı bağlayıcıların viskozitesinin belirli sıcaklığa kadar artıp daha sonra azaldığı ve elastikliğini artırdığı sonucuna varmışlardır [48].

Leng vd. (2018) yaptıkları çalışmaları atık PET'in aminolizinde trietilentetramin kullanarak elde ettikleri bağlayıcıların reolojik özelliklerini tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda PET katkılı bağlayıcıların düşük sıcaklık performansını artırdığı, orta sıcaklıklarda yorulma performansını artırdığı ve yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi performansında iyi performans gösterdiği sonucuna varmışlardır [49].

El Naga ve Ragab (2019), geri dönüştürülmüş PET'in asfalt karışımlarında kullanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında yaptıkları deneyler sonucunda, PET katkılı bağlayıcıların penetrasyon değerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinde artışlar meydana geldiği, ayrıca PET' in kaplamayı daha sert yaptığı sonucuna varmışlardır [50].

Ameri ve Nasr (2016), yaptıkları çalışmada devulkanize edilmiş PET' in asfalt bağlayıcıdaki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda PET katkılı bağlayıcıların, saf bağlayıcılara göre, penetrasyon değerinde azalma, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Ancak, yüksek sıcaklıklardaki depolama stabilitesi testi sonucunda ise tüm PET katkılı bağlayıcıların modifiye bitüm şartname sınırlarına uymadığı ve depolamada kararlı bir karışım olmayacağı sonucuna varmışlardır [51].

Hoxha (2014), atık PET'in asfalt betonunda kullanımının etkilerini araştırmıştır. Çalışmasında yaptığı deneyler sonucunda, PET malzeme oranının artmasıyla penetrasyon değerinde bir azalış, yumuşama noktası değerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durumun karışımın sertlik ve kıvamını artırarak, karışımın kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiği ve sıcak iklim bölgelerinde kaplama tabakalarında kullanılabileceği ayrıca PET katkılı karışım numunelerinin stabilite değerlerinin de arttığı sonucuna varmıştır [52].

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla katkı malzemesi olarak PET kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle saf bağlayıcı ile karışımda kullanılan agreganın özellikleri tespit edilmiştir. Daha sonra modifiye bağlayıcılar elde etmek amacıyla ilk olarak bağlayıcıya, bağlayıcı ağırlığının %2,5'i kadar TEO kimyasalı katılmış ve daha sonra saf bağlayıcıya ağırlıkça %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında PET katkısı ilave edilmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların fiziksel ve reolojik özellikleri geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite) ve Superpave bağlayıcı deneyleri (RV, DSR ve BBR) ile tespit edilmiştir. Ayrıca modifiye bağlayıcıların kimyasal ve morfolojik özelliklerinin tespiti için SEM, XRD ve FTIR analizleri yapılmıştır. Geri kazanılmış PET'in BSK'ların performans özellikleri üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla saf ve modifiye bağlayıcılar ile Marshall dizayn yöntemi kullanılarak karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS), Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS), Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) ve Sünme deneyleri uygulanmıştır.

4.1. Bitümlü Bağlayıcı Seçilmesi

Bu çalışmada, Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü asfalt şantiyesinden temin edilen B 70/100 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün fiziksel özellikleri geleneksel yöntemlerle tespit edilmiş olup sonuçlar çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. B 70/100 penetrasyonlu bitümün deney sonuçları

Deneyler	Deney Standardı	B 70/100	
		Şartname Limitleri	Ölçülen Değer
Penetrasyon (0,1mm)	EN 1426	70-100	88
Yumuşama Noktası (°C)	EN 1427	43-51	46,75
Düktülite (cm)	TS 119	min 100	>100
Parlama Noktası (°C)	EN 22719	min 230	238
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	TS 1087	1,0 – 1,1	1,038

4.2. Agrega Seçilmesi

Çalışmada agregası olarak Elazığ Karayolları Bölge Müdürlüğünden temin edilen kırmataş kalker malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan agreganın gradasyonu çizelge 4.2’de fiziksel özellikleri ise çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 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	60

Çizelge 4.3. Agreganın fiziksel özellikleri

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

4.3. Kullanılan Katkı ve Kimyasal Madde

Çalışmada bitüm modifikasyonunda kullanılmak için Adana Meltem Kimya LTD.ŞTİ.’ den temin edilen ve geri kazanım yoluyla elde edilmiş olan polietilen tereftalat (PET) kullanılmıştır. PET ‘in genel özellikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. PET 'in genel özellikleri

Özellik	PET
Özgül Ağırlık	1,33 – 1,42 g/cm ³
Fiziksel boyut	Granüler tanecikli
Renk	Açık renk
Erime Sıcaklığı	250 °C
Kullanılabilir sıcaklık	60 °C
Kullanılabilir max. boyut	0,3 mm

Bitüm ile PET arasında kimyasal bir bağ oluşturmak için kimya mühendisliği laboratuvarından temin edilmiş olan Trietanolamin (TEO) kullanılmıştır. TEO (C₆H₁₅NO₃) 'nun kimyasal özellikleri çizelge 4.5'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.5. TEO' nun kimyasal özellikleri [53]

Özellik	TEO
Kimyasal formül	C ₆ H ₁₅ NO ₃
Molar kütle (g/mol)	149,19 g/mol
Kaynama noktası (°C)	335,4 °C
Yoğunluk (g/cm ³)	1,12 g/cm ³
Yapı	Bazik

4.4. Modifiye Bitümlerin Hazırlanması

Çalışmada modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf bitüm 160 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bitüm ağırlığının %2,5'i kadar TEO ilave edilerek aynı sıcaklıkta 500 devirde 10 dakika boyunca karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Karıştırma cihazı şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Karıştırma cihazı

Daha sonra her bir yüzde için aynı işlem sırası takip edilerek, bitüm ağırlığının %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında PET ilavesi edilmiş ve karıştırma işlemi 1000 devirde 30 dakika boyunca aynı sıcaklıkta devam ettirilmiştir. Modifikasyonda kullanılan PET, karışıma PET eklenmesi ve 1000 devirde karıştırılması şekil 4.2’de verilmiştir. Tüm modifiye bağlayıcılar bu işlem sırasında hazırlanmıştır.

Çalışmada elde edilmiş olan saf ve modifiye bitümler sırasıyla B, B+%2PET, B+%4PET, B+%6PET, B+%8PET ve B+%10PET olarak kodlanmıştır.



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.2. Max. 0.3mm PET (a) , Bitüme PET eklenmesi (b), 1000 devirde karıştırılması (c)

4.5. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

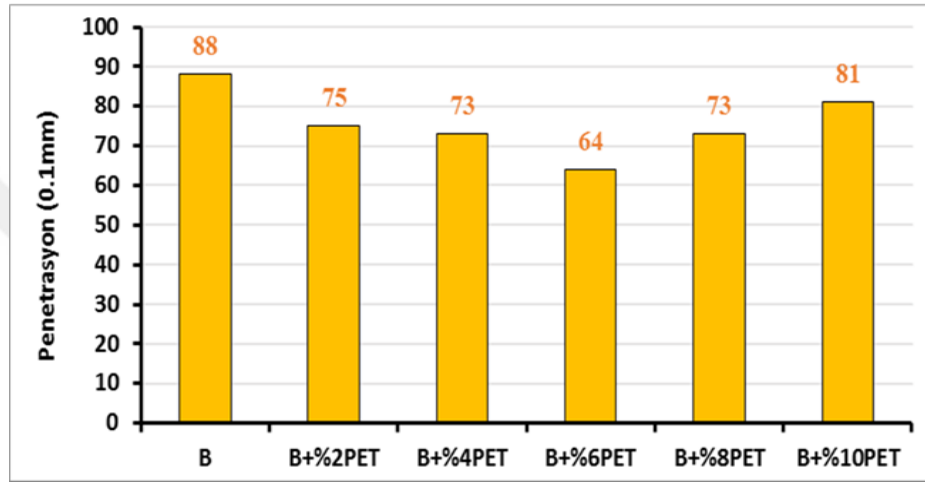
Hazırlanan saf ve PET modifiyeli bağlayıcılar üzerinde ilk olarak geleneksel deneyler yardımıyla bağlayıcıların fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklıktaki performans seviyelerinin belirlenebilmesi için dönel viskozimetre (RV), dinamik kayma reometresi (DSR) ve kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanmıştır. Tüm deney sonuçları sırasıyla alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.5.1. Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için penetrasyon, yumuşama noktası ve düktülite gibi geleneksel deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları çizelge 4.6’da bağlayıcıların penetrasyon değerlerindeki değişim ise şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Bağlayıcılara uygulanan geleneksel test sonuçları

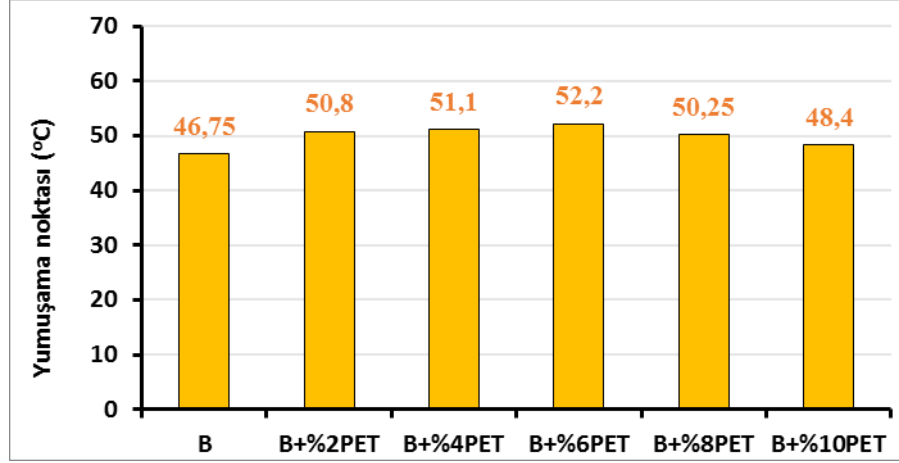
Bağlayıcı Türü	Penetrasyon	Yumuşama Noktası (°C)	Düktülite (cm)
B 70/100	88	46,75	117
B+%2PET	75	50,8	109
B+%4PET	73	51,1	105
B+%6PET	64	52,2	101
B+%8PET	73	50,25	107
B+%10PET	81	48,4	112



Şekil 4.3. Bağlayıcıların penetrasyon değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi B 70/100 penetrasyon sınıfına sahip saf bitüme TEO+PET eklenmesiyle penetrasyon değerinde %6 ‘ya kadar bir azalış meydana gelmiş olup, daha sonra artış meydana gelmiştir. Saf bitüme göre değişim oranları sırasıyla %14,8; %17; 27,3; %17 ve % 8 azalma olarak tespit edilmiştir. Bu durumda, PET ilavesi ile modifiye bitümün önce sertleşmeye başladığını fakat daha sonra tekrar yumuşamaya başladığını ifade etmek mümkündür. Bu sertleşme veya penetrasyon değerindeki azalma sonucunda %6 PET katkıli modifiye bitümün penetrasyon sınıfı B 50/70 olarak değişmiştir. Bunun sonucu olarak, nispeten daha ılıman bölgelerde kullanılabilen B 70/100 asfalt bağlayıcısının %6 PET ilave edilmesiyle çok daha sıcak bölgelerde kullanılabileceğini ve bunun bitümden kaynaklı kalıcı deformasyonlara karşı daha elverişli olduğunu ifade etmek mümkündür.

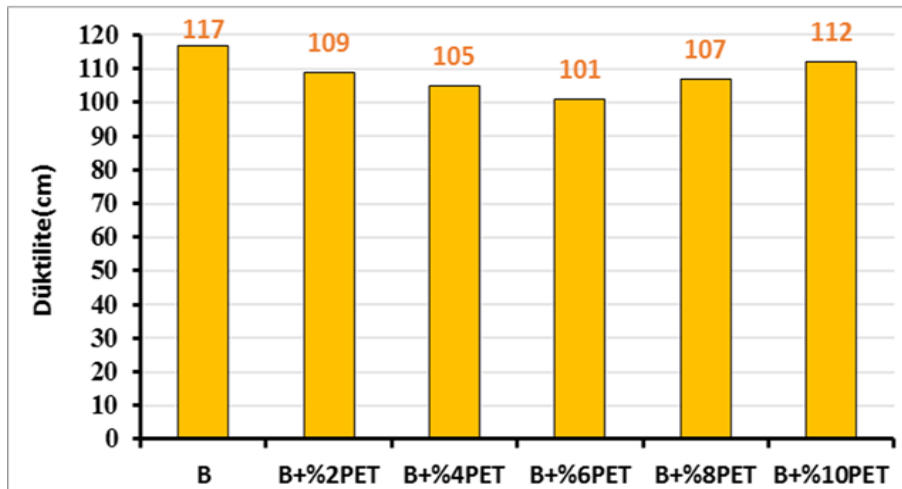
Bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.4’de görüldüğü gibi B 70/100 saf bitümüne PET eklenmesiyle yumuşama noktası değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Katkı miktarının artışına bağlı olarak değişim oranları saf bitüme göre sırasıyla %8,7; %9,3; %11,7; %7,5 ve %3,5 artış olarak tespit edilmiştir. Bu karışımlarda en yüksek yumuşama noktası değerine ise %6 PET oranında ulaşılmıştır. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının penetrasyon sonuçları ile uyumluluk gösterdiğini de ifade etmek mümkündür. Kısacası bağlayıcılar ilk olarak sert bir kıvama gelmiş, daha sonra tekrar yumuşama eğilimine girmiştir. Düşük penetrasyon ve yüksek yumuşama noktası değerleri, %6 PET ilavesinin bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini azalttığını ve daha sıcak bölgelerde kullanılabileceğini göstermektedir.

Bağlayıcıların düktülite değerlerindeki değişimler şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Bağlayıcıların düktülite değişimleri

Çizelge 4.6. ve Şekil 4.5’de görüldüğü gibi B 70/100 saf bitümüne PET eklenmesiyle düktilite değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. PET ilavesine bağlı olarak, bu değişim oranları saf bitüme göre sırasıyla %6,8; %10,3; %13,7; %8,5 ve %4,3 azalma olarak gerçekleşmiştir. PET ilavesiyle modifiye bitümlerin düktilite değerlerinde ilk olarak %6’ya kadar bir azalış, daha sonra ise artış meydana gelmiştir. Düktilite değerindeki azalma, bitümlü bağlayıcının uzama kabiliyetinin ve kohezyon mukavemetinin düşmesi, artması ise bu özelliklerde oluşan artış anlamına gelmektedir. Ayrıca düktilite sonuçlarının penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları ile de uyumluluk gösterdiği görülmektedir.

Çalışmada ayrıca saf ve PET katkılı bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının bir ölçüsü olarak değerlendirilen penetrasyon indeksi (PI) değeri de belirlenmiştir. PI değeri, (4.1) ve (4.2) denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır [26]. Bağlayıcılara ait PI değerleri çizelge 4.7’de verilmiştir.

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

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

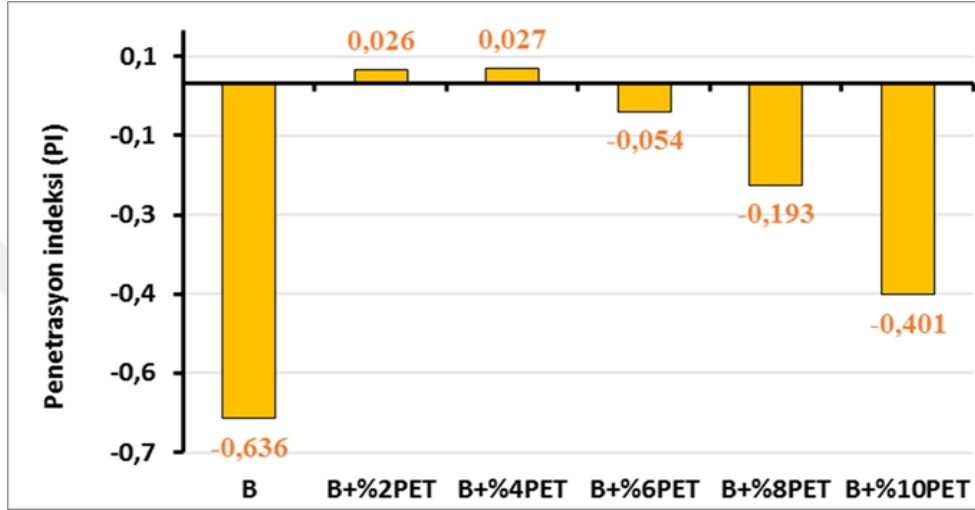
Formülasyondaki P_{25} , bitümün 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerini, T_{YN} ise yumuşama noktası değerini belirtmektedir. PI değerinin -2’den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2’den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir [26].

Çizelge 4.7. Penetrasyon İndeksi (PI) sonuçları

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B 70/100	-0,636
B+%2PET	0,026
B+%4PET	0,027
B+%6PET	-0,054
B+%8PET	-0,193
B+%10PET	-0,401

Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi B 70/100 saf bitüme PET ilavesi ile PI değerlerinde önemli değişimler meydana gelmiştir. Saf ve modifiye bağlayıcıların PI değerleri

sırasıyla -0,636; 0,026; 0,027; -0,054; -0,193 ve -0,401 olarak elde edilmiştir. PET ilavesiyle bağlayıcıların PI değerlerindeki değişim Şekil 4.6’da verilmiştir. Katkı oranının artmasıyla bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin önce düştüğü sonra tekrar yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Sıcaklık hassasiyeti bakımından en uygun katkı oranının %4 PET olmasına rağmen, %6 PET oranında da saf bitüme göre sıcaklık hassasiyetinde ciddi bir azalma olduğu görülmektedir



Şekil 4.6. PI değerinin katkı oranı ile değişimi

4.5.2. Bağlayıcıların Yaşlandırılması

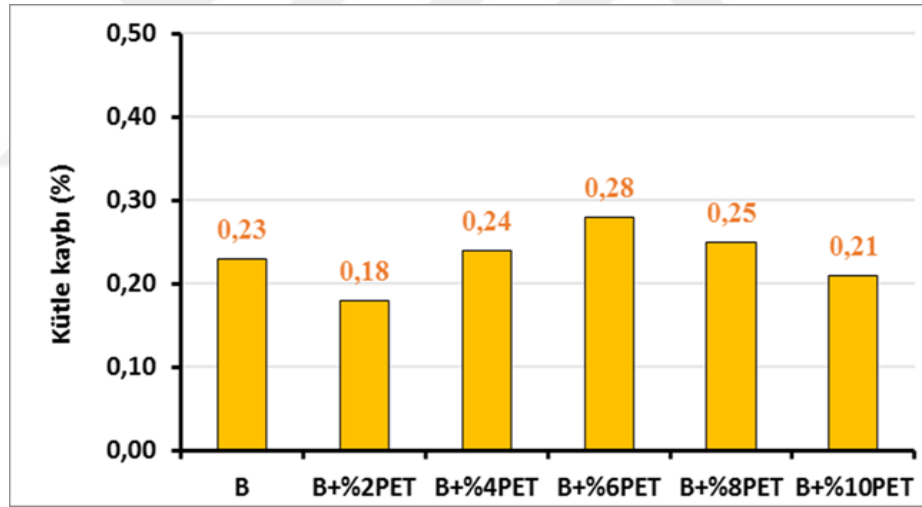
Hazırlanan saf ve PET modifiyeli bağlayıcılar ilk olarak dönel ince film etüvü deneyi (RTFOT) ile kısa süreli yaşlandırmaya tabii tutulmuş, daha sonra yaşlandırılmış olan tüm bağlayıcılar üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır.

Bu amaçla saf ve PET katkılı bağlayıcılar, 150 °C sıcaklıkta ısıtılarak 8 adet şişenin içerisine yaklaşık 35±0,5 gr. doldurulup 163 °C sıcaklığa ulaşmış olan RTFOT cihazının içindeki dönel tabla bölmelerine yerleştirildi. Tabla dakikada 15 devir yaparak 75 dakika süreyle deneye maruz bırakıldı. Deney sonucunda kütle kayıplarının hesabı için, önceden darası alınmış ve tartılmış olan 2 şişe, yaşlandırma işleminden sonra tartılarak kütle kayıpları hesaplandı. Geriye kalan 6 şişe ise diğer performans deneylerinde kullanılmak üzere başka kaplara alınarak muhafaza edildi.

Saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların kütle kayıpları çizelge 4.8’de, bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim ise şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Bağlayıcıların kütle kayıpları

Bağlayıcı Türü	Şartname Sınırları	M1	M2	Kütle Kaybı	Ort. Kütle Kaybı
B 70/100	max. 0,8	190,280	190,05	0,23	0,23
		191,52	191,10	0,22	
B+%2PET		202,76	202,45	0,15	0,18
		188,43	188,03	0,21	
B+%4PET		191,56	191,05	0,27	0,24
		190,26	189,88	0,20	
B+%6PET		183,84	183,38	0,25	0,28
		192,55	191,98	0,30	
B+%8PET		189,69	189,23	0,24	0,25
		194,81	194,30	0,26	
B+%10PET		195,00	194,49	0,26	0,21
		194,32	194,00	0,16	



Şekil 4.7. Bağlayıcıların kütle kayıplarındaki değişim

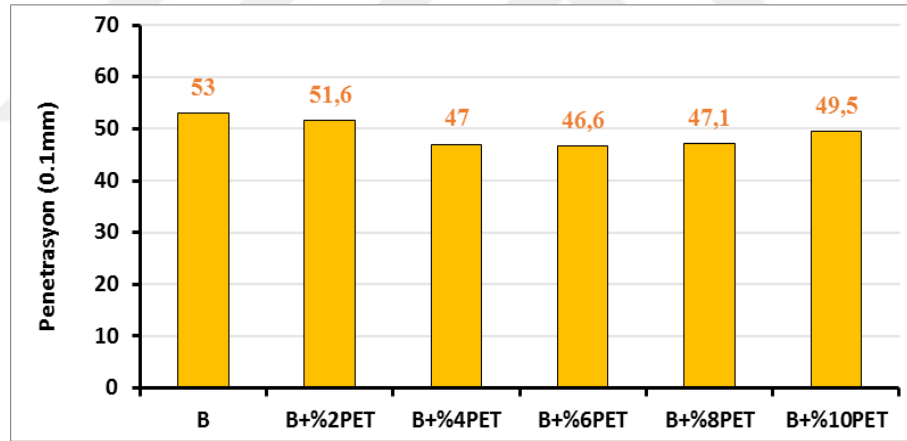
Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi B 70/100 saf bitüme PET eklenmesiyle kütle kaybında değişimler meydana gelmiştir. Bu değişim oranları saf bitüme göre %22 azalma; %4,3; %21,7; %8,7 artış ve %9 azalma şeklinde meydana gelmiştir. En fazla kütle kaybı %6 PET katkılı bağlayıcıda meydana gelmiştir. KTŞ’ye göre max. kütle kaybı yüzdesinin 0,8 olması istenmektedir. PET eklenmesiyle elde edilen bağlayıcılardaki kütle kaybı sonuçlarının şartname limitlerinin oldukça altında kaldığı

görülmektedir. Bu oluşum saf ve modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık ve oksidasyona karşı oldukça dirençli olduğunu göstermektedir.

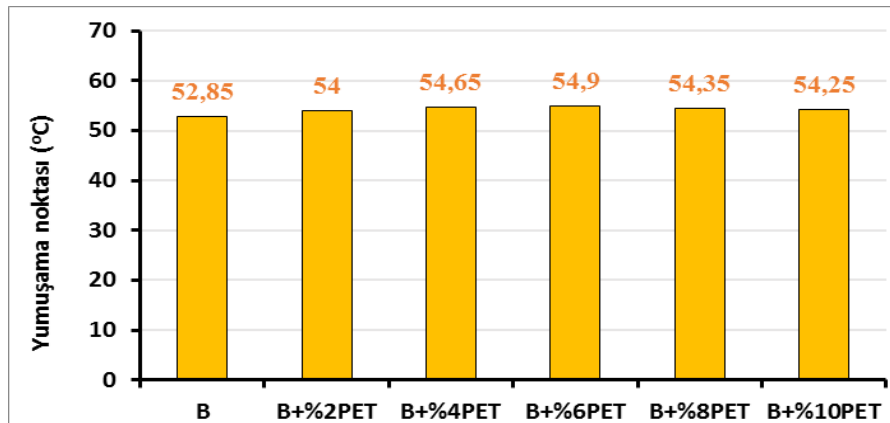
Çalışmada ayrıca saf ve PET katkılı bağlayıcılar, RTFOT yaşlandırma işleminden sonra penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerine tabii tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları çizelge 4.9’da gösterilmiştir. Bağlayıcıların RTFOT kütle kaybı sonrası penetrasyon değerlerinde meydana gelen değişim şekil 4.8’de, yumuşama noktası değerlerinde meydana gelen değişim ise şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Yaşlandırılmış numunelerin penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon	Yumuşama Noktası (°C)
B 70/100	53	52,85
B+%2PET	51.6	54,0
B+%4PET	47.0	54.65
B+%6PET	46.6	54.90
B+%8PET	47.1	54,35
B+%10PET	49.5	54,25



Şekil 4.8. RTFOT sonrası bağlayıcıların penetrasyon değişimleri



Şekil 4.9. RTFOT sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değişimleri

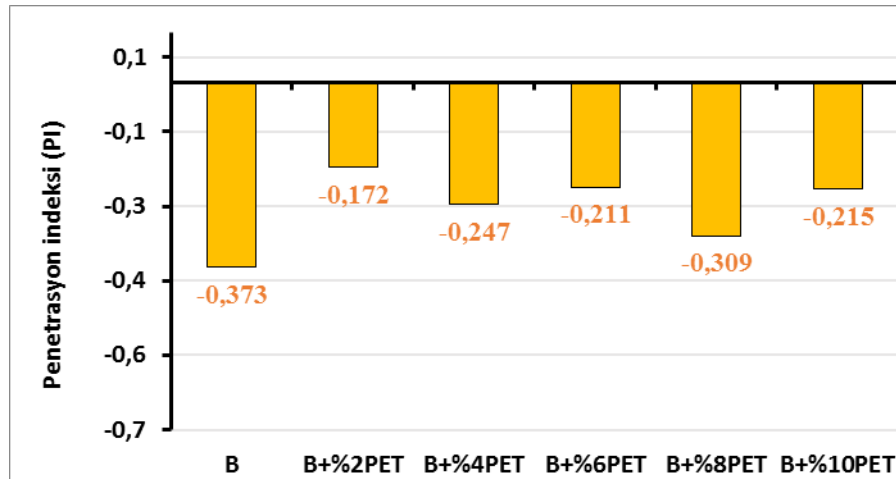
Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8’de görüldüğü gibi kısa süreli yaşlandırma deneyinden sonra PET katkılı tüm bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde yaşlanmadan önceki değerlere göre azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca saf bağlayıcının PET katkılı bağlayıcılara oranla, yaşlanmadan sonra daha fazla sertleştiği görülmektedir. Bu durumda PET katkılı kaplamaların saf bağlayıcı ile yapılmış olan kaplamalara göre kısa süreli yaşlanmalara karşı daha dirençli olabileceğini söylemek mümkündür.

Şekil 4.9’da verilen RTFOT deneyinden sonra bağlayıcılar üzerinde yapılan yumuşama noktası deney sonuçlarına göre saf ve PET katkılı bağlayıcıların yaşlanmamış bağlayıcılara göre yumuşama noktası değerlerinin arttığı ve en yüksek artışın saf bağlayıcıda meydana geldiği görülmüştür. Bu durum saf bağlayıcının kısa süreli yaşlanma hassasiyetinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Yaşlandırılmış saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmış olup sonuçlar çizelge 4.10’da, PI değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Yaşlandırılmış numunelerin PI değerleri

Bağlayıcı Türü	Penetrasyon İndeksi (PI)
B 70/100	-0,373
B+%2PET	-0,172
B+%4PET	-0,247
B+%6PET	-0,211
B+%8PET	-0,309
B+%10PET	-0,215



Şekil 4.10. RTFOT sonrası PI değerinin katkı oranı ile değişimi

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.10’da görüldüğü gibi yaşlandırılmış bağlayıcılar üzerinde yapılan PI değerleri sırasıyla -0,373; -0,172; -0,247; -0,212; -0,309 ve -0,215 olarak hesaplanmıştır. Bu değişimler değerlendirildiğinde, bağlayıcıların PI değerlerinin hemen hemen aynı seviyede kaldığı görülmektedir.

4.6. Bağlayıcıların Performans Deneyleri

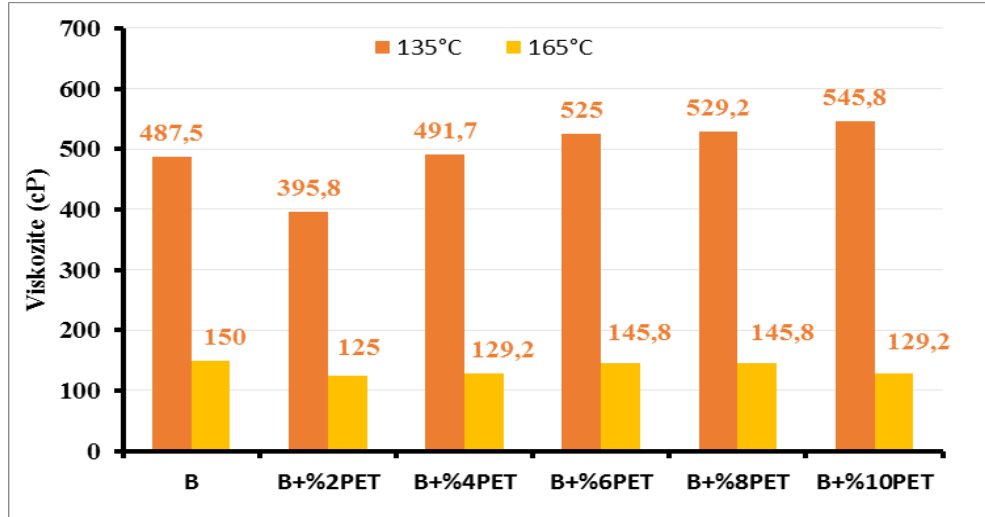
Saf ve modifiye bağlayıcıların düşük, orta ve yüksek sıcaklık performans özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla, Superpave bağlayıcı şartnamesine göre bağlayıcılara RV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Orijinal (yaşlandırılmamış) saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma sıcaklıklarını tespit etmek amacıyla RV deneyi uygulanmıştır. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyelerini belirlemek amacıyla orijinal saf ve modifiye bağlayıcılar ve RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve modifiye bağlayıcılar DSR deneyine tabii tutulmuştur. Bağlayıcıların orta ve düşük sıcaklıktaki performans seviyelerini belirlemek amacıyla RTFOT ile yaşlandırılmış saf ve modifiye bağlayıcılar PAV ile yaşlandırıldıktan sonra DSR ve BBR deneylerine tabii tutulmuştur. Deney sonucunda bütün bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ile yüksek ve düşük sıcaklık performans sınıfları belirlenmiştir.

4.6.1. Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

RV deneyi, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için yapılmaktadır. Bu amaçla saf ve modifiyeli bitümler, 135 °C ve 165 °C sıcaklıkta deneye tabii tutulmuştur. Bağlayıcılar 150 °C de ısıtılarak yaklaşık 11 gr. kadar viskozite kabına dolduruldu ve kap deney cihazına yerleştirildi. İstenilen deney sıcaklığına gelen viskozimetre sıfırlandıktan sonra 20 rpm. hızına ayarlı cihaza no:27 mili takıldı ve deney başlatıldı. Deney esnasında sabit sıcaklığa gelen numunelerin viskozite değerleri cihaz yazılı tarafından otomatik olarak elde edildi. Bu şekilde elde edilmiş olan saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların RV sonuçları çizelge 4.11’de verilmiştir. Saf ve PET katkılı bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki ortalama viskozite değerleri arasındaki ilişki ise şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Bağlayıcıların RV Sonuçları

Bağlayıcı Türü	Okumalar	Viskozite, cP	
		135°C	165°C
B 70/100	1	487,5	150
	2	487,5	150
	3	487,5	150
	Ortalama	487,5	150
B+%2PET	1	400	125
	2	400	125
	3	387,5	125
	Ortalama	395,8	125
B+%4PET	1	487,5	137,5
	2	487,5	125
	3	500	125
	Ortalama	491,7	129,2
B+%6PET	1	525	150
	2	537,5	137,5
	3	512,5	150
	Ortalama	525	145,8
B+%8PET	1	537,5	150
	2	525	150
	3	525	137,5
	Ortalama	529,2	145,8
B+%10PET	1	550	125
	2	550	137,5
	3	537,5	125
	Ortalama	545,8	129,2

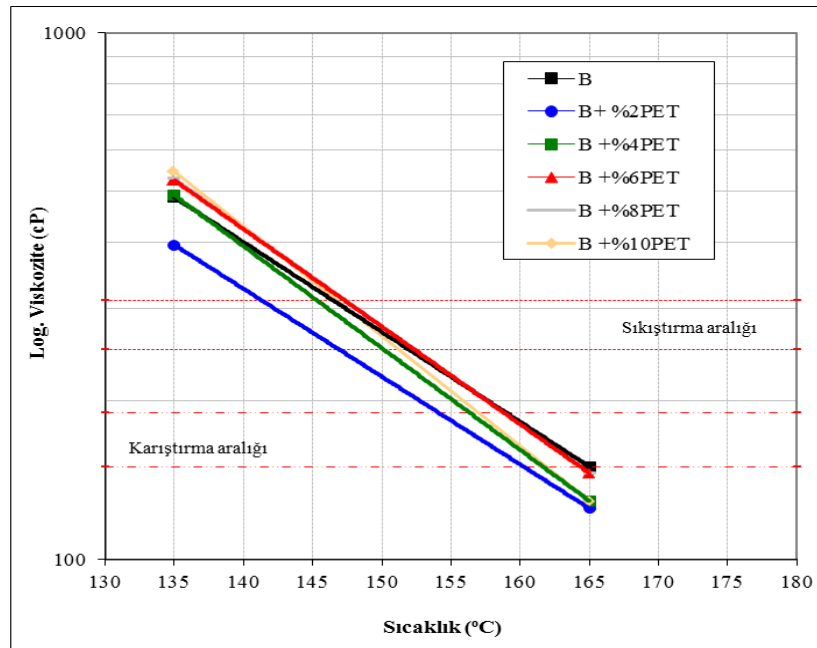


Şekil 4.11. Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki Viskozite Değişimi

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.11’de görüldüğü gibi 135 °C sıcaklıkta B 70/100 saf bitüme ilk olarak %2PET eklenmesiyle saf bitüme göre viskozite değerinde bir azalma, diğer yüzdelerde ise viskozite değerinde artış görülmüştür. Özellikle %2PET katkılı

bağlayıcının viskozite değerinde saf asfalta göre azalma olmuş, ancak artan PET katkısıyla orantılı olarak viskozite değerlerinde artış meydana gelmiştir. Meydana gelen değişimler saf bitüme göre sırasıyla % 19 azalma, %0,9; %7,7; %8,5 ve %12 artış şeklinde olmuştur. Buna karşın 165 °C sıcaklıkta bağlayıcıların viskozite değerleri saf bağlayıcıya göre %6 ve %8 PET oranlarındaki kısmi artışa rağmen genel olarak bir düşüş meydana gelmiştir. Saf bitüme göre meydana gelen değişimler sırasıyla %17; %14; %4; %3 ve %14 azalma şeklindedir. Bu sonuca göre katkılı bağlayıcıların 165 °C sıcaklıktaki işlenebilirlik özelliğinin saf bağlayıcıya göre daha uygun olduğu ifade edilebilir.

Bitümlü bağlayıcıların agrega ile plentte karıştırılırken ve arazide sıkıştırma işlemi yapılırken belirli bir işlenebilirliğe sahip olması gerekir. BSK 'nın karıştırılmasında bitümlü bağlayıcıların 170 ± 20 cP, sıkıştırılmasında ise 280 ± 30 cP viskozite değerine sahip olması istenmektedir [9]. Bu viskozite değerlerine karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma aralıklarını belirleyebilmek için 135 ve 165 °C sıcaklıkta yapılan viskozite deneyinden elde edilen viskozite değeri ile çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden yararlanılmaktadır. Saf ve PET katkılı bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıklarının belirlenebilmesi amacıyla elde edilen viskozite-sıcaklık grafikleri şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bağlayıcıların şekil 4.12'de çizilmiş olan grafikler vasıtasıyla elde edilmiş olan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları ise çizelge 4.12'de verilmiştir.

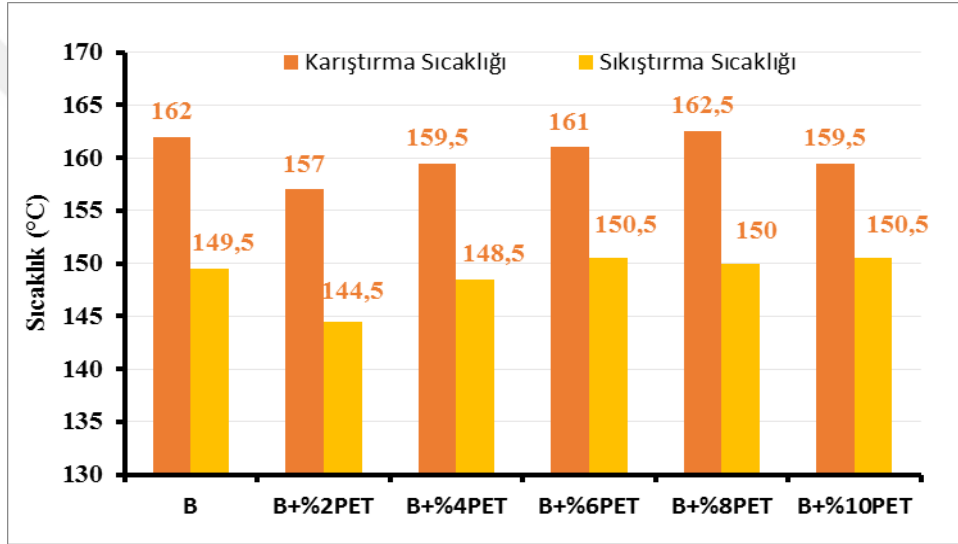


Şekil 4.12. Bağlayıcıların Viskozite-Sıcaklık İlişkisi

Çizelge 4.12. Bağlayıcıların Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklık Aralıkları

Bağlayıcı Türü	Karıştırma aralığı (°C)	Sıkıştırma aralığı (°C)
B 70/100	159-165	147-152
B+%2PET	154-160	142-147
B+%4PET	157-162	146-151
B+%6PET	159-163	148-153
B+%8PET	160-165	148-152
B+%10PET	157-162	148-153

Saf ve PET katkıli bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları arasındaki ilişki Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Bağlayıcıların karıştırma- sıkıştırma sıcaklık değerleri

Şekil 4.13 incelendiğinde, B 70/100 bağlayıcısı için karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 162 °C ve 149,5 °C olarak belirlenmiştir. B 70/100 saf bağlayıcısına artan oranlarda (%2, %4, %6, %8 ve %10) PET eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklıklarında saf bağlayıcıya göre sırasıyla %3,1, %1,6, %1 azalma; %0,3 artma ve %1,6 azalma meydana gelmiştir. Saf bağlayıcıya PET eklenmesiyle elde edilen modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklıklarında ise saf bağlayıcıya göre sırasıyla %4 , %0,5 azalma, %0,5, %0,3 ve %0,5 artış meydana gelmiştir. Tüm bu verilere göre saf bağlayıcıya PET eklenmesiyle elde edilen modifiye bağlayıcıların sıcaklık etkisi incelendiği zaman büyük değişimlerin meydana gelmediği, %2PET bağlayıcı hariç, bağlayıcıların genel olarak aynı kıvamda olduğu görülmektedir. Ancak bağlayıcıların penetrasyon sonuçları dikkate alındığında %6PET katkıli karışımlarda bağlayıcı sınıfı

değiştirdiği ve B 50/70 sınıfı bitüm özelliklerini taşıdığı görülmüştür. B 50/70 sınıfı bağlayıcının B 70/100 saf bağlayıcısına göre daha sert bir kıvamda olduğu düşünüldüğünde B+%6PET için elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının uygun olduğu rahatlıkla ifade edilebilir. Şöyle ki, %6PET katkılı asfaltın (B 50/70) sıcaklıkları saf asfalt (B 70/100) ile hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Bu durum, daha sert kıvamlı olan bir asfaltın daha yumuşak olan bir asfalt ile aynı işlenebilirlik yani aynı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına sahip olduğunu, dolayısıyla plentteki karıştırma ve yoldaki sıkıştırma esnasında çok daha az enerji sarfiyatı gerektireceğini göstermektedir. Sonuç olarak, PET katkısı ile (özellikle %6PET) daha sert kıvamlı bir asfaltın elde edilebileceğini ve bu asfaltın işlenebilirlik sıcaklıklarının kendisinden daha yumuşak bir asfalt ile aynı olabileceğini ifade etmek mümkündür.

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

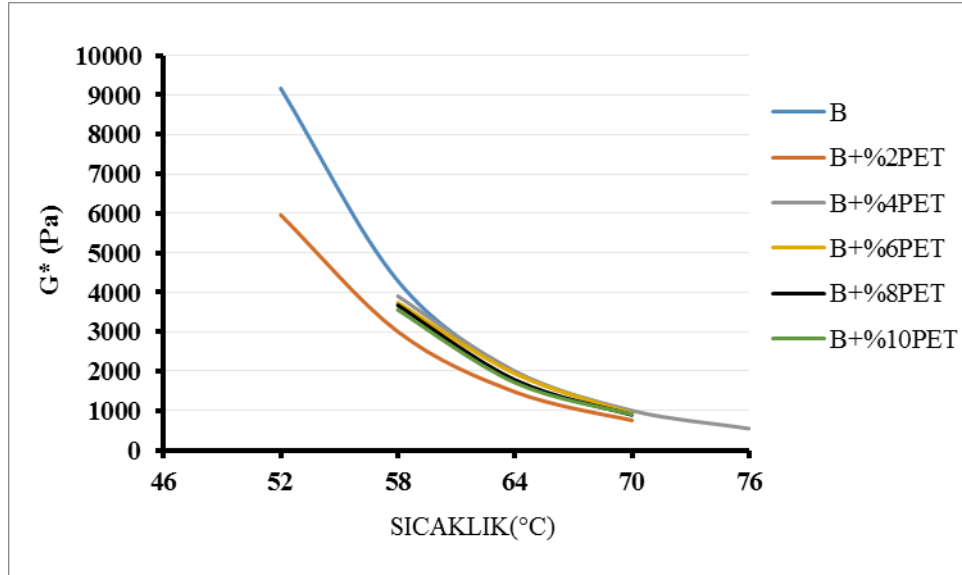
Bu deney ile bağlayıcıların yapımından hemen sonra yüksek servis sıcaklığında kaplamanın tekerlek izine karşı göstereceği direnç ve ilerleyen servis ömründe orta servis sıcaklığında yorulma çatlağı oluşumuna karşı göstereceği direnç belirlenmektedir. Deney orijinal, kısa dönem yaşlandırılmış ve uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılara uygulanmıştır. Deney orijinal bağlayıcılar üzerinde 52 °C, 58°C, 64°C, 70 °C ve 76 °C sıcaklıklarda, RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 64 ve 70 °C sıcaklıklarda, PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde ise 25 °C ve 28 °C sıcaklıklarda yapılmıştır.

Orijinal saf ve PET katkılı bağlayıcılar üzerine uygulanan DSR sonuçları çizelge 4.13'de verilmiştir.

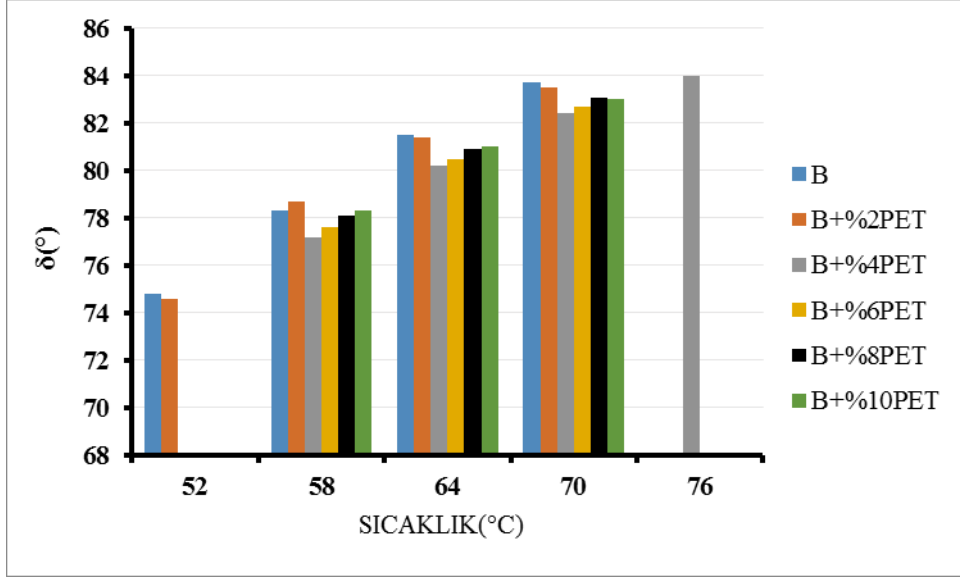
Çizelge 4.13. Orijinal Bağlayıcıların DSR Sonuçları

Sıcaklık (°C)	B 70/100	B+%2 PET	B+%4 PET	B+%6 PET	B+%8 PET	B+%10 PET
G* (Pa)						
52	9168,2	5959,8				
58	4290,4	3003,5	3904,6	3736	3673,6	3557,6
64	1992,5	1474,5	1992,5	1941,3	1778,7	1711,1
70	969,57	752,99	1001,4	929,7	894	907,34
76			546,17			
δ (°)						
52	74,8	74,6				
58	78,3	78,7	77,2	77,6	78,1	78,3
64	81,5	81,4	80,2	80,5	80,9	81,0
70	83,7	83,5	82,4	82,7	83,1	83,0
76			84,0			
G*/sin δ (Pa) (min.1000Pa)						
52	8849,14	5746,64				
58	4201,26	2944,94	3808,17	3649,13	3559,03	3483,43
64	1970,56	1458,07	1963,19	1914,73	1756,36	1689,89
70	963,733	748,194	992,534	922,226	887,506	900,654
76			543,188			

Orijinal bağlayıcılara ait kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerlerinin sıcaklıkla değişimi sırasıyla şekil 4.14 ve şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.14. Orijinal bağlayıcıların G^* değerlerinin sıcaklıkla değişimi

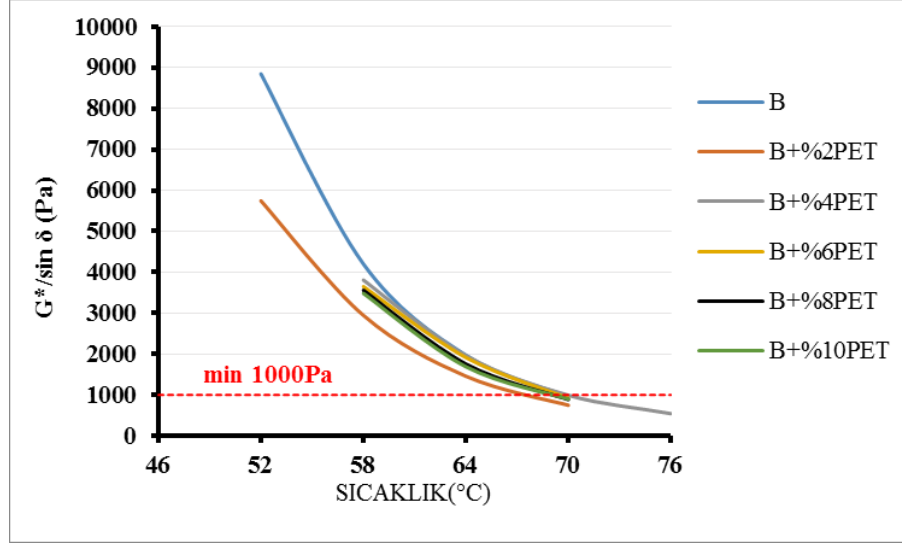


Şekil 4.15. Orijinal bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.14 incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla kayma modülü parametresi değerlerinin azaldığı görülmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin yarattığı deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam dirençtir. G^* değerinin azalması, bağlayıcının deformasyonlara karşı direncin azaldığının göstergesidir. Ancak herhangi bir sıcaklıktaki modifiye bağlayıcıların G^* değerlerinde az da olsa bir azalma (saf bağlayıcıya göre) meydana geldiği görülmüştür. Bu durum bağlayıcıların G^* değeri üzerinde atık PET'in önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

Şekil 4.15 incelendiğinde, sıcaklığın artmasıyla bağlayıcıların faz açıları artmaya başlamıştır. Faz açısının artması malzemenin viskoz davranmaya başladığını göstermektedir. Bağlayıcının viskoz davranışı, kalıcı deformasyonlara karşı direncinin azaldığını ve daha fazla kalıcı deformasyon yapacağını ifade etmektedir. Saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcıların herhangi bir sıcaklıktaki δ değerlerinde önemli bir değişim olmadığı yani hemen hemen bütün bağlayıcıların aynı kıvamda olduğu veya aynı elastikiyete sahip olduğunu ifade etmek mümkündür.

Orijinal saf ve modifiye bağlayıcıların üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Orijinal bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi bütün bağlayıcılar 64 °C sıcaklıkta $G^*/\sin \delta$ şartname limitini (min.1000 Pa) sağlamıştır. 70 °C sıcaklıkta şartname limitini sağlamayan bağlayıcılar 76 °C sıcaklıkta deneye tabii tutulmamıştır. Tüm bu sonuçlardan saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların performans seviyesi yüksek sıcaklık değeri PG 64-Y olarak tespit edilmiştir. Saf ve PET katkılı bağlayıcıların kayma modülü ve faz açısı değerleri bakımından kısmi artış ve azalmalarına rağmen benzer davranış sergiledikleri, PET katkısının tekerlek izi parametresine çok fazla etkilemediğini söylemek mümkündür.

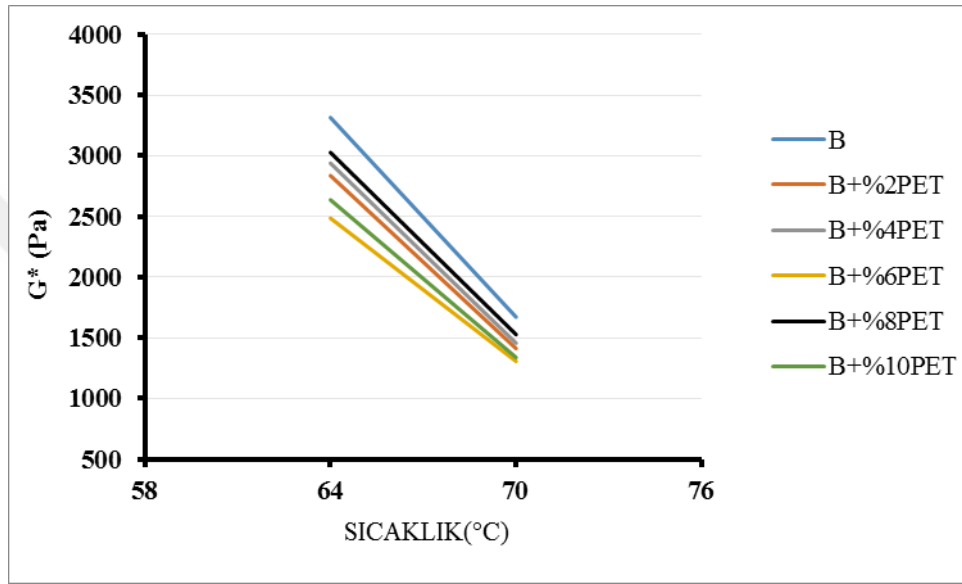
RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 64°C ve 70 °C sıcaklıkta yapılmış DSR deney sonuçları çizelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.14.RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

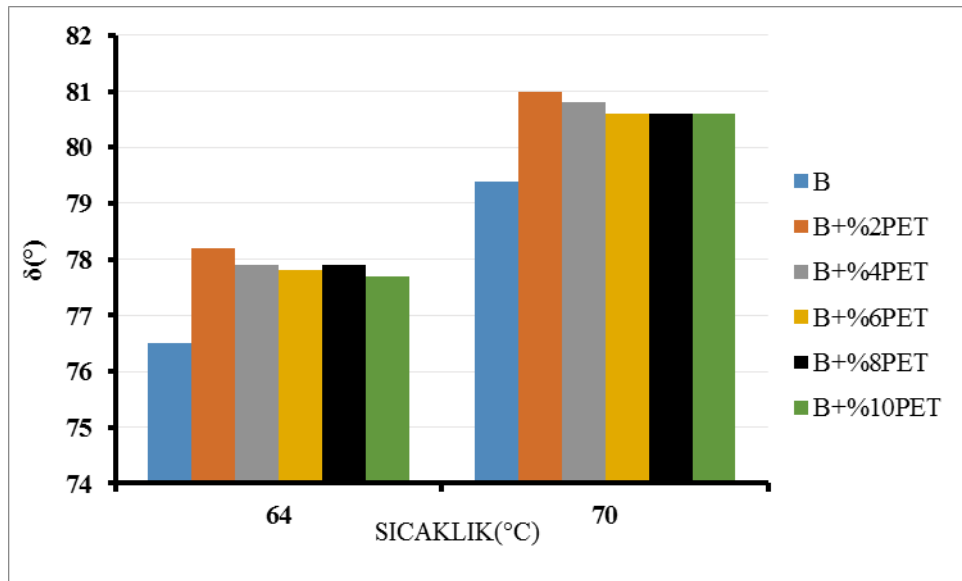
Sıcaklık (°C)	B 70/100	B+%2 PET	B+%4 PET	B+%6 PET	B+%8 PET	B+%10 PET
G* (Pa)						
64	3315,5	2837,8	2939,9	2486,2	3027,7	2637,9
70	1672,6	1413	1457,1	1307,4	1527,9	1339,3
δ (°)						
64	76,5	78,2	77,9	77,8	77,9	77,7
70	79,4	81	80,8	80,6	80,6	80,6
G*/sin δ (Pa) (min.2200 Pa)						
64	3223,89	2777,42	2875,12	2429,87	2960,99	2577,74
70	1644,33	1395,6	1438,52	1289,81	1507,51	1321,16

Çizelge 4.14 incelendiğinde saf bağlayıcıya göre kayma modülü değerlerinde genel olarak azalma, faz açısı değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda PET katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre azda olsa daha viskoz hale geldiğini ifade etmek mümkündür.

RTFOT kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerinin sıcaklık ile değişimi şekil 4.17’de, bağlayıcıların faz açılarının sıcaklıkla değişimi ise şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. RTFOT sonrası bağlayıcıların kayma modülü (G^*) değerinin sıcaklıkla değişimi

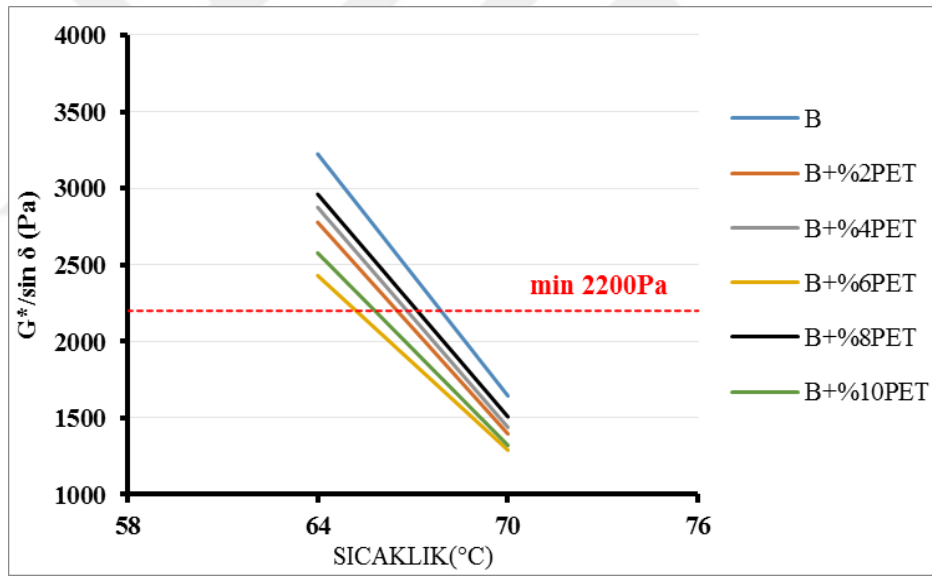


Şekil 4.18. RTFOT sonrası bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi RTFOT kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, kayma modülü parametresinin sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Kayma modülü parametresinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığı anlamına gelmektedir. Katkı miktarı arttıkça G^* değeri azalmış olup, bağlayıcıların kalıcı deformasyona karşı gösterdikleri dirençte bir miktar azalmıştır.

RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda faz açısı parametresinin sıcaklıkla arttığı şekil 4.18’de görülmektedir. Faz açısının sıcaklıkla artması, bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Katkı miktarının ve sıcaklığın artmasıyla bağlayıcıların viskoz davranış gösterdiği ve kalıcı deformasyona karşı direncinin azaldığını göstermektedir.

RTFOT sonrası bağlayıcılar üzerinde uygulanan DSR deneylerinden elde edilen $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19. RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Superpave şartnamesine göre RTFOT kalıntısı bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerleri min.2200 Pa olmalıdır. Çizelge 4.19 incelendiğinde 64 °C sıcaklıkta saf ve PET katkılı bağlayıcıların tümünün şartname limitini sağladığı, 70 °C sıcaklıkta bağlayıcıların şartname limitini sağlamadığı görülmektedir.

Orijinal bağlayıcıların şartname limitini 64 °C sıcaklıkta sağladığı ve saf ve PET katkılı bağlayıcıların performansları yüksek sıcaklık değeri PG 64 olarak belirlenmişti. RTFOT kalıntısı bağlayıcıların da şartname limitini 64 °C sıcaklıkta sağladığı ve bu

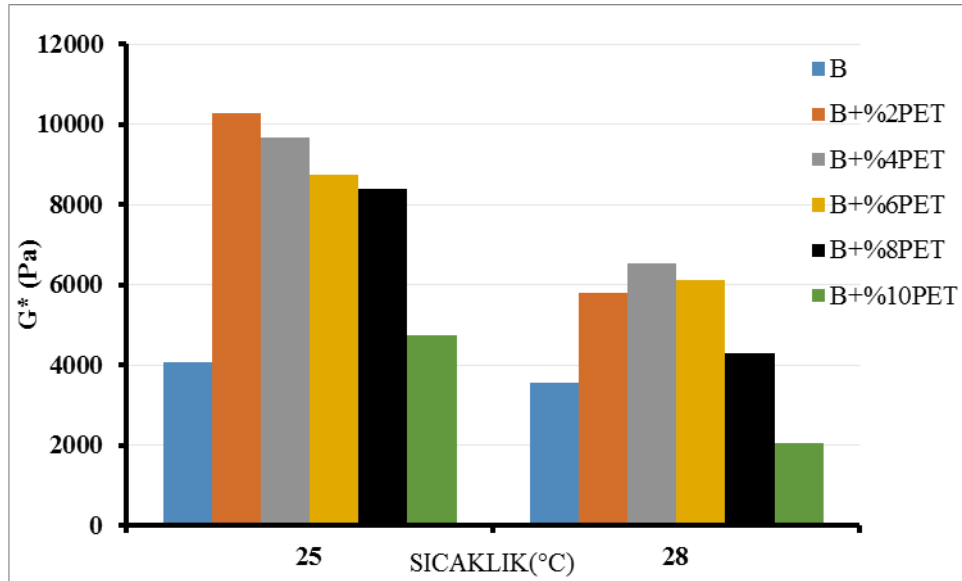
yüzden saf ve PET katkılı bağlayıcıların performans seviyeleri yüksek sıcaklık değerleri değişmemiş olup PG 64-Y olarak kalmıştır.

Saf ve PET modifiyeli bağlayıcıların orta sıcaklıklardaki yorulma dirençlerini tespit etmek amacıyla PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde 25 °C ve 28 °C sıcaklıkta yapılan DSR deney sonuçları Çizelge 4.15.'de verilmiştir.

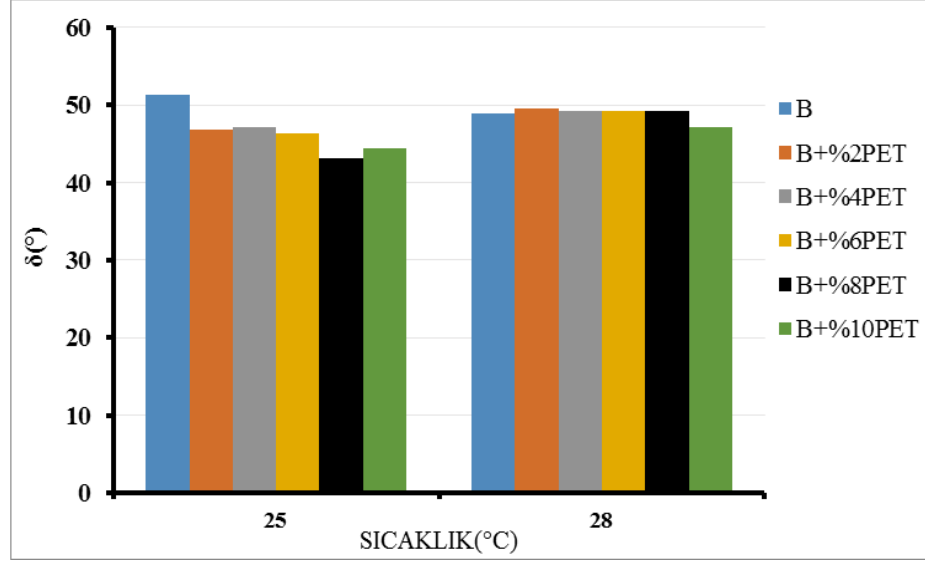
Çizelge 4.15. PAV kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

Sıcaklık (°C)	B 70/100	B+%2 PET	B+%4 PET	B+%6 PET	B+%8 PET	B+%10 PET
G* (Pa)						
25	4078,5	10284	9661,4	8751,1	8381,4	4758
28	3549,6	5816,7	6547	6125	4304,3	2060,8
δ (°)						
25	51,4	46,9	47,2	46,4	43,1	44,4
28	48,9	49,5	49,3	49,2	49,3	47,2
G*. sin δ (Pa) (max.5000 Pa)						
25	3187,4	7508,9	7088,8	6337,23	5726,8	3329,0
28	2674,8	4423,1	4963,5	4636,59	3263,2	1512,1

PAV kalıntısı bağlayıcıların kayma modülü (G*), faz açısı (δ) ve yorulma parametresi olan G*.sin δ değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.20 ve 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.20. PAV kalıntısı bağlayıcıların kayma modülünün (G*) sıcaklıkla değişimi

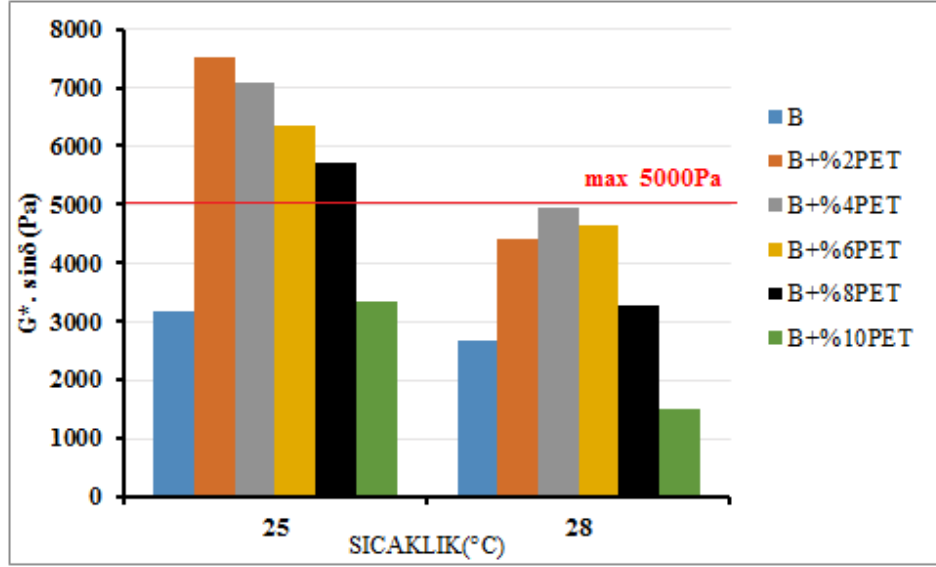


Şekil 4.21. PAV kalıntısı bağlayıcıların faz açılarının (δ) sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi PAV kalıntısı bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyi sonucunda, kayma modülü parametresinin sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. 25 °C sıcaklıkta katkı oranı artmasıyla, kayma modülü (G^*) değerinde ilk olarak artış (%2PET) meydana gelip daha sonra azalmaya başlamıştır. Ancak G^* değerlerinin saf bağlayıcıya göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum 25 °C için PET katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre kayma deformasyonu bakımından daha dirençli olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde 28 °C sıcaklıkta da bağlayıcıların PET katkı oranı arttıkça G^* değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu da bu oranların kayma deformasyonu bakımından dirençli olduğunu göstermektedir. Kayma modülü parametre sonuçlarını sıcaklıkla değerlendirdiğimiz zaman, sıcaklığın artması sonucunda doğal olarak G^* değeri azalmaya başlamıştır. Kayma modülü parametresinin azalması, bağlayıcının kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direncin azaldığı anlamına gelmektedir.

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi bütün bağlayıcıların δ değerleri saf bağlayıcı ile hemen hemen aynı düzeyde olduğu yani bağlayıcıların aynı elastikiyet özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Faz açısının sıcaklıkla artması bağlayıcının viskoz davranış gösterdiğini ifade etmektedir. Dolayısıyla PET katkısının bağlayıcıların akıcılık özellikleri üzerinde fazla bir öneme sahip olmadığı görülmektedir.

PAV kalıntısı bağlayıcıların yorulma parametresi olan G^* . Sin δ değerlerinin sıcaklık ile değişimi şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. PAV sonrası bağlayıcıların $G^* \cdot \sin \delta$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.22 incelendiğinde her iki sıcaklık için saf bağlayıcının yorulma parametresi değerlerinin 5000'den düşük olduğu dolayısıyla orta sıcaklıklarda yorulma performansının iyi olduğu görülmektedir. Ancak modifiye bağlayıcıların 25 °C'deki yorulma parametresi incelendiğinde %10 PET haricindeki bağlayıcıların yorulma parametresi sınır değerini sağlamadığı görülmektedir. Bu durum PET ilavesi ile bağlayıcılarda ciddi bir rijitlik artışı olduğunu göstermektedir. Ancak 28 °C sıcaklıkta bağlayıcıların yorulma performanslarının şartname limitinin altında kalması sebebiyle iyi olduğu ifade edilebilir. Bu durum sıcaklık artışı ile PET modifiyeli bağlayıcıların elastikiyetindeki artışı göstermektedir.

4.6.3. Kiriş Eğme Reometresi (BBR) Deneyi

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

Bağlayıcıların sünme sertliği ve m-değer sonuçları çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Bağlayıcıların BBR deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	Sıcaklık (°C)	Sünme Sertliği (MPa)	m değeri
B 70/100	-16	58,11	0,357
	-22	69,02	0,330
B+%2PET	-16	72,66	0,572
	-22	65,30	0,403
B+%4PET	-16	74,11	0,398
	-22	68,54	0,305
B+%6PET	-16	61,47	0,347
	-22	59,65	0,311
B+%8PET	-16	67,06	0,388
	-22	68,60	0,328
B+%10PET	-16	63,65	0,368
	-22	63,01	0,316

Superpave şartnamesine göre deney sıcaklığında bağlayıcının rijitlik değeri 300MPa'dan az olmaması, m değerinin ise 0,300 den büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Çizelge 4.16 incelendiğinde bütün bağlayıcıların sünme sertliği ve m-değer sonuçlarının hemen hemen aynı düzeyde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre PET katkısının bağlayıcının düşük sıcaklık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bağlayıcıların düşük sıcaklık performansı derecesinin -22 °C olduğu, dolayısıyla performans derecesinin PG X-22 olarak alınabileceği ifade edilebilir.

Bağlayıcılar hem yüksek hem de düşük sıcaklık performansı bakımından değerlendirildiğinde bağlayıcı sınıfı hepsi için PG 64-22 olduğu görülmektedir. Bu durumun her iki sıcaklık için PET katkılı bağlayıcıların performansı üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

4.7. Bitümlü Sıcak Karışımların Deney Sonuçları

Geri kazanılmış PET'in BSK kaplama üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla önceki bölümde farklı yüzdelerde hazırlanmış olan PET modifiyeli bitümler kullanılarak modifiye karışım numuneleri Marshall tasarım yöntemine göre hazırlanmıştır. Çalışmada saf ve modifiye karışım numuneleri üzerinde performans deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.7.1.Marshall Numunelerinin Hazırlanması

Marshall dizayn yöntemi kullanılarak hazırlanmış olan numunelerde, her bitüm yüzdesi için üç numune hazırlandı ve bu numunelerde kullanılacak olan bağlayıcının miktarı, kuru agreganın ağırlığının yüzdesi alınarak belirlendi. Tartımı yapılan agreganın numuneleri 165 °C sıcaklıkta, bitümlü bağlayıcı ise RV deneyi ile belirlenen karıştırma sıcaklığında ısıtıldı. Isıtılmış olan agreganın, karıştırma kabına aktararak orta kısmına bir çukur açılır ve ısıtılan bağlayıcı belirli miktarda buraya döküldü. Agreganın, bitümlü bağlayıcı ile tamamıyla kaplanıncaya kadar karıştırma cihazında karıştırıldı. Karıştırma işlemi yaklaşık 1-2 dk. içerisinde yapıldı. Deneyde kullanılan karıştırma cihazı Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Karıştırma cihazı

Karıştırma işlemi bittikten sonra, daha önceden temizlenip 160-165°C ısıtılmış olan kalıpların içerisine, malzeme dökülmeden önce kalıp çapına göre uygun kesilmiş aydınlatıcı kağıdı kalıp tabanına koyuldu. Malzemede ayrışma olmamasına özen gösterilerek daha önceden ısıtılmış olan kürek yardımıyla kalıp içerisine malzeme koyuldu. Kalıba koyulan malzemenin zaman kaybedilmeden 15 defa kenarlarına ve 10 defa orta kısmına sıcak cam çubuk ile şişleme işlemi yapıldı. Numune üzerine tekrar aydınlatıcı kağıdı koyulur ve sıkıştırma işlemi için tokmağa yerleştirildi. 457 mm. yüksekten serbest olarak düşen tokmak ile 75 defa ön yüze, 75 defa da arka yüze olmak üzere toplam 150 vuruş yapıldı. Sıkıştırma için kullanılan Marshall tokmağı Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



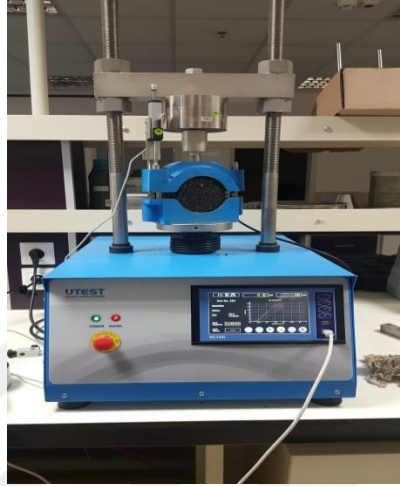
Şekil 4.24. Marshall tokmağı

Hazırlanmış olan briketler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kriko yardımıyla kalıptan çıkartıldı. Çıkarılan numunenin üst ve alt yüzeyi spatula yardımıyla düzeltildi ve numunenin yükseklikleri kumpas yardımıyla en az üç yerden ölçülüp ve kaydedildi. Yükseklikleri alınan numunelerin ilk olarak havadaki kuru ağırlıkları alındı. Daha sonra numunelerin Arşimet terazisinde sudaki ağırlıkları alındı ve numuneler sudan çıkarıldı. Çıkarılan numunelerin doymun hale getirilmesi için 3-5 dk. kadar su banyosunda tüm yüzeyi su ile kaplanacak şekilde suda bekletildi ve süresi dolan numune havlu yardımıyla yüzeyinde parlaklık kalmayacak şekilde kurutulup tartıldı ve suya doymun kuru yüzey ağırlığı belirlenmiş oldu. Kalıptan kriko yardımıyla çıkarılan briket numunesi Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Numunelerin krikoyla çıkarılması

Deneye hazır duruma getirilen numunelerin stabilite ve akma değerlerinin belirlenmesi için numuneler 60 °C suda 30-40 dk. kadar bekletildi. Sudan çıkarılan numuneler Marshall stabilite cihazına yerleştirildi ve akma çubuğu sabitlendi. Daha sonra yüklemeye başlandı. En yüksek yükleme değeri ve buna karşılık gelen akma değeri cihaz tarafından ekranda otomatik olarak gösterilip ve kaydedildi. Deneyde kullanılan Marshall stabilite ve akma cihazı Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Marshall stabilite ve akma cihazı

4.7.2. Optimum Bitüm Yüzdesinin Bulunması

Optimum bitüm oranının bulunması için karışımda kullanılacak olan agrega miktarı sabit tutularak, agrega ağırlığının %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 doymuş 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 aletinde stabilite ve akma deneyine tabii tutularak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerler yardımıyla stabilite, D_p , V_h , V_f ve akma - % bitüm grafikleri elde edilmiştir.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 %4 bitüm içeren 1. Numuneye ait gerekli ölçüm ve hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

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

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

$$\text{Filler} = 5, \text{ Gf-z} = 2,741 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Bitüm oranı} = \%4, \text{ Gb} = 1,033 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{Wa} = (48/1200) \times 100 = 4$$

$$\text{Wb} = (48/(48+1200)) \times 100 = 3,85$$

$$\text{V} = 1241,5 - 712,5 = 529 \text{ cm}^3$$

$$\text{Dp} = 1232,3 / 529 = 2,329 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Dp}_{\text{ort}} = (2,329 + 2,368 + 2,343) / 3 = 2,347 \text{ gr/cm}^3$$

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

$$\text{Gsa} = 100 / [(42/2,72) + (53/2,69) + (5/2,70)] = 2,701 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Dt} = 100 / [(100 - 3,85/2,683) + (3,85/1,033)] = 2,527 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Gse} = (2,665 + 2,701) / 2 = 2,683 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Vh} = [(2,527 - 2,347) / 2,527] \times 100 = 7,14$$

$$\text{Vb} = (3,60 \times 2,347) / 1,033 = 8,18$$

$$\text{Va} = 100 - (7,14 + 8,18) = 84,69$$

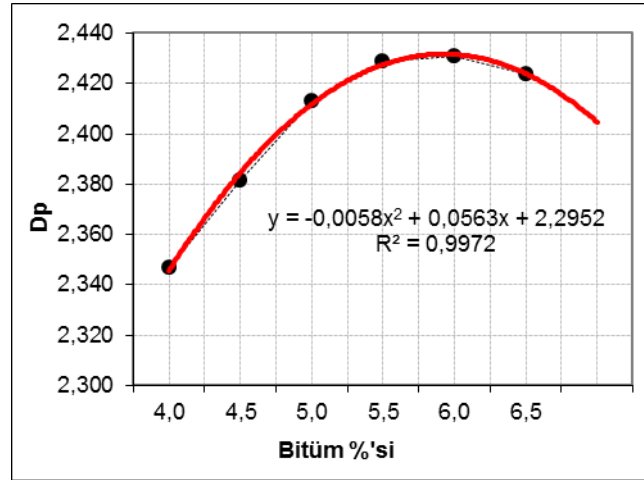
$$\text{Vma} = 100 - 84,69 = 15,31$$

$$\text{Vf} = (8,18/15,31) \times 100 = 53,39$$

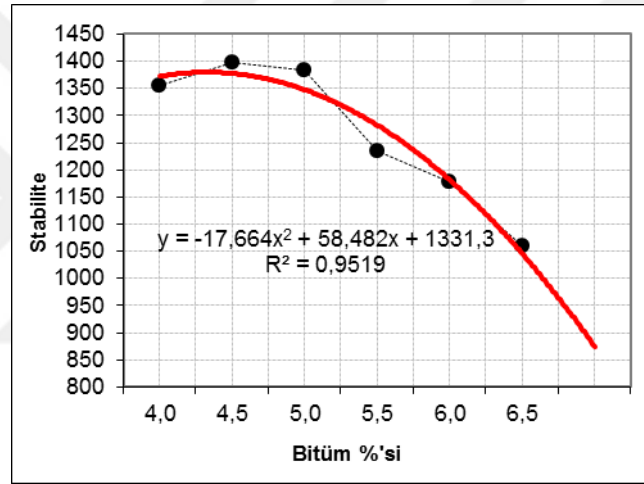
Aynı şekilde her bitüm yüzdesi ve her numune için hesaplamalar yapılmış olup tabloya aktarılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Marshall dizayn yöntemiyle B 70/100 saf karışımın optimum bitüm belirlenmesine ait deney sonuçları

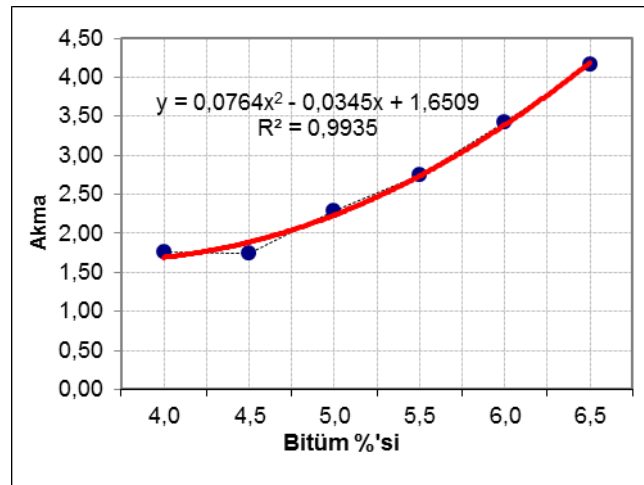
No	Wa	Wb	WB	Numune Yüksekliği (mm)				A (hava)	C (su)	B (doy.)	V	Dp	Dt	Vh	Vb	Va	Vma	Vf	Akma	Stb.	Dz.Fak.	Dz.Stb
	(%)	(%)	(gr)	1	2	3	Ort	(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)
1	4,0	3,85	48,00	66,8	66,9	66,5	66,72	1232,3	712,5	1241,5	529	2,329							1,83	14,05	0,930	1307
2				66,1	65,7	65,5	65,75	1237,7	718,9	1241,5	522,6	2,368							1,27	14,61	0,953	1392
3	3,74	3,60		66,4	65,8	65,9	66,03	1233,9	714	1240,6	526,6	2,343							2,18	14,4	0,947	1364
ORTALAMALAR												2,347	2,527	7,14	8,18	84,69	15,31	53,68	1,759			1354
4	4,5	4,31	54,00	65,5	65	65,1	65,18	1240,3	722,3	1243,4	521,1	2,380							1,63	14,84	0,968	1437
5				65,7	65,5	64,9	65,4	1239,5	722,2	1241,9	519,7	2,385							1,72	14,53	0,962	1398
6	4,24	4,06		65,1	65,2	65,7	65,33	1243,1	722	1244,5	522,5	2,379							1,89	14,09	0,964	1358
ORTALAMALAR												2,381	2,510	5,12	9,36	85,52	14,48	64,63	1,747			1398
7	5,0	4,76	60,00	64,6	64,9	65,1	64,87	1248,3	731,8	1249,3	517,5	2,412							2,15	14,3	0,975	1394
8				64,3	64,8	64,8	64,6	1247,2	733,2	1248,1	514,9	2,422							2,49	15,07	0,982	1480
9	4,74	4,52		65,4	64,9	64,7	65,01	1248,6	730,5	1249,6	519,1	2,405							2,23	13,13	0,972	1276
ORTALAMALAR												2,413	2,493	3,20	10,55	86,25	13,75	76,73	2,29			1383
10	5,5	5,21	66,00	64,5	64,5	64,7	64,54	1251,3	736,5	1252,2	515,7	2,426							2,49	12,65	0,984	1245
11				64,8	65,3	64,5	64,9	1252,7	738,3	1253,8	515,5	2,430							2,83	12,24	0,975	1193
12	5,24	4,97		64,6	64,6	64,4	64,52	1250,9	737,2	1252,1	514,9	2,429							2,93	12,9	0,984	1269
ORTALAMALAR												2,429	2,476	1,93	11,68	86,39	13,61	85,83	2,75			1236
13	6,0	5,66	72,00	64,4	64,1	64,5	64,34	1254	738,7	1255	516,3	2,429							3,52	11,16	0,989	1104
14				64,9	65,9	64,4	65,1	1254,6	739,3	1255,4	516,1	2,431							3,35	12,4	0,970	1203
15	5,74	5,42		64	64,3	64,6	64,29	1252	737,7	1252,4	514,7	2,432							3,41	12,43	0,990	1231
ORTALAMALAR												2,431	2,460	1,20	12,75	86,05	13,95	91,42	3,427			1179
16	6,5	6,10	78,00	64,8	64,8	65,1	64,87	1257,5	737,9	1257,8	519,9	2,419							4,15	10,51	0,975	1025
17				64,4	64,5	64,8	64,6	1254,4	737,5	1254,7	517,2	2,425							4,24	11,03	0,982	1083
18	6,24	5,86		64,5	64,7	64,9	64,68	1256	738,8	1256,2	517,4	2,428							4,10	10,9	0,980	1068
ORTALAMALAR												2,424	2,444	0,84	13,76	85,41	14,59	94,27	4,163			1059



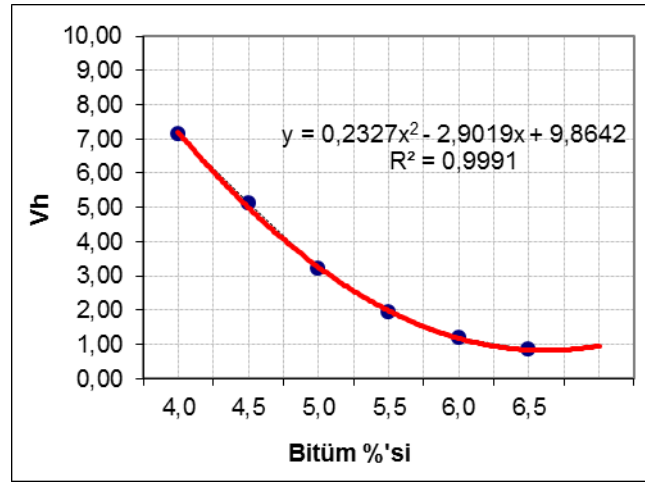
Şekil 4.27. Dp- Bitüm %'si



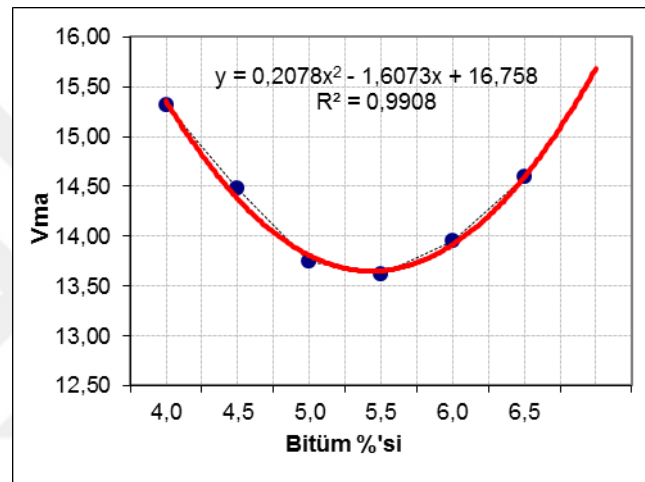
Şekil 4.28. Stabilite- Bitüm %'si ilişkisi



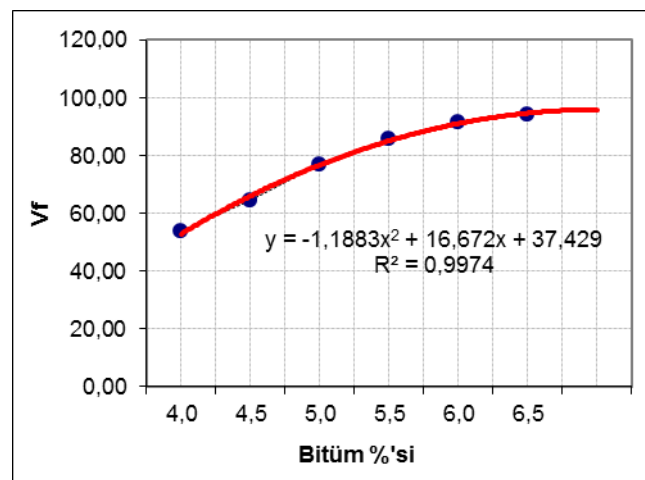
Şekil 4.29. Akma – Bitüm %'si



Şekil 4.30. Vh- Bitüm %'si



Şekil 4.31. VMA- Bitüm %'si



Şekil 4.32. Vf- Bitüm %'si

Çizilen grafiklerden boşluk oranının %4'e, asfaltla dolu boşluk oranının %70'e, stabilite ve hacim özgül ağırlığın ise max. değere karşılık geldiği yüzdelere alınmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak karışımın optimum bitüm yüzdesi %5 olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.18'de optimum bitüm içeriğinde kullanılan hesaplamalar gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Optimum bitüm içeriğinde kullanılan değerler

Kriterler	Sonuçlar
Max. Dp	6,0
Max. Stabilite	4,5
%4 V _h	4,8
%70 V _f	4,8
Optimum bitüm oranı	%5,0

Elde edilen optimum bitüm yüzdesinde üç adet kontrol numunesi hazırlanmıştır. Kontrol numuneleri üzerinde de hesaplamalar yapılarak elde edilen değerlerin uygunluğu Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kontrol numunelerine ait elde edilen sonuçlar şekil 4.33'de verilmiştir. Sonuçların KTŞ asfalt betonu aşınma için verilmiş olan sınır değerleri sağladığı görülmüştür.

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	5,0	4,76	60,00	66,4	66,2	65,9	66,16	1247,3	726,2	1249,3	523,1	2,384							1,72	14,01	0,943	1321
2				65,2	64,8	64,8	64,9	1243,6	725,8	1244,4	518,6	2,398							3,03	13,69	0,975	1335
3	4,74	4,52		65,1	65,5	66,3	65,64	1248,9	730,4	1249,9	519,5	2,404							2,57	13,72	0,956	1312
OPTİMUM BİTÜM ORANI SONUÇLARI												2,395	2,493	3,91	10,48	85,61	14,39	72,81	2,44			1323
ŞARTNAME LİMİTLERİ												F/B<1,5=		(3-5)			>14	(65-75)	(2-4)	Su/Ak=	542,02	>900

Şekil 4.33. Kontrol numunesine ait sonuçlar

Belirlenen bu optimum bitüm yüzdesi (%5) kullanılarak saf ve PET modifiyeli karışım numuneleri hazırlanmış ve performans deneylerine tabii tutulmuştur. Hazırlanmış olan modifiye karışımların saf karışımlarla kıyaslanabilmesi için bu oran sabit tutulmuştur.

4.8. Karışımlar Üzerinde Uygulanan Performans Deneyleri

Çalışmada Marshall karışım dizayn yöntemiyle bulunan optimum bitüm içeriğinde saf ve PET katkıli modifiye bitümlü karışımlar üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi, Kalıcı Marshall Stabilesi (RMS) deneyi, Dolaylı Çekme Esneklik Modülü (ITSM) deneyi, Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) deneyi ve statik sünme deneyleri yapılmıştır.

Performans deneylerinde kullanılmak amacıyla hazırlanan numune sayıları çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Performans Deneylerinde Kullanılan Numune Sayıları

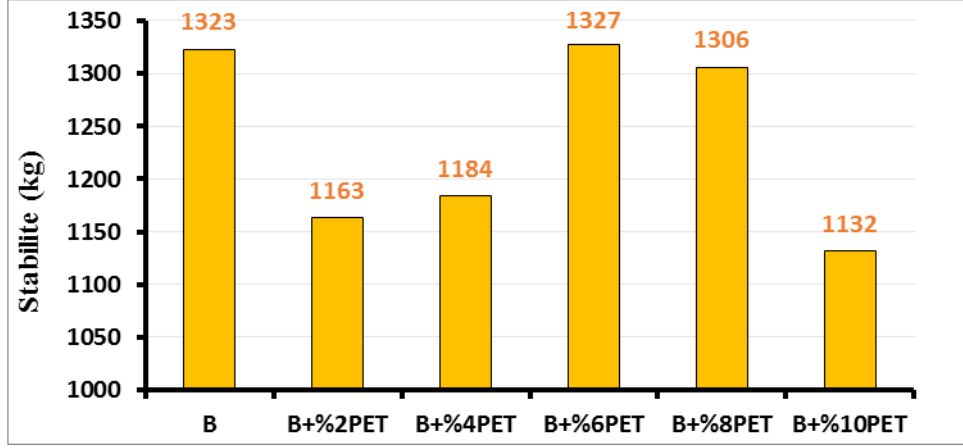
Performans Deneyleri	Numune Türü					
	B 70/100	B+%2PET	B+%4PET	B+%6PET	B+%8PET	B+%10PET
Marshall stabilite ve akma	3	3	3	3	3	3
RMS	3	3	3	3	3	3
ITS	6	6	6	6	6	6
ITSM	3	3	3	3	3	3
Sünme	3	3	3	3	3	3
Toplam	18	18	18	18	18	18
Genel Toplam	108					

4.8.1. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

B 70/100 saf bitümü ve %2, %4, %6, %8 ve %10 PET katkıli modifiye bitümlü karışımlar kullanılarak optimum bitüm içeriğinde hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. TS EN 12697-34 standardına göre 60 °C suda 40 dk. kadar bekletilen numuneler çıkarıldıktan sonra deneye tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar çizelge 4.20’de verilmiştir. Stabilite değerlerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.34.de, akma değerlerinin katkı miktarı ile değişimi şekil 4.35’de gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin, stabilite değerinin akma değerine bölünmesiyle, Marshall oranı (MQ) değerleri de elde edilmiş olup MQ- katkı miktarı değişimi şekil 4.36’da verilmiştir.

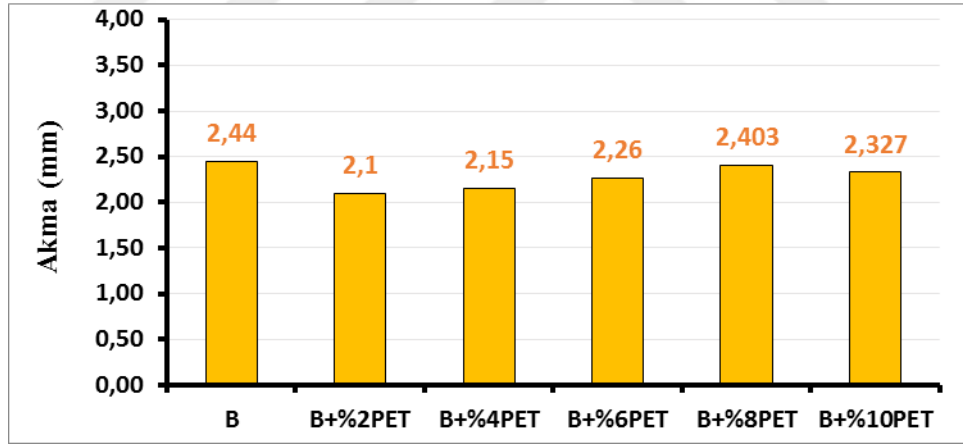
Çizelge 4.20. PET katkılı karışım numunelerinin Marshall Stabilite ve Akma Değerleri

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	Numune Türü
	(%)	(%)	(gr)	1	2	3	Ort	(gr)	(gr)	(gr)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(kN)		(kG)	
1	5,0	4,76	60,00	65,4	65,9	65,7	65,68	1241,1	730,8	1247,5	516,7	2,402							2,09	12,16	0,956	1162	B+%2 PET
2				65,9	65,9	65,9	65,91	1240,2	725,9	1247,2	521,3	2,379							2,11	12,25	0,950	1164	
3	4,74	4,52		65,7	65,9	65,8	65,78	1240,7	732,3	1247,3	515	2,409							2,10	12,21	0,953	1164	
ORTALAMALAR												2,397	2,493	3,86	10,48	85,66	14,34	73,06	2,1			1163	
4	5,0	4,76	60,00	65,8	65,4	65,4	65,54	1242	731,8	1248	516,2	2,406							2,17	12,79	0,959	1227	B+%4 PET
5				65,6	65,8	66,0	65,78	1239,3	729,7	1245,9	516,2	2,401							2,12	11,97	0,953	1141	
6	4,74	4,52		65,7	65,6	64,7	65,33	1240,6	727,3	1246,4	519,1	2,390							2,15	12,38	0,956	1184	
ORTALAMALAR												2,399	2,493	3,77	10,49	85,74	14,26	73,54	2,147			1184	
7	5,0	4,76	60,00	65,6	65,5	65,4	65,47	1244,8	730,1	1248,4	518,3	2,402							2,21	14,03	0,960	1347	B+%6 PET
8				65,7	65,6	65,6	65,6	1248,5	732,3	1252,2	519,9	2,401							2,11	12,73	0,957	1218	
9	4,74	4,52		65,6	65,6	65,5	65,57	1246,7	731,2	1250,3	519,1	2,402							2,45	14,76	0,959	1415	
ORTALAMALAR												2,402	2,493	3,67	10,50	85,83	14,17	74,11	2,257			1327	
10	5,0	4,76	60,00	65,5	65,8	65,7	65,65	1251,4	732,3	1254,2	521,9	2,398							2,34	13,04	0,956	1247	B+%8 PET
11				65,5	65,7	65,8	65,7	1248,9	731,4	1253,7	522,3	2,391							2,14	12,81	0,955	1223	
12	4,74	4,52		65,5	65,8	65,8	65,7	1250,5	731,85	1253,95	522,1	2,395							2,73	15,15	0,955	1447	
ORTALAMALAR												2,395	2,493	3,94	10,47	85,58	14,42	72,64	2,403			1306	
13	5,0	4,76	60,00	65,9	65,7	65,3	65,63	1247	730,8	1253,1	522,3	2,388							2,2	12,17	0,956	1163	B+%10 PET
14				64,6	64,4	64,3	64,4	1237,6	727,6	1242	514,4	2,406							2,02	11,96	0,987	1180	
15	4,74	4,52		65,3	65,1	64,8	65,03	1242,3	729,2	1247,55	518,4	2,397							2,76	10,81	0,972	1051	
ORTALAMALAR												2,397	2,493	3,86	10,48	85,66	14,34	73,06	2,327			1132	



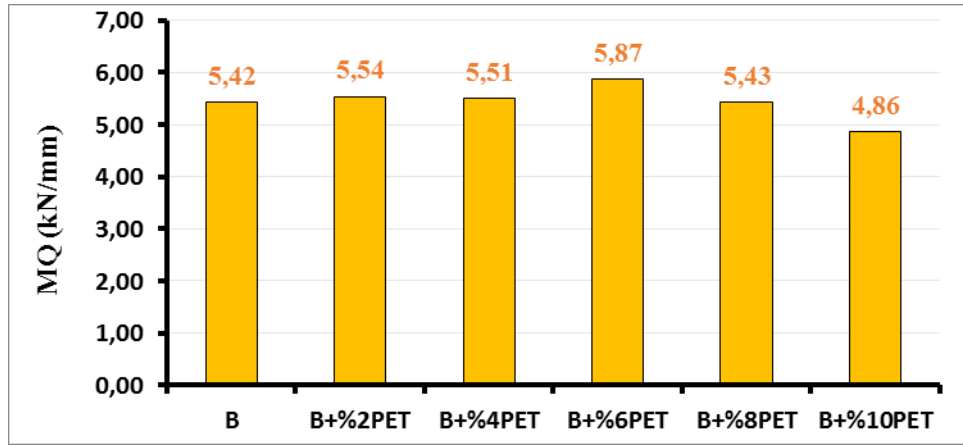
Şekil 4.34. Stabilitenin katkı miktarı ile değişimi

Şekil 4.34 incelendiğinde, PET modifiyeli bitüm kullanılarak hazırlanan karışımlarda, %6 PET katkılı karışımın stabilite değerinin, saf karışımdan yüksek olduğunu ve modifiye karışımlardaki en yüksek stabilite değerinin de %6PET katkılı karışım numunesinde olduğu görülmüştür. PET katkısıyla stabilitenin artış göstermesi, kaplamanın tekerlek izi oluşumu ve deplasmana karşı dirençli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.35. Akma- katkı miktarı değişimi

Şekil 4.35 incelendiğinde karışımların akma değerleri, saf karışıma göre modifiye karışımlarda genel olarak azalma olmasına rağmen hemen hemen aynı düzeyde kabul edilebilir. Akma, kaplamanın trafik yükleri altındaki davranışını belirleyen, plastiklik ve esneklik özelliklerini belirleyen bir değerdir. PET katkısıyla akma miktarının aynı düzeyde kalması, kaplamanın kırılma anındaki davranışının hemen hemen değişmediğini göstermektedir.



Şekil 4.36. Karışımların MQ- katkı miktarı değişimi

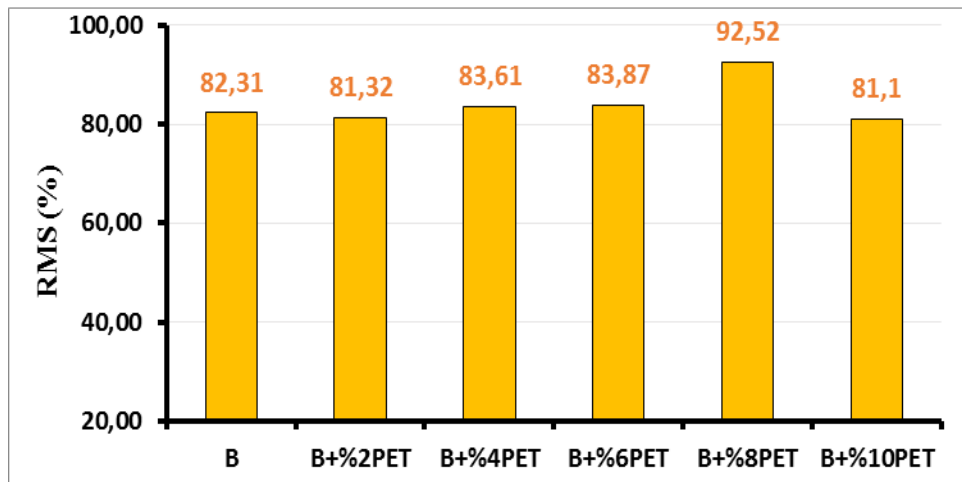
Şekil 4.36 incelendiğinde, karışımlardaki PET yüzdesinin artmasıyla, saf bağlayıcı karışıma göre, MQ değerlerine belirli yüzdeye kadar artış (%6PET), daha sonra ise azalış görülmüştür. MQ, kayma gerilmelerine karşı direncin bir göstergesidir. Saf ve PET katkılı karışımların MQ değerleri kıyaslandığında en yüksek MQ değerine %6 PET katkılı karışımda ulaşıldığı görülmektedir.

4.8.2. Kalıcı Marshall Stabilitesi (RMS)

Karışımların nem hasarına karşı direncinin göstergesi olarak kabul edilen RMS değerinin belirlenmesinde, numuneler 60 °C suda 24 saat bekletilerek Marshall stabilite deneyine tabii tutulmuştur. 24 saat suda bekletilen numuneler ‘Koşullandırılmış’, 40 dakika bekletilen numuneler ise ‘koşullandırılmamış’ olarak adlandırılmıştır. RMS değeri, koşullandırılmış numunelerin stabilite değerlerinin koşullandırılmamış numunelerin stabilite değerlerine bölünmesiyle elde edilmektedir. Karışımların RMS değerleri çizelge 4.21’de, RMS değerinin katkı oranına göre değişimi de şekil 4.37’de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Karışımların RMS değerleri

Numune Türü	Numune No	Koşullandırılmış Numunelerin Stabilesi (kN)	Koşullandırılmamış Numunelerin Stabilesi (kN)	RMS (%)
B 70/100	1	10,45	13,21	82,31
	2	11,18	13,35	
	3	11,03	13,12	
	Ortalama	10,89	13,23	
B+%2PET	1	10,68	12,47	81,32
	2	10,88	12,23	
	3	10,30	14,47	
	Ortalama	10,62	13,06	
B+%4PET	1	9,76	12,27	83,61
	2	9,49	11,41	
	3	10,45	11,84	
	Ortalama	9,9	11,84	
B+%6PET	1	10,76	13,47	83,87
	2	11,27	12,18	
	3	11,35	14,15	
	Ortalama	11,13	13,27	
B+%8PET	1	10,41	11,62	92,52
	2	11,23	11,64	
	3	10,65	11,64	
	Ortalama	10,76	11,63	
B+%10PET	1	9,39	11,63	81,10
	2	9,05	11,80	
	3	9,10	10,51	
	Ortalama	9,18	11,32	



Şekil 4.37. RMS değerinin katkı oranına göre değişimi

Çizelge 4.21 ve Şekil 4.37 incelendiğinde, saf ve PET modifiyeli karışımların nem hasarına karşı dayanımlarının %80' in üzerinde olduğu görülmektedir. En yüksek RMS oranı ise %8 PET katkılı numune de görülmektedir. PET katkısıyla RMS değerinin artış göstermesi, PET'in agrega ve asfalt bağlayıcı arasındaki adezyon kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve bu sebeple nem hasarı direncinde ciddi bir artışa sebep olduğunu göstermektedir.

4.8.3. ITS Deneyi

Saf ve PET katkılı modifiye karışımlar üzerinde uygulanan ITS deneyi, AASHTO T283 standardına göre çekme oranı belirlenerek karışımların nem hasarına karşı dayanımları tespit edilmektedir. B70/100 saf bitümü ve %2, %4, %6, %8 ve %10 PET içeren modifiye bitümler ile hazırlanan her bir karışım türü için 6 numune hazırlanmıştır. Karışım numunelerinin üçer tanesine vakum uygulanarak boşluk oranlarının %70-%80'nin suyla doldurulması sağlanmıştır. Vakum uygulanan numuneler vakum cihazından çıkarıldığında hemen streç film ile sarılmış ve -18 °C sıcaklıktaki dondurucuda 16 saat bekletilmiştir. Numunelere vakum yapılması şekil 4.38.(a) da, streç film ile sarılması ise (b) de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.38. Numunelere vakum uygulanması (a), Streç film ile sarılması (b)

Dondurucudan çıkarılan numuneler ardından 60 °C'deki su banyosunda 24 saat bekletilmiştir. Son aşama olarak numuneler 25 °C sıcaklıktaki su banyosunda 2 saat bekletildikten sonra Marshall cihazında kırılmıştır. Bu işlemlerin uygulandığı numuneler 'koşullandırılmış' numuneler olarak adlandırılmıştır. 60 °C su banyosunda bekletilen numuneler şekil 4.39.(a) da, numunelerin kırılması ise (b) de gösterilmiştir.



(a)



(b)

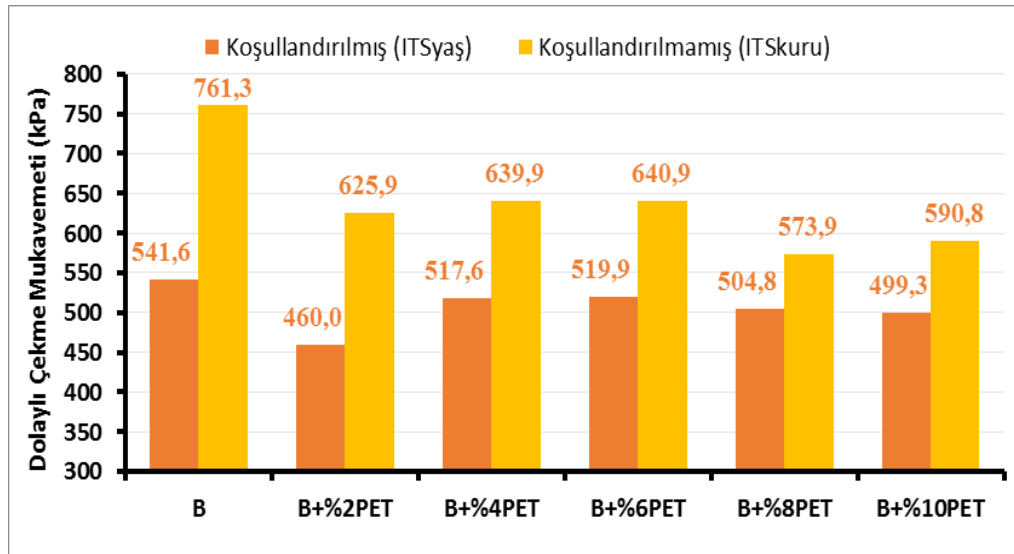
Şekil 4.39. Numunelerin 60 °C su banyosunda bekletilmesi (a) , Numunenin kırılması (b)

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

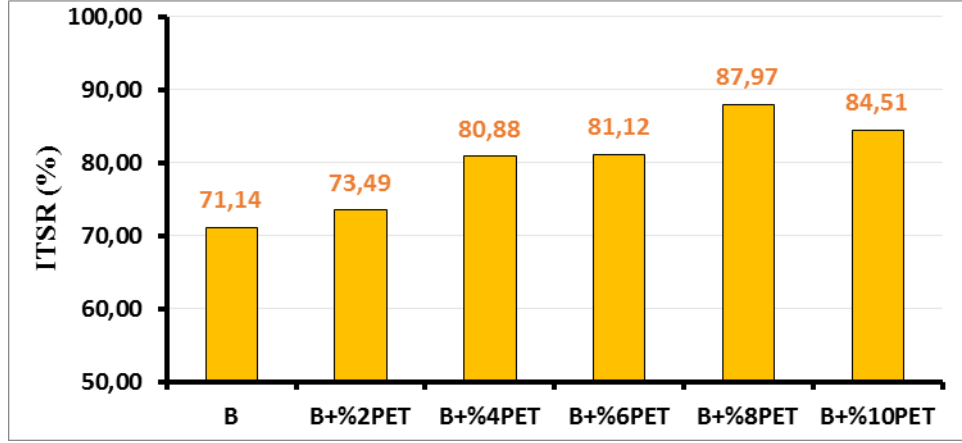
Çizelge 4.22'de ITS deneyine tabi tutulan koşullandırılmış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri $ITS_{yaş}$, koşullandırılmamış numunelerin dolaylı çekme mukavemetleri ITS_{kuru} olarak adlandırılmıştır. Nem hassasiyetinin bir ölçüsü olan dolaylı çekme mukavemeti oranı (ITSR) ise, $ITS_{yaş}$ 'ın ITS_{kuru} 'ya oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar çizelge 4.22'de, koşullandırılmış ve koşullandırılmamış numunelerin ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi şekil 4.40'da, karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise şekil 4.41'de verilmiştir.

Çizelge 4.22. Karışımların ITS ve ITS_R değerleri

Numune Türü	No	Koşullandırılmış Numuneler			Koşullandırılmamış Numuneler			ITSR (%)
		Yükseklik (mm)	Pmaks (kN)	ITS yaş (kPa)	Yükseklik (mm)	Pmaks (kN)	ITS _{kuru} (kPa)	
B 70/100	1	65,32	5,2	499,07	65,54	8,29	792,97	71,14
	2	65,52	5,9	564,53	65,3	7,69	738,28	
	3	65,58	5,87	561,14	65,56	7,87	752,56	
	Ortalama			541,58			761,27	
B+%2PET	1	65,65	5,15	491,79	65,7	6,74	643,13	73,49
	2	65,73	4,61	439,69	65,5	6,41	613,51	
	3	65,69	4,7	448,54	65,6	6,5	621,18	
	Ortalama			460,01			625,94	
B+%4PET	1	65,7	5,04	480,92	65,4	6,61	633,62	80,88
	2	64,44	5,64	548,69	65,42	6,72	643,97	
	3	65,07	5,43	523,15	65,41	6,7	642,15	
	Ortalama			517,59			639,91	
B+%6PET	1	66,51	5,3	499,57	65,55	6,82	652,26	81,12
	2	65,68	5,78	551,70	65,73	6,41	611,37	
	3	66,6	5,4	508,31	65,64	6,9	659,00	
	Ortalama			519,86			640,87	
B+%8PET	1	65,43	5,47	524,10	64,6	6,09	591,01	87,97
	2	66,13	5,3	502,44	65,63	5,84	557,85	
	3	65,78	5,12	487,96	65,12	5,95	572,81	
	Ortalama			504,83			573,89	
B+%10 PET	1	64,65	5,2	504,24	65,18	6,1	586,71	84,51
	2	64,92	5,18	500,22	65,33	6,23	597,84	
	3	64,79	5,1	493,48	65,26	6,12	587,91	
	Ortalama			499,31			590,82	



Şekil 4.40. Karışımların ITS değerlerinin katkı oranı ile değişimi



Şekil 4.41. Karışımların ITSR değerlerinin katkı oranı ile değişimi

Şekil 4.40 incelendiğinde karışımlarda PET katkı oranı artışıyla (%2, %4, %6, %8 ve %10) saf bitümlü karışım numunelerine göre koşullandırılmış (ITSyaş) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri sırasıyla %15,1 , %4,5 , %4,1, %6,8 ve %7,9 azalma, koşullandırılmamış (ITSkuru) karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemet değerleri sırasıyla %17,8, %16, %15,9, %24,6 ve %23 azalma göstermiştir. Şekil 4.41 incelendiğinde, karışımlarda PET katkı oranı artışıyla (%2, %4, %6, %8 ve %10) saf bitümlü karışım numunelerine göre karışım numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri sırasıyla %3,3, %13,7, %14, %23,7 ve %18,8 artış göstermiştir. En yüksek ITSR değeri %8PET katkılı modifiye karışımlarda görülmüştür. Saf ve modifiye karışımlarda ITSR değerlerinin %70 'in üzerinde olması, karışımların nem hasarına karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca PET katkı kullanımı ile hazırlanan modifiye karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Tüm veriler değerlendirildiğinde genel olarak saf ve modifiye bağlayıcılar ve seçilen agrega dizayn yapısı ile hazırlanmış karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu söylenebilir.

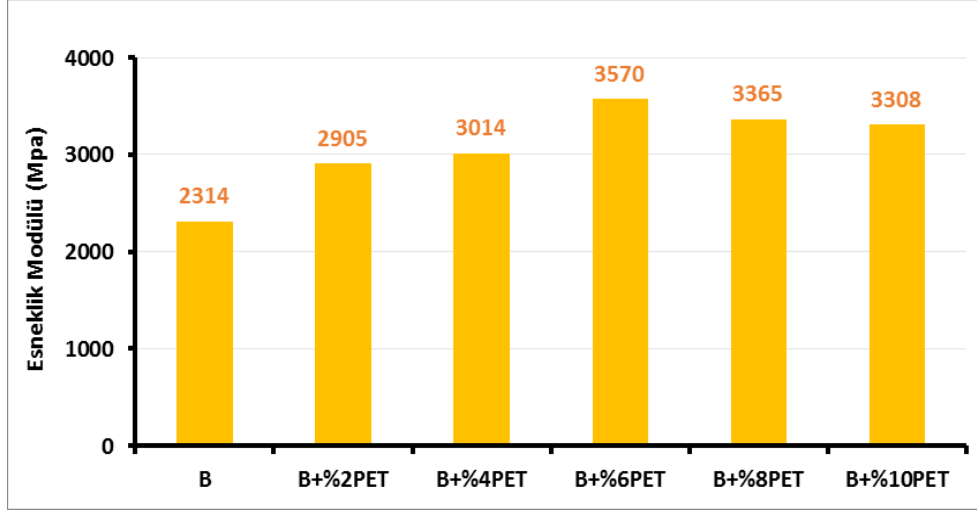
4.8.4. ITSM Deneyi

Saf ve PET katkılı karışımlar üzerinde BS DD 213 standartına uygun olarak dolaylı çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi uygulanmıştır. Deneyde B70/100 saf bitümünden ve %2, %4, %6, %8 ve %10 PET katkılı numunelerden üçer adet toplamda 18 adet numuneye ITSM deneyi uygulanmıştır. Deneyde numuneler üzerinde ilk olarak 5 adet ön yükleme, daha sonra 5 defa deney yükleme yapılarak karışımların dinamik yükler

karşısındaki rijitlikleri belirlenmiştir. Deneyde yük periyodu 3000 ms, yük artış süresi 124 ms, poisson oranı 0,35, hedef deformasyon ise 5 µm olarak seçilmiştir. Cihazda yatay eksen de 5 µm deformasyon meydana getirecek yük otomatik olarak belirlenmektedir. Numuneye uygulanan 5 darbe sonucunda ITSM değerleri bilgisayarda verilir, elde edilen değerlerin ortalamasından numunenin ITSM değeri belirlenmektedir. Ortam sıcaklığı olan 25 °C sıcaklıkta yapılan deney sonuçları çizelge 4.23’de verilmiştir. Saf ve PET katkılı karışımların ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.23. Karışımların ITSM deney sonuçları

Numune Türü	No	25°C	
		Yükseklik (mm)	Es (Mpa)
B 70/100	1	65,4	2304
	2	64,4	2329
	3	64,7	2310
	Ortalama	64,8	2314
B+%2PET	1	65,5	2916
	2	65,1	2894
	3	65,3	2905
	Ortalama	65,3	2905
B+%4PET	1	67,4	2993
	2	66,1	3035
	3	66,4	3015
	Ortalama	66,6	3014
B+%6PET	1	65,4	3664
	2	65,5	3527
	3	65,5	3518
	Ortalama	65,5	3570
B+%8PET	1	65,8	3508
	2	66,3	3262
	3	66,1	3325
	Ortalama	66,1	3365
B+%10PET	1	65,6	3005
	2	66,0	3602
	3	65,9	3318
	Ortalama	65,8	3308

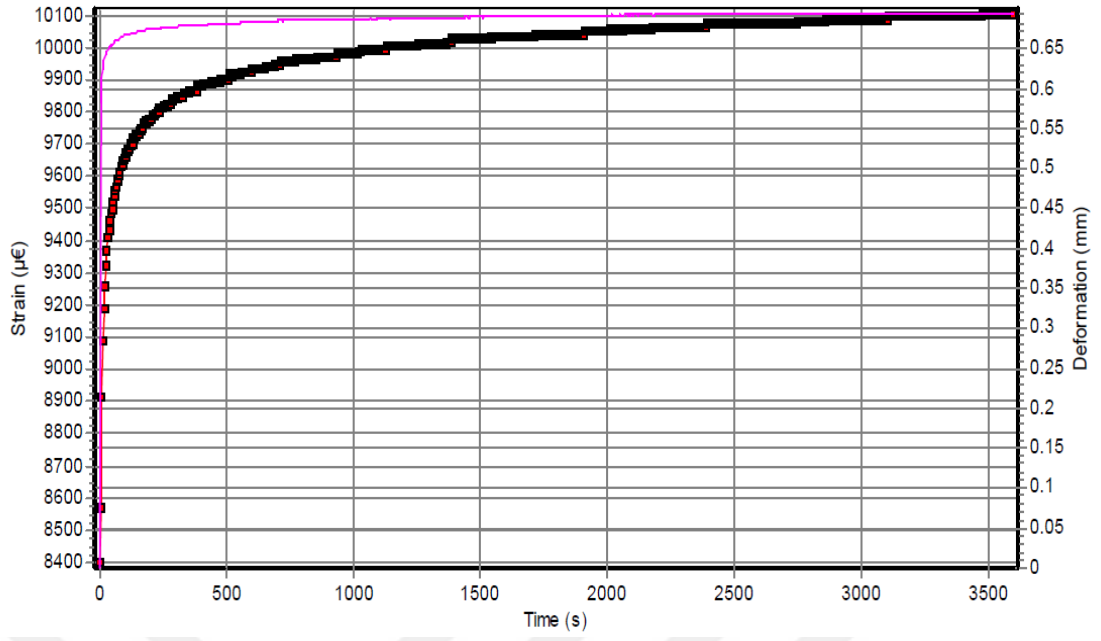


Şekil 4.42. Karışımların ITSM değerinin katkı miktarı ile değişimi

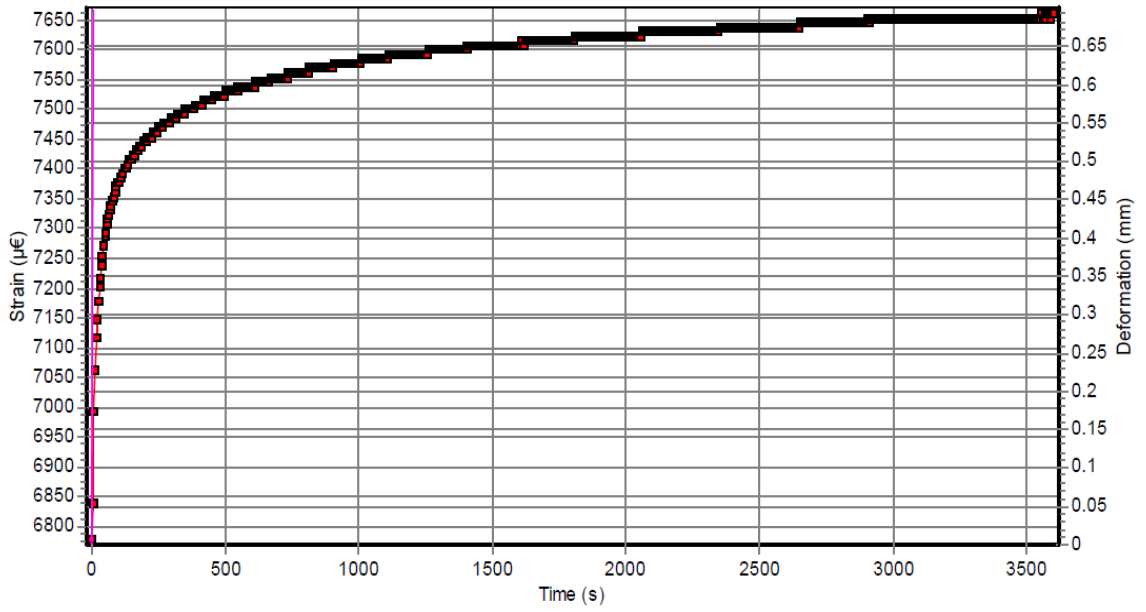
Çizelge 4.23 ve Şekil 4.42 incelendiğinde, karışımlarda PET katkı oranının (%2, %4, %6, %8 ve %10) giderek artmasıyla saf bitümlü karışım numunelerine göre ITSM değerleri 25 °C sıcaklıkta sırasıyla %25,5, % 30,3, %54,3, %45,4 ve % 43 artış göstermiştir. Bu sonuçlara göre PET katkısı ile asfalt karışımların sertliğinde önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. En yüksek ITSM değeri %6PET katkılı karışımda görülmüştür. Karışımların ITSM değerlerindeki artış, onların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını göstermektedir. Buna göre PET katkılı karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığını söylenebilir.

4.8.5. Sünme Deneyi

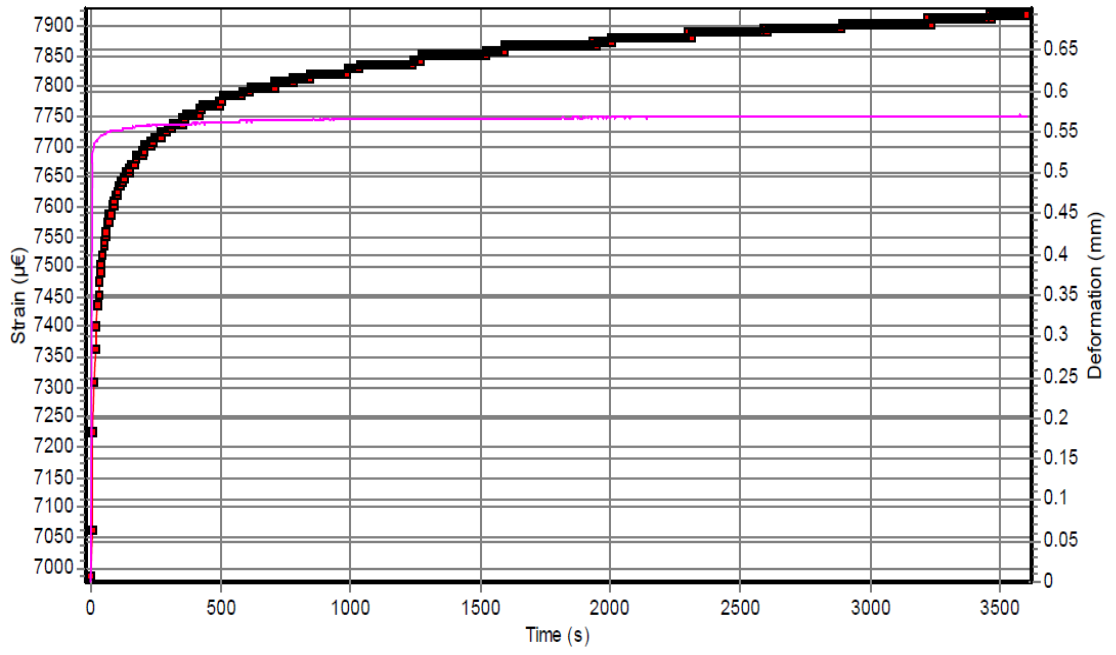
Saf ve PET ile modifiye edilmiş karışımlar üzerinde uygulanan sünme deneyinde, deney 50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce karışım numuneleri 3 saat boyunca deney sıcaklığında bekletilmiştir. Cihaz, ilk önce numunede 10 dakika boyunca 20 kPa gerilme oluşturacak ön yükleme yapmıştır. Daha sonra sensörlerde meydana gelen değişim, bilgisayar tarafından otomatik olarak sıfırlanır ve gerilme değeri 200 kPa'a çıkartılarak 1 saatlik deney süresi başlatılır. Deney süresi içerisinde bilgisayar yazılımı her 4 saniyede bir düşey deformasyonları kaydederek sünme sertliği değerini otomatik olarak hesaplamakta ve sonuç olarak vermektedir. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme – zaman – deformasyon sonuçları Şekil 4.43- 4.50'de verilmiştir.



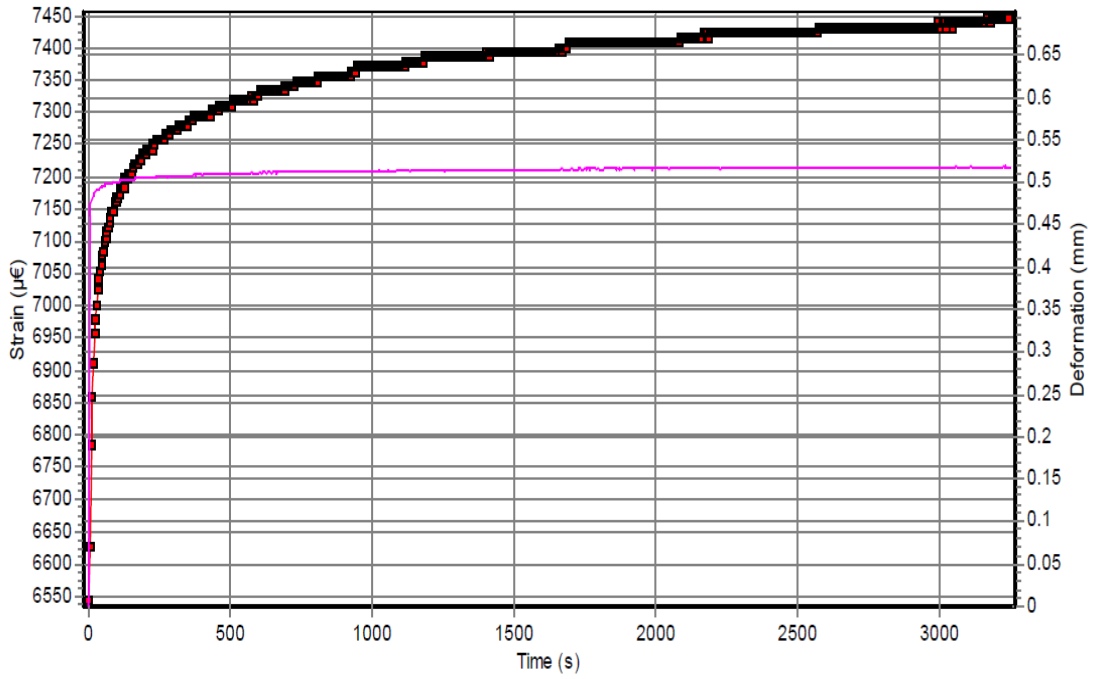
Şekil 4.43. Saf karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme – zaman-deformasyon grafiği



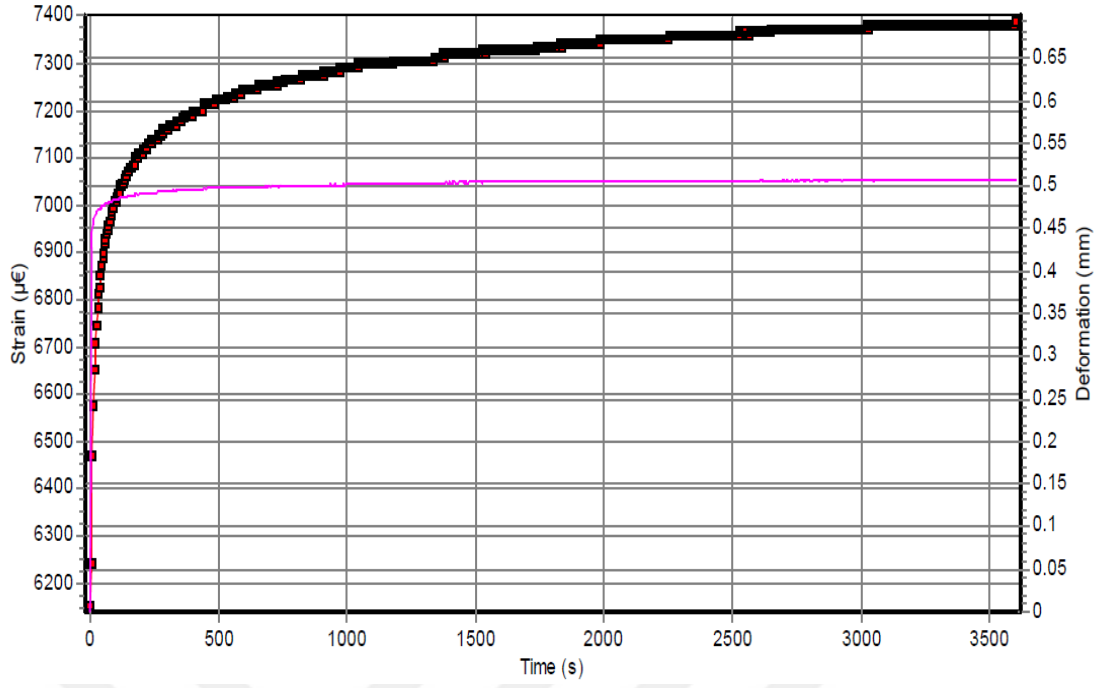
Şekil 4.44. B+2PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman – deformasyon grafiği



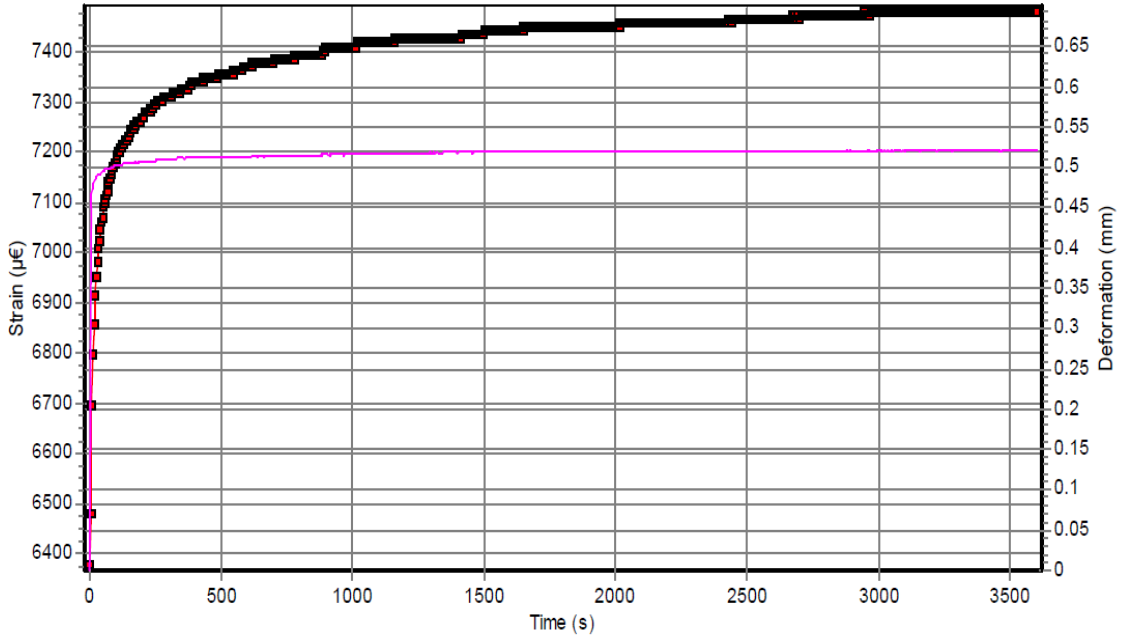
Şekil 4.45. B+%4PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme –zaman-deformasyon grafiği



Şekil 4.46. B+%6 PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman-deformasyon grafiği

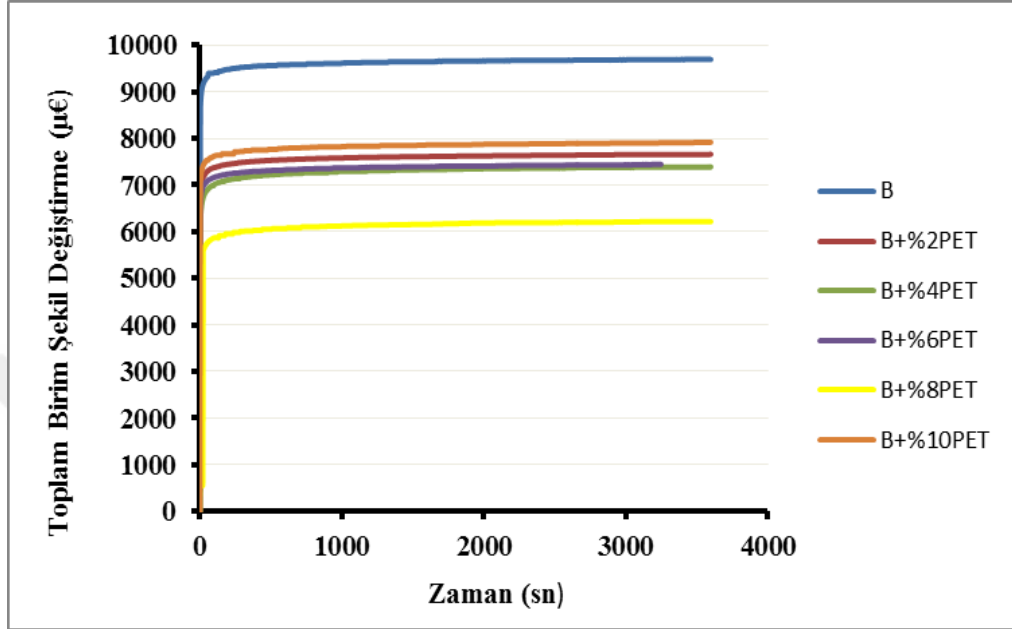


Şekil 4.47. B+%8PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme - zaman – deformasyon grafiği



Şekil 4.48. B+%10PET karışım numunesinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafiği

Saf ve modifiye bağlayıcı karışım numunelerinin toplam birim şekil değiştirme- zaman- deformasyon grafikleri incelendiğinde PET katkısıyla numunelerin sabit yükleme altında daha az deformasyon yaptığı görülmektedir. Tüm numunelere ait toplam birim şekil değiştirme – zaman grafiği şekil 4.49’da verilmiştir.



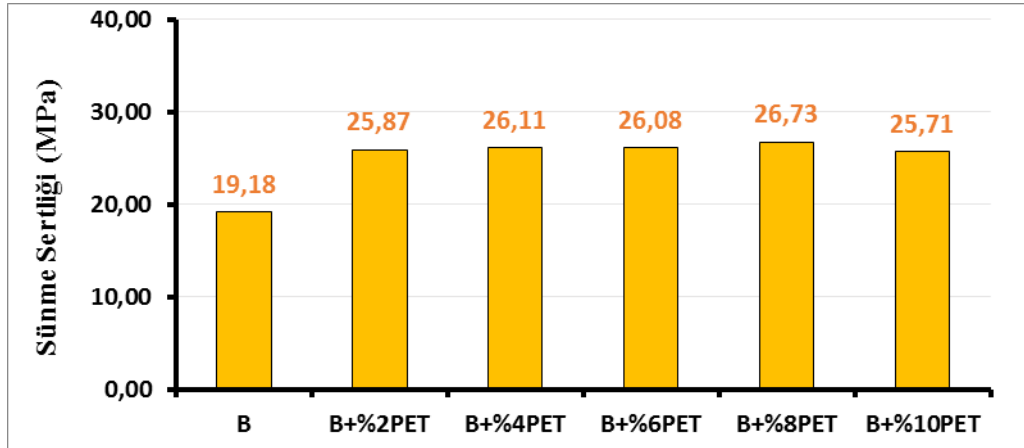
Şekil 4.49. Numunelerin toplam birim şekil değiştirme- zaman grafiği

Şekil 4.49 incelendiğinde PET katkısı ile hazırlanan numunelerin, saf numuneye göre, toplam birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı ve daha az deformasyon yaparak sünme özelliklerini gösterdiği görülmektedir.

Karışım numunelerinin sünme sertliği modülü (R_m) değerleri çizelge 4.24’de gösterilmektedir. Numunelerin sünme değerlerinin katkı oranı ile değişimi şekil 4.50’de verilmiştir.

Çizelge 4.24. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü (Rm) Değerleri

Numune Türü	Numune No	Yükseklik (mm)	Sünme Sertliği (Rm)
B 70/100	1	64,6	19,79
	2	64,9	20,18
	3	64,3	17,56
	Ortalama	64,6	19,18
B+%2PET	1	65,1	26,11
	2	65,4	26,02
	3	65,5	25,87
	Ortalama	65,3	26,8
B+%4PET	1	66,5	25,25
	2	66,3	27,08
	3	66,7	26,01
	Ortalama	66,5	26,12
B+%6PET	1	66,5	26,86
	2	66,3	25,90
	3	66,9	25,50
	Ortalama	66,6	26,08
B+%8PET	1	65,8	27,06
	2	65,4	26,94
	3	65,7	27,32
	Ortalama	65,6	27,1
B+%10PET	1	64,6	26,73
	2	64,3	25,10
	3	65,4	25,30
	Ortalama	64,8	25,71



Şekil 4.50. Numunelerin Sünme Sertliği Modülü Değişimi

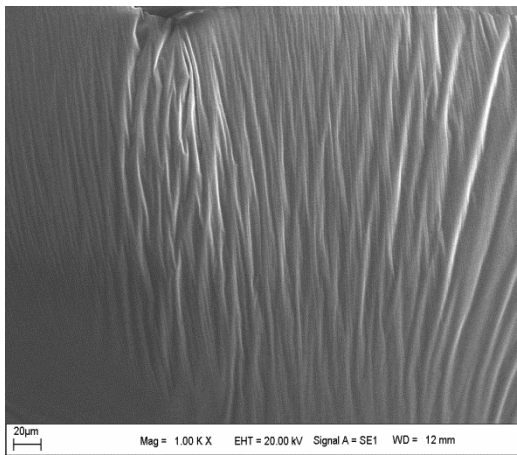
Şekil 4.50 incelendiğinde daha sert ve yüksek viskoziteye sahip olan PET katkılı bağlayıcı ile hazırlanan karışımların, saf bağlayıcı ile hazırlanan ana karışıma göre, daha yüksek sünme sertliği değerine sahip olduğu görülmektedir. PET katkısı ile karışım numunelerinin sünme sertliği değeri genel olarak artış göstermiştir. Saf karışıma göre artış miktarı sırasıyla %34,8; %36,1; %35,9; %39,3 ve % 34 'tür. En yüksek sünme sertliği değerine %8PET katkılı karışım numunesinde ulaşılmıştır. Katkı miktarının artışına paralel olarak, saf karışım numunesine göre PET katkılı karışımların sünme sertliği değerlerinin yüksek çıkması, yüksek sıcaklıklarda karışımın tekerlek izi deformasyonuna karşı direncinin arttığını ifade etmektedir.

4.9. Bağlayıcıların Karakterizasyonu

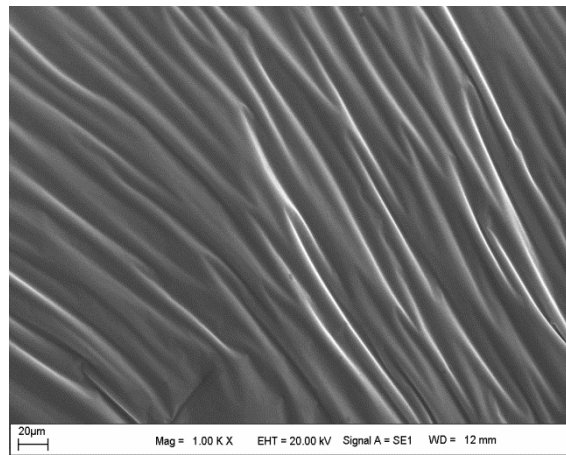
Elde edilen bağlayıcıların kimyasal karakterizasyonunu belirleyebilmek amacıyla, bağlayıcıların faz yapısının karakterizasyonun belirlenmesi için SEM, morfolojisinin belirlenmesi için XRD, fonksiyonel grupların tespit edilmesi için de FTIR analizleri yapılmıştır. Elde edilen görüntü ve sonuçlar alt başlıklar halinde yorumlanmıştır.

4.9.1. SEM

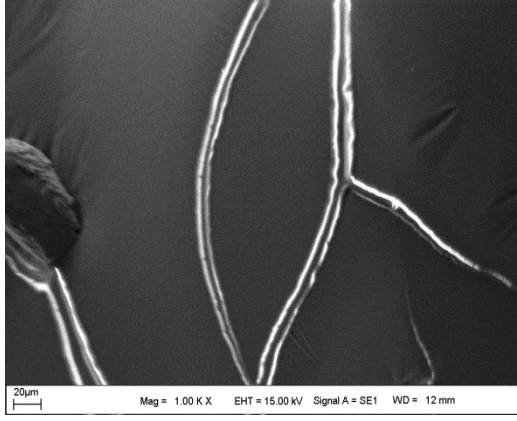
SEM, PET modifiyeli bitümün mikro yapısını araştırmak, PET' in saf bitümdeki dağılım durumunu belirlemek ve sürekli ve süreksiz faz yapısını karakterize etmek için kullanılmıştır. Tüm bağlayıcı numunelerinin yüzey görüntülemesi, 1.0K büyütme ile İnönü Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan LECO EVO40 marka cihaz ile yapılmıştır. Saf ve PET katkılı bağlayıcılara ait SEM görüntüleri Şekil 4.51'de verilmiştir.



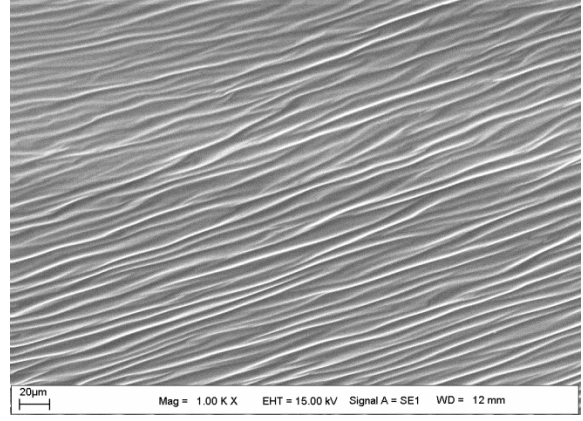
(a) B



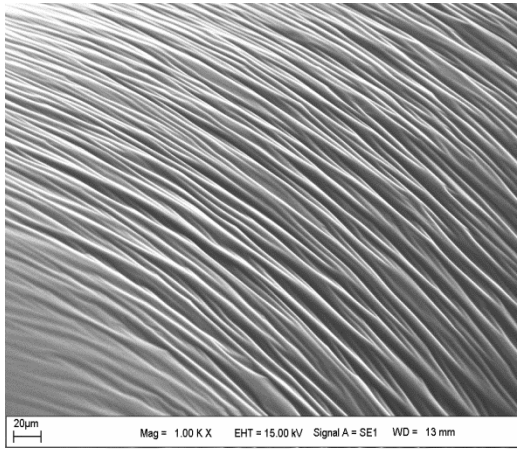
(b) B+TEO



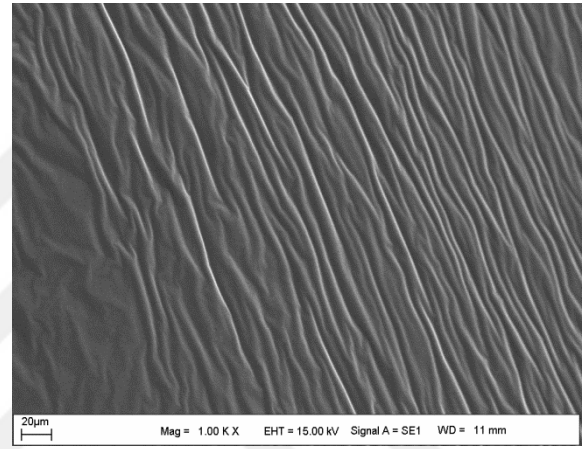
(b) B+%2PET



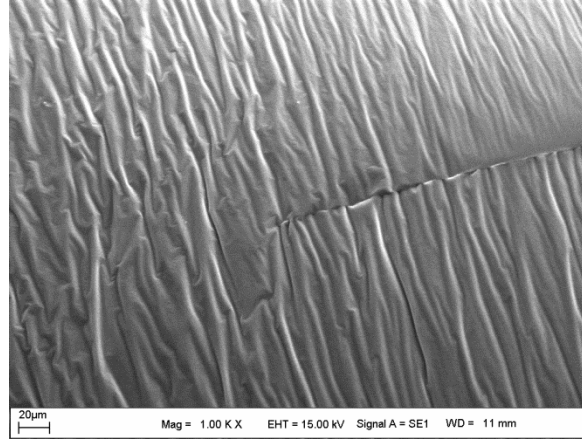
(d) B+%4PET



(e) B+%6PET



(f) B+%8PET



(g) B+%10PET

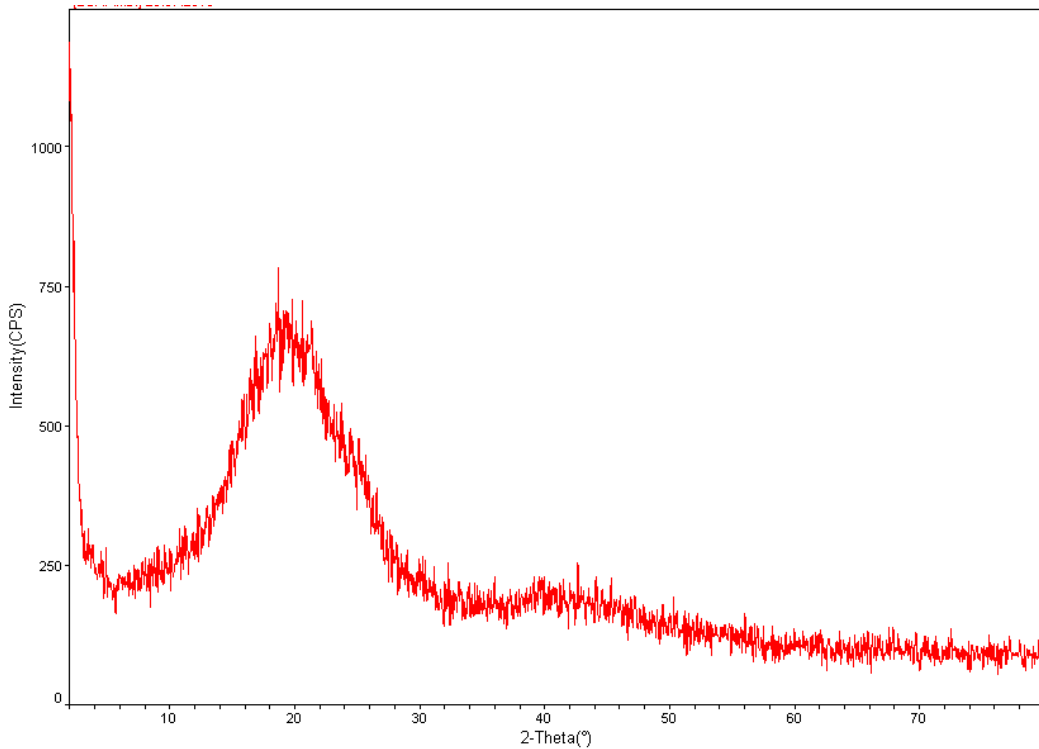
Şekil 4.51. Bağlayıcıların SEM görüntüleri

Şekil 4.51'e göre saf bitüme ait SEM sonucuna göre yapının oldukça homojen ve grafitik yapıda olduğu görülmektedir. Düzlemsel grafitik yapı nedeniyle kuruma esnasında yapısal gerilmeler sonucu büzölmeler meydana gelmiştir. Büzölmeler arasındaki düzensizlikler yapıda kristalin bölgelerin varlığı ile açıklanabilir. Nitekim

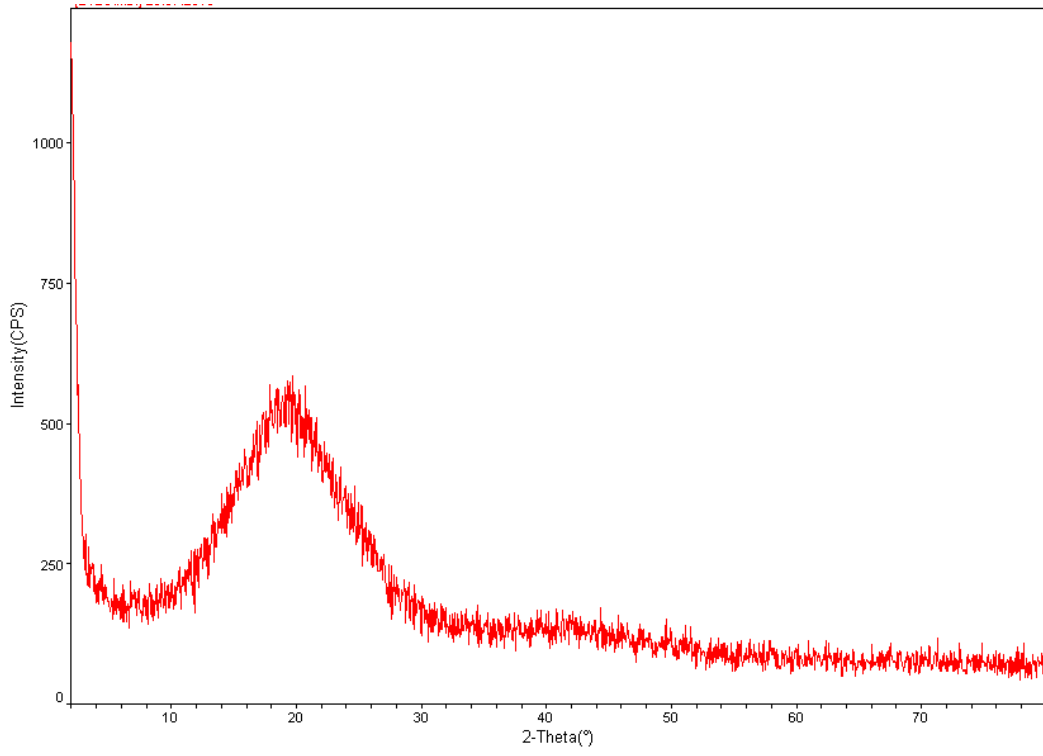
XRD difraktogramında saf bitüm büyük oranda amorf karakterde iken kısmen kristalin bölgelerde mevcut idi. B+%6 PET karışımında TEO'nun PET ile reaksiyonu ve/veya etkileşimi sonucu grafitik yapı ortaya çıkmaktadır. Kurumadan sonraki büzülmenin daha belirgin ortaya çıkması bu etkileşimin gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Özellikle kristalin PET ile etkileşme sonucu grafitik yapının ortaya çıkması bitüm ile homojen bir karışım olması ve büzülmenin homojenliği, sonuç ürünün mekaniksel özelliklerini önemli ölçüde artıracığı sonucunu çıkarmaktadır.

4.9.2. XRD

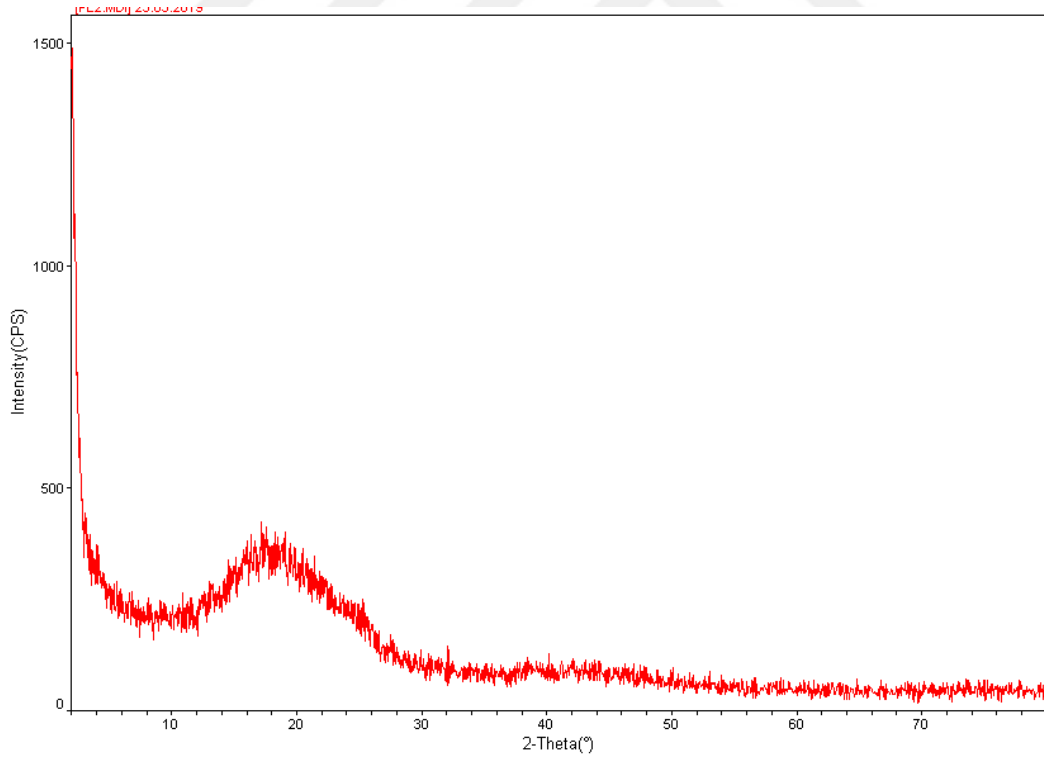
Saf ve PET ile modifiye edilmiş bitümlerin morfolojisi, XRD karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. X ışını kırınım desenleri, CuK α radyasyonuna sahip bir Rigaku Giegerflex D-Max/B toz difraktometresi ile elde edilmiştir. Kırınım desenleri ($2\theta = 2-80^\circ$) oda sıcaklığında 0.02° 'lık bir adımla kaydedilmiştir. XRD analizleri İnönü Üniversitesi Merkez laboratuvarında bulunan Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi kullanılarak yapılmıştır. PET'in kristallografik yapısı, asfalt bağlayıcı harmanındaki varlığı ve dağılımı seviyesi, desenler kullanılarak değerlendirilmiştir. Saf ve PET katkılı bağlayıcılara ait XRD sonuçları Şekil 4.52 – 4.58'de verilmiştir.



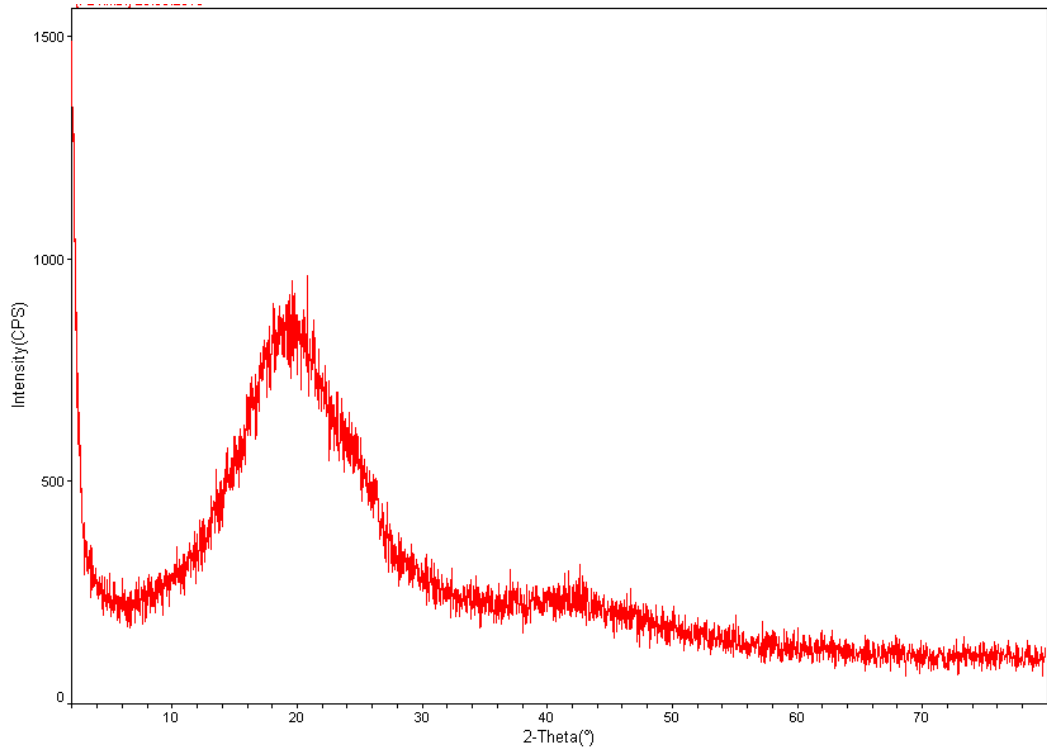
Şekil 4.52. B70/100 saf bitümün XRD görüntüsü



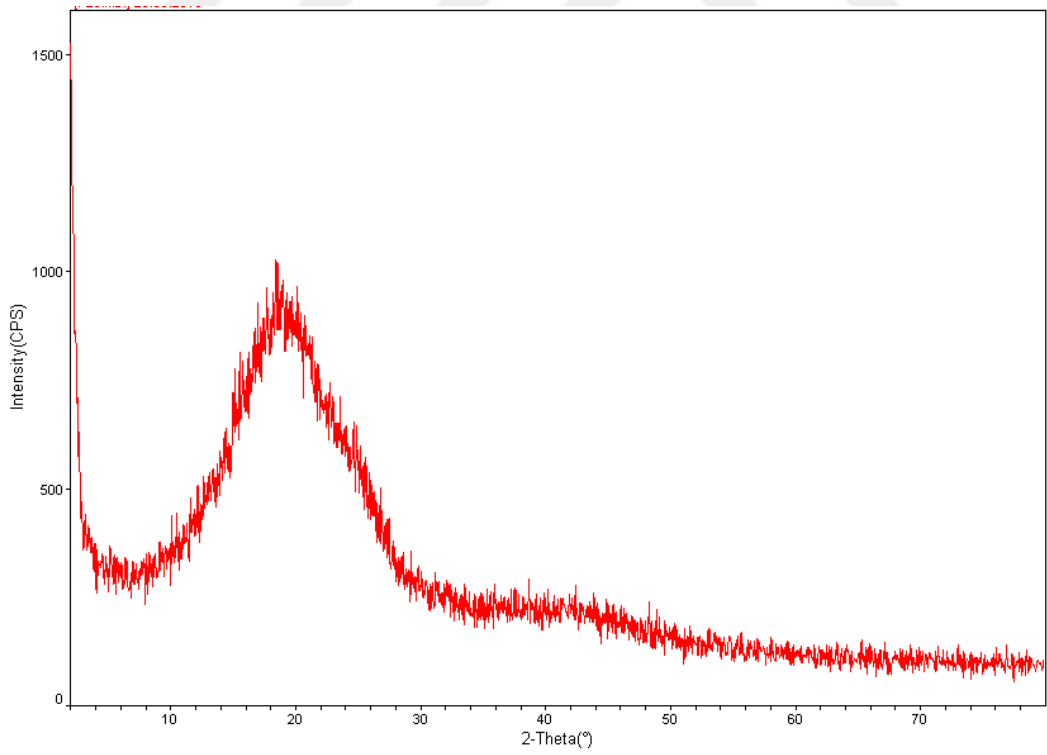
Şekil 4.53. Saf+TEO XRD görüntüsü



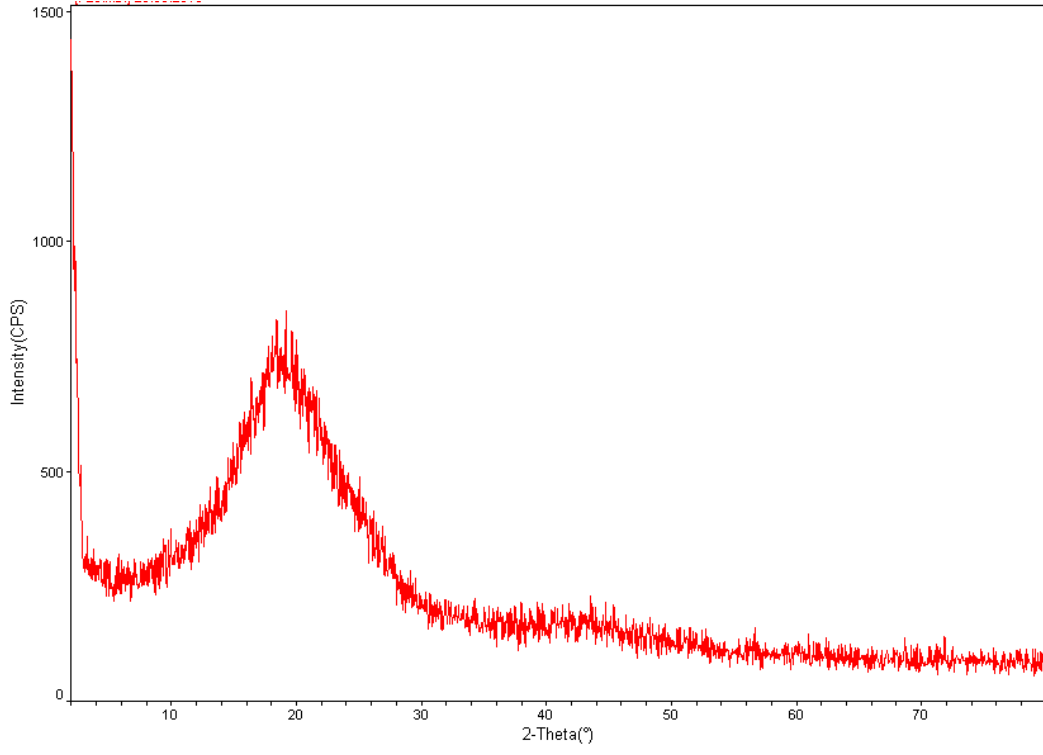
Şekil 4.54. Saf+TEO+%2PET XRD görüntüsü



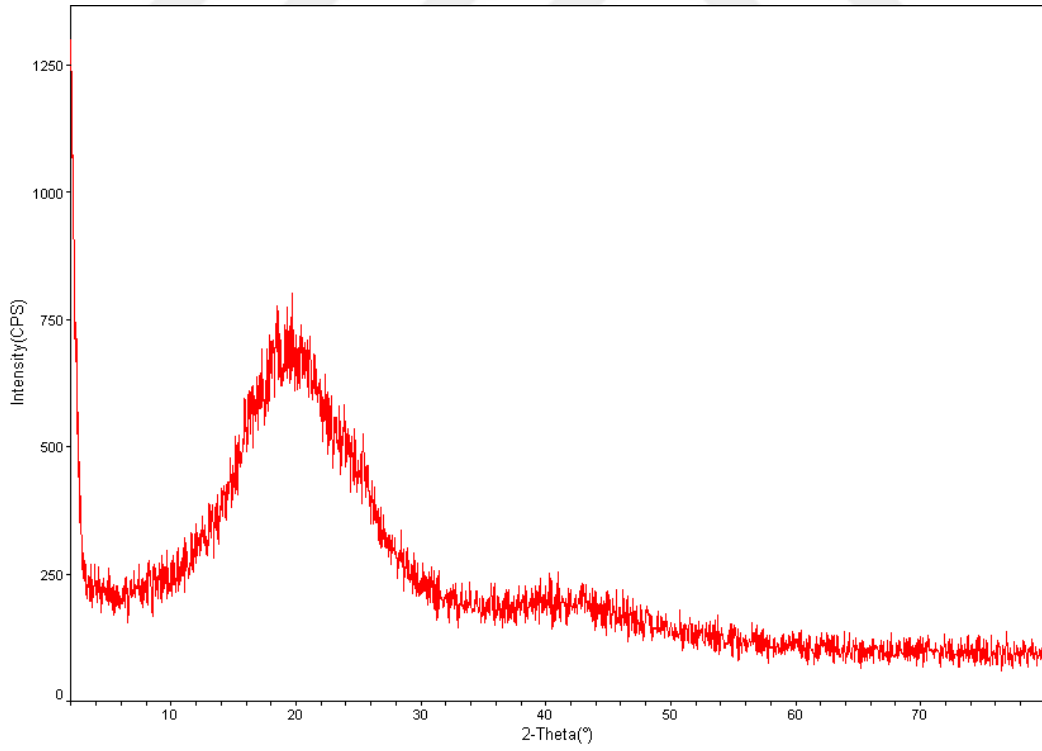
Şekil 4.55. Saf+TEO+%4PET XRD görüntüsü



Şekil 4.56. Saf+TEO+%6PET XRD görüntüsü



Şekil 4.57. Saf+TEO+%8PET XRD görüntüsü

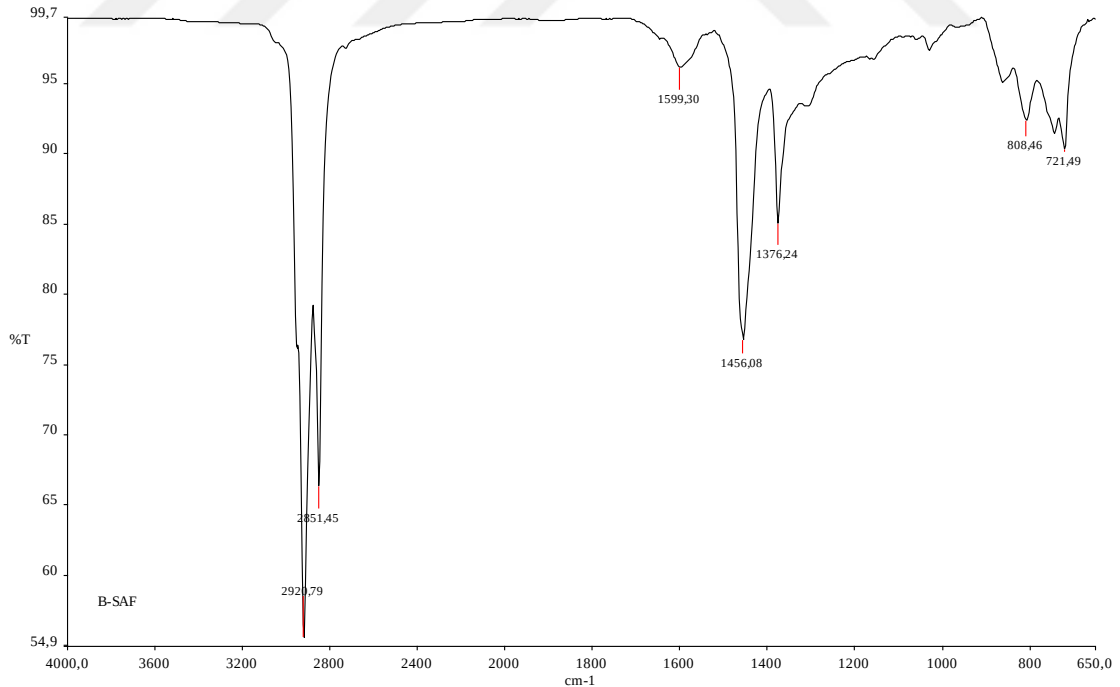


Şekil 4.58. Saf+TEO+%10PET XRD görüntüsü

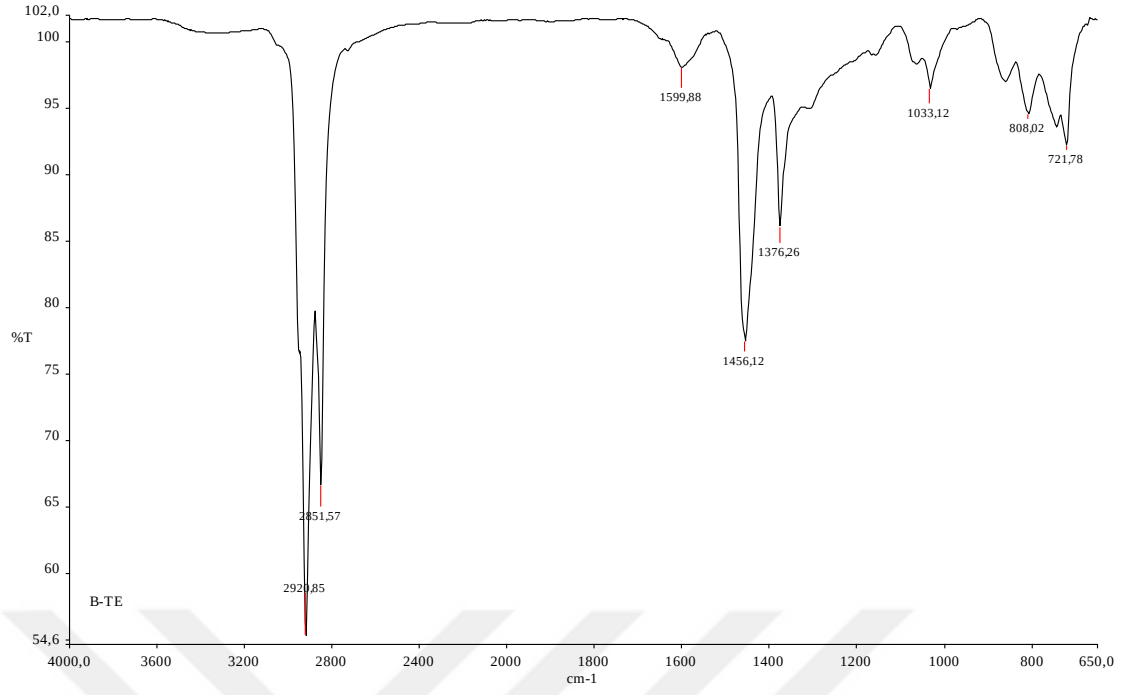
Numunelere ait difraktogramlar incelendiğinde saf bitüme (B) ait difraktogramı asfalt bağlayıcılar için tipik olup pik maksimumu 20-20 geniş ve yayvan ve 43-20 değerinde ise geniş ve daha az alana sahip amorf pikler görülmektedir. 20-20'daki geniş pik incelendiğinde kısmen kristalin bölgeler mevcut iken ikinci pik tamamen amorf görülmektedir. B+%6 PET karışımına ait difraktoğram incelendiğinde 20-20 pik maksimumundaki pik önemli ölçüde azalmış ve kristalin bölgelere ait pikler kısmen kaybolarak amorflaşmanın arttığı görülmektedir. 43-20'daki ikinci amorf pik saf bitüme ait pik ile benzer boyutta çıkmıştır. Bu durum TEO'nun hem bitüm ile hem de PET ile etkileştiği, hatta kimyasal reaksiyona girdiği şeklinde yorumlanabilir. Özellikle TEO'nun bazik yapıda olduğu düşünülürse asidik yapıda olan PET ile önemli ölçüde etkileşebileceği sonucuna varılabilir.

4.9.3. FTIR

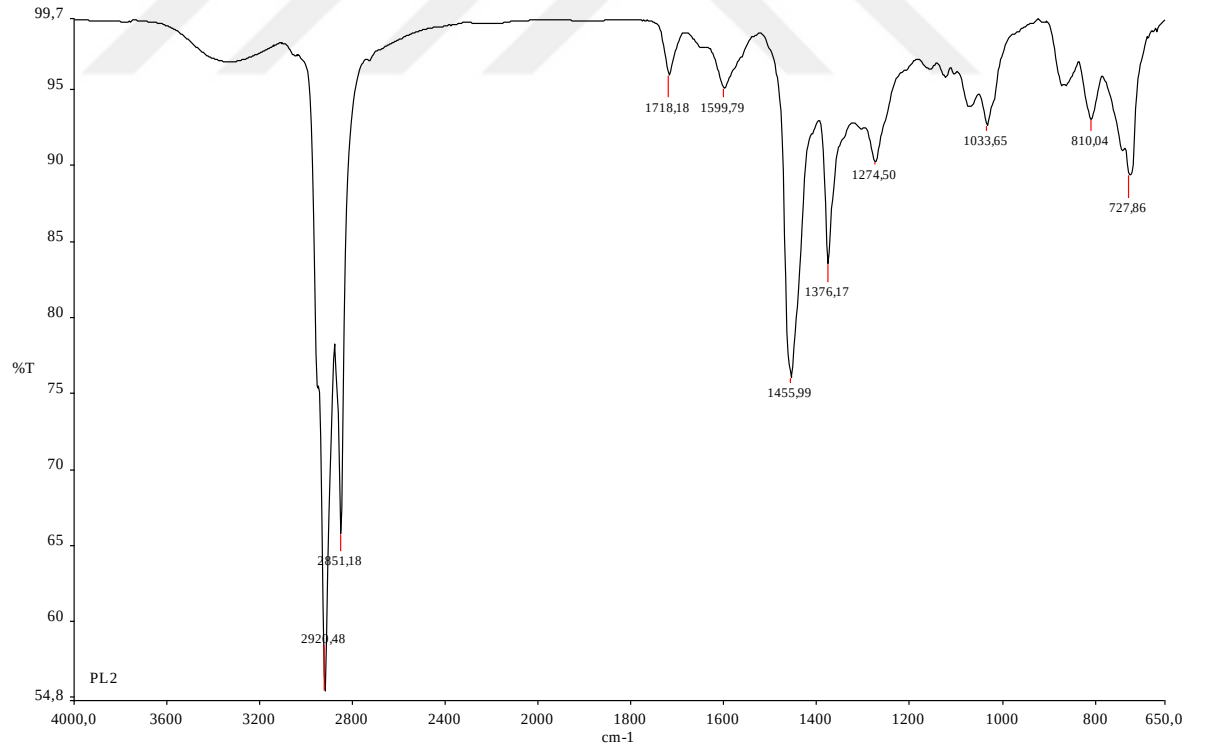
Saf ve modifiye bağlayıcıların FTIR analizleri İnönü Üniversitesi Merkez FTIR Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer 100 FTIR markalı spektrometrede 400- 4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ölçülmüştür. Elde edilen tüm sonuçlar Şekil 4.59- 4.65'de verilmiştir.



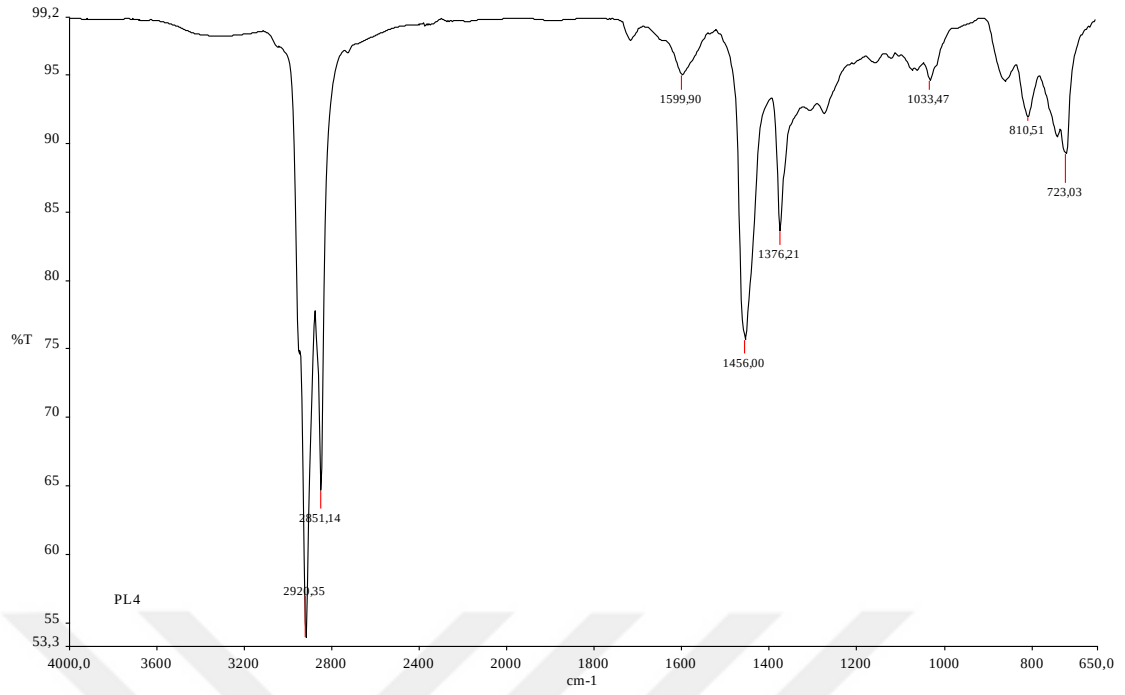
Şekil 4.59. Saf bitüm FTIR



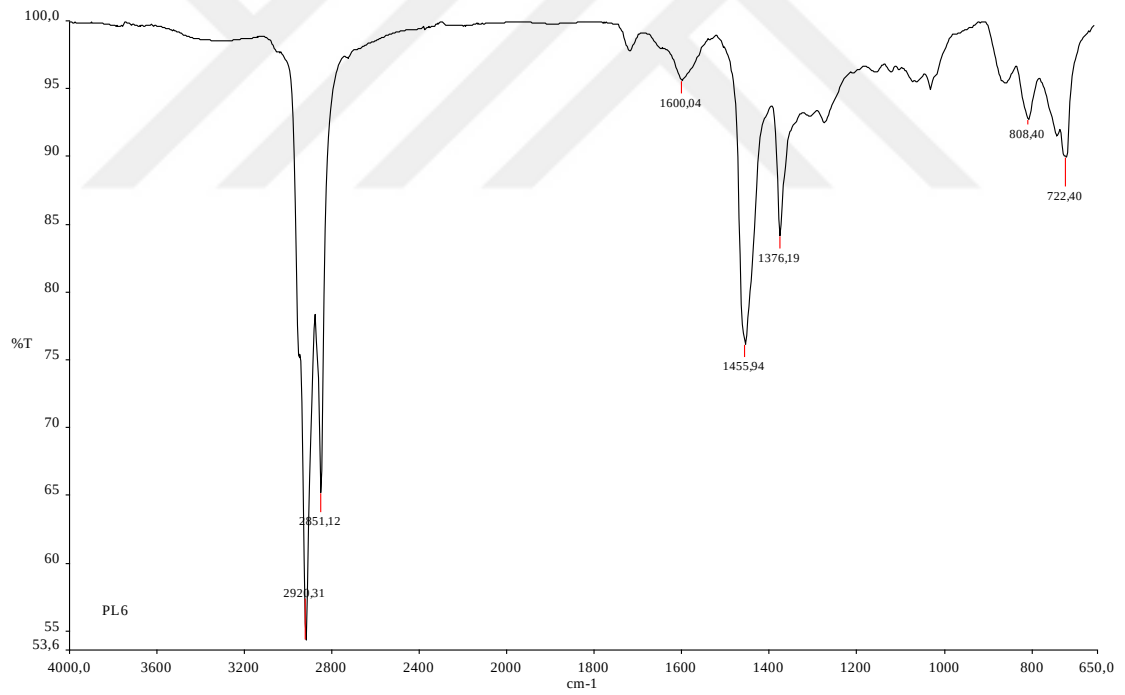
Şekil 4.60. Saf+TEO FTIR



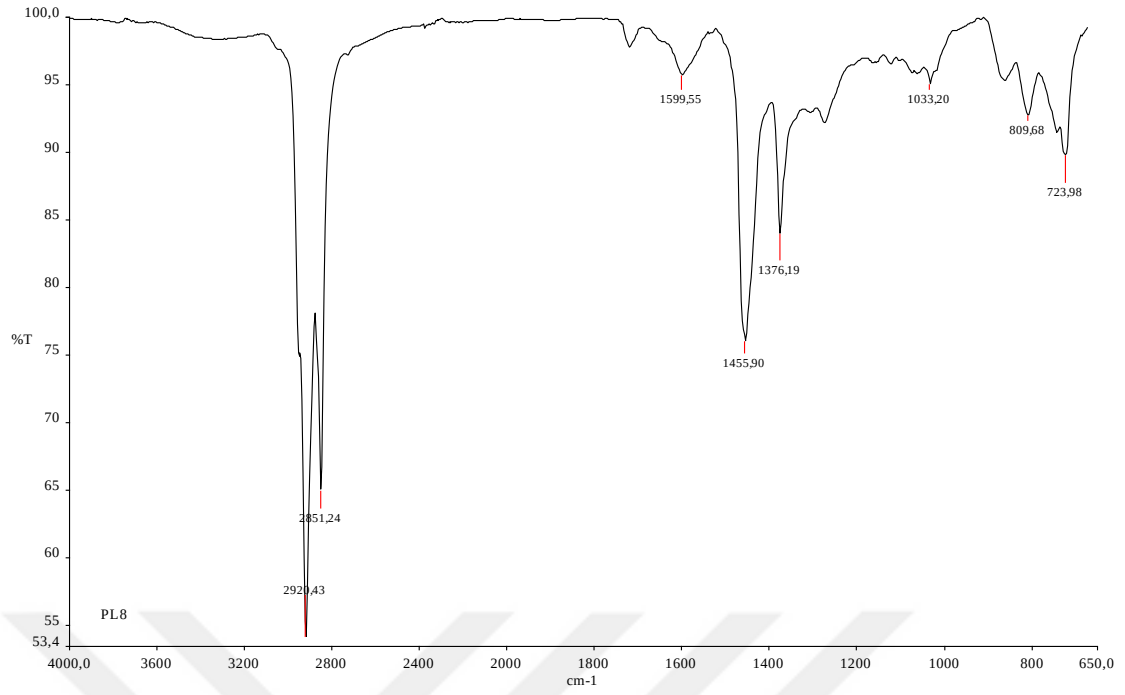
Şekil 4.61. Saf+TEO+%2PET FTIR



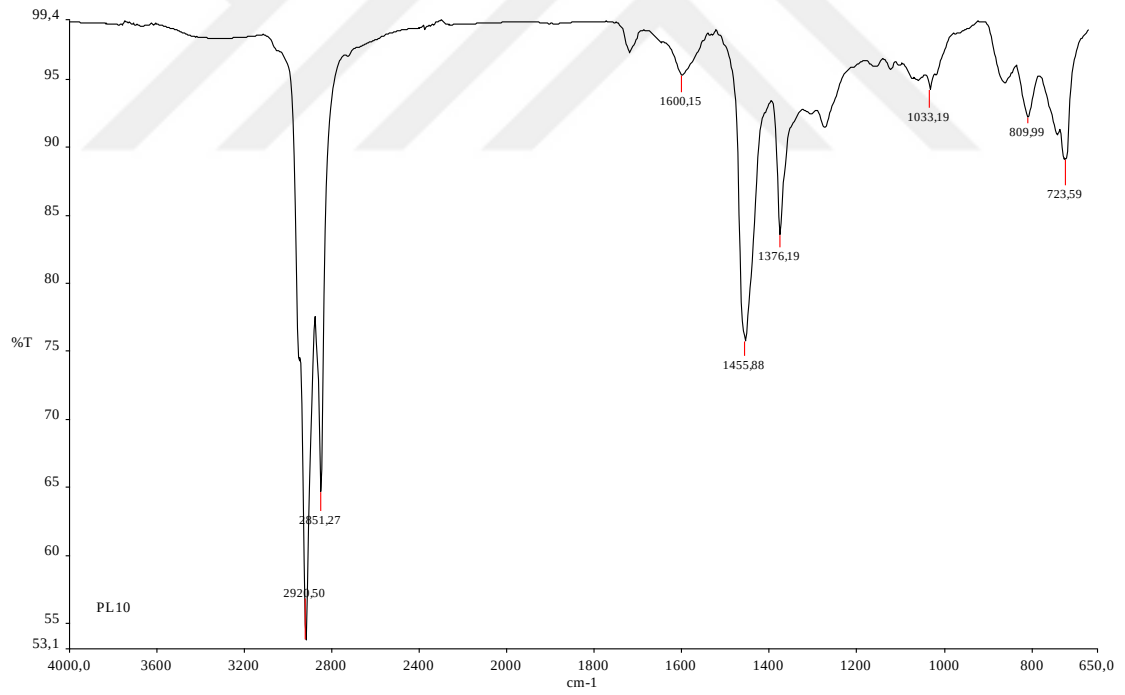
Şekil 4.62. Saf+TEO+%4PET FTIR



Şekil 4.63. Saf+TEO+%6PET FTIR



Şekil 4.64. Saf+TEO+%8PET FTIR



Şekil 4.65. Saf+TEO+%10PET FTIR

Tüm örneklere ait FTIR spektrumları incelendiğinde saf bitüm ve tüm karışımlar için yoğun alifatik yapıdan dolayı keskin alifatik C-H gerilmeleri 2851 ve 2920 cm⁻¹ bandları açıkça görülmektedir. Bitüm içerisine PET ilave edildiğinde PET ve TEO'ya ait –OH (hidroksil) ve PET'e ait –C=O (karbonil) gerilmelerine ait 3300 cm⁻¹ ve 1712 cm⁻¹ bandlarında açıkça görülmektedir. Ortama TEO katıldığında 1000 ve 150 cm⁻¹ civarındaki hafif pikler ortaya çıkmaktadır. Saf asfalta PET ve TEO ilave edildiğinde ana yapı genel olarak değişmemektedir. Bu beklenen bir sonuç olup yapı değiştiğinde başka bir malzemeye dönüş olması gerekirdi. Bu durumda malzemenin asfalt malzemesi olarak kullanımı mümkün olmayabilirdi. Ancak hem PET'in hem de TEO'nun asfalt ile homojen karışması yanında kısmende olsa reaksiyona girmesi kaçınılmazdır. Nitekim sonuç ürünün asfalta dair bir çok özelliklerinde önemli ölçüde pozitif yönde değişimler gözlemlenmiştir. Özellikle SEM görüntülerinde grafitik tabakalı yapı bu görüşü desteklemektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, geri kazanılmış Polietilen Tereftalat (PET) 'ın bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Saf bağlayıcıya PET katkısının eklenmesiyle penetrasyon değerinin ilk olarak azalma gösterdiği (%6PET), daha sonra ise arttığı gözlenmiştir. %6PET katkılı bağlayıcının sınıf değişerek daha sert kıvamlı olan B 50/70 sınıfı bir bağlayıcı sınıfına geçtiği görülmüştür. Ayrıca yumuşama noktası deney sonuçlarının da penetrasyon değeri ile uyumluluk gösterdiği ve %6PET katkılı bağlayıcıya kadar yumuşama değerinin arttığı, daha sonra ise azaldığı tespit edilmiştir. Sıcaklık hassasiyet ölçüsü olan PI değeri de bağlayıcılar için hesaplanıp en uygun bağlayıcının %4PET katkılı bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir. Yaşlandırılmış numuneler üzerinde ayrıca penetrasyon, yumuşama noktası deneyleri yapıp değerlendirildiğinde bağlayıcıların RTFOT ile yaşlanmasıyla daha da sertleştiği ve yumuşama noktası değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

2. Bağlayıcıların RV sonuçları değerlendirildiğinde ise, katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre sertleşmesine rağmen, aynı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında kalması işlenebilirlik ve tüketilen enerji bakımından olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.

3. Saf ve PET katkılı bağlayıcıların DSR sonuçları değerlendirildiğinde, saf bitüm ile aynı performans seviyesinde kaldığı, dolayısıyla bağlayıcıların düşük ve yüksek sıcaklık performansı üzerinde (reolojik özellikleri) PET katkısının önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

4. Karışımların Marshall stabilite deney sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek stabilite değerine %6 PET katkılı karışım numunesinin ulaştığı tespit edilmiştir.

5. RMS deney sonuçları değerlendirildiğinde PET katkısının genel olarak nem hasarı dayanımını arttırdığını söylemek mümkündür. Nem hasarı dayanımının en yüksek olduğu karışımın %8 PET katkılı karışım olduğu görülmüştür.

6. ITS ve AASHTO T283 deney sonuçları değerlendirildiğinde ise en yüksek ITSR değeri %8 PET katkılı karışımda görüldüğü ve PET katkılı karışımların yeterli adezyon ve kohezyona sahip olduğu ve nem hasarına karşı dirençli olduğu söylenebilir.

7. ITSM deney sonuçlarına göre, PET katkılı karışımların trafik etkisi sonucu kaplamada meydana gelen kalıcı deformasyonlara karşı direncinin arttığı ayrıca %6

PET katkılı karışımların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği esneklik modülü değerinin en yüksek olduğu da söylenebilir.

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

9. Modifikasyon işlemi sonucu elde edilen bağlayıcılara ait SEM, XRD ve FTIR analiz sonuçları değerlendirildiğinde; asfalt, TEO ve PET ile karıştırıldığında homojen bir yapı elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum her üç bileşen arasında kimyasal bir etkileşimin olduğunun göstergesidir. TEO'nun kullanılması ile PET'in asfalt içerisindeki normal fiziksel dağılımı kimyasal bir etkileşimin olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi TEO bazik yapıya sahip bir organik bileşik olup (asidik -COOH ve bazik -OH) PET'in yapısındaki fonsiyonel gruplar ile kimyasal etkileşime girmesidir. Bu etkileşim sonucu asfalt-PET-TEO kombinasyonu birbiri içerisinde homojen şekilde dağılarak (benzer benzeri çözer ilkesi) kompozit malzeme gibi davranmaya başlamıştır. Bu durum, PET modifikasyonunda TEO kullanılmasının yüksek sıcaklıklardaki depolama stabitesi açısından da fayda sağlayacağını göstermektedir.

Sonuç olarak, geri kazanılmış PET katkısının bitüm modifikasyonunda kullanılmasının bağlayıcıların bazı fiziksel özelliklerini iyileştirdiği ancak reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, buna karşın karışımda kullanılacak TEO kimyasalının etkisiyle asfalt ve PET arasında iyi bir etkileşim kurulabileceği görülmüştür. Bu modifiye bağlayıcıların yüksek sıcaklık stabilitesi bakımından önemli bir durumdur. Ayrıca geri kazanılmış PET kullanılmasının kaplamanın birçok fiziksel özelliği üzerinde olumlu bir iyileştirme sağlayacağı görülmüştür. Bu durumda geri kazanılmış PET kullanılmasının hem kaplamanın ömrünü uzatmak hem de PET' in çevreye vermiş olduğu zararı minimize etmek bakımından önemli olacağını ifade etmek mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- [1] Anonim, *Asfalt ve Uygulamaları*, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 2001, 280s.
- [2] D. Whiteoak, *Shell Bitüm El Kitabı*, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 2004, 334s.
- [3] A. Tunç, *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2007, 840s.
- [4] A. Tunç, *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*, Asil Yayın Dağıtım, İstanbul, 2004, 352s.
- [5] Tacettin Geçkil. *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2008.
- [6] Anonim, *Asfalt El Kitabı*, İSFALT Bilimsel Yayınları, İstanbul, 2002, 573s.
- [7] Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013, 525s.
- [8] F. Orhan, *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2012, 39s.
- [9] Mehmet Yılmaz. *Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2011.
- [10] J.P. Zaniewski ve M.E. Pumphrey, *Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol*, Asphalt Technology Program, Morgantown, West Virginia, 2004, 107p.
- [11] Fırat Yelken. *Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2009.
- [12] E. Avcı, M. Tığdemir ve T. Özdemir, *Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Esnek Üstyapı Kaplama Tabakalarında Performans Araştırması*, İzmir Ulaşım Sempozyumu, 8-9 Aralık 2009.
- [13] T.W. Kennedy, G.A. Huber, E.T. Harrigan, R.J. Cominsky, C.S. Hughes, H.V. Quintus and J.S. Moulthrop, *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program*, SHRP-A-410, National Research Council, Washington DC, 1994, 170p.
- [14] R.J. Cominsky, G.A. Huber, T.W. Kennedy and M. Anderson, *The Superpave Mix Design Manuel for New Construction and Overlays*, SHRP-A-407, National Research Council, Washington DC, 1994, 184p.
- [15] J.C. Petersen, R.E. Robertson, J.F. Branthaver, P.M. Harnsberger, J.J. Duvall, S.S. Kim, D.A. Anderson, D.W. Christensen, H.U. Bahia, R. Dongre, C.E. Antleve and M.G. Sharma, *Binder Characterization and Evaluation Volume 4: Test Methods, Strategic Highway Research Program*, SHRP A-370, National Research Council, Washington DC, 1994, 197p.
- [16] R.B. McGennis, S. Shuler, ve H.U. Bahia, *Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, FHWA-SA-94-069, Washington DC, 1994, 104 p.
- [17] M.A. Önal ve M. Kahramangil, *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013, 200s.
- [18] S. Hınıslıoğlu ve E. Ağar, *Use of the Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix*, **Materials Letters**, 58 (2004) 267-271.
- [19] S.E. Zoorob and L.B. Suparna, *Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt)*, **Cement&Concrete Composites**, 22 (2000) 233-242.

- [20] Khalid Salim Alshamsi. *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures*, PhD Thesis, Louisiana State University United Kingdom, 2006.
- [21] P.G. Lavin, *Asphalt Pavements*, Spon Pres, London and New York, 2003,444p.
- [22] P. Ahmedzade, T. Alataş and T. Geçkil, *The Effect of Carbon Black on The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures*, **Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences**, 25:2 (2007) 179-189.
- [23] Baha Vural Kök. *Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2007.
- [24] L. Francken, *Bituminous Binders and Mixes*, Rilem Reports, 1998, 352p.
- [25] Erkut Yalçın. *Filler Olarak Kireç Kullanımının Modifiye Bitümlerle Hazırlanan Karışımların Performansına Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2014.
- [26] T. Geçkil, *Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer- Modified Bitumen*, **Materials**, 12;6 (2019) 921.
- [27] Anonim. <http://inonu.edu.tr/en/ibtam/10485/menu?m=12127> (25 Ekim 2019 tarihinde erişim sağlandı.)
- [28] İlhan Küçük. *Farklı Kütlelerden Karbondioksit Kullanarak Karbon Moleküler Elek Özelliğinde Aktif Karbon Üretimi ve Uygulamaları*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, 2019.
- [29] M. Gürü, K. Çubuk, D. Arslan, S. Farzanian and İ.Bilici, *An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material*, **Journal of Hazardous Materials**, 279 (2014) 302–310.
- [30] Esra Yaşmun. *Pet Lifi Katkılı Bitüm Kaplamaların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, 2009.
- [31] Nimet İnkaya. *Atık Plastiklerin Karayolunda Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2016.
- [32] E. Tayyar ve S. Üstün, *Geri Kazanılmış Pet'in Kullanımı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16:1 (2009) 53-62.
- [33] S. Demirarslan, *Plastik Malzemenin Özellikleri ve İnşaat Sektöründeki Kullanım Yerleri*, Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi, İstanbul, 2009.
- [34] Z. Kalantar, M. Karim and A. Mahrez, *A review of using waste and virgin polymer in pavement*, **Construction and Building Materials**, 33 (2012) 55–62.
- [35] Z. Leng, R. Padhan and A. Sreeram, *Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt*, **Journal of Cleaner Production**, 180 (2018) 682-688.
- [36] R. Padhan, A. Gupta, R. Badoni and A. Bhatnagar, *Poly(ethylene terephthalate) waste derived chemicals as an antistripping additive for bitumenAn environment friendly approach for disposal of environmentally hazardous material*, **Polymer Degradation and Stability**, 98:12 (2013) 2592-2601.
- [37] E. Ahmadiania, M. Zargar, M. Karim, M. Abdelaziz and P. Shafigh, *Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt*, **Materials and Design**, 32:10 (2011) 4844–4849.
- [38] A. Modarres and H. Hamed, *Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes*, **Materials and Design**, 61 (2014)8–15.
- [39] T. Moghaddam, M. Karim and T. Syammaun, *Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles*, **Construction and Building Materials**, 34 (2012) 236–242.

- [40] W. Abdul Rahman and A. Abdul Wahab, *Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt*, **Procedia Engineering**, 53 (2013) 124-128.
- [41] A. Hassani, H. Ganjidoust and A. Maghanaki, *Use of Plastic waste(Polyethylene terephthalate) in Asphalt Concrete Mixture as Aggregate Replacement*, **Waste Management&Research**, 23 (2005) 322-327.
- [42] Çağlar Giriftinoğlu. *Plastik Atıkların Yol Kaplamalarında Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007.
- [43] Seyyed Ali Farzanian. *Polietilen Tereftalat (PET) Atıklarının Polimerizasyon ile Elde Edilen Ürünlerinin Asfalt Betonlarında Kullanılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2013.
- [44] H. Ziari, A. Kaliji and R. Babagoli, *Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures*, **Petroleum Science and Technology**, 34:9 (2016) 819-823.
- [45] Z. Denghan and A. Modarres, *Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test*, **Construction and Building Materials**, 139 (2017) 384–393.
- [46] T. Moghaddam, M. Soltani and M. Karim, *Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test*, **Materials and Design**, 53(2014) 317–324.
- [47] M. Tuncan, A.Tuncan and A. Çetin, *The use of Waste Materials in Asphalt Concrete Mixtures*, **Waste Management&Research**, 21 (2003) 83-92.
- [48] J. Silva, L. Lucena, J. Rodrigues, M. Carvalho and D. Costa, *Use of Micronized Polyethylene Terephthalate (Pet) Waste in Asphalt Binder*, **Petroleum Science and Technology**, 33:15-16 (2015) 1508-1515.
- [49] Z. Leng, A. Sreeram, R. Padhan and Z. Tan, *Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP)*, **Journal of Cleaner Production**, 196 (2018) 615-625.
- [50] I. El-Naga and M. Ragab, *Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures*, **Construction and Building Materials**, 219 (2019) 81–90.
- [51] M. Ameri and D. Nasr, *Properties of asphalt modified with devulcanized polyethylene terephthalate*, **Petroleum Science and Technology**, 34;16 (2016) 1424-1430.
- [52] Marjus Hoxha. *The Effects of Waste Polethylene Terephthalate (PET) on Asphalt Concrete*, Master Thesis, Zirve University, 2014.
- [53] Esra Bulak. *Atık Polietilen Tereftalat (PET) 'ın Aminolizi ve Aminoliz Ürünlerinin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ceren Beyza İNCE

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya – 12.08.1993

Adres: Fırat Mah. Erenler sok. No:7/10 Battalgazi / MALATYA

E-posta: c.beyzaince@gmail.com

Lisans: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2012-2016).

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı (2016-2019).

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Batualp Yapı Denetim LTD.ŞTİ. , Kontrol Mühendisi (2016- devam ediyor).

Yayın Listesi :

Geçkil T., Önal Y., İnce C.B. (2019). Atık PET Katkısının Asfaltın Karıştırma ve Sıkıştırma Sıcaklıklarına Etkisi (217-226), III. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, 21-23 Eylül, Malatya.