



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**FARKLI PLASTİK ATIKLARIN BİRLİKTE
PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN KATI
ÜRÜNLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ
SICAK KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Muhammet Mevlüt AKMAZ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Mevlüt AKMAZ tarafından hazırlanan “Farklı Plastik Atıkların Birlikte Pirolizinden Elde Edilen Katı Ürünle Modifiye Edilmiş Bitümlü Sıcak Karışımların Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 18/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Erol PEHLİVAN

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

.....

Üye

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

.....

Üye

Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

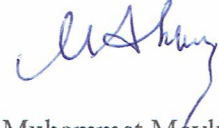
Bu tez çalışması, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (B.A.P.) Koordinatörlüğü tarafından 17101012 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Muhammet Mevlüt AKMAZ

Tarih: 22.09.2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI PLASTİK ATIKLARIN BİRLİKTE PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN KATI ÜRÜNLE MODİFİYE EDİLMİŞ BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammet Mevlüt AKMAZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2020, 210 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Erol PEHLİVAN
Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Atilla DEMİRÖZ**

Bu çalışmada; polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polietilen tereftalat (PET) atık plastikleri belirli oranlarda karıştırılmış, hazırlanan ikili ve üçlü plastik karışım grupları piroliz edilmiş ve piroliz ürün (katı, sıvı ve gaz) verimleri hesaplanmıştır. Piroliz katı ürünleri, saf 50/70 bitümle % 2, 4, 5 ve 6 oranlarında karıştırılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Katkıların saf bitüme etkisini incelemek amacıyla; penetrasyon, yumuşama noktası ve RV (dönel viskometre) deneyleri yapılmıştır. Katkıların ilavesiyle, bitümün penetrasyonunun azaldığı ve yumuşama noktasının arttığı görülmüştür. Saf bitüme göre; 60 ve 75 °C’lerdeki vizkozitelerin tüm katkılı bitümlerde arttığı, 90 °C’den itibaren YYSPE–PET katkılı bitümlerde ve 120 °C’den itibaren PP–YYPE–PET katkılı bitümlerde viskozitelerin azaldığı, PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerde tüm sıcaklıklarda viskozitelerin arttığı tespit edilmiştir. Katkılı bitümlerde, saf bitüme göre viskozite değişim yüzdelерinin düşük sıcaklıklarda daha yüksek seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Katkı verimleri, modifikasyon, penetrasyon, yumuşama noktası ve RV çalışmaları ile; PP–YYPE ve PP–PET katkıları seçilmiş, bu katkıların optimum oranları % 5 olarak bulunmuştur.

PP–YYPE ve PP–PET katkılarıyla hazırlanan katkılı ve saf bitümlere; RTFOT (dönen ince film halinde ısıtma), PAV (basınçlı yaşlandırma kabı), DSR (dinamik kesme reometre) ve BBR (kiriş eğilme reometre) deneyleri uygulanmıştır. Tekerlek izi ($G^*/\sin\delta$), kompleks kayma modülü (G^*) gibi DSR deney parametre değerlerini, katkıların oldukça artırdığı ve katkı oranına göre, bitümün yüksek sıcaklık PG sınıfının 1–2 kademe yükseldiği sonuçlarla görülmüştür. Ayrıca; bitümün elastikliğinin katkı ilavesiyle arttığı gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklık PG sınıflarının tüm bitümlerde aynı olduğu görülmüştür. Saf ve PP–YYPE ile PP–PET katkılı bitümlere uygulanan SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve FTIR (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) analizleriyle, katkıların bitümle etkileşimlerinin daha çok fiziksel nitelik taşıdığı gözlenmiştir. Katkılı ve saf bitümlü sıcak karışımların (BSK) yoğunluk–boşluk özelliklerinin benzerlik içerdiği tespit edilmiştir. PP–YYPE ile PP–PET katkılarının; Marshall stabilitesini sırasıyla % 8.45–12.87 ve % 10.22–13.74 oranlarında, tekerlek izi performansını ise sırasıyla % 32.81 ve % 45.43 oranlarında artırdığı bulgularına Marshall tasarımı ve tekerlek izi deneyleriyle ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik atıklar, birlikte piroliz, modifiye bitüm, bitümlü sıcak karışım

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT MODIFIED WITH SOLID PRODUCT OBTAINED FROM CO-PYROLYSIS OF DIFFERENT WASTE PLASTICS

Muhammet Mevlüt AKMAZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2020, 210 Pages

Jury

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Erol PEHLİVAN
Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ**

In this study; polypropylene (PP), high density polyethylene (HDPE), polyethylene terephthalate (PET) waste plastics were mixed in certain proportions, the prepared double and triple plastic mixture groups were co-pyrolyzed and pyrolysis product (solid, liquid and gas) yields were calculated. Modified bitumen was prepared by mixing pyrolysis solid products with pure 50/70 bitumen in 2, 4, 5, 6 % rates. In order to examine the effects of additives on pure bitumen; penetration, softening point, RV (rotational viscometer) tests were performed. With the addition of additives, it has been observed that the softening point increases and the penetration decreases. Compared to the pure bitumen; viscosity values at 60 and 75 °C increase in all modified bitumen, viscosity values decrease in HDPE–PET modified bitumen from 90 °C and in PP–HDPE–PET modified bitumen from 120 °C, respectively, viscosity values at 60 to 165 °C increase in PP–HDPE and PP–PET modified bitumen. In modified bitumen, it has been observed that viscosity change percentages according to pure bitumen are higher in low temperatures. With additive yields, modification, penetration, softening point and RV studies; PP–HDPE and PP–PET additives were selected and the optimum rates of these additives were found as 5 %.

RTFOT (rolling thin film oven test), PAV (pressurized aging vessel), DSR (dynamic shear rheometer) and BBR (bending beam rheometer) tests were applied to pure and PP–HDPE and PP–PET modified bitumen. It has been seen with results that additives significantly increase DSR test parameter values such as wheel tracking ($G^*/\sin\delta$), complex shear module (G^*) and the high temperature PG of bitumen has increased by 1–2 step with the addition of additives. Also; it has been observed that the elasticity of the bitumen increases with the addition of additives. It has been observed that low temperature PG is the same in all bitumen. With SEM (scanning electron microscopy) and FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) analysis applied to pure and PP–HDPE and PP–PET modified bitumen, it was observed that the interactions of the additives with bitumen are more physical. It has been determined that density and void properties of modified and pure HMA are similar. In PP–HDPE and PP–PET HMA; it has been found by Marshall Design and wheel tracking tests that Marshall Stability increases by 8.45–12.87 % and 10.22–13.74 % respectively, and rutting performance by 32.81 % and 45.43 % respectively.

Keywords: Plastic wastes, co-pyrolysis, modified bitumen, hot mix asphalt

ÖNSÖZ

Bu Doktora tez çalışması boyunca; bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, beni böyle bir konuda çalışmaya yönlendiren ve iyi niyetli yaklaşımıyla desteklerini sürekli hissettiğim değerli danışman hocam Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasını 17101012 numaralı proje ile destekleyen Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (B.A.P.) Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Bu tezin oluşturulmasında ve yürütülmesinde, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim ve bilgisini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu tezin kimyasal deneyleri sürecinde bilgi ve fikirlerinden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Erol PEHLİVAN'a, SEM analizleri konusunda yorum ve katkılarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya ve piroliz çalışmalarında bilgi ve fikirlerinden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ'ye saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım için desteğini ve yardımlarını her zaman veren saygıdeğer hocam Öğr. Gör. Dr. Mehmet Ali LORASOKKAY'a, değerli mesai arkadaşım ve hocam Arş. Gör. Hüseyin KÖSE'ye saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca olumlu yaklaşımı ile yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince desteklerinden faydalandığım İnş. Yük. Müh. Saadoon EYADA'ya ve İnş. Yük. Müh. Mohammed Ihsan Abbas ALDAKUKY'a; Ankara KGM ARGE Dairesi Başkanlığı Bitümlü bağlayıcılar laboratuvarı çalışanlarına ve birim şefi İnş. Müh. Tuğba ÖZTÜRK'e; FTIR ve SEM analizlerindeki katkılarından dolayı Selçuk Üniversitesi İLTEK çalışanlarına; agrega materyallerinin temini için yardımcı olan İnş. Müh. Mustafa ÖZTAŞ'a; bitüm materyalinin temini konusundaki desteklerinden dolayı BİBERCİ inşaat firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Benim bu günlere gelmemde çok emeği olan, evlatları için birçok fedakarlıklara katlanan, hayat boyu desteğini ve güvenini çok yakından hissettiğim ve mutluluğu için gayret gösterdiğim biricik ve çok değerli, saygıdeğer babam Prof. Dr. Ali AKMAZ'a teşekkürlerimi bir borç bilir ve kendisine sağlıklı, hayırlı ve hep birlikte yaşayacağımız nice ömürler dilerim. Bu anlamda, bugünlere onların sayesinde ulaştığım ve duasını her zaman gönlümde hissettiğim biricik rahmetli annem Şükran AKMAZ'a Cenabı Allahtan rahmet diler ve kendisini saygıyla anarım.

Tez çalışmalarım için desteklerini sürekli gördüğüm ve çok yakinen hissettiğim, çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, sabırlı, cefakar, vefakar ve fedakar biricik eşim ve hayat arkadaşım Mükerrrem AKMAZ'a ve oğullarım ALİ KEREM, İSMAİL ve AHMET FURKAN'a çok teşekkür ederim ve kendilerine nice sağlıklı, hayırlı ve uzun ömürler dilerim.

Muhammet Mevlüt AKMAZ
KONYA–2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Plastiklerin Türlerine ve Sektörlere Göre Dağılımı	4
1.2. Plastiklerde Geri Dönüşüm ve Kazanım.....	7
1.3. Genel Hususlar.....	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
2.1. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları.....	13
2.2. Polipropilen (PP) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları	21
2.3. Polietilen Tereftalat (PET) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları.....	28
2.4. Plastiklerin Bitümle Modifikasyonu ile İlgili Literatür Araştırması	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Materyal	36
3.1.1. Agregalar	36
3.1.1.1. Asfalt karışımlarda kullanılan agregaların özellikleri.....	38
3.1.2. Bitümlü bağlayıcılar.....	41
3.1.2.1. Bitümün kimyasal bileşimi, yapısı ve reolojisi.....	43
3.1.2.2. Bitümün dayanıklılığı	45
3.1.2.3. Bitümün adezyon (yapışma) özelliği	47
3.1.2.4. Bitümün kohezyonu, hacimsel genleşmesi ve ısı özellikleri	48
3.1.2.5. Modifiye bitümler	49
3.1.3. Bitümlü sıcak karışımlar	54
3.1.3.1. Stabilite özelliği	54
3.1.3.2. Rijitlik, dayanıklılık (durabilite) ve yorulma mukavemeti özellikleri ...	56
3.1.3.3. Esneklik ve kayma direnci özellikleri.....	57
3.1.3.4. Geçirimsizlik ve işlenebilirlik özellikleri.....	58
3.1.3.5. BSK'nın hizmet aşamasındaki performansı ve kusurları.....	59
3.1.3.5.1. Kalıcı deformasyon	60
3.1.3.5.2. Yorulma çatlakları	62
3.1.3.5.3. Düşük sıcaklık çatlakları.....	63
3.1.3.5.4. Nem hasarları	64
3.1.4. Plastikler	65
3.1.4.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE).....	65
3.1.4.2. Polipropilen (PP).....	66
3.1.4.3. Polietilen tereftalat (PET)	67
3.1.4.4. Plastik malzemelerin seçimi	68

3.2. Yöntem.....	70
3.2.1. Kimyasal deneyler	70
3.2.1.1. Piroliz deney sistemi	70
3.2.1.2. SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi.....	72
3.2.1.3. FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) analizi	73
3.2.2. Bitümlü bağlayıcı deneyleri.....	74
3.2.2.1. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri	75
3.2.2.2. Superpave bitümlü bağlayıcı deneyleri.....	77
3.2.2.2.1. Dönel viskometre (RV) deneyi	78
3.2.2.2.2. Dönen ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)	81
3.2.2.2.3. Basıncılı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi.....	82
3.2.2.2.4. Dinamik kesme (kayma) reometre (DSR) deneyi.....	83
3.2.2.2.5. Kiriş eğilme reometre (BBR) deneyi	86
3.2.2.2.6. Bitümlü bağlayıcı performans sınıfı (PG).....	87
3.2.3. Bitümlü sıcak karışım (BSK) deneyleri.....	88
3.2.3.1. Marshall karışım tasarım deneyi (yöntemi)	89
3.2.3.1.1. Sıkıştırılmış karışım numunesinin yoğunluk-boşluk analizi	90
3.2.3.1.1.1. Karışımın özgül ağırlığı (G_{mb} ve G_{mm})	91
3.2.3.1.1.2. Karışımın hava boşluğu (P_a)	96
3.2.3.1.1.3. Mineral agregalar arasındaki boşluklar (VMA).....	97
3.2.3.1.1.4. Bitümlü bağlayıcı ile doldurulmuş boşluklar (VFA)	99
3.2.3.1.1.5. Karışımın bitümlü bağlayıcı içeriği	100
3.2.3.1.2. Sıkıştırılmış karışım numunesinin stabilite-akma deneyi	102
3.2.3.2. Tekerlek izi deneyi.....	105
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	110
4.1. Piroliz Deneyleri ile Katkıların Elde Edilmesi	110
4.1.1. Birlikte piroliz deneyleri için plastik gruplarının oluşturulması.....	111
4.1.2. Piroliz deney sonuçları.....	113
4.2. Bitümlü Bağlayıcı Deneyleriyle Katkıların İncelenmesi.....	116
4.2.1. Modifiye bitümlü bağlayıcıların hazırlanması.....	117
4.2.2. Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları	118
4.2.3. Dönel viskometre (RV) deney sonuçları	121
4.2.3.1. Grup 1 (PP-YYPE) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları	122
4.2.3.2. Grup 2 (PP-PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları	123
4.2.3.3. Grup 3 (YYPE-PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları	125
4.2.3.4. Grup 4 (PP-YYPE-PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları.....	127
4.2.4. Katkıların karşılaştırılması ve uygun olanların seçilmesi.....	128
4.3. Superpave Bitümlü Bağlayıcı Deneylerinin Sonuçları	138
4.3.1. Bitüm yaşlandırma deneylerinin sonuçları	138
4.3.2. Dinamik kesme reometre (DSR) deney sonuçları	139
4.3.2.1. Grup 1 (PP-YYPE) katkılı bitümlerin DSR deneyi sonuçları.....	140
4.3.2.2. Grup 2 (PP-PET) katkılı bitümlerin DSR deneyi sonuçları	146
4.3.3. Kiriş eğilme reometre (BBR) deney sonuçları.....	153
4.3.3.1. Grup 1 (PP-YYPE) katkılı bitümlerin BBR deneyi sonuçları.....	153
4.3.3.2. Grup 2 (PP-PET) katkılı bitümlerin BBR deneyi sonuçları.....	155
4.3.4. Bitümlü bağlayıcıların performans sınıflarının (PG) belirlenmesi	157
4.3.4.1. Grup 1 (PP-YYPE) katkılı bitümlerin PG sınıfı.....	157
4.3.4.2. Grup 2 (PP-PET) katkılı bitümlerin PG sınıfı	158

4.4. Katkıların Bitüme Olan Etkilerinin Kimyasal Deneylerle İncelenmesi	160
4.4.1. SEM (taramalı elektron mikroskobu) analiz sonuçları	161
4.4.1.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkıli bitümlerin SEM görüntüleri.....	161
4.4.1.2. Grup 2 (PP–PET) katkıli bitümlerin SEM görüntüleri	166
4.4.2. FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) analiz sonuçları.....	170
4.5. Marshall Karışım Tasarımı Sonuçları.....	173
4.5.1. BSK içindeki agrega karışım grubunun oluşturulması	174
4.5.2. BSK'yı oluşturan materyallerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi.....	175
4.5.3. BSK numuneleri için deney parametrelerinin belirlenmesi.....	176
4.5.4. BSK numunelerinin hazırlanması ve gerekli deneylerin uygulanması.....	180
4.5.5. Deneyler sonrasında grafiklerin çizilmesi	180
4.5.6. Optimum bitüm oranlarının bulunması.....	187
4.6. Tekerlek İzi Deneyinin Uygulanması ve Sonuçları.....	189
4.6.1. BSK numunelerinin hazırlanması ve işlenebilirlik	189
4.6.2. Tekerlek izi deney sonuçları	192
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	195
KAYNAKLAR	200
ÖZGEÇMİŞ	209

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

PI	: Penetrasyon indeksi
cp	: Santipoise
mPa.s	: Milipascal saniye
Pa.s	: Pascal saniye
G*	: Bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü
δ	: Bitümlü bağlayıcının faz açısı
G'	: Bitümlü bağlayıcının elastik modülü
G''	: Bitümlü bağlayıcının viskoz modülü
G*/sin δ	: Bitümlü bağlayıcının tekerlek izi parametresi
G*.sin δ	: Bitümlü bağlayıcının yorulma parametresi
S	: Bitümlü bağlayıcının sünme rijitliği (sertliği)
m	: Bitümlü bağlayıcının sünme oranı
rad/s	: Saniyedeki radyan değişimi
G _{mb}	: Sıkıştırılmış BSK'nın hacim özgül ağırlığı
G _{mm}	: Gevşek BSK'nın maksimum (teorik) özgül ağırlığı
VMA	: BSK'da mineral agregalar arası boşluk yüzdesi
VFA	: BSK'da bitüm ile doldurulmuş boşluk yüzdesi
P _a	: Sıkıştırılmış BSK'da hava boşluğu yüzdesi
P _b	: BSK'daki bitüm yüzdesi
P _s	: BSK'daki agrega yüzdesi
G _{sa}	: BSK'daki agrega karışım grubunun zahiri özgül ağırlığı
G _{sb}	: BSK'daki agrega karışım grubunun hacim özgül ağırlığı
G _{se}	: BSK'daki agrega karışım grubunun efektif özgül ağırlığı
G _{ka}	: Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı
G _{kb}	: Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı
G _{ia}	: İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı
G _{ib}	: İnce agreganın hacim özgül ağırlığı
G _{fa}	: Mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı
P _k	: Agregada karışım grubunda kaba agrega yüzdesi
P _i	: Agregada karışım grubunda ince agrega yüzdesi
P _f	: Agregada karışım grubunda mineral filler yüzdesi
G _b	: Bitüm özgül ağırlığı
MQ	: Marshall oranı
N _{initial}	: Başlangıç yoğurma (dönüş) sayısı
N _{design}	: Tasarım yoğurma (dönüş) sayısı
N _{maximum}	: Maksimum yoğurma (dönüş) sayısı
Pa, kPa, MPa	: Pascal, Kilopascal, Megapascal
N, kN	: Newton, Kilonewton
cm, mm, μ m	: Santimetre, Milimetre, Mikron (10^{-3} mm)
gr, kg	: Gram, Kilogram
rpm	: Dakikadaki devir sayısı (devir/dakika)
mrad	: Miliradyan
cm ⁻¹	: Dalga sayısı birimi

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
AC	: Asfalt çimentosu (penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı)
APET	: Amorf polietilen tereftalat
BBR	: Kiriş eğilme reometresi
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
CPET	: Kristal polietilen tereftalat
CPP	: Klorlanmış polipropilen
DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetrisi
DSR	: Dinamik kesme (kayma) reometresi
DTT	: Dolaylı çekme testi (deneyi)
DYPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
EBA	: Etilen bütül akrilat
EDS	: Enerji dağıtıcı spektrometre
ELT	: Ömrünü tamamlamış lastik
EMA-GMA	: Elastomerik polimer
EPDM	: Etilen propilen dien monomer
ETDY	: Eşdeğer tekerlek dingil yükü
EVA	: Etilen vinil asetat
FTIR	: Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
HWT	: Hamburg tekerlek izi (Hamburg wheel tracking)
IR	: Kızılötesi (infrared)
ITS	: Dolaylı çekme mukavemeti
ITSM	: Dolaylı çekme sertlik modülü
İPP	: İzotaktik polipropilen
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LDYPE	: Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen
LK	: Lastik kırıntısı
LKT	: Kırıntı lastik tozu
MAS	: Maksimum agrega boyutu
MC	: Orta hızda kür olan (Sıvı-katbek bitüm cinsi)
MPP	: Maleatlanmış polipropilen
MS	: Orta hızda kesilen (Bitüm emülsiyon cinsi)
MSCR	: Çoklu gerilme sünmesi ve geri kazanım
NMAS	: Nominal maksimum agrega boyutu
OBC	: Optimum bağlayıcı içeriği
PAV	: Basınçlı yaşlandırma kabı
PB	: Polibilt
PBK	: Polibutadien kauçuk
PBT	: Polibütülen tereftalat
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PEPU	: Polieter poliüretan
PET	: Polietilen tereftalat
PEX	: Çapraz bağlı polietilen
PG	: Bitümlü bağlayıcının performans sınıfı
PMA	: Polimer modifiye asfalt

PMB	: Polimer modifiye bitüm
PP	: Polipropilen
PPA	: Polifosforik asit
PS	: Polisitren
PTFE	: Politetrafloretilen (Teflon)
PUR	: Poliüretan
PVC	: Polivinil klorür
RA	: Geri kazanılmış asfalt
RC	: Hızlı kür olan (Sıvı–katbek bitüm cinsi)
RPE	: Geri dönüştürülmüş polietilen
RPW	: Geri dönüştürülmüş plastik atık
RS	: Hızlı kesilen (Bitüm emülsiyon cinsi)
RTFOT	: Dönen ince film halinde ısıtma deneyi
RV	: Dönel viskometre
SBR	: Stiren bütadien random kopolimer
SBS	: Stiren bütadien stiren
SC	: Yavaş hızda kür olan (Sıvı–katbek bitüm cinsi)
SEBS	: Stiren etilen/butilen stiren
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SGC	: Superpave dönel sıkıştırma (gyratory compactor)
SIS	: Stiren izopren stiren
SS	: Yavaş hızda kesilen (Bitüm emülsiyon cinsi)
Superpave	: Superior performing asphalt pavements
TFOT	: İnce film halinde ısıtma deneyi
TLPP	: İnce sıvı poliol polietilen tereftalat
TMA	: Taş mastik asfalt
UMO	: Kullanılmış motor yağı
VPP	: Viskoz poliol polietilen tereftalat
WTR	: Atık lastik
YYPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
YYPHP	: Yüksek yoğunluklu polietilen homo polimer

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımı; üretim yerinden tüketim mahalline aktarmasız ve hızlı taşıma yapılmasına uygun olması nedeniyle, günümüzde diğer taşıma türlerine göre daha fazla tercih edilen bir ulaşım türüdür. Karayolu ulaşımında esnek üstyapı olarak kullanılan asfalt yol kaplamasının geçmişi 100 yıl öncesine dayanmaktadır. İlk asfalt karışım plenti 1920–1930 yılları arasında işletmeye alınmıştır. Türkiye’de asfalt yol uygulaması Osmanlı döneminde başlamış ve penetrasyon–makadam kaplamaların yapımında Fransız’lardan destek alınmıştır. Cumhuriyet döneminde, 1929’da başlayan asfalt yol kaplama yapımı, 1948’de Amerika Birleşik Devletleri’nden (ABD) sağlanan Marshall teknik yardımı ile yaygınlaştırılmış ve 1950’de Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) kurulması ile sürekli gelişim dönemi başlamıştır. 1950’den bu yana Türkiye’de otomotiv endüstrisinin gelişmesiyle; karayoluyla yapılan yük ve yolcu taşımacılığı oranı her geçen gün artmış, ihtiyaçlara paralel olarak imkânlar ölçüsünde hedef ve politikalar değişmiş ve 1970’li yılların sonunda çok şeritli bölünmüş yolların yapımına geçilmiştir. 1980’li yıllarda mevcut karayolu ağının standardının yükseltilmesi için, otoyol ağının geliştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır. 2000’li yıllarda bölünmüş yolların yapımı hız kazanmış ve her geçen yıl artmıştır (URL 1).

KGM’nin sorumluluğu altında bulunan yollar; Otoyol, Devlet ve İl yolları olmak üzere 3 sınıf yoldan oluşmaktadır. Bu yolların oluşturmuş olduğu karayolu ağı uzunluğu 01.01.2020 tarihi itibarıyla toplam 68,231 km.’dir (çizelge 1.1). Fakat KGM’nin yol ağı içinde olmayan ve bazı kamu kuruluşlarının sorumluluğunda olan; köy, turistik, orman ve şehiriçi yolları da mevcuttur (URL 2). Dolayısıyla; kaplama cinsine göre çizelge 1.1.’de verilen değerler, sadece KGM sorumluluğundaki yolları içerdiğinden, Türkiye olarak bu değerlerden çok daha fazla yol ağına sahip olduğumuz da bir gerçektir.

Çizelge 1.1. Kaplama tipine göre KGM bünyesindeki toplam karayolu uzunluğu, 01.01.2020 (URL 2)

Yol Tipi	Asfalt Beton	Sathi kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer	Toplam
Otoyol	3,060	-	-	-	-	-	3,060
Devlet yolu	17,991	12,654	56	27	-	278	31,006
İl yolu	4,689	26,163	243	453	440	2,177	34,165
Toplam (km)	25,740	38,817	299	480	440	2,455	68,231

Esnek (asfalt) yol kaplamasının performansını artırmak, oluşan problemlere karşı çözümler getirmek ve yol yapım–bakım–onarım maliyetlerini azaltmak amacıyla bitümlü bağlayıcının ve bitümlü sıcak karışım’ın (BSK) çeşitli katkılarla iyileştirilmesi

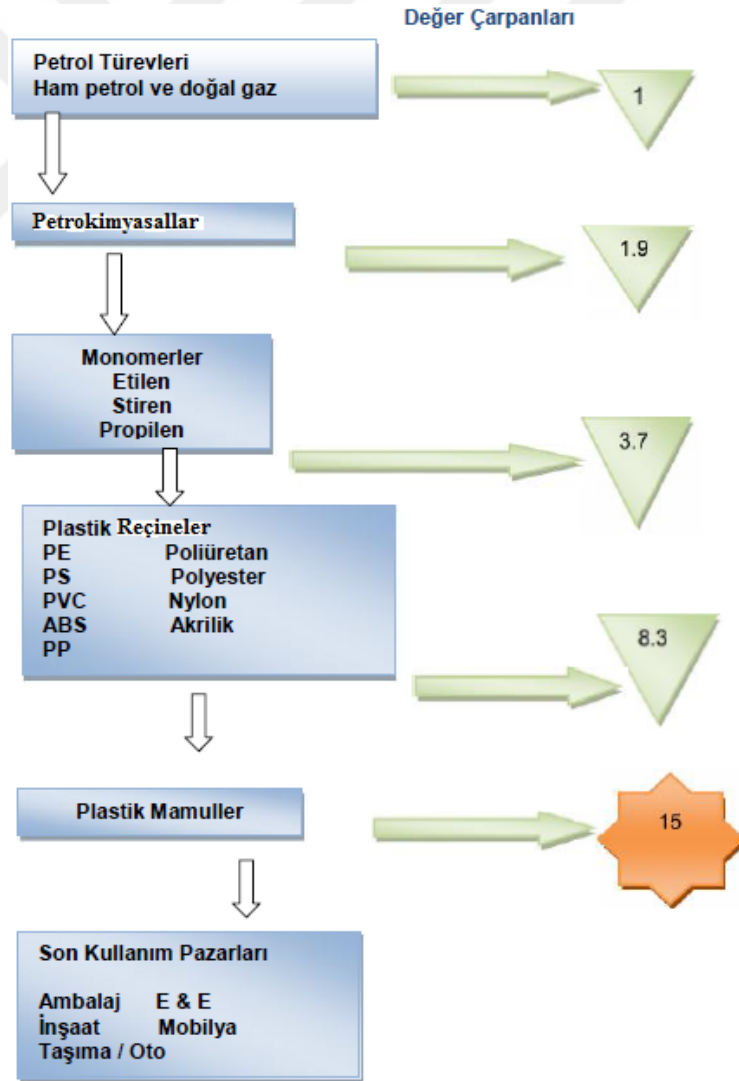
konusu, karayolu ağındaki her yıllık artıştan dolayı giderek önem kazanmaktadır. Fakat bilinçsiz katkı maddesi kullanımı, hem beklenen özelliklerde bir düşüş hem de maliyette artış anlamına gelmektedir. Katkı maddesi, bitümlü bağlayıcı veya BSK'nın özelliğini iyileştirse bile maliyeti artırdığı zaman ekonomik ve uygulama olarak önemli bir etki oluşturmaz. Ülkemizde her geçen yıl karayolu ağındaki artışla, maliyeti yüksek ve ithal olan bitümlü bağlayıcı kullanımı da artmaktadır. Bu artışa bir de maliyeti artıran katkı maddesi eklenirse, pek uygulanabilir olmayacaktır. Türkiye'de son 5 yılda yapılan asfalt uygulamaları ve bitüm tüketimi çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Türkiye'de son 5 yılda yapılan asfalt uygulamaları ve bitüm tüketimi (URL 3)

	Yıl	Bitümlü sıcak karışım (milyon ton)	Sathi kaplama (km ²)	Soğuk bitümlü karışım (milyon ton)	Bitüm tüketimi (milyon ton)
Karayolları	2013	24.4	158.0	0.450	1.560
	2014	17.6	154.0	0.385	1.322
	2015	17.5	140.9	0.260	1.330
	2016	24.5	173.7	0.117	1.755
	2017	22.5	151	0.045	2.208
Şehiriçi Yollar	2013	21.1	7.2	0.040	0.930
	2014	12.5	2.7	0.147	0.749
	2015	19.1	73.2	0.099	1.051
	2016	14.7	68.7	0.212	0.949
	2017	22.1	71.1	0.612	1.155
Köy yolları	2013	0.71	51.1	0.560	0.330
	2014	0.82	47.1	0.406	0.318
	2015	1.3	55.1	0.424	0.345
	2016	1.2	64.1	0.215	0.227
	2017	2.3	46.3	0.393	0.257
Toplam	2013	46.2	216.3	1.050	2.820
	2014	30.9	203.8	0.938	2.389
	2015	37.9	269.2	0.783	2.726
	2016	40.4	306.4	0.544	2.931
	2017	46.9	268.4	1.048	3.620

BSK'nın sağlamlığına etki eden birçok faktör vardır fakat BSK performansını, karışım içerisinde kullanılan bitümlü bağlayıcının niteliği çok büyük ölçüde etkiler. BSK'nın davranışı bitümlü bağlayıcının reolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Buradan hareketle tez çalışmada; atık plastiklerin birlikte pirolizinden elde edilen katkılar, önce bitümlü bağlayıcı ile modifiye edilmiş ve katkılarının bağlayıcı üzerindeki etkisi incelenerek kullanılabilirliği belirlenmiştir. Sonra, seçilen katkılarla modifiye edilmiş bağlayıcılarla hazırlanan BSK'ya ilgili deneylerin uygulanması ile BSK performansı incelenmiştir. Bununla birlikte, plastik atıkların kullanılarak değerlendirilmesi ile çevre ve insan sağlığına ve ülke ekonomisine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bir kişi tüm yaşamı boyunca petrokimyasal ürünlere dokunmaktadır. Ağırlıklı olarak kullandığımız; diş fırçaları, sağlık ürünleri, taşıma araçları, gıda ambalajları vb. ürünler günlük kullanımda önemli araçlarımız olmaktadır. Bu nedenle petrokimyasallar, hayatımızda olmazsa olmaz bir yer edinmiştir. Petrokimyasallar, malzeme sanayinin yapı taşı olan kollardan biri olarak, ekonomik büyüme ve gelişmede hayati rol oynamakta ve sentetik polimerlerin birincil kaynağını oluşturmaktadır. Petrolden başlayan yolculuk, imalat sanayi içinde petrokimyasallar, polimer monomerleri, plastik reçineler, plastik mamuller ve nihai uygulama sektörlerine kadar birçok aşamadan geçerek, katma değer zinciri çarpanlarını oluşturmaktadır. Bu anlamda ham petrolün değeri 1 iken son kullanım pazarında bu değer, ortalama 15 kata çıkan katma değerler oluşturmaktadır. Petrolden başlayıp, plastik üretimine kadar olan süreç ve katma değer zinciri şekil 1.1’de gösterilmiştir (Ergün, 2012).



şekil 1.1. Plastik mamul süreci ve katma değer çarpanı (Ergün, 2012)

1.1. Plastiklerin Türlerine ve Sektörlere Göre Dağılımı

Plastikler, özellikle 20. yüzyılın ilk çeyreğinden sonra, çok çeşitli dallarda ve çok çeşitli amaçlarla kullanılan ve kullanım alanı giderek genişlemeye devam eden bir ürün konumundadır. Plastikler; ahşap, kağıt, cam, metal, pamuk, yün, ipek ve kauçuk gibi pek çok doğal ürünün yerini almış ve hemen hemen tüm sektörlerin yan sanayi konumuna gelmiştir. Ayrıca, tıp sektöründe de hızla artan kullanımı nedeniyle, insan hayatının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (URL 4).

Yüksek kaynak verimi, düşük üretim ve geri kazanım maliyeti ve tasarım ve uygulama zenginliği nedeni ile plastik üretimi ve tüketimi tüm Dünya’da 50 yıldır hızlı gelişimini sürdürmektedir (URL 5). Dünya’da 1950 yılında 1 milyon ton olan plastik tüketimi, 1990 yılından sonra çelik tüketimini de geçerek 2010 yılında çelik tüketimini ikiye katlamıştır. 1950–2005 yılları arasında yılda ortalama % 9.5 artan dünya plastik tüketimi, 2005–2010 yılları arasında yılda ortalama % 5.5 büyümüştür (URL 4). İlk yıllarda petrokimya sanayindeki büyüme Batı’da gözlenirken, sanayi 1990’lardan sonra Ortadoğu ve Asya ülkelerine kayma eğilimi göstermeye başlamıştır. 2000’li yıllarda bu eğilim güçlenmiş ve bu ülkeler, Dünya petrokimya pazarının temel sürücü gücü pozisyonuna gelmiştir. Büyük tüketim potansiyeli olan Çin ve Hindistan gibi geniş pazarlarla, Orta Doğu’nun hammadde avantajı; petrokimyasal pazarı akışını bu bölgeye kaydırmıştır (Ergün, 2012).

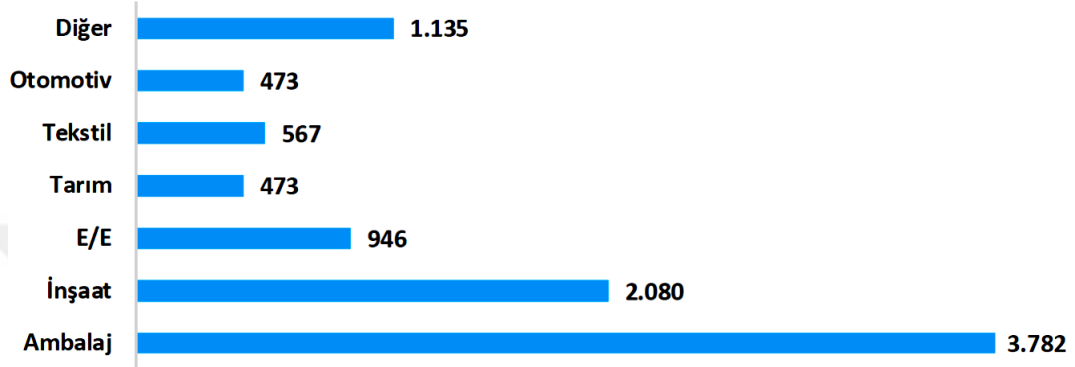
Dünya plastik üretimi ve tüketiminin plastik türleri itibariyle dağılımında; PE (polietilen) ilk ve PP (polipropilen) ikinci sırada yer almaktadır. Çizelge 1.3’de plastik türlerine göre Avrupa ülkelerindeki üretim ve tüketim verilmiştir (URL 6)

Çizelge 1.3. Plastiklerin türlerine göre kullanım oranı (URL 6)

Plastik Türü	Kullanım Oranı (%)
PP (Polipropilen)	19.3
DYPE (Düşük yoğunluklu polietilen)	17.5
YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen)	12.2
PVC (Polivinil klorür)	10.0
PUR (Poliüretan)	7.9
PET (Polietilen tereftalat)	7.7
PS (Polisitren)	6.4
Diğerleri (PC, ABS, PTFE, PBT vb.)	19.0

Plastikler, ekonomiye yön veren tüm önemli sektörlerde (ambalaj, inşaat–yapı, otomotiv, tarım, sağlık ürünleri, tekstil ve tüketici ürünleri vb.) büyüme için kritik rol

oynamaktadır (Ergün, 2012). Türkiye’de 2019 yılında, 9.46 milyon tonluk toplam plastik mamul üretimi; % 40 ambalaj, % 22 inşaat, % 10 elektrik–elektronik, % 6 tekstil, % 5’er otomotiv ve tarım sektörlerince gerçekleştirilmiştir. Diğer sektörlerin payı % 12’dir. Alt sektörler itibariyle 2019 yılı Türkiye plastik üretimi şekil 1.2’de gösterilmiştir (URL 7). 2018 yılına göre Avrupa’daki plastik talebinin sektörlere göre dağılımı da, şekil 1.3’de gösterilmiştir (URL 6).



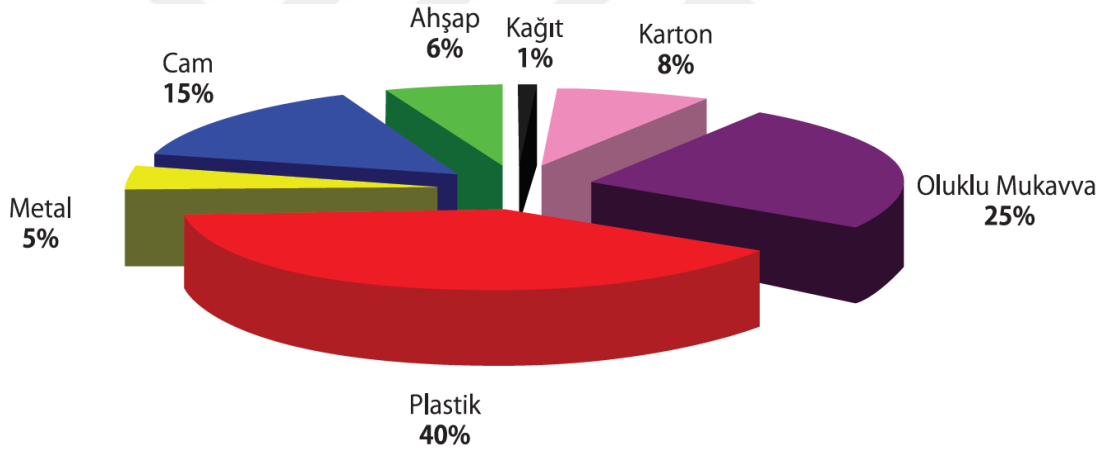
Şekil 1.2. Türkiye’de sektörler itibariyle 2019 yılı plastik mamul üretimi (milyon ton) (URL 7)



Şekil 1.3. 2018 yılı Avrupa plastik talebinin sektörlere göre dağılımı (URL 6)

Dünya ambalaj sanayi çok geniş ve büyük bir endüstri kolu olup, plastik ambalaj sanayi de ülkelerin ekonomileri içinde önemli bir yere sahiptir. Plastik sanayinin hızlı

gelişimine paralel olarak plastik ambalajlar günlük hayatımızın temel bir parçası haline gelmiştir. Bu başarının temel anahtarı, plastiklerin düşük ağırlıkları ve değerli kaynakları en iyi biçimde muhafaza etme kabiliyetlerinden dolayı maliyet tasarrufu sağlamalarından kaynaklanmaktadır. Plastikler yenilikçi teknolojiler sayesinde giderek daha hafif ve çok yönlü bir hale gelmiş, pek çok alanda cam ve kağıt gibi geleneksel ambalajların yerini almıştır. Plastik ambalajlar, 1950’li yıllarda polietilenin piyasaya sürülmesi ile yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Polistiren, polipropilen, Polivinil klorür, polyester ve polietilen kopolimerlerinin geliştirilmesi ile plastik kullanımındaki hızlı artış başlamıştır (URL 8). Dünya’da plastik sektöründeki söz sahibi ülkelerin toplam plastik mamul üretimleri içinde, ambalaj mamulleri % 40–53 arasındaki oranlarda pay almaktadır. Türkiye’de bu oran % 40, Dünya’da ise ortalama % 46 düzeyindedir. Türkiye’de ambalaj sektöründe kullanılan malzemelerin oransal dağılımı şekil 1.4’de gösterilmiştir (URL 9).



Şekil 1.4. Türkiye ambalaj sektörü üretiminin malzemeler bazında dağılımı (%) (URL 9)

Gelişmiş ülkelerde tüm ürünlerin üçte birinden fazlası plastikle ambalajlanmakta ve böylece bu malzemeler, kağıt ve mukavvadan sonra, en büyük pazar payına sahip olmaktadır. Hacim bakımından, bu ambalajların % 55’i esnek, % 45’i serttir. Ancak değer bakımından bu konum tersine dönmektedir. Sert ambalajların Avrupa’daki yıllık tüketim değeri 30 milyar Euro’nun üzerinde, esnek ambalajların değeri ise 10 milyar Euro civarındadır (URL 8). Ekonomik çevreden çok etkilenmeyen gıda, içecek ve ilaç vb. alanların ambalajlarının etkisiyle, ambalaj sektörü yılda % 4’lük kararlı bir büyüme yakalamıştır (Ergün, 2012). Türkiye sert plastik ambalaj sanayi, ülkemizde en hızlı büyüyen ambalaj dalıdır. Yıllık ortalama % 6’lık bir oranda büyüdüğü tahmin edilen sektör, kazandığı katma değer açısından da ambalaj sanayi içerisinde ilk sıralarda yer

almaktadır. Bugün sert plastik ambalajlar, başta gıda olmak üzere, kimya ve sağlık sektörleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Değişik sektörlerde kullanılan sert plastik ambalajlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir: (Arıkan, 2007)

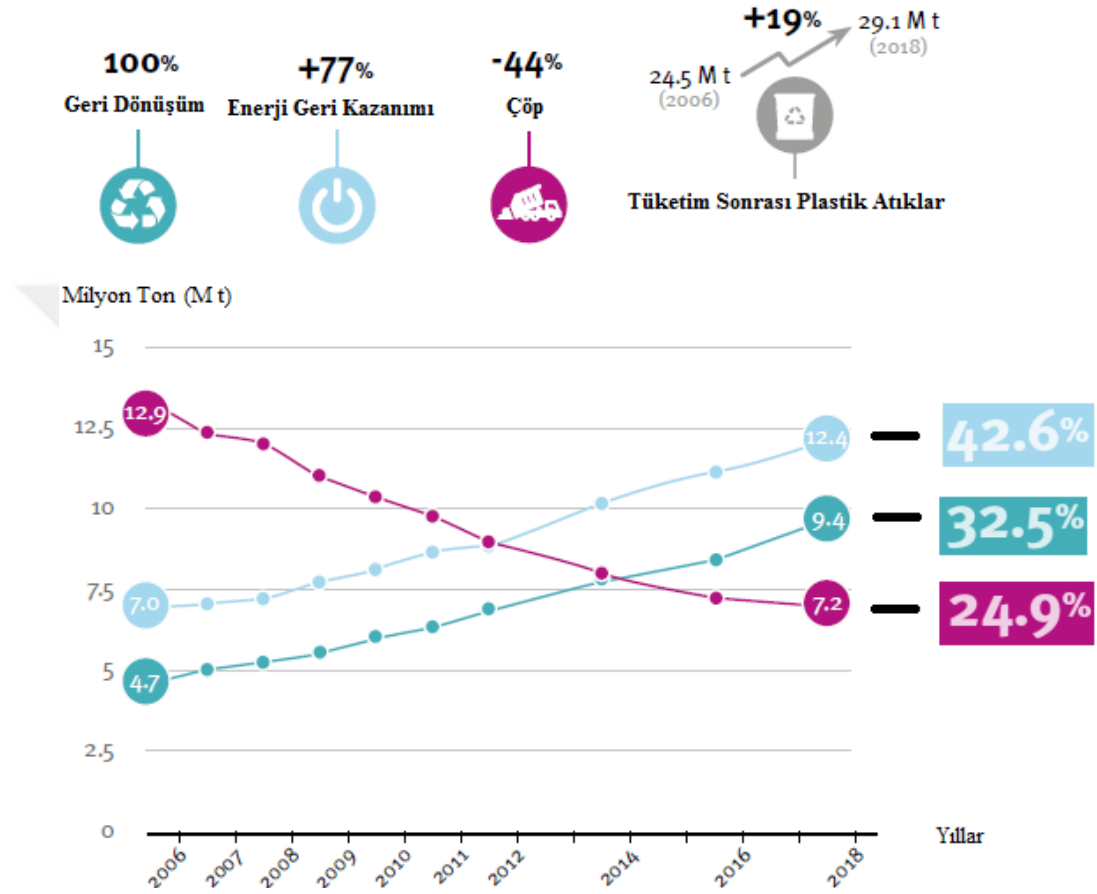
- Gıda ve İçecek Ambalajları
 - Sakız ve şekerleme ürünlerinin ambalajları
 - Katı ve sıvıyağ, süt ve peynir, yoğurt gibi süt ürünlerinin ambalajları
 - Baharat ve benzeri toz gıda ürünleri için ambalajlar
 - Et ve tavuk gibi et ürünlerinin ambalajları
 - Salata, sandviç ve pastane ürünleri vb. hazır gıda ambalajları
 - Meyve–sebze ambalajları
 - Su, maden suyu, meyve suyu, gazlı içecekler gibi içecek ambalajları
- Gıda Dışı Ambalajlar
 - Kozmetik ambalajları
 - Sıvı deterjanlar ve benzeri sıvı temizlik ürünleri için ambalajlar
 - Kimya sanayi ürünlerinin (yapı, deri, otomotiv, tekstil vb.) ambalajları
 - Zirai ilaç ambalajları
 - İlaç ve diğer sağlık ürünlerinin ambalajları

Türkiye’de kişi başına düşen plastik ambalaj miktarı yaklaşık 19 kg/yıl olarak hesaplanabilir. Ancak bu rakamın içerisine sert ve esnek plastik ambalajlar ile büyük torba, çuval vb. taşıma ambalajları da dahil olacağından, bu değer tüketim açısından çok gerçekçi bir rakam olarak kabul edilmeyebilir. Doğrudan sert plastik ambalaj sektörü rakamlarına bakıldığında, ortalama olarak kişi başına 6 kg/yıl civarında bir tüketim olabileceği tahmininde bulunmak oldukça gerçekçidir (Arıkan, 2007).

1.2. Plastiklerde Geri Dönüşüm ve Kazanım

Plastikte talep artış hızı büyük ölçüde Asya ve Doğu Avrupa ülkelerinde görülmektedir. Amerika’nın ve Avrupa’da önde gelen ülkelerin ileriki yıllarda pazar kaybına uğraması beklenmektedir. Avrupa plastik pazarının % 86’sı sadece 7 ülke tarafından bölüşülmektedir. Pazar olarak % 25 ile Almanya birinci, İtalya ve Fransa sırasıyla ikinci ve üçüncü sırayı almaktadır. Plastik sektörü; Avrupa Birliği’nde (AB) 15, Dünya’da 60 milyon kişiye istihdam sağlarken, AB’de yılda ortalama 160 milyon Euro katma değer oluşturmaktadır. Dünya’da ise bu değer yıl ortalama 700 milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir (URL 4).

Plastik malzemeler, 150 yıldır yenilikler için anahtar olmuş ve toplumun gelişim ve kalkınma sürecine katkıda bulunmuştur. Fakat Dünya petrol üretiminin sadece % 4–6’lık kısmı plastik üretimi için kullanılmaktadır (URL 10). Dolayısıyla, plastiklerin yaygın kullanımı ve kısıtlı kaynaklar sebebiyle plastik atıkların geri dönüşümü önemli bir boyut kazanmaktadır.



Şekil 1.5. 2006–2018 yılları arasında Avrupa’daki plastik atık süreçlerinin durumu (URL 6)

2006 yılından bu yana, AB’de geri dönüşüme gönderilen plastik atık miktarı iki katına (% 100) çıkmış, enerji geri kazanımı % 77 ve tüketim sonrası plastik atıklar % 19 artmış ve çöp % 44 azalmıştır. Plastik atık miktarı artsa da, yıllara göre plastik geri dönüşüm ve enerji kazanımı artmış ve çöp miktarı azalmıştır. Şekil 1.5’de görüldüğü gibi; 2006 yılında 24.5 milyon ton olan toplam atık plastiğin 12.9 milyon tonu çöp olarak kalırken, 2018 yılında bu değerler sırasıyla 29.1 milyon ton ve 7.2 milyon ton olmuştur. Geri dönüşüm veya enerji kazanımı ile plastik kazanım döngüsü yıllara göre arttığı ve plastik çöp miktarı azaldığı halde, 2018’de tüketici sonrası plastik atıkların yaklaşık % 25’i hala düzenli depolama alanına gönderilememiş ve çöp olarak doğada kalmıştır. 2018 yılında, Avrupa’da tüketim sonrası 29.1 milyon ton civarında plastik

atık değerinin % 32.5'lik kısmı geri dönüşüm ve % 42.6'lık kısmı da enerji geri kazanımı yoluyla olmak üzere, % 75.1'lik kısmı kurtarılabilmektedir (URL 6).

Plastik ürünlerin yaşam döngüsünü anlamak için, tüm plastik ürünlerin aynı olmadığını ve hepsinin aynı hizmet ömrüne sahip olmadığını anlamak önemlidir. Bazıları kendi içinde bir üründür (örneğin; bir şişe gibi) ve bazıları da bir son kullanıcı ürününün parçalarıdır (örneğin; bir otomobilin veya elektronik cihazların parçaları, bir binanın yalıtımı vb.). Kullanım ömürlerinin sonunda, son kullanıcı üründen toplanan ve işlenen plastikler atık haline gelir. Bazı plastik ürünlerin ömrü bir yıldan az, bazılarının 15 yıldan fazla ve bazılarının ömrü 50 yıl veya daha fazladır. Bu nedenle, üretimden atığa, farklı plastik ürünler değer zincirlerinde farklı kullanımlar gösterir (URL 6). Geri dönüşüm, plastik atıklar için tercih edilen en sürdürülebilir seçenektir fakat geri dönüşüm artık sürdürülebilir bir seçenek olmadığında, enerji geri kazanımı da bir alternatiftir. Her iki seçenek de birbirini tamamlamakta ve plastik atıkların tam olarak kullanım potansiyelini gerçekleştirmeye yardımcı olmaktadır (URL 10).

Çizelge 1.4. Ambalaj atıklarının geri kazanımıyla ilgili yönetmelik kriterleri (URL 11)

Yıllar	Malzemeye göre yıllık geri kazanım hedefleri (%)				
	Cam	Plastik	Metal	Kâğıt/Karton	Ahşap
2005	32	32	30	20	-
2006	33	35	33	30	-
2007	35	35	35	35	-
2008	35	35	35	35	-
2009	36	36	36	36	-
2010	37	37	37	37	-
2011	38	38	38	38	-
2012	40	40	40	40	-
2013	42	42	42	42	5
2014	44	44	44	44	5
2015	48	48	48	48	5
2016	52	52	52	52	7
2017	54	54	54	54	9
2018	54	54	54	54	11
2019	54	54	54	54	13
2020 ve sonrası	60	55	55	60	15

Türkiye'deki duruma bakıldığında; 2017 yılının sonlarında yayımlanan “ambalaj atıklarının kontrolü yönetmeliğinde” ambalaj atıklarının geri kazanımı ile ilgili olarak, Madde 19'da geri kazanım hedefi belirlenmiştir. Madde 19'da, “Yetkilendirilmiş kuruluş/piyasaya sürenler, 2005 yılından 2018 yılına kadar ambalaj atıklarının en az aşağıda belirtildiği oranlarda geri kazanım hedeflerini sağlamakla yükümlüdürler.” ibaresi vardır. Bu geri kazanım hedefleri çizelge 1.4'de verilmiştir (URL 11).

1.3. Genel Hususlar

Plastiklerden farklı yollarla elde edilen geri kazanımın toplamı, AB ülkelerinde daha önceki yıllarda düşük oranlarda olduğu halde son yıllarda % 75 seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 1.5). Fakat AB ülkeleri arasında bu oran değişkenlik göstermektedir. Genellikle, atık depolama yasağına sahip ülkeler daha yüksek kazanım oranına sahiptir (URL 6). Türkiye’de ise, plastik atıkların geri kazanımıyla ilgili olarak yönetmelik kapsamında hedeflenen oranlar yıllara göre artmakla birlikte daha % 55’ler mertebesinde (Çizelge 1.4). Dolayısıyla tüketilen plastik atıkların üçte biri veya yarıya yakınının geri kazanılmadan doğada atık olarak kaldığı tahmininde bulunmak oldukça gerçekçidir.

Plastiklerin en yaygın olarak kullanıldığı sektör, hem Türkiye hem de Dünya değerlendirmesinde ambalaj sektörüdür. Tüm plastik sektörü içinde ambalaj sektörünün payı % 40’lar düzeyindedir. Bazı ülkelerde değişkenlik gösterse de ambalaj sektörünü, % 20–25’ler düzeyindeki payla inşaat ve % 8–9’lar düzeyindeki payla otomotiv sektörü takip etmektedir (Şekil 1.2 ve 1.3). Ayrıca; ambalaj sektöründe kullanılan malzemeler bakımından, sektörün kendi içinde de plastik kullanımı yaygındır (Şekil 1.4).

Ambalaj sektörü plastiklerin, diğer (elektrik–elektronik, otomotiv, inşaat vb.) sektör plastiklerine göre daha kısa süreli kullanım ömrüne sahip olduğu söylenebilir. Bu yüzden, özellikle ambalaj sektöründeki plastiklerin tüketici sonrası oluşturduğu atık potansiyeli daha fazladır. Bu nedenle; ev, işyeri, çevre vb. hayatın birçok alanında kullanılarak atılmış pek çok şişe, kap, kova, bardak, bidon, kasa vb. sert plastik ambalaj atıklarını; poşet, naylon vb. esnek plastik ambalaj atıklarını görmek mümkündür.

Plastikler, kendilerine özgü özelliklerinden faydalı bir şekilde yararlanılabilecek alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin: PVC, yapı ve inşaatteki tüm uygulama alanlarında en fazla kullanılan plastik; PP de otomotiv sektörü içerisinde en yaygın kullanılan plastiktir (URL 6). Tüm plastik sektörü açısından genel olarak bakıldığında ise; PP en yaygın kullanılan plastik türüdür (Çizelge 1.3).

Plastiklerin tüm uygulama alanları arasında % 20–25 bir hacme sahip olan yapı ve inşaat, ambalaj uygulamalarından sonra en önemli ikinci alandır. İnşaat alanında tüm plastik uygulamalarının ortalama çalışma ömrü 35 yıl olsa da, uygulamanın özelliğine göre, bu ömür farklılık göstermektedir. Bunlar sadece ihtiyatlı varsayımlardır; zira bu malzemelerin çalışma ömürlerinin teknik olarak tanımlı sonu konusunda pratik ve uzun vadeli bir deneyim halen mevcut değildir. Dolayısıyla plastik yapı ürünlerinde, tüketim

sonrası olarak atık kıtlığı oluşmaktadır. Böylelikle bu ürünlerin geri kazanımı hakkında deneyimler de azdır. Ayrıca geri kazanım söz konusu olduğunda, binalarda kullanılan pek çok plastiğin ilk maliyetinin düşük olması yüzünden geri kazanılmış malzemelerin rekabetçi bir fiyatla piyasaya sürülmesi de çok zor olmaktadır (URL 12).

Ambalaj sanayinde ise, kullanılan plastik hammaddelerin büyük bir kısmını PE ve PP gibi “çokça kullanılan ticari polimerler” adı verilen plastikler oluşturmaktadır. Sert plastik ambalaj sektörü de, genellikle YYPE ile PET’in egemenliği altındadır. Pek çok alanda, PET pazarı hızla büyümektedir. PP ambalajlarda da beklenenden hızlı bir gelişme söz konusudur (Arıkan, 2007).

Tüm bu hususlardan yola çıkarak; plastiklerin en yaygın kullanıldığı ve atık olma potansiyeli en yüksek sektör olan ambalaj sektörü ele alınmış, ambalaj sektöründe de en hızlı büyüyen sert plastik ambalaj sektörü dikkate alınmıştır. Hem bu sektörde hem de genel olarak yaygın kullanım ve atık olma potansiyeline sahip olan PP, YYPE ve PET plastikleri tez çalışması için seçilmiştir.

Tez çalışması için seçilen YYPE, PP ve PET plastiklerinin bitüm ve BSK içinde kullanımı ile ilgili yapılan bazı araştırma çalışmaları, belli bir yıl dizininde ve her biri farklı bir başlık altında tez çalışmasının ikinci bölümünde sunulmuştur. Genel olarak; bitüm ve BSK’nın mühendislik özelliklerinin, bu katkılarla geliştiği yapılan çalışmalarla görülmüştür. Bu plastiklerin farklı kimyasal süreçlere sokularak katkıların elde edildiği veya farklı malzemelerle (lastik, kauçuk, SBS, EVA vb.) kombine olarak kullanıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Katkı üretimi konusunda kimyasal süreçlerden biri olan pirolizle ilgili olarak birkaç çalışma tespit edilmiştir. Al-Hadidy (2006) PP, Al-Hadidy ve Yi-qiu (2009) DYPE (düşük yoğunluklu polietilen) piroliz katkısını kullanmışlardır.

Ancak, bitüm ve BSK içerisinde plastiklerin birlikte (kombine) kullanıldığı ve birlikte piroliz edilerek elde edilen katkıların kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır.

Çalışmasının üçüncü bölümünün birinci kısmında; çalışma kapsamında kullanılan malzemeler (PP, YYPE ve PET atıkları, bitüm, agrega ve BSK) hakkında detaylı teorik ve teknik bilgiler tanımlanmıştır. İkinci kısmında ise, yapılan tez çalışmasının yöntemi ve deneysel süreçleri hakkında gerekli hususlar belirtilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde; yapılan tüm deneysel çalışmaların bulguları ortaya konmuş ve sonuçlar detaylı olarak ele alınmıştır.

Beşinci bölümde de; deneysel çalışmalarla elde edilen bulgular genel olarak değerlendirilmiş ve çalışmanın ulaştığı çıktılar sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yıllarda, insan başına düşen araç sayısı ile trafik hızı ve yükü önemli ölçüde artmıştır. Bu ani ve bir şekilde plansız aşırı yüklenme; bakım maliyetini ve kullanıcılar için riskleri artırmış, kaplamaların ömrünü önemli ölçüde kısaltmıştır. Yol ağlarının bozulmasını sınırlamak için, bitümlü bağlayıcıya polimer ilave ederek kaplamaların kalitesini ve performansını artırmak gerekir. Polimer modifiye asfaltlar (PMA) yirminci yüzyılın ikinci yarısında önem kazanmıştır ve şimdi asfalt kaplama alanında temel bir rol oynamaktadır. Yüksek sıcaklık ve yüksek kesmeli karıştırma ile polimer; bitüm molekülleriyle birleşir, tüm bağlayıcıyı içeren yutulmuş bir ağ oluşturur ve modifiye edilmemiş bağlayıcıya kıyasla viskoelastik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlar (Polacco ve ark., 2015). PMA karışımıyla ilgili birçok araştırma yapılmıştır. PMA'nın, kaplamanın belirli özelliklerini iyileştirmesi açısından bir avantaj sağladığı yapılan araştırmalarla görülmüştür. Belirli polimerlerin, optimum koşullarda bitüm ile yeterince harmanlandığında kaplamanın performansını ve ömrünü büyük ölçüde artıracığı konusunda, araştırmacılar arasında ortak fikir birliği olduğu görülmektedir. Kaplama uygulamalarında geniş bir sıcaklık aralığında asfalt özelliklerini arttırmak amacıyla asfalta işlenmemiş polimerlerin eklenmesi, belli bir süre düşünülmüş olsa da, kaplama performansının iyileştirilmesinde işlenmemiş polimerlere kıyasla, asfalta eklenen geri dönüştürülmüş polimerler neredeyse aynı sonucu göstermiştir. Ekonomik açıdan, yol yapımında ve kaplamada atık malzeme kullanımı farklı şekillerde faydalıdır. Daha az kaplama kalınlığının yanı sıra, kaplama performansın artırılmasıyla da faydalı olabilir. Atık polimerlerin çoğu tehlikeli olabilir ve etkili bir şekilde geri dönüştürülmez veya yeniden kullanılmazsa çevresel yük olarak görülebilir. Atık polimerleri kaplamaya dahil ederek; sadece kaplama performansının iyileştirilmesi ve çevre kirliliğinin azaltılması değil, aynı zamanda işlenmemiş polimerlerin kaplamada kullanılma ihtiyacının azalması ile uzun vadede olası maliyet tasarrufları da elde edilecektir (Kalantar ve ark., 2012).

Bitüm modifikasyonunda kullanılan bazı popüler plastomerler ve termoplastik elastomerler: polietilen (PE), polipropilen (PP), etilen–vinil asetat (EVA), etilen–bütül akrilat (EBA), stiren–bütadien–stiren (SBS), stiren–izopren–stiren (SIS) ve stiren–etilen/butilen–stiren (SEBS)'dir. Bu polimerlerin tümü belli bir dereceye kadar bitümün özelliklerini geliştirse de; yüksek maliyet, düşük yaşlanma direnci ve polimer modifiye bitümün (PMB) zayıf depolama stabilitesi gibi gelecekte PMB'nin gelişimini sınırlayan bazı dezavantajlar vardır. Araştırmacılar bu dezavantajları ortadan kaldırmak için çeşitli

yollar denemiştir fakat beklenen PMB özelliklerinin tümünü aynı anda mükemmel bir şekilde elde etmek de zordur. Popüler polimerlerin kullanımıyla oluşan bazı avantaj ve dezavantajlar, çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Zhu ve ark., 2014).

Çizelge 2.1. Bitüm modifikasyonunda kullanılan popüler polimerler (Zhu ve ark., 2014)

Kategori	Polimerler	Avantajlar	Dezavantajlar
Plastomer	PE	İyi yüksek sıcaklık özellikleri	Elastikiyette sınırlı gelişme
	PP	Nispeten düşük maliyet	Faz ayrımı problemleri
	EVA	Nispeten iyi depolama kararlılığı	Elastik geri dönmeye sınırlı gelişme
	EBA	Tekerlek izine karşı yüksek direnç	Düşük sıcaklık özelliklerinde sınırlı artış
Termo plastik Elastomer	SBS	Artan sertlik	Bazı bitümlerde uyumluluk problemleri
	SIS	Düşük sıcaklık hassasiyeti, gelişmiş elastikiyet	Isıya, oksidasyona ve ultraviyoleye karşı düşük direnç, nispeten yüksek maliyet
	SEBS	Isıya, oksidasyona ve ultraviyoleye karşı yüksek direnç	Depolama kararsızlığı sorunları, nispeten azalan elastikiyet, yüksek maliyet

2.1. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları

Ait-Kadi ve ark. (1996) yaptıkları çalışmada; hem YYPE’yi hem de YYPE ile etilen-propilen-dien-monomer (EPDM) karışımını saf asfalt bağlayıcıya ilave ederek modifiye etmişlerdir. Asfalt bağlayıcıya eklenecek polimerin özel olan son kullanım uygulamaları için uyarlanma olasılığını göstermek üzere, karışım (YYPE/EPDM) oranı 90/10’a sabitlenmiştir. İnce film fırın testi (TFOT) ile yaşlandırma öncesi ve sonrasında, ağırlıkça % 1–5 arasındaki oranlarda polimer katkılı ve saf bitümlerin lineer visko-elastik özellikleri incelenmiştir. Tüm numunelere yumuşama noktası, frass kırılma noktası ve TFOT gibi standart testler uygulanmış ve % 1 YYPE/EPDM numuneleri için iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, istenen özelliklerin elde edilmesi için optimum tasarımın gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

Hınıslıoğlu ve Ağar (2004) yaptıkları çalışmada; YYPE içeren çeşitli plastik atıkların, asfalt betonunda polimer katkısı olarak kullanılma ihtimalini incelemişlerdir. YYPE içeriklerinin Marshall stabilite, akma ve Marshall oranı (MQ) üzerindeki etkileri ile modifikasyonda farklı karıştırma zamanları ve sıcaklıklarının etkileri araştırılmıştır. BSK (bitümlü sıcak karışım)’da kullanılan bağlayıcı, YYPE ile % 4, 6 ve 8 oranlarında karıştırılarak; 145, 155 ve 165 °C sıcaklık ve 5, 15, 30 dakika karıştırma sürelerinde katkılı bitümler hazırlanmıştır. YYPE katkılı asfalt betonunda Marshall stabilite ve MQ değerlerinde önemli derecede artış görülmüştür. % 4 YYPE, 165 °C karıştırma sıcaklığı ve 30 dakika karıştırma zamanı; Marshall stabilite, akma ve MQ için optimum şartlar olarak belirlenmiştir. Yüksek stabilite ve MQ değerlerinden dolayı kalıcı deformasyona

karşı, atık YYPE katkıli bağlayıcıların daha iyi direnç gösterdiği ve bu şekilde plastik atıkların geri dönüşümü sağlandığı gibi çevrenin korunmasına da katkıda bulunduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Yousefi (2004) yaptığı çalışmada; bitümün özellikleri üzerinde DYPE (düşük yoğunluklu polietilen), YYPE gibi farklı polietilen ve kauçuk (polibutadien kauçuk (PBK), stiren bütadien random kopolimer (SBR), doğal kauçuk ve stiren etilen butilen stiren blok kopolimeri (SEBS)) karışımlarının etkisini araştırmıştır. Lineer DYPE, diğer PE'lere kıyasla bitüm özellikleri üzerinde daha yüksek bir etkinlik ve SBR karışımları daha iyi elastik geri kazanım ve ince tabaka oluşturma özellikleri göstermiştir. SBR-PE karışımları bitüm özellikleri üzerinde en etkili karışımlar olarak bulunmuştur.

Hınışlıoğlu ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada; Marshall tasarım parametreleri ve sünme davranışını kullanarak, asfalt betonunun kalıcı deformasyonu üzerinde bitüm modifiye edicisi olarak YYPE'nin etkisini araştırmışlardır. Sıkıştırılmış karışımın özgül ağırlığı, karışımın hava boşluğu, mineral agregalar arasındaki boşluk ve bitümle dolu boşluk yüzdeleri, Marshall stabilite ve akma, MQ, eksenel gerilme ve sertlik modülü parametreleri değerlendirilmiş ve penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite gibi bitümün bazı fiziksel özellikleri üzerinde YYPE etkisi araştırılmıştır. Yüksek kesmeli bir karıştırıcı kullanarak; ağırlıkça % 1-4 YYPE, 185 °C'de 60 dakika süresince bitümle karıştırılmıştır. Katkıli bitümle Marshall numuneleri hazırlanmıştır. % 3 YYPE ilavesi ile MQ değerinde % 57 artışa ulaşılmış; % 2 YYPE ilavesiyle, kalıcı deformasyonda % 34 azalma ve sünme sertliğinde ise % 52 artış gözlenmiştir. Yüksek stabilite ve sertlik, düşük akma nedeniyle, YYPE katkıli bitüm ile kalıcı deformasyona karşı iyi bir direnç sağlandığı sonucuna ulaşılmış ve YYPE katkıli bitümün sıcak iklimli bölgelerde kalıcı deformasyonu azaltmada çok faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Awwad ve Shbeeb (2007) yaptıkları çalışmada; asfalt karışım özelliklerini geliştirme potansiyelini araştırmak için, bir çeşit polimer olarak polietilen kullanmışlar ve kullanılacak en iyi polietilen tipinin ve oranının belirlenmesini de hedeflemişlerdir. İki tip polietilen (DYPE ve YYPE) agregaya ilave edilmiş ve polimerler karışıma iki halde (öğütülmüş ve öğütülmemiş) sokulmuştur. Optimum bitüm içeriğini belirlemek ve sonra da modifiye edilmiş karışım özelliklerini test etmek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Toplamda 105 numune hazırlanmıştır (bitüm içeriğini belirlemek için 21 numune kullanılmış ve asfalt karışımların modifiye edilmesinin etkisini araştırmak için, kalan numuneler kullanılmıştır). Optimum asfalt içeriği % 5.4 olarak bulunmuştur. Test edilecek her bir tür için, optimum bitüm içeriği ağırlığına göre yedi polietilen oranı (%)

6, 8, 10, 12, 14, 16 ve 18) seçilmiştir. Testler hacim özgül ağırlık, stabilite ve akma belirlenmesini içermiştir. Öğütülmüş YYPE katkısının daha iyi mühendislik özellikleri sağladığı görülmüş ve katkının önerilen oranı, % 12 olarak belirlenmiştir. Ayrıca; özgül ağırlıkların azaldığı, stabilitelerin arttığı ve hava ile mineral agrega boşluklarının hafifçe arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2009) yaptıkları çalışmada; asfalt kaplama malzemesi için, modifiye edici olarak DYPE pirolizinin potansiyel kullanımını araştırmışlardır. Saf bitüm içeren beş farklı bitüm, reolojik testler gibi bağlayıcı testlerine ve ayrıca sistemin homojenliği ile ilgili diğer bazı testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca, taş mastik asfalt (TMA) karışımların nem hassasiyeti ve düşük sıcaklık performansı üzerinde katkının etkisi incelenmiştir. Modifiye bağlayıcıların duktilite değerlerinin minimum şartname aralığında kaldığı, ısı ve hava nedeniyle ağırlık kaybında yüzde olarak azalmanın olduğu ve daha yüksek yumuşama noktası değerlerinin elde edildiği sonuçlarına ulaşılmış ve böylelikle orijinal bağlayıcının dayanıklılığının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, TMA karışımlarına DYPE dahil edilmesi sonucu, yüksek ve düşük sıcaklık performans gereksiniminin karşılanabileceği görülmüştür.

Attaelmanan ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; asfalt kaplama malzemesi için bir modifiye edici olarak YYPE kullanılmasının uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bitüm ağırlığına göre farklı YYPE oranları, 80/100 sınıfı bitümle harmanlanmıştır. Saf ve modifiye edilmiş asfalt bağlayıcılar fizikokimyasal ve homojenlik testlerine tabi tutulmuştur. Marshall stabilitesi, MQ, çekme mukavemeti ve oranı, eğilme mukavemeti ve esneklik modülü dahil olmak üzere performans testleri, saf ve modifiye edilmiş BSK üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının analizi, YYPE ile modifiye edilmiş asfalt karışımların performansının geleneksel karışımlardan daha iyi olduğunu göstermiştir. YYPE'nin asfalt karışımına dahil edilmesiyle, nem ve sıcaklık duyarlılığının azaldığı görülmüş ve BSK'nın performansının iyileştirilmesinde ağırlıkça % 5'lik YYPE içeriği önerilmiştir.

Jain ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; kaplama performansını arttırmak ve çevreyi korumak için atık polimerik ambalaj malzemesini asfalt karışımına katmışlar ve karışımın sertlik modülünü incelemişlerdir. Bitüm ve asfalt karışımının modifikasyonu için, YYPE olan iki tip katkının optimum dozu araştırılmıştır. Optimum doz, karışım ağırlığınca % 0.3–0.4 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek doz kullanılması ile, BSK'nın istenmeyen şekilde daha yüksek sertliğe ulaştığı ve BSK içine optimum miktarda katkı eklenerek, 20,000 devir sonrasında 16.2 mm değer 3.6 mm'ye düştüğü görülmüştür.

Silva ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; asfalt karışımlarına polietilen esaslı atıkları dahil etmenin olası avantajlarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. YYPE, bitüm modifiye edici olarak kullanılırken, çapraz bağlı polietilen (PEX) agregaya katılmıştır. YYPE kullanımının asfalt bağlayıcı/karışımının davranışını önemli ölçüde geliştirdiği gözlenmiştir. Karışımların yoğunluğu PEX kullanımı ile önemli ölçüde azaldığından, kaplamayı hafifletmek için PEX kullanımının çekici olabileceği düşünülmüştür. PEX'li karışımların, su hassasiyeti açısından saf bitümlü karışımla benzer performansa sahip olduğu fakat saf bitümlü karışıma göre kalıcı deformasyon direncinin arttığı ve sıcaklık duyarlılığının azaldığı tespit edilmiştir. Atık polimerleri içeren karışımların, kaplamalar için, iyi bir teknik ve çevresel alternatif olarak düşünülebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Costa ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada; YYPE, DYPE, etilen–vinil–asetat (EVA), akrilonitril–bütadien–stiren (ABS) ve lastik kırıntısı (LK) ile bitümün modifiye edilmesinin olası avantajlarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Geri dönüştürülmüş polimerlerle modifiye edilmiş bağlayıcıların performansı, saf bitümle ve ticari olarak kullanılan modifiye bitümlerden birisiyle (Styrelf) karşılaştırılmıştır. Davranışı optimize etmek için bitüm modifikasyonunda kullanılması gereken en iyi atık malzemelerinin ve üretim koşullarının seçiminde, laboratuvar testlerinin sonuçları (dinamik viskozite, temel özellikler, esneklik ve depolama stabilitesi) kullanılmıştır. Plastik atıkların daha çevresel ve ekonomik şekilde yeniden kullanılmasının teşvik edilmesi amaçlanmıştır.

Nejad ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada; asfalt karışımların nem hasarı üzerine YYPE ve DYPE'nin etkilerini değerlendirmiştir. Granit ve kireçtaşı olmak üzere iki tip agrega değerlendirilmiştir. BSK'nın nem hasarı üzerindeki PE etkisini değerlendirmek için, kontrol karışımları (PE olmadan) ve PE içeren karışımlar kuru ve ıslak koşullarda dolaylı çekme mukavemeti (ITS) ve dolaylı çekme sertlik modülü (ITSM) testlerine tabi tutulmuştur. Kireç taşı içeren karışımlar için ITS ve ITSM'nin ıslak/kuru değerlerinin oranının, granit içerenlerden daha yüksek olduğunu sonuçlar göstermiştir. Laboratuvar testlerinin sonuçları, PE'nin asfalt bağlayıcının agrega üzerindeki ıslanabilirliğini ve asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyonu, özellikle de nem hasarına eğilimli asidik (granit) agrega içeren karışımlarda, artırdığını göstermiştir. Çalışmada kullanılan her iki agrega için de, YYPE'li karışımlarda nem hasarına karşı daha iyi direnç görülmüştür.

Vargas ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada; bitüm modifiye edicileri olarak çeşitli polietilenler üzerinde analiz yapmışlardır. Bitümün yumuşama noktasının arttığı ve penetrasyon derecesinin azaldığı sonuçlar ile görülmüştür. Floresan mikroskopundan görülen faz dağılımları, polietilenlerin bitüm ile kolayca karışamayacağını göstermiştir.

Bitümlerin tekerlek izi davranışını tahmin etmede uygunluğunu belirlemek için, literatürde bulunan farklı modeller kullanılarak, sıfır kesme viskozitesi hesaplanmıştır.

Ahmedzade ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; gamma ışınmasına tabi tutulmuş geri dönüştürülmüş YYPE polimerinin (γ -HDPE_R), bitüm için katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini kimyasal ve fiziksel deney yöntemleri ile incelemiştir. HDPE_R, gamma ışınması ile radyasyona tabi tutularak polimer üzerinde yeniden kimyasal bağ oluşturabilecek serbest radikaller meydana getirilmiş, FTIR (fourier dönüşüm kızılötesi spektroskopisi) ile bu değişim gözlenmiştir. Floresan mikroskobu ile bağlayıcıların yüzey görüntülerinin elde edilmesinin ardından, çalışma kapsamındaki bağlayıcılar üzerinde geleneksel testler (dönen ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), DSR (dinamik kesme reometre), BBR (kiriş eğilme reometre), RV (dönel viskozite)) yapılmıştır. Bitümün yüksek sıcaklık performansının, γ -HDPE_R katkısı ile arttığı ve bu sayede γ -HDPE_R katkılı bağlayıcının orijinal bitüme göre daha geniş bir sıcaklık kullanım aralığına sahip olduğu ortaya konmuştur.

Nejad ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; yorulma çatlaması ve tekerlek izi gibi asfalt karışımların performans özellikleri üzerinde, YYPE'nin potansiyel kullanımını araştırmışlardır. YYPE'nin asfalt bağlayıcı katkısı olarak, kaplama davranışı üzerinde etkisini değerlendirmek için; YYPE'siz kontrol karışımları ile kuru ve ıslak koşullarda YYPE içeren karışımlar test edilmiştir. YYPE içeren karışımlarda yorulma ömrünün, kontrol karışımlara göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, YYPE ile modifiye edilmiş karışımlar, daha yüksek sertlikleri nedeniyle tekerlek izi olarak daha iyi direnç sağlamıştır. Sıcaklık ve yorulma zamanı artırıldığında, numunelerin kalıcı deformasyona karşı dirençleri azalmış ve YYPE'li karışımların sıcaklık duyarlılığının daha düşük olduğu görülmüştür. Öte yandan, asfalt bağlayıcı ve agrega arasındaki nem varlığında, YYPE'nin adezyonu arttırdığı laboratuvar test sonuçlarıyla görülmüştür.

Abreu ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; geri kazanılmış asfalt (RA) karışımının mekanik, çevresel ve ekonomik performansını iyileştirmek için, bazı atık malzemelerin üretime katılımının arttırılmasını amaçlamışlardır. % 50 RA ile geri dönüştürülmüş karışımlar analiz edilmiştir: RA seçimi, hazırlanması ve özellikleri; kullanılmış motor yağı (UMO) ve atık YYPE gibi bağlayıcı katkı maddesi olarak atık malzemelerin dahil edilmesi; farklı karışımların üretimi (katkı maddesi olmadan; UMO ile; UMO ve YYPE ile) ve karışımların avantajlarını değerlendirmek için performanslarının karşılaştırılması süreçleri uygulanmıştır. % 50 RA içeren asfalt karışımları için % 7.5'a kadar UMO ve % 4.0 YYPE kullanıldığında; 0.02 mm/10³ döngü ile tekerlek izi derinliği, % 81.9 ile su

hassasiyeti oranı ve oldukça iyi yorulma direnci gibi mükemmel özelliklere sahip karışımların elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Nejad ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; düşük molekül ağırlıklı YYPE'yi kullanmışlar ve depolama stabilitesi konusunu ele alarak, YYPE ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi potansiyelini ölçmüşlerdir. YYPE katkılı bitümlerin depolama stabilitesine daha iyi katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bitüme ağırlıkça % 7 YYPE ilave edilmesiyle; kompleks kayma modülünün önemli ölçüde arttığını, farklı tekerlek izi parametrelerinden elde edilen sonuçlar göstermiştir.

Amin ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; saf bitümün performans derecesini artırmak için, belediye atıklarının farklı yüzdelere (plastik ve lastik kırıntısı) bitüm katkı maddeleri olarak kullanmışlardır. Düşük, orta ve yüksek sıcaklıklarda bitümlerin performansını değerlendirmişlerdir. Ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 YYPE, DYPE ve LK (lastik kırıntısı) saf bitümle (PG 64–10) karıştırılmıştır. Saf ve modifiye bitümlerin tekerlek izini, düşük sıcaklık davranışını, yorulmasını ve viskozitesini değerlendirmek için DSR, RV ve BBR deneyleri yapılmıştır. Bitümün visko-elastik özelliklerindeki iyileşme nedeniyle, katkılı bitümlerde kalıcı deformasyon, yorulma direnci ve reolojik özelliklerin önemli ölçüde iyileştiği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Arabani ve Pedram (2016) yaptıkları çalışmada; cam katkılı asfalt karışımların dinamik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerindeki YYPE etkisini incelemişler ve YYPE içeren asfalt karışımlarda tekerlek izi ve yorulma olayları üzerine laboratuvar çalışması yapmışlardır. Örnekler üzerinde tekrarlanan eksenel yük, ITS ve sertlik modülü testleri yapılmıştır. Örneklerin esneklik modülü, sünme ve yorulma direnci gibi özelliklerinin arttığı, deney sonuçlarıyla görülmüştür.

Gama ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; elastomerik polimer (EMA–GMA), YYPE ve polifosforik asit (PPA) kullanarak, elastomerik modifiye bitüm karışımlarını geliştirmişlerdir. Kompleks kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve çoklu gerilme sünmesi ve geri kazanımı (MSCR) testleriyle, katkılı bitümlerin reolojik özelliklerini analiz etmişlerdir. Modifiye bitümlerde elastik davranışın arttığını ve uygulama için üretilen malzeme özelliklerinin uygun olduğunu, penetrasyon, yumuşama noktası ve MSCR test sonuçları göstermiştir. Polimer ilavesiyle, kalıcı deformasyona direnç için asfaltta sıcaklık aralığının artırabildiği reolojik test sonuçlarına dayanarak gözlenmiştir.

Ge ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; atık lastik (WTR) ve geri dönüştürülmüş polietilen (RPE) ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının modifikasyon mekanizmasını, kapsamlı bir laboratuvar programı ile incelemişlerdir. Saf bitüm kütlesinin % 5 ve 10'u

kadar WTR ve % 2 ve 4'ü kadar RPE, sırasıyla saf bitüm ile karıştırılmış ve modifiye bitümler hazırlanmıştır. Modifikasyon mekanizmasını anlamak için; FTIR, floresan mikroskobu, DSC (diferansiyel tarama kalorimetrisi) ve termogravimetrik morfolojik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklar altında reolojik özellikleri incelemek için; geleneksel testler, DSR ve BBR yapılmıştır. WTR ve RPE ilave edildikten sonra, bitümün deformasyon direnci, yüksek sıcaklık stabilitesi ve esnekliğinin geliştirildiği bulunmuştur. Yumuşama noktası ve kompleks kayma modülünün artması, penetrasyon ve faz açısının azalması sonucu olarak deformasyon direncinin arttığı ve yüksek sıcaklık stabilitesinin geliştiği görülmüştür. WTR ve RPE ile modifikasyondan sonra sünme sertliğinde azalma, bağlayıcının esnekliğinin geliştiğini düşündürmüştür. Modifikasyon ile performansın daha kararlı ve etkinin düşük sıcaklıklarda daha iyi olduğu bulunmuş, düşük sıcaklık performans derecesi değişmemiş ve yüksek sıcaklık performans derecesi artmıştır. Bazı bitümlerin performans dereceleri; PG 64–22 saf bitüm, (% 5 WTR + % 2 RPE) bitüm PG 76–22 ve (% 10 WTR + % 2 RPE) bitüm PG 82-22 olarak bulunmuştur.

Köfteci (2016) yaptığı çalışmada; asfalt karışımlar üzerinde YYPE'nin etkisini araştırmıştır. YYPE modifiye edici olarak % 1, 2, 3 ve 4 oranlarında bitüme eklenmiştir. Modifiyeli asfalt karışımların performansı; önce stabilite ve akma değerleri ile ölçülmüş ve sonra sıkıştırılmış örneklerle dolaylı çekme testi uygulanarak, BSK'nın su hasarına karşı duyarlılığı belirlenmiştir. Tüm numuneler su hasarına karşı direnç göstermiş ve stabilite açısından en iyi performans % 4 katkı içeriğinde elde edilmiştir.

Kishchynskyi ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; geri dönüştürülmüş PE temelli olarak etkili kombinasyonların oluşturulmasını incelemişlerdir. Böylelikle, bitümdeki pahalı ve özel polimer katkıların miktarında önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Geri dönüştürülmüş PE % 50–65, yumuşatan olarak endüstriyel yağlar, yağ özleri vb. % 10'a kadar, termo–elasto plastik tipi olarak kauçuk veya SBS % 30–50 şeklinde, polimer karışımlarının oranları seçilmiş ve bitüm ağırlığınca % 3–4 katkı oranı, uygun içerik olarak belirlenmiştir. Polimer bileşenlerini kendi aralarında ve bitümle birleştirme teknolojileri geliştirilmiştir. Oluşturulan polimer bileşenleri ile bitümün modifikasyonu, asfalt karışımının mukavemet ve ısı direnci özelliklerini geliştirmiş ve çatlamaya karşı direncini artırmıştır. Katkılı asfalt karışımları hazırlamanın, teknolojik parametreleri tanımlanmış ve kompozit polimer katkı maddesinin doğrudan karşına ilave edilmesi yoluyla, asfalt karışımının modifikasyonu önerilmiştir.

Rongali ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; saf bitümün geleneksel ve reolojik özellikleri üzerinde, yüksek yoğunluklu polietilen homo polimer (YYPHP) ve stiren

butadien stiren (SBS)'in kombine etkisini tartışmışlardır. Her iki polimerin değişen yüzdeleri kullanılarak altı katkılı bitüm hazırlanmış ve bitümlerin reolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Her iki polimerin kullanımı da yüksek viskoziteye yol açarken, orijinal bitüme kıyasla, sadece YYPHP katkılı bitümlerde viskozitede düşük bir artış olduğu görülmüştür. Dinamik modül ve faz açısı ana eğrilerinin karşılaştırılması sonucunda, özellikle daha düşük frekanslarda, yaşlanmayan koşullara kıyasla, farklı yaşlanma koşulları ile elde edilen ana eğriler arasında önemli farklılıklar bulunmuştur.

Costa ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; PEX ile ve PEX olmadan üretilen karışımların performanslarını karşılaştırmak için, karışımları test etmişler ve böyle bir uygulama için, PEX'in alternatif bir malzeme olarak başarılı şekilde kullanılmasını araştırmışlardır. Bu nedenle, % 5'e kadar PEX katkılı asfalt karışımları üzerinde nem hassasiyeti, tekerlek izi direnci, sertlik modülü ve yorulma çatlama direnci testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, PEX'in asfalt karışımlarına dahil edilmesinin, özellikle yüksek servis sıcaklıklarında asfalt kaplama için uygun bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır.

Fernandes ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; motor yağı ve farklı polimerler gibi farklı atık maddelerin bitüm içerisine eklenmesini değerlendirmişlerdir. Saf bitüme % 10 atık motor yağı ve % 5 polimer (YYPE, LK ve SBS) ilave edilmiş ve elde edilen modifiye bitümler, temel ve reolojik testlerle incelenmiştir. Farklı atık malzemelerin eklenmesiyle, saf bitümün bazı önemli özelliklerinin geliştiği sonucuna varılmıştır.

Gibreil ve Feng (2017) yaptıkları çalışmada; BSK'nın özellikleri üzerinde YYPE ve kırıntı lastik tozunun (LKT) etkilerini araştırmışlardır. Saf ve katkılı bitümün fiziksel özellikleri; penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite testleri ile çeşitli YYPE ve LKT içerikleri için ölçülmüştür. Ayrıca; Marshall stabilite ve akma, MQ, nem hassasiyeti ve tekerlek izi testleri yapılmıştır. YYPE ve LKT'nin modifiye edici olarak kullanılmasıyla bitümün fiziksel özelliklerinin ve BSK karışımlarının Marshall özelliklerinin geliştiği görülmüştür. Nem hasarı ve kalıcı deformasyona karşı direnç önemli ölçüde artmıştır.

Swamy ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; saf bitümün geleneksel ve reolojik özellikleri üzerinde, YYPHP ve SBS'nin kombine etkisini tartışmışlardır. Değişken SBS ve YYPHP yüzdeleri kullanılarak altı katkılı bitüm hazırlanmış ve her iki polimerin etkisini değerlendirmek için yaşlanmamış, kısa ve uzun dönem yaşlanmış bağlayıcılar üzerinde çeşitli reolojik testler yapılmıştır. Her iki polimerin kullanılması, saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerin viskozitesini az miktarda artırmıştır. Düşük frekanslarda, saf bitüme göre katkılı bitümlerde kompleks kayma modülü değerlerinin daha yüksek

olduğu görülmüştür. YYPHP ilavesi, diğer bitümlere kıyasla daha yüksek elastikiyet sağlamıştır. Uzun süreli koşullar ve sünme yükü ile gerilme altında, SBS ve YYPHP kombinasyonunun daha yüksek direnç sunduğu görülmüştür. Böylelikle, SBS modifiye bitümün viskoelastik özelliklerinin YYPHP ilavesi ile arttığı sonucuna varılmıştır.

2.2. Polipropilen (PP) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları

Murphy ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada; atık polimerin bir modifiye edici olarak bitüm içerisine dahil edilme olasılığını incelemişlerdir. Kanıtlanmış modifiye bitümlere (Polyflex 75) benzer veya 100 penetrasyon dereceli bitümün özelliklerini arttıracak polimer katkılı bitümleri bulmayı amaçlamışlardır. PE'ler, PP'ler, polieter poliüretan (PEPU), öğütülmüş lastik ve kamyon lastiği, EVA dahil olmak üzere çok çeşitli geri dönüştürülmüş polimerler test edilmiştir. Penetrasyon, viskozite, yumuşama noktası, yaşlandırma ve reoloji testleri yapılmıştır. Bir dizi bağlayıcı kullanılarak, BSK numunelerine yapılan sertlik testleri de araştırmanın bir parçasını oluşturmuştur. Bazı modifiye bitümlerde stabilite sorunları belirgin olmasına rağmen, bazı vakaların başarılı olduğu bulunmuştur. % 1 SBS yerine % 3 DYPE ilave edilen bitümün, daha düşük bir sertliği olduğu halde, Polyflex 75'inkine benzer özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bitüm, DYPE ve EVA kombinasyonu, en etkileyici karışım olarak bulunmuştur.

Yeh ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada; asfalt bağlayıcılar için, izotaktik PP (İPP) ve maleatlanmış PP (MPP) gibi polimerik katkıları kullanarak modifiye bitümleri hazırlamışlar ve kaplama yapımındaki potansiyel kullanımlarını karakterize etmişlerdir. İPP'nin kristalliliğinin çoğunun bitüm içinde bozulmadan kaldığını ancak MPP'nin amorf bölgesinin artması nedeniyle bitüm ile daha fazla etkileşim sergilediğini, DSC çalışması göstermiştir. Modifiye bitümlerin reolojik ve faz dağılımı özellikleri, sırasıyla DSR ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) testleri ile incelenmiştir. SEM görüntüleriyle, bitüm içindeki zengin fazların, MPP'li katkılı olanlarda iPP'li olanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bu da MPP katkılı bitümdeki asfalt fazına polimerin daha fazla dağıldığını göstermiştir. Ayrıca, iPP içeren bitümlerin sıcaklık açısından daha yüksek viskozite sergilediğini reolojik çalışmalar göstermiştir.

Al-Hadidy (2006) yaptığı çalışmada; asfalt kaplamada modifiye edici olarak, PP pirolizinin potansiyel kullanımını araştırmıştır. PP piroliz katkılı ve saf dahil olmak üzere 7 farklı bitüm, reolojik testler gibi bitüm testlerine ve ayrıca sistemin homojenliği ile ilgili diğer bazı testlere tabi tutulmuştur. Marshall yöntemi ile optimum bitüm içeriği

elde edilmiş ve katkılı tüm karışımlarda kullanılmış ve karışımların Marshall stabilite ve ITS dahil olmak üzere mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Katkılı bitümlerin düktilite değerlerinin minimum şartname aralığında kaldığı, daha yüksek yumuşama noktası değerlerinin elde edildiği ve ısı ile hava nedeniyle ağırlık kaybında yüzde olarak azalmanın olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. BSK'nın stabilite ile diğer Marshall ve ITS özelliklerindeki artışlar açısından, asfalt karışımlarına bu yöntemle PP dahil edilmesinin oldukça tatmin edici bir sonuç verdiği görülmüştür.

Nien ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada; izotaktik PP (İPP) ve farklı derecelerde klorlanmış PP (CPP) polimerik katkıları kullanarak modifiye bitümleri hazırlamışlar ve bitümleri DSC, SEM, RV ve DSR testleriyle incelemişlerdir. İPP'nin kristalliliğinin çoğu bitümde bozulmadan kaldığı için, İPP'li bitümlerde farklı seviyelerde kristalleşmenin meydana geldiğini; CPP'nin amorf bölgesinin artışı nedeniyle, CPP'li bitümlerde termal davranışın etkileme eğiliminde olduğunu, DSC çalışmaları göstermiştir. Bağlayıcı ile uyumluluğu kontrol etmede CPP'deki klor içeriğinin önemli bir faktör olduğunu, SEM ile görülen İPP'li ve CPP'li bitümler arasındaki faz dağılımı ayrımları göstermiştir. Ayrıca, CPP içeren bitümlerin sıcaklık açısından daha yüksek viskozite sergilediği reolojik çalışmalar ile görülmüştür.

Tapkın (2008) yaptığı çalışmada; PP fiber katkılı asfalt karışımı numunelerini optimum bitüm içeriğinde üretmiş ve katkılı numunelerin Marshall stabilite değerlerinin arttığını, akma değerlerinin gözle görülür bir şekilde azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca, numunelerin yorulma ömrü de artmıştır. PP fiber uygulanması ile asfalt karışımının özelliklerinin çok faydalı bir şekilde değiştiği sonucuna varılmıştır.

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2009) yaptıkları çalışmada; esnek kaplamada, asfalt ve TMA karışımların modifiye edilmesinin faydalarını araştırmışlardır. 50/60 penetrasyon dereceli bitüm ve dört oranda PP pirolizi seçilmiştir. Saf ve katkılı asfalt bağlayıcılar, reolojik ve homojenlik testlerine tabi tutulmuştur. Saf ve modifiye TMA karışımları üzerinde, Marshall stabilitesi, çekme ve basınç mukavemeti dahil performans testleri gerçekleştirilmiştir. Performans testleri arasında regresyon ilişkileri elde edilmiştir. TMA modifikasyonu nedeniyle, aynı servis ömrü için TMA ve taban katmanının kalınlığını azaltmak veya kaplamanın servis ömründeki iyileşmeyi tahmin etmek için mekanik-ampirik bir tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. PP katkılı asfalt karışımların performansının, saf karışımlara kıyasla daha iyi olduğu test sonuçlarıyla görülmüştür. Sıcaklığa duyarlılık PP'nin asfalt karışımına dahil edilmesiyle azaltılmış ve araştırılana benzer asfalt karışımının performansının iyileştirilmesi için, bitüm ağırlığına göre %

5'lik bir PP içeriği önerilmiştir. Bir yüzey katmanı olarak PP katkılı TMA'dan oluşan kaplamanın yapı malzemelerinin azaltılmasında faydalı olduğunu, çok katmanlı elastik analiz sonuçları göstermiştir.

Tapkın ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada; PP fiber katkılı asfalt karışımı için Marshall tasarımı ve optimum bitüm içeriğini rapor etmişlerdir. Optimum PP miktarı ve bitüm içeriğini belirlemek için, farklı tipte PP fiberleri kullanılmıştır. Tekrarlanan yük altında karışımın sünme davranışını belirlemek için, Marshall örnekleri test edilmiştir. PP fiberlerin ilave edilmesiyle, tekrarlanan sünme testleri altında numunelerin ömrünün arttığı ve davranışlarının geliştiği görülmüştür.

Habib ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada; termoplastik, yani doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LDYPE), YYPE ve PP ile modifiye edilmiş bitümlerin reolojik özelliklerini ve 80 penetrasyon saf bitüm ile etkileşimlerini araştırmışlardır. Polimer katkılı bitümün reolojik çalışması; penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri ile yapılmıştır. Sonuçlar, polimer katkılı bitümün reolojik özelliklerindeki değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Polimerlerin, yumuşama noktasından ziyade penetrasyon üzerinde derin bir etki gösterdiği gözlenmiştir. PP, YYPE ve LDYPE'ye göre daha iyi bir karışım sunmuş ve saf bitüm viskozitesi polimer ilavesiyle arttırılmıştır. Polimer oranı % 3'ün altında tutulduğunda, en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Othman (2010) yaptığı çalışmada; BSK'nın uzun süreli yaşlanmasına, PP uygulama yönteminin etkisini araştırmıştır. Üç farklı uygulama yöntemi; kuru ve ıslak yöntem, agrega yüzeyinin PP ile kaplandığı kaplama yöntemi göz önüne alınmıştır. Toplam karışım ağırlığınca % 0.7'lik sabit PP içeriği kullanılmıştır. Asfalt kaplamaların sahada meydana gelen yaşlanma sürecini uyarlamak için laboratuvar yaşlanma programı oluşturulmuştur. Üç farklı PP uygulama yöntemi kullanarak hazırlanan yaşlanmamış ve yaşlı karışımların mekanik özellikleri MQ, ITS ve serbest basınç mukavemeti, kırılma enerjisi esas alınarak değerlendirilmiştir. Deneysel testler, PP ilave edildiğinde BSK'nın mekanik özelliklerindeki artışı ortaya çıkarmıştır. BSK'nın uzun süreli yaşlanmasının neden olduğu etkiye karşı koymayı, PP katkısı başarmıştır. Yaşlanmış ve yaşlanmamış koşullar altında BSK'nın ITS ve kırılma enerjisinde, diğer uygulama yöntemlerine göre kaplama yönteminde önemli bir iyileşme olmuştur. Test edilen BSK'ların MQ ve basınç dayanımları, PP uygulama yöntemine daha az bağımlılık göstermiştir.

Abtahi ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; düşük maliyetli olmaları ve asfalt kaplamayla uyumlu olmaları sebebiyle, PP fiberleri modifiye edici olarak seçmişlerdir. Hem Marshall hem de Superpave yöntemleriyle BSK numuneleri üretilmiş ve analizler

yapılmıştır. Asfalt betonunun toplam ağırlığına göre % 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.5'lik 4 farklı yüzde ve 2 farklı uzunlukta (6 ve 12 mm) PP elyaflar karışıma eklenmiştir. Optimize edilmiş bitüm miktarındaki (% 4.2) toplam karışım ağırlığına göre, lifleri agregalarla karıştırmak için kuru prosedür kullanılmıştır. PP katkı ilavesiyle; Marshall stabilitesinin % 26 ve hava boşluklarının % 67 arttığı, akmanın % 38 düştüğü görülmüştür. Son olarak, asfalt karışımlarında PP fiber kullanmanın avantajlarını önemli ölçüde gösteren sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için varyans analiz yöntemi kullanılmıştır.

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2011) yaptıkları çalışmada; bitümü modifiye etmek için 2 plastomer polimer tipi (PE ve PP) kullanmışlardır. Saf bitüm dahil olmak üzere 9 farklı bitüm, yaşlanmadan önce ve sonra reolojik testler gibi bağlayıcı testlerine ve ayrıca sistemin homojenliği ile ilgili diğer bazı testlere tabi tutulmuştur. TMA karışımlarında Marshall stabilitesi, MQ, statik çekme mukavemeti, çekme mukavemeti oranı, statik basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bu polimerlerin ilave edilmesiyle, saf bağlayıcıya göre yaşlanmamış ve reolojik özelliklerin arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, bu tür bağlayıcılar içeren TMA karışımlarının, yüksek sıcaklık ve fazla yağmur bölgesinin performans gereksinimini karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tapkın ve Özcan (2012) yaptıkları çalışmada; öncelikle PP fiberlerin bitüm üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkilerini araştırmışlardır. Daha sonra karışıma ilave edilmesi gereken “optimum” PP fiber miktarı belirlenmiştir. Bunun için, önce statik sünme testleri ve Marshall testleri yapılmış ve daha sonra floresan mikroskobu altında PP katkılı bitümlü bağlayıcıların görüntüleri araştırılmıştır. Elde edilen optimum PP miktarıyla hazırlanan Marshall örneklerine fiziksel ve mekanik testler uygulanarak, optimum bitüm içeriği belirlenmiş ve son olarak ekonomik analizler yapılmıştır. PP lif kullanılmasıyla, esas olarak kalıcı deformasyon direncinin artırılarak, asfalt kaplamanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirildiği kapsamlı analizler sonucu görülmüştür.

Tapkın (2013) yaptığı çalışmada; Superpave dönel sıkıştırma (SGC) yöntemi kullanarak ve statik sünme testleri yaparak; referans ve çeşitli miktarlarda PP katkılı asfalt karışımların mekanik farklılıklarını, standart fiziksel özellikler, Marshall stabilite ve akma analizleriyle karşılaştırmıştır. Ayrıca, bu testlerin sonuçları, 50 darbe Marshall tokmağı ile sıkıştırılan benzer asfalt örneklerine daha önce yapılan testlerin sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. PP fiber kullanımının esas olarak kalıcı deformasyon direncini geliştirerek, karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiği sonucuna ulaşılmış ve PP fiberin karışıma optimum ilave miktarı bulunmuştur. Optimum PP, önceki Marshall sıkıştırma testi sonuçları ile aynı olarak, agrega ağırlığına göre % 5.5 şeklinde

tespit edilmiştir. Optimum PP fiber ilavesinin sıkıştırma tekniğinden bağımsız olduğu, test sonuçlarının tekrarlanabilirliği ile kanıtlanmıştır.

Tapkın ve Keskin (2013) yaptıkları çalışmada; SGC ve Marshall sıkıştırma yöntemleri kullanarak ve tekrarlı sünme testleri yaparak, referans ve PP katkılı asfalt karışımların mekanik farklılıklarını karşılaştırmışlar ve 100 mm çaplı numunelerin sıkıştırma ve deney süreçleri için yeni standartlar önermeyi amaçlamışlardır. Benzer ve özel agrega kaynakları, bitüm, agrega derecelendirme, karışım oranlama, modifikasyon tekniği ve laboratuvar koşulları için orta trafik koşulları altında; tasarım SGC dönme (gyration) sayısını referans için 40 ve PP katkılı için 33 olarak belirlemişlerdir. Döner sıkıştırma ile üretilen numunelerin Marshall sıkıştırma ile yapılanlara göre, kalıcı deformasyon etkilerine karşı çok daha dirençli olduğu görülmüştür.

Qadir (2014) yaptığı çalışmada; PP fiber katkılı asfalt karışımın, tekerlek izine karşı performansını araştırmıştır. Kontrol numuneleri (PP ilavesi olmayanlar) ve katkılı numuneler olmak üzere 2 tip karışım numunesi hazırlanmıştır. Her iki numune türü için de, optimum bitüm içeriğini belirlemek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Hem kontrol hem de katkılı numuneler için 300 mm uzunluk ve genişlik ve 50 mm kalınlığında levha asfalt numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler tekerlek izi cihazında test edilmiştir. Numuneler 40, 50, 55 ve 60 °C olmak üzere 4 sıcaklıkta ve 10,000 yük geçişi 700 N aks yükünün uygulanması altında test edilmiştir. PP katkısının, Marshall stabilitesini neredeyse % 25 artırdığı bulunmuştur. Yüksek sıcaklıklarda, dolaylı çekme dayanımının arttığı ve tekerlek izine karşı katkının etkili olduğu saptanırken, düşük sıcaklıkta genel olarak katkının etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Sadeque ve Patil (2014) yaptıkları çalışmada; atık DYPE, PP, LK ve nanokil'in Marshall stabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. 60/70 penetrasyonlu bitüme atık polimerler % 2, 4 ve 6 oranlarında eklenirken, nanokil % 1, 2 ve 3 oranlarında eklenmiştir. Atık polimerler ve nanokil eklenmesinden dolayı, Marshall stabilitesinde önemli bir iyileşmenin olduğunu görülmüştür.

Ahmedzade ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; bitüm ile uyumlu olarak bilinen maleik anhidrit ve stiren gibi malzemeleri ve % 80 atık PP içeren bir polimeri (PP_r) sentezlemişler ve bitüm modifiye edici olarak, (PP_r) kullanmışlardır. Saf ve (PP_r) katkılı bitümler; floresan mikroskobu, penetrasyon, yumuşama noktası, RV ve DSR testleri ile araştırılmıştır. PP_r katkısının, saf bitüme bir sertlik sağladığı görülmüştür. Örneğin; % 6 katkılı bitüm 27 penetrasyon, 76 °C yumuşama noktası ve 687.5 cP viskozite değerlerine sahipken, saf bitümün 62 penetrasyon, 50.5 °C yumuşama noktası ve 412 cP

viskozite değerlerine sahip olduğu sonuçlarla görülmüş ve PP'nin sertlik etkisi, DSR testlerindeki G^* değerleri ile de onaylanmıştır. Modifikasyondan sonra DSR testi ile daha iyi viskoelastik davranış gözlenmiştir. Kaplamada ekonomik ve çevre açısından atık polimerlerin kullanılmasının önemine ek olarak, bitüm performansı ve asfalt betonundaki çatlamaya karşı atık polimerin pozitif etkisi de görülmüştür.

Ahmedzade ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; geri dönüştürülmüş (PP_R)'yi gamma ışıması ile radyasyona tabi tutarak polimer üzerinde yeniden kimyasal bağ oluşturabilecek serbest radikaller meydana getirmişlerdir. Ağırlıkça % 1, % 3, % 5, % 7 ve % 9 katkı oranlarında hazırlanan modifiye bitümler üzerinde; FTIR spektroskopisi, floresan mikroskobu, geleneksel test yöntemleri, kısa ve uzun vadeli yaşlanma işlemleri, RV, DSR ve BBR deneyleri yapılarak katkının bitüm içerisinde kullanımı kimyasal ve fiziksel yöntemlerle incelenmiştir.

Gonzalez ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; PE, PP, polistiren (PS) ve ömrünü tamamlamış lastik (ELT) olmak üzere 4 farklı polimerik atık ele alarak, asfalt betonunu modifiye etmişlerdir. Bir yol inşaatında gerekli olan büyük miktarda malzeme açısından bulunabilirlik, homojenlik ve ekonomik kriterlere göre, bu atıklar seçilmiştir. Basitliği ve önemli değişiklikler olmaksızın herhangi bir asfalt tesisinde gerçekleştirilme olasılığı nedeniyle BSK'yı modifiye etmek için kuru yöntem kullanılmıştır. Saf ve katkılı asfalt betonu ayrı ayrı analiz edilmiş ve karışımların performansları karşılaştırılarak kalıcı deformasyona, işlenebilirliğe, sertliğe ve yorulmaya karşı dirençleri değerlendirilmiştir. Tüm durumlar için, atık kullanımıyla, özellikle de PE, PP ve ELT kullanıldığında, referans karışımın sertliğinin önemli ölçüde arttığı, bununla birlikte bu malzemelerin hiçbirinin referans karışımın yorulma davranışını önemli ölçüde değiştirmedikleri sonuçlarla görülmüştür. Hem PE hem de ELT kullanımı kalıcı deformasyona karşı direncin artmasına neden olurken, PP'nin bunu değiştirmedikleri ve PS'nin de azalttığı görülmüştür. Modifiyeli karışımların sıkıştırma enerjisinin önemli bir değişikliğe maruz kalmadığı, işlenebilirlikle görülmüştür. Bu nedenle; özelliklerini geliştirdikleri veya değiştirmedikleri için asfalt kaplamayı modifiye edici olarak, PE, PP ve ELT'nin kullanılabileceği, çelişkili sonuçları nedeniyle PS'nin daha fazla incelenmesi ve sadece kalıcı deformasyon problem olmadığında bu malzemenin kullanılabileceği görülmüştür.

Karmakar ve Roy (2016) yaptıkları çalışmada; saf bitümün (60/70 penetrasyon sınıfı) özelliklerinde, yüksek moleküler YYPE, PP, DYPE ve lastik kauçuk külü gibi polimer içerikli atıkların yaptığı değişiklikleri araştırmışlardır. Karışık plastiğin bitüme ağırlıkça % 1 oranında ilavesi sonrasında; polimer katkılı bitümün temel özelliklerinin

karşılanarak mikro düzeyde yapışkanlık ile sıcaklığa karşı direnç, viskoz ve elastik geri kazanım özelliklerinde iyi uyumluluk ve artış sağlandığı sonuçlarla görülmüştür.

Kathari (2016) yaptığı çalışmada; fiber takviyeli asfalt bağlayıcıları hazırlamak için, PP fiberi katkı maddesi olarak kullanmış ve bitüm ağırlıkça % 2.5 oranına kadar % 0.5'lik artışlarla modifiye edilmiştir. Fiberlerin mikro yapısı ve bitüm içinde dağılımı, SEM kullanılarak farklı büyütme oranlarında analiz edilmiştir. Reolojik özellikleri incelemek için penetrasyon, yumuşama noktası, DSR ve MSCR testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. PP liflerinin dozajındaki artışla birlikte; yumuşama noktası ve kompleks kayma modülü (G^*) artarken, penetrasyon ve faz açısı (δ) azalmıştır.

Appiah ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; YYPE ve PP atık plastiklerin çeşitli oranlarda saf bitümle karıştırılmasının etkilerini incelemişlerdir. Plastikler parçalanmış ve bitüm ile 160–170 °C sıcaklık aralığında bir kesmeli karıştırıcı ile harmanlanmıştır. Bitümde meydana gelen değişiklikleri belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri gibi temel reolojik testler; bitümde bulunan kimyasal işlevsellikleri incelemek için ise FTIR kullanılmıştır. Viskozite, yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinde hafif doğrusal artışla homojenlik ve uyumluluk üzerinde, PP polimerin YYPE'ye göre daha iyi etki gösterdiği gözlenmiştir. Tüm katkılı bitümler için; polimer oranı arttıkça, penetrasyon değerleri azalırken yumuşama sıcaklığı artmıştır. YYPE için en uyumlu ve uyumsuz karışımlar sırasıyla % 2 ve % 3; en gelişmiş, homojen karışım % 3 PP olarak gözlenmiştir.

Dalhat ve Wahhab (2017) yaptıkları çalışmada; asfalt bağlayıcının viskoelastik performansı üzerinde; PP, YYPE ve DYPE geri dönüştürülmüş plastik atıkların (RPW) etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı ile daha kolay karıştırmak için, RPW arzu edilen boyuta kadar parçalanmıştır. RPW katkılı bağlayıcının PG limiti, çoğu durumda RPW içeriğindeki her % 2 artış için en az bir seviye üste çıkmıştır. PP, YYPE ve DYPE ile yapılan asfalt betonunun esneklik modülünde (M_R), sırasıyla % 55, 19 ve 9'luk bir artış gözlenmiştir. Ayrıca; mekanik ampirik kaplama tasarım kılavuzu (ME-PDG) yazılımı kullanarak tipik bir kaplama kesitini modellemek için, RPW modifiyeli bağlayıcılardan elde edilen viskoelastik özellikler kullanılmıştır.

Wahhab ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; geri dönüşümlü YYPE, DYPE ve PP modifiye asfalt bağlayıcıları, SBS ve polibiltle (PB) birlikte kullanmışlar ve dinamik depolama stabilitesi, yüksek sıcaklık performansı, birim deformasyon ve geri kazanım eğilimini araştırmışlardır. Plastik atıklar ile modifiye edilmiş bağlayıcıların yeterli birim deformasyon ve geri kazanım kabiliyetine sahip olmadığı ve SBS ile birlikte DYPE

veya YYPE kullanıldığında, aynı miktarda SBS kullanıldığında elde edilenden daha yüksek geri kazanım ve birim deformasyon direncinin elde edildiği görülmüştür. % 2'nin üzerinde PP içeriğinin dengesiz modifiye bitüme yol açacağı bulunmuştur. İster SBS ister PB içeriyor olsun, % 4'ün altındaki YYPE ve % 6'nın altındaki DYPE içeriği iyi depolama kararlılığı özelliği göstermiştir.

2.3. Polietilen Tereftalat (PET) ile Yapılan Araştırma Çalışmaları

Hassani ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada; PET imhasının çevresel etkilerini azaltmak için, asfalt karışımlarda PET atığının agrega ile yer değiştirilerek kullanılma olasılığını araştırmışlardır. Bu amaçla, PET'li karışımların mekanik özellikleri kontrol örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada Marshall stabilite, akma, MQ ve yoğunluk parametrelerine odaklanılmıştır. Eşit büyüklükteki (2.36–4.75 mm) mineral kaba agregaların bir kısmının (hacimce) yerini alarak, yaklaşık 3 mm çapında granüler PET ile 5 farklı yüzdede karışımlar hazırlanmış ve tümünde, belirlenen % 6.6 optimum bitüm içeriği kullanılmıştır. Hacimce % 20'yi PET'le değiştirme, sıkıştırılmış karışım yoğunluğunda % 2.8'lik bir azalmaya neden olmuş ve katkılı karışımlardaki akma değerlerinin kontrol numunelerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, PET kısmi olarak agrega yerine kullanıldığında, kontrol örnekleri ile Marshall stabilite ve MQ'nun neredeyse aynı olduğunu sonuçlar göstermiştir. Elde edilen sonuçların, pratik kullanım için uygun hale getirebilecek özelliklere sahip asfalt karışımı sunduğu ve asfalt kaplamada atık PET kullanarak, çevre sorununun hafifletilmesine ve enerji tasarrufunun sağlanmasına yardımcı olunacağı değerlendirilmiştir.

Ahmadinia ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; TMA karışımına atık PET şişeyi dahil ederek, TMA'nın mühendislik özellikleri üzerinde oluşan etkiyi belirlemişlerdir. Farklı PET yüzdeleri (% 0, 2, 4, 6, 8 ve 10) içeren asfalt karışımlarının hacimsel ve mekanik özellikleri laboratuvar testleriyle hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Bitüm ağırlığınca % 6 PET, uygun miktar olarak bulunmuştur. Sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve belirli güven sınırlarında anlamlılık belirlenmiştir. TMA özellikleri üzerinde, PET ilavesinin önemli bir pozitif etki oluşturduğu sonuçlarla görülmüştür.

Ahmadinia ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada; TMA'da katkı maddesi olarak atık PET şişenin uygulanması üzerine deneysel araştırma sunmuşlardır. Bitüm ağırlığına göre % 0, 2, 4, 6, 8 ve 10 olarak çeşitli atık PET yüzdeleri içeren örnekler üzerinde tekerlek izi, nem hassasiyeti ve esneklik modülü testleri yapılmıştır. Atık PET miktarı

için uygun aralığın, % 4–6 olduğu belirlenmiştir. Atık PET ilavesiyle, karışımın kalıcı deformasyon (tekerlek izi) direncinin iyileştiği ve sertliğinin arttığı görülmüş ve TMA özellikleri üzerinde önemli bir pozitif etkinin olduğu sonuçlarla tespit edilmiştir.

Moghaddam ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada; optimum bitüm içeriklerindeki TMA karışımların sertlik ve yorulma özelliklerine, atık PET ilave edilmesinin etkilerini araştırmışlardır. TMA karışımlarına maksimum boyutu 2.36 mm olan farklı atık PET yüzdeleri eklenmiştir. 3 farklı gerilme seviyesi (250, 350, 450 kPa) ve 20 °C sıcaklıkta ITSM ve dolaylı çekme yorulma testleri yapılmıştır. Karışımın sertlik modülünün daha düşük miktarda PET içeriğinde arttığı görülmüş fakat daha fazla miktarda PET ilavesi karışımı daha yumuşak hale getirmiştir. Ayrıca; PET katkılı karışımlar, katkısız olanlara göre önemli ölçüde daha yüksek yorulma ömrü sergilemiştir.

Abdul Rahman ve Abdul Wahab (2013) yaptıkları çalışmada; katkılı BSK'nın kalıcı deformasyon ve sertlik davranışını belirleyerek, ince agrega yerine kısmi olarak geri dönüştürülmüş PET'in kullanımının etkisini ve optimum kalitesini araştırmışlardır. 2.36–1.18 mm arası elek boyutunda asfalt karışım ağırlığının % 5–25'i arasında PET içeriğine sahip ve ağırlıkça % 5 bitüm ile katkılı BSK'lar elde edilmiştir. Katkılı asfalt karışımların kalıcı deformasyonunu ve sertliğini belirlemek için, numunelere 1800 devir boyunca tekrarlı yük (100 kN eksenel yük) ve 25 °C'de ITSM testleri uygulanmıştır. PET katkılı BSK'nın sertliğinin katkısızla göre azalma eğiliminde olduğu ve PET'in, BSK'nın kalıcı deformasyon özelliklerini geliştirme yeteneğine sahip olduğu görülmüş; çevresel ve ekonomik açılardan, PET katkılı asfalt karışımların yol kaplamalarında kullanılmaya uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Temiz ve Yaşmun (2013) yaptıkları çalışmada; atık taşıt lastik parçaları ve PET lifi katkılı BSK'nın, stabilite ve akma değerlerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan numuneler; agrega, 75–100 penetrasyonlu bitüm, atık PET lifi ve lastik malzemelerinin karışımları ile üretilmiştir. PET lifleri agreganın bir kısmının yerine (ikame malzemesi olarak) karışıma ilave edilirken, lastik kaba agrega yerine kullanılmıştır. Karışımların bazı fiziksel özellikleri ile optimum bitüm içeriği belirlenmiş ve bitüm oranı % 5.33 olarak bulunmuştur. Belirlenen orana sahip referans ve PET katkılı örneklerin stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Optimum atık PET lifi oranı % 0.75 olarak bulunmuş ve en yüksek stabilite ile uygun akma değerleri bu oranda elde edilmiştir. Kaba agrega yerine lastik parçaları kullanılarak üretilen numunelerin stabilite değeri düşük çıkmıştır.

Gürü ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; toplam plastik atık hacminin önemli bir parçası olarak, son yıllarda çevresel sorunlara yol açan PET şişe atığı için uygulama

alanı araştırmışlardır. 2 yeni katkı maddesi, yani ince sıvı poliol PET (TLPP) ve viskoz poliol PET (VPP), kimyasal olarak atık PET şişelerinden türetilmiş ve bu amaçla saf bitümün ayrı ayrı modifiye edilmesi için kullanılmıştır. Yumuşama noktası, duktilite, penetrasyon, RV, DSR, BBR, Marshall stabilite ve Nicholson soyulma testleri ile TLPP ve VPP'nin bitüm ve BSK özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, kimyasal yapılar enerji dağıtıcı spektrometre (EDS), FTIR ve SEM ile tanımlanmıştır. Bitümün düşük sıcaklık performansının ve yorulma direncinin, BSK'nın ise Marshall stabilite ve soyulma direncinin arttığı uygulanan testlerin sonuçlarına göre belirlenmiş ve ekolojik olarak tehlikeli maddelerin atılmasının alternatif ve faydalı yolu olarak, PET atıkların asfalt yol kaplama malzemesinde kullanılması önerilmiştir.

Modarres ve Hamed (2014) yaptıkları çalışmada; 5 ve 20 °C sıcaklıklarda asfalt karışımların sertlik ve yorulma özellikleri üzerinde, atık plastik PET şişelerin etkisini araştırmışlardır. Ayrıca, asfalt karışımların modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan geleneksel bir polimer katkı maddesi olan SBS ile PET karşılaştırılmıştır. Farklı PET içeriği (bitüm ağırlığınca % 2–10), kuru işlem yöntemi olarak doğrudan karışıma ilave edilmiştir. Dolaylı çekme yükleme prosedürü ile silindirik numuneler üzerinde esneklik modül ve yorulma testleri yapılmıştır. Asfalt karışımın sertliği başlangıçta daha az miktarda PET eklendiğinde artmış olsa da, PET muhtevasının artırılmasıyla karışımın sertliği azalmıştır. PET katkılı karışımın sertliğinin kabul edilebilir olduğu ve ağır yük koşullarında uygun deformasyon özellikleri göstereceği, esneklik modülü testleri ile görülmüş ve her iki sıcaklıkta da katkılı karışımların yorulma davranışı gelişmiştir. PET katkılı karışımlar, 20 °C'de SBS'e benzer sertlik ve yorulma davranışı göstermiş fakat 5 °C'de, SBS katkılı olanların yorulma ömrü, PET'e göre biraz yüksek olmuştur.

Moghaddam ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; büyük miktarda PET atıkların oluşmasından kaynaklanan potansiyel risklerin üstesinden gelmenin yanı sıra; alternatif bir çözüm olarak BSK'nın deformasyon özelliklerini değerlendirmek için, modifiye edici olarak PET kullanımının etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için, agrega ağırlığınca % 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1 olmak üzere farklı PET yüzdeleri, gerilme seviyeleri (300 kPa ve 400 kPa) ve sıcaklıklarda (10, 25 ve 40 °C) dinamik sünme testi yapılmıştır. Tüm gerilme seviyeleri ve sıcaklıklarda PET katkılı BSK'nın, saf karışıma kıyasla, kalıcı deformasyon özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Moghaddam ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; atık PET kullanılması ile BSK'da meydana gelen etkileri değerlendirmeyi amaçlamışlardır. İlk aşamada, farklı PET yüzdeleri içeren karışımlarda hacim özgül ağırlık, Marshall, dolaylı çekme modülü

ve mukavemeti testleri yapılmıştır. İkinci aşamada, PET katkılı asfalt karışımının kalıcı deformasyonu statik ve dinamik yükler altında değerlendirilmiştir. Son adımda, 1. ve 2. adımlarda elde edilen sonuçlar arasında ilişkiler bulunmuş ve katkı maddesi olarak PET kullanılmasıyla, asfalt karışımının özelliklerinin değiştirilebileceği görülmüştür. PET katkılı karışımların statik ve dinamik yüklemeler altında tamamen farklı davranışlara sahip olduğu, PET'in statik yükleme için uygun bir katkı maddesi olarak kabul edilemeyeceği fakat dinamik yükleme koşulları altında asfalt karışımının tekerlek izi özelliklerini önemli ölçüde artırabilecek üstün bir katkı maddesi olduğu görülmüştür.

Silva ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; bitümü modifiye edici olarak, PET'in uygulanmasını değerlendirmişlerdir. PET, bitümle ağırlıkça % 4, 5 ve 6 oranlarında karıştırılmıştır. PET katkısı ile bitümün kıvamının arttığı ve elastikliğinin geliştiği bulunmuştur. Katkılı bitümlerde, daha yüksek oksidasyon seviyeleri azaldığı için; PET ilavesinin, yaşlanmaya karşı etki konusunda umut vaat ettiği tespit edilmiştir.

Ameri ve Nasr (2016) yaptıkları çalışmada; bitümlü bağlayıcıların performans karakteristiklerini artırmada, devulkanize edilmiş PET'in etkinliğini araştırmışlardır. Yumuşama noktası, penetrasyon, depolama stabilitesi, RV ve DSR testleri kullanılarak, 4 farklı orandaki bağlayıcı numunesinin fiziksel ve reolojik davranışı araştırılmıştır. Saf olana kıyasla, katkılı bağlayıcıların penetrasyonlarının azaldığı ve yumuşama noktası, viskozite ve kalıcı deformasyon dirençlerinin de arttığı görülmüştür. Katkının yüksek sıcaklıklarda depolanmaya karşı kararlı bir bağlayıcı olamayacağı görülmüştür.

Ziari ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; asfalt karışımının özellikleri üzerinde, modifiye edici olarak atık PET kullanmanın etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çeşitli PET yüzdeleri (% 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) ve boyutları (10×2.5, 20×2.5 ve 30×2.5 mm) içeren asfalt karışımların performansı, Hamburg tekerlek izi ve dinamik sünme testleri ile değerlendirilmiştir. Karışımların tekerlek izi direncinin, PET içerikleri ile arttığı ve PET boyutlarındaki artışla da azaldığı görülmüştür.

Ahmad ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; asfalt karışımların özelliklerini iyileştirmedeki ihtimali araştırmak için, PET'i kullanmışlar ve kullanılacak en iyi PET miktarına karar vermeyi amaçlamışlardır. Optimum bitüm içeriğini belirlemek ve katkılı karışımların özelliklerini test etmek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Bitüm içeriğini belirlemek için 20, katkının etkisini araştırmak için 30 numune kullanılmıştır. Optimum bağlayıcı içeriği (% 4.8) ağırlığına göre, % 2, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında PET karışıma ilave edilmiş, optimum PET içeriği % 10 olarak bulunmuş ve PET katkılı karışımların daha iyi mühendislik özellikleri verdiği görülmüştür.

Ameri ve Nasr (2017) yaptıkları çalışmada; BSK'nın performans özelliklerini artırmada, devulkanize edilmiş PET'in potansiyel kullanımını değerlendirmişlerdir. Bunun için, farklı oranlarda atık PET (bağlayıcı ağırlığınca % 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 ve 15) içeren 7 asfalt karışımı ıslak yöntemle üretilmiştir. Kontrol ve katkılı karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri; Marshall stabilite, tekerlek izi, dolaylı çekme dayanımı testleri kullanılarak araştırılmıştır. PET kullanımıyla, kontrol karışımına kıyasla, katkılı karışımlarda nem hassasiyeti ve tekerlek izi derinliği azalırken Marshall stabilitesinin de arttığı görülmüş ve % 7.5–10 katkılı karışımlardan yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Badejo ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; asfalt yol kaplaması mukavemetini değiştirici olarak; yıkanmış, kurutulmuş ve parçalanmış PET atığının uygulanabilirliği üzerine bir araştırma sunmuşlardır. Kontrol asfalt karışımının optimum bağlayıcı içeriği (OBC) belirlenmiştir. OBC sabit tutularak, agrega ağırlığına göre sırasıyla % 1, 3 ve 5 miktarındaki PET atığı bitüm yerine konularak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, Marshall stabilite ve akma testlerine tabi tutulmuştur. Birim hacim ağırlık, karışımdaki boşluk ve bitümle doldurulmuş boşluk belirlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. OBC'ye % 1 ilave edilen PET içeriğinde iyi sonuçlar bulunmuş ve bu içerikte PET katkılı asfalt, plastik atık miktarını azaltmada kaplama yapımı için faydalı olarak değerlendirilmiştir.

2.4. Plastiklerin Bitümle Modifikasyonu ile İlgili Literatür Araştırması

Murphy ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada; polimerler ile bitümlü bağlayıcının karıştırılmasını, polimer ilavesi sırasında 700 rpm ve diğer aşamada 1,300 rpm hızda gerçekleştirmişlerdir. YYPE, PP gibi polimerler kullanılarak, 165 °C'de 45 dakikalık karışırmalar ile modifiye bitümler elde edilmiştir.

Gonzalez ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 5'i kadar polimeri bitüme ilave etmişlerdir. 180 °C sıcaklıkta, 6 saatlik sürede ve 1,200 rpm hızda karışırmalar yapılmıştır.

Hınıslıoğlu ve Ağar (2004) yaptıkları çalışmada; BSK'da kullanılan bitümlü bağlayıcıyı, farklı sıcaklıklar (145, 155 ve 165 °C) ve karıştırma sürelerinde (5, 15 ve 30 dakika) bitüm içeriğinin % 4, 6 ve 8'i ağırlığındaki YYPE ile karıştırmışlardır (27 modifiye bitüm hazırlanmıştır). YYPE-bitüm karışımları, 200 rpm hızda yapılmıştır. % 4 YYPE'nin 165 °C sıcaklıkta ve 30 dakikada bitüm ile karıştırılması sonucu hazırlanan modifiye bitümde, en iyi Marshall stabilite, akma ve (MQ) sonuçları elde edilmiştir.

Hınıslıoğlu ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığınca % 1, 2, 3 ve 4 YYPE ile bitümü 3,000 rpm hızda, 185 °C’de ve 1 saat boyunca karıştırmışlardır.

Al-Hadidy (2006) yaptığı çalışmada; bitüm ağırlığının % 1, 3, 5, 7, 9 ve 11’i olarak PP piroliz ürününü, 5 dakika boyunca 155–165 °C sıcaklık aralığında yavaş hızlarda bitümle karıştırmıştır.

Tapkın ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada; 50/70 sınıfındaki bitümü, PP fiberle 500 rpm hız ve 2 saat karıştırma ile modifiye etmişlerdir. Karıştırma sıcaklığı 165–170 °C aralığında tutulmuştur.

Habib ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada; yaklaşık 400 gr bitümü akışkan hale gelene kadar fırında ısıtmışlar ve polimeri yavaş yavaş eklemişlerdir. Karıştırıcı hızı 120 rpm ve sıcaklık 160–170 °C aralığında tutulmuştur. Bağlayıcı ağırlığının % 0.5–5’i oranlarında PP, DYPE ve YYPE kullanılmıştır. Homojen karışımlar elde etmek için 1 saat karıştırma işlemi yapılmıştır.

Naskar ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığınca % 1, 3, 5 ve 7 oranlarında katkıları kullanarak, 180 °C’de, 45 dakika süre boyunca ve 3,500 rpm hızda atık plastik ile bitümlü bağlayıcıyı karıştırmışlardır.

Yeh ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada; bağlayıcı ağırlığınca % 3 ve 5 olarak, polimer katkı maddelerini bitümle yüksek bir karıştırma hızında 10 dakika boyunca 180 °C’de karıştırmışlardır. Ardından, homojen karışım oluncaya kadar 40 dakika boyunca 160 °C’de karışımaya devam edilmiştir.

Al-Hadidy ve Yi-qiu (2011) yaptıkları çalışmada; 50/60 penetrasyon dereceli bitümle, bitüm ağırlığının % 1, 3, 5 ve 7’si olarak PP’yi ve % 2, 4, 6 ve 8’i olarak PE’yi ayrı ayrı olarak 170 °C sıcaklıkta, 2 saat sürede ve 3,000 rpm hızda karıştırmışlardır.

Attaelmanan ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 1, 3, 5 ve 7’si olarak farklı yüzdelerdeki YYPE ile bitümü, 170 °C’de, 2 saat sürede ve 3,000 rpm hızda karıştırmışlardır. Çalışma sonucunda, BSK performansının geliştirilmesi için % 5 YYPE içeriği önerilmiştir.

Tapkın ve Özcan (2012) yaptıkları çalışmada; 50/70 penetrasyonlu bitüm ile M–03 tipli PP liflerini karıştırmışlardır. 165–170 °C sıcaklık civarında, en az 2 saat sürede, 500 rpm hızla karıştırma yapılmıştır.

Vargas ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 4’ü olarak polimer katkı maddelerini, 160 °C’de, 500 rpm hızda, 10 dakika boyunca bağlayıcı ile karıştırmışlar ve sonrasında, homojenlik için 180 °C’de 4 saat karıştırma yapmışlardır.

Costa ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 5'i kadar birkaç polimerle yapılan karışımı, 180 °C'de, 1 saatlik sürede, 350 rpm hızda yapmışlardır.

Ahmedzade ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; granül haldeki “YYPE_R” katkı maddesini öğütücü makine yardımıyla ufalamışlar ve 0.6 mm elekten geçirmişlerdir. Bitüm 168 °C'de 90 dakika ısıtılarak karıştırıcıya aktarılmış ve toz halindeki katkı, ağırlıkça % 1, 3, 5, 7 ve 9 oranlarında bitüme ilave edilmiştir. 15 dakika 500 dev./dak. (rpm) ön karıştırmadan sonra, 45 dakika 1,300 rpm hızla karıştırma yapılmıştır.

Gürü ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; her bir katkı maddesini, bağlayıcı ağırlığının % 1, 2, 3, 5 ve 10'u olarak bitüme eklemişlerdir. Modifikasyon işlemi; 120 °C sıcaklıkta, 10 dakika sürede ve 1,300 rpm hızda yapılmıştır.

Nejad ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada; bitümlü bağlayıcıyı 185 °C'ye kadar ısıtmışlar ve bitüm ağırlığının % 5'i kadar YYPE ile karıştırmışlardır. Modifikasyon işlemi; 185 °C sıcaklıkta, 1 saat sürede ve 3,000 rpm hızda yapılmıştır.

Ahmedzade ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; % 80 PP içeren katkıyı, bitüm ağırlığının % 3, 4, 5 ve 6'sı oranında bitüme ilave etmişlerdir. 50/70 sınıfındaki bitüm 180 °C'de 90 dakika ısıtılmış ve 1,200 rpm hızda 15 dakika karıştırılmıştır. Bu süre boyunca katkı belirli aralıklarla ilave edilmiştir. Daha sonra 4,000 rpm hızda 45 dakika karıştırmaya devam edilmiştir.

Nejad ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 3 ve 7'si olarak 5 farklı sınıftaki YYPE'leri, bitümlü bağlayıcı ile 180 °C sıcaklıkta, 1 saat boyunca ve 5,500 rpm hızda karıştırmışlardır.

Silva ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada; 60 rpm hızda ve 165 °C'de, polimeri yavaş yavaş ilave ederek 2 saat karıştırma yapmışlardır. Bitüm ağırlığının % 4, 5 ve 6'sı oranlarında PET (polietilen tereftalat) ile modifiyeler yapılmıştır.

Ahmedzade ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; granül haldeki “PP_R” katkı maddesini öğütücü makine yardımıyla ufalamışlar ve 0.6 mm elekten geçirmişlerdir. 160/220 sınıfındaki bitümlü bağlayıcı 163 °C sıcaklıkta 90 dakika ısıtılarak karıştırıcıya aktarılmış, toz halindeki katkı belirli aralıklarla ve ağırlıkça % 1, 3, 5, 7 ve 9 oranlarında bitüme ilave edilmiştir. 15 dakika 500 rpm hızda süren katkı ilave işleminden sonra, modifiye bitüm 1,300 rpm hızla 45 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra, 163 °C'de modifiye bitüm 1 saat etüvde bekletilmiştir.

Ameri ve Nasr (2016) yaptıkları çalışmada; bağlayıcıyı sıcaklık kontrollü bir kap içinde 2,800 rpm hızda 160 °C'ye gelene kadar ısıtmışlar ve sonra bitüm ağırlığının % 2.5–15'i olarak farklı yüzdelerdeki polimerleri yavaş yavaş bitüme eklemişlerdir. 4,000

rpm hızla 60 dakikada karışımlar yapılmış ve sonrasında hız 500 rpm'e düşürülerek 10 dakika daha karışıma devam edilmiştir.

Arabani ve Pedram (2016) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığının % 2, 4, 6, 8 ve 10'u kadar YYPE ile modifiye bitümler hazırlamışlardır. Modifikasyonda, 100 ve 200 no'lu eleklerde kalan parçalar kullanılmıştır. Karıştırma parametreleri; 180 °C sıcaklık, 40 dakika süre ve 4,500 rpm hızdır.

Karmakar ve Roy (2016) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığınca % 0.5–4.5 oranlarındaki farklı polimerik atıkları (YYPE, PP, DYPE ve karışımları) ayrı ayrı olarak bitüme ilave etmişler ve 4,000 rpm hızda 45 dakika karıştırmışlardır. Tüm karışımlar 170–180 °C aralığında yapılmıştır.

Kathari (2016) yaptığı çalışmada; 160 °C'de, 1 saat 2,500 rpm hızda karıştırarak bitüm modifikasyonları yapmıştır. Bitüm ağırlığına göre, % 0.5–2.5 aralığında değişen PP lifleri kullanılmıştır.

Khan ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; bitüm ile DYPE ve YYPE'yi, bitüm ağırlığının % 2, 4, 8 ve 10'u olarak 2 saat boyunca 165 °C'de karıştırmışlardır. Kuru ve temiz olan atıklar, mekanik öğütücüyle 0.15–0.75 mm arasında toz haline getirilmiştir.

Köfteci (2016) yaptığı çalışmada; bitüm ağırlığının % 1, 2, 3 ve 4'ü miktarındaki YYPE atıklarını kullanmıştır. Katkı yavaşça bitüme ilave edilmiş ve 500 rpm hızda yaklaşık olarak 15 dakika boyunca 155–160 °C'de karıştırılmıştır. Karıştırıcı sıcaklığı 180 °C'ye getirilmiş, 60 dakika 1,300 rpm hızda karıştırmaya devam edilmiştir.

Rongali ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada; bitüm ağırlığınca % 0.5–2 oranında YYPH'yi (homo polimer YYPE), 180 °C'de 30 dakika sürede bitümle karıştırmışlardır.

Dalhat ve Wahhab (2017) yaptıkları çalışmada; bitüm ile PP, YYPE, DYPE'yi % 2, 4, 6 ve 8 oranlarında karıştırmışlardır. DYPE, 160 °C'de 30 dakika; YYPE, 180 °C'de 60 dakika; PP, 190 °C'de 50 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma hızları 5,000 rpm'dir. % 4 oranlarında her bir plastik atık için karıştırma sürelerinin optimizasyonu, RV ve DSR deneyleri ile yapılmıştır.

Fernandes ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada; modifiye bitümlerin üretimini iki aşamada gerçekleştirmişlerdir. 180 °C'de başlangıç karışımı elde etmek için düşük kesmeli karıştırıcı ile modifikasyon yapılmış ve sonra, polimerleri öğütmek ve homojen modifiye bitümlü bağlayıcı elde etmek üzere 20 dakika boyunca 7,200 rpm'de yüksek kesmeli karıştırıcı ile karışıma devam edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde; çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin özelliklerinden genel olarak bahsedilmiş ve konu ile ilgili detaylar, bu bölümün birinci kısmını oluşturmuştur. Bölümün ikinci kısmında ise, yapılan deneysel çalışmalar ve yöntemleri ele alınmıştır.

3.1. Materyal

Bu çalışmada; atık plastiklerin (PP, YYPE ve PET) birlikte pirolizinden elde edilen katkıları, önce bitümlü bağlayıcı ile modifiye edilmiş ve katkıların bağlayıcı üzerindeki etkisi incelenerek kullanılabilirliği belirlenmiştir. Sonra, katkılı bağlayıcılar ile hazırlanan BSK'ya ilgili deneyler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeleri; agregalar, bağlayıcılar, bitümlü sıcak karışım ve plastikler olarak farklı gruplarda incelemek mümkündür. Aşağıda bu malzemelerle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

3.1.1. Agregalar

Agregalar yol yapımında kullanılan ana malzemedir. Üstyapının ağırlıkça ve hacimce önemli bir kısmını oluşturan agregalar, yola etkiyen yüklerin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bakımdan agregaların özellikleri, yol mühendisleri için çok önemlidir ve değişik tip agregaların özelliklerinin bilinmesi, yolların projelendirilmesi için gereklidir. Yol agregaları orijinlerine göre, doğal ve yapay agregalar olarak iki gruba ayrılmaktadır (İlıcılı ve ark., 2001).

Doğal agregalar, doğal olarak oluşmuş kayalardan fiziksel yolla elde edilirler. Bu agregaların ham maddesi olan kayaların birçok tipi vardır ve bu kayalar değişik yapılarda bir araya gelmiş mineral tane ve kristallerden oluşmuştur. Mineraller başlıca; oksijen, silisyum, alüminyum, demir, magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum ve daha az olarak diğer elementlerden oluşmaktadır. Bir kayanın tanınabilmesi için, içindeki minerallerin ve diziliş şekillerinin (doku) bilinmesi gerekir. Doku tipleri, minarelerin tane büyüklüğü veya çaplarına göre değişmektedir. Doğal kayalar orijinlerine göre; magmatik, tortul (sedimenter) ve metamorfik olarak üçe ayrılırlar (İlıcılı ve ark., 2001). Yol kaplamalarında kullanılan en ideal agregalar, bu kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral (doğal) agregalardır (Tunç, 2004).

Yol yapımında kullanılan doğal agreganın ham maddesi olan doğal kayalar ile ilgili, petrografik yapılara bağlı olarak farklı birçok kaya ismi vardır fakat birçoğu agrega olarak bir başkasından ayrı özellikler göstermediğinden, bu isimlerin bilinme zorunluluğu yoktur. Ayrıca; doğal agregalar dışında cüruf, klinker ve çimento olarak endüstriyel işlemler sonucu elde edilen yapay agregaların da yol üstyapısının çeşitli tabakalarında kullanımı mevcuttur (İlıcılı ve ark., 2001).

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın, kökeni (magmatik, tortul veya metamorfik) ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerdeki fiziksel özelliklerin sağlanması gerekir. Agregalar boyutlarına göre üç grupta incelenir:

- Kaba agrega; 4 no'lu elek (4.75 mm) üzerinde kalan,
- İnce agrega; 4 no'lu elek ile 200 no'lu elek (0.075 mm) arasında kalan,
- Mineral filler; 200 no'lu elekten geçen

Bu 3 grup malzemenin her biri bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder. Bitümlü karışımdaki iri agrega yüzdesi % 40–50'ye çıkarılırsa, iri agrega karışımın mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur; böylece karışımın direncinde önemli bir artış hissedilir. İri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını ince agrega doldurarak, daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Ayrıca, agreganın satıh dokusu da önemlidir. Mineral filler, toplam agreganın çok küçük yüzdesini oluşturduğu halde, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde rol oynar (İlıcılı ve ark., 2001).

Agregaların ve agrega–bağlayıcı karışımların özellikleri, kaplamanın stabilitesi, ömrü, performansı vb. hususları üzerinde en önemli rolü üstlenmektedir. Agregadan beklenen görevleri yerine getirebilmesi için, uygun özelliklere sahip agreganın seçimi en gerekli husustur. Kaplamanın yapısal ve fonksiyonel gereksinimlerinin karşılanması için, agreganın aşağıda belirtilen hususlara sahip olması gerekir:

- ✓ Yeterli içsel sürtünme direnci ve stabilite ile yükleri zemine yayabilmeli ve aşırı deplasman göstermemeli,
- ✓ İklimsel ve kimyasal etkilerin aşındırmasına karşı dirençli olmalı,
- ✓ Statik ve dinamik yükler altında kırılmalara karşı dirençli olmalı,
- ✓ İç gerilmelere (genleşme–büzülme, ıslanma–kuruma, donma–çözülme vb.) karşı dirençli olmalı,
- ✓ Bağlayıcı ile güçlü adezyon yapmalı,
- ✓ Yüzey tabakalarında kullanıldığında; kayma ve sürtünme direnci, tekerlek aşındırması, pürüzlülük, görünüm ve ışık yansıtması, gürültü gibi yüzey özelliklerini sağlamalıdır (Tunç, 2004).

Gerek rijit (beton) kaplamada gerekse esnek (asfalt) kaplamalarda kullanılacak agregalarda aranılan temel özellikler yaklaşık olarak aynıdır. Ancak, kaplamanın tipine ve kullanım amacına göre agregalardan beklenen hususlar farklı olmakta ve agregalarda aranılan özellikler de farklılaşmaktadır. Agreganın asfalt veya çimento ile stabil edilip edilmemesine bağlı olarak, agreganın birtakım özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bunlar arasında; asfalt kaplamalarda kullanılacak agreganın asfaltla iyi bir adezyon yapabilmesi, trafik ve çevre etkilerinden ötürü asfaltın soyulmaya ve aşınmaya karşı direnç göstermesi vb. gibi özellikler sayılabilir (Tunç, 2004).

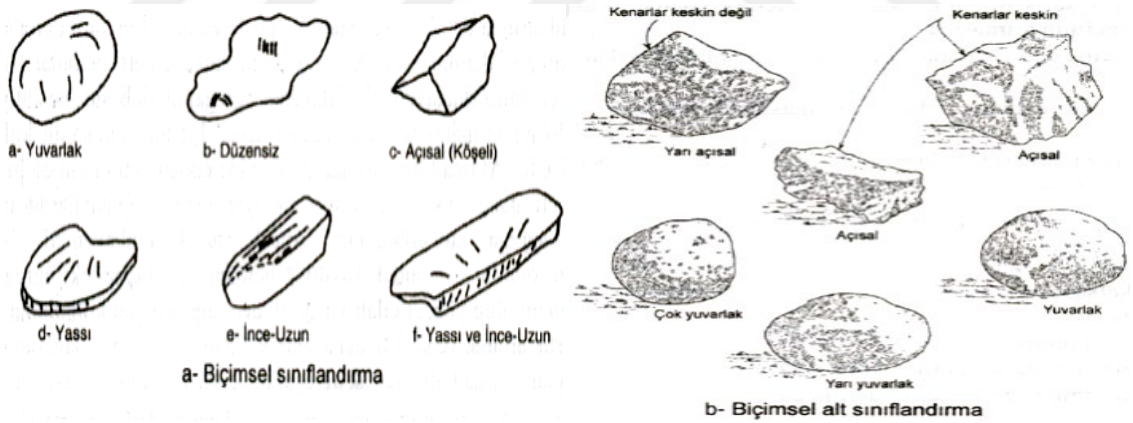
3.1.1.1. Asfalt karışımlarda kullanılan agregaların özellikleri

Asfalt karışımlarda kullanılan agregaların gradasyon, maksimum tane boyutu ve şekli gibi özellikleri sayesinde karışımın stabilitesi artarken; porozite ve tane yüzey dokusu sayesinde kazanılan adezyon ile de karışımın stabilitesi artmaktadır.

Agreganın gradasyonu karışımın stabilite ve işlenebilirlik özelliğini belirler. Gradasyon, agrega harmanını oluşturan tanelerin boyutlarına göre dağılımını ifade eder. Belirli bir karışım için maksimum tane boyutu ve belirli boyuttaki tanelerin bazı limitler dahilinde olması şartnameler ile öngörülür. Yoğun sürekli gradasyonda; en kabadan en inceye kadar tüm boyuttaki agregalar belirli bir yüzdede mevcut olduğundan dolayı, en az boşluk veya en yoğun agrega karışımı elde edilmektedir. Agrega ile yapılan tüm karışımların stabilitesinin yüksek olması için, agrega taneleri arasındaki boşluğun en az olması gerekir. Sürekli gradasyon ile düşük permabiliteli karışımlar elde edilebildiği gibi, bu karışımların sıkışma dirençleri de nispeten daha düşüktür. Bu nedenle, asfalt karışımlarda sürekli gradasyonlar tercih edilmektedir. Karışımdaki en düşük ve yüksek tane boyutları arasındaki fark arttıkça, karışımdaki boşluk oranı azalır.

Trafik yüklerine direkt maruz kalan aşınma tabakaları için daha yoğun bir asfalt tabaka imal etmek gerekir. Binder ve bitümlü temel tabakalarındaki gerilmeler aşınma tabakasına göre daha az ve kalınlıklar daha fazla olduğundan dolayı, bu tabakalarda nispeten daha açık gradasyon ve daha az filler kullanılmaktadır. Agregalar sıkıştırma esnasında ve trafik yükleri altında kırılmaya, parçalanmaya ve aşınmaya karşı dirençli olmalıdır. Açık gradasyonlu agregalar, aynı yük altında yoğun gradasyonlu agregalara göre daha çok aşınmaya yatkındır. Bu nedenle, esnek kaplamalarda daha çok gerilme alan üst tabakaların daha yoğun gradasyonlu olması zorunludur (Tunç, 2004).

Kaynak, işleme yöntemi veya mineraloji ne olursa olsun, yol üstyapısı agregaları kalıcı deformasyona direnmek için yeterli kesme mukavemeti sağlamalıdır. Karışım aşırı yüklenirse, bir kesme düzlemi gelişir ve agrega parçacıkları birbirine doğru ilerler, bu da kalıcı deformasyona neden olur. Bu düzlem boyunca, kesme gerilmesi karışımın kesme mukavemetini aşar. Agrega kayma mukavemeti, karışımın birincil tekerlek izi direncini sağladığı için kritik derecede önemlidir. Agrega nispeten daha az kohezyona sahiptir. Bu nedenle, karışımın kesme mukavemeti esas olarak, agregalar tarafından sağlanan hareket veya parçacıklar arası sürtünme direncine bağlıdır. Açısal, pürüzlü dokulu agregalar yuvarlak ve düzgün dokulu agregalara göre daha fazla direnç sağlar. Bir yük uygulandığında, agrega yapısı daha güçlü olma eğilimindedir, çünkü yük (sınırlama basıncı) agregayı bir arada tutar ve kesme mukavemetini artırır. Açısal bir parça yuvarlak bir parça ile aynı malzeme mukavemetine sahip olsa da, açısal agrega parçacıkları birlikte kilitlenme eğilimindedir ve daha güçlü bir malzeme kütlesi ile sonuçlanır. Yuvarlak agrega parçacıkları birbirini geçme eğilimindedir. İç sürtünme, agreganın birbirine kenetlenme ve neredeyse tek tek parçalar kadar güçlü bir kütle oluşturma yeteneğini geliştirir (Buncher ve ark., 2014).



Şekil 3.1. Agrega tanelerinin değişik şekil ve biçimleri (Tunç, 2004)

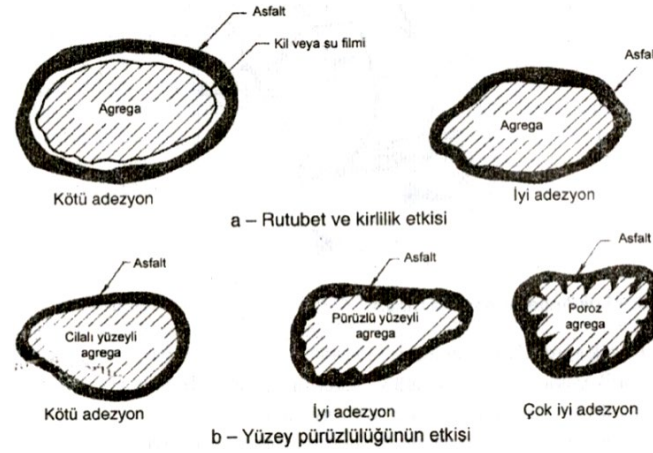
Agrega tanelerinin biçimleri yol kaplamalarında kullanılan karışımların; sıkışma direnci, işlenebilirlik, yoğunluk, stabilite, içsel kenetlenme ve sürtünme açısı, kayma mukavemeti özelliklerine etki ederler. Şekil 3.1’de agrega tanelerinin değişik şekil ve biçimleri; soldaki şekilde (a), genel sınıflandırma ve sağdaki şekilde (b) yuvarlak ve köşeli agreganın alt sınıflandırması olarak gösterilmiştir. Yuvarlak biçimli agreganın işlenebilirlik özelliği, açısal (köşeli) biçimli agregaya göre daha yüksek iken, stabilite yönünden durum tam tersidir. Açısal biçimli agrega tanelerinin temas noktalarının

sayısının daha çok olması, içsel sürtünme açıları ve taneler arası kenetlenme özelliğini artırmakta ve stabilite daha fazla olmaktadır. Açısal kenarlı ve kübik şekilli kırmataş agregaların içsel kenetlenme özelliği, yoğun gradasyonlu agregaların stabilitelerinin artmasında en önemli faktördür. Ayrıca, kırılmış ve açısal biçimli ince agregalar her türlü karışımın stabilitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Yassı ve ince–uzun taneler hem stabilite hem de ayrışma açısından sorun oluşturmaktadır. Bu tip agregaların yük karşısında kırılma dirençlerinin düşük olması nedeniyle kullanımları son derece sakıncalıdır (Tunç, 2004). Asfalt karışımların çoğu hem köşeli hem de yuvarlak agrega taneleri içermektedir. Kaba agrega genellikle bir kırmataş veya kırılmış çakıl ve ince agrega ise genellikle doğal kum (yuvarlak taneler) veya kırma kum olmaktadır. Bu karışımlar esasen mukavemet açısından kırma agregalara, işlenebilirlik ve sıkıştırma kolaylığı açısından da yuvarlak kum tanelerine dayanmaktadır (Uluçaylı, 2002).

Agregaların yüzey yapısı, tanelerin pürüzlülük ve cilalılık durumunu ifade eder. Yüzey dokusu agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyona etki eden önemli bir faktördür. Cilalı yüzeylerin bağlayıcı ile kaplanması kolay olmakla birlikte, adezyon zayıflığından dolayı bu yüzeyler kolaylıkla soyulmaktadır. Bu nedenle, asfalt karışımlarda pürüzlü yüzeyli agregalarla yüksek stabilite ve soyulma direnci elde edilir. Agregaların yüzey pürüzlülüğü fazlaysa işlenebilirlik azalmakta fakat içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti ve asfalt ile adezyon kuvveti artmaktadır. Ancak agreganın boşluk hacmi, sıkışmaya karşı direnci ve aşınma gibi özellikleri de olumsuz etkilenmektedir.

Agrega tanelerinin porozitesi (su emme yeteneğine sahip boşlukların miktarı) belli bir seviyede olması gerekir. Porozite özelliği agreganın diğer özelliklerinden daha az önemli olsa da, adezyon için en önemli husustur. Yeterli poroziteye sahip agrega taneleri bağlayıcının emilmesine olanak sağlayacağından, agrega ile bağlayıcı kuvvetli bir adezyon oluşturur; böylece stabilitenin artması ve suyun etkisinden dolayı asfalt film tabakasının daha az soyulması sağlanır. Ancak aşırı poroz agregalar nedeniyle stabilite azalır, daha fazla asfalt kullanımı gerekir ve sıcak havalarda kuma–terleme problemleri doğar. Bu nedenle, poroz olmayan veya çok poroz olan agregalar asfalt karışımlarda kullanılmamalıdır (Tunç, 2004).

Şekil 3.2’de agrega ile bağlayıcı adezyonu, farklı agrega taneleri için gösterilmiştir. Yukarıdaki şekilde (a); agrega etrafındaki su (nem) tabakası ve kil topağı gibi kirlerin, agrega–bağlayıcı kenetlenmesine olumsuz etkisi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde (b); pürüzlü yüzeyli veya poroz agregalarda, bağlayıcının absorbe (emilme) edilmesi ile oluşan iyi adezyon görülmektedir.



Şekil 3.2. Agregat bitümlü bağlayıcı adezyonu (Tunç, 2004)

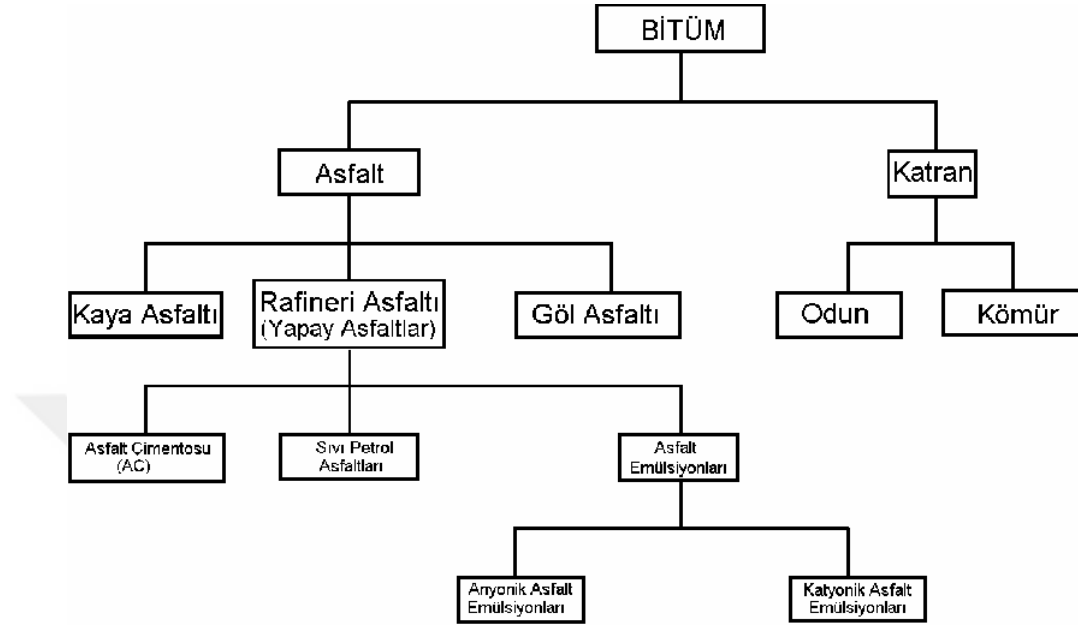
Agregat tanelerinin yüzey dokusu ve gözenekliliği (porozite) gibi adezyona etki eden önemli özelliklerinin yanı sıra, asfalta yatkinlık özelliği olan soyulma dirençleri de önemlidir. Bağlayıcının su etkisi ile agregadan sıyrılma–ayrılma (soyulma) hareketi, bir agregayı asfalt karışımlar için uygunsuz hale getirebilmektedir. Bu tür malzemeler hidrofilik (su sever) olarak adlandırılmaktadır. Kuvarsit ve bazı granitler gibi silisli agregalar soyulma açısından özel bir dikkat gerektirebilmektedir. Su etkisi altında asfalt filminin sıyrılmasına karşı yüksek direnç gösteren agregalar ise, hidrofobik (su sevmez) olarak adlandırılmaktadır. Kireçtaşı ve dolomit soyulmaya karşı yüksek direnç gösteren ve asfalt karışımlara uygunluk sağlayan malzemelere örnektir (Uluçaylı, 2002).

Asfalt kaplama tabakasında kullanılan agregaların şimdiye kadar bahsedilen gradasyon, sağlamlık, tane şekli ve biçimi, yüzey dokusu, porozite ve soyulma gibi önemli özelliklerinin yanında; aşınma tabakasında kullanılan agregalar, trafik etkisine direkt olarak maruz kaldığı için cilalanmaya karşı da dirençli olmalıdır (Tunç, 2004).

3.1.2. Bitümlü bağlayıcılar

Bitüm; doğal veya piyrogenik (doğal, ısı etkisiyle ergime sonucu oluşan) kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bir kombinasyonudur ve sıvı, yarı–katı veya katı halde olabilen, metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır. Asfalt ve katran bitümün iki ana grubunu teşkil etmektedir. Asfalt, koyu kahverengiden siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvam bakımından katı, yarı–katı veya sıvı halde olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün arıtılmasından elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Asfaltlar, kökenlerine göre doğal ve

yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal asfalt, doğada genellikle mineral maddeler ile karışmış halde bulunur. Göl ve kaya asfaltları bu sınıfa girerler. Üstyapıda kullanılan bitümlü malzemelerin sınıflandırılması şekil 3.3’de verilmiştir (İlıcılı ve ark., 2001).



Şekil 3.3. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması (İlıcılı ve ark., 2001)

Yapay asfaltlar, ham petrolün arıtılmasından elde edilirler. Petrol kuyularından çıkarılan ham petrol; rafinerilerde pompalarla tanklara, buradan da ısıtma kulelerine gönderilerek sıcaklık yükseltilir ve daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kolay uçucu olan kısımlar, kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrılır. Bunlar hafif ürünleri, daha az uçucu olanlar orta ürünleri ve en ağır uçanlar ağır ürünleri oluştururlar. Başlıca asfaltı içeren kalıntı maddeler ise, kulenin dibinde birikir. Bu şekilde benzin (gazolin), gaz yağı (kerosen), dizel yağları (mazot), madeni yağlar ve ağır kalıntı maddeleri olmak üzere, ham petrol başlıca 5 kısma ayrılır. Bunların hepsine gerektiğinde yeniden damıtma işlemi uygulanarak daha farklı petrol ürünleri elde edilir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi: yapay (rafineri) asfaltlar; asfalt çimentosu (AC), sıvı petrol asfaltları ve asfalt emülsiyonları olmak üzere çeşitli tiplere ayrılır (İlıcılı ve ark., 2001).

Ham petrolün damıtılmasıyla dipte kalan kalıntı maddeleri çeşitli işlemlerden geçer ve geriye AC (penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcılar) kalır. Farklı sınıflarda (istenilen penetrasyonda) AC ürünleri, koşulların değiştirilmesiyle elde edilebilir. AC; kaynama noktası düşük (kolay uçan) bir çözücü (benzin, nafta) ile karıştırılırsa, çabuk kür olan (RC) sıvı petrol asfaltları; orta derecede uçucu bir çözücü (gaz yağı) ile

karıştırılırsa, orta hızda kür olan (MC) sıvı petrol asfaltları; ağır yağlarla inceltilerek karıştırılırsa, yavaş kür olan (SC) sıvı petrol asfaltları elde edilir. Asfalt emülsiyonları ise, AC küreciklerinin su içinde (çözünmeden üniform halde) dağılmasıyla elde edilir. Bir asfalt emülsiyonu agregayla karıştırıldığında veya yolun sathına püskürtüldüğünde; asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışırlar ve serbest kalan su buharlaşır. Su buharının kesilme hızına göre; asfalt emülsiyonları çabuk kesilen (RS), orta hızda kesilen (MS) ve yavaş kesilen (SS) olarak 3 farklı gruba ayrılır. Ayrıca emülgatörün cinsine göre; anyonik ve katyonik olarak, asfalt emülsiyonları iki sınıftır.

Yol üstyapılarında kullanılan AC'ler, özellik ve kıvam bakımından direkt olarak bitümlü kaplamalarda kullanılmak için hazırlanmıştır. Sıvı petrol asfaltları, asfalt malzemesi ve çimentolu temel tabakalarının satırlarında kür malzemesi olarak; asfalt emülsiyonları ise, sathi ve penetrasyon makadam yol kaplamalarında, karışım ve harç kaplamalarında ve yama ile onarım işlerinde kullanılırlar (İlcalı ve ark., 2001).

Asfalt tabakaları, agrega ve uygun oranda katılan AC ile elde edilirler. Asfalt karışımlarının kohezyonu AC tarafından sağlanırken; agrega, karışımın içsel sürtünme direnci ve stabilitesinden sorumludur. Fakat AC; agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında karışımın dağılmasını önlemekte, oluşturulan düzgün yüzeyler ile sürüş konforu sağlamakta, kohezyonu ile karışımın stabilitesini artırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliği sağlamaktadır. Ağırlıkça en fazla % 5–7 ve hacim olarak en fazla % 13–15 gibi küçük oranlarda kullanılsa da, esnek kaplamalar için çok önemli bir malzemedir (Tunç, 2004).

Yollarda her geçen gün gittikçe artan toplam dingil yükleri ve daha yüksek performans talebi, üstyapıların uzun süreli davranışının tahminini zorunlu kılmıştır. Bir üstyapının performansı, tasarım, uygulama ve kullanılan malzemenin kalitesinin dahil olduğu birçok faktöre bağlıdır. Bitüm, karışım içerisinde hacimce küçük bir yer tuttuğu halde, dayanıklılık ve bitümlü karışıma viskoelastik özellik kazandırması sebebiyle karışımlarda çok önemli bir role sahiptir. Esas olarak, bitümün yol üzerinde tatmin edici bir performans göstermesi; *reoloji*, *kohezyon*, *adezyon* ve *dayanıklılık* olmak üzere dört özelliğin kontrol edilmesiyle sağlanabilir (Whiteoak, 2004).

3.1.2.1. Bitümün kimyasal bileşimi, yapısı ve reolojisi

Belirli bir sıcaklıktaki bitüm reolojisi, malzemede hakim bulunan hidrokarbon moleküllerin kimyasal bileşimi ve fiziksel yapısı ile belirlenmektedir. Bileşimde ve

yapıda veya her ikisinde gerçekleşecek değişiklikler reolojide de bir değişikliğe sebep olacaktır. Bitüm reolojisindeki değişiklikleri anlamak için, bitümün bileşim ve yapısının reolojiyi etkileyecek ne tür bir etkileşim içerisinde olduğunu bilmek önem taşımaktadır.

Bir bitümün içyapısının şekli geniş oranda, mevcut moleküler türlerin kimyasal bileşimi ile belirlenmektedir. Bitüm; hakim durumdaki hidrokarbon moleküller ile az miktarda, yapısal olarak benzer türler ve sülfür, nitrojen ve oksijen atomları içeren fonksiyonel grupların karmaşık bir kimyasal karışımıdır. Ayrıca, bitüm az miktarda inorganik tuzlar ve oksitler veya kalsiyum, vanadyum, nikel, demir ve magnezyum gibi metalleri de içerir. Bitümlerin çoğunluğunun; karbon (% 82–88), hidrojen (% 8–11), sülfür (% 0–6), oksijen (% 0–1.5) ve nitrojen (% 0–1) elementlerini içerdiğini, farklı ham petrolerden imal edilen bitümlerin analiz sonuçları göstermiştir. Bitümün kesin içeriği; malzemenin elde edildiği ham petrolün kaynağına, imalat sırasında yapılan değişime ve ardından kullanma süresince oluşan yaşlanmaya göre değişmektedir. Bu kimyasal içerik oldukça karmaşık olduğundan, bitümün tam kimyasal analizi zahmetli incelemeler gerektirmekte ve sonuç olarak reolojik özelliklerle korelasyonu imkansız hale getirecek miktarda çok veri ortaya çıkmaktadır (Whiteoak, 2004).

Bitüm, asfaltın ve maltenlerin olmak üzere iki geniş kimyasal gruptan oluşur ve düşük moleküler ağırlıklı yağlı ortamlar (maltenler) içerisinde çözünmüş veya dağılmış yüksek moleküler ağırlıklı asfaltın damlacıklarından oluşan bir süspansiyon (koloidal) sistemdir. Damlacıklar asfaltın etrafını bir kılıf gibi çeviren yüksek moleküler ağırlıklı reçinelerdir. Damlacıkların merkezinden uzaklaştıkça, daha düşük elektriksel yüklere sahip reçineler bulunmakta ve bu katmanlar dışarıya doğru daha düşük aromatik yağlı bir dağılım ortamı oluşturmaktadır. Maltenler; doymuşlar, aromatikler ve reçineler olarak alt gruplara ayrılmaktadır. Asfaltın; esasen karbon ve hidrojenle oluşan ve bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren, siyah veya kahverengi amorf katılardır. Oldukça yüksek moleküler ağırlığa, elektriksel yüklere (polar) sahip, karmaşık aromatik maddelerdir ve bitümün % 5–25’ini oluşturur. Bitümün reolojik özellikleri üzerinde, asfaltın miktarı önemli etkilere sahiptir. Asfaltın miktarının artırılması ile daha düşük penetrasyon ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip, daha sert ve sonuç olarak daha yüksek viskoziteli bitümler elde edilmektedir. Reçineler; asfaltın gibi geniş oranda hidrojen ve karbondan oluşmakta, az miktarda oksijen, sülfür ve nitrojen içermektedir. Koyu kahverengi renkte katı veya yarı katı haldedir ve elektriksel olarak oldukça yüklüdür. Bu özellikleri sayesinde güçlü bir yapışkanlık sağlamaktadırlar ve asfaltın ayıran veya yayılmasını sağlayan katılardır. Aromatikler; bitüm içerisine dağılmış

asfaltlenlerin yayılımları için gereken ortamın büyük kısmını teşkil eden, bitümün % 40–65'ini oluşturan ve en düşük moleküler ağırlıklı bileşenlerden oluşan koyu kahverengi viskoz sıvılardır. Doygunlar; düz ve zincir şeklinde alifatik hidrokarbonlardır. Saman veya beyaz renkteki polar olmayan viskoz yağlardır. Ortalama moleköl ağırlık aralığı aromatlklere benzerdir, bitümün % 5–20'sini oluşturur ve parafinli veya parafinsiz bileşenlerden oluşur (Whiteoak, 2004).

Bitümü oluşturan dovgunlar, aromatikler, reçineler ve asfaltlenlerin oranlarının sistematik karışımı, bitümün reolojisini etkiler. Asfaltlen içeriğini sabitleyip, diğerlerinin konsantrasyonunu değıştirdiğimizde:

- Sabit dovgun reçine oranında, aromatik içeriğı artırıldığında kesme–kayma mukavemetindeki küçük miktarda azalmadan başka reolojide etki oluşmaz.
- Sabit reçine aromatik oranında, dovgun içeriğı artırıldığında bitüm yumuşar.
- Sabit dovgun aromatik oranında, reçine eklendiğinde ise; bitüm sertleşir, penetrasyon indeksi azalır ve viskozite yükselir.

Böylece, bitümün reolojik özelliklerinin asfaltlen içeriğine bağılı olduğu anlaşılır. Asfalt karışımlarının davranışı, bitümlü bağlayıcının reolojisi ile doğrudan ilişkilidir ve yükleme süresi ile sıcaklık reolojiyi etkileyen unsurlardır (İlıcılı ve ark., 2001).

Asfaltlenler bitüm içinde dağılmış bir faz olarak yer alırken, maltenler sürekli faz halindedir. Asfaltlenler, çözünmeye yatkındır ve oldukça yüksek moleküler ağırlıklıdır. Maltenler, yağ ve reçinelerden oluşmuştur. Bitümün yağlı kısımlarını, aromatikler ile dovgun hidrokarbonlar oluşturmuştur. Bitümün katılığına asfaltlenlerin, adezyon ve düktilitesine maltenlerin etkin olduğu sanılmaktadır. Yağlar ve reçineler, viskozite yani akışkanlık üzerinde etkin olmaktadır (Tunç, 2004).

3.1.2.2. Bitümün dayanıklılığı

Bitümlü kaplama tabakalarının bozulmadan hizmet ömrünü tamamlaması için; depolama ve üretim sırasında veya hizmet ömrü boyunca, bitümün aşırı sertleşmemesi gerekir. Bitüm oksijen, ultraviyole ışınları ve sıcaklık değışimlerinden etkilenmektedir. Bitümün sertleşmesine ilişkin dört esas mekanizma; oksitlenme, uçucu bileşen kaybı, fiziksel sertleşme ve sızma sertleşmesi olarak tanımlanmıştır.

Bitüm havayla temasa geçtiğinde yavaşça oksitlenir. Oksijen içeren gruplar, daha yüksek moleküler ağırlıklı damlacıklarla bir araya gelir ve sonuç olarak bitümün viskozitesi artar. Oksitlenme derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm filminin kalınlığına

büyük ölçüde bağlıdır. Oksitlenme sonucu sertleşme, yaşlanmanın ana sebebi olarak kabul edilmektedir fakat diğer faktörler de göz ardı edilmemelidir.

Uçucu bileşenlerin kaybı, esas olarak sıcaklığa ve dış etkenlere maruz kalma koşullarına bağlıdır. Penetrasyon dereceli bitümlerdeki uçucu bileşenler göreceli olarak daha az olduğundan, uçucu bileşen kaybından kaynaklı sertleşme miktarı nispeten az olmaktadır (Whiteoak, 2004).

Fiziksel sertleşme, bitüm ortam sıcaklığında kaldığında ve bitüm moleküllerinin yeniden yönelmesi ile petrol mumlarının yavaş kristalleşmesi söz konusu olduğunda ortaya çıkmaktadır. Fiziksel sertleşme geri dönüşümlüdür ve bitümün ısıtılması halinde orijinal viskozite tekrar kazanılır. Fiziksel sertleşme, bitümün zaman içerisinde, belirli aralıklarla ısıtılmadan penetrasyonun ölçülmesi ile laboratuvar ortamında incelenebilir. Zaman ilerledikçe, penetrasyonda düşme gözlenecektir.

Sızma sertleşmesi, bitümden mineral agrega içerisine yağlı bileşenlerin sızması ile oluşmaktadır. Bu tür sertleşme, hem bitümün sızma eğilimine hem de agreganın porozitesine bağlıdır (Whiteoak, 2004).

Sertleşmenin meydana geldiği haller oldukça fazla ve birbirinden farklıdır. Depolama süresince, bitüm, günler veya haftalar boyunca oldukça yüksek sıcaklıklarda, kütle halinde bulunur. Kütle halinde (büyük miktarda) depolandığında çok az sertleşme meydana gelir. Bu durum, oksijene maruz kalan bitüm yüzeyinin tüm kütleyle oranının çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Karıştırma, sıcak depolama, taşıma, serme ve sıkıştırma süresince ise, bitüm, kısa bir zaman diliminde yüksek sıcaklıklara ince bir tabaka halindeyken maruz kalmaktadır. Bu durum oksitlenme ve uçucu bileşen kaybı için oldukça elverişlidir. Sertleşme miktarı sıcaklık, karıştırma süresi, bitüm miktarı ve film kalınlığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Sertleşmenin getireceği zararların en aza indirilmesi, tüm bu faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Ayrıca, karıştırma şekli yani plent tipi de sertleşmeyi etkileyen faktörlerden biridir. Hizmet aşamasında ise, bitüm, çok uzun bir süre boyunca düşük veya orta sıcaklıklara yine ince bir tabaka halinde maruz kalır. Hizmet süresinde, hava girişi önem taşımaktadır ve bu durum karışımdaki boşluk oranına bağlıdır. Yoğun, iyi sıkıştırılmış karışımlarda normal şartlarda küçük değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Bitüm sertleşmelerinin büyük bir kısmı karıştırma sırasında, daha az kısmı ise depolama, taşıma ve uygulama sırasında ve uzun hizmet süresinde meydana gelir (Whiteoak, 2004).

Bitümün sertleşmesi genel olarak; bitümün adezyon kabiliyetinin azalması ve suda çözünür hale dönüşebilmesi, gevrekleşme sonucu asfalt kaplamada çatlakların

oluşması gibi olumsuz sonuçlar doğurur. Dolayısıyla bitümün sertleşmesi ne kadar az ve geç olursa, kaplamanın ömrü de o kadar artacaktır. Bu nedenle, bitümün dayanıklılığı sertleşme direnci olarak tanımlanmaktadır (Tunç, 2004).

3.1.2.3. Bitümün adezyon (yapışma) özelliği

Bitümün ana işlevlerinden birisi de, agregaları birbirlerine bağlayan yapışkanlık özelliğidir. İyi sıkıştırılmış bitümlü karışımlarda yapışma özelliğinin ortadan kalkması problemine az rastlanmaktadır fakat yapışkan bağın bozulduğu ve mukavemetin ciddi derecede azaldığı durumlara rastlanmaktadır. Yapışkan bağın bozulması, bitümün su etkisi ile agrega yüzeyinden sıyrıldığı “soyulma” olayı olarak adlandırılmaktadır.

Temiz, kuru olmaları ve çok fazla toz barındırmamaları koşuluyla yol agregası türlerinin büyük çoğunluğuyla bitümler iyi yapışma sağlarlar fakat agregaların doğal yapısı, bitüme yapışma konusundaki farklılıklar yönünden adezyon üzerinde önemli derecede etkilidir. Yapışkan bağ elde etmek için bitümün agregayı ıslatması gereklidir ve bu işlem büyük oranda bitümün viskozitesine bağlıdır. Viskozite yüksek olduğunda, bitümün agregayı ıslatması daha uzun zaman alacaktır ve bu, uygulamada istenilen bir durum değildir. İyi bir adezyon elde edildikten sonra, su etkisi olmaksızın agrega ile bitüm arasındaki bağın çözülmesi çok beklenen bir durum değildir (Whiteoak, 2004).

Su varlığı altında adezyon problemleri iki şekilde ortaya çıkmaktadır; birincisi agreganın karışımdan önce ıslak olması, ikincisi de malzeme serildikten sonra yağmur etkisidir. Normal şartlarda soğuk ve ıslak bir agregayı bitümle kaplamak mümkün olmadığı için, su tabakasının ortadan kaldırılması agreganın ısıtılmasıyla sağlanır. Düşük oranda boşluk içeren yoğun asfalt kaplamalarda soyulma ihtimali daha azdır. Geçirgenliği yüksek karışımlarda, bazıları göreceli olarak daha yoğun olsalar bile, içsel kohezyon kaybına ve kaplamanın dağılmasına yol açan soyulma riski vardır. Bu risk, agrega ile bitümün birbirlerine yakınlığının ve neticede suyun etkisine karşı direnç yeteneğinin bir fonksiyonudur. Agregaların çoğunluğu iyi direnç sağlarken, bir kısmıysa sağlayamamaktadır fakat bu, ıslak hava koşullarının belli tür agregalar için kaçınılmaz olarak problem oluşturacağı anlamına da gelmemektedir. Yalnızca, bu durumlarda risk daha çok artmaktadır (Whiteoak, 2004).

Bitüm–agrega adezyonunu etkileyen faktörler oldukça karmaşıktır. Üretim ve yapım sırasında bu faktörlerin yaklaşık olarak % 80'i kontrol edilebilir. Çizelge 3.1’de bu faktörlerin bir kısmı belirtilmiştir (İlcalı ve ark., 2001).

Çizelge 3.1. Bitüm/agrega bağıni etkileyen malzeme ve özellikleri ve dış etkiler (İlcalı ve ark., 2001)

Agrega Özellikleri	Bitüm Özellikleri	Karışım Özellikleri	Dış Etkiler
Mineroloji, Yüzey dokusu, Porozite, Şekil, Dayanıklılık, Yüzey alanı, Rutubet içeriği, Absorpsiyon, Toz, Hava etkisi	Reoloji, Elektriksel polarite, Kimyasal bileşen cinsleri ve oranları	Boşluk oranı, Geçirgenlik, Bitüm oranı, Karışım tipi, Bitüm film kalınlığı, Filler tipi, Agregada gradasyonu	Yağmur, Nem, Tuz, PH derecesi, Trafik, Sıcaklık, Tasarım, İşçilik, Drenaj

Çizelge 3.1’de görüleceği gibi; adezyona etki eden birçok faktör olmasına rağmen, agreganın kuru, yeterince sıcak, bir miktar emici ve temiz olması ile bitümün yeterince akışkan hale kadar ısıtılması gibi hususlar diğerlerine göre daha önemli rol oynamaktadır. Asfalt kaplamaların stabilitesi, karışımdaki agregada taneleri ile bağlayıcı arasındaki adezyona bağlıdır. Bağlayıcının adezyon özelliği, kohezyon özelliğinden farklıdır. Ancak asfalt kaplamaların kohezyon özelliği, bağlayıcının agregaya yapışma yeteneği yani adezyona bağlıdır. Adezyon, esnek kaplamaların ömrü için en önemli faktörlerden biridir. Kaplama yüzeylerindeki kusurların büyük kısmı adezyon eksikliği veya soyulmadan kaynaklanmaktadır. Bitümün soyulması sonucu karışımın kohezyonu azalacağından stabilitesi de düşecektir. Soyulmayı önlemek amacıyla; kimyasal katkı, hidrokarbon esaslı yağlı aminler ve kireç katkısı kullanılmaktadır. Sıcak asfalt karışımlara filler yerine belirli miktar kireç katarak, karışımın suya karşı hassasiyeti azaltılmakta ve durabilite ve adezyon artırılmaktadır. Kireç miktarı genellikle agregada ağırlığının % 0.5–1.5’u arasındadır (Tunç, 2004).

3.1.2.4. Bitümün kohezyonu, hacimsel genişmesi ve ısı özellikleri

Bitümün kohezyonu, yük altında kopmadan uzayabilme yeteneğidir ve karışımın kayma mukavemetine etki etmektedir. Bitümün adezyon ve kohezyon özellikleri, asfalt karışımların stabilitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Kohezyon mukavemeti, 25 °C’deki düktilite (sünme) testi ile karakterize edilmektedir. Bitümlü bağlayıcı düşük ısılarında büzülerek gevrek davranış gösterir ve kaplamada düşük ısı çatlakları oluşur. Eğer bitüm yeterince sünek ise, bu tip çatlaklar az olmakta veya hiç olmamaktadır.

Bitümlerin hacimsel genişleme katsayısı, agreganınkinden yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bitüm ve agregadan oluşan karışımların ısı ile genişmesi sırasında, bitüm agregadan daha fazla genişleyeceği için, bitüm karışımdan dışarıya (kaplama yüzeyine) çıkacaktır. Bu olaya kuma veya terleme denir. Bunu önlemek için, asfalt karışımlarında belli bir boşluk bırakılması gerekir. Böylelikle, genişleme sırasında boşluklar bitümle

dolacak ve kuma olayı engellenmiş olacaktır. Ayrıca, ısının düşmesi ile büzülmeler oluşacağından dolayı yağmur suları kaplamanın içine sızabilmektedir (Tunç, 2004).

Bitümlerin ısı iletkenliği, agregalara göre daha düşüktür. Yani agregalara göre daha geç soğur ve ısınırlar. Dolayısıyla asfalt kaplama, bitümlü bağlayıcıya göre daha çabuk soğur. Bu durum, asfalt karışım içinde farklı büzülmelerden dolayı ilave gerilme oluşturmaktadır. Ayrıca, bitümlerin ısıyı absorbe etme özellikleri de vardır. Bu nedenle, aşınma tabakasından daha alttaki tabakalarda ısının absorbe edilmesinden dolayı daha çok genleşme beklenmelidir. Ortam ısısı 30 °C iken, kaplamanın birkaç cm. derinliğinde 70 °C'ye kadar çıkabilmektedir (Tunç, 2004). Sonuç olarak, bitümlerin farklı genleşme ve ısı özelliklerinden dolayı, karışımın yeterli boşlukta yapılması son derece önemlidir. Bununla birlikte, gereğinden fazla boşluğun da stabilite düşüklüğü, soyulma gibi ilave problemler oluşturacağı da unutulmamalıdır.

3.1.2.5. Modifiye bitümler

Bitümün farklı kimyasal bileşiklerinin birbirleriyle olan karmaşık ilişkileri tam olarak bilinmemektedir. Aynı kuyudan alınan ham petrol, aynı rafineride üretilmiş olsa bile farklı davranış sergileyebilmektedir. Dolayısıyla, bitüm çok karmaşık bir yapıya sahiptir ve istenilen özellikleri de kontrol altına alınamamaktadır. Bu nedenle, bitümden istenilen özellikleri sağlamak veya iyileştirmek için bitüme veya asfalt karışıma bazı katkıları katılmaktadır. Bu şekilde modifiye bitümler veya modifiye karışımların üretimi son yıllarda hızla yaygınlaşmaktadır (Tunç, 2004).

Bitüm, termo-plastik bir malzeme olduğu gibi visko-elastik bir malzemedir ve bu özellikler reolojik davranışlar üzerinde etkin bir rol oynamaktadır. Bitümün ısıtılması ile elastik katıdan viskoz sıvıya dönüşüm olduğu gibi, hızlı yüklemelerde elastik ama yavaş yüklemelerde viskoz davranış görülmektedir. Dolayısıyla ısı ve yükleme süresi, bitümün ve dolaylı olarak karışımın reolojik davranışını da belirlemektedir. Yük tatbik edildiğinde, ani elastik ve zamana bağlı olarak yavaş yavaş artan viskoz deformasyonlar gözlenir. Yükün kalkması halinde ise; elastik deformasyon aniden kalkar, geciktirilmiş elastik deformasyon zaman içinde yavaş yavaş kalkar ve kalıcı deformasyon görülür. Bitüme birtakım plastomerler katılarak, viskoz davranış modifiye edilir ve malzemenin elastik davranışında bir değişim olmasa da daha katı veya viskoz olması sağlanabilir. Bitüme elastomer katılarak, viskoz deformasyon ile yorulma direnci artırılmakta ve düşük ısılarda esneklik iyileştirilebilmektedir (Tunç, 2004).

Bitüm, bitümlü karışımların visko-elastik özelliklerinden sorumlu olduğu için, üstyapının performansı üzerinde önemli bir rol oynar. Bir bitüm modifiye edicisinin ana rollerinden birisi, başka sıcaklıklarda bağlayıcının veya karışımın özelliklerini olumsuz etkilemeden, karışımın yüksek sıcaklıklar altında kalıcı deformasyona karşı direncini artırmaktır. Bitümün elastik bileşenini artırarak viskoz bileşenin azaltılması veya bitüm sertleşmesi yoluyla, karışımın visko-elastik tepkisinin ve kalıcı şekil değiştirmesinin azaltılması gerçekleştirilmektedir. Bitümün sertliğinin artırılmasıyla, karışımın dinamik rijitliği yükselecek ve dolayısıyla bitümün yükü yayma yeteneği ile kaplamanın yapısal mukavemeti ve beklenen tasarım ömrü iyileşecektir. Ayrıca, aynı yapısal mukavemeti elde edebilmek için, daha ince bir tabaka oluşturulacaktır. Bitümün elastik bileşeninin artırılması, yüksek çekme deformasyonlarının bulunduğu ortamlarda büyük önem taşıyan esnekliği de geliştirecektir (Whiteoak, 2004).

Modifiye edici maddenin etkili olabilmesi ve pratik ve ekonomik uygulanması için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır (Whiteoak, 2004):

- Kolayca bulunabilir olmalıdır.
- Bitümle karıştırma sıcaklıklarında bozulmamalıdır.
- Bağlayıcıyı; karıştırma ve serme sıcaklıklarında fazla viskoz, sıkıştırma ve hizmet sıcaklıklarında ise çok rijit ve kırılgan hale getirmemelidir.
- Yüksek hizmet sıcaklıklarında akmaya karşı direnci iyileştirmelidir.
- Ekonomik olmalıdır.

Modifiye edici madde bitüm ile karıştırıldığında, karışım aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Whiteoak, 2004):

- ❖ Depolama, uygulama ve hizmet aşamalarında fiziksel, kimyasal ve katkı ile geliştirilmiş özelliklerini korumalıdır.
- ❖ Geleneksel ekipmanlar ile işlenebilmelidir.
- ❖ Normal uygulama sıcaklıklarında kaplama özelliklerini sağlamalıdır.

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilginin artmasında etkili olan bazı hususlar şöyle sıralanabilir (İlcalı ve ark., 2001):

- ✚ Ham petrol ve bitüm fiyatlarında her zaman artış tehlikesi vardır.
- ✚ Yüksek maliyetler daha ince kaplamaların inşası eğilimini doğurmuş ve bu durumda da hizmet ömürlerinde düşüşler görülmüştür.
- ✚ Trafik yüklerinde önemli artışlar olmuştur.
- ✚ Kaynak sıkıntıları sebebiyle gerekli onarımların zamanında yapılmaması durumuyla oldukça sık karşılaşılmaktadır.

- ✚ Özel durumlara karşı dayanımın artırılması gereksinimleri oluşmaktadır.
- ✚ Bazı endüstriyel atıkların ortadan kaldırılabilmesi veya başka bir yere nakledilmesi konusunda oluşan çevreci ve ekonomik baskılar sonucu, bu atıkların bitüm katkı maddesi olarak kullanılması düşüncesi oluşmuştur.
- ✚ İnşaat ekipmanlarındaki gelişme, katkı kullanılması olanağını sağlayacak düzeye ulaşmıştır.

Bu ve bunun gibi hususlar sebebiyle, dünyada modifiye bitüme olan ilginin artmasına paralel olarak, ülkemizde de bu konuda birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Katkı maddesi bitüme katılarak “modifiye bitüm” veya asfalt plentinde karışıma katılarak “modifiye karışım” elde edilir. Bitüm modifikasyonunda; modifiye bitüme çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak, bitüm özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi mümkün olabilmekte ve modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma vb. gibi sorunlarla karşılaşmamakta fakat karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır (İlıcılı ve ark., 2001).

Esnek kaplamaların gerek stabilite gerekse performans yönünden üstün nitelikli, daha uzun ömürlü, bakım-onarım maliyeti ve gereksinimin daha az olması arzulanır. Bunun için kalıcı deformasyonlar, yorulma ve düşük ısı çatlakları, su etkisiyle soyulma ve düşük durabilite gibi başlıca kaplama kusurlarının en aza indirgenmesi gerekir. Çok sık karşılaşılan bu kusurların giderilmesinde, modifiye bitüm kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kullanılan katkılar, cins ve miktar olarak farklı bitümlerde değişik sonuçlar oluşturmakla birlikte aynı bitümde dahi farklı oranlarda modifiyer katıldığında, sonuçlar farklılaşmaktadır. Bu bakımdan katkının cinsi ve miktarının belirlenmesi önemli bir husustur. Ayrıca; doğal veya yapay kauçuk, termoseting (ısıtıldığında geri dönüşümsüz sertleşen) veya termoplastik (ısıtıldığında yumuşayıp, soğutulduğunda tekrar sertleşen) polimerler vb. modifiyerlerin (genellikle polimerler) bitüme ilavesinde, polimer/bitüm uyumu da önemlidir. Dolayısıyla, hem modifiye bitümün özellikleri hem de katkı/bitüm uyumu açısından cins ve miktarın doğru saptanması gerekir. Bunun için katkılı bitüme yapılan birtakım deneyler, modifiye edilmemiş bitüme de yapılarak karşılaştırılmalıdır. Katkı cinsi ve miktarı dışında, polimer/bitüm homojenliği açısından karışım süresi, ısısı

ve ekipmanın belirlenmesi gibi karışım prosesine de karar verilmelidir. Uygun cins ve miktarda bitüme katılan polimerler, bitüm içinde şişerek kimyasal bileşenlerle karşılıklı etkileşmekte ve bitüm içerisinde uygun ağ oluşumunu sağlamaktadır. Bunun sonucunda orijinal bitümün özellikleri değişmekte ve istenilen sonuçlar alınabilmektedir. Ayrıca, bitümü modifiye etmek amacıyla kullanılan katkıların yüksek ve uzun süreli ısılarda değişime uğramaması da gerekmektedir (Tunç, 2004).

Bitüm katkı maddeleri çeşitli biçimlerde sınıflandırılmaktadır. Katkı maddesinin tipini, örneklerini ve bitüm kıvamına etkisini gösteren genel bir sınıflandırma, çizelge 3.2’de verilmiştir (İlcalı ve ark., 2001).

Çizelge 3.2. Bitüm katkı maddelerinin genel sınıflandırılması (İlcalı ve ark., 2001)

Katkı tipi	Katkı özellikleri	Bitüm kıvamına genel etkisi
1. Filler	– Minarel filler: Taş tozu, Kireç, Portland çimentosu, Uçucu kül – Karbon siyahı – Sülfür	Sertleştirme
2. Ekstender (Genleştirici)	– Sülfür – Ligrin (Odun özü)	Sertleştirme
3. Kauçuk a. Doğal lateks (kauçuk ağacı özsuğu) b. Yapay lateks c. Blok kopolimer d. İşlenmiş kauçuk	– Doğal kauçuk – Stiren butadien (SBR) – Stiren butadien stiren (SBS) – Dönüştürülmüş kauçuk	–
4. Plastik	– Polietilen (PE) – Polipropilen (PP) – Etivinil asetat (EVA) – Polivinil klorür (PVC)	Sertleştirme
5. Bileşim	– 3 ve 4’deki polimerlerin karışımı	–
6. Fiber	– Doğal: Asbest, Taş yünü – Yapay: PP, Polyester, Fiberglas	Sertleştirme
7. Oksidan	– Manganez tuzu	Sertleştirme
8. Antioksidan	– Kurşun karışımları – Karbon – Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9. Hidrokarbon	– Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları – Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşatma veya Sertleştirme
10. Soyulma önleyici	– Aminler – Kireç	Yumuşatma

Katkı maddesi olarak polimerlere ilginin arttığı ve bitüm katkı maddeleri sınıflandırılırken polimerler temel alınarak, polimer olan ve olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırıldığı görülmektedir. Bu şekildeki sınıflandırma da, çizelge 3.3’de verilmiştir (İlcalı ve ark., 2001).

Bitümün belirli özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılacak olan değişik modifiyerlerin uzun dönemli etkisini belirleyebilmek için hızlandırılmış test metotları

henüz çok gelişmiş değildir fakat modifiye edilmiş bitüm veya karışımın bazı özellikleri mevcut test yöntemleriyle saptanabilmektedir. Bu nedenle, modifiyer tipinin seçiminde dikkatli olunmalıdır. Daha önce kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmış olanların seçimi de avantaj sağlayabilir. En yaygın olarak kullanılan bazı katkıları ve kullanım amaçları çizelge 3.4’de gösterilmiştir (Tunç, 2004).

Çizelge 3.3. Bitüm modifikasyon tipleri (Ilıcalı ve ark., 2001)

Modifikasyon tipleri	Örnekler
a. Polimer olmayan katkıları 1. Fillerler 2. Soyulma önleyici katkıları 3. Ekstenderler (Genleştirici) 4. Antioksidanlar 5. Organo–metal bileşimleri 6. Diğerleri	Kil, karbon siyahı, uçucu kül Organik aminler ve amidler Ligrin, sülfür Çinko ve kurşun antioksidanları, phenolikler, aminler Organo manganer bileşimleri Organo karbon bileşimleri
b. Polimer katkıları 1. Plastikler – Termoplastikler – Termosetler 2. Elastomerler – Doğal kauçuklar – Yapay elastomerler 3. İşlenmiş kauçuklar 4. Fiberler – Doğal fiberler – Yapay fiberler	Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistren, etilen vinil asetat Epoksi reçineler SBR, SBS, Etilen proceplendien harmoliper, İsobüten isopren kopolimer Selüloz, yün, asbestler (silikat) PP, polyester, poliüretan vb. (organik); karbon, cam, çelik (inorganik)
c. Kimyasal reaksiyon olanlar	Katkı (monomer), volkanizasyon (sülfür), nitrosyon (nitrik asit)

Çizelge 3.4. Bitümlü bağlayıcılar için katkı maddeleri (Tunç, 2004)

Katkı Tipi	Amaç
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve Marshall stabilitesini artırmak
Kauçuk ve lastik	Viskozluğu artırmak
Termoplastik polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek, viskozluğu artırmak
Termoplastik kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek, bir miktar elastikliği artırmak, adezyonu artırmak
Termoset polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu artırmak
Organo-manganer bileşikler	Mukavemeti artırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini (deformasyon direnci, Marshall stabilitesi) iyileştirmek
Doğal (göl veya kaya) asfalt	Isıya duyarlılığı düzeltmek, aşınma direncini artırmak
Epoksi reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci artırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci artırmak
Gilsonit (tabii asfalt)	Tekerlek izi deformasyon direncini artırmak
Karbon siyahı	Bitümün dayanımını ve karışımın deformasyon direncini artırmak
Yağ	Bağlayıcılığı ve penetrasyonu artırmak, yumuşama noktası ve viskoziteyi düşürmek
Filler	Rijitliği artırmak, yumuşama noktasını artırmak
Elyaf (fiberler)	Çatlama direncini artırmak
Ataktik PP ve EVA	Rijitlik, penetrasyon, frass kırılabilirlik, yumuşama noktası vb. özellikleri iyileştirmek
SBS	Penetrasyon, yumuşama noktası, elastikiyet vb. özellikleri iyileştirmek
Çözücüler	Viskoziteyi azaltmak

3.1.3. Bitümlü sıcak karışımlar

Bitümlü sıcak karışım (BSK), esnek kaplamanın stabilitesinden önemli ölçüde fakat performansından tamamen sorumlu olan malzemedir ve uygun vasıftaki agregaya belli oranda bitümlü bağlayıcı karıştırılarak elde edilir. BSK'nın özellikleri ve hesapları, esnek kaplama tabakalarının yapım teknikleri ve tabakalarda oluşan kusur ve iyileştirme teknikleri gibi hususların çok iyi bilinmesi gerekir. Agregası, bitümlü bağlayıcı ve BSK olarak ele alınan esnek kaplama malzemelerinin her birinin ayrı ayrı çok iyi bilinmesi halinde, esnek kaplamaların başarılı olarak yapılması mümkün olabilmektedir. BSK her ne kadar agregası ile bitümün belli oranlarda karışımlarından elde edilen heterojen bir malzeme olsa da, kendine has birtakım özellikleri ve fonksiyonları olduğundan, agregası ve bitüme ait temel bilgilerin bilinmesinin yanı sıra BSK özellikleri ve tekniklerinin de çok iyi bilinmesi gerekir (Tunç, 2004).

Bir kaplamaya tekerlek yükü uygulanırsa; birincil gerilmeler, BSK'ya iletilen dikey basınç gerilmesi, asfalt tabakası içindeki kayma gerilmesi ve asfalt tabakasının altındaki yatay çekme gerilmesidir. BSK, içten güçlü olmalı ve karışım içinde kalıcı deformasyonu önlemek için basınç ve kayma gerilmelerine karşı dayanıklı olmalıdır. Asfalt tabakasının tabanındaki çatlak başlangıcına direnmek için, malzemenin ayrıca çekme gerilmesine dayanacak kadar yeterli çekme mukavemetine sahip olması gerekir, bu durum birçok yük uygulamasından sonra yorulma çatlamasına neden olur. Yüksek basınçlı dairesel lastiklerin kenarındaki çekme zorlanması, yukarıdan aşağıya çatlamaya da neden olabilir. Ayrıca, asfalt karışımı hızla azalan veya aşırı soğuk sıcaklıklardan kaynaklanan büzülme gerilmelerine de direnmelidir (Buncher ve ark., 2014).

BSK ile yapılan aşınma, binder ve bitümlü temel gibi esnek kaplama tabakalarının kaliteleri; *stabilite, rijitlik, dayanıklılık, yorulma mukavemeti, esneklik, geçirimsizlik, kayma direnci, işlenebilirlik* özelliklerine bağlıdır. Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek karışım elde etmek çok mümkün değildir fakat optimum karışım hesaplarının yapılabilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi gerekir (Tunç, 2004).

3.1.3.1. Stabilite özelliği

Stabilite terimi, mukavemet ile yakından ilgilidir ve BSK'dan imal edilen yol kaplamalarının trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir.

Trafik yükleri altında BSK'da oluşacak aşırı deformasyondan dolayı çok düşük stabilite istenmez. Ayrıca çok sert veya gevrek olan BSK, gerilmelere maruz kaldığında esnek davranamaz ve böylelikle kaplamada çatlaklar oluşmasından dolayı çok yüksek stabilite de istenmez. Stabiliteye etki eden hususlar kayma mukavemeti, sıcaklık ve eylemsizlik direnci olarak göz önüne alınır (Tunç, 2004).

Agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyona ve bağlayıcının deformasyonuna bağlı olan kohezyon ve agrega taneleri arasındaki sürtünme ile kilitlenmeden kaynaklanan içsel sürtünme direnci BSK'nın kayma mukavemetini oluşturmaktadır. Böylece, agrega içsel sürtünmeden ve bitüm kohezyondan sorumlu olmaktadır. Statik ve yavaş hızlarda agreganın sürtünme direnci, yüksek hızlarda bitümün kohezyonu tarafından stabilite belirlenir. Özellikle yüksek ısı ve yavaş trafik hızlarında (veya uzun yükleme süresinde) stabilitenin sağlanmasından tek sorumlu agreganın sürtünme direnci iken, düşük ısı ve hızlı yüklemelerde (veya çok kısa etki süresinde) kohezyonun etkisi oldukça büyüktür. Agreganın içsel sürtünme direnci, tanelerin yüzey pürüzlülüğü ile kırılmışlığı arttıkça ve karışımın boşluğu azaldıkça önemli bir artış göstermektedir. Agreganın absorpsiyonu (emme) ve porozluğu, bağlayıcının miktarı (optimum bağlayıcı yüzdesine kadar) ve viskozluğu, yükleme hızı, karıştırma ve serme-sıkıştırma sıcaklığı arttıkça ve bitümün sıcaklığı ile penetrasyonu ve filler/bitüm oranı azaldıkça, kohezyon genel olarak önemli şekilde artmaktadır.

Stabilite üzerindeki diğer bir etken de sıcaklıktır. Bitümün termoplastik malzeme olması sebebiyle, sıcaklığı arttıkça viskozluğu azalmaktadır. Böylece, sıcaklık artışıyla karışım kohezyonu azalmakta ve stabilite düşmektedir. Özellikle yaz aylarında bitümün ısı absorbesinin etkisiyle deformasyon direnci büyük ölçüde azalmaktadır. Dolayısıyla, tekerlek izi, ondülasyonlar, ötelenme vb. kalıcı deformasyonların oluşumunda yüksek hava sıcaklığı en önemli sebeptir. Düşük sıcaklıkta ise viskozluk artar ve bitüm sertleşir. Sertleşme aşırı olursa; trafik yükleri altında oluşan çatlaklar, kaplamanın kütleli olarak ayrışmasına sebep olur ve sonuç olarak stabilite düşer. Dolayısıyla; çok sık karşılaşılan düşük ısı çatlakları, bitümün aşırı sertleşmesinden ve büzülmesi sırasında tabakanın alt kısmında oluşan gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sıcaklığın kaplama inşaatı sırasında da etkisi yüksektir. Sıcaklık etkisiyle, agreganın bitüm absorpsiyonu artacak ve bitümün viskozluğu da azalacak ve sonuç olarak daha güçlü adezyon ile daha yüksek stabilite elde edilebilecektir. Bitümün viskozluğundaki düşüş karışımın sıkışmaya karşı direncini azaltacak ve daha kolay ve daha iyi sıkışma sayesinde karışımın yoğunluğu artarak daha yüksek stabilite elde edilebilecektir. Bu nedenlerden ötürü, karıştırma ve

sıkıştırma sıcaklıkları şartname ve deney koşulları ile belirlenen minimum değerlerden az olmamalı, soğuk ve özellikle rüzgarlı havalarda kaplama inşaatı yapılmamalıdır.

Stabiliteye etkisi olan eylemsizlik direnci, asfalt karışım kütesinin trafik yükleri altında yer değiştirmeye (ötelenmeye) karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Yükün miktarı azaldıkça ve yükleme hızı ile kaplamanın kalınlığı arttıkça, eylemsizlik direnci genel olarak artmaktadır. Sonuç olarak; agreganın pürüzlülüğü, köşeliliği ve yoğunluğu, bitüm miktarı optimumda iken karışımın yoğunluğu, yükleme hızı, bitüm film kalınlığı arttıkça ve bitümün penetrasyonu, karışımın boşluk oranı, sıcaklık azaldıkça BSK'nın stabilitesi artmaktadır (Tunç, 2004).

3.1.3.2. Rijitlik, dayanıklılık (durabilite) ve yorulma mukavemeti özellikleri

Rijitlik, yükleme süresi (veya hızı) ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin bir ifadesidir. BSK, viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için “rijitlik modülü” kullanılmaktadır. Isı, yükleme süresi, bitümün penetrasyonu azaldıkça ve karışımın yoğunluğu arttıkça rijitlik genel olarak artmaktadır (Tunç, 2004). BSK bileşen niteliklerinin çok çeşitli olması sebebiyle, BSK özelliklerini kestirebilmek oldukça zordur. Bitüm, visko-elastik ve mineral yapı ise elastik özellikleri etkiler. Düşük sıcaklık veya kısa yükleme süreleri koşullarında elastik rijitlik ve yüksek sıcaklık veya uzun yükleme sürelerinde viskoz rijitlik olmak üzere, iki rijitlik kategorisi bulunmaktadır. Elastik rijitlik, analitik tasarım için yapıdaki kritik deformasyonları hesaplamak; viskoz rijitlik ise, malzemenin deformasyona karşı direncini değerlendirmek için kullanılır (İlcalı ve ark., 2001).

Durabilite, trafik ve çevre şartlarının aşındırma etkisine BSK'nın karşı koyması (direnç göstermesi) olarak tanımlanır. Yani; bitüm özelliklerinin değişmesi (yaşlanma-sertleşme), agrega tanelerinin kırılması, ufalanması ve bitümün soyulması gibi etkilere karşı BSK dayanıklı olmalıdır. Yüksek bitüm oranı, sert bitüm (düşük penetrasyonlu) ve kalın film tabakası, yüksek soyulma direnci, yoğun gradasyon ve iyi sıkışma (düşük boşluk oranı ve geçirimsizlik) ile dayanıklılık genel olarak artış gösterir. Bu şartlar sağlanırsa, geçirimsizlik artar ve karışımın içine daha az hava ve su gireceğinden dolayı durabilite de artar. Hava ve su bitümün oksidasyonunu hızlandıracığı için, bitüm film tabakası kalınlığı oksidasyondan dolayı oluşan yaşlanma etkisini azaltacaktır. Bitümün yaşlanması veya miktarının azlığı ile soyulma ve çatlaklar artar ancak bitüm miktarının fazlalığı da sıcak havalarda kuma ile kaplamanın kayma direncini azaltmaktadır. Sonuç

olarak, bağlayıcı miktarının optimum olarak kullanılmasıyla BSK'daki ideal boşluklar sağlanarak stabilite artarken; su ve hava daha az karışıma gireceğinden dolayı bitümün yaşlanması geciktirilerek de durabilite artırılmış olur (Tunç, 2004). Ayrıca, sağlam, sert, neme dayanıklı ve yoğun gradasyonlu agrega, BSK dayanıklılığına katkıda bulunur ve trafik yükü altında parçalanmaya karşı dayanıklıdır. Agrega parçacıklarının daha yakın teması sayesinde karışımın sızdırmazlığı artar (Buncher ve ark., 2014).

Yorulma mukavemeti, çatlamlar oluşmadan tekrar eden yükler etkisinde kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına BSK'nın müsaade etme yeteneğidir. Bir başka deyişle; BSK'nın sahip olduğu çekme mukavemetinin aşılmadan, kaplama çatlaklarının başladığı andaki trafik yüklerinin maksimum tekrar sayısına “yorulma mukavemeti” denir. Bu nedenle, BSK'nın çekme mukavemeti altındaki gerilmelere karşı çatlamadan ne kadar direnç gösterebileceğinin belirlenmesi gerekir. Bitüm miktarı ve penetrasyonu, rijitlik, gradasyon ve yoğunluk, kaplama ve bitüm tabakası kalınlığı arttıkça ve eğilme gerilmesi azaldıkça genel olarak yorulma mukavemeti artış gösterir. Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi, BSK'nın yeterli olarak sıkıştırılması yorulma mukavemetini de artıran önemli bir özelliktir. Trafik yüklerinin belirli bir tekrar sayısından sonra yorulma çatlakları yavaş yavaş meydana gelmektedir. Bu çatlaklar, aynı anda oluşan birçok faktöre bağlıdır ve çatlakların oluşması için çok sayıda tekrar eden ağır yüklerin olması gerekir. Yorulma çatlaklarını önlemek için, çekme mukavemeti yüksek malzeme kullanmak gereklidir. Dolayısıyla, yumuşak bitüm sert bitüme göre daha iyi yorulma özelliğine sahiptir. Karışımın yoğunluğu, rijitliği ve kohezyonu, filler ve bitüm miktarı arttıkça ve karışımın boşluk oranı azaldıkça yorulma çatlakları azalmaktadır (Tunç, 2004).

3.1.3.3. Esneklik ve kayma direnci özellikleri

Esneklik, çatlamadan eğilebilme (yani kalıcı olmayan deformasyon) ve zeminin veya temel tabakasının uzun dönemli oturma durumunda çökmelere uyum sağlayabilme kabiliyetidir. Esneklik genel olarak, bitüm içeriği arttıkça ve açık gradasyonlu karışıma sahip olundukça artış göstermektedir. BSK'nın esnekliği artarsa stabilitesinin azalacağı ve aşırı deformasyondan dolayı azalan yorulma mukavemeti ile yorulma çatlaklarının oluşabileceği göz önünde tutulmalıdır fakat esnekliği düşük karışımlarda da oluşan aşırı çatlamlar, kütlenin parçalanmasına ve stabilitenin düşmesine neden olabilir. Ayrıca, zeminde don kabarması olursa alttan yukarı doğru kaplamada gerilmeler oluşacaktır. Eğer esneklik yeterli olursa, çatlama olmadan sadece geçici deformasyonlar oluşur.

Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden ötürü savrulmaması için tekerlek ile kaplama arasındaki gerekli sürtünme kuvvetini ifade eder. Düşük bitüm miktarı ve cilalanma direnci yüksek, açık ve kaba gradasyonlu, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega ile kayma direnci genel olarak artmaktadır. BSK'nın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta fakat kayma direnci önemli ölçüde azalmaktadır. Agregada boyutunun kayma direnci üzerinde çok önemli rol oynamadığı yol testleri ile görülmüş olsa da, boyut arttıkça kayma direnci artmaktadır. Bitüm optimum miktardan fazla olursa, BSK'nın stabilitesi ve kusmadan dolayı kayma direnci azalır. Özellikle cilalanmış agregada ve kuma ile yüzeyde oluşan film tabakası, yağışlı havalarda ve yüksek hızlarda önemli tehlikeler oluşturmaktadır (Tunç, 2004). İyi kayma direnci için, lastik yüzeyi agregada parçacıkları ile teması sürdürebilmeli ve kaplama yüzeyinde bir su filmi oluşmamalıdır. Pürüzlü yüzeye sahip olmanın yanı sıra, agregalar trafik altında cilalanmaya karşı dayanıklı olmalıdır. Kireçli agregalar (kalkerler), silisli agregalardan (kuvars) daha kolay cilalanır. Tekerlek izi veya akma eğiliminde olan stabil olmayan karışımlar, ciddi kayma direnci problemleri ortaya çıkarırlar (Buncher ve ark., 2014).

3.1.3.4. Geçirimsizlik ve işlenebilirlik özellikleri

Geçirimsizlik, BSK'nın içine hava ve suyun girmesinin bir ölçüsüdür. BSK'daki boşluk miktarı ile boşlukların irtibatı, kaplamanın üstünden altına kadar su, hava ve su buharının geçmesi için koridorları oluşturur. Geçirimsizlik genel olarak; bitüm miktarı, agregada gradasyonu ile karışımın yoğunluğu ve sıkıştırma arttıkça fazlalaşmaktadır. BSK geçirimsizliği, karışımdaki boşluk oranının minimum olması ile sağlanır. Bitümün sıcak havalarda genişmeden dolayı kuma ile kaplamanın yüzeyine çıkmasını engellemek ve trafik yükleri altında bir miktar sıkışmaya müsaade etmek amacıyla minimum boşluk oranı gerekir fakat içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve geçirgenliği azaltarak problemleri azaltmak amacıyla maksimum boşluk oranı da gerekir (Tunç, 2004).

BSK'nın serme ve sıkıştırma esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü işlenebilirlik olarak tanımlanır. Agregada yüzeyinin pürüzlülüğü ve kırılmışlığı, kaba agregada miktarı, maksimum tane boyutu, bağlayıcının viskozluğu ve katılığı, filler ve ara boyutlu aşırı malzeme miktarı arttıkça ve karışım sıcaklığı düştükçe genel olarak işlenebilirlik azalır. İşlenebilirliği düşük olan karışımları serme ve özellikle sıkıştırma sırasında, birtakım güçlükler oluşmaktadır. Yeterli sıkışma sağlanamazsa karışımın stabilitesi azalmaktadır.

Sıkıştırma sırasında silindirin altında, bu karışımların çok az çökme göstermelerinden dolayı yeterli sıkıştırma elde edilemediği gibi; kaba agreganın karışım içine gömülmesi az olması sebebiyle, BSK'nın yüzey pürüzlülüğü fazla olmaktadır. Düşük işlenebilirliğe sahip karışımlar ile genellikle homojen olmayan kaplamalar elde edilmektedir. Ayrıca bu karışımlarda, tabaka kalınlığınca homojen bir sıkıştırma elde edilememekte özellikle yüzeyde daha az sıkışma olmaktadır. Böylelikle, trafik etkisi ile yüzeyde çok çabuk kopmalar oluşarak kaplama bozulmaktadır. Bunun yanı sıra işlenebilirliği çok yüksek olan karışımlar, genellikle içsel sürtünmesi az olan dere malzemesi agregalar ve yüksek penetrasyonlu bitümler ile üretildikleri için stabilite de düşük olmaktadır. İşlenebilirlik, esasen BSK'daki agrega tanelerinin yer değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir. Bitümün kohezyonu, agreganın içsel sürtünme açısı ve karışımın viskozluğu bu dirence etki eder. Bu nedenle; agreganın biçimi, kırılmışlığı, yüzey alanı ve yapısı vb. hususlar ile bitüm viskozluğu gibi özellikler işlenebilirlik üzerinde önemli rol oynamaktadır (Tunç, 2004).

Karışım tasarım parametrelerini, agrega kaynağı ve gradasyonunu değiştirmek işlenebilirliği artırabilir. Bununla birlikte, daha işlenebilir olan karışımlar genellikle kalıcı deformasyona daha yatkındır. İşlenebilir bir karışım sağlamak için, tekerlek izi direncinden ödün verilmemesine dikkat edilmelidir. Bir kaplamanın kullanım amacına uygun bir denge sağlamak için dikkat edilmelidir. Sert karışımlar (yüksek oranda kaba agrega ve/veya düşük bitüm içeriği içeren karışımlar), kullanımları sırasında ayrışma eğilimi gösterir. Bu karışımların sıkıştırılması zor olabilir. Birçok yüksek mukavemetli karışım serttir ve sıkıştırılması zordur. Çok kolay işlenebilen veya itilebilen karışımlara hassas karışımlar denir. Bu karışımlar, yerleştirilemeyecek kadar dengesizdir ve sorun genellikle; mineral filler eksikliği veya fazlalığı, aşırı orta boy kum, pürüzsüz–yuvarlak agrega parçacıkları ve karışımdaki nemden kaynaklanır. Normal olarak işlenebilirlik sorunlarına önemli bir katkıda bulunmasa da, bağlayıcının işlenebilirlik üzerinde bazı etkileri vardır. Karışımın sıcaklığı bitümün viskozitesini etkilediğinden; çok düşük bir sıcaklık karışımı işlenemez hale getirirken, çok yüksek bir sıcaklık da onu hassas hale getirebilir. BSK'daki bitümlü bağlayıcı yüzdesinin yanı sıra, bitümlü bağlayıcı sınıfı da işlenebilirliği etkileyebilir (Buncher ve ark., 2014).

3.1.3.5. BSK'nın hizmet aşamasındaki performansı ve kusurları

Yapıdaki kritik gerilmeyi veya deformasyonu analiz etmek için kullanılan yük veya gerilme deformasyon özellikleri ve olabilecek hatayı belirleyecek malzemelerin

kendi performans özellikleri olmak üzere, bitümlü yapıların analitik tasarımı malzeme özelliklerinin iki yönünün incelenmesini gerektirir. Bu iki yön, yorulma çatlaması ve aşırı kalıcı deformasyon olmak üzere iki ana kusuru oluşturur (İlcalı ve ark., 2001).

BSK'nın serilip sıkıştırılmasından sonra, arazide hizmet süresindeki davranışları dikkate alınmalıdır. Hizmet süresindeki kritik koşullar, genel olarak yüksek veya düşük sıcaklıklarda ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklardaki problemler, kalıcı deformasyonlar ve kusmadır. Dingil yükleri etkisiyle karışımdaki agreganın konsolidasyonu ile BSK'nın boşluk oranının azalması neticesinde, bitümün yüzeye doğru itilmesi sonucunda kusma oluşmaktadır. Bağlayıcı içeriğinin fazla veya boşluk oranının çok düşük olması halinde, kusma miktarı fazla olmaktadır. Bitümün yüzeye doğru geçişi, ıslak havalarda sürtünme katsayısı düşük olan pürüzsüz, parlak bir yüzey oluşturur. Kusma en çok yüksek hizmet sıcaklarında görülür. Böylece, 60 °C'de bitümün yumuşama noktasının sınırlandırılması kusmayı azaltacaktır. Düşük sıcaklıklardaki problemler, çatlama ve soyulmadır. Trafik ve sıcaklık değişimleriyle oluşan tekrarlı gerilmeler ve şekil değiştirmelerin, karışımın kırılma veya yorulma mukavemetini aşması durumunda karışım çatlar. Bu çatlaklar; yorulma ve termal çatlaklar vb. olarak çeşitlilik gösterir (Whiteoak, 2004).

BSK bileşenlerinin bireysel özellikleri önemli olmakla birlikte, karışım davranışı en iyi, birlikte hareket eden bitümlü bağlayıcı ve mineral agrega dikkate alınarak açıklanabilir. Karışım davranışını anlamamanın bir yolu; kalıcı deformasyon, yorulma ve düşük sıcaklık çatlaması olarak tanımlanan, birincil asfalt kaplama bozulma tiplerini dikkate almaktır (Buncher ve ark., 2014).

3.1.3.5.1. Kalıcı deformasyon

Teorik olarak, yol üstyapılarının her tabakasında deformasyon oluşabilir. Fakat, BSK'nın düşük termal iletkenliğe sahip olmasından dolayı, pratikte deformasyonların büyük çoğunluğu aşınma tabakasında oluşan kalıcı deformasyonlardır. Deformasyon, statik veya dinamik dingil yükleri altında ve özellikle frenleme, ivmelenme veya dönüş hareketleri sırasında ortaya çıkan yüksek kayma gerilmeleri nedeniyle oluşur. Kalıcı (plastik) deformasyonlar en büyük değerlere yüksek hizmet sıcaklıklarında ulaşır. 60 °C pratikte maksimum hizmet sıcaklığı olarak kabul edilir. Kalıcı deformasyonu etkileyen ana faktör karışım kompozisyonu olmakla birlikte belirli bir karışımda deformasyonlara karşı davranışı bitümün viskozitesi belirler (Whiteoak, 2004).

Kaplamaya uygulanan tekrarlanan yüklerden dolayı, az miktarda kurtarılamaz küçük deformasyonların birikmesiyle kalıcı deformasyon oluşur. Tekerlek izi, kalıcı deformasyonun en yaygın şeklidir. Trafik altında itmeye ve tekerlek izine direnecek stabil bir BSK kaplaması tasarlanarak ve inşa edilerek, kalıcı deformasyona karşı direnç sağlanır. Bu kaplama, tekrarlı yükleme altında şeklini ve düzgünlüğünü koruyacaktır. Stabil olmayan bir kaplamada, tekerlek izi gelişir ve karışım kayma belirtileri gösterir. Kalıcı deformasyon direnci esas itibariyle, agrega parçacıkları tarafından sağlanan iç sürtünmeye ve daha az ölçüde asfalt bağlayıcısı tarafından sağlanan kohezyona bağlıdır. Agrega parçacıkları arasındaki sürtünme, ince ve kaba agreganın şekli ile yüzey dokusu ve agrega gradasyon özellikleri ile ilgilidir. Kohezyon, bağlayıcının yapışma kabiliyeti ve sertlik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Karışımındaki parçacıklar arası sürtünmenin ve kohezyonun uygun derecesi, trafik tarafından uygulanan kuvvetlerle parçacıkların birbirlerinin ötesine geçmesini önler. Daha pürüzlü yüzey dokusu ile daha açısız agrega parçacıklarının kullanılması, karışımın stabilitesini artıracaktır. Asfalt bağlayıcısının sertliği arttıkça veya kaplama sıcaklığı düştükçe kohezyon artar. İç sürtünmenin ve kohezyonun bir karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini etkileme derecesi, her karışıma göre değişmektedir. Tekerlek izinin 2 temel nedeni, alt tabakaların başarısızlığı ve yetersiz karışım stabilitesidir. İlk olarak, asfalt katmanlarından ziyade temel veya alt temel gibi alttaki tabakalarda deformasyon meydana gelebilir. Bu durum tipik olarak, kaplama yapısı ve yükleme koşulları için gerekli olan yerdeki, düşük zemin kalitesi veya koşulundan kaynaklanır. Daha sert kaplama malzemeleri bu tür tekerlek izini azaltabilir, ancak alt tabaka veya alttaki katman yetersizliğini düzeltmek daha iyidir. Yetersiz bir karışım durumunda ise, deformasyon asfalt tabakası ile sınırlıdır ve tekerlek izi kenarında bir dalgalanma oluşacaktır. Bu durum, tekerlek izinin asfalt bağlayıcı problemi olduğunu düşündürse de, birleştirilmiş mineral agrega ve bitüm özelliklerini, gradasyonu ve hacimsel oranlamaları da dikkate alarak, tekerlek izini değerlendirmek daha doğru olur. Yüksek derecede iç sürtünme ve pürüzlü bir yüzey dokusuna sahip ve açısız olan ve parçacıkların temasını geliştirecek uygun gradasyonlu bir agrega seçilerek, BSK'nın kayma mukavemeti artırılabilir. Karışıma bir yük uygulandığında; agrega parçacıkları birbirine sıkıca kilitlenir, agrega harmanı daha büyük, tek, elastik bir kütle olarak işlev görür. Agregaların geliştirilmesiyle, karışımın kayma mukavemetinde yeterli gelişme sağlanmazsa, daha sert bir bağlayıcı ve/veya modifiye edilmiş bir bağlayıcı seçilebilir (Buncher ve ark., 2014).

3.1.3.5.2. Yorulma çatlakları

Dingil yükleri altında, bitümlü bir kaplamanın tabanında (alt kısmında) çekme gerilmeleri meydana gelir. Üstyapı gelen yüklere uygun değilse veya taban zemininin özellikleri su girişi sonucu değişme gösteriyorsa, malzeme çekme mukavemeti değeri aşılıp bitümlü tabakanın tabanında bir çatlak ortaya çıkar. Sürekli çekme gerilmeleri oluşturan tekrarlı yükler, çatlağın yol yüzeyine doğru yayılmasına sebep olacaktır. Bu durum malzemenin yorulmasıdır (Whiteoak, 2004).

Yorulma direnci, tekerlek yükleri (trafik) altında tekrarlanan eğilmeye karşı BSK'nın direncidir. Yorulma başarısızlığının sonucu, genellikle timsah sırtı çatlaması olarak adlandırılan yorulma çatlağıdır. Bu tip çatlak, kaplama ömrünün sınırına kadar, tekrarlı yük uygulamaları ile kaplama gerildiğinde meydana gelir. Yorulma çatlaması, öncelikle yetersiz kaplama kalınlığı ile ilişkili olsa da, BSK hava boşlukları ve asfalt bağlayıcı özellikleri yorulma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kaplamadaki hava boşluğu yüzdesi, tasarım veya sıkıştırma eksikliği nedeniyle arttıkça, kaplamanın yorulma direnci büyük ölçüde azalır. Polimerle modifiye edilmiş bağlayıcı kullanımıyla BSK karışımının yorulma direncinin önemli ölçüde artırılabilmesini, araştırmalar ve uygulamalar göstermiştir. Kaplamanın kalınlık ve mukavemet özellikleri ve alt temelin desteği, yorulma veya yüke bağlı çatlaklarının önlenmesi ve kaplama ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kalın, iyi desteklenmiş kaplamalar, ince veya zayıf destekli kaplamalara göre trafik yükleri altında daha az bükülür. Bu yüzden, daha uzun yorulma ömürleri vardır. Sürekli bir kaplama tasarımı için, dayanıklılık sınırına (malzemenin yorulmada başarılı olacağı gerginlik seviyesi) asla ulaşılmaz. Yorulma çatlaması, tipik olarak bir BSK'nın alt kısmında başlar ve yüzeye doğru ilerler. Bu, BSK katmanının altındaki yüksek çekme gerilmesinin bir sonucudur. Son yıllarda, yorulma çatlamasının kaplamanın tepesinden başladığı ve aşağıya doğru ilerlediği gözlenmiştir. Bu çatlama, BSK'nın yüzeyindeki yüksek çekme gerilmesinden kaynaklanmaktadır. Genellikle ince BSK kaplamaların, BSK'nın alt kısmında başlayan yorulma çatlaması yaşadığı ve kalın BSK kaplamaların, BSK yüzeyinde başlayan yorulma çatlaması yaşadıkları düşünülür. Yorulma çatlağının üstesinden gelme yöntemleri şunlardır:

- ❖ Tasarım sırasındaki ağır yüklerin sayısı yeterince hesaplanmalı;
- ❖ Daha kalın kaplamalar kullanılmalı;
- ❖ Yeterli alt zemin drenajı sağlanmalı;
- ❖ Nem nedeniyle kolayca zayıflamayan kaplama malzemeleri kullanılmalı;

- ❖ Normal bükülmelere karşı yeterince dayanıklı BSK kullanılmalı ve
- ❖ Modifiye edilmiş bağlayıcı kullanılmalıdır.

Malzeme seçimi ve karışım tasarımı sırasında sadece esnek malzemelerin seçimi ele alınabilir. BSK, asfalt tabakasının tabanına uygulanan çekme gerilimine dayanacak kadar yeterli çekme mukavemetine sahip olmalı ve tekrarlanan yük uygulamalarına çatlamadan dayanacak kadar esnek olmalıdır. Bu nedenle, BSK, yorulma çatlağının üstesinden gelmek için elastik bir malzeme gibi davranacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu, AC'nin sertlik özelliklerine üst sınır koyarak yapılır, çünkü BSK'nın çekme davranışı AC'den güçlü bir şekilde etkilenir. Basitçe söylemek gerekirse, yumuşak bitümler sert bitümlerden daha iyi yorulma özelliklerine sahiptir (Buncher ve ark., 2014).

3.1.3.5.3. Düşük sıcaklık çatlakları

Düşük sıcaklıkta çatlama normalde, BSK yüzeyinin sıcaklığı yeterince düştüğü zaman meydana gelir. Sonuç, karayolunun merkez hattına dik ve sıklıkla eşit aralıklı olan enine çatlaklardır. Bu çatlaklar yüzeyde başlar ve aşağı doğru ilerler. Soğuma hızı, büyüklük, düşük sıcaklık oluşumlarının sıklığı ve asfalt bağlayıcının sertliği çatlakları etkileyen ana faktörlerdir. Düşük sıcaklıkta çatlama, tek bir olayın veya karışımında bir yorulma tipi hasarına neden olan tekrarlayan soğuk sıcaklık döngülerinin bir sonucu olabilir. Genel olarak, bu sorunun çözümü doğru bağlayıcı seçimidir. Oldukça emici veya fazla toz içerikli agregalar kullanmak, düşük sıcaklık çatlaklarını etkinleştirebilir (Buncher ve ark., 2014). Bitüm ve BSK'ların rijitlik ve kırılma özelliklerinden, gerilme boşalmasına sebep olacak termal kırılmaların oluşacağı koşulları hesaplamak mümkündür. Çatlak oluşumunun ortaya çıktığı sıcaklığın bitümün düşük sıcaklıktaki rijitliği ile ilişkili olduğunu, laboratuvar araştırmaları göstermiştir (Whiteoak, 2004).

Stabilize veya hafif betondan yapılmış tabakaların genleşme ve büzülmesi sonucunda oluşan gerilmeler ve aşırı şekil değiştirmeler birleşim yerlerinde çatlakları oluşturur ve bu çatlaklar yüzeye kadar ilerler. Ancak bu yansıma çatlaklarının aynı zamanda yol yüzeyinde başlayıp, stabilize tabaka üzerindeki çatlaklarla birleştikleri de görülmektedir. Kış aylarında, bitümlü üstyapı tabakaları çok rijit olmakta ve termal büzülme sonucu ortaya çıkan çekme gerilmeleri ve şekil değiştirmelere karşı daha az direnç göstermektedir. Soğuk havalarda, üstteki tabakalar alttaki katmanlardan daha düşük sıcaklıklara sahip olmakta ve bunun sonucunda oluşan derinlikler arası farklı büzülme, hafif beton veya stabilize temel tabakasının eğilmesine ve yol yüzeyinde

çekme gerilmeleri oluşturmasına sebep olmaktadır. Bu gibi bir durumda, yüzeydeki çatlama temel tabakasında oluşan çatlaklara doğru ilerler (Whiteoak, 2004).

3.1.3.5.4. Nem hasarları

Büyük bir durabilite sorunu, genellikle “soyulma” olarak adlandırılan nem hasarı ile ilişkilidir. Bu, tipik olarak suyun tekrarlanan trafik yükleri ile kombinasyon halindeki sonucudur ve su kaplamadaki boşlukların içine girer ve çıkarken bir soyulma etkisine neden olur. Soyulma işlemi, bitüm filmi ile agregalar arasına giren su veya su buharını içerir, böylece su agrega ile bitüm film arasındaki yapışkan bağı koparır ve bağlayıcı agregadan sıyrılır. Soyulma işlemine karşı en iyi savunma, karışımında yeterli bağlayıcıya sahip olmak ve yeterli sıkıştırma sağlayarak geçirimsizlik oluşturmaaktır.

Kaplamada soyulma aşırı hale gelirse, tekrarlı yükleme sonucunda kaplamada ciddi deformasyon ve bozulma meydana gelir. Trafik etkisiyle BSK’nın bozulması genellikle aşamalar halinde gerçekleşir. İlk aşamada, yüzeyde lekelenmeler olacaktır. Bu şekilde yerel sorunları; tekerlek yollarında yoğun bir şekilde tekerlek izi, timsah sırtı çatlak ve çukurlar izler. Neme karşı hassas agregalar, soyulma önleyici katkı maddeleri ile işlenmesi koşuluyla kullanılabilir (Buncher ve ark., 2014).

Soyulma, yol yüzeyinden boşluklar arası ince parçacıkların kaybolması sonucu zamanla oluşur. Agregada parçacıklarının dingil yüklerinin etkisiyle meydana gelen küçük hareketlerinin bitümün kırılma mukavemetini aşacak derecede çekme gerilmeleri veya şekil değiştirme oluşturması durumunda soyulma başlamaktadır. Soyulma, genellikle bitümün rijitliği yüksek iken (düşük sıcaklık) kısa yükleme sürelerinde ortaya çıkar. Ayrıca kaplamanın suyla teması ile çok yakından ilişkilidir. Agregada ile bitüm arasındaki adezyonun kaybolması veya agrega parçacıklarını bağlayan bitüm tabakasının çatlaması ile agrega kayıpları oluşur. Serme işleminin elverişsiz hava koşullarında yapılması ve uygun bir sıkıştırma sıcaklığının sağlanmadığı durumlarda, seçilen bitümlü bağlayıcı cinsi sıkıştırmanın başarısını etkiler. BSK’da kullanılan bağlayıcının düşük sıcaklıklarda rijitliğinin düşük olması veya penetrasyonunun yüksekliği, BSK’nın soyulmaya karşı direncini artırmaktadır (Whiteoak, 2004).

Bu bölümün 1. başlığı olan materyal bölümünde; tez çalışmasında kullanılan agrega, bitümlü bağlayıcı ve BSK ile ilgili olarak çeşitli mekanik, fiziksel veya kimyasal özelliklerden bahsedilmiştir. Materyal bölümünün son kısmında ise, çalışma kapsamındaki katkıların elde edildiği malzemeler olan plastikler ele alınacaktır.

3.1.4. Plastikler

Tez metninin 1. Bölümü olan “Giriş” kısmında Dünya ve Türkiye geneli olarak plastik sektörü ile ilgili ayrıntılar verilmiş ve farklı bir konu başlığı (1.3.) altında genel hususlar özetlenmişti. Buradan hareketle; tez çalışması kapsamında PP, YYPE ve PET plastiklerinin seçildiğinden bahsedilmiş ve 2. Bölümde, bu malzemeler ile ilgili literatür çalışmaları ele alınmıştı. Bu bölümde ise, bu malzemelerin bazı özelliklerinden ve kendi içindeki çeşitlerinden bahsedilmiş ve çalışma kapsamında PP, YYPE ve PET plastikleri olarak hangi plastik gruplarının seçildiği ifade edilmiştir.

3.1.4.1. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)



Şekil 3.4. Yaygın kullanılan ve şişirme kalıplama ile üretilen YYPE plastik kaplar (Arıkan, 2007)

YYPE, yoğunluğu $0.936\text{--}0.960\text{ gr./cm}^3$ arasında değişen, düşük basınçta üretilen bir PE türüdür. YYPE hammaddesi, plastik şişe üretim süreçlerinin (şişirme kalıplama) hepsinde işlenebilir. Şekil 3.4’de YYPE plastiklerine örnekler gösterilmiştir. (Arıkan, 2007). “Petilen YY S” adı ve çeşitli kodlarla üretilen YYPE hammaddeleri kullanılarak, şişirme kalıplama yöntemi ile gerekli plastik ürünler elde edilir. Şampuan, deterjan, kozmetik ürünleri gibi kimyasal maddeler için küçük ve orta hacimli kaplar, su ve kimyasalların taşınması için depolama tankları, 100 litreye kadar büyük boy kaplar, geniş ve küçük hacimli konteynırlar vb. plastik ürünler, şişirme kalıplama ile üretilen YYPE plastiklerine örnektir (URL 13). İnce duvarlı kaplar ile plastik kapak üretimi için uygun olan YYPE hammaddeleri de, enjeksiyon kalıplama süreci ile işlenir (Arıkan, 2007).

“Petilen YY I” adı ve çeşitli kodlarla üretilen YYPE hammaddeleriyle de, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile gerekli plastik ürünler elde edilir. Şişe ve meyve kasaları, büyük konteynır, paletler, mutfak eşyaları, kutu, tepsi, sepet, çanta, sandık, ev eşyaları, oyuncak, su ve meşrubat şişesi kapakları vb. plastik ürünler, enjeksiyon kalıplama ile üretilen YYPE plastiklerine örnektir. Bunların dışında “Petilen YY F” ve “Petilen YY B” adı ile ve çeşitli kodlarla üretilen YYPE hammaddeleri kullanılarak, ekstrüzyon yöntemi ile gerekli plastik ürünler elde edilir. “Petilen YY F” isimli ham maddeler ile alış-veriş torbaları, atıkları yok edebilir torbalar, ağırlığa dayanıklı torbalar, yüksek dayanıklılığa sahip ince filmler üretilirken; “Petilen YY B” isimli hammaddeler ile de içme ve sulama, kanalizasyon vb. amaçlar için çeşitli borular üretilir (URL 13).

YYPE yaygın olarak süt, ayran gibi gıda ürünlerinin ve zirai ilaçlar, madeni yağlar, deterjanlar gibi kimyasalların ambalajlanmasında kullanılır. Birçok uygulama için oldukça ekonomik ve sağlam bir polimerdir. Doğal durumunda süt beyazı ve yarı saydam malzeme olduğu için, berraklığın önemli olduğu uygulamalarda kullanılamaz. Kolaylıkla istenilen renge boyanabilir. Neme karşı bariyer özelliği çok iyidir fakat gaz bariyer özelliği düşüktür. Bu yüzden özellikle oksijen geçirgenliğinin önemli olduğu ambalajlarda tek katlı değil, bariyer polimerleri ile birlikte koekstrüde edilerek (çok katlı olarak) kullanılmaktadır. Kimyasallara karşı direnci çok iyidir (Arıkan, 2007).

3.1.4.2. Polipropilen (PP)

PP hammaddesi kimyasallara karşı direnç ve bariyer özellikleri bakımından YYPE hammaddesine benzerdir fakat PP’nin fiziksel özellikleri, kopolimerleştirme süreci sayesinde geliştirilmiştir. Üç farklı PP grubu vardır. Bunlar; homopolimer, blok kopolimer ve random kopolimer PP’dir.

Homopolimer PP, darbeye karşı nispeten dayanıklı ve sert bir malzemedir. Bu hammaddeden üretilen ürünler berraktır. Termoform (ısı ile şekillendirme), şişirme (üfleme) ve enjeksiyon kalıplama süreçlerinde işlenebilmektedir (Arıkan, 2007).

Blok kopolimer PP, homopolimer PP’den çok daha dayanıklıdır. Genellikle içeriğinde etilen bulunur. Etilen içeriği ne kadar fazla oranda olursa, o kadar dayanıklı olur. Bu özelliğinden dolayı blok kopolimer PP, dondurma gibi dondurulmuş gıdaların ambalajlanması için en çok tercih edilen ürünlerden biri olmuştur. Dondurma, katı yağ vb. gıdaların ambalajı, boya gibi kimyevi maddeler için küçük veya geniş hacimli kaplar, içecek, sebze ve meyve, unlu mamul kasalarının bir kısmı (YYPE olanlar var),

ev eşyası veya çok çeşitli amaçlarla kullanılan kova, kap, kutu vb. birçok uygulaması ile blok kopolimer PP'nin çok geniş bir uygulama alanı vardır (Arıkan, 2007). Şekil 3.5'de iki farklı PP tipine ait örnekler gösterilmiştir. Soldaki şekilde (a), tek kullanımlık bardak olan homopolimer PP; sağdaki (b) ise, gıda ambalajlarında çok yaygın olarak kullanılan blok kopolimer PP gösterilmiştir.



Şekil 3.5.a. Homopolimer PP



Şekil 3.5.b. Blok Kopolimer PP

Random kopolimer PP, darbelere karşı, homopolimer PP'den daha dayanıklıdır fakat düşük sıcaklıklarda kırılmalıdır. Daha çok termoform süreciyle üretilen kaplarda kullanılırlar. Son yıllarda şişe amaçlı uygulamalarında da büyük artış olmuştur. Ketçap şişeleri imalatında, bu hammadde daha sık kullanılmaktadır (Arıkan, 2007).

3.1.4.3. Polietilen teraftalat (PET)

PET, gazlı içecek şişelerin ambalajlanması için ideal bir malzemedir. Bu şişeler enjeksiyon–streç (gerdirerek)–şişirme kalıplama süreci ile üretilirler. Bu uygulamanın yanı sıra, özellikle ısıya dayanıklı plastik kapların üretiminde de PET tercih edilir. Diğer plastiklerle kıyaslandığında PET'in gaz bariyer özelliği çok daha iyidir. PET, tamamen amorf veya yüksek derecede kristal olabilme gibi bir özelliğe sahiptir. Erimiş haldeyken hızla soğutulursa amorf halde katılaşır ve soğuma yavaş gerçekleşirse kristal hale geçer. Kristalleşme sıcaklığına kadar ısıtılırsa, sertleşir ve mat beyaz bir renk alır. Kristal PET yaklaşık 255 °C'de erir. Üretim ve uygulama olarak farklı PET ham maddeleri vardır.

Oriyente edilmiş PET, enjeksiyon–streç–şişirme kalıplama sürecinde amorf haldeki proses ürünü, enlemesine ve boylamasına gerdirilir. Bu durumda, çift eksenle gerdirilmiş (oriyente edilmiş) PET oluşur. Prosesten gelen bu özellik sayesinde, PET'in gazlı içeceklere karşı olan direnci artar (Arıkan, 2007).

Amorf PET (APET), şeffaf plastik kapların üretiminde tercih edilen bir hammaddedir. Kristalleşme olmadığı için son ürün oldukça berraktır. Termoform süreci ile işlenebilmektedir.



Şekil 3.6. Çeşitli ebatlarda kullanılan PET şişe ve kaplara örnekler (Arıkan, 2007)

Kristal PET (CPET), geleneksel mutfak fırınına girebilen kapların üretiminde kullanılan bir plastiktir. Bu özellik, malzemeye termoform süreci sırasında kazandırılır. Bu süreç esnasında “ısı ile sabitleme” adı verilen süreç uygulanır. CPET’ten üretilmiş olan plastik levha, kristalleşmeyi engellemek üzere hızlı biçimde soğutulur. Daha sonra levha yeniden ısıtılır ve bilinen proses yöntemi ile şekillendirilir. Bu işlemin sonucunda ürün, beyaz ve ısıya dayanıklı bir yapıya dönüşür ve 220 °C’ye kadar çıkan sıcaklıklara dayanabilmektedir (Arıkan, 2007). Şekil 3.6’da PET plastiklerine örnekler verilmiştir.

3.1.4.4. Plastik malzemelerin seçimi

Şimdiye kadar olan bölümde, sert plastik ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılan plastikler (YYPE, PP ve PET) hakkındaki bilgilere kısaca yer verilmiştir. Bu sektörde, plastiklerin çok yaygın olarak kullanıldığı ve kullanılan plastiklerin (diğer sektörlerde kullanılanlarına göre) kısa süreli kullanım ömrüne sahip olması sebebiyle, bu plastiklerin geri dönüşüme hızlı kazandırıldığı bilinmektedir. Ayrıca, genel olarak sektörler bazında da, plastik mamullerin en yoğun oranda kullanıldığı sektörün ambalaj sektörü olduğu yine bilinen bir gerçektir.

Sert plastik ambalajlarını, ana başlıklar altında ele alırsak; *şişeler, bidonlar, fıçı, varil ve IBC’ler, bardak, kap, kutu ve kovalar, kasa ve paletler, kapaklar* olmak üzere bir sınıflandırma yapılabilir. Bunlardan ilki olan *şişe* gruplarını ele alırsak, bu alanda PET ve YYPE plastik mamullerinin yaygın olduğu görülmektedir. İlaç şişeleri, bazen PP de olabilen ketçap/hardal/mayonez/sıvı margarin/sos gibi çok katlı (coex) şişeler, süt/ayran/kefir gibi içecek şişeleri, zirai ürün şişeleri, madeni yağ şişeleri, kozmetik

şişeler, deterjan şişeleri, tutkal, ayakkabı boyası gibi şişe ve benzeri ürünler olmak üzere YYPE'nin kullanıldığı çok geniş bir alan vardır. Gazlı-alkolsüz ve alkollü içecek şişeleri, ismi ile ünlenmiş su şişeleri, sıvıyağ şişeleri, kozmetik şişeler, deterjan şişeleri, sirke ve limon suyu gibi şişe ve benzeri ürünler olmak üzere PET pazarı da oldukça geniş bir alana sahiptir. Bunların dışında; kozmetik ve deterjan şişeleri, içerisinde taşınan üründen vb. sebeplerden olsa gerek, bazen PET ve YYPE dışında PP'den üretilir. Dolayısıyla, bu iki plastik (PET ve YYPE) dışında şişe gruplarında diğer plastiklerin kullanımı yok denecek kadar azdır (Arıkan, 2007).

Su şişeleri (5 L'den büyük olanları) dışında şişe grubundaki plastik mamuller, genellikle 0.25–5 L arasındaki hacme sahiptir. Bu hacimden daha büyük hacimli olan (5–150 L arası, genellikle 5–60 L) ve sınıflandırmanın ikincisi *bidonlar* ile üçüncüsü ve çok daha büyük hacimli olan (plastik variller, 30–220 L; IBC, 1000 L) *plastik fıçı, varil ve IBC'ler*, YYPE hammaddesinden üretilir. Bu büyük hacimli plastik malzemeler; madeni yağlar, zirai ilaçlar, kimyevi maddeler, tehlikeli kimyasallar, gıda ve temizlik malzemeleri gibi birçok farklı ürünün ambalajlanması, depolanması ve taşınması için kullanılırlar. Sınıflandırmanın dördüncüsü olan *bardak, kap, kutu ve kovalar* grubunda ise, her ne kadar kesin bir yargıya varmak zor olsa da, PP'nin yaygın olduğu (özellikle blok kopolimer PP) ve PS (polistiren) ile PET'in kullanım alanlarının bulunduğu söylenebilir. Sınıflandırmanın beşincisi olan *kasa ve paletler* grubunda ise; genellikle *kasalar* (özellikle mavi ve beyaz olanları) YYPE hammaddesinden üretilmekle birlikte PP de (özellikle siyah blok kopolimer PP olanları) azımsanmayacak miktarda vardır. *Paletlerde* de, YYPE'den üretim yaygındır. Sınıflandırmanın altıncısı olan *kapaklar* grubuna gelince; genellikle PP ve PE kullanımı var olmakla birlikte, PS kullanımı da mevcuttur (Arıkan, 2007).

Tüm bunlardan yola çıkarak; YYPE plastiği olarak “Petilen YY S” ürün adı ile tanımlanan hammadde ve şişirme kalıplama yöntemi ile üretilen siyah renkli bidonlar, PP plastiği olarak “blok kopolimer PP” hammaddesi ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen siyah renkli kasalar, PET olarak da “enjeksiyon–streç–şişirme kalıplama” yöntemi ile üretilen ve adından da anlaşılan berrak renkli PET şişeler tez çalışması için seçilmiş ve Konya Sanayi Bölgesi'nde belirli yerlerden temin edilmiştir. Böylelikle şişe grubu olarak PET, bidon veya varil, fıçı, IBC grupları olarak YYPE, kap, kova, kasa grupları olarak genel düşünüldüğünde PP plastiklerinin seçilmesi sonucu, sınıflandırma gruplarında (6 farklı grup) *ön plana çıkan* plastikler dikkate alınmış oldu.

3.2. Yöntem

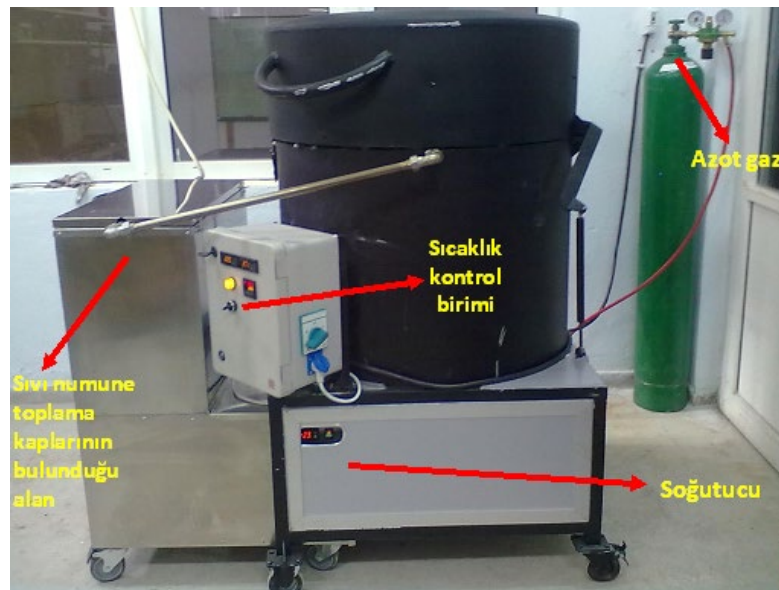
Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan deneysel faaliyetlerin yöntemleri açıklanmıştır. Plastik atıklardan katkıların elde edildiği piroliz işlemleri ve modifiye bitümlere uygulanan kimyasal analizler olmak üzere kimyasal deneyler, katkı etkisini değerlendirmek üzere uygulanan bitümlü bağlayıcı ve bitümlü sıcak karışım deneyleri olmak üzere, deneysel çalışmaları 3 farklı grupta ele almak mümkündür.

3.2.1. Kimyasal deneyler

Çalışma kapsamında, plastik atıkların birlikte pirolizleri yapılmış ve bitümlü bağlayıcı katkısı olarak, piroliz katı ürünleri kullanılmıştır. Ayrıca, seçilen katkılarla üretilmiş modifiye bitümlere, “SEM (scanning electron microscopy–taramalı elektron mikroskobu)” ve “FTIR (fourier transform infrared spectroscopy–fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)” analizleri uygulanmıştır.

3.2.1.1. Piroliz deney sistemi

Plastik atıkların birlikte piroliz işlemleri, şekil 3.7’de görülen deney sisteminde yapılmıştır. Fırın, kontrol ve yoğunlaştırma (soğutucu ve sıvı ürün toplama kısmı) birimleri olmak üzere, deney sistemi 3 farklı birimden oluşmaktadır.



Şekil 3.7. Piroliz deney sistemi ve birimleri

Piroliz işleminin ilk aşaması olarak; yüksekliği yaklaşık 30 cm ve iç çapı 10 cm olan çelik bir reaktör (şekil 3.8.a) içerisine deney için hazırlanmış numune koyulur ve deney cihazının fırın birimine reaktör dikey olarak yerleştirilir. Piroliz işleminin olduğu bu birimin iç kısmında, yüksek sıcaklığa dayanabilen ve ısıyı reaktöre aktaran direnç telleri vardır (şekil 3.8.b). Ayrıca, fırın çıkış borusu (deney sırasında bozulan ürünün reaktörden çıktığı, şekil 3.8.a’da sol taraftaki boru), sıvı kaplarını tutan boru ve bu iki borunun bağlantı borusu olmak üzere, bu boruların kalınlıkları artırılmış ve ilk başta şekil 3.7’deki gibi olan “piroliz deney cihazı”, sonraki aşamalarda modifiye edilmiştir (şekil 3.8.c). Şekil 3.8.c’de görüldüğü gibi; ürün akışını kolaylaştırmak ve tıkanmaları önlemek amacıyla, kalınlaştırılan borular üzerinde ısıtma sistemleri vardır. Çalışmada uygulanan piroliz işlemleri, cihazın bu son haldeki durumunda yapılmıştır.



Şekil 3.8. Piroliz deney sisteminin ekipmanları

Piroliz deney düzeneğinin kontrol biriminde, açma–kapama düğmesi ve sıcaklık ile ısıtma hızının ayarlanmasını sağlayan düğmeler bulunmaktadır. Reaktörden gelen fırın çıkış borusu, bağlantı borusu ve sıvı ürün yakalama kaplarını tutan boru yardımıyla reaktör içinde bozulan ürünün akışı sağlanmaktadır. Soğutucu sistemine gelen bu ürün, yoğunlaştırma biriminde sıvı ürüne dönüşmektedir. Sıvı ürün yakalama kaplarının (şekil 3.8.e) soğutucu içerisine (şekil 3.8.d) dikey olarak yerleştirilmesiyle, piroliz sürecinde akış halindeki ürünler yoğunlaştırılarak sıvı ürün olarak bu kaplarda toplanmaktadır.

Yoğunlaştırılamayan ürünler, sıvı ürün yakalama kaplarını tutan boru ve ona bağlanan hortum yardımıyla gaz ürün olarak dışarıya salınmaktadır. Ayrıca, piroliz işlemi için gerekli olan N₂ (Azot) gazı akışını sağlamak amacıyla, reaktörün diğer kısmına (şekil 3.8.a’da sağ taraftaki boru) N₂ gazı bağlanmaktadır.

Piroliz deney düzeneğinin çalışma sistemi incelendiğinde; piroliz işlemi için belli bir sıcaklık ayarlaması yapıldığında, ısıtmanın bu sıcaklıkta durduğu fakat sistemin sıcaklığının yükselmeye devam ettiği görülmektedir. Bunun sebebi şudur: Deney için gerekli hazırlıkların yapılıp cihazın çalıştırılmasıyla, reaktör ayarlanan ısıtma hızı ve sıcaklığa göre sistem tarafından ısıtılmaktadır. Ayarlanan sıcaklığa ulaştınca, sistem ısıtmayı kesmekte fakat fırın içinde reaktöre ısıyı aktaran sistem olan direnç tellerinde biriken enerji sonlanamamaktadır. Yalıtımın iyi olması ve sistemin hava almamasından dolayı, fırın içinde biriken enerji ile reaktör ısınmaya devam etmektedir. Yani, sistemin ataletiyle, ayarlanan sıcaklığa geldikten sonra da sıcaklık yükselişi devam etmekte ve piroliz reaksiyonu sürmektedir. Buradan hareketle, yapılan deneylerde sıcaklığın belli bir değere kadar (son sıcaklık) yükseldiği ve bu sıcaklıkta belli süre kaldıktan sonra düştüğü görülmüştür. Sistemin tamamen ısınmasının bittiği, soğumaya geçtiği ve piroliz sıcaklığının bu son sıcaklık olduğu düşüncesiyle, bu andan itibaren cihaz kapatılmış ve deney sonlandırılmıştır.

3.2.1.2. SEM (taramalı elektron mikroskopu) analizi

İnsan gözünün çok ince ayrıntıları görebilme olanağı sınırlı olduğu için, görüntü iletimini sağlayan ışık yollarının merceklerle değiştirilmesiyle, daha küçük ayrıntıların görülebilmesine olanak sağlayan optik cihazlar geliştirilmiştir. Ancak bu tür cihazlarda, elde edilen görüntü üzerinde işlem yapma imkanının olmayışı ve büyütme miktarlarının sınırlı olması nedeniyle, araştırmacılar yeni sistemler geliştirmeye yönelmiştir. Böylece, optik ve elektronik sistemlerin birlikte kullanılmasıyla yüksek büyütmelerde, üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar geliştirilmiştir. Bu prensip çerçevesinde tasarlanmış olan SEM, bu amaca hizmet eden cihazlardan birisidir.

Yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucu meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla, SEM görüntüsü elde edilir. Bu algılayıcılardan gelen sinyaller,

dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Ayırım gücü, görüntü ile analizi birleştirebilme ve odak derinliği gibi çeşitli özellikler, SEM'in kullanım alanını genişletmektedir (URL 14). Şekil 3.9'da görülen SEM cihazında, çalışma kapsamında belirlenen saf ve katkılı bitümlü bağlayıcı numunelerinin yüzey görüntüleri alınmıştır.



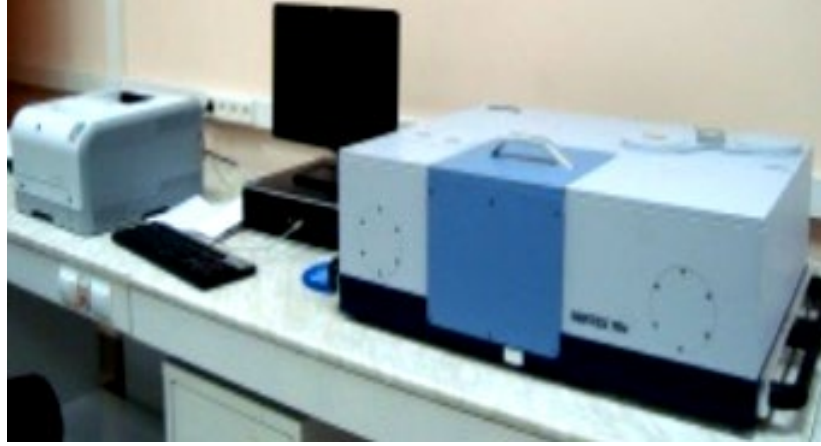
Şekil 3.9. SEM görüntü işleme ve analiz cihazı ve bilgisayar sistemi

SEM; optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği ve buna bağlı çeşitli çapta aparatlar ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklanmaktadır. Görüntü sisteminde ise; elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, bu dedektörlerin sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (URL 14).

3.2.1.3. FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) analizi

FTIR analizi, numune yapısının tayini için kullanılan analitik bir tekniktir. Numune yapısını hiç bozmaz veya çok az bozar. Numuneden geçirilen ışımanın dalga boyu değiştirilir ve değişik dalga boylarında numune tarafından soğurulan (emilen) ışın

miktarı ölçülür. Infrared (IR–kızılötesi) spektroskopisi moleküllerdeki çeşitli bağların titreşim frekanslarını ölçer ve moleküldeki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi verir. Spektrometre cihazlarının çift ışınlı ve daha gelişmiş FTIR cihazıdır. Cihazın spektral aralığı 15 cm^{-1} (uzak kızılötesi) ile $28,000\text{ cm}^{-1}$ (morötesi)'dir (URL 15). Tez çalışması kapsamında belirlenen bitümlü bağlayıcı numunelerinde bulunan fonksiyonel grupları incelemek için kullanılan FTIR spektrometre cihazı şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. FTIR spektrometre cihazı (URL 15)

IR spektroskopisi, organik bileşiklerin moleküler bağ özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemle katı, sıvı veya gaz halindeki organik bileşiklerin arasındaki bağların türleri, özellikleri, bağlanma yerleri vb. saptanabilir. Moleküller, kendilerine ait bir frekansta titreşmekte ve cihaz tarafından gönderilen IR ışını bu titreşim tarafından soğrulmaktadır. Soğrulmanın şeklinden bağ özelliklerine ait bilgi edinilmektedir. FTIR spektroskopisinde ışınma şiddeti, zamanın fonksiyonu olarak ele alınmaktadır (Ahmedzade ve ark., 2016).

3.2.2. Bitümlü bağlayıcı deneyleri

Bu çalışmada; piroliz deneyleri sonucunda elde edilen katkılar, saf 50/70 sınıfı Kırıkkale Rafinerisi bitümlü bağlayıcısı ile modifiye edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılara “penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite (RV), dinamik kesme reometresi (DSR), kırılgan eğilme reometresi (BBR), dönen ince film halinde ısıtma (kısa dönem yaşlanma–RTFOT), basınçlı yaşlandırma kabı (uzun dönem yaşlanma–PAV)” deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada uygulanan bu bitümlü bağlayıcı deneyleri hakkında genel bilgiler, bu bölümde sunulmuştur.

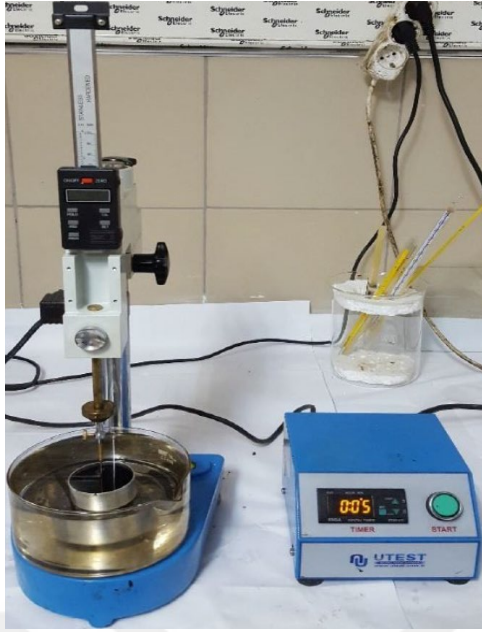
3.2.2.1. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri

Bitümlerin kıvamlılıklarının belirlenmesinde, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri uygulanır (Whiteoak, 2004). Penetrasyon deneyinde, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 5 saniye süre ile 25 °C'deki bitüm numunesine batma miktarı ölçülmektedir. 0.1 mm batma miktarı 1 penetrasyon olmak üzere, toplam batma miktarı ölçülerek bitümün penetrasyon değeri belirlenir. Bu deneyle bitümün kıvamlılığı yani katılığı belirlendiği gibi, sınıfı da belirlenir. Genel olarak; penetrasyon arttıkça adezyon artar, viskozite ve katılık azalır (Tunç, 2004). Penetrasyon değeri 500'e kadar numunelerde deney sıcaklığı 25 °C iken, 500'ün üzerinde olan numuneler için 15 °C'dir (İlcalı ve ark., 2001). Deney okumalarının en küçük ve büyük değerleri arasındaki fark, 0–49 penetrasyon aralığında en fazla 2 ve 50–149 aralığında en fazla 4 olacak şekilde; en az 3 penetrasyon okuması yapılmalı ve bu okumaların ortalaması alınarak en yakın tam sayı şeklinde penetrasyon değeri belirlenmelidir (ASTM D5, 2013).

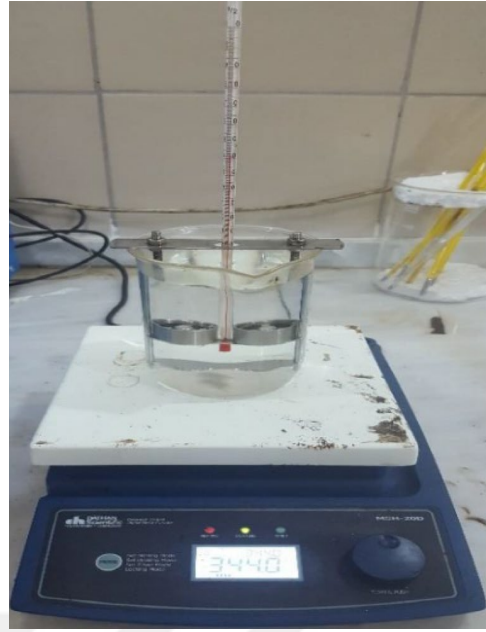
Bitümlü bağlayıcılar farklı sıcaklık değerlerinde akma yeteneği ve kıvamları ile karakterize edilirler. Kıvam, herhangi bir sıcaklık değerinde bitümün viskozitesi veya akışkanlık derecesini tanımlamak amacıyla kullanılan bir terimdir. Kıvamın sıcaklıkla değişim göstermesinden dolayı, farklı bitümlü bağlayıcıların kıvamlarının kıyaslanması amacıyla standart bir sıcaklık değerinin kullanılması gerekli olmaktadır. Bu sıcaklıktaki kıvamlılıklarına göre, bağlayıcılar sınıflandırılmaktadır (Uluçaylı, 2002).

Bütün bitümlü maddelerin yumuşaması belli bir sıcaklıkta gerçekleşmez. Penetrasyonu aynı olan iki bitüm numunesinin özellikleri bile farklı sıcaklıklarda değişebilir (İlcalı ve ark., 2001). Bu nedenle; standart kalınlık ve çapta yüzükler içine konan bitüm numunesi üzerine, standart çap ve ağırlıkta bilyeler yerleştirilir. Deney tertibatının su içinde belli hızda (5 °C/dak.) ısıtılması sonucu, bilyenin ağırlığıyla yüzük içindeki bitümün belirli bir derinliğe (25 mm) çökmesini sağlayan sıcaklık değeri, bağlayıcının yumuşadığı sıcaklık olarak belirlenir (Tunç, 2004). Deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği için, ısıtma hızına sıkı sıkıya bağlı kalınması esastır ve deneyde tespit edilen iki sıcaklık arasındaki fark 1 °C'yi aşmamalıdır (ASTM D36, 2014).

Penetrasyon cihazı, iğnesi ve tertibatı, numune kabı ve kabın konduğu aktarma kabı, zaman ölçer olmak üzere, penetrasyon test düzeneği şekil 3.11.a'da gösterilmiştir. Numunenin koyulduğu yüzükler, bilye ve merkezleme kılavuzları, deney düzeneğinin koyulduğu su dolu beher, termometre, manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı olmak üzere, yumuşama noktası deney düzeneği de şekil 3.11.b'de gösterilmiştir.



a. Penetrasyon deney düzeneği



b. Yumuşama noktası deney düzeneği

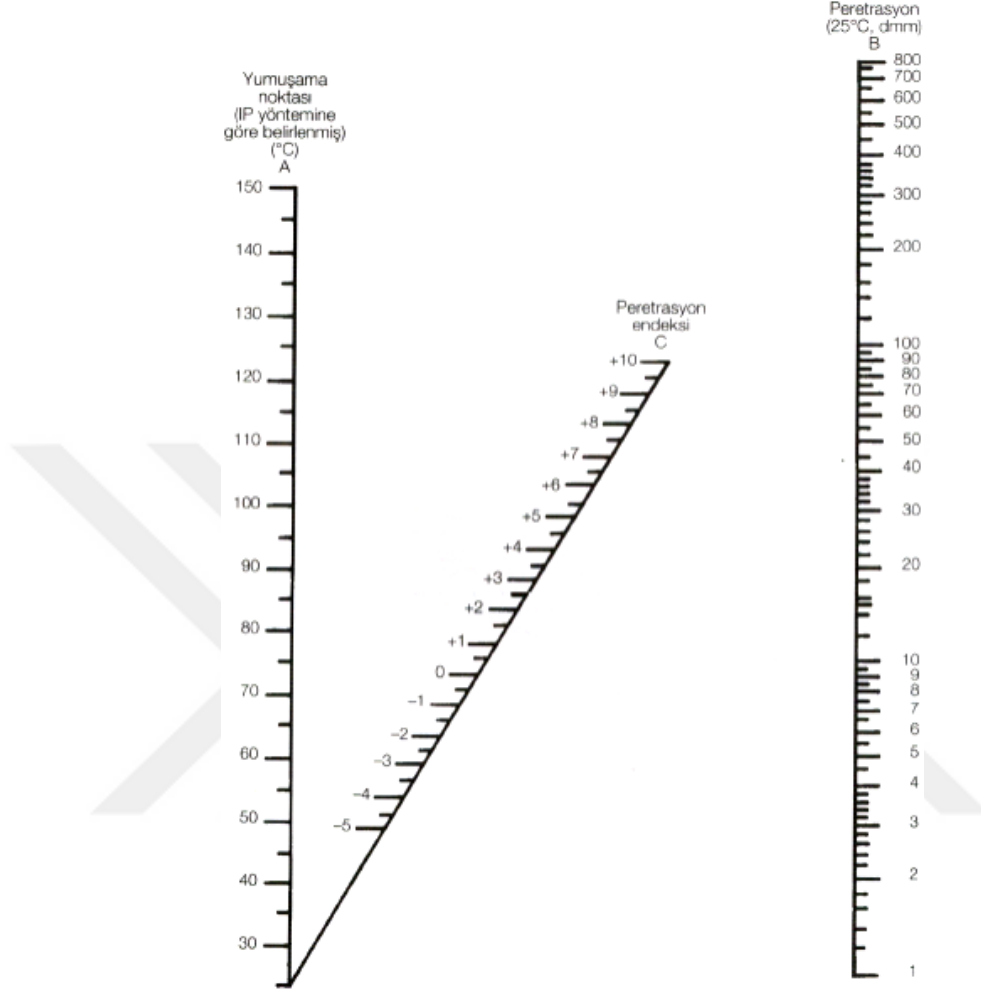
Şekil 3.11. Penetrasyon ve yumuşama noktası deney düzeneği ve ekipmanları

Her iki deney yönteminin de hassas bir şekilde izlenmesi önemlidir çünkü hafif bir sapma, deney sonuçlarında büyük farklılıklara neden olabilir. En çok yapılan hatalar; örnekleme, numune hazırlama, deney aletleri ve penetrasyon iğnesinin bakımsızlığı, sıcaklık, penetrasyon süresi ve yumuşama sıcaklığının tespitinde suyun ısıtma oranının yanlışlığıdır. Penetrasyon deneyi sıcaklığı oldukça önemlidir ve 0.1 °C hassaslığında kontrol sağlanması zorunludur. İğnelerin düzgünlüğü ve doğruluğu ile temizliği düzenli kontrol edilmelidir. Hassaslığı sağlamak için, otomatik zamanlama cihazları gerekmekte olup, bunların düzenli şekilde kontrol edilmesi sağlanmalıdır (Whiteoak, 2004).

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, aynı zamanda bitümün sıcaklık hassasiyetini de gösterir. Tüm bitümler termoplastik özellik gösterirler, ısıtıldıklarında yumuşar ve soğutulduklarında sertleşirler (Whiteoak, 2004). Bitümlerin, keskin bir şekilde tanımlanmış erime noktaları yoktur, sıcaklık arttıkça yavaş yavaş daha yumuşak ve daha az viskoz hale gelirler ve belirli bir yöntemle tanımlanmış yumuşama noktası, bitümlerin sınıflandırılması için de faydalıdır. Yumuşama noktası, bitümün hizmette karşılaştığı yüksek sıcaklıklarda akma eğiliminin bir göstergesidir (ASTM D36, 2014). Kıvamın sıcaklıkla değişimini tanımlamak amacıyla çeşitli ifadeler getirilmiştir. Bu ifadelerden en çok bilinenlerden biri, “Pfeiffer ve Van Doormal” tarafından geliştirilmiş olan ve bitümler için sıcaklık hassasiyetini veren “penetrasyon indeksi (PI)”.

Penetrasyon ve yumuşama noktası sıcaklığından faydalanarak, şekil 3.12’deki grafik yardımıyla PI değeri belirlenebilir. Sıcaklık hassasiyetleri yüksek olan bitümler

için (-3) civarında bir değerle ve düşük olan bitümler için (+7) civarındaki bir aralıkta, PI değerleri değişir. PI değerleri arttıkça sıcaklık hassasiyeti azalır (Whiteoak, 2004).



Şekil 3.12. Penetrasyon indeksi nomografı (Whiteoak, 2004)

3.2.2.2. Superpave bitümlü bağlayıcı deneyleri

Bitümlü bağlayıcıların kimyasal özellikleri çok karmaşıktır ve bitümler fiziksel özellikleri ile karakterize edilmektedir. Bağlayıcılar, penetrasyon değerlerine göre yani kıvamlılıklarına göre sınıflandırılmaktadır fakat bu tip sınıflandırma, bitüm davranışını tam yansıtamamaktadır. Bu nedenle, Amerika’da Asfalt Enstitüsü tarafından Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) adı altında bir sistem geliştirilmiştir. Böylece, kıvamlılık yerine bağlayıcıların fiziksel özelliklerini belirleyerek performans esasına dayalı olarak bir sınıflandırma yapılmaktadır. Bu sınıflandırma esasına göre yapılan bitümlü bağlayıcı deneyleri çizelge 3.5’de verilmiştir (Tunç, 2004).

Çizelge 3.5. Superpave bitümlü bağlayıcı deneyleri (Tunç, 2004)

Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri	Deneylerin Amacı
Dönen ince film halinde ısıtma (RTFOT)	Bağlayıcının sertleşme (yaşlanma) özelliklerini belirlemek
Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV)	Bağlayıcının sertleşme (yaşlanma) özelliklerini belirlemek
Dinamik kesme (kayma) reometresi (DSR)	Yüksek ve orta sıcaklıklarda bağlayıcının tekerlek izi ve yorulma çatlağı direncini belirlemek
Kiriş eğilme reometresi (BBR) Direkt çekme testi (DTT)	Düşük sıcaklıklarda bağlayıcının düşük sıcaklık çatlağı direncini belirlemek
Dönel viskometre (RV)	Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcının akışkanlığını ölçmek

3.2.2.2.1. Dönel viskometre (RV) deneyi

Viskozite; akmaya karşı direncin ölçüsüdür, bağlayıcıların sınıflandırılmasında kullanılan önemli bir kriterdir ve bağlayıcının kıvamlılığını tarif etmek için kullanılır. Sıcaklık, viskozite ölçümlerini etkileyen ana faktördür ve yükseldikçe viskozite azalır.

RV deneyi, bitümün değişik sıcaklıklarda sahip olduğu akıcılık özelliklerini gösteren temel deneydir. Agregata ile karıştırılma ve yola serilip sıkıştırılma esnaslarında, BSK’da bulunan bitümün belirli akıcılıkta olması gerekir. Aksi halde, agregata ile bitüm yeterli derecede bağlanamaz (eksik adezyon kuvveti) ve BSK yola serildikten sonra yeterli oranda sıkıştırılamaz. Bu durum, trafiğe açılmasından kısa süre sonra BSK’nın bozulmasına sebep olur. Bununla birlikte, bitümün yeterli akıcılıkta olmasını sağlayan sıcaklık faktörü bitümün yaşlanmasına sebep olan önemli bir etkidir. Yaşlanma, büyük oranda maruz kalınan yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, BSK inşaatının farklı aşamalarında bitümün sahip olması gereken akıcılık özelliklerine dikkat edilmesi oldukça önemli bir husustur (Arslan, 2010).



Şekil 3.13. Dönel viskometre deney cihazı ve burulma (tork) hareketi

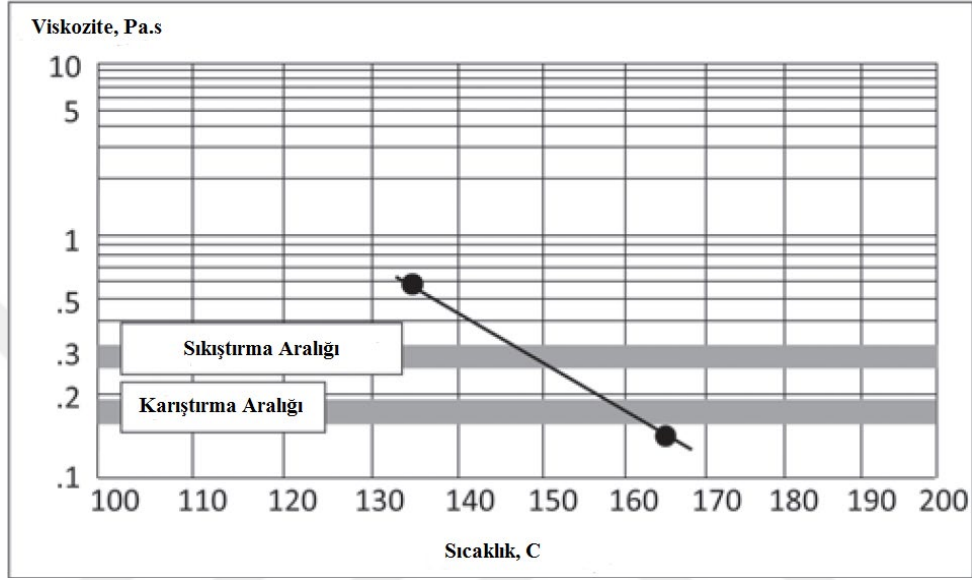
ASTM D4402 deney standardındaki hususlar dikkate alınarak ve 27 numaralı spindle (dönme aparatı) kullanılarak, çalışma kapsamındaki viskozite ölçümleri şekil 3.13’de gösterilen “Brookfield DV2T” viskometre cihazı ile yapılmıştır. Viskometre, farklı sıcaklıklarda bitümün viskozitesini ölçmek için kullanılır. Deney sıcaklığını korumak için sıcaklık kontrollü bir termosel (termal oda) kullanılarak, viskozite ölçülür. Dönmeye karşı direnci ölçmek için, bitüm numunesini içeren termostatik olarak kontrol edilen bir numune haznesi içinde spindle kullanılır. Viskozite; pascal saniye (Pa.s), milipascal saniye (mPa.s) veya santipoise (cp) cinsinden belirlenir. (cp), viskozite birimi olarak sıklıkla kullanılır ve (mPa.s)’e eşittir (ASTM D4402, 2015).

Cihazda seçilen herhangi bir hızda tork değeri değişir ve her sıcaklıkta tork–hız ilişkisi oldukça farklıdır. Cihazda seçilebilecek en yüksek hız 200 rpm’dir ve hız ile viskozite değerlerinin tespit edileceği aralık arasında sabit bir ilişki vardır. Yani; hız ne kadar yüksekse, bu aralık o kadar azalmakta ve nihayetinde doğru viskozite değerine daha çok yaklaşılmaktadır. Ayrıca, hızın büyük olması tork değerinin yüksek olmasına sebep olmakta ve bu, cihaz kapasitesinin %’si olarak ifade edilmektedir. Viskozite değerleri sıcaklıkla üstel olarak değişir ve sıcaklık azaldıkça viskozite değerleri artar. Cihazın değerleri tespit edebileceği aralık da orantılı olarak artar ve yukarıda bahsedilen sabit ilişki değişmeyeceği için, belirli bir hızdan sonra viskozite ölçümleri yapılamaz ve cihazın kapasitesi aşılır. Kısacası, her sıcaklıkta tork, seçilebilecek hız ve bunlara bağlı olarak cihaz kapasitesi çok farklı bir durum arz etmektedir.

ASTM D4402’de, viskozite ölçümünde seçilen hızın kapasite (tork) olarak % 10–98 aralığında olması şartı vardır. Tez çalışması kapsamında, 165 °C’deki viskozite ölçümlerinde, en yüksek hız olan 200 rpm seçilse bile genellikle % 10’a yakın tork değerleri ölçülmüş ve yumuşak olan birkaç bitümde % 10 sınırında kalınmıştır. Yani, 165 °C’de 200 rpm dışındaki bir hızda viskozite ölçümü çok mümkün olamamıştır. Okumalarda sabit bir hız olması nedeniyle diğer 150, 135 ve 120 °C’lerde de 200 rpm hızla ölçümler yapılmıştır. Fakat sıcaklık azaldıkça aynı hızın korunması için, yukarıda bahsedilen hususlar gereği kapasite değeri yükselmiş ve sert olan birkaç bitümde 120 °C’de bu hızda okuma yapılamamıştır. Bu numunelerde ise, % 98 koşulunu sağlayacak hızda ölçümler yapılmıştır. Bundan sonraki diğer sıcaklıklarda (105, 90, 75 ve 60 °C) da, bu koşuldaki hızlarda ölçümler yapılmış ve her bir sıcaklıkta özellikle 60 ve 75 °C’lerde hızın oldukça düşük seviyelere kadar indiği görülmüştür.

Viskozitenin tespitinde, genellikle, bahsedilen en yüksek hız (200 rpm) veya en yüksek kapasite (% 98) koşullarındaki viskozite ölçümleri dikkate alınmıştır. Yine de

her bir numune için her bir sıcaklıkta ASTM D4402 koşulunu sağlayan en düşük (% 10), en yüksek (% 98) kapasiteyi sağlayacak iki farklı hızda ve bunların ortalaması hızda olmak üzere toplam 3 farklı hızda viskozite ölçümleri yapılmıştır. Böylelikle; numunenin o sıcaklıktaki viskozitesinin farklı hızlarla nasıl değişim gösterdiği tespit edilerek, sonuçların değerlendirmesinde tüm gerekli hususlar fazlaca sağlanmıştır.



Şekil 3.14. Karıştırma ve sıkıştırma aralıkları, sıcaklık-viskozite grafiği (Buncher ve ark., 2014)

RV deneyinde, istenen herhangi bir sıcaklıkta bitümlü bağlayıcının viskozitesi ölçülebilmektedir. Laboratuvar karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını seçmek için, asfalt karışım tasarımı “eş-viskoz sıcaklık aralıkları” yöntemi kullanılmaktadır. Bunun amacı, karışımın hacimsel özellikleri üzerinde bitümlü bağlayıcı sertliğinin etkisini normalleştirmektir. Bu yöntem kullanılarak, aynı agrega yapısına sahip belirli bir asfalt karışımı, sert veya yumuşak bir bitümlü bağlayıcının kullanılmasına bakılmaksızın çok benzer hacimsel özellikler sergileyecektir. Bu yöntemde, şekil 3.14’de gösterildiği gibi, sıcaklık ve viskozite arasında bir ilişki kurarak, bitümlü bağlayıcı viskozitesi iki test sıcaklığında belirlenir. Sıkıştırma sıcaklıkları, viskozite-sıcaklık hattının 0.28 ± 0.03 Pa.s sıkıştırma viskozite aralığını geçtiği yerde; karıştırma sıcaklıkları ise, viskozite-sıcaklık hattının 0.17 ± 0.02 Pa.s karıştırma viskozite aralığını geçtiği yerde belirlenir.

Yüksek oranda modifiye edilmiş bağlayıcıların kullanımının artması, genellikle alışılmadık ($177\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde) yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına neden olmaktadır. Bu aşırı sıcaklıklarda, karıştırma işlemi sırasında, bağlayıcının bozunması ve yaşlanmasıyla ilgili potansiyel problemler vardır. Ek olarak; bazı kaba karışımlarda

bağlayıcının boşalması, bazı agrega tipleri tarafından bitümün aşırı emilmesi ve düşük karışım sertliği nedenleriyle, yüksek sıkıştırma sıcaklıkları doğru yoğunluk verilerinin elde edilmesinde potansiyel sorunlara yol açar (Buncher ve ark., 2014).

3.2.2.2.2. Dönen ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT)

RTFOT deneyi için kullanılan etüv (cihaz) şekil 3.15’de gösterilmiştir. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi, cihazın iç kısmındaki raflı bölmelere deney numuneleri için kullanılan özel olarak tasarlanmış kavanozlar (kaplar) yerleştirilir. Bu raflı bölme, 163 °C sabit sıcaklıktaki fırın içinde ve yatay eksen etrafında belirlenen hızda dönmektedir. Dönmekte olan kavanoz, sürekli olarak taze bağlayıcı filmi açığa çıkarmaktadır. Her bir dönüşte, numune kavanozunun ağzı bir hava jetinden geçmekte ve jetten gelen ısıtılmış hava, numune üzerine birikmiş olan buharı atmaktadır (Uluçaylı, 2002).



Şekil 3.15. Dönen ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) için kullanılan cihaz

Isıtma ile uçucu madde kaybının tespit edilmesi ve ısıtmadan sonra elde edilen yaşlanmış bitümlü bağlayıcının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi olmak üzere iki ayrı amaç için bu deney yapılmaktadır. Kütle kaybı, bitümlü bağlayıcı içerisindeki uçucu maddelerin kaybindan ibarettir ve taşıma–depolama, ısıtma, asfalt kaplamanın inşası ve kullanımı süreçlerinde bitümün sertleşmesinin yani yaşlanma ile fiziksel özelliklerinin değişmesi veya durabilitesinin bir göstergesidir. Deney sonrasında, kütle kaybı hesabı için alınan numuneler dışında geriye kalan yaşlanmış numuneler; bir kaba boşaltılır, homojenliği sağlamak üzere karıştırılır ve diğer deneylerde (PAV ve DSR) kullanılmak üzere saklanır (Tunç, 2004).

Bu test yönteminde; belli bir film kalınlığında hareket eden bitümlü bağlayıcıya, ısı ve havanın etkisi ölçülür. Hareketli bir bitümlü bağlayıcı filmi, 163 °C sıcaklıkta bir fırında 85 dakika ısıtılır. Isı ve havanın etkileri, ısıtma işleminden önce ve sonra ölçülen fiziksel test değerlerindeki değişikliklerden belirlenir. Test yöntemi, yaklaşık 150 °C sıcaklıkta BSK sırasında bitümün özelliklerindeki yaklaşık değişimi gösterir. Karıştırma sıcaklığı 150 °C seviyesinden önemli ölçüde farklılık gösterirse, özellikler üzerinde az ya da çok etki meydana gelir (ASTM D2872, 2012).

3.2.2.2.3. Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi



Şekil 3.16. Basınçlı yaşlandırma kabı ve numune koyulan raflar

RTFOT deneyi, BSK'nın hazırlanması ve inşası sırasında karışım sıcaklığı nedeniyle oluşan yaşlanma (kısa dönem) performansını belirlemek için yapılırken; PAV deneyi ise, bağlayıcının kaplama ömrü boyunca maruz kalacağı yaşlanma (uzun dönem) etkilerini belirlemek için yapılmaktadır. Bunun için bitümlü bağlayıcı numunesi 20 saat süreyle yüksek basınç ve sıcaklık etkisine tabii tutularak, bağlayıcının uzun dönemde maruz kalacağı sertleşme etkisi oluşturulur (Tunç, 2004). İçinde rafları olan ve istenilen sıcaklık ve basıncı sağlayabilen PAV deney cihazı ve rafları şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Bitümlü bağlayıcının servis ömrü boyunca karşılaştacağı şartlar, RTFOT ve PAV deneyleri uygulanarak sağlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen numunelere, çizelge 3.6'da gösterilen deneyler tatbik edilerek bitümün fiziksel özellikleri belirlenmekte ve gerçek şartlara benzeşim sağlanarak, bitümün performansı belirlenmeye çalışılmaktadır. Dolayısıyla bu deney metotları, daha gerçekçi yaklaşımlar sağlamaktadır (Tunç, 2004).

Çizelge 3.6. Superpave bitümlü bağlayıcı deneylerinde yaşlanma şartları (Tunç, 2004)

Bitümlü Bağlayıcı Deneyleri	Bağlayıcı Şartı
Dinamik kayma reometresi (DSR)	Orijinal, kısa dönem ve uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcı
Dönel viskometre (RV)	Orijinal bitümlü bağlayıcı
Kiriş eğilme reometresi (BBR)	Uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcı
Direkt çekme testi (DTT)	Uzun dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcı

PAV deneyinde, basınçlı hava ve yüksek sıcaklık aracılığıyla, hızlandırılmış yaşlanma simüle edilir. Böylelikle, hizmet süresi boyunca yaşlanma neticesinde bitümlü bağlayıcılarda meydana gelen reolojideki değişimler simüle edilmiş olur. Bu deneyde, RTFOT deneyi sonrasında elde edilen numune kullanılır. Numune standart paslanmaz çelik kaplara yerleştirilir, seçilen şartlandırma sıcaklığında 20 saat süreyle 2.10 MPa'ya kadar hava ile basınçlı bir tankta yaşlandırılır (2.1 MPa'yı aşan basınç, yaşlanma oranını önemli ölçüde artırmadığı için daha yüksek basınçlar uygulanmaz).

Sıcaklık, asfalt bağlayıcı sınıfına göre seçilir. PAV sonrası kalıntının daha sonra vakumla gazı giderilir. Farklı bağlayıcıların sertleşme derecesi, PAV'daki sıcaklıklara ve basınçlarına göre değişir. Bu nedenle, iki farklı bağlayıcı, bir sıcaklık ve basınç koşulunda benzer bir oranda yaşlanabilir, ancak başka bir koşulda farklı yaşlanabilir.

PAV yaşlanma sıcaklığı benzetilmiş (simüle edilmiş) iklim koşullarına dayanır ve 90, 100 veya 110 °C sıcaklıklarından biridir. Normalde bu sıcaklık, PG 58–xx ve üzeri bitümler için 100 °C'dir. Bununla birlikte, PG 70–xx ve üzeri bitümler için 110 °C olarak seçilebilir (ASTM D6373, 2016). Yaklaşık 115 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda PAV uygulanması, bitümün kimyasını değiştirebilir ve kaçınılmalıdır.

Hizmet süresindeki bağlayıcının yaşlanmasında; karışımın hacimsel oranları ve geçirgenliği, agregaların özellikleri ve diğer faktörler gibi karışımla ilişkili değişkenler ve ortam sıcaklığı etkilidir. Bu deney, farklı bitümlerin seçilen hızlandırılmış yaşlanma sıcaklıkları ve basınçlarında yaşlanmaya karşı dirençlerinin değerlendirilmesini sağlar, ancak karışım değişkenlerini hesaba katamaz (ASTM D6521, 2018).

3.2.2.2.4. Dinamik kesme (kayma) reometre (DSR) deneyi

Bu deney yöntemi; paralel iki plaka kullanarak numuneye dinamik (salınımlı) kesme uygulanması sonucu, bitümlü bağlayıcıların dinamik kayma modülü (G^*) ve faz açısının (δ) belirlenmesini kapsar ve 100 Pa–10 MPa aralığında dinamik kayma modülü değerlerine sahip bitümlü bağlayıcılara uygulanabilir. Modül içindeki bu aralık, tipik olarak 10 rad/s'de 4–88 °C arasında elde edilir. Deney yöntemi, bağlayıcıların lineer

viskoelastik özelliklerini belirlemek için tasarlanmıştır ve yaşlandırılmamış (orijinal), kısa dönem (RTFOT sonrası) ve uzun dönem (RTFOT+ PAV sonrası) yaşlandırılmış numuneler kullanılarak her birine ayrı olarak deneyler uygulanır. Orijinal ve RTFOT sonrası numune, 1 mm kalınlığında 25 mm çapında; RTFOT+PAV sonrası numune ise, 2 mm kalınlığında 8 mm çapında paralel metal iki plaka arasına yerleştirilir. Deney sırasında, paralel plakalardan biri önceden seçilmiş frekanslarda ve açısal sapma (veya tork) genliklerinde diğerine göre salınım yapar. Gerekli genlik, test edilen bitümün kompleks kayma modül değerine bağlıdır. İki plakayı da içine alacak şekilde deney numunesi, termal olarak kontrol edilen bir ortamda veya deney kısmında ± 0.1 °C deney sıcaklığında tutulur. Salınımlı yükleme frekansları 1–160 rad/s aralığında olabilir ve bağlayıcının performans sınıfının (PG) belirlenmesi için, deney 10 rad/s frekansında gerçekleştirilir. Kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ); deney sisteminin bağlı olduğu ve deneyi komuta eden bilgisayar yazılımı kullanılarak, reometre çalışmasının bir parçası olarak otomatik olarak hesaplanır (ASTM D7175, 2015). Şekil 3.17’de DSR deney cihazı ve bilgisayar yazılım sistemi görülmektedir.

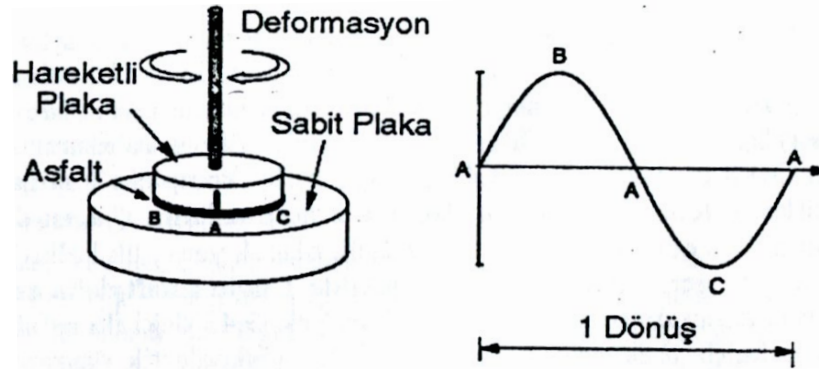


Şekil 3.17. Dinamik kesme reometre (DSR) deney cihazı ve bilgisayar yazılım sistemi

Bu deney için gerekli test sıcaklığı, bitümlü bağlayıcının kullanılması amaçlanan coğrafi bölgelerdeki kaplamanın yaşadığı sıcaklıkla ilgilidir. G^* , bitümlü bağlayıcının yük altında deformasyona karşı dayanıklılığının veya direncinin bir göstergesidir. G^* ve δ , lineer viskoelastik bölgede bitümlü bağlayıcıların kayma deformasyonuna karşı direncini tanımlar ve bağlayıcı performansı ile ilgili kriterleri hesaplamak için kullanılır. Bitümlü bağlayıcı yapısal olarak, 250 μm 'den daha küçük boyutlara sahip partiküllerle sınırlıdır. Partiküllü malzeme içeren 2 fazlı bir malzemeyi doğru bir şekilde karakterize etmek için, deney numunesinin kalınlığının maksimum parçacık boyutunun en az 4 katı

(1,000 μm =1 mm) olması gerektiği kabul edilir. Ayrıca; DSR'den elde edilen verilerden G^* hesaplanması, test örneğinin çapının doğru bir şekilde ölçülmesine bağlıdır. Deney prosedüründe, test numunesi çapının, test plakalarının çapına eşit olduğu kabul edilir. Bunların yanısıra, bitümlü bağlayıcıların fiziksel özellikleri test sıcaklığına ve termal geçmişe karşı çok hassastır. Termal geçmiş, testten önce bağlayıcı numunesinin ısıtılma sayısıdır. Deney sıcaklığını ± 0.1 °C'de kontrol etmek ve test öncesinde numune ısıtılma sayısını sınırlandırmak (sadece bir ısıtma önerilir), sonuçları üretmek ve laboratuvarlar arasında tekrarlanabilir test sonuçları elde etmek için gereklidir (ASTM D7175, 2015).

Bitüm visko-elastik ve termo-plastik bir malzemedir ve bitümün özelliklerinin belirlenmesinde her iki özelliğin birlikte göz önüne alınması gerekir. Yükleme süresi ve sıcaklığın bağlayıcı üzerindeki etkileri, DSR deneyi ile değerlendirilebilmektedir. Şekil 3.18'de görüldüğü gibi, sabit ve dönebilen iki plaka arasına konan belirli kalınlıktaki bitüm numunesi belli bir sıcaklık ve hızda döndürülmeye çalışılır. Döner plakaya tatbik edilen gerilme ile plaka tablanın merkezinden (şekil 3.18 A noktasından) B noktasına hareket ettirilir. Daha sonra B noktasından, A ve C noktalarına kadar döndürülür. Son olarak C noktasından tekrar A noktasına döndürülerek bir devir tamamlanır ve deney süresince tekrar edilir. Bir devrin dönme hızına da frekans denir (Tunç, 2004).



Şekil 3.18. Dinamik kesme reometresi (DSR) deney düzeneği (Tunç, 2004)

DSR deneyiyle elde edilen G^* , tekrar eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direnci ifade eder ve buradaki deformasyon elastik (geçici) ve viskoz (kalıcı) olarak iki türdür. G^* ve δ değerleri, bağlayıcının sahip olduğu sıcaklık ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişir. Yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı viskoz davranış yani kalıcı deformasyonlar gösterirken, düşük sıcaklıklarda ise elastik davranış göstermektedir. $\delta=90^\circ$ için çok yüksek ısılarda bitüm sadece viskoz davranışı temsil ederken, G^* 'ın elastik davranışı olmayacaktır. Çok

düşük ısılarda ise, tamamen elastik deformasyon olduğu için G^* 'ın viskoz davranışı olmayacak ve $\delta=0^\circ$ olacaktır. Ancak normal kaplama ısısı ve trafik yüklemesi altında, bağlayıcılar viskoz ve elastik davranış sergileyeceklerdir. Bağlayıcının visko-elastik özellikleri, G^* ve δ değerleri ile birlikte izah edilebilmekte ve G^* ve δ sonuçları ile bağlayıcıların performans esaslı olarak özellikleri belirlenebilmektedir (Tunç, 2004).

3.2.2.2.5. Kiriş eğilme reometre (BBR) deneyi

Bu deney yöntemi; bağlayıcının eğilme-sünme rijitliği veya uygunluğu ile “m” değerinin, kiriş eğilme reometresi ile belirlenmesini kapsar. Bu deneyde, orta noktasına uygulanan sabit bir yüke maruz kalan ve basit bir şekilde desteklenen prizmatik bitüm kirişinin orta nokta deformasyonu ölçülür. Deney cihazı sadece yükleme modunda çalışır; geri kazanım ölçümleri alınamaz. Asfalt kaplamaların düşük sıcaklıktaki termal çatlama performansı, karışımda bulunan bağlayıcının sünme rijitliği ve “m” değeri ile ilgilidir. Bu deney için gerekli sıcaklık, bitümlü bağlayıcının kullanılması amaçlanan coğrafi bölgelerdeki kaplamanın yaşadığı kış sıcaklıklarına bağlıdır (ASTM D6648, 2016). Şekil 3.19’da BBR deney cihazı ve bilgisayar yazılım sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Kiriş eğilme reometre (BBR) deney cihazı ve bilgisayar yazılım sistemi

Bitümlü bağlayıcılar düşük ısılarda son derece rijit (katı) bir davranış gösterirler. Bu deneyle, asfalt kaplamaların düşük sıcaklıklarda sahip olabileceği elastik davranışlar belirlenmeye çalışılmaktadır. Düşük sıcaklık çatlakları genellikle kaplamanın hizmete açılmasından bir müddet sonra oluştuğu için, deney için kullanılan bitümlü bağlayıcı numunesi (RTFOT+PAV) ile yaşlandırılarak elde edilmektedir (Tunç, 2004).

Bu testin süresi 4 dakika (240 sn.) olup daha uzun süreli yüklemeler için aranan rijitlik değerleri cihazdan elde edilen grafik çıktısıyla bulunabilmektedir. Sünme rijitlik

değerinin, kaplamanın minimum tasarım sıcaklığında iki saat yüklemekten sonra elde edilmesi istenmektedir. Ancak araştırmacıların yaptığı çalışmalar sonucunda deney ısı, bu (min. kaplama tasarım sıcaklığı) sıcaklıktan 10 °C fazlasına yükseltildiğinde, 60 saniyelik yükleme sonucunda elde edilen sünme rijitliğinin iki saatlik yükleme ile elde edilene eşit olduğu görülmüştür. Dolayısıyla 240 saniyelik test süresi fazlasıyla yeterli gelmektedir. Bu deneydeki ikinci parametre olan “m” değeri, sünme rijitliği ile zaman arasındaki ilişkinin değişimini temsil etmektedir. 60 saniyedeki sünme rijitliği ve “m” değerleri, deney cihazı tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır (Tunç, 2004).

3.2.2.2.6. Bitümlü bağlayıcı performans sınıfı (PG)

Asfalt karışım davranışında; sıcaklık duyarlılığı, viskoelastisite ve yaşlanma özellikleri olmak üzere üç önemli bağlayıcı özelliği vardır. Bağlayıcının özellikleri sıcaklığa duyarlıdır ve daha soğuk sıcaklıklarda daha serttir. Bu nedenle, belirli bir test sıcaklığı tarihsel olarak her bitümlü bağlayıcı ve karışım testine eşlik eder. Test sıcaklığı belirlenmeden, deney sonuçları etkili bir şekilde yorumlanamaz. Aynı nedenden ötürü, bitümlü bağlayıcı davranışı yükleme süresine de bağlıdır; daha kısa yükleme süresi altında bitüm daha serttir. Bitümlü bağlayıcı davranışının sıcaklık ve yük süresine bağımlılığı, bu iki faktörün birbirinin yerine kullanılabileceği anlamına gelir. Örneğin, hızlı yükleme oranları düşük sıcaklıklarla simüle edilebilir (Buncher ve ark., 2014).

Performans sınıfı (PG) sisteminin ortaya çıkmasıyla, belirli bir deney için tek bir sıcaklık belirtilmesi geçersiz hale gelmiştir. Fiziksel bir özellik için test sıcaklığı belirtmek yerine, istenen özellik parametresi ayarlanmış ve bu değere ulaşan sıcaklık, ilgili deney yöntemi ile belirlenmiştir. Bu, bağlayıcı deney felsefesinde temel bir değişikliktir ve beklenen çevre koşullarında bitümün sınıflandırılmasını sağlar. Bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık (tekerlek izi), düşük sıcaklık (termal çatlama) ve yaşlanma (yorulma) davranışlarını yansıtmak için, PG sistemi bazı testlerden oluşmaktadır. Asfalt kaplama sistemindeki bağlayıcının performans yeteneği; farklı sıcaklıklar, yükleme oranları ve yaşlanma aşamalarındaki bağlayıcı özellikleri ile belirlenir.

Bitümlü bağlayıcı visko-elastik bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda, neredeyse tamamen viskoz bir sıvı görevi görür ve motor yağı gibi yağlayıcının kıvamını gösterir. Düşük sıcaklıklarda, çoğunlukla elastik bir katı gibi davranır, yükleme ve boşaltmada orijinal şekline geri döner. Çoğu kaplama sisteminin bulunduğu ara sıcaklıklarda ise, viskoz sıvı ve elastik bir katı özelliğine sahiptir. Bitüm kimyasal olarak organik ve

çevreden gelen oksijenle reaksiyona girer. Oksidasyon; bitüm moleküllerinin yapısını ve bileşimini değiştirir, bağlayıcının daha kırılgan olmasına neden olur ve daha yüksek sıcaklıklar ve hava boşluklarında hızlı gerçekleşir. Böylece bağlayıcı yaşlanır (sertleşir). BSK üretimi sırasında, karıştırma ve sıkıştırmayı kolaylaştırmak için bitüm ısıtıldığında, önemli ölçüde bu yaşlanma meydana gelir (Buncher ve ark., 2014). PG sisteminde; bitümün farklı sıcaklıklardaki özellikleri DSR ve BBR, yaşlanma özellikleri de RTFOT ve PAV deneyleri ile belirlenebilmektedir.

DSR deneyi ile elde edilen G^* ve δ değerleri, asfalt kaplamanın tekerlek izi deformasyon ve yorulma çatlağı direnci için bir göstergedir. Tekrar eden ağır trafik yüklerinin yüksek hava sıcaklıklarında oluşturduğu viskoz deformasyonların birikmesi sonucu kaplamada tekerlek izleri oluşmaktadır. Yorulma çatlakları genel olarak düşük ve orta sıcaklıklarda, kaplamanın bir müddet kullanımından sonra oluşur (Tunç, 2004).

“ $G^*/\sin\delta$ ” değeri tekerlek izi faktörü ve “ $G^*.\sin\delta$ ” değeri de yorulma faktörü olarak göz önüne alınır. 10 rad/s frekansında uygulanan DSR deneyi sonucunda; orijinal bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değeri minimum 1.0 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değeri minimum 2.20 kPa ve (RTFOT+PAV) ile yaşlandırılmış bağlayıcının $G^*.\sin\delta$ değeri maksimum 5,000 kPa şartlarını sağlayacak şekilde, bağlayıcının yüksek sıcaklıklardaki PG’si ve yorulma çatlağı direnci belirlenir (ASTM D6373, 2016).

Asfalt kaplama sıcaklığı düştüğünde büzülür ve alt tabaka ile sürtünmeden ötürü, kaplamada çekme gerilmeleri oluşur. Eğer bu gerilmeler, kaplamanın çekme dayanımını aşarsa, düşük ısı çatlakları oluşur. BBR deneyi ile elde edilen “sünme rijitliği” ve “m” değerleri, düşük sıcaklık çatlak direncinin bir göstergesidir. Sünme rijitliği çok yüksek ise, bitüm gevrek davranış göstereceğinden dolayı daha çok çatlama oluşacaktır (Tunç, 2004). Bu çatlakları önlemek için, BBR deneyi sonucunda 60 sn. yükleme sonundaki; (RTFOT+PAV) ile yaşlandırılmış bağlayıcının sünme rijitliği değeri maksimum 300 MPa ve m değeri minimum 0.30 şartlarını sağlayacak şekilde, bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık PG’si belirlenir. Ayrıca, PG belirlenmesinde etkisi olmasa da, RV deneyi ile elde edilen 135 °C’de bitüm viskozitesi maksimum 3 Pa.s olmalı ve RTFOT deneyi sonrasında oluşan kütle kaybı da maksimum % 1 olmalıdır (ASTM D6373, 2016).

3.2.3. Bitümlü sıcak karışım (BSK) deneyleri

Çalışma kapsamında uygulanan bitümlü bağlayıcı deneyleri sonucunda; seçilen katkılarla belirli oranlarda hazırlanan katkılı bitümler kullanılarak, BSK deneyleriyle de

piroliz katkılarının etkileri incelenmiştir. “Marshall karışım tasarımı” ve “tekerlek izi deneyi” olmak üzere yapılan bu BSK deneyleri hakkındaki genel bilgiler, bu bölümde sunulmuştur.

3.2.3.1. Marshall karışım tasarım deneyi (yöntemi)

Karışım tasarımının amacı, kaplama yapısının bir parçası olarak uzun ömürlü performans verecek bitüm ve agrega kombinasyonunu belirlemektir. Tasarım, BSK’da kullanılmak üzere gerekli malzeme oranlarını belirlemek için geliştirilen laboratuvar süreçlerini içerir. Bu süreçler; mineral agreganın uygun şekilde gradasyonunu sağlamak için agrega kaynaklarından uygun karışımın belirlenmesini ve karışımda kullanılacak bağlayıcı tipi ve miktarının seçilmesini içerir. Çeşitli çevre ve yükleme koşullarında, iyi tasarlanmış BSK’nın uzun yıllar başarılı bir şekilde hizmet vermesi beklenebilir.

Karışım tasarımı, bir asfalt kaplamanın gerektiği gibi performans göstermesini sağlamak için sadece başlangıç noktasıdır ve uygun inşaat uygulamaları ile birlikte karışım tasarımı, iyi performans gösteren asfalt kaplamaların elde edilmesinde önemli bir adımdır. Birçok durumda kötü performans gösteren BSK’nın nedeni, laboratuvarla tasarlanandan farklı karışımın üretilmesinden veya zayıf ve uygun olmayan tasarımdan kaynaklanmaktadır. Doğru karışım tasarımı, belirlenmiş laboratuvar teknikleri ve tasarım kriterlerine bağlı kalmayı içerir. Bu teknikler ve kriterler, asfalt kaplamaların performansını gözlemleme konusunda yıllar boyunca oluşan deneyimler ve bilimsel araştırmalara dayanır. Bu bakımdan, laboratuvar yöntemlerinin tam olarak yazıldığı gibi takip edilmesi önemlidir (Buncher ve ark., 2014).

Kaplamalar, istenen belirli özellikleri sağlamak için tasarlandığı, üretildiği ve inşa edildiğinde iyi performans gösterebilir. Bu özellikler, BSK’nın esnek kaplama yapısındaki konumuna ve proje beklentilerine bağlı değişkenlik gösterebilir. Tasarım, büyük ölçüde bitmiş inşaat ürünüde istenen özellikleri elde etmek için malzemeleri seçme ve oranlama konusudur ve tasarımdaki genel amaç, BSK’yı oluşturan agregaların ve bağlayıcı içeriğinin aşağıdaki koşullar doğrultusunda belirlenmesidir:

- Dayanıklı bir kaplama sağlamak için yeterli bağlayıcı;
- Bozulma veya yer değiştirme olmadan trafik taleplerini karşılamak için yeterli karışım stabilitesi;
- Zararlı miktardaki hava ve nemin, karışıma geçmesini sınırlamak için maksimum boşluk içeriği;

- Uçucu bileşen ve stabilite kaybı ile kuma olmadan az miktarda termal bağlayıcı genleşmesi ve trafik yükü altında az miktarda ek sıkıştırma için toplam sıkıştırılmış karışımda yeterli hava boşlukları;
- Karışımın ayrışma olmadan, stabilite ve performanstan ödün vermeden verimli bir şekilde yerleştirilmesine izin verecek yeterli işlenebilirlik;
- Elverişsiz hava koşullarında yeterli kayma direnci sağlamak için agrega dokusu ve sertliği.

Tasarımının nihai amacı, istenen tüm özellikler arasında bir denge sağlayacak benzersiz bir tasarım bağlayıcı içeriği seçmektir. Nihai kaplama performansı durabilite, geçirimsizlik, mukavemet, stabilite, rijitlik, esneklik, yorulma direnci ve işlenebilirlik ile ilgilidir. Bu bağlamda, tüm bu özellikleri en üst düzeye çıkaracak tek bir bağlayıcı içeriği yoktur. Bunun yerine, belirli koşullar için gerekli özelliklerin optimize edilmesi temelinde bir bağlayıcı içeriği seçilir (Buncher ve ark., 2014).

Marshall metodu kapsamında deney süreci, deney numunelerinin hazırlanması ile başlar. Tasarımda kullanılan tüm deneysel malzemeler, ilgili şartnamelerinin fiziksel gereksinimlerini karşılamalı; agrega karışım kombinasyonları, ilgili şartnamelerin gradasyon gerekliliklerini karşılamalı; yoğunluk ve boşluk analizleri yapmak amacıyla, BSK'da kullanılan tüm agregaların ve bağlayıcının özgül ağırlıkları belirlenmelidir. Bu gereklilikler, herhangi bir karışım tasarım yöntemi için dikkate alınması gereken rutin deney, şartname ve laboratuvar teknikleridir.

Marshall metodunda; 101.6 mm (4 inç) çap ve 63.5 mm (2½ inç) yükseklikte standart deney numuneleri kullanılır. Bu numune; bitümlü bağlayıcı ve agrega grubunun ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması için belirli bir prosedür kullanılarak hazırlanır. Bu tasarım yönteminin iki temel özelliği, sıkıştırılmış deney numunelerinin yoğunluk–boşluk analizi ve stabilite–akma deneyidir (Buncher ve ark., 2014).

3.2.3.1.1. Sıkıştırılmış karışım numunesinin yoğunluk–boşluk analizi

Laboratuvarda bir karışım tasarımı gerçekleştirildiğinde, bu karışımın kaplama yapısındaki olası performansını belirlemek için karışım analiz edilir. Kullanılan tasarım yöntemine bakılmaksızın tipik olarak tüm karışımlar üzerinde, hacimsel analiz yapılır. Hacimsel analiz; karışımın özgül ağırlığı, hava boşluğu ve bitüm içeriği, karışımdaki mineral agregalar arası boşluk (VMA) ve bitümle doldurulmuş boşluk (VFA) olmak üzere beş özelliğe ve bu özelliklerin karışım davranışı üzerindeki etkisine odaklanır.

3.2.3.1.1.1. Karışımın özgül ağırlığı (G_{mb} ve G_{mm})

Bir asfalt karışımın yoğunluğu, birim hacim başına düşen karışımın kütlesi olarak tanımlanır. Asfalt kaplamanın tasarımı ve inşası sırasında, “karışımın hacim özgül ağırlığı (G_{mb})” ve “maksimum (teorik) özgül ağırlık (G_{mm})” olmak üzere, tipik olarak iki farklı karışım özgül ağırlığı belirlenir. Karışım tasarımı gerçekleştirilirken, laboratuvarda sıkıştırılmış numunelerin hava boşluğu içeriğini hesaplamak için her iki değere de ihtiyaç vardır (Buncher ve ark., 2014).

Laboratuvar örneklerinin G_{mb} değerinin belirlenmesi, asfalt karışım tasarımının ve deneyinin temel bir bileşenidir. Tüm özgül ağırlık hesaplamaları, birim su kütlesiyle çarpılan hacme bölünen bir kütle içerir. Bu durumda kütle, hem agrega hem de bitümün kütlesidir. Hacim; sıkıştırılmış bir numunedeki hava boşluklarının hacmini, agreganın efektif hacmini ve bitümün hacmini içerir (Buncher ve ark., 2014). 25 °C’de belirli bir hacimdeki malzeme kütlesinin, aynı sıcaklıkta eşit hacimdeki su kütlesine oranı, hacim özgül ağırlıktır. Buradan hareketle; sıkıştırılmış BSK numunesi, 25 °C’de su banyosuna daldırılır, su altında kütle (C) kaydedilir. Numune sudan çıkarılır, nemli bir havlu ile hızlı bir şekilde kurulanır ve havada tartılır (B). İki kütle arasındaki fark, 25 °C’de eşit hacimde suyun kütlesini ölçmek için kullanılır. Böylece, G_{mb} değeri aşağıda verilen formülle hesaplanır. Özgül ağırlık birim içermediğinden, birim gerektiren hesaplamaları yapmak için yoğunluğa dönüştürülmelidir. Belirli bir sıcaklıktaki özgül ağırlığı, aynı sıcaklıktaki suyun yoğunluğu ile çarparak, bu dönüşüm yapılır (ASTM D2726, 2017).

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.1)$$

A = Havada kuru numunenin kütlesi, gr.,

(B – C) = 25 °C’deki numune hacmine eşit su hacminin kütlesi, gr.,

B = Havada doymun yüzey–kuru numunenin kütlesi, gr., ve

C = Numunenin su içindeki kütlesi, gr. (ASTM D2726, 2017).

Gevşek asfalt karışımların G_{mm} değerinin belirlenmesi, asfalt karışım tasarımı ve testinin diğer temel bileşenidir. Bu durumda kütle, hem agrega hem de bağlayıcının kütlesini içerir. Hacim sadece agreganın efektif hacmini ve bağlayıcı hacmini içerir. G_{mb} ve G_{mm} numuneleri havada aynı kuru ağırlığa sahip olsaydı, özgül ağırlık denkleminin (3.1) payları her ikisi için de aynı olurdu. Fakat hava hacmini içermediğinden dolayı,

G_{mm} hesaplamasının paydası daha küçüktür. Bu nedenle, G_{mm} her zaman G_{mb} 'den daha büyük bir sayı olmalıdır. Teorik olarak, bir G_{mb} numunesi % 0 hava boşluğu kalana kadar sıkıştırılabilir, G_{mb} ve G_{mm} eşit olacaktır (Buncher ve ark., 2014).

G_{mb} sıkıştırılmış bir karışım numunesi üzerinde ölçülür. Karışımındaki bağlayıcı yüzdesi arttıkça, numunenin sıkışması ve hacminin hafifçe azalmasına izin veren daha fazla kayganlık karışıma eklenirken; aynı zamanda, bağlayıcı sıkıştırılmış agrega yapısı içindeki boşlukları doldururken numune kütlesi artar. Artan kütle ile birlikte hacimdeki hafif azalma, sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığının (yoğunluğunun) artmasına neden olur. Fakat boşluklar bağlayıcı ile dolduruldukça, numunenin hacmi artmaya başlar. Bu artan hacim, tamamen sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığını azaltmaya başlayan ilave bağlayıcı maddenin eklenmesinden kaynaklanmaktadır (Buncher ve ark., 2014).

Artan bağlayıcı yüzdesinin G_{mm} üzerindeki etkileri ise oldukça farklıdır. BSK'da bağlayıcı yüzdesi arttıkça, agrega yüzdesi azalır. G_{mm} ölçümü ile ilgili herhangi bir hava boşluğu veya sıkıştırma olmadığından, bir G_{mm} numunesinin hacmi her zaman artar. Çünkü karışıma eklenen bağlayıcı maddenin hacmi, onun yerine karışımdan çıkan agrega hacminin kabaca 2.5 katıdır. Bu, G_{mm} özelliğini bağlayıcı içeriğine karşı çok hassas hale getirir. Bu, aynı zamanda G_{mm} testi yapılırken temsili karışım örnekleri elde etmenin önemini de gösterir. Karışımdan bir numune ayrılırsa ve çok kabaysa, bağlayıcı içeriği yapay olarak düşük olur ve bu da çok yüksek bir G_{mm} değeri ile sonuçlanır. Ayrılmış numune üretilen karışıma göre çok inceyse, test edilen malzemenin bağlayıcı içeriği yüksek olacak ve sonuçta ortaya çıkan G_{mm} deney sonucu çok düşük olacaktır. Agreganın bağlayıcıyı emmesi sabittir ve karışıma eklenen bağlayıcı bu sabit değeri aştığı için, emilim, karışıma eklenen bağlayıcı miktarına bağlı değildir. Bu sebeple, herhangi bir bağlayıcı içeriği için G_{mm} değerinin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Sonuç olarak; farklı bağlayıcı içeriklerindeki G_{mm} değerleri, "agreganın efektif özgül ağırlığı (G_{se})"nın bulunması ile aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (3.2)$$

P_s = Karışımındaki agreganın yüzdesi,

P_b = Karışımındaki bitümün yüzdesi ($P_s + P_b = 100$ (ağırlık olarak, %)),

G_{se} = Agregalar karışım grubunun efektif özgül ağırlığı,

G_b = Karışımındaki bitümün özgül ağırlığıdır (Buncher ve ark., 2014).

Agrega tanelerinin boyutuna bağlı olarak, agrega için genel olarak kabul gören; “zahiri özgül ağırlık (G_{sa})”, “hacim özgül ağırlık (G_{sb})” ve “efektif özgül ağırlık (G_{se})” olmak üzere, 3 ayrı özgül ağırlık türü söz konusudur. G_{sa} hacmi, agreganın kendi hacmi olarak ele almakta ve 24 saat suda tutma sonrasında içi su ile dolan gözenek ve kılcal boşlukların hacmini dikkate almamaktadır. G_{sb} agrega parçacığının toplam hacmini ele almakta ve 24 saat suda tutma işlemi sonunda su ile dolan gözenek ve kılcal boşlukları da hesaba katmaktadır. G_{se} ise, agreganın bitümlü bağlayıcı emen boşlukları dışındaki toplam hacmini dikkate almakta ve G_{sa} ile G_{sb} değerlerinin ortalaması olarak yaklaşık şekilde hesaplanabilmektedir (Uluçaylı, 2002). Agregada tarafından bitümlü bağlayıcı emilimi, tipik olarak, su emme oranının % 40–80’i kadardır (Buncher ve ark., 2014).

Sıkıştırılmış asfalt kaplama tabakası içindeki hava boşlukları, karışım bütününde bağlayıcı ile sarılmış agregada taneleri arasındaki küçük hava cepleridir. Agregaya ilişkin karışım hesaplamalarında kullanılan özgül ağırlık seçimi, sıkıştırılmış kaplama içindeki hava boşluğu oranı üzerinde büyük etkiye sahip olabilmektedir. BSK içindeki agreganın gerçek özgül ağırlığı, agregada parçacıklarının bitümlü bağlayıcıyı emme (absorpsiyon) derecesine bağlıdır. Bu bakımdan, G_{se} BSK’da boşluk oranının belirlenmesinde gerçek değere daha yakın sonuç vermektedir. Hesaplamalarda G_{sa} kullanıldığında, agreganın bütün su geçiren gözeneklerinin bağlayıcı emdiği varsayılmakta ve G_{sb} kullanılırsa da, bu gözenekler tarafından bağlayıcı emilmediği kabul edilmektedir. Bu iki yaklaşım da doğru değildir. Bir agreganın emdiği bağlayıcı hacmi, emebileceği su hacminden daima azdır. Dolayısıyla G_{se} değeri, G_{sa} ve G_{sb} değerlerinin arasındadır (Uluçaylı, 2002).

Denklem (3.2)’den ve buraya kadar ifade edilen kısımdan anlaşılacağı gibi; G_{mm} değerinin belirlenebilmesi ve karışım tasarımının hesaplama adımlarının yapılabilmesi için, BSK içindeki tüm farklı grupların özgül ağırlıkları hesaplanmalıdır. BSK içindeki agregalar; kaba agregada, ince agregada ve filler olmak üzere 3 farklı tane boyutuna göre sınıflandırılır ve her birinin özgül ağırlık değerleri ve hesaplama yöntemleri farklıdır. İlgili deney yöntemlerine göre, bu farklı agregada sınıflarının özgül ağırlıkları belirlenmeli ve bu hesaplamalardan elde edilen veriler yardımıyla, belli bir gradasyona sahip BSK içindeki bütün olarak agregada karışım grubunun özgül ağırlık değerleri hesaplanmalıdır. Ayrıca, BSK’nın diğer bileşeni olan bağlayıcının da özgül ağırlığı tespit edilmelidir.

Kaba agreganın (4 no’lu elek (4.75 mm) üzeri) özgül ağırlık hesabı, sıkıştırılmış BSK’nın G_{mb} hesabına (denklem 3.1) benzerdir. Esas olarak gözenekleri doldurmak için 24±4 saat boyunca bir kaba agregada örneği suya batırılır. Daha sonra sudan çıkarılır; su, parçacıkların yüzeyinden kurutulur ve kütle belirlenir (B). Sonra; numunenin hacmi,

suyun yer değiştirmesi yöntemiyle belirlenir. Son olarak, numune fırında kurutulur ve kütle belirlenir (A). Bu şekilde elde edilen kütle değerlerini ve aşağıdaki formülleri kullanarak, kaba agreganın özgül ağırlıkları belirlenir (ASTM C127, 2015).

$$G_{ka} = \frac{A}{A - C} \quad (3.3)$$

$$G_{kb} = \frac{A}{B - C} \quad (3.4)$$

A = Havada kuru numunenin kütlesi, gr.,

B = Havada doğgun yüzey kuru numunenin kütlesi, gr.,

C = Numunenin su içindeki kütlesi, gr.,

G_{ka} = Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{kb} = Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı

İnce agreganın (4 no'lu elek ile 200 no'lu elek (0.075 mm) arasında kalan) özgül ağırlık hesabı, kaba agregaya göre farklıdır. Esas olarak gözenekleri doldurmak için, 24±4 saat boyunca bir ince agreganın örneği suya batırılır. Daha sonra sudan çıkarılır; su, parçacıkların yüzeyinden kurutulur. Numune doğgun yüzey kuru durumuna getirilmeye çalışılır ve ince agreganın parçacıklarında, yüzey neminin hala mevcut olup olmadığını belirlemek için nem testi uygulanır. Ardından, numune (veya bir kısmı) bir dereceli kap içine yerleştirilerek, numune hacmi gravimetrik (piknometre) yöntemle belirlenir. Son olarak, numune fırında kurutulur ve kütle belirlenir. Elde edilen kütle değerleri ve aşağıdaki formüller kullanılarak, özgül ağırlıklar belirlenir (ASTM C128, 2015).

$$G_{ia} = \frac{A}{B + A - C} \quad (3.5)$$

$$G_{ib} = \frac{A}{B + S - C} \quad (3.6)$$

A = Havada kuru numunenin kütlesi, gr.,

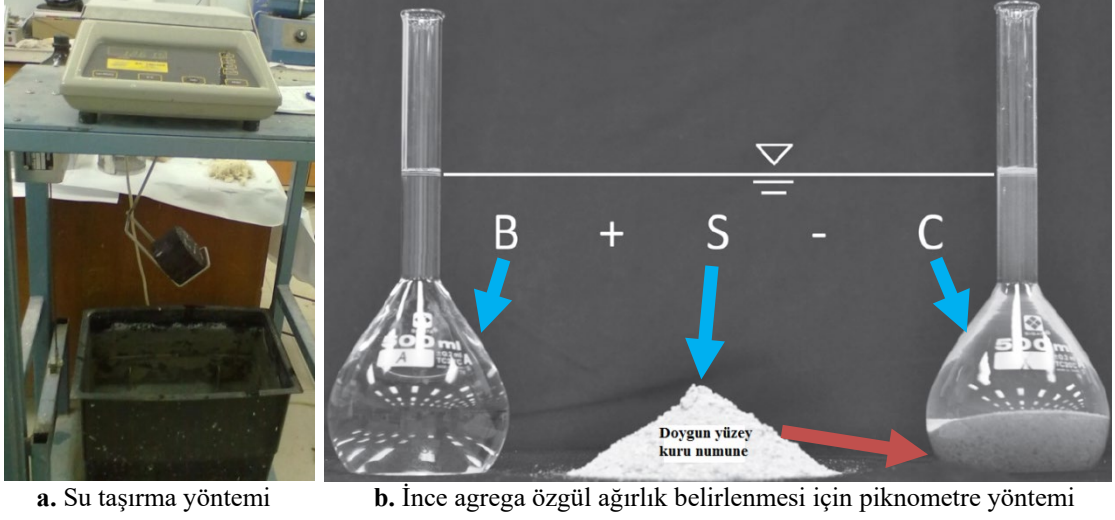
B = Kalibrasyon işaretine kadar su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi, gr.,

C = Numune ve su ile kalibrasyon işaretine kadar doldurulmuş piknometre kütlesi, gr.,

S = Doğgun yüzey kuru numunenin kütlesi, gr.,

G_{ia} = İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{ib} = İnce agreganın hacim özgül ağırlığı



a. Su taşıma yöntemi

b. İnce agrega özgül ağırlık belirlenmesi için piknometre yöntemi

Şekil 3.20. Özgül ağırlıkların belirlenmesi için kullanılan “piknometre” ve “su terazisi”

Sıkıştırılmış BSK numunesi ve kaba agreganın özgül ağırlık yöntemi (su yer değiştirmesi) için kullanılan su terazisi şekil 3.20.a’da; ince agrega ve filler gibi 4,75 mm (4 no’lu elek) altı malzeme için kullanılan piknometre yöntemi ise şekil 3.20.b’de gösterilmiştir. Agrega grubunun sonuncusu mineral fillerin (200 no’lu elek (0.075 mm) altı) hacim özgül ağırlığının doğru şekilde belirlenmesi zordur ve zahiri özgül ağırlığı daha kolay belirlenir. Karışıma eklenen mineral filler miktarı tipik olarak küçük olduğu için, zahiri özgül ağırlık kullanımı önemli bir hata oluşturmaz. BSK’daki agrega karışım grubunun özgül ağırlıkları, aşağıdaki formüllerle belirlenir (Buncher ve ark., 2014).

$$G_{sa} = \frac{P_k + P_i + P_f}{\frac{P_k}{G_{ka}} + \frac{P_i}{G_{ia}} + \frac{P_f}{G_{fa}}} \quad (3.7)$$

P_k = Agrega karışım grubunda kaba agreganın yüzdesi (%),

P_i = Agrega karışım grubunda ince agreganın yüzdesi (%),

P_f = Agrega karışım grubunda mineral fillerin yüzdesi (%),

G_{ka} = Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{ia} = İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı,

G_{fa} = Mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı,

G_{sa} = BSK’yı oluşturan agrega karışım grubunun zahiri özgül ağırlığı

$$G_{sb} = \frac{P_k + P_i + P_f}{\frac{P_k}{G_{kb}} + \frac{P_i}{G_{ib}} + \frac{P_f}{G_{fa}}} \quad (3.8)$$

G_{kb} = Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı,

G_{ib} = İnce agreganın hacim özgül ağırlığı,

G_{fa} = Mineral fillerin zahiri özgül ağırlığı,

G_{sb} = BSK'yı oluşturan agreganın karışım grubunun hacim özgül ağırlığı

$$G_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (3.9)$$

A = piknometre kütlesi (tıpa ile birlikte), gr.,

B = Su ile doldurulmuş piknometre kütlesi, gr.,

C = Numune ile doldurulmuş piknometre kütlesi, gr. ve

D = Numune ve su ile doldurulmuş piknometre kütlesi, gr.

BSK'nın " G_{mm} " değerinin belirlenmesi için, son olarak, agreganın dışında diğer bir karışım bileşeni olan bitümlü bağlayıcının özgül ağırlığı belirlenir. Bunun için, numune standart bir piknometre içine yerleştirilir. Piknometre ve numune tartılır, daha sonra kalan hacim su ile doldurulur. Doldurulmuş piknometre, deney sıcaklığına getirilir ve tartılır. Numune yoğunluğu, kütlesinden ve doldurulmuş piknometrede örnek tarafından yer değiştiren su kütlesinden aşağıda verilen formülle hesaplanır. Aşağıdaki ağırlık (A, B, C, D) hesaplamalarında, piknometrenin tıpası ile birlikte tartılmasına ve 25 °C deney sıcaklığına dikkat edilmelidir (ASTM D70, 2018).

3.2.3.1.1.2. Karışımın hava boşluğu (P_a)

Bir asfalt kaplamanın durabilitesi, BSK kaplamasının hava boşluk içeriğinin bir fonksiyonudur. Hava boşlukları ne kadar düşük olursa, karışım o kadar az geçirgen olur. Çok yüksek bir hava boşluğu içeriği, karışımın içinden havanın ve suyun girmesine izin veren geçiş yolları oluşturur. Çok düşük bir hava boşluğu içeriği ise; tekerlek izi, itme, kasma veya akmaya neden olabilir. BSK'daki hava boşlukları, bağlayıcı kaplı agreganın parçacıkları arasındaki küçük oyuklardır ve toplam BSK hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. Trafik altında ilave sıkışma ve sıcaklık artışları sebebiyle az miktarda bitümün genişlemesini sağlamak için, bitmiş BSK'da belirli bir hava boşluğu yüzdesi gereklidir. Genel olarak, laboratuvar ortamında sıkıştırılmış bir BSK numunesindeki tasarım hava boşluğu seviyesi % 4'tür. Özel kullanımlar için daha düşük veya daha yüksek bir tasarım hava boşluğu içeriği belirtilebilir (Buncher ve ark., 2014). Sıkışmanın değerlendirilmesi için

ve tasarım yöntem kriterlerinden biri olarak kullanılan hava boşluk yüzdesi, “P_a” ile gösterilir ve aşağıdaki formülle hesaplanır (ASTM D3203, 2017).

$$P_a = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (3.10)$$

P_a = Sıkıştırılmış karışımın hava boşluk yüzdesi (%),

G_{mb} = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı,

G_{mm} = Gevşek (sıkıştırılmamış) karışımın maksimum (teorik) özgül ağırlığı.

3.2.3.1.1.3. Mineral agregalar arasındaki boşluklar (VMA)

Karışım tasarımlarının tipik olarak % 4 hava boşluğunu hedeflediği göz önüne alındığında, yeterli bitümlü bağlayıcı film kalınlığını elde etmek için, mineral agregadaki boşluklar (VMA) yeterince yüksek kalmalıdır, bu dayanıklı asfalt kaplamaya neden olur. Minimum VMA değerlerinin altındaki karışımlar, ince filmlere sahip olacak ve düşük durabiliteye sahip BSK kaplaması oluşacaktır. Bu nedenle, VMA'yı düşürerek bitüm içeriğini azaltmak aslında verimsizdir ve kaplama kalitesi için zararlıdır. VMA, hava boşlukları hacmini ve efektif (emilmemiş) bitümlü bağlayıcıyı temsil eder. Yani; VMA, hava boşlukları ile efektif bitüm hacmini içeren ve sıkıştırılmış BSK'daki agregadaki parçacıkları arasındaki tanecikler arası toplam boşluk olarak tanımlanır ve sıkıştırılmış BSK hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. Sıkıştırılmış BSK numunesindeki boşluklar ve hacimler, şekil 3.21'de gösterilmiştir. VMA, agregadaki su geçirgen boşlukları içermediği için hesaplamada agreganın hacim özgül ağırlığı (G_{sb}) kullanılır. VMA, aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanır (Buncher ve ark., 2014).

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s \quad (3.11)$$

VMA = Sıkıştırılmış karışımdaki mineral agregadaki tanecikler arası boşluk (%),

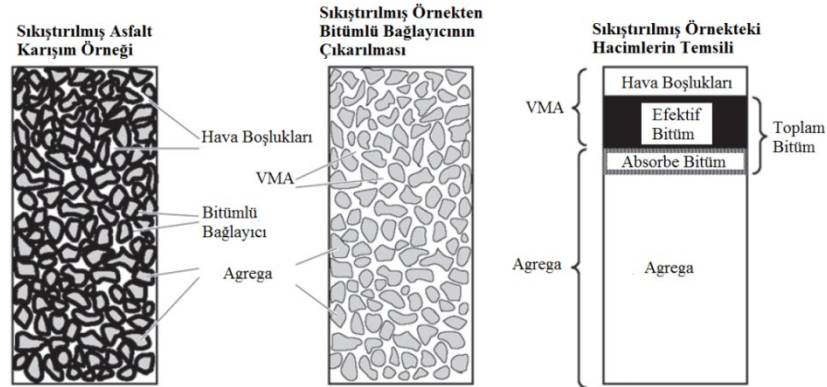
G_{mb} = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı,

G_{sb} = Sıkıştırılmış karışımdaki agreganın hacim özgül ağırlığı,

P_s = Sıkıştırılmış karışımdaki agreganın yüzdesi (%) (karışım ağırlığınca, %'de).

Sıkıştırılmış bir BSK'da VMA'yı birçok faktör etkiler. Aslında, karışımın kalıpta konsolidasyonu için, sıkıştırmanın durumunu etkileyen herhangi bir şey VMA sonucunu

etkileyecektir. Bu faktörler: bağlayıcı tipi ve miktarı, numune sıcaklığı, agregâ şekli, dokusu veya dayanımı olmak üzere küçük faktörler; laboratuvar sıkıştırma ekipmanının türü ve miktarı, agregâ gradasyonu olmak üzere büyük faktörler olarak ele alınabilir.



Şekil 3.21. Sıkıştırılmış BSK numunesindeki boşluklar ve hacimler (Buncher ve ark., 2014)

Bağlayıcı tipi olarak; daha sert bağlayıcılar, laboratuvar veya sahada BSK'nın sıkışmaya karşı direncini artırabilir. Sıkışmaya karşı direnç, daha yüksek sıcaklıklarda azalabilir, ancak bağlayıcı viskozitesindeki artışa bağlı olarak BSK sıcaklığı azaldıkça artar. Bağlayıcı miktarı artışıyla karışımın oluştuğu yağlanma etkisi, agregâ yapısının konsolidasyon yeteneğini artıracak ve VMA'yı etkileyecektir. BSK sıcaklığı azaldıkça, karışımın viskozitesi artacaktır ve bu durum, kalıpta ve sahada sıkışmaya karşı direnci artıracak ve böylece VMA'nın artmasına neden olacaktır. Agregâ şekli, dokusu veya dayanımı gibi değerler çok öznel ve ölçülmesi zordur. Daha kübik açısız malzemeler veya pürüzlü yüzey dokuları, sıkışmaya karşı direnci artıracaktır. Agregâ dayanımı ise, kritiktir çünkü zayıf bir agregâ sıkıştırma sırasında bozulabilir veya kırılabilir, böylece gradasyon değişir ve VMA büyük ölçüde etkilenir (Buncher ve ark., 2014).

Laboratuvar sıkıştırma ekipmanının türü ve sıkıştırma sayısı, VMA üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Superpave sisteminde kullanılan döner sıkıştırma (gyratory compactor), Marshall yönteminde kullanılan geleneksel darbe sıkıştırmasına göre, BSK numunesine önemli ölçüde daha fazla enerji verir ve bu durum herhangi bir agregâ grubu için daha düşük VMA ile sonuçlanır. Sezgisel olarak, daha fazla sayıda dönme veya darbe sayısı da sıkıştırılmış bir numunedeki VMA'yı azaltacaktır. Parçacıkların miktarı ve boyutunu ifade eden agregâ gradasyonu ise, belki de VMA'yı yöneten en etkili faktörlerden biridir. Sadece gradasyona dayalı bir BSK'nın VMA'sını tahmin etmek çok zordur. Farklı karışımların VMA'ları, karışımlar aynı tekrar sayısında ve sıkıştırıcı ile sıkıştırılmadan belirlenemez (Buncher ve ark., 2014).

Birçok durumda, ulaşılması en zor karışım tasarım özelliği, “VMA”dır ve amaç, bitüm için yeterli alan sağlamaktır. Böylece agregâ parçacıklarını bağlamak için yeterli yapışma sağlanabilir ancak sıcaklıklar arttığında ve asfalt genleştiğinde kuma oluşmamalıdır. Normal olarak, eğri, minimum değere düşen ve daha sonra bitüm içeriği ile artan bir “U” şekli sergiler. Hava boşluklarının basitçe bitümle yer değiştireceği düşünülürse, VMA’nın değişen bitüm içeriğiyle sabit kalması beklenebilir. Fakat sabit birim hacmi varsayımı doğru değildir. Bitümdeki artışla, BSK daha uygulanabilir hale gelir ve daha kolay sıkıştırılır, yani birim hacme daha fazla ağırlık sıkıştırılabilir. Bu nedenle, bir noktaya kadar, karışımın yığın yoğunluğu artar ve VMA azalır. Bitüm oranı arttıkça bu noktada (U şekilli eğrinin tabanı) VMA artmaya başlar; çünkü nispeten daha yüksek özgül ağırlık materyali (agrega), düşük özgül ağırlık materyalinden (bitüm) dolayı yer değiştirir ve itilir. Minimum hava boşluğu ve VMA kriterleri karşılanırsa bile, bu VMA eğrisinin “ıslak” veya “sağ tarafta artan” bağlayıcı içeriğinden kaçınılması önerilir. Bu aralıktaki tasarım bitüm içerikleri, sahaya yerleştirildiklerinde kuma veya plastik akış sergileme eğilimindedir. Trafikten gelen herhangi bir ek sıkıştırma sebebi ile; bitümün genleşmesi, agregâ-agrega temas kaybı ve nihayetinde yüksek trafikli alanlarda tekerlek izi ve itme için yetersiz alan oluşur. İdeal olarak, tasarım bitüm içeriği VMA eğrisinin düşük noktasının biraz solunda seçilmelidir.

Bazı BSK’larda, U-şekilli VMA eğrisinin tabanı çok düzdür. Yani sıkıştırılmış karışım, seçilen bitüm içeriği aralığında diğer bazı faktörler kadar VMA’ya duyarlı değildir. BSK sıkıştırılabilirliği, normal bitüm içeriği aralığında agregâ özelliklerinden daha fazla etkilenir. Bununla birlikte, U şekilli eğrinin tabanından sonra bitüm miktarı karışımın davranışı için kritik hale gelecektir ve VMA önemli ölçüde arttıkça bitümün etkisi baskın olacaktır. U-şekilli VMA eğrisinin tabanı, karışımın NMAS değeri için gerekli min. kriterin altına düşmemelidir. Bu durumda, ek VMA sağlayacak şekilde agregâ gradasyonu değiştirilmelidir. Bitüm oranı min. kriterleri karşılasa bile, kabul edilebilir aralığın uçlarında seçilmemelidir. Sol tarafta, karışım çok kuru, ayrılmaya eğilimli ve muhtemelen hava boşlukları da çok yüksek olacaktır. Sağ tarafta, karışımın dağılması bekleniyordur (Buncher ve ark., 2014).

3.2.3.1.1.4. Bitümlü bağlayıcı ile doldurulmuş boşluklar (VFA)

BSK’da bağlayıcıyla doldurulmuş boşluklar (VFA), şekil 3.21’den anlaşılabileceği gibi, efektif bağlayıcı ile dolan (efektif bağlayıcı içeren) agregâ parçacıkları arasındaki

tanecikler arası boşluk alanının (VMA'nın) yüzdesidir. VFA, BSK'daki uygun bitüm film kalınlığını sağlamak için kullanılır. Çok düşükse, karışım zayıf dayanıklılığa sahip olacaktır veya çok yüksekse, karışım stabil olmayabilir. Kabul edilebilir VFA aralığı trafik seviyesine bağlı olarak değişir. Daha yüksek trafik, daha düşük VFA gerektirir çünkü BSK gücü ve stabilitesi daha büyük bir endişe kaynağıdır. Daha düşük trafik ise, BSK dayanıklılığını artırmak için daha yüksek bir VFA aralığı gerektirir. Bunun yanı sıra, çok yüksek bir VFA, hassas bir karışıma sebep olabilir ve akmaya neden olabilir. Maksimum VMA ve bağlayıcı içeriği seviyelerini sınırlamak ve minimum VMA'ya yakın olan BSK'lar için izin verilen hava boşluğu içeriğini kısıtlamak amacıyla, VFA kriterleri tasarım ve yapım sürecinde performans açısından ek güvenlik faktörü sağlar. VFA, VMA ve P_a yardımıyla aşağıdaki formülle hesaplanır (Buncher ve ark., 2014).

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - P_a}{VMA} \quad (3.12)$$

3.2.3.1.1.5. Karışımın bitümlü bağlayıcı içeriği

Bir karışımın optimum bağlayıcı içeriği, büyük ölçüde gradasyon ve emme gibi agrega özelliklerine bağlıdır. Agrega gradasyonu, doğrudan optimum bağlayıcı içeriği ile ilgilidir. Karışım gradasyonu ne kadar ince olursa, agreganın toplam yüzey alanı o kadar büyük olur ve parçacıkları eşit olarak kaplamak için gereken bağlayıcı miktarı o kadar fazla olur. Tersine, daha kaba karışımlar toplam agrega yüzey alanına daha az sahiptir ve daha az bağlayıcı gerektirir. Agrega yüzey alanı ile optimum bitüm içeriği arasındaki ilişki, karışımdaki mineral fillerin yüksek yüzdelerinde çok daha belirgindir. Sabit bir bağlayıcı içeriğinde mineral filler miktarı ve boyutundaki değişiklikler, karışım özelliklerinde çok az veya çok fazla değişikliklere neden olacaktır. Filler içeriğindeki küçük artışlar, ilave bağlayıcı kullanılması ile kuru, stabil olmayan karışım oluşmasına sebep olurken; küçük düşüşler, bunun tersi bir etkiye sahiptir.

Asfalt karışım teknolojisinde bitüm içeriği yöntemlerini ifade etmek için, toplam ve etkili (efektif) bitüm içeriği olmak üzere iki terim kullanılır. Toplam içerik, istenen karışım kalitesini üretmek için karışıma ilave edilmesi gereken bitüm miktarıdır. Etkatif içerik ise, agrega tarafından emilmeyen bitüm hacmine dayanır ve agrega yüzeylerinde etkili bir bağ filmi oluşturan bitümdür. Agrega absorpsiyonu, optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Yeterli film kalınlığı için, agrega parçacıkları

bitümle kaplanırken; emmeye de izin vermek için karışıma yeterli miktarda bitüm ilave edilmelidir. Çoğu karışım tasarım süreçleri, farklı bağlayıcı içeriği yüzdelerinde çoklu deneme karışımları hazırlanarak gerçekleştirilir. Tasarım sürecinde, bağlayıcı içeriğinin ne olduğu ile ilgili kararlar; deneme bağlayıcı içeriklerinin sayısını, arasındaki artışları ve aralıklarını içerir (Buncher ve ark., 2014).

Her bir agrega harmanı için çok az sayıda bağlayıcı artışı kullanılması, tasarım sonuçları hakkında belirsizliğe yol açabilir. Örneğin; bir BSK tasarımının tek deneme bağlayıcı yüzdesi üzerine temellendirilmesiyle, deney sonuçlarının güvenilirliği kontrol edilemeyecek ve karışımın özelliklerinin farklı bağlayıcı içerikleri ile nasıl değiştiği konusunda fikir sahibi olunamayacaktır. Çok fazla bağlayıcı artışı kullanmak, tasarım sürecini gereksiz yere uzatacaktır. Bu bakımdan, malzeme kaynağı tasarımcı tarafından bilinmiyorsa, beş deneme bağlayıcı içeriği kullanmak uygundur. Tasarımcı malzeme kaynağına aşınaysa, deneme sayısı en az üçe indirgenebilir.

Benzer şekilde, deneme bağlayıcı içeriği arasındaki artışlar, noktalar arasında bir ayırım sağlamak için yeterince uzak olmalı, ancak uzun enterpolasyondan kaçınmak için yeterince yakın olmalıdır. Bağlayıcı yüzdeleri arasında en çok seçilen artış % 0.5'tir. Nihai amaç, BSK'nın beklenen tasarım bitüm içeriğine destek veren numune grupları hazırlamaktır. Tasarımcı, bağlayıcı içeriği aralıklarını (başlangıç ve bitiş noktalarını) seçmeden önce agrega tipi, yapısı ve ek materyalleri veya katkıları değerlendirmelidir. Tasarım sonunda, hiçbir zaman deneme noktaları aralığının dışından daha yüksek veya daha düşük bir tasarım bağlayıcı içeriği önerilmemelidir. Bağlayıcı içeriğini etkileyen bazı hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- Bağlayıcı talebi, karışımın nominal maksimum agrega boyutu (maksimum agrega boyutundan bir küçük elek boyutu veya agrega gradasyon dağılımının % 10'undan fazlasının kaldığı birinci elek boyutundan bir büyük elek boyutu –NMA) azaldıkça artar;
- Emici agregalar daha büyük bir bağlayıcı talebine sahiptir;
- Belirli bir NMA için; ince agregalı gradasyon, kaba agregalı gradasyondan daha fazla bağlayıcı gerektirir;
- Sert, açısız agregalar nedeniyle daha yüksek VMA bekleniyorsa, daha fazla bağlayıcı gerekecektir;
- Daha yüksek filler içerikli karışımlar, daha düşük filler içerikli olanlara göre, daha fazla bağlayıcı gerektirme eğilimindedir (Buncher ve ark., 2014).

3.2.3.1.2. Sıkıştırılmış karışım numunesinin stabilite–akma deneyi

Marshall yöntemi ile agregaların belirli bir karışımı veya gradasyonu için BSK tasarım bitüm içeriğinin belirlenmesinde, deney veri eğrilerinin iyi tanımlanmış ilişkiler göstermesi için, bir dizi farklı bitüm içeriğinde deney numuneleri hazırlanır. Deneyler, beklenen tasarım değerinin üzerinde ve altında en az iki bağlayıcı içeriği olacak ve bağlayıcı içerikleri % 0.5'lik artışla ilerleyecek şekilde planlanmalıdır. Mineral fillerin agrega gradasyonundaki yüzdesine, beklenen tasarım bağlayıcı içeriğinin (toplam BSK ağırlığının yüzdesi olarak) yaklaşık eşit olduğu tahmin edilebilir. Yeterli veri sağlamak için, seçilen her bitüm içeriğinde en az üç deney örneği hazırlanır. Böylece, beş farklı bağlayıcı içeriği olan Marshall karışım tasarımı normal olarak en az 15 test numunesi gerektirir. Her deney numunesi için yaklaşık 1.2 kg. agrega gerekir.

Agregalar çeşitli tane boyutlarında derecelendirilir (gradasyon) ve her bir farklı boyutlu agregaların yüzdelерinden faydalanarak 1.2 kg. agrega karışım grubu hazırlanır.

Agrega gradasyon (tane boyutu dağılımı) analizi ve agregaların birleştirilmesi, istenen granülometriyi elde etmek için BSK tasarımında en önemli adımlardan biridir. Agrega gradasyonu; ilgili şartnamelerin gerekliliklerini karşılamalı, uygun kalitede mevcut olan en ekonomik agregalardan oluşmalı ve tasarım yöntemlerinin kriterlerini karşılayan bir karışım tasarımını sağlamalıdır. Agrega gradasyonunun oluşturulması ve kontrolünün amacı; karışımındaki bitümün termal genleşmesine izin verecek tasarım hava boşluğu sistemini sağlamak ve her bir agrega partikülü üzerinde uygun film kalınlığını oluşturmak için, bitüm–agrega karışımında yeterli hacimde boşluk sağlamaktır. Böylece VMA gereksinimi olarak, her bir karışım türünde doğru hacimde etkili bitüm varlığının temin edilmesine yardımcı olmak için nominal maksimum agrega boyutuna (NMAS) göre değişen minimum boşluklar tanımlanmıştır (Buncher ve ark., 2014).

Superpave yönteminde kullanılan gradasyon grafiği, düşeyde her bir elekten geçen yüzdeyi temsil eden değerler ve yatayda 0.45 kuvvete yükseltilmiş inç veya mm. cinsinden elek boyutu açıklıklarını temsil eden değerlerden oluşur. Örneğin; 4.75 mm. elek boyutunun yatay eksenindeki değeri “ $[(4.75)^{0.45}]$ ” hesaplanarak bulunur. Bu grafiğin önemli bir özelliği, maksimum agrega boyutundan grafiğin orjinine doğru düz bir çizgi olarak çizilen maksimum yoğunluk çizgisidir. Ayrıca; Superpave yönteminde kullanılan grafik üzerinde, gradasyon için gerekli olan “kontrol noktaları” ve “sınırlanmış bölge” olmak üzere iki önemli husus da gösterilmektedir. Kontrol noktaları karışım tipini tanımlar ve gradasyonun geçmesi gereken ana aralıklar olarak işlev görür. Kontrol

noktaları NMAS'a, orta boyuta (2.36 mm) ve en küçük boyuta (0.075 mm) yerleştirilir. Ara elek boyutu (4.75 mm veya 2.36 mm) ve 0.30 mm. elek boyutu arasında sınırlanmış bölge, grafik üzerinde maksimum yoğunluk çizgisi boyuncadır. Gradasyonun 2.36 mm. ve 0.30 mm. elekleri arasındaki bu bölgeden geçmesi durumunda, karışımında çok fazla kum bulunacaktır ve bu da BSK ile ilgili problemlere yol açacaktır. Bu yüzden, agrega gradasyonu sınırlanmış bölgeden geçmemelidir (Buncher ve ark., 2014).



Şekil 3.22. Sıkıştırılmış BSK numunesi üretmek için kullanılan Marshall deney ekipmanları

Agrega ve bağlayıcının karıştırıldığı karıştırıcı şekil 3.22.a'da, sıkıştırıldığı Marshall tokmağı şekil 3.22.b'de ve Marshall kalıbı ve numune çıkarıcı şekil 3.22.c'de olmak üzere, BSK numunelerinin hazırlanması aşamasında kullanılan Marshall deney ekipmanları şekil 3.22'de gösterilmiştir.

Gerekli sayıda agrega grupları hazırlandıktan sonra, bitüm ile agregalar ısıtılır, karıştırılır ve sıkıştırılır ve böylece, standart Marshall kalıbında hedeflenen sıkıştırılmış numune elde edilir. Bu aşamalarda önemli hususlardan biri, bağlayıcının “ 0.17 ± 0.02 Pa.s” viskozite değerinde olduğu karıştırma ve “ 0.28 ± 0.03 Pa.s” viskozite değerinde olduğu sıkıştırma sıcaklıklarının tespitidir. Bu sıcaklıklar, “dönel viskometre (RV) deneyi” bölümünde anlatılan, viskozite-sıcaklık grafiği (şekil 3.14) yardımıyla belirlenir ve BSK numunesi hazırlama aşamasında titizlikle uygulanır. Belli bir prosedürle kalıplanan sıkıştırılmış BSK numuneleri; stabilite, akma, dolaylı çekme mukavemeti, yorulma, sünme ve modül gibi çeşitli fiziksel deneylerde kullanılır. BSK

tasarımı ve sıkışmanın değerlendirilmesi için, stabilite–akmanın yanı sıra, yoğunluk–boşluk analizi de yapılır (ASTM D6926, 2016). Marshall stabilite ve akma deneyi veya diğer tasarım analizleri için hazırlanan sıkıştırılmış en az üç özdeş BSK numunesi; aynı agrega tipi, kalitesi, gradasyonu, mineral filler tipi, miktarı, bağlayıcı kaynağı, sınıfı ve miktarına sahip olmalıdır. Ek olarak; tüm numuneler aynı hazırlığa, yani sıcaklıklara, soğumaya ve sıkıştırmaya sahip olmalıdır (ASTM D6927, 2015).

Tipik olarak, Marshall stabilitesi, sabit bir deformasyon (50 ± 5 mm/dak) yükleme dizisi sırasında elde edilen maksimum (tepe) direnç yüküdür. Deney esnasında stabilite ile birlikte akma değeri de ölçülmektedir. Akma, numune deformasyonudur (elastik artı plastik) ve numunenin tepe direnç yüküne (stabiliteye) karşılık gelen değerdir. Yoğun gradasyonlu (tüm tane boyutlarında derecelenmiş) BSK'lar, genellikle test için seçilen bağlayıcı içeriği aralığında, stabilite eğrisinde bir tepe noktası gösterir. Stabilitenin büyüklüğü; agrega tipi, gradasyon, bağlayıcı tipi, sınıfı ve miktarı ile değişir (ASTM D6927, 2015). Marshall stabilite–akma deney cihazı ve örnek numune yüklemesi şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Marshall stabilite–akma deney cihazı ve örnek bir numune yüklemesi

Laboratuvarda üretilmiş BSK numuneleri, 2.50 ± 0.10 inç (63.5 ± 2.5 mm) kalınlık gereksinimini karşılamalıdır. Kalınlık toleransı içindeki numuneler, numune hacmi veya kalınlığına göre düzeltilebilir (ASTM D6927, 2015). BSK numunesi etrafında çeyrek noktalarda dört ölçümün ortalaması şeklinde pratik olarak veya numunenin ağırlık

ölçümlerinden elde edilen hacim değeri kullanılarak, Hacim/Alan formülü ile yaklaşık teorik olarak her bir numuneye ait yükseklikler belirlenir (ASTM D3549, 2017).

Tüm deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra, tasarlanan BSK'nın optimum bağlayıcı içeriğinin seçilmesi için, bağlayıcı içeriğine karşı; Marshall stabilite, akma, birim (özgül) ağırlık (G_{mb}), hava boşlukları (P_a), bağlayıcı ile doldurulmuş boşluklar (VFA) ve mineral agregalar arası boşluklar (VMA) olmak üzere tasarım için gerekli eğriler çizilir (ASTM D 6927, 2015).

Bitümlü bağlayıcı içeriğine göre çizilen eğriler kullanılarak; tasarımı ilgilendiren her bir parametre, grafiksel çizgilerin uygunluğu ile birlikte ilgili şartname kriterlerine göre değerlendirilir. Karışım numuneleri tasarım kriterlerini karşılayamazsa, karışımda değişiklik yapmak veya bazı hallerde yeniden tasarım yapmak zorunlu olmaktadır. Bu konudaki eksikliğin giderilmesi için şartname limitleri dahilinde kalmak şartıyla, agrega gradasyonunda belirli ayarlamalara gidilmesi zorunlu olabilmektedir. BSK tasarımının değerlendirilmesi ve ayarlanmasında; mutlaka nihai karışımdaki agrega gradasyonu ile bitümlü bağlayıcı içeriğinin, stabilite ve dayanıklılık koşulları arasında pozitif bir denge sağlanmasına dikkat edilmelidir. Buradaki amaç, yeterli bir stabilite değeri ile maksimum dayanıklılık olmalıdır (Uluçaylı, 2002).

3.2.3.2. Tekerlek izi deneyi

Bir ulaşım yapısında kullanılmadan önce BSK'nın performansını tahmin etmek ve BSK performansını artırmada yeni malzemeler ve tasarım araçlarını değerlendirmek için, BSK'nın performans deneyleri yapılır. Farklı sorunları gidermek için, farklı deney ve yükleme şekilleri kullanılır.

Asfalt karışımların kalıcı deformasyonu veya tekerlek izi, yüklü koşullar altında yüksek kaplama sıcaklıklarında meydana gelen bir sorundur. Kaplama sıcaklığı arttıkça, BSK daha yumuşak olur ve yük altında harekete daha duyarlıdır. Kalıcı deformasyon, asfalt karışımı yük altında deforme olduğunda ve daha sonra orijinal, deforme olmamış konumuna geri dönmediğinde ortaya çıkar. Kalıcı deformasyon, zamanla tekerlek izine veya yüzeyde kanallaşmaya yol açabilir (Buncher ve ark., 2014).

Tekerlek izi performansını değerlendirmek için uygulanan laboratuvar deneyleri, yaz aylarında kaplamanın yaşadığı hizmet sıcaklığını temsil etmek amacıyla, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Asfalt karışımının sertliğini veya mukavemetini ölçen basit Marshall stabilitesi gibi deneyler, genellikle, kaplamanın maksimum hizmet sıcaklığını

temsil eden bir sıcaklık olan 60 ° C'de gerçekleştirilir ve bu deneyler, asfalt karışımın yük altında deformasyona dayanma kabiliyetinin bir göstergesi olarak kullanılmıştır. Fakat karışım performans deney isteği arttıkça ve teknoloji ilerledikçe, diğer karışım performans deneyleri kullanılmaya başlanmıştır ve bu deneyler, asfalt karışım tasarım teknoloji uzmanları tarafından kullanılmak üzere standart hale getirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda karışım sertliğinin önemli olduğu düşünülür ve yaygın olarak kullanılan tekerlek izi deneylerinin çoğu bir tür tekrarlı yüklemeyi içerir.

Yüklü tekerlek deneyleri, bir BSK'nın tekerlek izi hassasiyetini değerlendirmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Farklı yükleme şekli ve deney koşulları ile birçok tipte tekerlek izi deneyleri yapılmış olmasına rağmen, deney prensipleri esasen aynıdır. Yüklü bir tekerlek testinde, bir tekerlek, bir asfalt karışım numunesi üzerinde, pistonlu bir şekilde yüksek bir sıcaklıkta çalışır. Her bir yük çevriminde, karışım numunesinde belirli bir miktarda deformasyon oluşur. Belirtilen sayıda yük çevriminden sonra, asfalt karışımındaki kalıcı deformasyon (tekerlek izi) belirlenir ve tekerlek izi duyarlılığını belirlenmesi için gerekli kriterler karşılaştırılır (Buncher ve ark., 2014).



Şekil 3.24. Hamburg tekerlek izi (HWT) deney cihazı

Çalışma kapsamında deneylerin yapıldığı, “Hamburg tekerlek izi (HWT)” deney cihazı şekil 3.24’de görülmektedir. HWT deneyi yaygın olarak kullanılan tekerlek izi deneylerinden birisidir. 705 Newton yüke sahip yüklü çelik tekerlekler, deney sırasında doğrudan BSK deney numunelerine temas eder ve daha sonra tekerlek izini belirlemek

için ileri geri hareket eder. Numune, plaka veya silindir şeklinde sahadan alınabilir veya laboratuvarında sıkıştırılabilir. Deneyler, kuru veya suya batırılmış şekillerde yapılabilir. Birçok uzman, sulu ortamda yapılan deneyi, tekerlek izi duyarlılığından ziyade soyulma duyarlılığının bir göstergesi olarak görmektedir. Standart deney sıcaklığı 50 °C'dir ve farklı sıcaklıklar da seçilebilir. 10,000 tekerlek döngüsüne (bir ileri ve geri hareketin toplamı) veya 20,000 tekerlek geçişine (1 döngü=2 geçiş) veya deney numunesinde 20 mm. deformasyona ulaşılan kadar deney devam eder (Buncher ve ark., 2014).

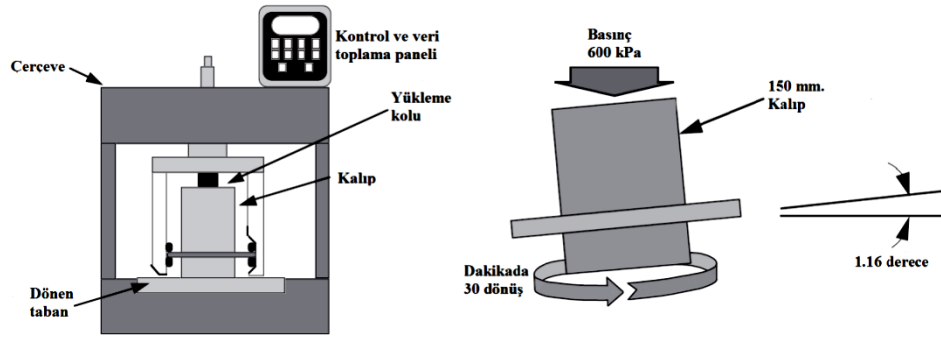
Tekerlek izi deneyleri kapsamında, BSK numunelerinin hazırlanması ve HWT deney cihazının kalıbına göre kesilip deneye hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda; deney için gereken numuneler, şekil 3.25'de görülen "Superpave gyratory compactor (SGC)" cihazı kullanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.25. SGC deney cihazı ve üretilen tekerlek izi numunesi

SGC cihazı; yükleme çerçevesi, sistemi ve kolu, basınç göstergesi, döner taban, motor, yükseklik ölçme ve kayıt sistemi (bilgisayar yazılımı), kalıp, taban plakası ve numune çıkartma kısımlarından oluşur. Cihazın tipik olarak şematik gösterimi ve kalıp hareketinin biçimi şekil 3.26'da gösterilmiştir. Cihazın sıkıştırma işlemini düzenleyen ana parametreler de şunlardır: (Buncher ve ark., 2014)

- Dikey basınç, 600 ± 18 kPa;
- Kalıbın dönme açısı, $(1.16 \pm 0.02)^\circ$ (iç), $(1.25 \pm 0.02)^\circ$ (dış);
- Dönerek sıkıştırma hızı, dakikada 30.0 ± 0.5 dönüş;
- Dönerek sıkıştırma sayısı, beklenen trafik seviyesine bağlı olarak belirlenir.



Şekil 3.26. SGC cihazının tipik bir şematik gösterimi ve kalıp hareketi (Buncher ve ark., 2014)

Tüm parametrelerin düzenli ve doğru bir şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir. Birlikte, dönme açısı numune sıkıştırması üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Açı arttıkça sıkıştırma çabası artar. Benzer şekilde, azalırsa, numune sıkışması azalacaktır. Açıdaki nispeten küçük değişiklikler sıkıştırma seviyesinde önemli değişiklikler yapabilir ve açıda herhangi bir sapma olmamasını sağlamak için iyi kalibre edilmiş bir sıkıştırıcıyı korumak önemlidir. SGC numunelerinin imalatında, kalıp dönerken numuneye sabit bir konsolidasyon basıncı uygulanır. Tutarlı yoğunlukta numuneleri sağlamak için, SGC'nin sıkıştırma işlemi sırasında sabit bir basınç ve bilinen sabit bir dönme açısı sağlaması çok önemlidir. Her SGC modeli, dönme açısını ayarlamak, sağlamak ve korumak için farklı bir yöntem kullanır. SGC kalıpları, 150 mm çapında ve yükleme altında deformasyona direnmek için minimum 7.5 mm kalınlığında çelik duvarlı olarak tasarlanmıştır. Kalıp, sıkıştırma sırasında karışım için sınırlama sağlar. 150 mm kalıp dışında, bazı amaçlar için 100 mm kalıplar da kullanılmaktadır. Tasarımcı, SGC cihazı ve kalıpların zamanla aşındığının farkında olmalı, kalıplar ve ekipman her kullanımdan sonra temizlenmeli ve üreticinin önerilerine göre korunmalı ve aşınma belirtileri açısından düzenli kontrol edilmelidir. Bu sorun önemli bir hata oluşturacak kadar ciddi olabilir. SGC, sıkıştırma sırasında her bir dönüşte örnek yüksekliğini en yakın 0.1 mm'ye kadar doğru bir şekilde ölçme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, düşük sıkıştırma düzeylerinde BSK yoğunluğunu tahmin etmek ve sıkıştırma oranını belirlemek için kullanılır (Buncher ve ark., 2014).

SGC, sıkıştırma süresince istenen basıncı uygulamalı ve sabit açı ayarlanmalıdır. İstenen son noktaya (gerekli sayıdaki dönüşe (hacimsel özelliklerin tespiti için)) veya belirli bir yüksekliğe (mekanik özellik testlerinde kullanım için) kadar sıkıştırma devam etmeli ve gerekli sıkıştırma parametreleri (ilk 5 dönüşte 600 ± 60 kPa, diğer aşamada 600 ± 18 kPa; dakikada 30 ± 0.5 dönüş; iç (alt ve üst taban plakalarıyla kalıp iç duvarı arası) ve dış (SGC çerçevesiyle kalıp dış duvarı arası) açılar sırasıyla 20.25 ± 0.35 mrad ($1.16 \pm 0.02^\circ$), 21.82 ± 0.435 mrad ($1.25 \pm 0.02^\circ$)) sağlanmalıdır (ASTM D6925, 2015).

Çizelge 3.7. Superpave gyratory sıkıştırma (SGC) seviyeleri (sayıları) (Buncher ve ark., 2014)

20 yıllık tasarım ETDY* (milyon)	Sıkıştırma sayıları			Tipik Karayolu Uygulamaları
	N _{ini}	N _{des}	N _{max}	
< 0.3	6	50	75	Uygulamalar arasında; yerel karayolları, ilçe yolları ve kamyon trafiğinin yasak olduğu veya çok az düzeyde olduğu şehir sokakları gibi çok hafif trafik hacimli yollar bulunur. Bu yollardaki trafik; bölgesel, eyaletler arası veya değil, yerel yapı olarak kabul edilir. Dinlenme alanlarına veya bölgelerine hizmet veren özel amaçlı yollar da bu seviyede uygulanabilir.
0.3 – 3	7	75	115	Uygulamalar toplayıcı yolları veya erişim sokaklarını içerir. Orta trafiğe kapalı şehir sokakları ve ilçe yollarının çoğu bu seviyede uygulanabilir.
3 – 30	8	100	160	Uygulamalar arasında birçok iki şeritli, çok şeritli, bölünmüş ve kısmen veya tamamen kontrol edilen erişim otoyolları bulunmaktadır. Bunlar arasında orta ve ağır trafiğe kapalı şehir sokakları, birçok devlet yolu ve bazı kırsal eyaletler bulunmaktadır.
> 30	9	125	205	Uygulamalar, kırsal ve kentsel yapıdaki eyaletler arası yolların büyük çoğunluğunu içerir. İki seviyeli yollardaki kamyon ağırlık tartma istasyonları veya kamyon tırmanma şeritleri gibi özel uygulamalar da bu seviyede uygulanabilir.

*: ETDY: Eşdeğer tekerlek dingil yükü

SGC'lerin her dönüşten sonra örnek yüksekliğini ölçebilme yeteneği, herhangi bir örnek yüksekliği veya dönme sayısında bir G_{mb} 'nin (karışım hacim özgül ağırlığı) tahmin edilmesini sağlar. Çizelge 3.7'de verilen tahmini trafik yüküne dayanarak; $N_{initial}$, N_{design} ve $N_{maximum}$ olmak üzere 3 farklı dönüş sayısında laboratuvar sıkıştırma seviyeleri (yoğunlukları) tanımlanmıştır. Daha yaygın olarak N_{ini} , N_{des} ve N_{max} olarak belirtilen bu terimler, farklı yoğunluk seviyelerine neden olan dönerek sıkıştırma sayısını ifade eder.

N_{ini} , BSK'nın sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsüdür. Çok hızlı bir şekilde sıkışabilen karışımlar, doğal olarak sıkışabilir hale gelme eğilimindedir ve bu nedenle istenmeyen olabilirler. N_{ini} sayısındaki yoğunluk özellikleri, tasarım trafik seviyesine bağlı olarak G_{mm} 'in % 89–91.5'u arasında değişmektedir. Yüksek oranda doğal kum veya ince ve kaba agrega olarak düşük açısallık (köşeli) özellikli karışımlar, bu şartı karşılamayabilir. Çok kaba, sert BSK'ların N_{ini} sayısında G_{mm} 'in % 82–83'ü kadar bir yoğunluğu olabilir. Bunların sıkıştırılması zor olabilir ve geçirgenlik riskleri daha yüksektir. N_{des} , karışımın hedef yoğunluğuna ulaşması için belirtilen dönüş sayısıdır ve BSK'nın hizmet ömrünün ortasındaki tahmini yoğunluğunu ifade eder. Hedef yoğunluk, G_{mm} 'in % 96.0 veya hava boşluğunun % 4.0 olduğu yoğunluktur. N_{max} ise, kullanım ömrünün sonunda trafikteki sıklığın ardından kaplamada beklenen nihai yoğunluğun bir tahminidir. Tüm trafik seviyeleri için % 98 ile sınırlandırılmıştır. Düşük hava boşluğu, kolayca akan ve kaçınılması gereken plastik bir karışımla sonuçlanabilir (Buncher ve ark., 2014).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamındaki deney süreçleri; katkıların elde edilmesi, katkıların etkilerinin incelenmesi, modifiye bağlayıcıların performans sınıflarının belirlenmesi, katkıların etkilerinin kimyasal deneylerle de araştırılması, katkıların ve BSK içindeki modifiye bağlayıcıların optimum oranlarının belirlenmesi, optimum oranlardaki katkılı BSK'ların performanslarının tespit edilmesi olarak sınıflandırılabilir ve çalışmalar şu şekilde ana başlıklar altında özetlenebilir:

- ✓ PP, YYPE ve PET plastik atıklarının ikili ve üçlü olarak gruplandırılmış birlikte piroliz deneyleri.
- ✓ Piroliz sonucu elde edilen ürünlerin çeşitli oranlarda, Kırıkkale Rafinerisi 50/70 sınıfı bitümlü bağlayıcı ile karıştırılması ve hazırlanan modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve RV deneylerinin uygulanması.
- ✓ Bitümlü bağlayıcı deneyleri sonucunda iki farklı katkı seçilmiştir. Bu katkılar ile çeşitli oranlarda hazırlanan modifiye bitümlü bağlayıcılara Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Araştırma Laboratuvarında Superpave (RTFOT, PAV, DSR ve BBR) deneylerinin uygulanması.
- ✓ Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi'nde (İLTEK), bir önceki maddede belirtilen bitümlü bağlayıcılara SEM ve FTIR analizlerinin yapılması.
- ✓ Seçilen katkıların, RV deneyi ile optimum oranları bulunmuştur. Optimum oranda hazırlanan katkılı modifiye bitümler kullanılarak Marshall yöntemine göre karışım tasarım analizlerinin yapılması.
- ✓ “Superpave Gyratory Compactor” cihazıyla, optimum bitüm oranında katkılı BSK numunelerinin hazırlanması ve numunelere tekerlek izi deneylerinin yapılması.

4.1. Piroliz Deneyleri ile Katkıların Elde Edilmesi

Plastiklerin birçok sektörde geniş uygulamaları nedeniyle, küresel plastik üretimi yıllar boyunca artmıştır. Plastik talebindeki artış; depolama alanlarında plastik atıkların birikmesine neden olarak, birçok çevre sorunlarına sebep olmakta ve plastiklerin petrol esaslı malzeme olmasından dolayı yenilenemeyen fosil yakıtların bir sonucu olarak, petrolün tükenmesine de yol açmaktadır. Plastik atıkların yönetimi için geliştirilen bazı

alternatifler, geri dönüşüm ve enerji kazanımı yöntemidir fakat plastikleri ayırma işlemi yüksek işçilik maliyeti gerektirdiğinden, geri dönüşüm yönteminin bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle, yüksek enerji talebini karşılamak için enerji geri kazanım yöntemine araştırmacılar dikkatlerini yöneltmişlerdir. Kapsamlı araştırma ve teknoloji geliştirme sayesinde, plastik atıkların enerjiye dönüşümü geliştirilmiştir. Petrol, plastik üretiminin ana kaynağı olduğu için, plastiklerin piroliz işlemiyle sıvı yakıtı geri kazandırılması büyük bir potansiyele sahiptir. Çünkü, üretilen yakıt, ticari yakıt ile karşılaştırılabilir yüksek kalorifik değere sahiptir (Sharuddin ve ark., 2016). Aynı anda sıvı ve gazları üretmek için kullanılan piroliz; ham petrokimyasalları geri kazanmak, atık plastiklerden enerji üretmek veya hidrokarbon elde etmek için elverişli olabilir (Kiran ve ark., 2000).

Piroliz, uzun zincirli polimer moleküllerini ısı ve basınç yoluyla daha küçük, daha az karmaşık moleküllere termal olarak indirgeme sürecidir. Süreç, daha kısa süre ve oksijensiz yoğun ısı gerektirir. Piroliz sırasında üretilen üç ana ürün, özellikle üretim ve rafineriler başta olmak üzere sanayiler için değerli olan petrol (sıvı), gaz ve çar (katı-kalıntı)'dır. Piroliz parametreleri, herhangi bir piroliz işleminde ürünlerin bileşimini ve verimini optimize etmede büyük rol oynamaktadır. Plastik pirolizinde, anahtar proses (işlem) parametreleri; katı, sıvı ve gaz gibi nihai ürünlerin üretimini etkileyebilir. Bu önemli parametreler; sıcaklık, reaktör tipi, basınç, tepkime (kalış) süresi, katalizörler, akışkanlaştırıcı gaz türü ve hızı olarak özetlenebilir. Arzu edilen ürün, farklı ayarlarda parametreleri kontrol ederek gerçekleştirilebilir.

Sıcaklık, polimer zincirinin kırılma reaksiyonunu kontrol ettiği için pirolizde en önemli işletim parametrelerinden biridir. Moleküller Van der Waals kuvveti tarafından çekilir ve bu durum moleküllerin çökmesini engeller. Sistemin sıcaklığı arttıkça, sistem içerisindeki moleküllerin titreşimi daha büyük olur ve moleküller nesne yüzeyinden uzaklaşır. Bu durum, polimer zincirleri boyunca Van der Waals kuvveti tarafından indüklenen enerji, zincirdeki C-C bağının entalpitesinden daha büyük olduğunda ortaya çıkar ve karbon zincirinin kırılmasına neden olur (Sharuddin ve ark., 2016).

4.1.1. Birlikte piroliz deneyleri için plastik gruplarının oluşturulması

Plastik karışım gruplarının oluşturulmasında, değişkenlerin durumu dikkate alınmalıdır. 3 farklı plastiğin ikili ve üçlü kombinasyonları düşünüldüğünde, 4 farklı plastik karışım grubu oluşmaktadır. Ayrıca; karışım grupları içinde plastiklerin oransal değişimlerinden yola çıkarak, ihtimaller çoğaltılabilir. Bununla birlikte; tüm bu oluşan

karışım gruplarının farklı sıcaklıklarda ürün eldeleri düşünülürse, iyice karmaşık durum ortaya çıkar. Yani; “x: plastiklerin değişik sayılarda kombinasyonu”, “y: her bir grup içinde plastiklerin oransal değişimleri”, “z: tüm karışım grupları için farklı sıcaklıklar” olarak, bu çalışma için söz konusu değişkenlerin olduğu ve piroliz çalışması sürecinde oluşacak toplam plastik karışımının ise “x.y.z” olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, bu değişkenlerin en az 1’nin sabit tutulması karışıklığının giderilmesi açısından zorunlu olarak görülmüştür.

Buradan hareketle; yapılan piroliz deneyleriyle, pirolizden elde edilen ürünlerin farklılığının ve bunların bitümlü bağlayıcıya olan etkilerinin daha zor tespit edileceği düşüncesiyle, “y” olarak adlandırılan değişkenin sabit tutulması gerektiği fikri ön plana çıkmıştır. Böylelikle; ikili ve üçlü plastik kombinasyon gruplarında her bir plastiğin oranı, plastiklerin türlerine göre kullanım oranlarından (giriş bölümü çizelge 1.3) yola çıkarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan plastikler ve küçük boyutlara getirilmiş durumları şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tez çalışmasında kullanılan PP, YYPE ve PET plastikleri

Çöp veya depolama alanlarında biriken karışık plastiklerin oranını temsil etme niteliği taşıyabilmesi durumundan dolayı, gruplandırmada plastiklerin kullanım oranları dikkate alınmıştır. Bu bilgiler ışığında, oluşturulan karışım grupları şu şekildedir:

- ✚ Grup 1: % 60 PP ve % 40 YYPE grubu (PP/YYPE=3/2)
- ✚ Grup 2: % 75 PP ve % 25 PET grubu (PP/PET=3/1)
- ✚ Grup 3: % 66,67 YYPE ve % 33,33 PET grubu (YYPE/PET=2/1)
- ✚ Grup 4: % 50 PP, % 33,33 YYPE ve % 16,67 PET grubu (PP/YYPE/PET=3/2/1)

4.1.2. Piroliz deney sonuçları

Oransal dağılım açısından, karışım gruplarında PP ve YYPE plastikleri ön plana çıkmaktadır. Buradan hareketle, öncelikli olarak “Grup 1” olarak ifade edilen karışım grubuna ait piroliz deneyleri yapılmıştır.

Piroliz ile ilgili olarak en önemli parametre olan deney sıcaklıkları değiştirilerek, elde edilen katı ve sıvı ürün değişimleri tespit edilmiş ve ürün verimleri hesaplanmıştır. Yapılan ilk deneyde, PP ve YYPE’den oluşan plastik karışımı reaktöre konmuş, cihazın kontrol biriminde; sıcaklık 150 °C’ye, ısıtma kademesi de 1’e getirilmiştir. Deneyin başlaması ile birlikte, 20–25 dakika civarında sisteme N₂ (azot) gazı akışı sağlanmıştır. Reaktörün ulaştığı son sıcaklık, göstergeden 293 °C olarak okunmuş ve sıcaklık düşüşü ile birlikte deney sonlandırılmıştır.

Reaktör belli bir soğukluğa geldikten sonra, gerekli bağlantılar sökülmüş ve reaktör ile sıvı toplama kaplarında biriken (boru çeperleri dahil) katı ve sıvı ürünler tartılarak piroliz ürün verimleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

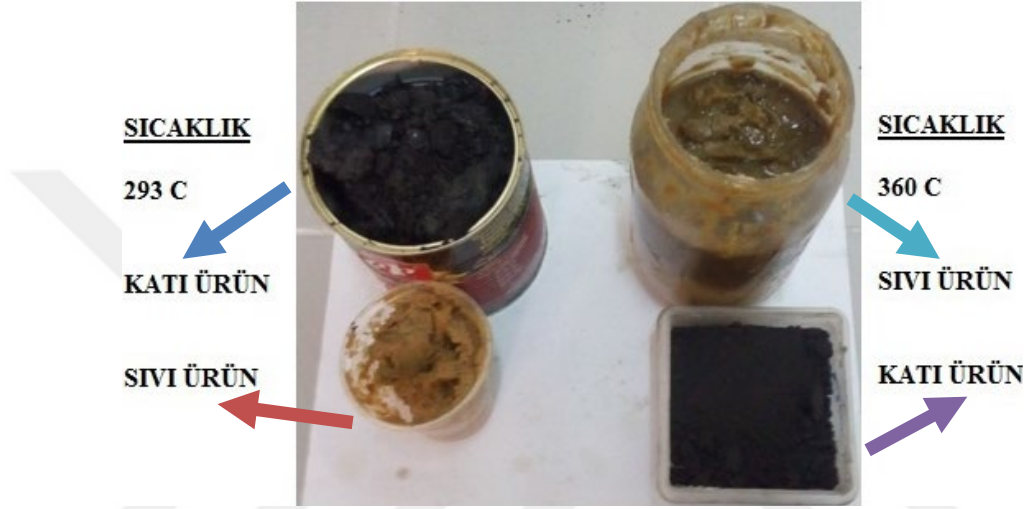
$$\%KATI = \frac{\text{Katı ürün miktarı (gr.)}}{\text{Toplam hammadde(gr.)}} \times 100 \longrightarrow \%KATI = 82.51 \quad (4.1.a.)$$

$$\%SIVI = \frac{\text{Sıvı ürün miktarı (gr.)}}{\text{Toplam hammadde(gr.)}} \times 100 \longrightarrow \%SIVI = 11.62 \quad (4.1.b.)$$

$$\%GAZ = 100 - (\% \text{ Katı ürün} + \% \text{ Sıvı ürün}) \longrightarrow \%GAZ = 5.87 \quad (4.1.c.)$$

Deney sonunda; şekil 4.2’de gösterildiği gibi, boru çeperlerinden elde edilebilen sıvı ürünün bardağa boşaltılabilecek kadar az olduğu ve reaktörde de buna kıyasla fazla miktarda bir kütlenin erimiş olarak kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, piroliz işlemi için seçilen sıcaklığın yeterli bir sıcaklık olmadığını göstermektedir.

Herhangi bir plastik karışımın ayrışma (bozulma) davranışını modellemek için, tek tek plastik bileşenlerin ayrışma kinetikleri hakkında bilgi gereklidir (Hujuri ve ark., 2008). PE ve PP plastikleri, poliolefin olarak tanımlanırlar ve benzer yapıya sahiplerdir. PE, nispeten termal olarak stabil bir polimerdir ve 290 °C'ye kadar oksijensiz ortamda bozulma olmadan dayanabilir. (Miteva ve ark., 2016). Teorik olarak PP, YYPE'den daha hızlı bozunur çünkü PP zincirindeki karbonun yarısı üçüncül karbondur. YYPE'ye kıyasla PP, düşük termal bozunma sıcaklığına sahiptir (Sharuddin ve ark., 2016).



Şekil 4.2. Farklı deney sıcaklıkları ile PP–YYPE karışımında piroliz ürünlerindeki değişim

Yapılan diğer bir deneyde, PP–YYPE birlikte pirolizi için aynı deney süreçleri uygulanmış ve bir önceki deneyden farklı olarak cihazın kontrol biriminde, sıcaklık 200 °C'ye getirilmiştir. Reaktörün ulaştığı son sıcaklık, 360 °C olarak okunmuş ve deney sonrası bir önceki deneydeki aynı işlemler uygulanarak, katı, sıvı ve gaz olmak üzere ürün verimleri sırasıyla % 12.42, % 69.74 ve % 17.84 olarak bulunmuştur. Deney sonunda; şekil 4.2'de görüldüğü gibi, sıvı toplama kaplarındaki ürünün oldukça arttığı ve reaktörde toz halinde parçalanmış bir kütlenin kaldığı tespit edilmiştir.

Yapılan iki deney sonucunda: 300 °C civarı veya daha aşağı sıcaklıklardaki piroliz deneylerinde reaktöre konulan ürünün yeterli miktarda bozulamayacağı (büyük miktarda eriyik halde kalacağı); 350 °C civarı veya daha yukarı sıcaklıklardaki piroliz deneylerinde ise reaktörde kalan katı ürünün azalacağı, verim açısından uygun sonuç elde edilemeyeceği görülmüştür. Ayrıca; ürünün bozunma süreci ile ilgili olarak, bu iki sıcaklık (300–350 °C) arasında oldukça büyük bir değişimin olduğu görülmüştür. Bu yüzden; bitümlü bağlayıcıya katkı olarak etkilerin tespiti maksadıyla, tüm plastik

karişım grupları için 300–350 °C sıcaklıklar arasındaki piroliz ürünlerinin değerlendirilmesinin uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Böylelikle, dört farklı plastik karişım grubunun aynı koşullar ile yapılan piroliz deney sonuçları aşağıda sunulmuştur.

PP–YYPE karişımında olduğu gibi, yapılan tüm bu deneylerde, piroliz işlemlerinde aynı deney süreçleri uygulanmış ve yukarıda ifade edilen iki deneyden farklı olarak cihazın kontrol biriminde, sıcaklık 170 °C’ye getirilmiştir. Reaktörün ulaştığı son sıcaklıklar ise: grup 1 (PP–YYPE), grup 2 (PP–PET), grup 3 (YYPE–PET) ve grup 4 (PP–YYPE–PET) için sırasıyla 319, 316, 320 ve 323 °C olarak cihaz göstergesinden okunmuştur.

Deneyler sonrasında ürün verimleri hesaplanmıştır. Dört farklı plastik karişım grubunda elde edilen ürün verimleri, izelge 4.1’de ve pirolizden elde edilen katı ve sıvı ürünler de şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Birlikte piroliz deneyleri sonrasında elde edilen piroliz ürünlerinin verimleri

Plastik karişım grubu	Katı rn (%)	Sıvı rn (%)	Gaz rn (%)
Grup 1 (PP–YYPE)	56.04	32.37	11.59
Grup 2 (PP–PET)	51.23	21.32	27.45
Grup 3 (YYPE–PET)	40.28	33.82	25.90
Grup 4 (PP–YYPE–PET)	50.00	31.78	18.22



şekil 4.3. PP–YYPE plastik karişımının pirolizi sonucu elde edilen katı ve sıvı ürün



şekil 4.4. PP–PET plastik karişımının pirolizi sonucu elde edilen katı ve sıvı rn



Şekil 4.5. YYPE–PET plastik karışımının pirolizi sonucu elde edilen katı ve sıvı ürün



Şekil 4.6. PP–YYPE–PET plastik karışımının pirolizi sonucu elde edilen katı ve sıvı ürün

4.2. Bitümlü Bağlayıcı Deneyleriyle Katkıların İncelenmesi

Katkı maddeleri ile Kırıkkale Rafinerisi 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı gerekli koşullarda karıştırılmış ve modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bunun için; karıştırma süresi, karıştırma hızı, sıcaklık gibi modifikasyonla ilgili parametreler önem arz etmektedir. Bu bakımdan plastiklerin bağlayıcı ile modifikasyonu konusunda, ilgili çalışmalar gözden geçirilmiş ve gerekli modifikasyon parametreleri belirlenmiştir.

Plastik piroliziyle elde edilen sıvı ürünler, ticari yakıtle karşılaştırılabilir yüksek kalorifik değere sahiptir (Sharuddin ve ark., 2016). Atık plastiklerin piroliz sıvı ürünleri, ham petrokimyasalları geri kazanmak ve atık plastiklerden enerji üretmek için elverişli olabilir (Kiran ve ark., 2000). Dolayısıyla sıvı ürünlerin bitümlü bağlayıcı katkı maddesi olarak kullanılmasından ziyade, bu amaçlarla kullanılması daha elverişli olarak nitelendirilebilir. Ayrıca, “Piroliz yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış atıklarla modifiye edilen bitümlü karışımların mühendislik özellikleri isimli 112M116 No’lu TÜBİTAK 1001 projesi” çalışmasında, bağlayıcı ve BSK katkısı olarak, “beyaz blok kopolimer PP plastik atığı” piroliz katı ürününün olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece; bu tez çalışmasında, 1001 projesinden elde edilen olumlu sonuçların geliştirilmesi ve katkı maddesi olarak farklı plastik atıkların birlikte piroliz durumunun incelenmesi amacı

güdülmüştür. Sonuç olarak; plastik karışım gruplarının her birinin pirolizinden elde edilen ve şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da gösterilen 4 farklı katı ürün, çalışma kapsamında katkı maddeleri olarak kullanılmıştır.

4.2.1. Modifiye bitümlü bağlayıcıların hazırlanması

Literatür çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde; plastiklerle bağlayıcının modifikasyonunda kullanılan sıcaklıkların genel olarak 160–180 °C arasında olduğu görülmüştür.

Bitümlü bağlayıcının uzun süre yüksek sıcaklıklarda kalmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü, bu durum bitümde oksidasyona sebep olabilir. Oksidasyon, bitümlü bağlayıcının yaşlanmasına yol açar ve yaşlanma, bağlayıcının en önemli özelliklerinin bozulmasına sebep olur (Dalhat ve Wahhab, 2017).

Karıştırma hızlarının; genellikle 500–700 rpm vb. şeklinde düşük hızlar veya 1200–1300 rpm vb. şeklinde yüksek hızlar olarak seçildiği görülmüş ve toplam karıştırma süresinin iki aşamaya (katkı ilavesi ve sonrası) ayrıldığı çalışmaların az olmadığı tespit edilmiştir.

Karıştırma süresi olarak, genellikle 1 saatlik sürenin çalışmalarda yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Dalhat ve Wahhab (2017) tarafından yapılan çalışmada, farklı karıştırma sürelerinde % 4 katkı oranlı modifiye bitümler üretilmiş ve bu bitümlere RV ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonrasında; PP için en uygun karıştırma süresi 50 dak., YYPE için ise 60 dak. olarak tespit edilmiştir.

Literatür değerlendirmesinin yanı sıra katkıların (piroliz katılarının) durumu da incelenmiştir. Modifikasyon öncesinde, katkıların fiziksel özelliklerine bakılmış ve 170 °C civarındaki sıcaklıklarda katkıların eridiği görülmüştür. Bu, beklenen bir durumdur çünkü YYPE 132–134 °C civarında ve PP 163 °C civarında erime noktasına sahiptir. Dolayısıyla, katkıların bitümle modifikasyonunun zor olmayacağı düşüncesi ile sıcaklık çok yüksek (180 °C) seçilmemiş ve modifikasyon süresince 160–170 °C aralığında sıcaklık tutulmuştur.

Modifikasyon parametreleri (sıcaklık, hız ve süre) dışında; katkıların bitümlü bağlayıcı ile karıştırma oranları, bitüm ağırlığının % 2, 4, 5 ve 6’sı olarak belirlenmiştir. Literatür özetlerinde de görüleceği gibi, polimer katkılarının optimum oranlarının % 4–6 aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Buradan hareketle; % 4’e kadar olan kısımda, % 2’şer artışla ve sonrası % 1’er artışla oranları seçmek uygun olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.7. Modifiye bitümlerin hazırlandığı “modifiye bitüm mikseri”

Sonuç olarak; PP–YYPE, PP–PET, YYPE–PET ve PP–YYPE–PET plastik karışım gruplarına ait piroliz katı ürünlerinin herbiri, şekil 4.7’de görülen “modifiye bitüm mikseri” kullanılarak, bitüm ağırlığının % 2, 4, 5 ve 6’sı oranlarında Kırıkkale Rafinerisi’nden tedarik edilen 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı (400 gr.) ile karıştırılmıştır. 160–170 °C sıcaklık, katkının yavaş yavaş ilave edildiği 15 dak. 500 rpm ön karıştırma ve katkı ilavesi sonrası 45 dak. 1,300 rpm yüksek karıştırma olarak, modifikasyon parametreleri belirlenmiş ve her bir modifiye bağlayıcı için aynı işlemler uygulanmıştır. Karıştırma işlemi sonucunda elde edilen modifiye ve saf 50/70 bitümlü bağlayıcı numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası ve RV deneyleri uygulanmıştır.

4.2.2. Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçları

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinin sonuçları; grup 1 (PP–YYPE), grup 2 (PP–PET), grup 3 (YYPE–PET) ve grup 4 (PP–YYPE–PET) olarak sırasıyla çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; saf bitüme göre, tüm katkılı bitümlerde penetrasyonların azaldığı ve yumuşama noktalarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, katkıların daha fazla oranlarda bitüme eklenmesiyle, penetrasyondaki azalışlar ve yumuşama noktasındaki artışlar devam etmiştir. Her bir katkının ilavesiyle farklı etkiler oluşsa da, bitümün kıvamının sertleştiği deney sonuçları ile görülmüştür.

Çizelge 4.2. Saf ve “PP–YYPE” modifiye bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon (1/10 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
50/70 Saf (Katkısız) Bitüm	56	51.5
% 2 PP–YYPE Katkılı Bitüm	49	56.0
% 4 PP–YYPE Katkılı Bitüm	46	60.0
% 5 PP–YYPE Katkılı Bitüm	45	62.5
% 6 PP–YYPE Katkılı Bitüm	43	63.5

Çizelge 4.3. Saf ve “PP–PET” modifiye bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon (1/10 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
50/70 Saf (Katkısız) Bitüm	56	51.5
% 2 PP–PET Katkılı Bitüm	47	56.5
% 4 PP–PET Katkılı Bitüm	44	61.5
% 5 PP–PET Katkılı Bitüm	41	64.0
% 6 PP–PET Katkılı Bitüm	40	65.0

Çizelge 4.4. Saf ve “YYPE–PET” modifiye bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon (1/10 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
50/70 Saf (Katkısız) Bitüm	56	51.5
% 2 YYPE–PET Katkılı Bitüm	51	54.5
% 4 YYPE–PET Katkılı Bitüm	50	57.0
% 5 YYPE–PET Katkılı Bitüm	49	59.0
% 6 YYPE–PET Katkılı Bitüm	47	60.5

Çizelge 4.5. Saf ve “PP–YYPE–PET” modifiye bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon (1/10 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
50/70 Saf (Katkısız) Bitüm	56	51.5
% 2 PP–YYPE–PET Katkılı Bitüm	51	55.0
% 4 PP–YYPE–PET Katkılı Bitüm	49	57.5
% 5 PP–YYPE–PET Katkılı Bitüm	48	60.0
% 6 PP–YYPE–PET Katkılı Bitüm	45	61.5

Penetrasyon değerindeki azalış, bitümlü bağlayıcının daha sert kıvama geldiğini gösterir ve bunun sonucu olarak, yumuşama noktası sıcaklığında da artış beklenir. İki deney arasında bu ilişki, deney sonuçlarıyla da görülmektedir. Yumuşama noktasındaki artış, bitümün daha yüksek sıcaklıklarda yumuşadığını gösterir. Böylelikle; bağlayıcının yüksek sıcaklık performansına ve tekerlek izi direncine, katkıların olumlu olacağı söylenebilir. Fakat bu iki deney, daha kapsamlı olarak ve farklı sıcaklıklarda bitümün davranışı hakkında sonuç vermeyeceği için, ulaşılan yargı bir ön tanı niteliğindedir.

Çizelge 4.6’da saf ve modifiye bitümler için PI değerleri verilmiştir. Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi; saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerde PI değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Böylelikle, katkıların bitümün sıcaklık hassasiyetini azaltıcı bir etki oluşturduğu ve artan katkı miktarıyla, hassasiyetteki azalmanın arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.6. Saf ve modifiye bitümlerin penetrsayon indeksi (PI) değerleri

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon İndeksi (PI)				
	Katkısız	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE Katkılı	– 0.6	+ 0.1	+ 0.8	+ 1.2	+ 1.4
PP–PET Katkılı	– 0.6	+ 0.2	+ 1.0	+ 1.3	+ 1.5
YYPE–PET Katkılı	– 0.6	– 0.1	+ 0.4	+ 0.7	+ 0.9
PP–YYPE–PET Katkılı	– 0.6	0.0	+ 0.5	+ 0.9	+ 1.1

Bitümlü bağlayıcının davranışında sıcaklık etkili bir faktördür ve esnek kaplama inşası (taşıma, depolama, karıştırma, sıkıştırma vb. işlemler) sırasında veya kaplamanın hizmet süresi aşamasında bağlayıcı birçok farklı sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu bakımdan değerlendirildiğinde, katkıların ilavesi ile sıcaklık hassasiyetinin azalmasının olumlu bir etki oluşturacağı düşünülebilir. Çünkü bağlayıcı sıcaklık değişiminden daha az etkilendikçe, sıcaklıkla oluşacak etkiler (düşük sıcaklık çatlaması, yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyon vb.) hafifletilmiş olacak ve bitüm sıcaklık artışı ile daha az akıcı özellik gösterecektir. Bununla birlikte, daha az akıcı özellik, BSK'nın karıştırma ve sıkıştırma koşullarını olumsuz hale getirebilir.

Çizelge 4.2 ve 4.5 arasındaki tüm bağlayıcılara ait penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri incelendiğinde; penetrasyonu en düşük ve yumuşama noktası en büyük olan bitümün (% 6 PP–PET katkılı bitüm), başka bir deyişle kıvamı en sert olan bitümün PI değerinin en yüksek olduğu (+1.5) görülür. Penetrasyon arttıkça, yumuşama noktası azaldıkça benzer şekilde PI değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Kısacası, bitümün sertliği (kıvamı) ile PI değerinin ilişkili olarak arttığı ve dolayısıyla sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmektedir.

Fakat penetrasyon düştüğünde veya yumuşama noktası yükseldiğinde kesin olarak PI değeri artmalı şeklinde düşünülmemeli ve PI'nın penetrasyon ve yumuşama noktası arasındaki ilişki olduğu unutulmamalıdır. Örneğin; çizelge 4.3'de % 5 PP–PET 41 penetrasyon ve çizelge 4.2'de % 6 PP–YYPE 43 penetrasyon olarak görülmektedir. % 5 PP–PET'in daha sert olmasından dolayı, PI indeksinin yüksek olacağı düşünülebilir fakat bu iki bitümün yumuşama noktası değerleri % 5 PP–PET ve % 6 PP–YYPE için sırasıyla 64.0 ve 63.5 °C olarak ilgili çizelgelerden görülmektedir. Bu durum; daha sert olsa bile, % 5 PP–PET'in yumuşama noktası sıcaklıklarındaki kıvamının % 6 PP–YYPE'ye yaklaşmasından kaynaklanmakta ve sıcaklığa karşı hassas olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla; hassasiyetteki artış PI değerini azaltacağı için, çizelge 4.6'da yakın olmakla birlikte % 5 PP–PET'in PI (+1.3) değeri, % 6 PP–YYPE'ye (+1.4) göre daha düşüktür.

Buradan hareketle, yumuşama noktaları aynı olan bitümlerden (örneğin; çizelge 4.3 % 4 PP–PET ve çizelge 4.5 % 6 PP–YYPE–PET ikisi de 61.5 °C) penetrasyonu küçük olan bitümün yüksek sıcaklık hassasiyetine ve düşük PI değerine sahip olduğu söylenebilir. Çizelge 4.6’da, bu iki bitüm için sırasıyla PI değerleri (+1.0) ve (+1.1) olarak görülmektedir. Benzer şekilde, penetrasyonları aynı olan bitümlerden yumuşama noktası küçük olanlar için de aynı durum olacaktır. Örneğin; 45 penetrasyonlu sırasıyla çizelge 4.2 % 5 PP–YYPE ve çizelge 4.5 % 6 PP–YYPE–PET bitümlerden yumuşama noktası büyük olan (62.5 °C) % 5 PP–YYPE’nin sıcaklık hassasiyetinin düşük olması sebebiyle PI değeri (+1.2) de yüksek olacaktır.

Tüm bu değerlendirmelerin yanı sıra; PI sistemi, bitümü tanımlamak amacıyla nispeten küçük bir sıcaklık aralığında gerçekleşen değişimlerden yararlanmaktadır. Bu, sakıncalıdır ve bitümün özelliklerini tahmin etmek için bazen yanıltıcı olabilir. Tahmini davranış için iyi bir yaklaşım elde etmek amacıyla, PI sistemi kullanılabilir fakat rijitlik ve viskozite ölçümü ile onaylanması gerekmektedir (Whiteoak, 2004).

4.2.3. Dönel viskometre (RV) deney sonuçları

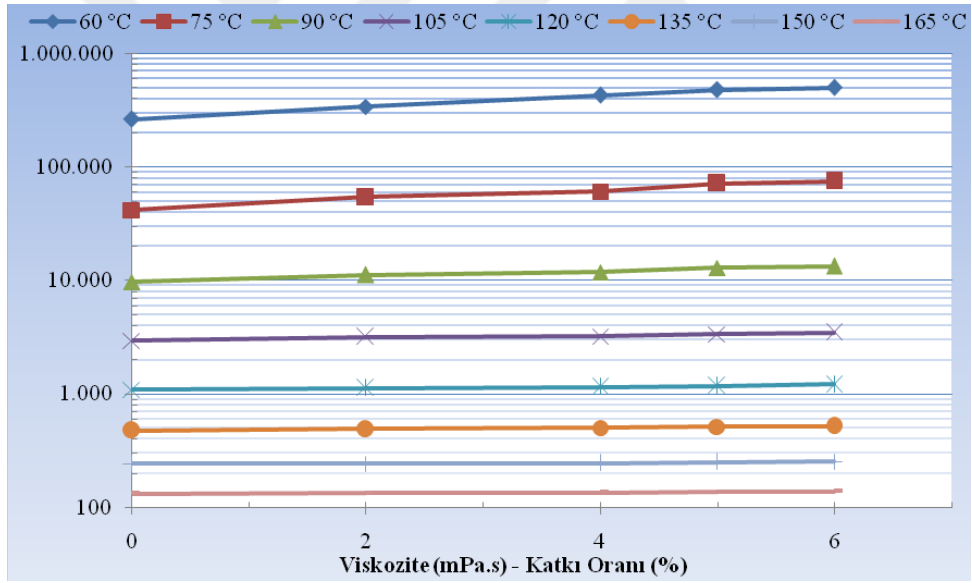
Bir önceki başlıkta sonuçları sunulan penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi ile sadece deneyler kapsamındaki sıcaklıklardan (25 °C ve yumuşama sıcaklıkları) yola çıkarak, bitümlerin kıvamlılıkları belirlenebilmektedir ve sıcaklık hassasiyetleri de bu bağlamda yorumlanmıştır. Buradan hareketle; saf ve katkılı tüm bitümlü bağlayıcıların, yaklaşık yumuşama noktası sıcaklıklarını (çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’den görüleceği gibi) ve kaplamanın maksimum hizmet sıcaklığını temsil eden (BSK’nın sertliğini veya mukavemetini ölçen basit Marshall stabilitesi gibi deneyler, genellikle, bu sıcaklıkta gerçekleştirilir (Buncher ve ark., 2014)) bir sıcaklık olan 60 °C ve BSK uygulanmasında “0.17±0.02 Pa.s” viskozite değerine karşılık gelen sıcaklığın karıştırma sıcaklığı olduğu düşüncesiyle (bölüm 3.2.2.2.1’de bu husus belirtilmiştir), bu sıcaklığın hesaplanabildiği sıcaklık olan 165 °C olmak üzere, çalışma kapsamında oldukça geniş bir sıcaklık aralığı olarak viskozite ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler; 60–165 °C sıcaklık aralığında ve bu iki sıcaklık arasında uygun aralık olarak düşünülen her 15 °C artan sıcaklıklarda tüm bağlayıcılar için yapılmıştır. Böylece; önceki deneylerle birlikte kaplama inşası (taşıma, depolama, karıştırma, sıkıştırma vb.) sırasında ve kaplamanın hizmet süresi aşamasında bağlayıcının maruz kalabileceği birçok farklı sıcaklıklardaki (düşük sıcaklıklar hariç) akışkanlık ve kıvam durumları hakkında fikir sahibi olunmuştur.

4.2.3.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları

Saf ve % 2, 4, 5, 6 “PP–YYPE” katkılı bitümlerin 8 farklı sıcaklıktaki viskozite değerleri, çizelge 4.7’de ve şekil 4.8’de verilmiştir. Katkı ilavesi sonucu saf bitüme göre viskozitedeki değişim çizelge 4.8’de yüzde (%) olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Saf ve “PP–YYPE” katkılı bitümlerin viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkı	% 4 Katkı	% 5 Katkı	% 6 Katkı
60	262,500.0	339,466.7	426,000.0	477,500.0	497,500.0
75	41,430.0	53,890.0	60,686.7	71,253.3	74,170.0
90	9,630.0	11,096.7	11,820.0	12,880.0	13,376.7
105	2,936.0	3,156.0	3,208.7	3,358.0	3,471.0
120	1,084.0	1,115.7	1,142.7	1,176.0	1,204.7
135	474.2	487.5	500.0	512.1	518.8
150	240.0	242.5	245.1	250.0	253.4
165	130.9	132.2	134.0	136.3	137.5



Şekil 4.8. Tüm sıcaklıklarda ve oranlarda “PP–YYPE” katkılı bitümlerin viskozite–katkı oranı grafiği

Çizelge 4.8. “PP–YYPE” katkısının ilavesiyle saf bitüme göre viskozitedeki değişim (%)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değişimi (Saf Bitüme Göre–%)			
	% 2 Katkı	% 4 Katkı	% 5 Katkı	% 6 Katkı
60	29.32	62.29	81.90	89.52
75	30.07	46.48	71.98	79.02
90	15.23	22.74	33.75	38.91
105	7.49	9.29	14.37	18.22
120	2.92	5.41	8.49	11.13
135	2.80	5.44	7.99	9.41
150	1.04	2.13	4.17	5.58
165	1.02	2.39	4.15	5.07

Çizelge 4.7 ve 4.8 incelendiğinde; katkılı bitümlerin viskozite değerlerinin, saf bitüme göre özellikle 60–90 °C sıcaklıkları arasında oldukça yüksek artış sergilediği tespit edilmiştir. Çizelge 4.8’de görüleceği gibi; saf bitüme göre viskozitede, % 6 katkılı bitüm olarak 60 °C’de % 89.52, 75 °C’de % 79.02 ve 90 °C’de % 38.91 gibi artışlar görülmüştür. Şekil 4.8’de doğruların düşen sıcaklıkla artan eğimleri fark edilmektedir. Ayrıca; katkı oranının artmasıyla da, viskozitedeki artışlar devam etmiştir.

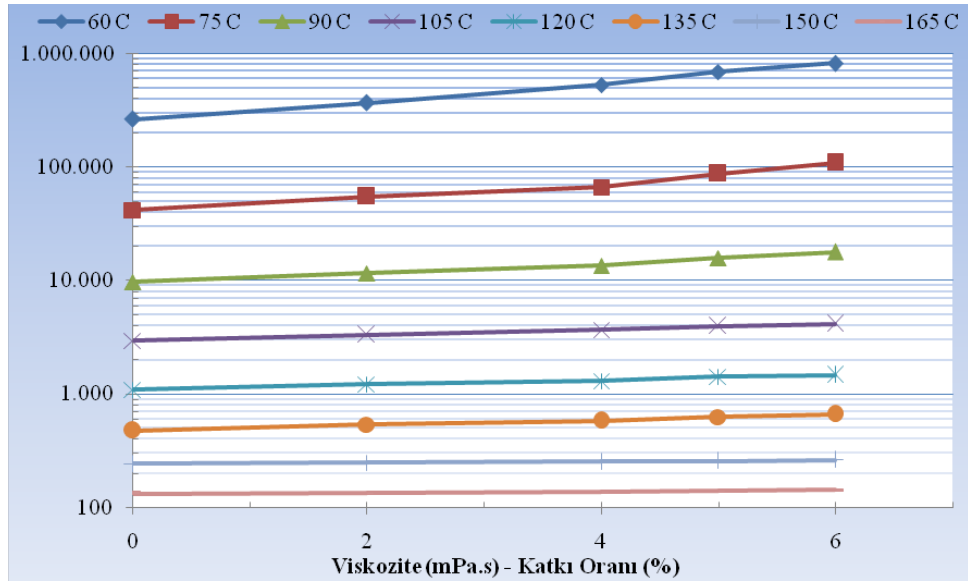
Tüm sıcaklık ve oranlarda saf bitüme göre viskoziteler artmıştır fakat sıcaklık artışı ile viskozitedeki artış yüzdelерinin gittikçe azaldığı çizelge 4.8’de görülmektedir. Şekil 4.8’deki grafikte, doğruların eğimlerinin azalmasıyla da, bu durum görülmektedir.

Özellikle 150 ve 165 °C sıcaklıklarda viskozite artışının diğer sıcaklıklara göre oldukça düşük oranlarda olduğu görülmekte ve bu olumlu olarak değerlendirilmektedir. Çünkü bitümlü bağlayıcının karıştırma sıcaklığı “170±20 mPa.s” değerine karşılık gelen sıcaklıktır ve hem çizelge 4.7 hem de şekil 4.8’den de görüleceği gibi, bu değer 150–165 °C arasına düşmektedir. Viskozite artışındaki azalışla katkılı bitümlerin karıştırma sıcaklığı saf bitüme göre çok farklı olmayacak ve karıştırma aşamasında sıcaklığın çok az değişimiyle enerji sarfiyatı ve yaşlanmanın olumsuz etkileri azaltılacaktır. Bitümün sıkıştırma sıcaklığı “280±30 mPa.s” değerine karşılık gelen sıcaklıktır (bu husus, bölüm 3.2.2.2.1’de belirtilmiştir). Hem çizelge 4.7 hem de şekil 4.8’den de görüleceği gibi, bu değer 135–150 °C arasına düşmektedir ve sıkıştırma sıcaklığı ile ilgili olarak da aynı durum geçerlidir. Böylece, işlenebilirlik probleminin etkisi azalacaktır. Yani, BSK’nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının yükselmesiyle yaşlanma ve işlenebilirlik gibi problemler ve kaplama imalatında daha fazla enerji sarfiyatı oluşmaktadır.

Sonuç olarak; kaplamanın hizmet sıcaklığını temsil eden sıcaklıklar olması sebebiyle, viskozitelerin saf bitüme göre düşük sıcaklıklarda daha yüksek oranlarda artması ve kaplamanın imalat aşamasını temsil eden karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları olan yüksek sıcaklıklarda da daha az oranlarda artması olumlu olarak nitelendirilebilir. Viskozite artışıyla bitümün kıvamı (sertliği) ve kohezyonu artar ve dolaylı olarak BSK’nın yüksek sıcaklık performansı ve tekerlek izi direncinin artması beklenir.

4.2.3.2. Grup 2 (PP–PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları

Saf ve % 2, 4, 5, 6 “PP–PET” katkılı bitümlerin 8 farklı sıcaklıktaki viskozite değerleri, çizelge 4.9’da ve şekil 4.9’da verilmiştir. Katkı ilavesi sonucu saf bitüme göre viskozitedeki değişim çizelge 4.10’da yüzde (%) olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Tüm sıcaklıklarda ve oranlarda ‘PP-PET’ katkıli bitümlerin viskozite-katkı oranı grafiği

Çizelge 4.9. Saf ve ‘PP-PET’ katkıli bitümlerin viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
60	262,500.0	367,500.0	526,666.7	686,733.3	815,000.0
75	41,430.0	54,833.3	66,190.0	87,330.0	108,066.7
90	9,630.0	11,546.7	13,426.7	15,770.0	17,710.0
105	2,936.0	3,325.3	3,664.3	3,967.0	4,114.0
120	1,084.0	1,209.3	1,299.0	1,409.7	1,458.0
135	474.2	533.8	575.0	625.9	659.5
150	240.0	246.7	250.9	256.3	259.6
165	130.9	132.5	136.5	139.6	141.9

Çizelge 4.10. ‘PP-PET’ katkısının ilavesiyle saf bitüme göre viskozitedeki değişim (%)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değişimi (Saf Bitüme Göre-%)			
	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
60	40.00	100.63	161.61	210.48
75	32.35	59.76	110.79	160.84
90	19.90	39.43	63.76	83.90
105	13.26	24.81	35.12	40.12
120	11.56	19.83	30.04	34.50
135	12.57	21.26	31.98	39.07
150	2.79	4.53	6.78	8.17
165	1.25	4.30	6.67	8.41

Çizelge 4.9 ve 4.10 incelendiğinde; katkıli bitümlerin viskozite değerlerinin, saf bitüme göre 60–135 °C sıcaklıkları arasında oldukça iyi artış gösterdiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.10’da görüleceği gibi; % 5 ve 6 katkıli bitümler olarak sırasıyla 60 °C’de % 161.61 ve % 210.48 ve 75 °C’de % 110.79 ve % 160.84 gibi, saf bitüm viskozitesine göre iki katından yüksek artışlar olmak üzere birçok oran ve sıcaklıkta oldukça fazla

değişim gözlenmiştir. Şekil 4.9’da da 60–135 °C sıcaklık doğrularının yükselen durumu açık olarak görülmektedir. Ayrıca, katkı ilavesiyle viskozite artışları devam etmiş ve viskozitedeki artışların sıcaklık arttıkça azaldığı da görülmüştür.

“PP–YYPE” katkısında olduğu gibi, “PP–PET” katkısında da tüm sıcaklıklar ve oranlarda viskozite değerleri artmaktadır. Fakat “PP–PET” katkılı bitümlerde, çok daha iyi ve yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca; bir önceki katkıda olduğu gibi, “PP–PET” katkısı için de yüksek sıcaklıklarda (150–165 °C) viskozite değerlerinin saf bitüme yakın olduğu görülmektedir. Böylelikle; “PP–YYPE” katkısı için olumlu olarak nitelendirilen değerlendirmelerin, bu katkı için de geçerli olduğu görülmektedir.

4.2.3.3. Grup 3 (YYPE–PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları

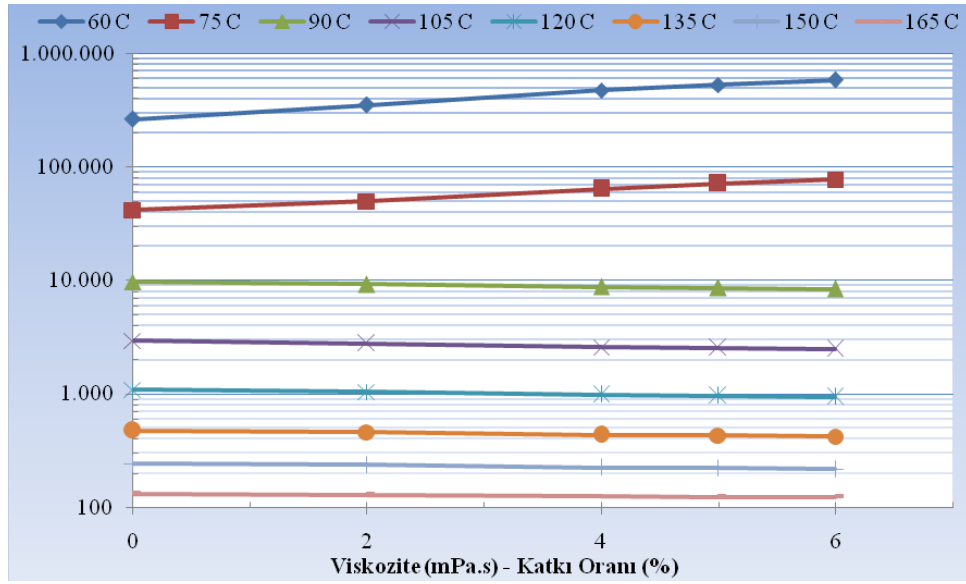
Saf ve % 2, 4, 5, 6 “YYPE–PET” katkılı bitümlerin 8 farklı sıcaklıkta viskozite değerleri, çizelge 4.11’de ve şekil 4.10’da verilmiştir. Çizelge 4.11’de verilen saf ve katkılı bitümlerin viskozite değerlerinden yola çıkarak, katkı ilavesi sonucu saf bitüme göre viskozitedeki değişim çizelge 4.12’de yüzde (%) olarak gösterilmiştir. Çizelgedeki negatif (–) değerler viskozite azalışını, yüzde (%) olarak ifade etmektedir.

Çizelge 4.11. Saf ve “YYPE–PET” katkılı bitümlerin viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
60	262,500.0	350,833.3	471,700.0	526,666.7	585,000.0
75	41,430.0	49,720.0	63,753.3	71,253.3	76,880.0
90	9,630.0	9,196.0	8,750.0	8,562.3	8,387.0
105	2,936.0	2,762.0	2,561.0	2,528.0	2,477.0
120	1,084.0	1,033.3	977.1	957.5	935.2
135	474.2	458.8	435.0	428.8	418.8
150	240.0	235.0	223.9	219.7	215.0
165	130.9	128.8	124.6	123.3	122.5

Çizelge 4.12. “YYPE–PET” katkısının ilavesiyle saf bitüme göre viskozitedeki değişim (%)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değişimi (Saf Bitüme Göre–%)			
	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
60	33.65	79.70	100.63	122.86
75	20.01	53.88	71.98	85.57
90	– 4.51	– 9.14	– 11.09	– 12.91
105	– 5.93	– 12.77	– 13.90	– 15.63
120	– 4.67	– 9.86	– 11.67	– 13.73
135	– 3.25	– 8.27	– 9.57	– 11.68
150	– 2.08	– 6.72	– 8.46	– 10.42
165	– 1.58	– 4.81	– 5.78	– 6.39



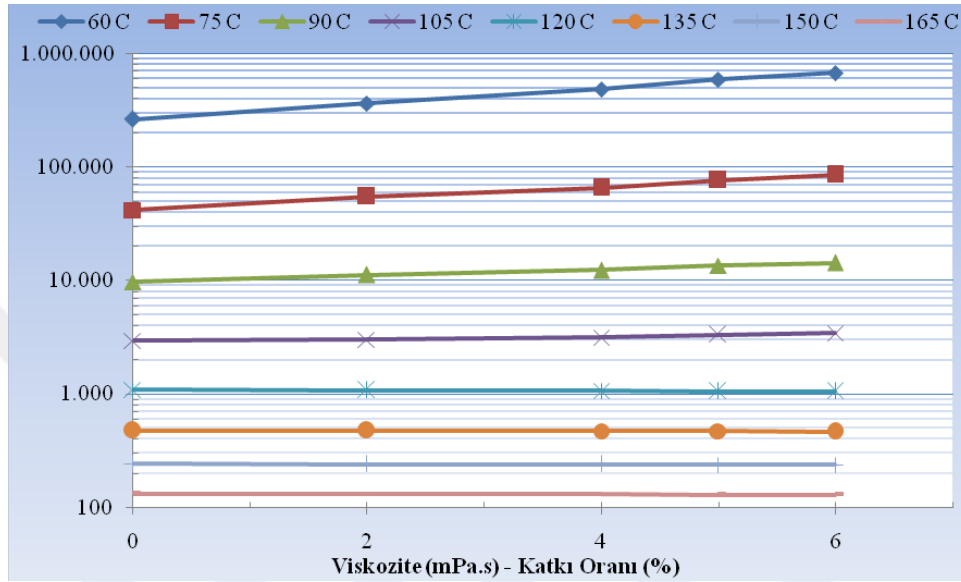
Şekil 4.10. Tüm sıcaklıklarda ve oranlarda “YYPE–PET” katkıli bitümlerin viskozite–katkı oranı grafiği

Çizelge 4.11 ve 4.12 incelendiğinde; katkıli bitümlerin viskozite değerlerinin, saf bitüme göre 60 ve 75 °C sıcaklıklarında arttığı fakat diğer sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.10’da yükselen doğrular olarak 60 ve 75 °C’de viskozitedeki artışlar ile azalan doğrular olarak 90 °C ve sonrası sıcaklıklarda viskozitedeki azalışlar görülmektedir. Viskozitedeki artış (60 ve 75 °C) ve azalış (90 °C ve üstü) katkı miktarı arttıkça da devam etmektedir. Çizelge 4.12’den görüleceği gibi; 60 °C’de, % 5 ve 6 katkıli bitümler saf bitüm viskozitesine kıyasla sırasıyla % 100.63 ve % 122.86 gibi, iki katından yüksek artışlar göstermiştir. 60 ve 75 °C’de viskozite artışının oldukça yüksek olduğu, çizelgede negatif (–) değerler olarak gösterilen viskozite azalış yüzdelерinin, artışlar gibi yüksek olmadığı da görülmektedir.

Önceki iki grup katkının viskoziteye etkisine göre, bu katkının etkisi oldukça farklıdır. Önceki iki grup katkı gibi; viskozitenin 60 ve 75 °C’lerde oldukça yüksek artış sergilemesi kaplamanın hizmet aşaması sıcaklığında, bu katkının da olumlu etkiler göstereceği ve bitümün kıvamının sertleşmesinden dolayı, bu etkilerin yüksek sıcaklık performansı ve tekerlek izi direncine olumlu şekilde yansıtacağı düşünülebilir. Fakat 90 °C ve üstü için viskozite azalışı nedeniyle, bu katkının bitümün kıvamını keskin bir şekilde sertleştirdiği sonucu çıkarılamamıştır. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıkta viskozite azalışı olumlu olarak değerlendirilebilir çünkü bu azalış daha işlenebilir ve akıcı bitümden dolayı, BSK’nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını azaltacak ve önceki iki katkıyla kıyaslandığında, bu katkı için amaçlanan bir durum söz konusu olacaktır.

4.2.3.4. Grup 4 (PP–YYPE–PET) katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları

Saf ve % 2, 4, 5, 6 “PP–YYPE–PET” katkılı bitümlerin sekiz farklı sıcaklıktaki viskozite değerleri, çizelge 4.13’de ve şekil 4.11’de verilmiştir. Katkı ilavesi sonucu saf bitüme göre viskozitedeki değişim çizelge 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Tüm sıcaklıklarda ve oranlarda PP–YYPE–PET katkılı bitümün viskozite–katkı oranı grafiği

Çizelge 4.13. Saf ve “PP–YYPE–PET” katkılı bitümlerin viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkı	% 4 Katkı	% 5 Katkı	% 6 Katkı
60	262,500.0	361,100.0	483,333.3	590,000.0	675,266.7
75	41,430.0	54,833.3	65,360.0	76,330.0	85,150.0
90	9,630.0	11,090.0	12,250.0	13,436.7	14,210.0
105	2,936.0	3,000.0	3,140.3	3,303.3	3,435.0
120	1,084.0	1,073.0	1,064.7	1,053.3	1,044.0
135	474.2	472.9	469.1	466.5	465.0
150	240.0	238.8	237.9	236.7	236.0
165	130.9	130.4	130.0	129.2	128.8

Çizelge 4.14. “PP–YYPE–PET” katkısının ilavesiyle saf bitüme göre viskozitedeki değişim (%)

Sıcaklık (°C)	Viskozite Değişimi (Saf Bitüme Göre–%)			
	% 2 Katkı	% 4 Katkı	% 5 Katkı	% 6 Katkı
60	37.56	84.13	124.76	157.24
75	32.35	57.76	84.24	105.53
90	15.16	27.21	39.53	47.56
105	2.18	6.96	12.51	17.00
120	– 1.01	– 1.78	– 2.83	– 3.69
135	– 0.27	– 1.07	– 1.62	– 1.94
150	– 0.51	– 0.86	– 1.38	– 1.67
165	– 0.33	– 0.66	– 1.27	– 1.58

Çizelge 4.13 ve 4.14 incelendiğinde; katkılı bitümlerin viskozite değerlerinin, saf bitüme göre 60–105 °C sıcaklıkları arasında arttığı fakat diğer sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, viskozite azalışının çok düşük yüzdelerde olduğu ve 120–165 °C sıcaklıklar arasında viskozitenin saf bitüme çok yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.11’de bu sıcaklıklarda doğruların yataya çok yakın olması da, bu durumu göstermektedir. Viskozite artışı ise, saf bitüm viskozitesi ile kıyaslandığında, çizelge 4.14’den görüleceği gibi; % 5 ve 6 katkılı bitümler için 60 °C’de sırasıyla % 124.76 ve % 157.24 ve % 6 katkılı bitüm için 75 °C’de % 105.53 olarak iki katından daha yüksek olmuştur. Özellikle 60–90 °C sıcaklık aralığında oldukça fazla değişim gözlenmiştir. Bu durum, şekil 4.11’de 60–90 °C sıcaklıklarındaki doğruların yükselen eğim artışlarından daha net görülmektedir. Başka bir deyişle; diğer 3 katkıda olduğu gibi, viskozitenin düşük sıcaklıklarda yüksek oranlarda artması ve yüksek sıcaklıklarda düşük oranlarda değişmesi durumu, bu katkı için de geçerlidir. Ayrıca; viskozitedeki artışların (60–105 °C) ve azalışların (120–165 °C) katkı miktarı arttıkça devam ettiği de görülmektedir.

4.2.4. Katkıların karşılaştırılması ve uygun olanların seçilmesi

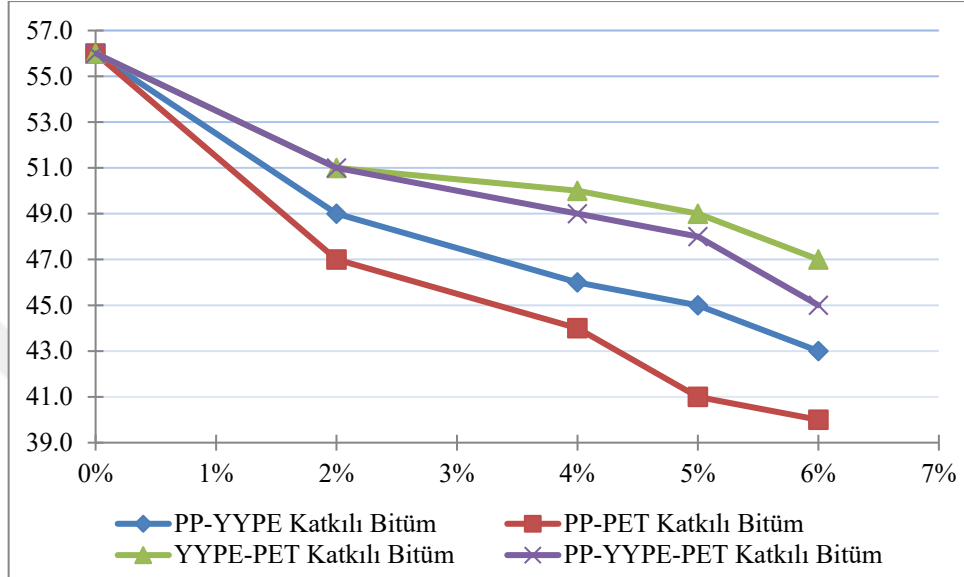
Piroliz ile elde edilen 4 farklı katı ürünün (katkıların) farklı oranlarda saf bitüm ile karıştırılarak modifiye bitümlerin hazırlanması, elde edilen bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve RV deneylerinin uygulanması ve tüm bunlarla ilgili ayrıntılar buraya kadar olan bölümlerde açıklanmıştır. Bu bölümde ise; deney sonuçları, piroliz ürün verimleri ve modifikasyon süreçleri genel olarak değerlendirilerek, katkıların birbiriyle olan ilişkileri ortaya konmuştur.

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında; 17101012 no’lu Selçuk Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) Koordinatörlüğü tarafından desteklenen tez projesi yardımıyla, Ankara KGM bünyesinde yapılan Superpave bitümlü bağlayıcı deneylerinin (RTFOT, PAV, DSR ve BBR) sonuçları sunulacaktır. Deney maliyeti düşünüldüğünde, sadece iki katkının deneylerinin yaptırılması mümkün olabilmektedir. Ayrıca; çalışmanın ileriki süreçlerindeki BSK deneyleri düşünüldüğünde, daha uygun katkılarla ilerlemenin ideal yaklaşım olacağı kanaati oluşmuştur.

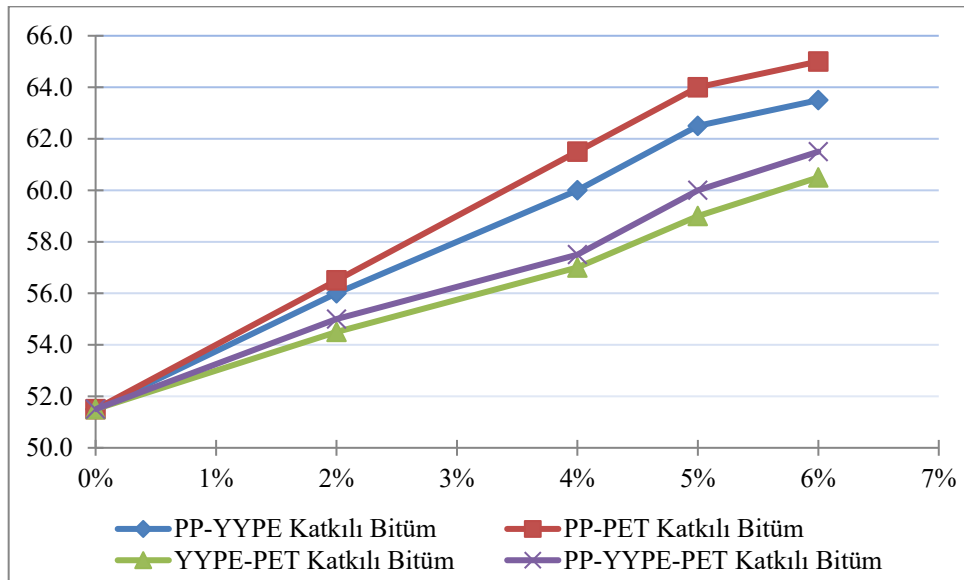
Penetrasyon ve yumuşama noktası deney sonuçlarının hepsi toplu olarak çizelge 4.15’de verilmiş ve katkıların penetrasyonları şekil 4.12 ve yumuşama noktaları şekil 4.13’de grafiksel olarak da sunulmuştur.

Çizelge 4.15. Saf ve tüm katkılı bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası

Katkılı Bitüm	Penetrasyon (1/10 mm)					Yumuşama Noktası (°C)				
	% 0	% 2	% 4	% 5	% 6	% 0	% 2	% 4	% 5	% 6
PP-YYPE	56	49	46	45	43	51.5	56.0	60.0	62.5	63.5
PP-PET	56	47	44	41	40	51.5	56.5	61.5	64.0	65.0
YYPE-PET	56	51	50	49	47	51.5	54.5	57.0	59.0	60.5
PP-YYPE-PET	56	51	49	48	45	51.5	55.0	57.5	60.0	61.5



Şekil 4.12. Saf ve % 2, 4, 5 ve 6 katkılı bitümlerin penetrasyon (1/10 mm) değerleri



Şekil 4.13. Saf ve % 2, 4, 5 ve 6 katkılı bitümlerin yumuşama noktası (°C) değerleri

Çizelge 4.15 incelendiğinde; sırasıyla PP-PET, PP-YYPE, PP-YYPE-PET ve YYPE-PET olmak üzere, katkılı bitümlerde yumuşama noktalarının giderek azaldığı ve penetrasyonların ise giderek arttığı görülmüştür. Dolayısıyla; tüm katkıların, bu

bahsedilen sırada saf bitümün kıvamını sertleştirdiği görülmüştür. Şekil 4.12’de azalan ve 4.13’de artan doğruların sırasında da, bu durum rahatlıkla tespit edilebilir.

RV deneyleri sonucunda ise; 4 katkı grubunda viskozite değerlerinin, saf bitüme göre tüm sıcaklıklarda düzgün (sürekli artış veya azalış şeklinde) olarak değişmediği görülmüştür. YYPE–PET katkılı bitümlerde; 60 ve 75 °C sıcaklıklarda saf bitüme göre viskozite artarken, üst sıcaklıklarda (90–165 °C aralığı) azalmıştır. PP–YYPE–PET katkılı bitümlerde; 60–105 °C aralığında saf bitüme göre viskozite artmış ve 120–165 °C aralığında saf bitüme oldukça yakın olarak azalmıştır. Tüm sıcaklıklarda (60–165 °C), sadece PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerin viskozitelerinde sürekli artış şeklinde düzgün bir değişimin olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle; 60 ve 75 °C’lerde tüm katkılı bitümlerde, 90 ve 105 °C’lerde YYPE–PET katkılı bitüm haricindekilerde, 120–165 °C sıcaklık aralığında PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerde, saf bitüme göre viskozitelerin arttığı görülmüştür.

Ayrıca; viskozitede katkıların ve sıcaklıkların durumuyla azalışlar ve artışlar olması halinde, bitüme ilave edilen katkı miktarlarıyla viskozite değişiminin düzgün olarak ilerlediği tespit edilmiştir. Yani; katkı miktarı artışıyla, viskozite artarken bu artışın devam ettiği veya azalırken de azalışın devam ettiği görülmüştür.

Bunların yanı sıra; tüm katkılar için geçerli olmak üzere, viskozitedeki artış veya azalış oranlarının (saf bitüme göre değişim yüzdesi) sıcaklık artışıyla giderek azaldığı ve özellikle 150–165 °C sıcaklıklardaki viskozitelerin saf bitüme oldukça yaklaştığı görülmüştür. Dolayısıyla; katkıların bu sıcaklıklarda bitümün akıcılığı ile kıvamına çok yüksek oranlarda etki yapmaması ve BSK’nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının da dolaylı olarak çok değişmemesi gibi nedenlerden dolayı, BSK üretimi aşamasında işlenebilirlik, enerji sarfiyatı ve bağlayıcıda oluşacak yaşlanma gibi hususlarda, tüm katkıların ilave etkiler oluşturmayaacağı tespit edilmiştir. Bununla birlikte; YYPE–PET ve PP–YYPE–PET katkılarının bu sıcaklıklarda viskoziteyi azaltmaları sebebiyle, bu BSK’larda bahsedilen hususlarda iyileşme olduğu bile söylenebilir.

Bu 4 katkının viskoziteye olan etkisinin incelenmesinde 60–165 °C aralığında deneylerin yapılmasıyla, BSK’nın üretim ve hizmet aşamasında bağlayıcının maruz kaldığı sıcaklıklardaki akıcılığı ve kıvamı tespit edilmiştir. Burada; karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında BSK’nın hazırlanması ve bağlayıcının taşınması, depolanması gibi üretimle ilgili süreçleri temsil eden, 120–165 °C sıcaklık aralıklarındaki viskozite ölçümleri yüksek sıcaklıklar olarak değerlendirilmiştir. Diğer sıcaklıkları (60–105 °C) da ayrı değerlendirmeye almak daha yerinde yaklaşım olacaktır.

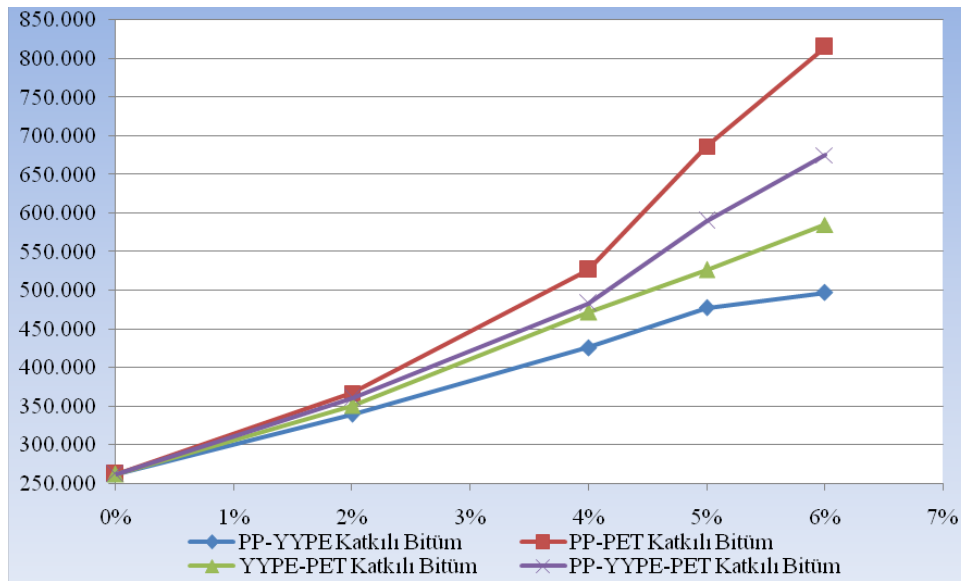
Esasen bağlayıcının hizmet koşullarındaki en yüksek sıcaklığının 60 °C olduğu düşüncesiyle, sadece 60 °C'deki viskoziteleri incelemek çok da hatalı olmaz. Çünkü yüksek sıcaklık performansı olarak, birçok BSK deneyinde bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklar çok tercih edilmez (bölüm 4.2.3'de bu husus belirtilmiştir). Fakat bitümün ısıyı absorbe etmesinden dolayı, ortam ısı 30 °C iken, kaplamanın birkaç cm. derinliğinde bağlayıcı ısı 70 °C'ye kadar çıkabilmektedir (Tunç, 2004). Bu bakımdan hizmetle ilgili süreçleri temsil düşüncesiyle, 75 °C'deki viskoziteleri de dikkate almak daha iyi olacaktır.

Ayrıca; katkıların viskoziteye etkileri incelendiğinde, 105 °C sonrasında iki katkının ön plana çıkmasından dolayı, 60–105 ve 120–165 °C sıcaklıklar şeklinde ayrı değerlendirme uygun olarak düşünülmüştür. Her bir sıcaklıktaki viskozite durumları sırasıyla aşağıda ifade edilmektedir.

Çizelge 4.16'da % 2, 4, 5 ve 6 oranlarında tüm katkılara ait 60 °C'deki viskozite değerleri verilmiş ve şekil 4.14'de grafiksel olarak da sonuçlar sunulmuştur.

Çizelge 4.16. Tüm bitümlerin 60 °C'deki viskozite değerleri (mPa.s)

Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP-YYPE	262,500.0	339,466.7	426,000.0	477,500.0	497,500.0
PP-PET	262,500.0	367,500.0	526,666.7	686,733.3	815,000.0
YYPE-PET	262,500.0	350,833.3	471,700.0	526,666.7	585,000.0
PP-YYPE-PET	262,500.0	361,100.0	483,333.3	590,000.0	675,266.7

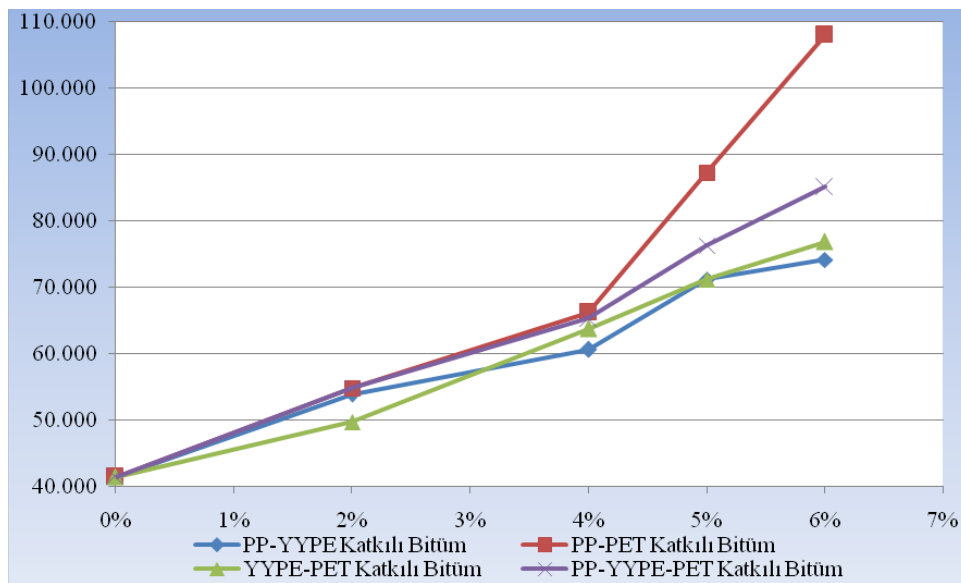


Şekil 4.14. Tüm katkılı bitümleri gösteren 60 °C'deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

Çizelge 4.16 ve şekil 4.14 incelendiğinde; bütün oranlarda geçerli olmak üzere, PP–PET katkısında en yüksek viskozitelerin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca; şekil ve çizelgede görüleceği gibi, viskozite değerleri % 2 oranlarında oldukça yakınken, oranlar arttıkça farklar çok daha belirginleşmektedir. Ayrıca; tüm oranlarda, PP–YYPE katkısının en düşük viskoziteye sahip olduğu da görülmüştür. Genel olarak, 60 °C’deki viskozitelerin yüksekten düşüğe doğru sırasıyla PP–PET, PP–YYPE–PET, YYPE–PET ve PP–YYPE olarak sıralandığı sonuçlarla görülmüştür.

Sonuç olarak; saf bitüme göre, katkılı bitümlerin yumuşama noktalarının artması ve penetrasyonlarının azalması ile bitümün kıvamının sertleşmesinden dolayı viskozite artışı beklenilmekteydi. Katkıların ortalama olarak yumuşama noktası sıcaklığını, 60 °C temsil ettiği için, tüm katkıları ve oranlarda viskozitelerin artması beklenen bir sonuçtur. Katkıların bitüm ve BSK üzerindeki etkilerini, çalışmanın ileri aşamasındaki deneylerle de incelemek amacıyla viskoziteyi en fazla artıran katkının seçilmesi uygun olacaktır. Fakat bir katkının seçilmesi, sadece saf bitümle kıyas imkanı sağlar ve katkıları kendi içinde değerlendirme olanağı tanımaz. Bu yüzden iki katkının seçilmesi daha uygun olarak değerlendirilmiştir. Buradan hareketle; 60 °C’de tüm katkıları ve oranlarda viskoziteler arttığı için, en uç olanların kıyaslanması yaklaşımıyla, viskoziteyi en fazla artıran PP–PET ve en az artıran PP–YYPE katkıların seçilmesi uygun görülmüştür.

Hizmet koşullarındaki durum açısından, 60 °C daha etkili olsa da, 75 °C’deki viskozitenin de önemli olduğu yukarıda belirtilmişti. Çizelge 4.17’de tüm katkılara ait 75 °C’deki viskozite değerleri verilmiş ve şekil 4.15’de grafiksel olarak da sunulmuştur.



Şekil 4.15. Tümü katkıli bitümleri gösteren 75 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

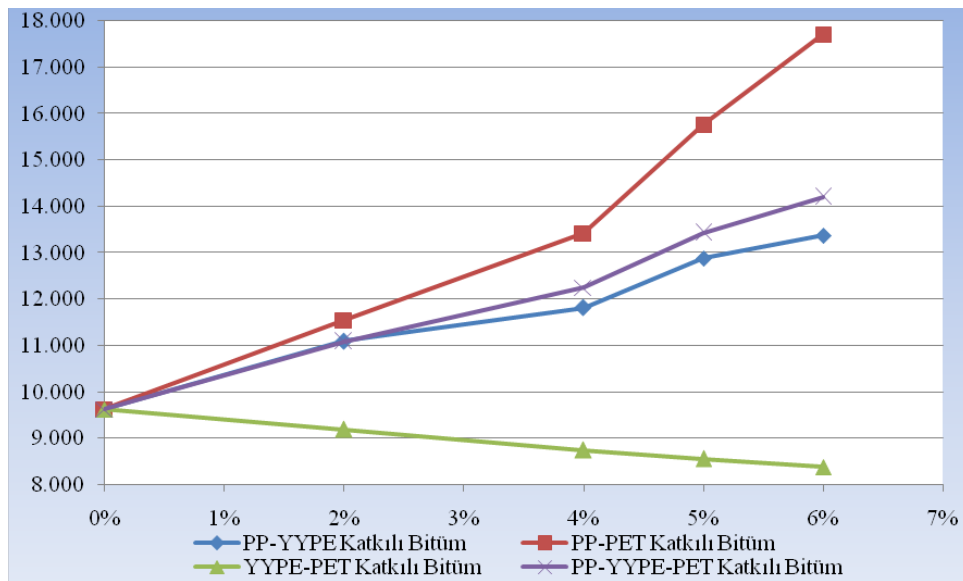
Çizelge 4.17. Tüm bitümlerin 75 °C'deki viskozite değerleri (mPa.s)

Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP-YYPE	41,430.0	53,890.0	60,686.7	71,253.3	74,170.0
PP-PET	41,430.0	54,833.3	66,190.0	87,330.0	108,066.7
YYPE-PET	41,430.0	49,720.0	63,753.3	71,253.3	76,880.0
PP-YYPE-PET	41,430.0	54,833.3	65,360.0	76,330.0	85,150.0

Çizelge 4.17 ve şekil 4.15 incelendiğinde, 60 °C'deki yüksekten düşüğe doğru olan viskozite değeri sırasının 75 °C için de geçerli olduğu tespit edilmiştir. Viskozite değerleri % 2 ve 4 oranlarında oldukça yakinken, katkı oranları arttıkça farkların daha belirginleştiği ve özellikle % 5 ve 6 oranlarında PP-PET'in diğerlerine göre çok daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca viskozite değerleri olarak; YYPE-PET katkısının biraz daha PP-YYPE katkısına yaklaştığı, % 2 oranında daha aşağı değere düştüğü, % 4 ve 6 oranlarında daha yüksek olduğu ve % 5 oranında ise iki katkının eşitlendiği tespit edilmiştir. Fakat genel olarak incelendiğinde, 60 °C'deki viskozite değerine göre yapılan sıralamanın değişmediği görülmüştür.

Çizelge 4.18. Tüm bitümlerin 90 °C'deki viskozite değerleri (mPa.s)

Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP-YYPE	9,630.0	11,096.7	11,820.0	12,880.0	13,376.7
PP-PET	9,630.0	11,546.7	13,426.7	15,770.0	17,710.0
YYPE-PET	9,630.0	9,196.0	8,750.0	8,562.3	8,387.0
PP-YYPE-PET	9,630.0	11,090.0	12,250.0	13,436.7	14,210.0



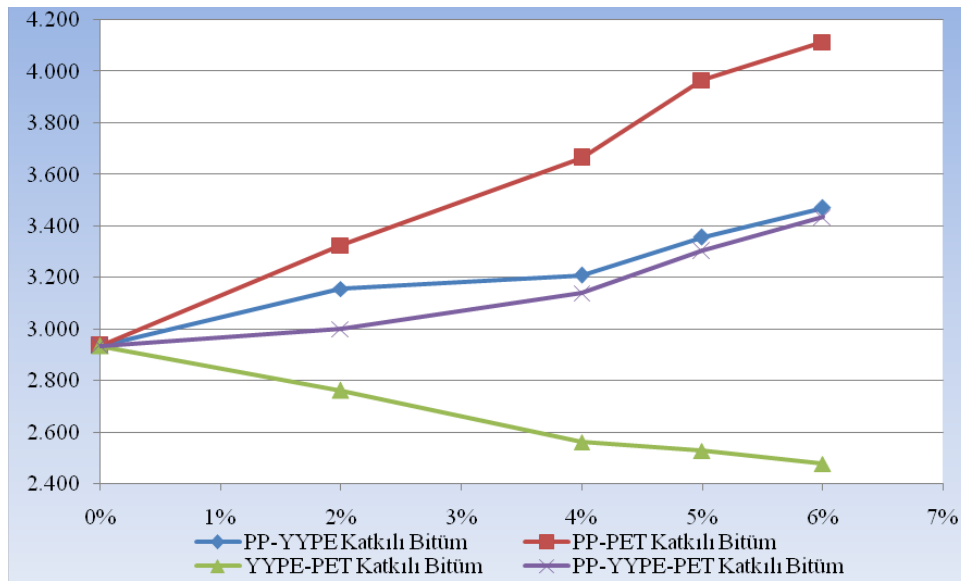
Şekil 4.16. Tüm katkılı bitümleri gösteren 90 °C'deki viskozite (mPa.s)-katkı oranı (%) grafiği

Çizelge 4.18’de tüm katkılara ait 90 °C’deki viskozite değerleri verilmiş ve şekil 4.16’da grafiksel olarak da sunulmuştur. Çizelge 4.18 ve şekil 4.16 incelendiğinde; 60 °C’de viskoziteyi en yüksek artıran PP–PET ile en az artıran PP–YYPE katkılarının seçilmesi fikrinin, 75 ve 90 °C sıcaklıklardaki sonuçlarla doğrulandığı görülmektedir. Bu sıcaklıkta da PP–YYPE katkısının, viskoziteyi artıran diğer iki katkıya göre daha düşük oranlarda kaldığı görülmektedir. Fakat viskozite değerleri olarak; PP–YYPE katkısının biraz daha PP–YYPE–PET katkısına yaklaştığı, % 2 oranında oldukça yakın olmakla birlikte viskozitenin daha yüksek değere çıktığı tespit edilmiş ve sıcaklık arttıkça iki katkının viskozite değerlerinin giderek birbirine yaklaştığı görülmüştür.

Çizelge 4.19’da tüm katkılara ait 105 °C’deki viskozite değerleri verilmiş, şekil 4.17’de grafiksel olarak da sunulmuştur. Bu sıcaklıktaki sonuçlar incelendiğinde; üçlü karışım katkısının etkisinin giderek azaldığı ve viskoziteyi artıranlar kıyasında en düşük seviyeli katkı olduğu görülmüştür. Fakat çizelge ve şekilden görüleceği gibi, sonuçların PP–YYPE katkısına yakın olduğu da tespit edilmiştir.

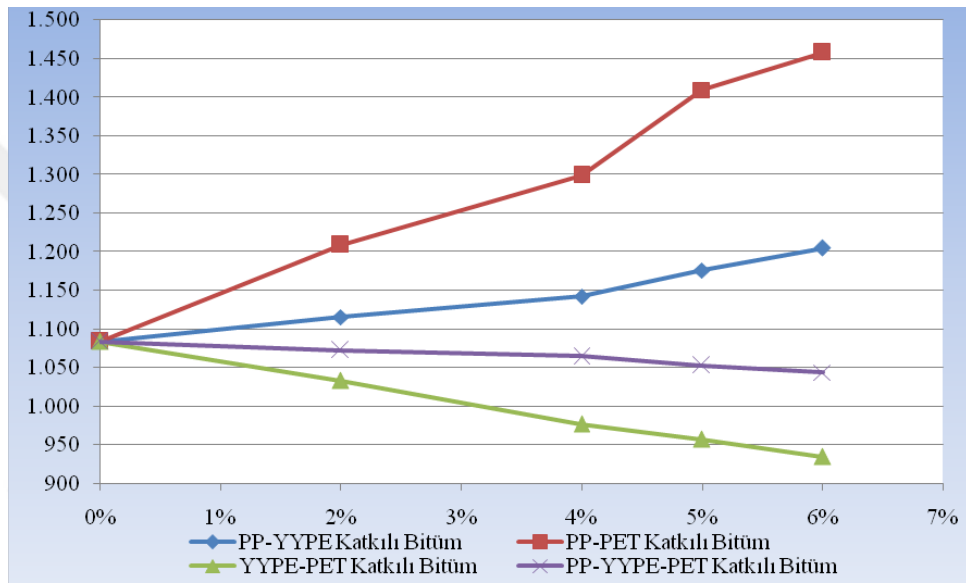
Çizelge 4.19. Tüm bitümlerin 105 °C’deki viskozite değerleri (mPa.s)

Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s)				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE	2,936.0	3,156.0	3,208.7	3,358.0	3,471.0
PP–PET	2,936.0	3,325.3	3,664.3	3,967.0	4,114.0
YYPE–PET	2,936.0	2,762.0	2,561.0	2,528.0	2,477.0
PP–YYPE–PET	2,936.0	3,000.0	3,140.3	3,303.3	3,435.0

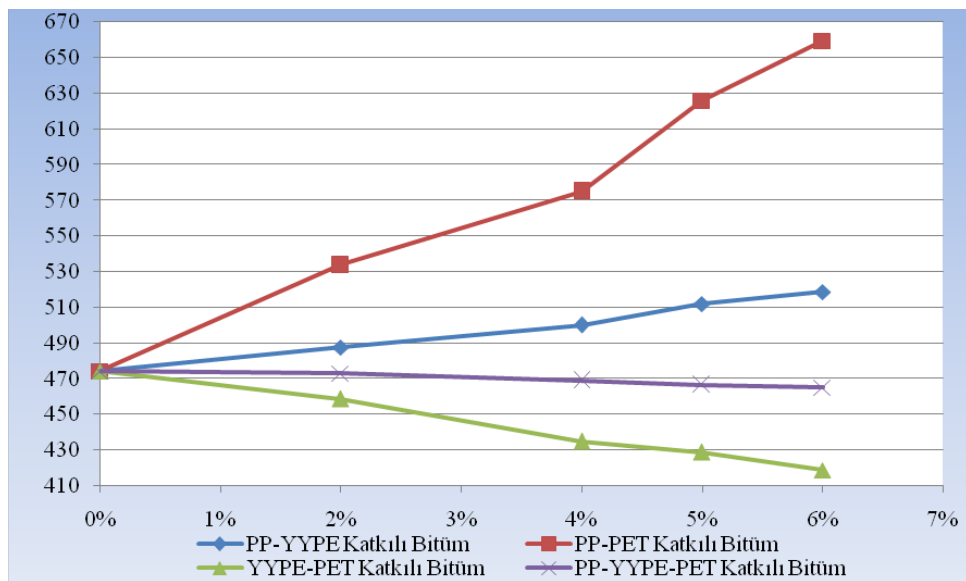


Şekil 4.17. Tüm katkılı bitümleri gösteren 105 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

Üst sıcaklıklarda (120–165 °C) saf bitüme göre sadece 2 katkının viskozitesinin arttığı, PP–YYPE–PET katkısının saf bitüme oldukça yakın olarak viskoziteyi azalttığı ve YYPE–PET katkısında 90 °C ile başlayan viskoziteyi azaltma durumunun devam ettiği sonuçlarla görülmektedir. Katkıları değerlendirme olarak, bu sıcaklıklar arası benzer nitelikler taşıdığı için; viskozite sonuçları toplu olarak çizelge 4.20’de verilmiş ve sırasıyla 120, 135, 150 ve 165 °C’deki sonuçlar şekil 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlardan görüleceği gibi, PP–PET katkılı bağlayıcıda 60 °C ile başlamak üzere tüm sıcaklıklarda en yüksek viskozite değerleri elde edilmiştir.



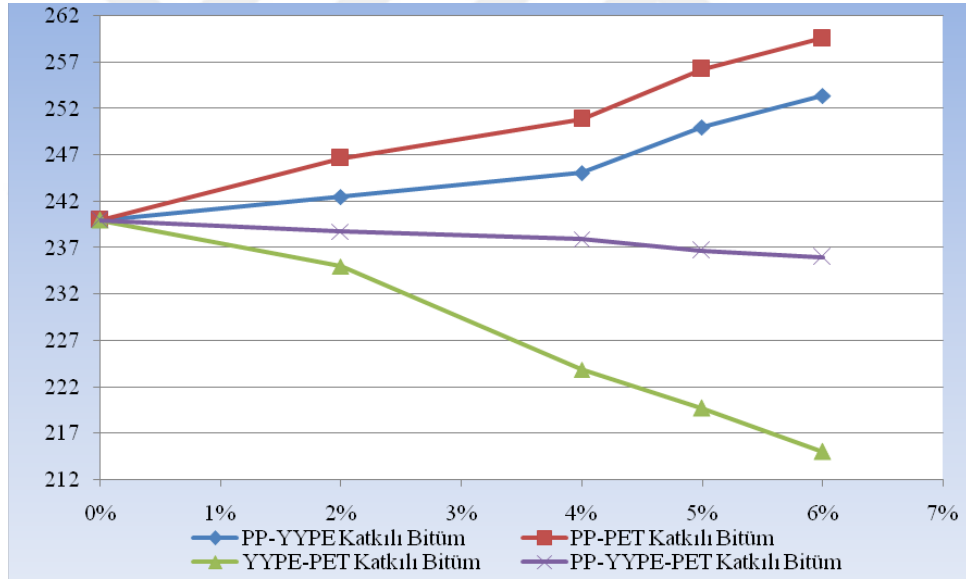
Şekil 4.18. Tüm katkıli bitümleri gösteren 120 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği



Şekil 4.19. Tüm katkıli bitümleri gösteren 135 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

Çizelge 4.20. Tüm bitümlerin 120–165 °C sıcaklıklarındaki viskozite değerleri (mPa.s)

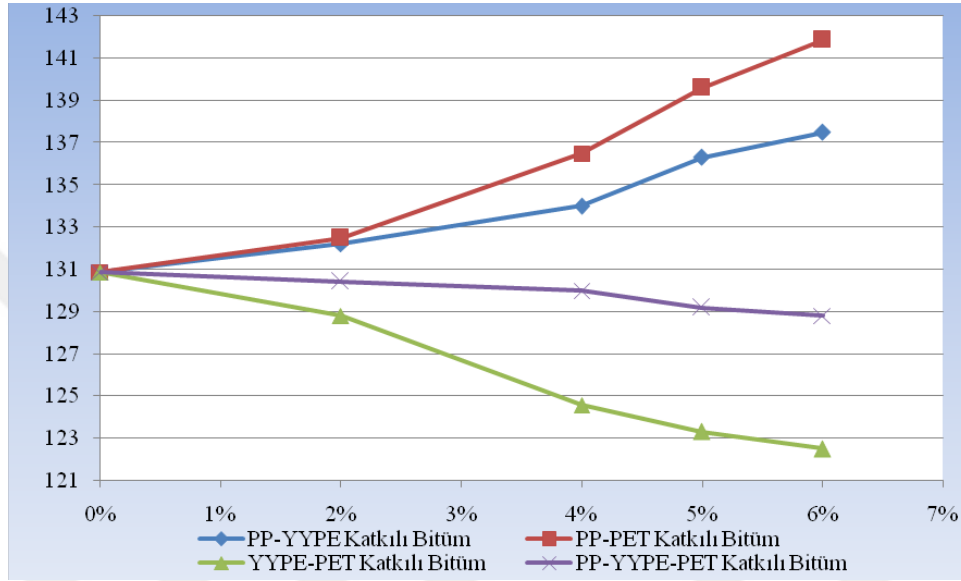
Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s) – 120 °C				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE	1,084.0	1,115.7	1,142.7	1,176.0	1,204.7
PP–PET	1,084.0	1,209.3	1,299.0	1,409.7	1,458.0
YYPE–PET	1,084.0	1,033.3	977.1	957.5	935.2
PP–YYPE–PET	1,084.0	1,073.0	1,064.7	1,053.3	1,044.0
Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s) – 135 °C				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE	474.2	487.5	500.0	512.1	518.8
PP–PET	474.2	533.8	575.0	625.9	659.5
YYPE–PET	474.2	458.8	435.0	428.8	418.8
PP–YYPE–PET	474.2	472.9	469.1	466.5	465.0
Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s) – 150 °C				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE	240.0	242.5	245.1	250.0	253.4
PP–PET	240.0	246.7	250.9	256.3	259.6
YYPE–PET	240.0	235.0	223.9	219.7	215.0
PP–YYPE–PET	240.0	238.8	237.9	236.7	236.0
Katkılı Bitüm	Viskozite Değerleri (cp = mPa.s) – 165 °C				
	Saf Bitüm	% 2 Katkılı	% 4 Katkılı	% 5 Katkılı	% 6 Katkılı
PP–YYPE	130.9	132.2	134.0	136.3	137.5
PP–PET	130.9	132.5	136.5	139.6	141.9
YYPE–PET	130.9	128.8	124.6	123.3	122.5
PP–YYPE–PET	130.9	130.4	130.0	129.2	128.8



Şekil 4.20. Tüm katkılı bitümleri gösteren 150 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

Yapılan RV deneyleri sonucunda; saf bitüme kıyasla, 60–165 °C aralığında her bir sıcaklıkta sunulan çizelge ve grafik değerleri ile tüm katkıların viskozite sonuçları irdelenmiştir. Özetle: viskozitenin tüm katkıları için artış gösterdiği 60 ile 75 °C, 3 katkı için artış gösterdiği 90 ile 105 °C ve sadece iki katkı için artış gösterdiği 120–165 °C olarak; viskozitede artış görülen durumlar genel şekliyle düşünüldüğünde, kıyaslamada en yüksek ve en düşük viskoziteye sahip olan katkıların sırasıyla PP–PET ve PP–YYPE katkıları olduğu görülmektedir. Viskozitede artış görülen katkıların değerlendirmesinde,

sadece 105 °C’de PP–YYPE–PET katkısında PP–YYPE’ye göre daha düşük viskozite değerleri görülmüş fakat iki katkı değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca; tüm sıcaklıklardaki durumlar incelendiğinde, 105 °C’deki sonucun genel tespiti değiştirmeyeceği rahatlıkla söylenebilir. Daha önce de belirtildiği gibi; viskozitelerin arttığı durumlarda, en uç olanların kıyaslanması yaklaşımıyla, bu iki katkının seçilmesi uygun olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.21. Tüm katkılı bitümleri gösteren 165 °C’deki viskozite (mPa.s)–katkı oranı (%) grafiği

Tüm bunların yanı sıra; yüksek sıcaklıklarda (150 ve 165 °C) saf bitüme yakın veya daha düşük viskozite sonuçları tüm katkılar olarak elde edildiği için, BSK üretimi olarak beklenen olumlu gelişmeler açısından katkılar benzer nitelik taşımaktadır. Dolayısıyla katkılarının sadece özellikle düşük sıcaklıklar (60 ve 75 °C) olmak üzere, viskozite artışı görülen durumlar şeklinde karşılaştırılması daha uygun olarak değerlendirilmiş ve özellikle, sadece, seçilen bu iki katkının tüm sıcaklıklarda viskoziteyi artırması oldukça dikkat çekici bir durum olarak nitelendirilmiştir.

Viskozite değerleri dışında, penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri (çizelge 4.13, şekil 4.12 ve 4.13) incelendiğinde; bu iki katkının ön plana çıktığı görülmektedir.

Piroliz katı ürün verimleri; Grup 1, 2, 3 ve 4 katkılar olarak sırasıyla % 56.04, % 51.23, % 40.28 ve % 50 şeklinde çizelge 4.1’de belirtilmişti. Katı ürün verimi açısından da, Grup 1 ve 2 katkılarının daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca; piroliz sürecinde bir tespit olarak, şu durum ifade edilebilir: Pirolizde PET içeriği arttıkça daha fazla gaz ürünün oluştuğu görülmüş ve bu durum ürün verimlerine yansımıştır.

Bununla birlikte; PP ve YYPE plastikleri poliolefin plastikleri olduğu için, bu plastik karışımında pirolizden elde edilen katı ürünlerde uyumlu bir nitelik tespit edilmiş, PET bileşenlerinin PP veya YYPE bileşenleri içerisinde daha uyumsuz yapı sergilediği görülmüştür. Buradan hareketle, PP–YYPE katkısı içerisinde bulunan 2 plastiğin uyumu ve bitümle karıştırılma aşamasında bu 2 plastiğin de erime sıcaklığına ulaşması nedeni ile katkının da kolayca erimesi gibi sebeplerden dolayı; PP–YYPE katkılı bitümlerin modifiye işlemleri, diğer katkılı bitümlere göre daha kolay olmuştur.

Sonuç olarak; piroliz ürün verimi ve bitüm modifikasyonu açısından en uygun katkının PP–YYPE olduğu, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile bitümün kıvamına yapılan etkiler bakımından sırasıyla PP–PET ve PP–YYPE katkılarının ön plana çıktığı ve RV deneyleriyle geniş bir şekilde incelemenin ardından bu iki katkının daha uygun seçilebilir nitelik taşıdığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla; RV deneyiyle tespit edilen bu 2 katkının seçilmesi fikri, diğer deneyler ve sonuçlarıyla kesinlik kazanmıştır.

4.3. Superpave Bitümlü Bağlayıcı Deneylerinin Sonuçları

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda seçilen PP–PET ve PP–YYPE katkıları ile hazırlanan % 2, 4, 5 ve 6 oranlarındaki modifiye ve saf bitümler olmak üzere 9 bitüm numunesinin, Superpave bağlayıcı deneyleri (RTFOT, PAV, DSR, BBR) Ankara KGM bünyesinde yapılmıştır. Bitümün kısa dönem (BSK'nın üretimi sırasında) ve uzun dönem (BSK'nın hizmet süresince) yaşlanmasını simüle eden sırasıyla RTFOT ve PAV deneyleriyle, her bir bitüm numunesi yaşlandırma koşullarına tabi tutulmuştur. Böylece, 9 farklı bitüm numunesine ait olarak orijinal (KGM'ye teslim edilen), RTFOT (kısa dönem yaşlanmış) ve RTFOT+PAV (uzun dönem yaşlanmış) olmak üzere, DSR ve BBR deneyleri için gerekli numuneler elde edilmiştir. DSR deneyi, orijinal, RTFOT ve RTFOT+PAV olmak üzere 9 bitümlü bağlayıcı numunesinin tüm gruplarına; BBR deneyi ise, sadece RTFOT+PAV grubuna uygulanmıştır.

4.3.1. Bitüm yaşlandırma deneylerinin sonuçları

Çizelge 4.21. RTFOT deneyi sonrası kütle kayıpları (%)

RTFOT Deneyi Sonrası Kütle Kaybı (%)							
Saf	PP–YYPE Katkılı				PP–PET Katkılı		
50/70	% 2	% 4	% 5	% 6	% 2	% 4	% 5
0.031	0.009	0.014	0.026	0.040	0.011	0.017	0.027

Saf ve katkılı bitümlerin RTFOT deneyi sonrası kütle kayıpları çizelge 4.21’de verilmiştir. Kütle kaybı % (yüzde) olarak, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$\text{Kütle kaybı (\%)} = 100 \times \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (4.2)$$

M_1 ve M_2 = Sırasıyla, RTFOT deneyi öncesi ve sonrasındaki numune kütlesi (gr.)

Bitümlerin performans sınıfının (PG) tanımlandığı ASTM D6373 standardında; bitümlere uygulanan RTFOT deneyi sonrasında kütle kaybı sınır değeri, % 1.0 olarak belirtilmiştir. Çizelge 4.21’de görüleceği gibi, tüm bitümlü bağlayıcıların kütle kaybı değerleri ilgili şartları sağlamaktadır. Kütle kaybı tespitinden sonra; uygulanacak diğer superpave deneyleri için her bir cam (deney) numune kabı içindeki yaşlandırılmış (kısa dönem) numuneler, uygun bir toplama kabına aktarılmıştır.

Kütle değişimi PAV deneyinin bir parçası değildir ve anlamlı değildir. Çünkü bitüm, uygulanan basınç sonucu havayı emer ve yaşlanma ile uçabilecek kütle, basınçla birlikte emilen hava ile bitüm içinde hapsolunur (ASTM D6521, 2018). Dolayısıyla, yapılan PAV işlemi sonrasında sayısal anlamda deneysel bir veri elde edilmez. 9 farklı bitüm numunesine 100 °C’de PAV deneyleri uygulanmış, DSR ve BBR deneylerinde kullanılmak üzere uzun dönem yaşlandırılmış numuneler elde edilmiştir.

4.3.2. Dinamik kesme reometre (DSR) deney sonuçları

Saf ve katkılı bitümler olarak 9 farklı bağlayıcının orijinal, RTFOT sonrası ve RTFOT+PAV sonrası numunelerine (toplam 27) DSR deneyi uygulanmıştır.

Deneyler sonrasında; orijinal ve RTFOT sonrası numuneler için tekerlek izi direncini ifade eden “ $G^*/\sin\delta$ ” ve RTFOT+PAV sonrası numuneler için yorulma direncini ifade eden “ $G^*.\sin\delta$ ”, kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) değerleri elde edilmiştir. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki yenilme sıcaklığı, “ $G^*/\sin\delta$ ” değeri; orta sıcaklıktaki yorulma sıcaklığı ise, “ $G^*.\sin\delta$ ” değeri ile belirlenir.

DSR deneyine başlarken, bağlayıcının PG sınıfına uygun olan deney sıcaklığı seçilir. Birden fazla sıcaklıkta deney yapılacaksa; orijinal ve RTFOT sonrası numuneler (25 mm plaka) için en düşük ve RTFOT+PAV sonrası numuneler (8 mm plaka) için en yüksek deney sıcaklığında deneye başlanır (ASTM D7175, 2015). Bu sebeple, her numunede deneyin uygulandığı sıcaklık farklılık arz etmektedir.

Sıcaklıkların düşükten yükseğe doğru ilerlediği orijinal ve RTFOT sonrası numuneler olarak: saf (50/70) bitümde 64 ve 70 °C; katkıli bitümlerde ise, katkı cinsi, oranı ve orijinal veya RTFOT sonrası olma durumuna göre değişmekle birlikte 70, 76, 82 ve 88 °C sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. % 2 ve 4 katkıli bitümlerde 70, 76 ve nadiren 82 °C; % 5 ve 6 katkıli bitümlerde 76, 82 ve nadiren 88 °C sıcaklıklarda deneyler uygulanmıştır.

DSR deneyleri incelendiğinde; orijinal ve RTFOT sonrası olmak üzere saf ve katkıli bitümlerde deneylerin uygulandığı ortak sıcaklık, 70 °C olarak tespit edilmiştir. Fakat % 5 ve 6 katkıli bitümlerde deneylerin uygulanması, 76 °C sıcaklıkla başlamıştır. Böylece, saf ve katkıli bitümler olarak deney sonuçlarının karşılaştırılması sadece % 2 ve 4 katkıli bitümler için geçerlidir. Ayrıca, 76 °C sıcaklıkta saf bitüm dışındaki diğer tüm numunelerde deneyler uygulanmıştır. Bu yüzden; katkıli bitümlerin sonuçlarının karşılaştırılması olarak, 76 °C ortak bir sıcaklık niteliği taşımaktadır. Bunların dışında, 64, 82 ve 88 °C sıcaklıklardaki DSR sonuçları; farklı numuneleri kıyaslama niteliğinden ziyade, PG sınıfından dolayı ilgili numuneye uygulanan deney niteliği taşımaktadır.

Sıcaklıkların yüksekte düşüşe doğru değiştiği RTFOT+PAV sonrası numuneler olarak ise; tüm numunelerde 25 °C, ilaveten saf, PP–PET ve PP–YYPE katkıli bitümler için sırasıyla 22, 22 ve 28 °C sıcaklıklarda deneyler uygulanmıştır. Böylelikle, PP–PET katkıli bitümler ile saf bitümün kıyaslanması olarak 22 ve 25 °C sıcaklıklar; PP–YYPE katkıli bitümler ile saf bitümün kıyaslanması olarak 25 °C sıcaklık dikkate alınmıştır.

4.3.2.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkıli bitümlerin DSR deneyi sonuçları

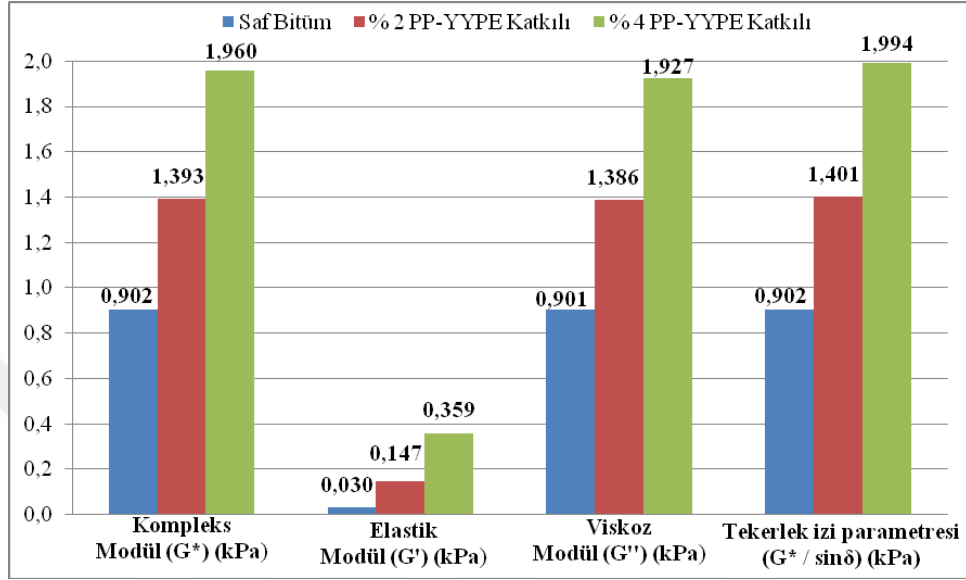
Saf ve % 2, 4 “PP–YYPE” katkıli orijinal ve RTFOT sonrası bitümler olarak, 70 °C sıcaklığındaki DSR sonuçları sırasıyla çizelge 4.22 ve 4.23’de verilmiştir. Kompleks kayma (G^*), elastik (G') ve viskoz (G'') modüller ile tekerlek izi parametre ($G^*/\sin\delta$) değerleri (kPa cinsinden), orijinal ve RTFOT sonrası için sırasıyla şekil 4.22 ve 4.23’de sunulmuş ve faz açıları (δ) ile yenilme sıcaklıkları (°C) şekil 4.24’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.22. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP–YYPE katkıli “orijinal” bitümlerin DSR sonuçları

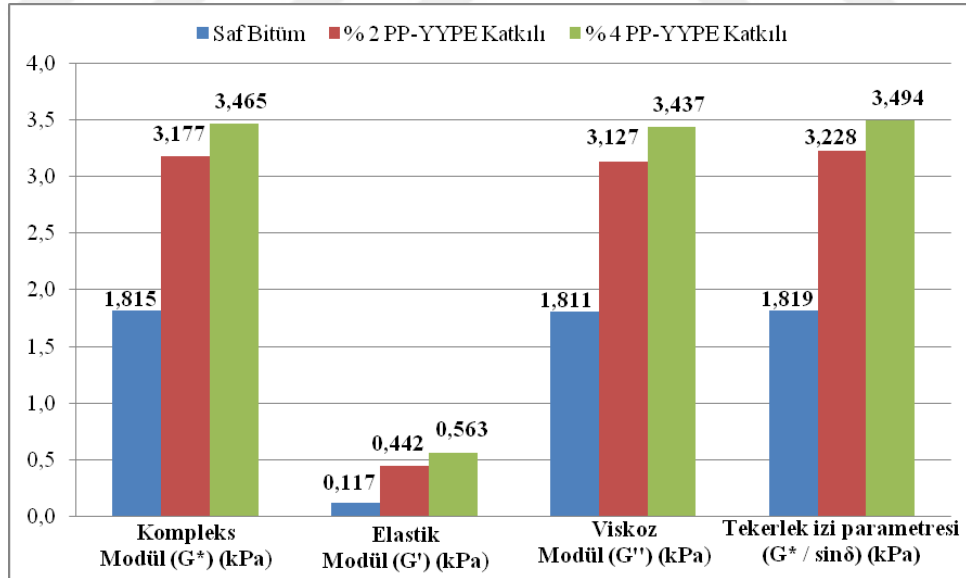
70 °C (Orijinal)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	88.07	0.902	0.030	0.901	0.902	69.2
% 2 PP–YYPE	83.96	1.393	0.147	1.386	1.401	73.8
% 4 PP–YYPE	79.44	1.960	0.359	1.927	1.994	78.5

Çizelge 4.23. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

70 °C (RTFOT)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	86.30	1.815	0.117	1.811	1.819	68.5
% 2 PP-YYPE	82.68	3.177	0.442	3.127	3.228	71.3
% 4 PP-YYPE	79.79	3.465	0.563	3.437	3.494	74.3



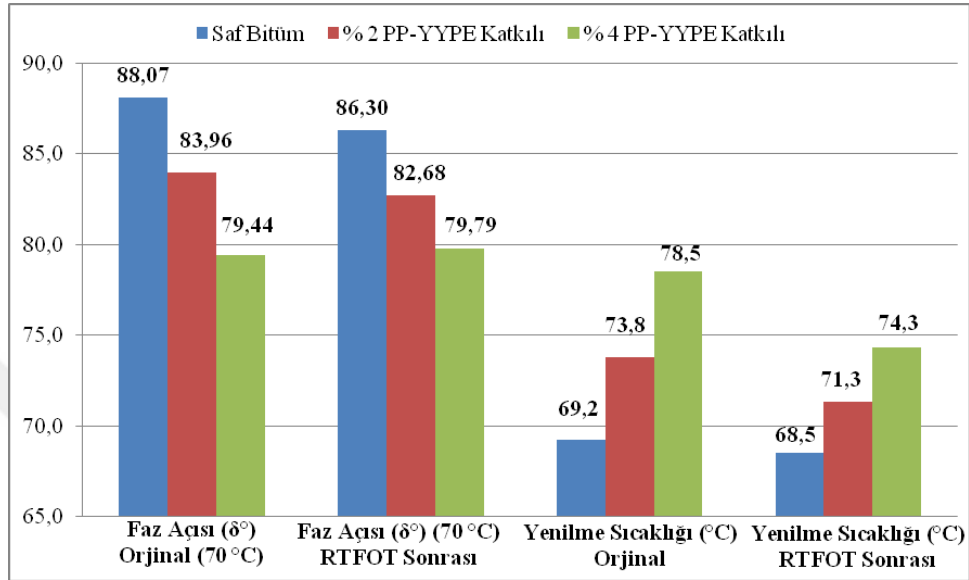
Şekil 4.22. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP-YYPE katkılı “orijinal” bitümlerin DSR deneyi sonuçları



Şekil 4.23. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP-YYPE katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

Çizelge 4.22 ile şekil 4.22 (orijinal bitümler için) ve çizelge 4.23 ile şekil 4.23 (RTFOT sonrası bitümler için) incelendiğinde; G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerlerinin saf bitüme göre, katkılı bitümlerde oldukça arttığı ve bu artışın katkı oranı ile devam ettiği görülmektedir. Öyle ki; saf bitüme kıyasla % 4 katkılı bitümde (orijinal) bu değerler, iki

katından daha yüksek bir değer şeklinde (çizelge 4.22 ve şekil 4.22) tespit edilmiştir. Aynı şekilde; RTFOT sonrası için (çizelge 4.23 ve şekil 4.23) de, bu kıyaslanmanın 2 katına yaklaştığı görülmektedir. G^* değerlerindeki artışla ilişkili olarak; saf bitüme göre, katkılı bitümlerin G' ve G'' değerleri de benzer niteliklerde artışlar göstermiştir.



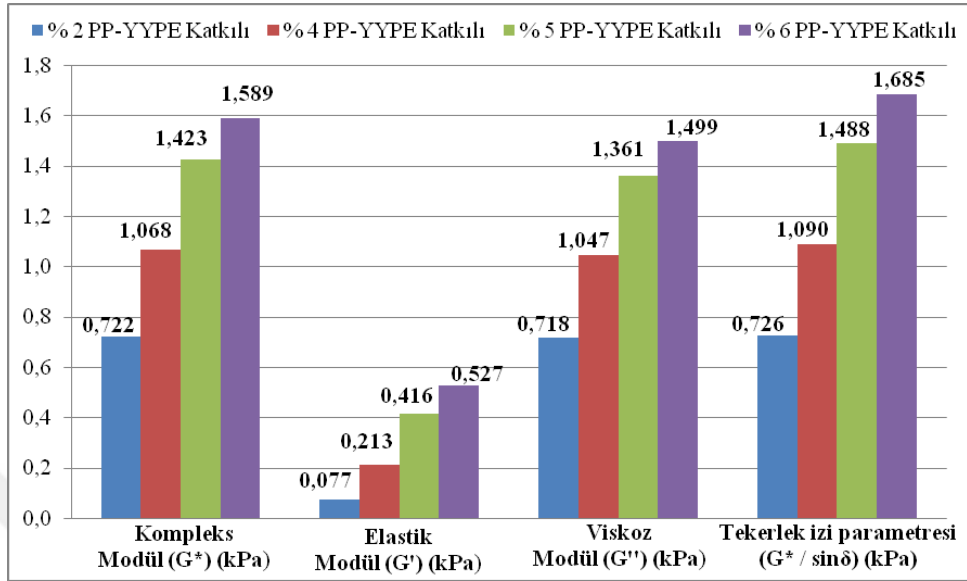
Şekil 4.24. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 katkılı bitümlerin faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C)

Genel olarak; deney parametrelerinde elde edilen artışlarla, bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki davranışına ve dolaylı olarak BSK'nın tekerlek izi direncine PP-YYPE katkısının oldukça olumlu etkiler yaptığı tespit edilmiştir. Bu durum, RV deneyi ile elde edilen sonuçları da teyit etmektedir.

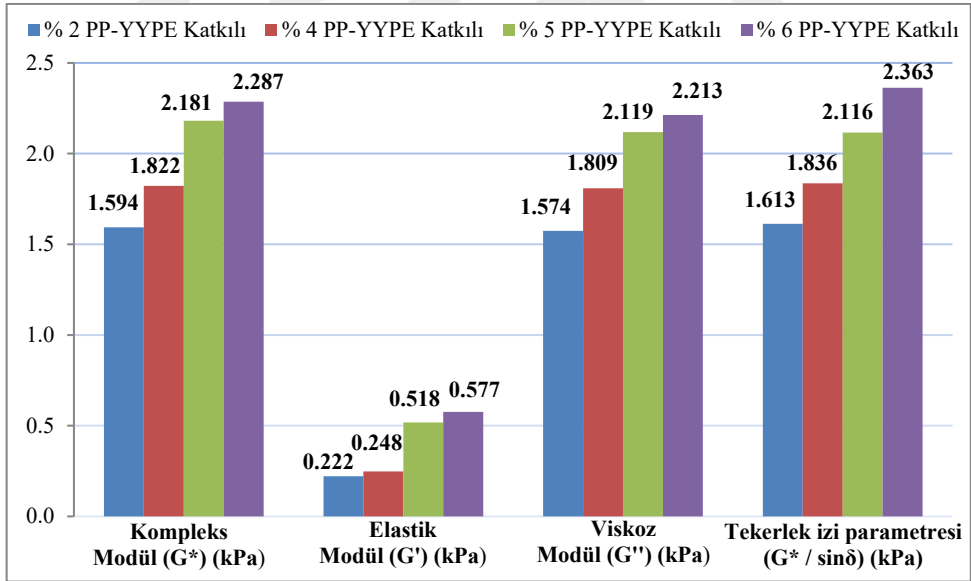
Çizelge 4.22 ve 4.23 ile şekil 4.24 incelendiğinde; saf bitüme göre, hem orijinal hem de RTFOT sonrası bitümlerde δ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, katkının bitümün elastikliğine de olumlu etkiler yaptığını göstermektedir. Ayrıca şekil ve çizelgelerde görüleceği gibi; orijinal ve RTFOT sonrası saf bitümün $G^*/\sin\delta$ değeri, sırasıyla “0.902<1.0 kPa” ve “1.819<2.2 kPa” şeklindedir ve buradan yola çıkarak, saf bitümün yenilme sıcaklığının sırasıyla “69.2” ve “68.5” olarak 70 °C’den düşük olduğu da görülmektedir. Hem RTFOT sonrası hem de orijinal % 2 ve 4 katkılı bitümlerde tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$) olarak şartname kriterleri sağlandığından dolayı, katkılı bitümlerin yenilme sıcaklıklarının 70 °C’den yüksek olduğu da görülmektedir.

Saf bitüm dışında, katkılı bitümlerin hepsinde 76 °C’de deneyler uygulanmıştır. Orijinal ve RTFOT sonrası olarak bu sıcaklıktaki DSR sonuçları, sırasıyla çizelge 4.24

ve 4.25’de sunulmuştur. Ayrıca; G^* , G' , G'' ve $G^*/\sin\delta$ değerleri grafiksel olarak şekil 4.25 ve 4.26’da, faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları da şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP-YYPE katkıli “orijinal” bitümlerin DSR deneyi sonuçları



Şekil 4.26. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP-YYPE katkıli “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

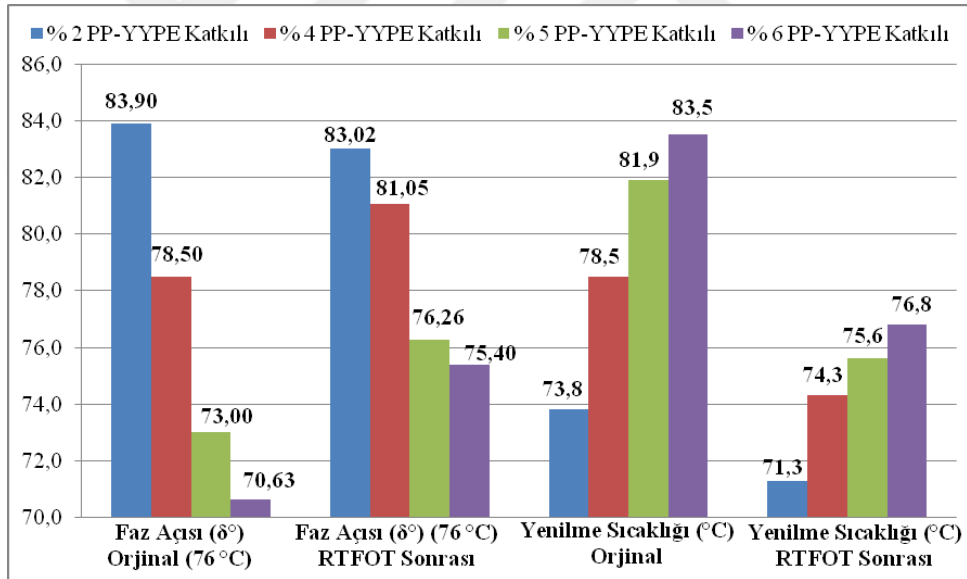
Çizelge 4.24. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP-YYPE katkıli “orijinal” bitümlerin DSR sonuçları

76 °C (Orijinal)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
% 2 PP-YYPE	83.90	0.722	0.077	0.718	0.726	73.8
% 4 PP-YYPE	78.50	1.068	0.213	1.047	1.090	78.5
% 5 PP-YYPE	73.00	1.424	0.416	1.361	1.489	81.9
% 6 PP-YYPE	70.63	1.589	0.527	1.499	1.685	83.5

Çizelge 4.25. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

76 °C (RTFOT)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
% 2 PP-YYPE	83.02	1.594	0.222	1.574	1.613	71.3
% 4 PP-YYPE	81.05	1.822	0.248	1.809	1.836	74.3
% 5 PP-YYPE	76.26	2.181	0.518	2.119	2.116	75.6
% 6 PP-YYPE	75.40	2.287	0.577	2.213	2.363	76.8

Çizelge 4.24 ile şekil 4.25 (orijinal bitümler için) ve çizelge 4.25 ile şekil 4.26 (RTFOT sonrası bitümler için) incelendiğinde; G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerlerinin, bitüme ilave edilen katkı miktarı ile arttığı ve artış yüzdesinin % 5 katkı oranında diğerlerine göre daha fazla olduğu (grafik görüntüsünden) görülmektedir. G^* değerlerindeki artışla ilişkili olarak; katkılı bitümlerin G' ve G'' değerleri benzer nitelikte artışlar göstermiştir. 70 °C’deki deney sonuçlarıyla tespit edilen bitümün yüksek sıcaklıktaki davranışına ve BSK’nın tekerlek izi direncine PP-YYPE katkısının olumlu etkisinin katkı ilavesi ile de artarak devam ettiği, 76 °C’deki deney sonuçlarıyla görülmüştür.



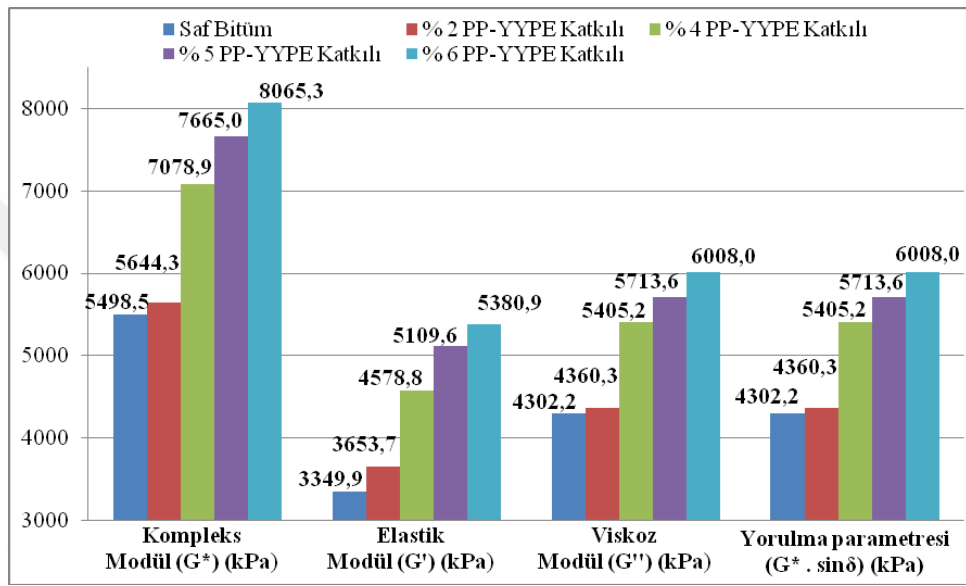
Şekil 4.27. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 katkılı bitümlerin faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C)

Çizelge 4.24 ve 4.25 ile şekil 4.27 incelendiğinde; orijinal ve RTFOT sonrası bitümlerde δ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Böylece, katkının bitümün elastikliğine yaptığı etkinin de katkı miktarı ile artarak devam ettiği görülmektedir.

Şekil ve çizelgelerden görüleceği gibi; orijinal bitümlerde, % 2 katkılı bitümün “ $G^*/\sin\delta$ ” değeri 1.0 kPa’dan küçük (0.726) olarak ve RTFOT sonrası bitümlerde, % 2, 4 ve 5 katkılı bitümlerin “ $G^*/\sin\delta$ ” değerleri 2.2 kPa’dan küçük (sırasıyla 1.613, 1.816

ve 2.116) olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bu bitümlerin yenilme sıcaklıklarının da dolaylı olarak 76 °C'den düşük olduğu görülmektedir. RTFOT sonrası (% 6 katkılı) ve orijinal (% 4, 5 ve 6 katkılı) diğer bitümler için $G^*/\sin\delta$ kriterleri sağlandığından dolayı, bu bitümlerin yenilme sıcaklıklarının 76 °C'den yüksek olduğu görülmektedir.

Saf ile % 2, 4, 5 ve 6 “PP-YYPE” katkılı RTFOT+PAV sonrası (uzun dönem yaşlandırılmış) bitümlerin, 25 °C deney sıcaklığında elde edilen DSR sonuçları çizelge 4.26’da verilmiş ve sonuçlar, şekil 4.28 ve 4.29’da grafiksel olarak da sunulmuştur.

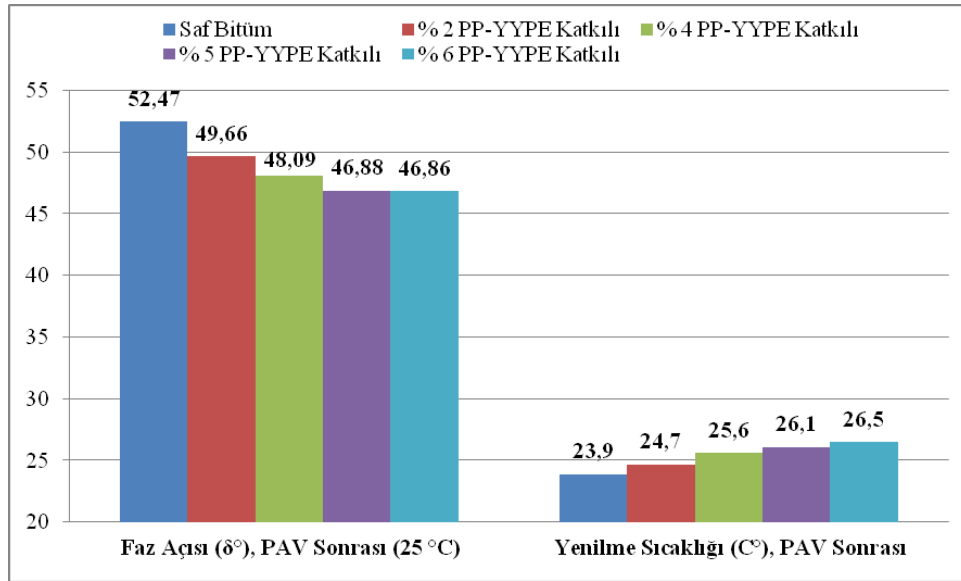


Şekil 4.28. 25 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR deneyi sonuçları

Çizelge 4.26. 25 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR sonuçları

25 °C (RTFOT+PAV)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*.\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	52.47	5498.5	3349.9	4302.2	4302.2	23.9
% 2 PP-YYPE	49.66	5644.3	3653.7	4360.3	4360.3	24.7
% 4 PP-YYPE	48.09	7078.9	4578.8	5405.2	5405.2	25.6
% 5 PP-YYPE	46.88	7665.0	5109.6	5713.6	5713.6	26.1
% 6 PP-YYPE	46.86	8065.3	5380.9	6008.0	6008.0	26.5

Çizelge 4.26 ve 4.28 incelendiğinde; katkılı bitümlerde, saf bitüme kıyasla G^* , G' , G'' ve $G^*.\sin\delta$ değerlerinin arttığı görülmektedir. Numunelerin orijinal ve RTFOT sonrası sonuçlarıyla da, parametre değerleri artmıştı. Yani; bu durumlar esasen saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerin sertliğinin arttığını ve tekerlek izine daha dirençli olduğunu gösterir. Fakat 5,000 kPa ile sınırlandırılan “ $G^*.\sin\delta$ ” değerinin azalması, bitümün yorulma olarak daha dirençli olduğunu gösterir. Dolayısıyla; katkılı bitümlerde $G^*.\sin\delta$ değerinin artması, yorulma davranışı açısından olumsuz bir nitelik taşımaktadır.



Şekil 4.29. 25 °C sıcaklıkta “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C)

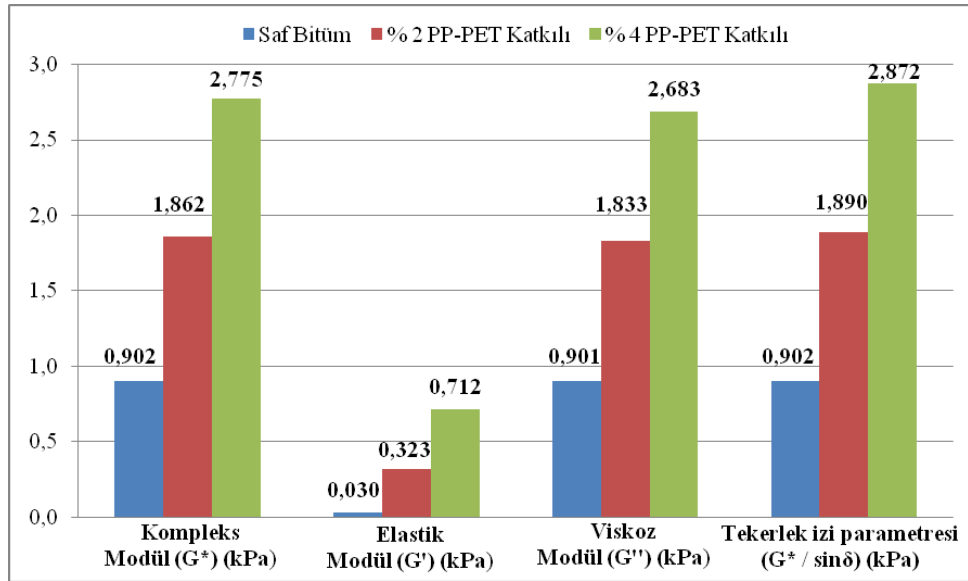
Genel olarak sonuçlar incelendiğinde: $G^* \cdot \sin \delta$ değerleri olarak, saf ve katkılı bitümler arasındaki yüzde değişimlerin (şekil 4.28); $G^* / \sin \delta$ değerleri olarak, orijinal (şekil 4.22) ve RTFOT sonrası (şekil 4.23) saf ve katkılı bitümler arasındaki yüzde değişimlere göre çok daha az olduğu görülmektedir. Böylece, bitümlerin yüksek sıcaklıktaki yenilme sıcaklıkları arasındaki farkların oldukça arttığı (şekil 4.24) ve bu farkların orta sıcaklık olarak çok daha azaldığı (şekil 4.29) da görülmektedir.

Şekil 4.28 ve çizelge 4.26’da görüleceği gibi; $G^* \cdot \sin \delta$ değeri saf ve % 2 katkılı bitümde 5,000 kPa değerinden küçük, tersi olarak diğer (% 4, 5 ve 6) bitümlerde büyüktür. Dolayısıyla, bitümlerin yenilme sıcaklıkları (şekil 4.29) da bu duruma göre 25 °C’den büyük ve küçük olarak şekillenmektedir.

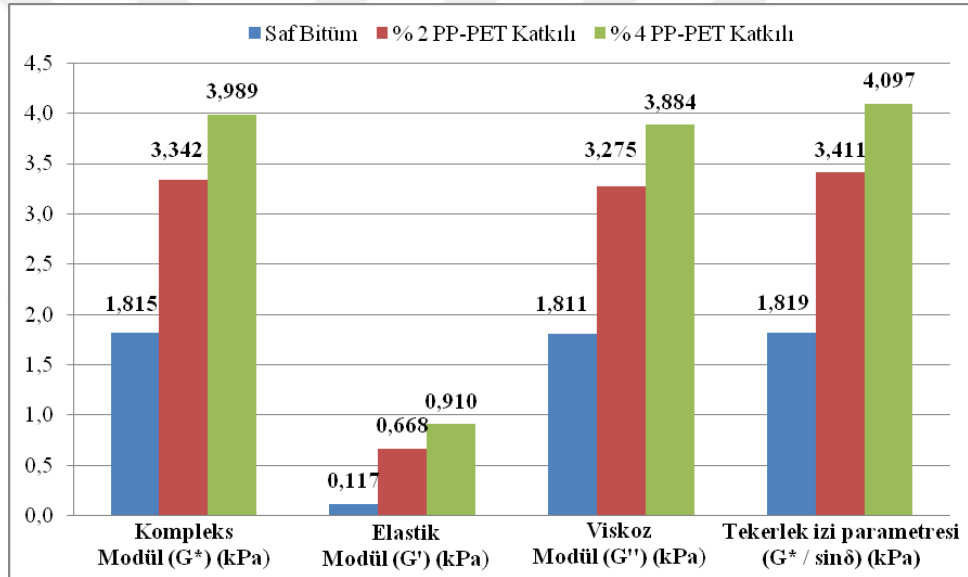
Sonuç olarak; katkılı bitümlerde yüksek sıcaklıklarda yenilme sıcaklıklarının artması daha fazla tekerlek izi direnci olarak yorumlanırken, aksine orta sıcaklıklarda yenilme sıcaklıklarının artması yorulmaya karşı daha az direnç anlamına gelmektedir.

4.3.2.2. Grup 2 (PP–PET) katkılı bitümlerin DSR deneyi sonuçları

Saf ve % 2, 4 “PP–PET” katkılı orijinal ve RTFOT sonrası bitümler olarak, 70 °C sıcaklığındaki DSR sonuçları sırasıyla çizelge 4.27 ve 4.28’de verilmiştir. Kompleks kayma (G^*), elastik (G') ve viskoz (G'') modüller ile tekerlek izi parametre ($G^* / \sin \delta$) değerleri (kPa cinsinden), orijinal ve RTFOT sonrası için sırasıyla şekil 4.30 ve 4.31’de sunulmuş ve faz açıları (δ) ile yenilme sıcaklıkları (°C) şekil 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil 4.30. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP-PET katkılı “orijinal” bitümlerin DSR deneyi sonuçları



Şekil 4.31. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP-PET katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

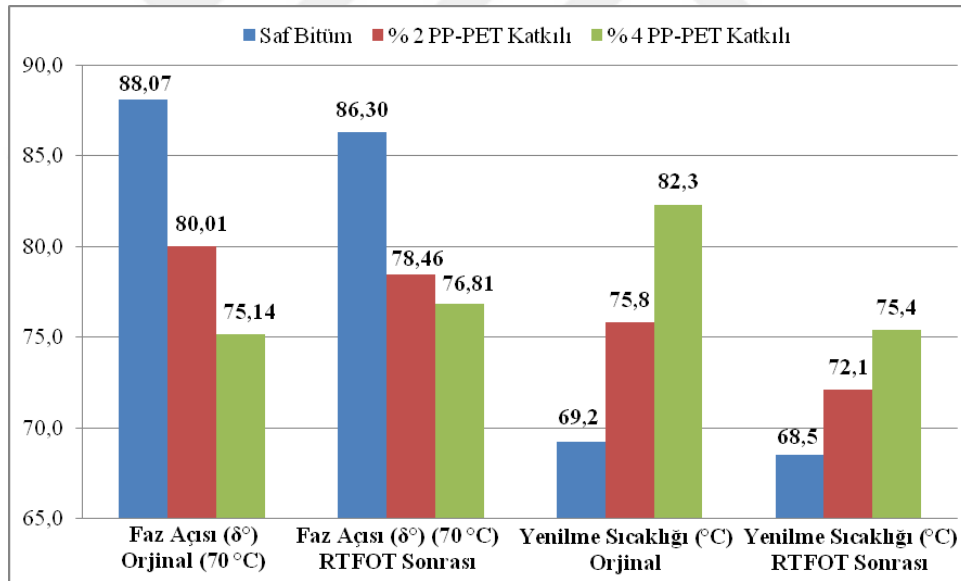
Çizelge 4.27. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 PP-PET katkılı “orijinal” bitümlerin DSR sonuçları

70 °C (Orijinal)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	G*/sinδ	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	88.07	0.902	0.030	0.901	0.902	69.2
% 2 PP-PET	80.01	1.862	0.323	1.833	1.890	75.8
% 4 PP-PET	75.14	2.775	0.712	2.683	2.872	82.3

Çizelge 4.28. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

70 °C (RTFOT)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	G*/sinδ	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	86.30	1.815	0.117	1.811	1.819	68.5
% 2 PP-PET	78.46	3.342	0.668	3.275	3.411	72.1
% 4 PP-PET	76.81	3.989	0.910	3.884	4.097	75.4

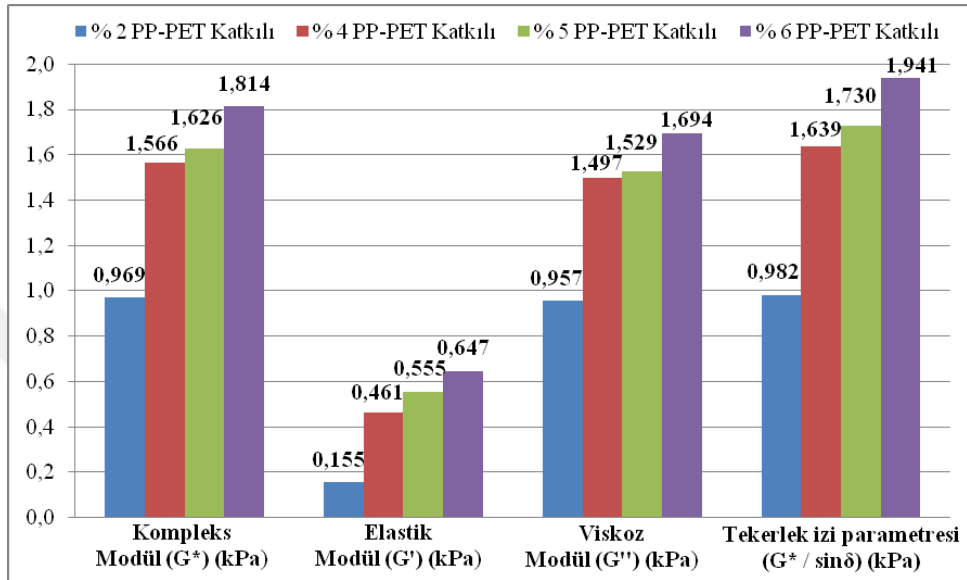
Çizelge 4.27 ile şekil 4.30 (orijinal bitümler için) ve çizelge 4.28 ile şekil 4.31 (RTFOT sonrası bitümler için) incelendiğinde; G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerlerinin saf bitüme göre, katkıli bitümlerde oldukça arttığı ve bu artışın katkı oranı ile devam ettiği görülmektedir. Öyle ki; saf bitüme kıyasla % 4 katkıli bitümde (orijinal) bu değerler, üç katından daha yüksek bir değer şeklinde (çizelge 4.27 ve şekil 4.30) tespit edilmiştir. Aynı şekilde; RTFOT sonrası için (çizelge 4.28 ve şekil 4.31) de, bu kıyaslamanın 2 katı aştığı görülmektedir. G^* değerlerindeki artışla ilişkili olarak; saf bitüme göre, katkıli bitümlerin G' ve G'' değerleri de benzer niteliklerde artışlar göstermiştir. Genel olarak; deney parametrelerinde elde edilen artışlarla, bitümün yüksek sıcaklıktaki davranışı ve dolaylı olarak BSK'nın tekerlek izi direnci olarak PP-YYPE katkısında olduğu gibi, PP-PET katkısının da oldukça olumlu etkiler yaptığı fakat PP-PET katkısının çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle, RV deneyi ile elde edilen sonuçlar da teyit edilmiştir. Nitekim PP-PET katkısının daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu, RV sonuçları bölümünde (4.2.3.2) açıklanmıştır.



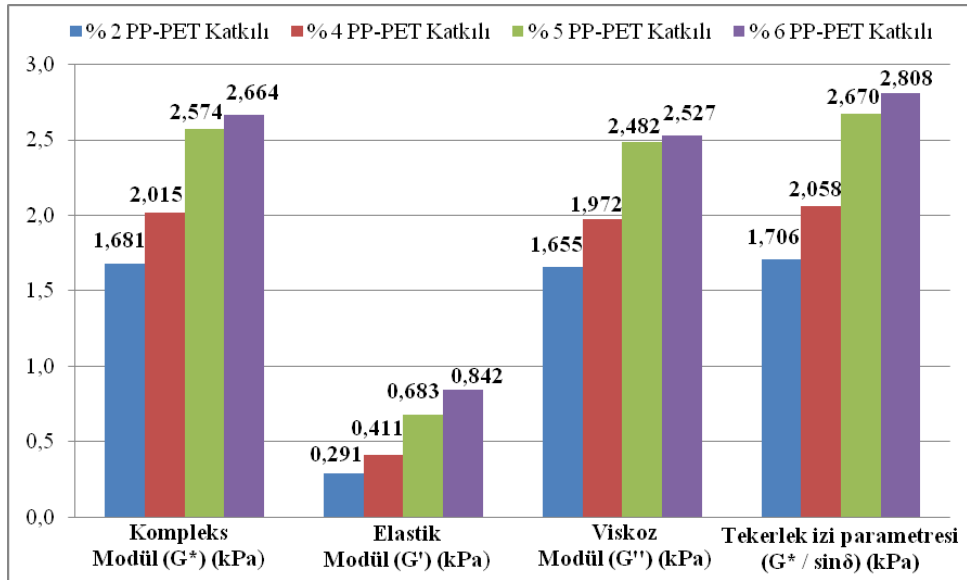
Şekil 4.32. 70 °C sıcaklıkta saf ve % 2, 4 katkıli bitümlerin faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C)

Çizelge 4.27 ve 4.28 ile şekil 4.32 incelendiğinde; saf bitüme göre, hem orijinal hem de RTFOT sonrası bitümlerde δ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, katkının bitümün elastikliğine de olumlu etkiler yaptığını göstermektedir. Ayrıca, hem RTFOT sonrası hem de orijinal % 2 ve 4 katkıli bitümlerde ($G^*/\sin\delta$) olarak şartname kriterleri sağlandığından dolayı, katkıli bitümlü bağlayıcıların yenilme sıcaklıklarının 70 °C'den yüksek olduğu da görülmektedir.

Saf bitüm dışında, % 2, 4, 5 ve 6 katkılı bitümlerin hepsinde 76 °C’de deneyler uygulanmıştır. Orijinal ve RTFOT sonrası olarak bu sıcaklıktaki DSR deneyi sonuçları, sırasıyla çizelge 4.29 ve 4.30’da sunulmuştur. Ayrıca; G^* , G' , G'' ve $G^*/\sin\delta$ değerleri grafiksel olarak şekil 4.33 ve 4.34’de, 76 °C sıcaklıktaki faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C) da şekil 4.35’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP–PET katkılı “orijinal” bitümlerin DSR deneyi sonuçları



Şekil 4.34. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP–PET katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

Çizelge 4.29 ile şekil 4.33 (orijinal bitümler için) ve çizelge 4.30 ile şekil 4.34 (RTFOT sonrası bitümler için) incelendiğinde; G^* ve $G^*/\sin\delta$ değerlerinin, bitüme ilave edilen katkı miktarı ile arttığı ve artış yüzdesinin (RTFOT sonrası bitümlerde) % 5 katkı

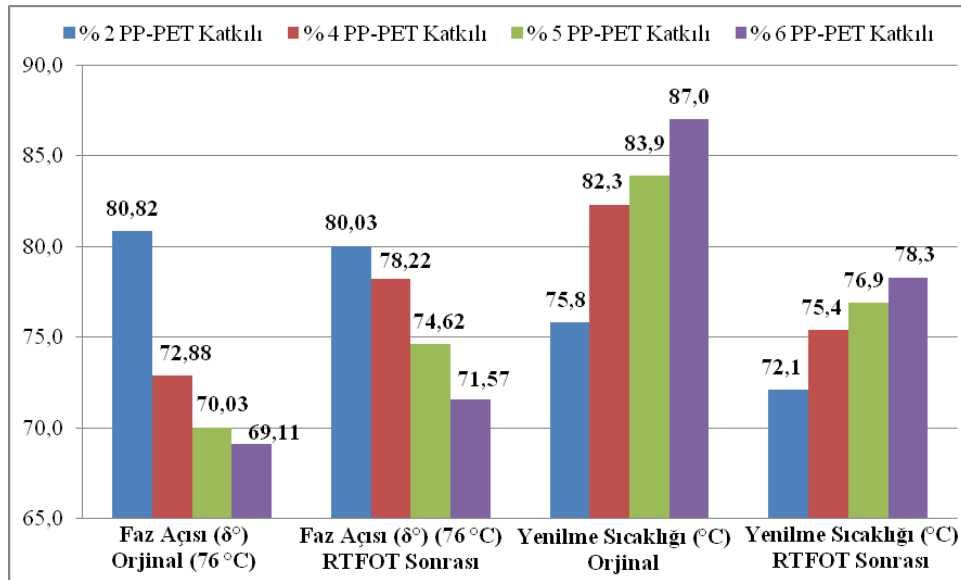
oranında diğerlerine göre daha fazla olduğu (grafik görüntüsünden) görülmektedir. G^* değerlerindeki artışla ilişkili olarak; katkılı bitümlerin G' ve G'' değerleri de benzer nitelikte artışlar göstermiştir. 70 °C'deki deney sonuçları ile tespit edilen bağlayıcının yüksek sıcaklıktaki davranışına ve BSK'nın tekerlek izi direncine PP-PET katkısının olumlu etkisinin katkı ilavesi ile de artarak devam ettiği, 76 °C'deki deney sonuçlarıyla görülmüştür.

Çizelge 4.29. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 PP-PET katkılı “orijinal” bitümlerin DSR sonuçları

76 °C (Orijinal)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
% 2 PP-PET	80.82	0.969	0.155	0.957	0.982	75.8
% 4 PP-PET	72.88	1.566	0.461	1.497	1.639	82.3
% 5 PP-PET	70.03	1.626	0.555	1.529	1.730	83.9
% 6 PP-PET	69.11	1.814	0.647	1.694	1.941	87.0

Çizelge 4.30. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin DSR sonuçları

76 °C (RTFOT)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*/\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
% 2 PP-PET	80.03	1.681	0.291	1.655	1.706	72.1
% 4 PP-PET	78.22	2.015	0.411	1.972	2.058	75.4
% 5 PP-PET	74.62	2.574	0.683	2.482	2.670	76.9
% 6 PP-PET	71.57	2.664	0.842	2.527	2.808	78.3

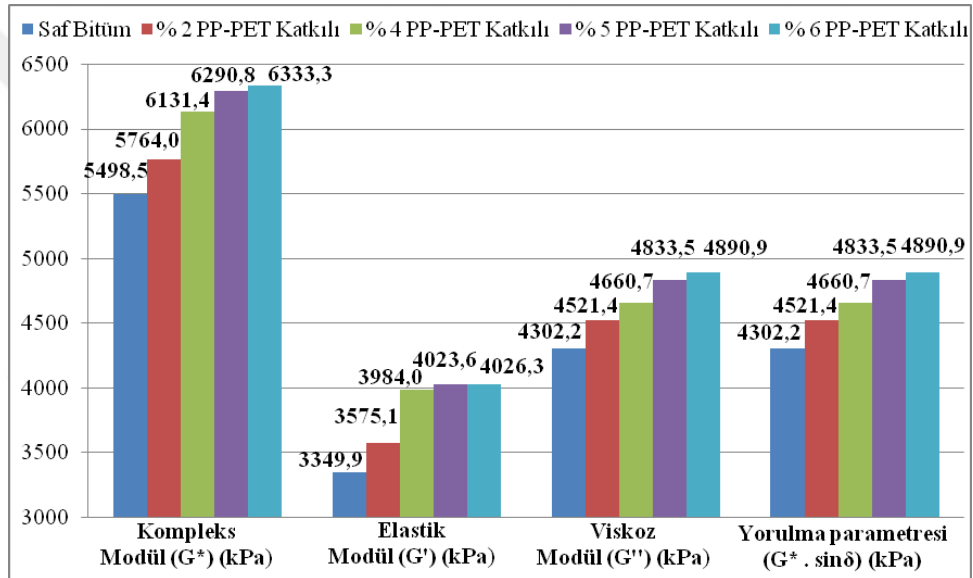


Şekil 4.35. 76 °C sıcaklıkta % 2, 4, 5 ve 6 katkılı bitümlerin faz açıları (δ) ve yenilme sıcaklıkları (°C)

Çizelge 4.29 ve 4.30 ile şekil 4.35 incelendiğinde; orijinal ve RTFOT sonrası bitümlerde δ değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Böylece, katkının bitümün elastikliğine yaptığı etkinin de katkı miktarı ile artarak devam ettiği görülmektedir.

Şekil ve çizelgelerden görüleceği gibi; orijinal bitümlerde, % 2 katkılı bitümün “ $G^*/\sin\delta$ ” değeri 1.0 kPa’dan küçük (0.982) olarak ve RTFOT sonrası bitümlerde, % 2 ve 4 katkılı bitümlerin “ $G^*/\sin\delta$ ” değerleri 2.2 kPa’dan küçük (sırasıyla 1.706 ve 2.058) olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bu bitümlerin yenilme sıcaklıklarının da dolaylı olarak 76 °C’den düşük olduğu görülmektedir. RTFOT sonrası (% 5 ve 6 katkılı) ve orijinal (% 4, 5 ve 6 katkılı) diğer bitümler için $G^*/\sin\delta$ kriterleri sağlandığından dolayı, bu bitümlerin yenilme sıcaklıklarının 76 °C’den yüksek olduğu görülmektedir.

Saf ve PP–PET katkılı RTFOT+PAV sonrası bitümlerin; 25 ve 22 °C’lerde elde edilen sonuçları çizelge 4.31 ve 4.32’de verilmiş, şekil 4.36 ve 4.37’de sonuçlar grafik olarak sunulmuş ve faz açıları ile yenilme sıcaklıkları şekil 4.38’de gösterilmiştir.



Şekil 4.36. 25 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR deneyi sonuçları

Çizelge 4.31. 25 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR sonuçları

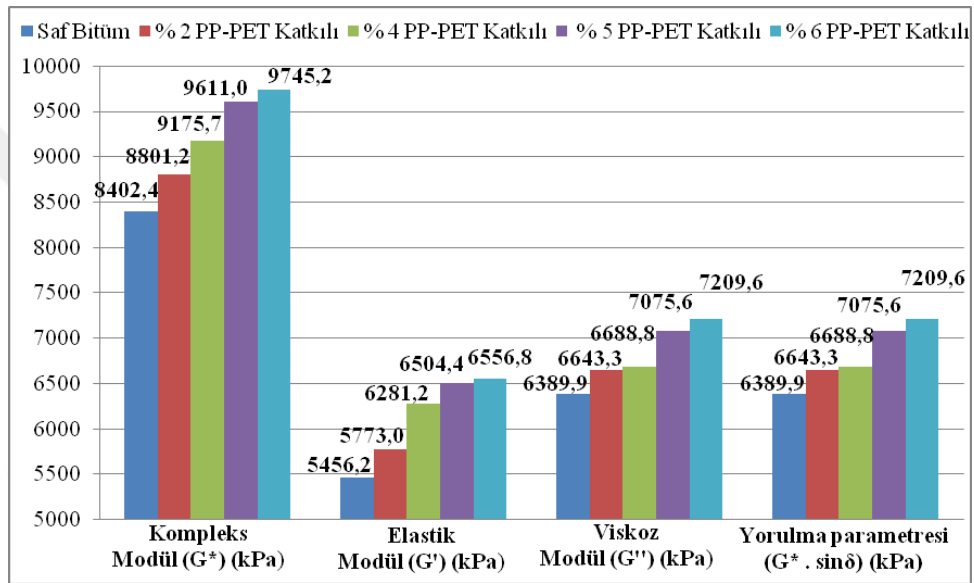
25 °C (RTFOT+PAV)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^*.\sin\delta$	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	52.47	5498.5	3349.9	4302.2	4302.2	23.9
% 2 PP–PET	51.67	5764.0	3575.1	4521.4	4521.4	24.2
% 4 PP–PET	50.56	6131.4	3984.0	4660.7	4660.7	24.4
% 5 PP–PET	50.21	6290.8	4023.6	4833.5	4833.5	24.7
% 6 PP–PET	49.48	6333.3	4026.3	4890.9	4890.9	24.8

Çizelge 4.31 ile şekil 4.36 ve çizelge 4.32 ile şekil 4.37 incelendiğinde; saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerde G^* , G' , G'' ve $G^*.\sin\delta$ değerlerinin arttığı ve her iki sıcaklıkta da sonuçların saf bitüme oldukça yakın olduğu görülmektedir. PP–YYPE katkısında olduğu gibi PP–PET katkısında da, “ $G^*.\sin\delta$ ” değerlerinin artması yorulma

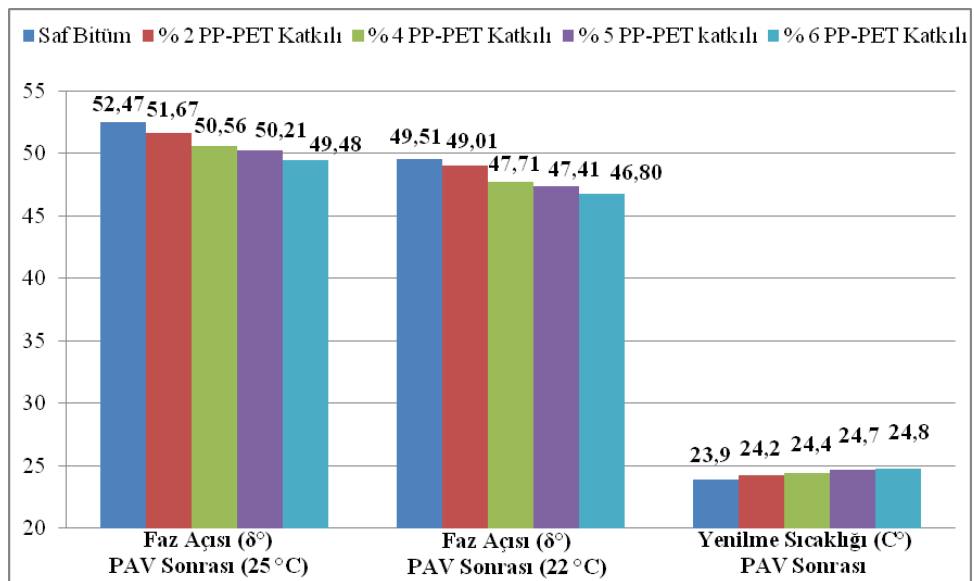
davranışı açısından olumsuz nitelik taşımaktadır fakat saf bitümle değerlerin yakınlığı ve katkı ilavesi ile artışların azlığı PP-PET katkısının daha iyi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.32. 22 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR sonuçları

25 °C (RTFOT+PAV)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G^*)	Elastik Modül (G')	Viskoz Modül (G'')	$G^* \cdot \sin \delta$	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	49.51	8402.4	5456.2	6389.9	6389.9	23.9
% 2 PP-PET	49.01	8801.2	5773.0	6643.3	6643.3	24.2
% 4 PP-PET	47.71	9175.7	6281.2	6688.8	6688.8	24.4
% 5 PP-PET	47.41	9611.0	6504.4	7075.6	7075.6	24.7
% 6 PP-PET	46.80	9745.2	6556.8	7209.6	7209.6	24.8



Şekil 4.37. 22 °C sıcaklıkta saf ve tüm katkılı “RTFOT+PAV” sonrası bitümlerin DSR deneyi sonuçları



Şekil 4.38. 25 ve 22 °C sıcaklıklarda RTFOT+PAV sonrası bitümlerin faz açıları ve yenilme sıcaklıkları

Sonuçlar incelendiğinde: $G^* \cdot \sin \delta$ değeri olarak, saf ve katkılı bitümler arasındaki yüzde değişimlerin (şekil 4.36 ve 4.37); $G^*/\sin \delta$ değerleri olarak, orijinal (şekil 4.30) ve RTFOT sonrası (şekil 4.31) saf ile katkılı bitümler arasındaki yüzde değişimlere göre kıyaslanamayacak kadar düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, yüksek sıcaklıklarda bitümlerin yenilme sıcaklıkları arasındaki farkların çok daha belirgin olduğu (şekil 4.32) ve orta sıcaklıklar olarak yenilme sıcaklıklarının çok yakın şekilde, tüm bitümler için 25 °C’den az olduğu (şekil 4.38) görülmektedir.

Şekil ve çizelgelerden görüleceği gibi; $G^* \cdot \sin \delta$ değeri tüm bitümlerde, 25 °C sıcaklıkta 5,000 kPa değerinden küçük ve tersine 22 °C sıcaklıkta büyüktür. Dolayısıyla, bitümlerin yenilme sıcaklıkları da bu duruma göre 22–25 °C arasına düşmektedir.

4.3.3. Kiriş eğilme reometre (BBR) deney sonuçları

Katkılı ve saf olarak 9 farklı bağlayıcının RTFOT+PAV sonrası numunelerine BBR deneyi uygulanmıştır. Düşük sıcaklıktaki davranışı belirlemek için, RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış deney numuneleri kullanılır. Deneyler sonunda sünme sertliği (S) ve sünme oranı (m) değerleri elde edilmiştir. Bitümün termal çatlak oluşumuna karşı direncini ölçmeye yönelik olduğundan, deney negatif sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

BBR deneyinde, DSR deneyine benzer şekilde, bağlayıcının sınıfına uygun deney sıcaklığı ile başlanarak şartname değerlerinin sağlanabildiği son sıcaklığa kadar deney süreçleri devam ettirilmiştir. Böylece, saf ve katkılı tüm numunelerde –6, –12 ve –18 °C sıcaklıklarda BBR deneyi yapılmıştır.

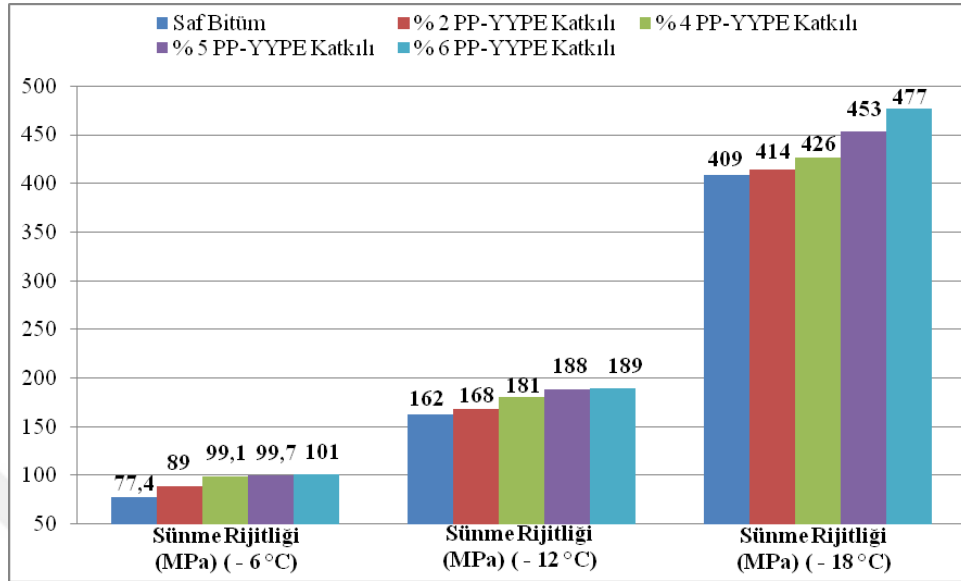
4.3.3.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkılı bitümlerin BBR deneyi sonuçları

Çizelge 4.33. Saf ve “PP–YYPE” katkılı bitümlerin –6, –12 ve –18 °C’deki BBR sonuçları

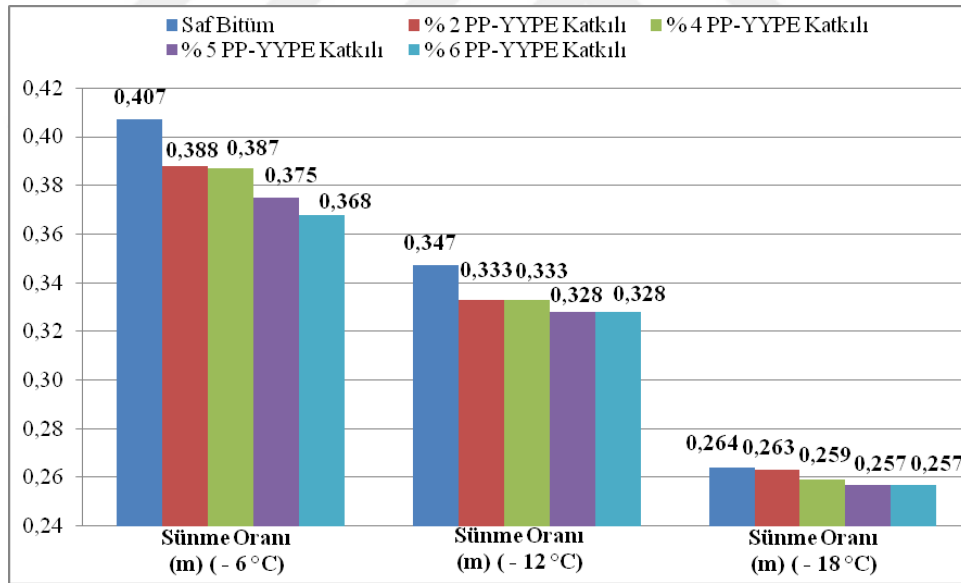
Bitüm Cinsi	Sünme Rijitliği (S) (MPa)			Sünme Oranı (m değeri)			PG Sınıfı
	–6 °C	–12 °C	–18 °C	–6 °C	–12 °C	–18 °C	
SAF (50/70)	77.4	162	409	0.407	0.347	0.264	–22
% 2 PP–YYPE	89	168	414	0.388	0.333	0.263	–22
% 4 PP–YYPE	99.1	181	426	0.387	0.333	0.259	–22
% 5 PP–YYPE	99.7	188	453	0.375	0.328	0.257	–22
% 6 PP–YYPE	101	189	477	0.368	0.328	0.257	–22

Saf ile % 2, 4, 5 ve 6 “PP–YYPE” katkılı RTFOT+PAV sonrası bitümler olarak, –6, –12 ve –18 °C deney sıcaklıklarındaki BBR sonuçları çizelge 4.33’de verilmiştir.

Deney sıcaklıklarındaki sünme rijitliği (S – MPa) ve sünme oranı (m) değerleri sırasıyla şekil 4.39 ve 4.40’da grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.39. Saf ve “PP-YYPE” katkılı bitümlerin –6, –12 ve –18 °C’deki sünme rijitliği (S – MPa)



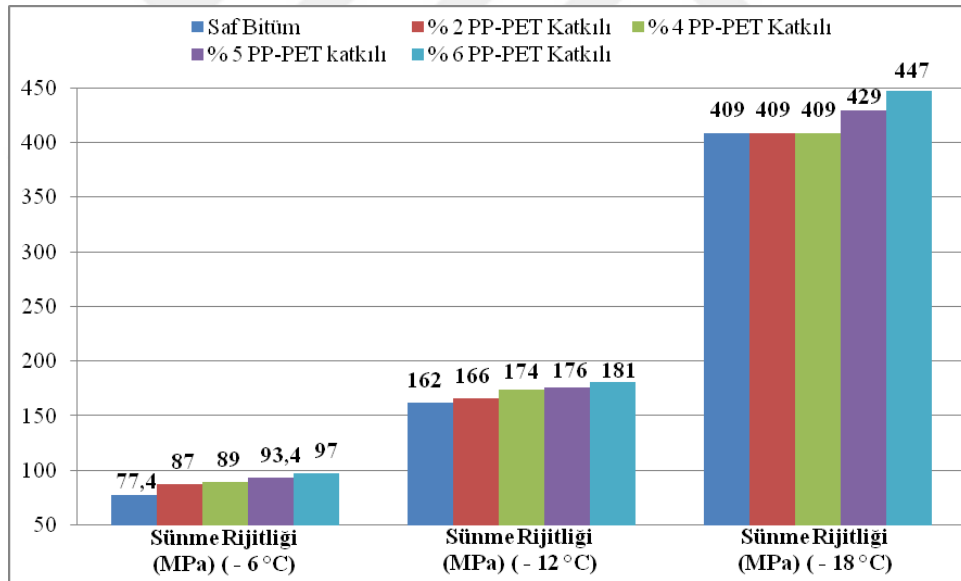
Şekil 4.40. Saf ve “PP-YYPE” katkılı bitümlerin –6, –12 ve –18 °C’deki sünme oranı (m değeri)

Çizelge 4.33 ve şekil 4.39 incelendiğinde; saf bitüme kıyasla, her 3 sıcaklık için de, katkılı bitümlerde sünme rijitliği değerlerinin arttığı görülmektedir. Bazı oranlarda değerler birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, katkı ilavesiyle artışların devam ettiği de görülmektedir. Çizelge 4.33 ve şekil 4.40 incelendiğinde; saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerde “S” değerlerindeki sonuçlara benzer şekilde, sünme oranı (m) değerlerinin

azaldığı da görülmektedir. Yani; saf bitüme göre kıyas ve katkı ilavesi olarak, S ve m değerlerinin benzer niteliklerde arttığı veya azaldığı deney sonuçlarıyla tespit edilmiştir.

“S” değerinin artması ve dolaylı olarak “m” değerinin azalması, bağlayıcının yük altında daha gevrek bir davranış göstereceği ve bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha hassas olacağı anlamına gelmektedir. Bu sebeple; BSK’nın düşük sıcaklık çatlaklarına karşı PP-YYPE katkısının olumsuz etki oluşturacağı, deney sonuçlarıyla tespit edilmiştir fakat yüksek sıcaklıklardaki bu katkının yaptığı etkinin yanında bu dikkate alınmayacak kadar düşük seviyelerde kalmaktadır. Çünkü katkı düşük sıcaklık direnci olarak olumsuz nitelik taşısa da, “S” ve “m” değerleri şartname kriterlerini sağlamakta ve düşük sıcaklık PG sınıfının değişmediği görülmektedir. Saf ve katkılı tüm bitümler için geçerli olmak üzere, “ $S \leq 300$ MPa” ve “ $m \geq 0.3$ ” kriterlerinin -6 ve -12 °C’de sağlandığı fakat -18 °C’de sağlanmadığı sonuçlarla tespit edilmiştir.

4.3.3.2. Grup 2 (PP-PET) katkılı bitümlerin BBR deneyi sonuçları

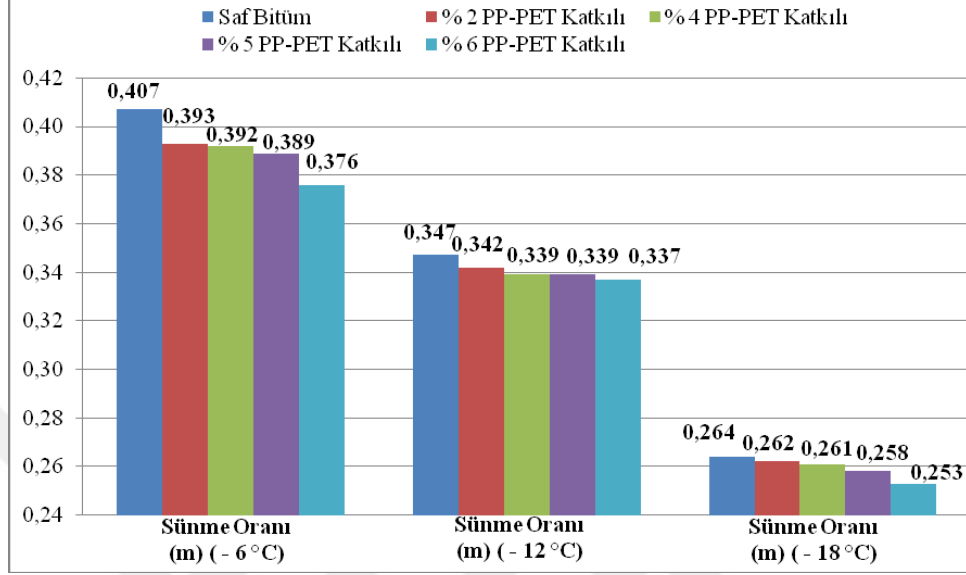


Şekil 4.41. Saf ve “PP-PET” katkılı bitümlerin -6 , -12 ve -18 °C’deki sünme rijitliği (S – MPa)

Çizelge 4.34. Saf ve “PP-PET” katkılı bitümlerin -6 , -12 ve -18 °C’deki BBR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sünme Rijitliği (S) (MPa)			Sünme Oranı (m değeri)			PG Sınıfı
	-6 °C	-12 °C	-18 °C	-6 °C	-12 °C	-18 °C	
SAF (50/70)	77.4	162	409	0.407	0.347	0.264	-22
% 2 PP-PET	87	166	409	0.393	0.342	0.262	-22
% 4 PP-PET	89	174	409	0.392	0.339	0.261	-22
% 5 PP-PET	93.4	176	429	0.389	0.339	0.258	-22
% 6 PP-PET	97	181	447	0.376	0.337	0.253	-22

Saf ve “PP–PET” katkılı RTFOT+PAV sonrası bitümler olarak, –6, –12 ve –18 °C sıcaklıklardaki BBR sonuçları çizelge 4.34’de verilmiş ve sünme rijitliği (MPa) ve sünme oranı (m) değerleri sırasıyla şekil 4.41 ve 4.42’de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4.42. Saf ve “PP–PET” katkılı bitümlerin –6, –12 ve –18 °C’deki sünme oranı (m değeri)

Çizelge 4.34 ve şekil 4.41 incelendiğinde: saf bitüme kıyasla, her 3 sıcaklık için de, katkılı bitümlerde sünme rijitliği (S) değerlerinin arttığı veya bazılarında eşit olduğu ve genel olarak, katkı ilavesiyle de artışların devam ettiği görülmektedir. Çizelge 4.34 ve şekil 4.42 incelendiğinde; saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerde “S” değerlerindeki sonuçlara benzer şekilde, sünme oranı (m) değerlerinin azaldığı da görülmektedir. Yani; saf bitüme göre kıyas ve katkı ilavesi olarak, S ve m değerlerinin benzer niteliklerde arttığı veya azaldığı sonuçlarla görülmüştür. Böylece; düşük sıcaklık çatlaklarına karşı, PP–YYPE katkısında olduğu gibi, PP–PET katkısında da olumsuz etki oluşacağı, sonuçlarla tespit edilmiştir ve PP–YYPE katkısı olarak yapılan değerlendirmelerin bu katkı için de geçerli olduğu görülmektedir.

Düşük sıcaklık direnci olarak, her iki katkı da olumsuz nitelik taşısa bile, S ve m değerleri şartname kriterlerini sağlamakta ve düşük sıcaklık PG sınıfının değişmediği görülmektedir. Saf ve katkılı tüm bitümler için geçerli olmak üzere, “ $S \leq 300$ MPa” ve “ $m \geq 0.3$ ” kriterlerinin –6 ve –12 °C’de sağlandığı fakat –18 °C’de sağlanmadığı sonuçlarla tespit edilmiştir. Özetle; deney sonuçlarına göre, saf, PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümler olmak üzere, toplam 9 bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık olarak PG sınıfları aynıdır.

4.3.4. Bitümlü bağlayıcıların performans sınıflarının (PG) belirlenmesi

DSR deneyi ile belirlenen yüksek sıcaklık ve BBR deneyi ile belirlenen düşük sıcaklık (10 °C daha aşağısı) değerleri alınarak, 9 farklı bitümlü bağlayıcının PG'si belirlenmiş ve bu iki sıcaklıkla PG isimlendirmesi yapılmıştır.

4.3.4.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkılı bitümlerin PG sınıfı

Saf ve “PP–YYPE” katkılı bitümlerin, orijinal ve RTFOT sonrası olarak DSR deneyi sonuçları toplu bir şekilde sırasıyla çizelge 4.35 ve 4.36’da verilmiştir.

Çizelge 4.35. Saf ve “PP–YYPE” katkılı “orijinal” bitümlerin tüm sıcaklıklardaki DSR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* / sinδ	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	64	86.99	1.994	1.997	69.2
	70	88.07	0.902	0.902	
% 2 PP–YYPE	70	83.96	1.393	1.401	73.8
	76	83.90	0.722	0.726	
% 4 PP–YYPE	70	79.44	1.960	1.994	78.5
	76	78.50	1.068	1.090	
	82	77.67	0.607	0.621	
% 5 PP–YYPE	76	73.00	1.424	1.489	81.9
	82	66.89	0.913	0.993	
% 6 PP–YYPE	76	70.63	1.589	1.685	83.5
	82	65.81	1.020	1.118	
	88	63.22	0.643	0.720	

Çizelge 4.36. Saf ve “PP–YYPE” katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin tüm sıcaklıklardaki DSR sonuçları

BitümCinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* / sinδ	Yenilme Sıcaklığı	PG Sınıfı
SAF (50/70)	64	84.60	3.887	3.904	68.5	64
	70	86.30	1.815	1.819		
% 2 PP–YYPE	70	82.68	3.177	3.228	71.3	70
	76	83.02	1.594	1.613		
% 4 PP–YYPE	70	79.79	3.465	3.494	74.3	70
	76	81.05	1.822	1.836		
% 5 PP–YYPE	76	76.26	2.181	2.116	75.6	70
% 6 PP–YYPE	76	75.40	2.287	2.363	76.8	76
	82	72.17	1.362	1.431		

Saf ve PP–YYPE katkılı orijinal ve RTFOT sonrası bitümlerin; deney parametre değerleri ve şartname koşulunun sağlandığı (1.0 kPa ve 2.2 kPa) yenilme sıcaklıkları, çizelge 4.35 ve 4.36’da görülmektedir. Çizelgeler incelendiğinde; aynı bitüm türündeki yenilme sıcaklıklarının, RTFOT sonrası bitümlerde (çizelge 4.36) daha düşük olduğu

görülmüştür. Buradan hareketle; saf ile % 2, 4, 5 ve 6 PP–YYPE katkıli bitümlerin yüksek sıcaklık PG sınıfları sırasıyla 64, 70, 70, 70 ve 76 şeklinde tespit edilmiş ve PG sınıfının katkı ilavesiyle 1–2 seviye yükseldiği görülmüştür.

Saf ve “PP–YYPE” katkıli bitümlerin, RTFOT+PAV sonrası olarak DSR deney parametre değerleri ve şartname koşulunun sağlandığı (5,000 kPa) yenilme sıcaklıkları çizelge 4.37’de sunulmuştur.

Çizelge 4.37. Saf ve “PP–YYPE” katkıli “RTFOT+PAV sonrası” bitümlerin toplu olarak DSR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* . sinδ	Yenilme Sıcaklığı	Kontrol Sıcaklığı
SAF (50/70)	25	52.47	5498.5	4302.2	23.9	25
	22	49.51	8402.4	6389.9		
% 2 PP–YYPE	25	49.66	5644.3	4360.3	24.7	28
	22	46.81	7156.7	5218.0		
% 4 PP–YYPE	28	50.84	5462.0	4235.3	25.6	28
	25	48.09	7078.9	5405.2		
% 5 PP–YYPE	28	49.64	5865.2	4469.3	26.1	28
	25	46.88	7665.0	5713.6		
% 6 PP–YYPE	28	49.60	6196.1	4718.8	26.5	31
	25	46.86	8065.3	6008.0		

RTFOT+PAV sonrası bitüm numunelerini, “[$(PG_{yüksek} + PG_{düşük})/2$]+4” değerine göre belirlenen sıcaklıkta test etmek uygundur. Örneğin; PG 64–22 bitüm için, deney sıcaklığı “[$(64 + (-22))/2$]+4=25 C°” seçilebilir (ASTM D6373, 2016). Saf ve PP–YYPE katkıli bitümlerin, çizelge 4.36’da verilen yüksek sıcaklık ve çizelge 4.33’de verilen düşük sıcaklık PG değerlerinden yola çıkarak, yorulma çatlakları için deney (kontrol) sıcaklıkları çizelge 4.37’de verilmiştir. Çizelge 4.37 incelendiğinde; belirtilen kontrol sıcaklıklarında şartname kriterleri (< 5,000 kPa) sağlandığı için, tüm bitümlerin yorulma çatlaklarına karşı dirençli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, % 2 ve 6 PP–YYPE katkıli bitümlerde kontrol sıcaklığından bile daha düşük sıcaklıkta (sırasıyla 25 ve 28) kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir.

4.3.4.2. Grup 2 (PP–PET) katkıli bitümlerin PG sınıfı

Saf ve “PP–PET” katkıli bitümlerin; orijinal, RTFOT ve RTFOT+PAV sonrası olarak DSR deney parametre değerleri ve PG şartname koşulunun sağlandığı yenilme sıcaklıkları sırasıyla çizelge 4.38, 4.39 ve 4.40’da sunulmuştur. Çizelge 4.38 ve 4.39 incelendiğinde; aynı bitüm türündeki yenilme sıcaklıklarının, PP–YYPE katkısında olduğu gibi, RTFOT sonrası bitümlerde (çizelge 4.39) daha düşük olduğu görülmüştür.

Buradan hareketle; saf ile % 2, 4, 5 ve 6 PP–PET katkılı bitümlerin yüksek sıcaklık PG sınıfları sırasıyla 64, 70, 70, 76 ve 76 şeklinde tespit edilmiş ve PG sınıfının katkı ilavesiyle 1–2 seviye yükseldiği görülmüştür.

Çizelge 4.38. Saf ve “PP–PET” katkılı “orijinal” bitümlerin tüm sıcaklıklardaki DSR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* / sinδ	Yenilme Sıcaklığı
SAF (50/70)	64	86.99	1.994	1.997	69.2
	70	88.07	0.902	0.902	
% 2 PP–PET	70	80.01	1.862	1.890	75.8
	76	80.82	0.969	0.982	
% 4 PP–PET	70	75.14	2.775	2.872	82.3
	76	72.88	1.566	1.639	
	82	68.56	0.956	1.027	
	88	67.61	0.571	0.618	
% 5 PP–PET	76	70.03	1.626	1.730	83.9
	82	64.76	1.038	1.148	
	88	61.57	0.654	0.744	
% 6 PP–PET	76	69.11	1.814	1.941	87.0
	82	63.45	1.195	1.335	
	88	57.71	0.797	0.942	

Çizelge 4.39. Saf ve “PP–PET” katkılı “RTFOT sonrası” bitümlerin tüm sıcaklıklardaki DSR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* / sinδ	Yenilme Sıcaklığı	PG Sınıfı
SAF (50/70)	64	84.60	3.887	3.904	68.5	64
	70	86.30	1.815	1.819		
% 2 PP–PET	70	78.46	3.342	3.411	72.1	70
	76	80.03	1.681	1.706		
% 4 PP–PET	70	76.81	3.989	4.097	75.4	70
	76	78.22	2.015	2.058		
% 5 PP–PET	76	74.62	2.574	2.670	76.9	76
	82	71.43	1.511	1.594		
% 6 PP–PET	76	71.57	2.664	2.808	78.3	76
	82	71.02	1.489	1.574		

Çizelge 4.40. Saf ve “PP–PET” katkılı “RTFOT+PAV sonrası” bitümlerin toplu olarak DSR sonuçları

Bitüm Cinsi	Sıcaklık (C°)	Faz Açısı (δ)	Kompleks Modül (G*)	G* . sinδ	Yenilme Sıcaklığı	Kontrol Sıcaklığı
SAF (50/70)	25	52.47	5498.5	4302.2	23.9	25
	22	49.51	8402.4	6389.9		
% 2 PP–PET	25	51.67	5764.0	4521.4	24.2	28
	22	49.01	8801.2	6643.3		
% 4 PP–PET	25	50.56	6131.4	4660.7	24.4	28
	22	47.71	9175.7	6688.8		
% 5 PP–PET	25	50.21	6290.8	4833.5	24.7	31
	22	47.41	9611.0	7075.6		
% 6 PP–PET	25	49.48	6333.3	4890.9	24.8	31
	22	46.80	9745.2	7209.6		

Saf ve PP–PET katkılı bitümlerin, çizelge 4.39’da verilen yüksek sıcaklık ve çizelge 4.34’de verilen düşük sıcaklık PG değerlerinden yola çıkarak, yorulma çatlakları için deney (kontrol) sıcaklıkları çizelge 4.40’da verilmiştir. Çizelge 4.40 incelendiğinde, yorulma çatlaklarına karşı tüm bitümlerin 25 C° sıcaklıkta dirençli olduğu ve belirtilen kontrol sıcaklıklarında şartname kriterlerinin sağlandığı görülmektedir. Yani, kontrol sıcaklığından 1–2 seviye düşük sıcaklıklarda dahi kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir.

Her iki katkı için de tüm sonuçlar genel olarak incelendiğinde; hem orijinal hem de RTFOT sonrası bitümler olarak, yenilme sıcaklıkları ve PG sınıfı anlamında PP–PET katkısının PP–YYPE katkısına göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, tüm katkılı bitümlerin yorulma çatlaklarına karşı dirençli olduğu da görülmüştür.

Düşük sıcaklık PG sınıfları olarak, tüm bitümlerin PG sınıfı (–22) olarak tespit edilmiştir. Böylelikle; 9 farklı bitümlü bağlayıcının PG isimlendirmesi “PG X–22” (çizelge 4.36 ve 4.39’daki PG sınıfı değerleri, “X” olarak tanımlanmıştır) şeklindedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde; bitümün yüksek sıcaklık performansı arttıkça rijitliğinin artmasından dolayı, çatlama ve kırılmalık özelliklerinin de artması ile tersi olarak düşük sıcaklık performansının azalması beklenebilir veya en azından düşük sıcaklıkta bitümün mevcut durumunu koruması iyi bir sonuç olarak nitelendirilebilir. Deney sonuçları bu bağlamda incelendiğinde; bitümün performansı olarak, katkıların oldukça olumlu etkiler yaptığı görülmüştür.

4.4. Katkıların Bitüme Olan Etkilerinin Kimyasal Deneylerle İncelenmesi

Bu bölüm, tez çalışması kapsamında bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneylerin son kısmını oluşturmaktadır. PP–YYPE ve PP–PET katkıları ile hazırlanan modifiye bitümlere, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi’nde (İLTEK) SEM ve FTIR analizleri uygulanmıştır.

Polimerin bitüm matrisindeki faz dağılımını ve “polimerik katkı/bitüm” bileşiminin mikro yapısını gözlemlemek amacıyla; saf ve % 2, 4, 6 PP–YYPE ile PP–PET katkılı bitümler olmak üzere toplam 7 farklı bitümlü bağlayıcı SEM ile izlenmiştir. SEM görüntülerinin benzer nitelikleri taşıyabileceği düşüncesiyle, diğer deneylerden farklı olarak % 5 katkı oranlı bitümlerden SEM görüntüsü alınmamıştır. Yani, katkılı bitümlerin % 2 artışı durumları dikkate alınmıştır.

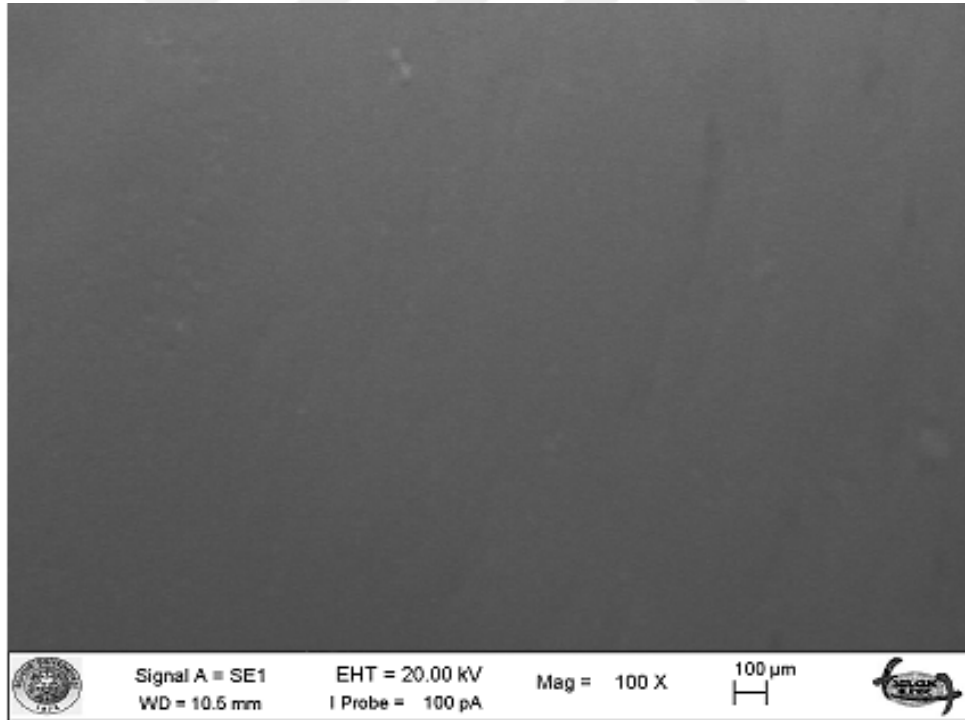
Katkıların etkisiyle bitümde oluşan fiziksel veya kimyasal yapıların durumunu incelemek amacıyla; saf ve % 2, 4, 5 ve 6 PP–YYPE ile PP–PET katkılı bitümler olmak

üzere toplam 9 farklı bitümlü bağlayıcıya FTIR analizi yapılmıştır. Yapılan kimyasal deneylerin sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

4.4.1. SEM (taramalı elektron mikroskobu) analiz sonuçları

SEM görüntüleri elde etmek için, numuneler “1x1x1 cm” ebadında hazırlanarak İLTEK’e teslim edilmiş ve gerekli koşullarda numunelere kurutma işlemleri yapılmıştır. Sonra numuneler daha küçük boyutlara getirilerek, argon atmosferinde yüksek vakumda altın nanometre kalınlıkta kaplanmış ve SEM görüntüleri almak için numuneler hazır hale getirilmiştir. Herbir numuneden farklı büyütme miktarlarında (100 X–30 KX) SEM görüntüleri alınmıştır.

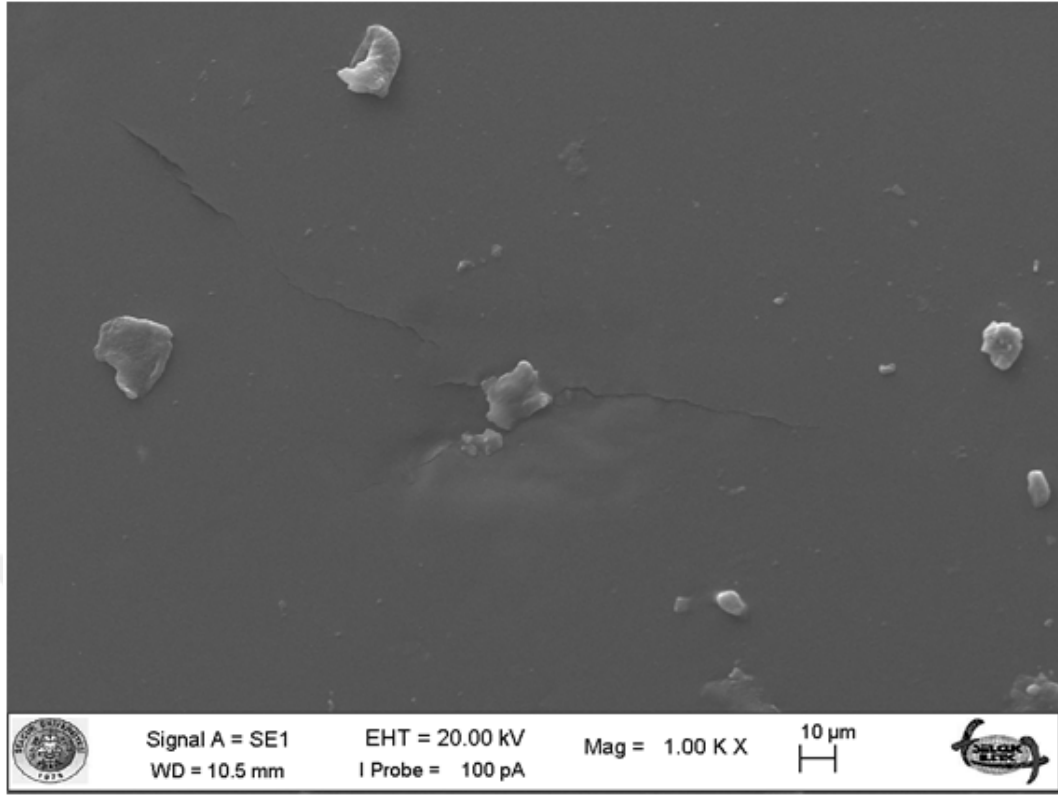
Saf (50/70) bitümün “100X” büyütmedeki SEM görüntüsü şekil 4.43’de verilmiştir. Şekil 4.43’de görüleceği gibi, saf bitümde herhangi bir katkı içeriği olmadığı için, yüzey morfolojisi olarak her tarafta aynı nitelikte görüntü elde edilmiştir.



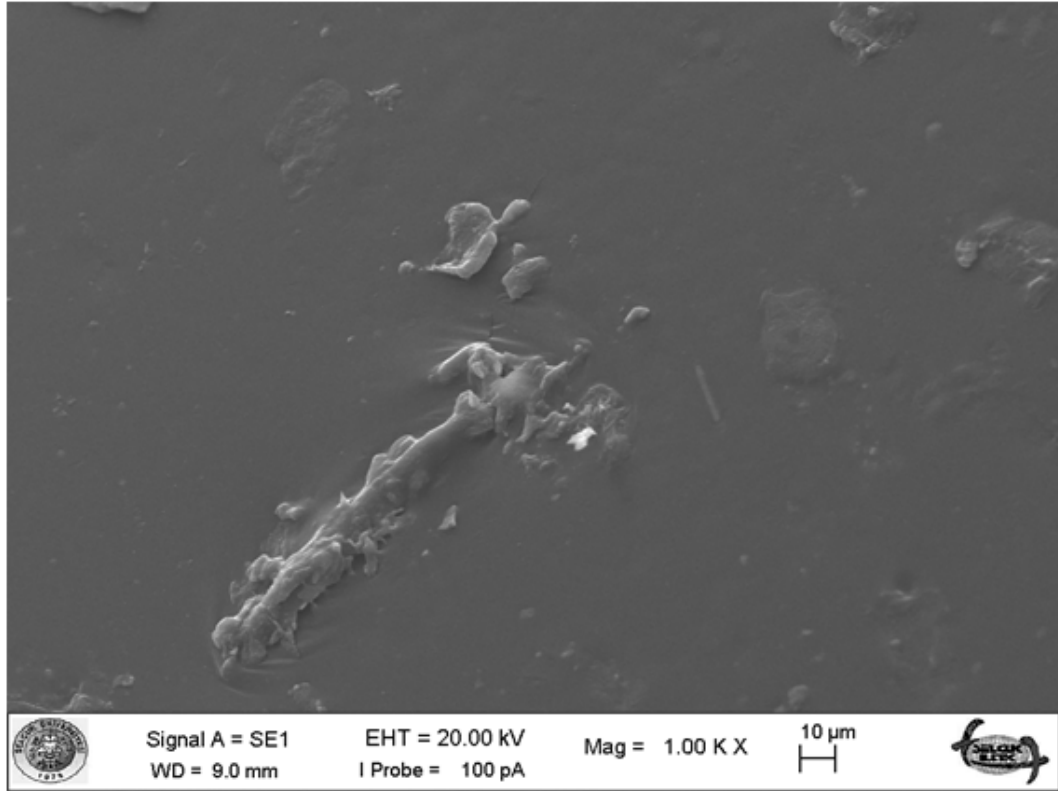
Şekil 4.43. Saf (50/70) bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (100 X)

4.4.1.1. Grup 1 (PP–YYPE) katkılı bitümlerin SEM görüntüleri

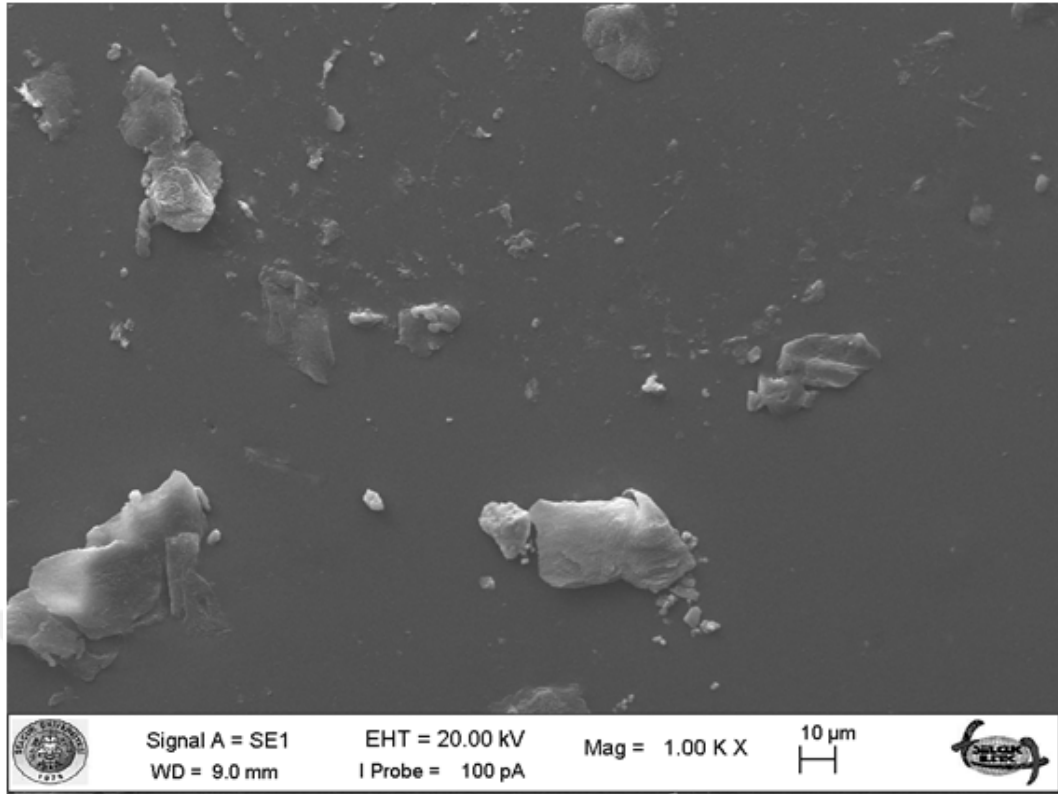
Şekil 4.44, 4.45 ve 4.46’da sırasıyla % 2, 4 ve 6 PP–YYPE katkılı bitümlerin “1,000 X = 1 KX” büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.44. % 2 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)



Şekil 4.45. % 4 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)



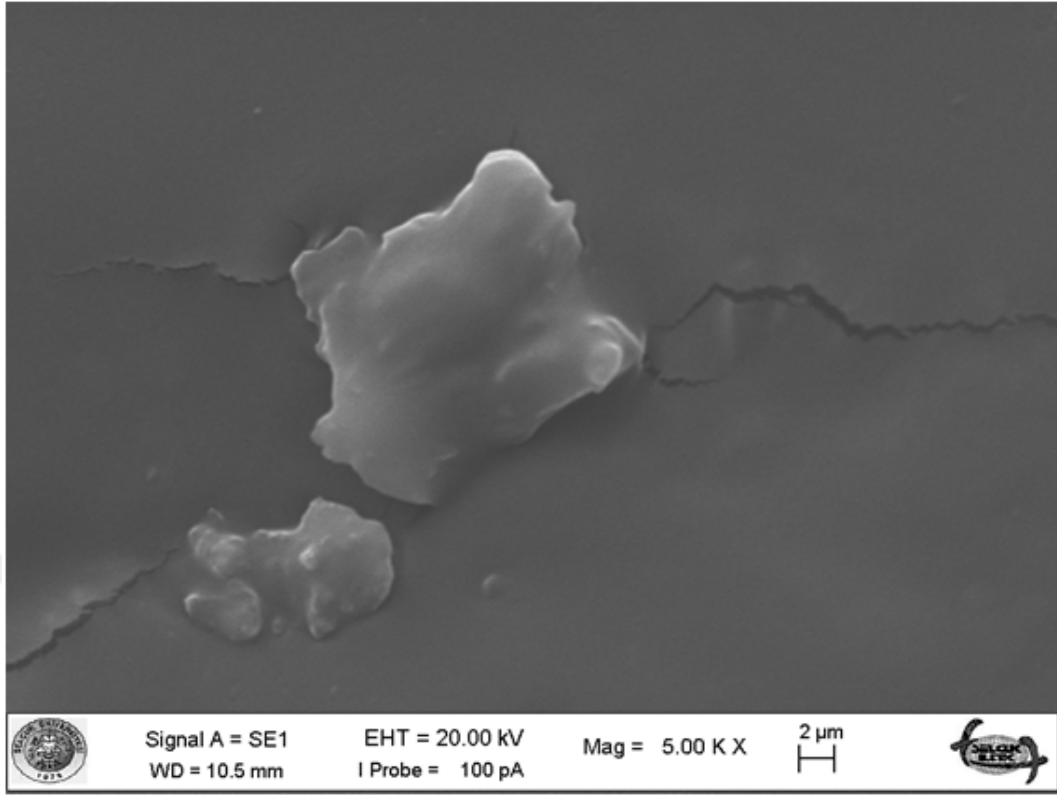
Şekil 4.46. % 6 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)

PP-YYPE katkısı partiküllerinin, bitüm matrisinden açıkça ayrıldığı şekillerden görülmektedir ve katkı ilavesiyle bitümden ayrı olan parçacıkların miktarı artmaktadır. Çok küçük boyutlardan yaklaşık 20–25 µm boyutlarına kadar değişik boyutlarda katkı parçacıklarının % 2 PP-YYPE katkılı bitümde dağıldığı şekil 4.44’den tespit edilmiş, şeklin bazı bölümlerinde katkıların kısmi olarak bitüm içine gömüldüğü ve bazı katkıların yakınında çatlakların oluştuğu görülmüştür.

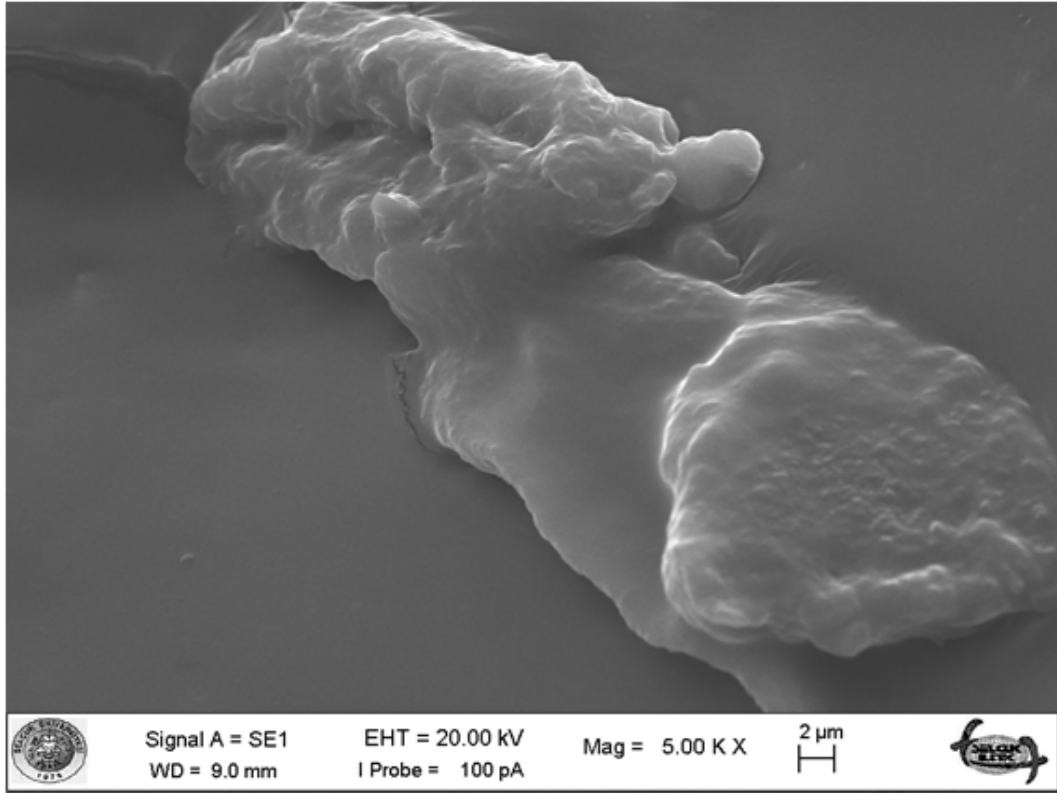
% 4 katkılı bitümde, bütünleşmiş kütle olarak yaklaşık 130 µm boyutuna kadar katkı partiküllerinin belli bölgede yoğunlaştığı ve % 2 katkıya göre daha büyük parçacıklar şeklinde bitüm üzerinde parçacıkların dağıldığı şekil 4.45’den tespit edilmiş, şeklin bazı bölümlerinde katkıların kısmi olarak bitüm içine gömülmesinin % 2 katkıya göre arttığı ve bazı kısımlarda gözeneklerin oluştuğu görülmüştür.

% 6 katkılı bitümde ise; küçük boyuttan yaklaşık 70 µm boyutuna kadar katkı parçacıklarının, değişik boyutlarda ve diğer katkılı bitümlere göre çok daha fazla alanı kaplayarak bitüm üzerinde yayıldığı şekil 4.46’dan tespit edilmiştir.

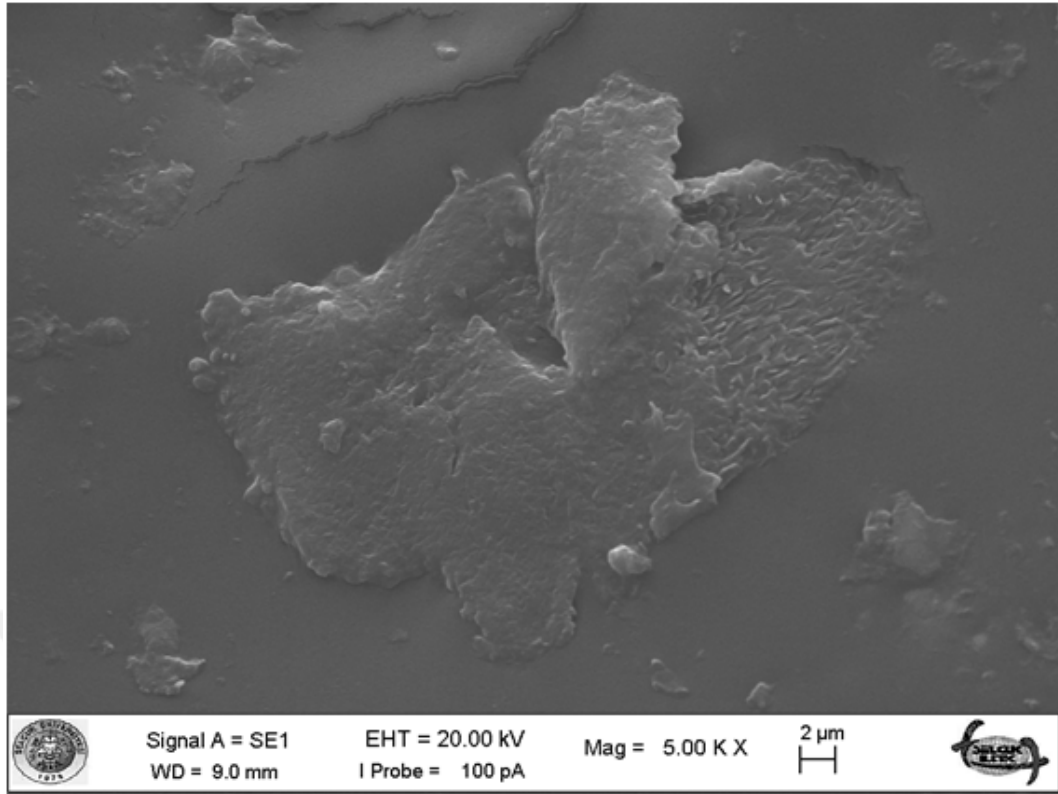
Katkının bitümle etkileşimini daha iyi gözlemlemek, bitüm veya katkı üzerinde oluşan çatlak, gözenek vb. fiziksel durumları analiz etmek için; bitümlerin “5,000 X=5 KX” büyütmedeki SEM görüntüleri şekil 4.47, 4.48 ve 4.49’da sunulmuştur.



Şekil 4.47. % 2 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)



Şekil 4.48. % 4 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)

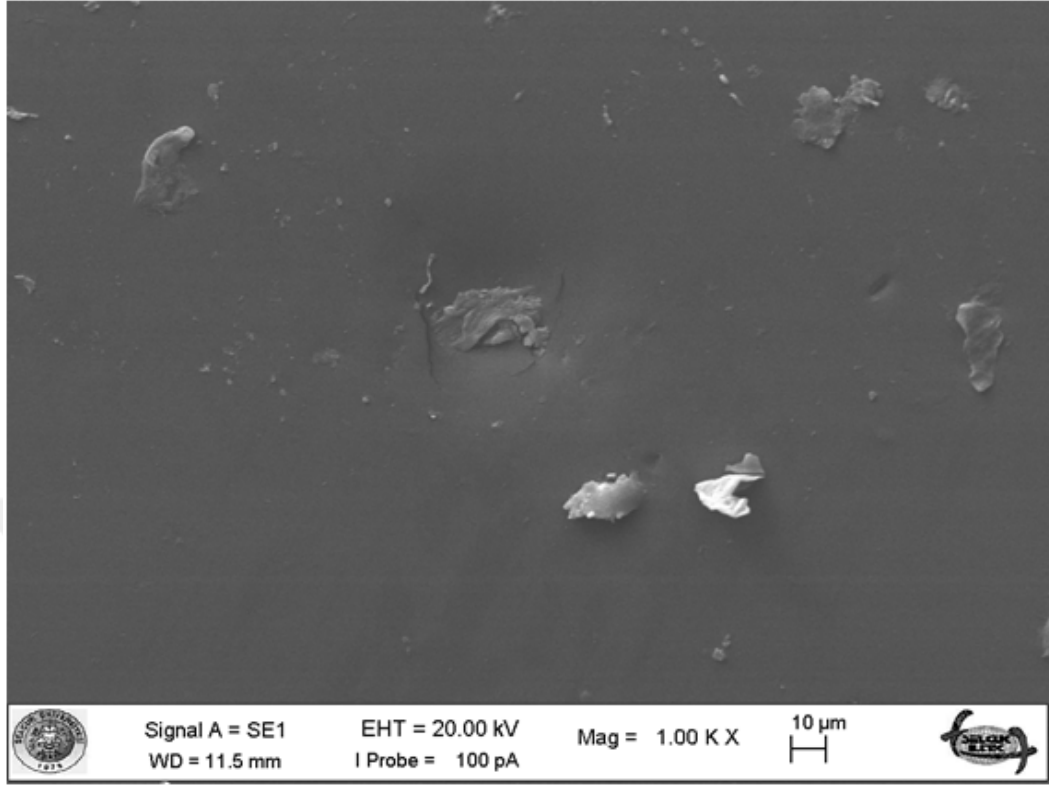


Şekil 4.49. % 6 PP-YYPE katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)

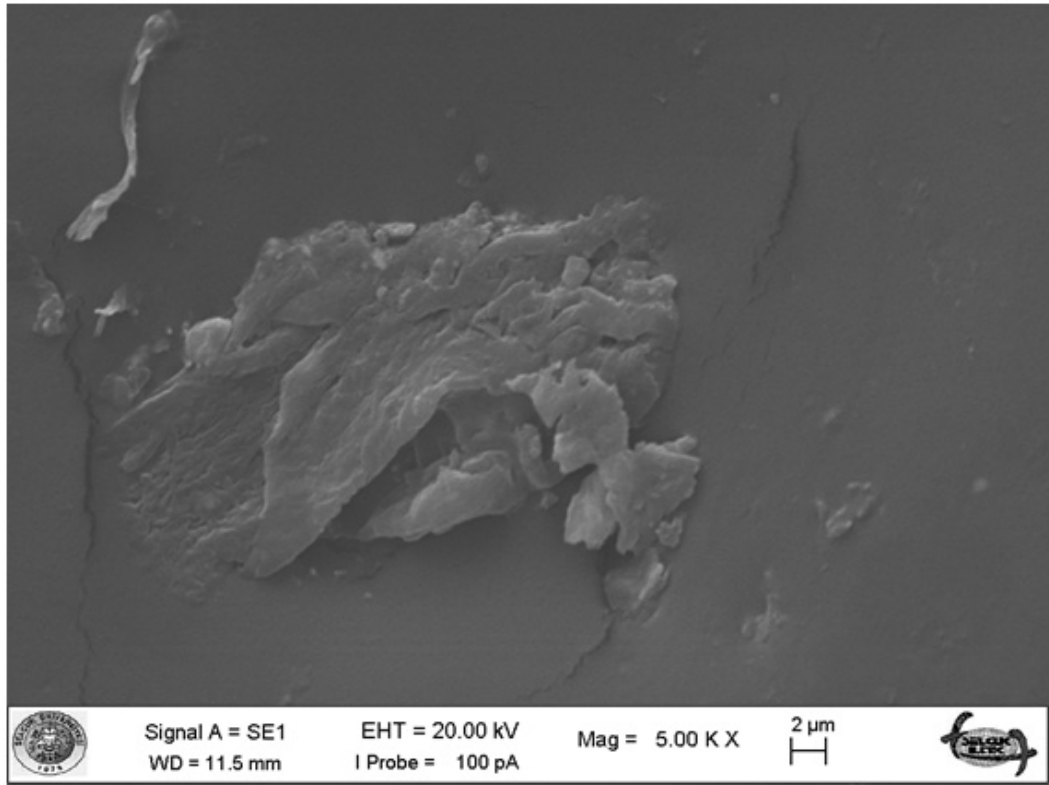
Şekiller incelendiğinde, katkı parçacıklarına daha yakın bölgelerde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların derinleştiği görülmektedir. Katkı ilavesi sonucunda bitümün gevrekleşmesi (sertleşmesi), katkılı bitümlerde çatlakların oluşmasının sebebi olarak düşünülmektedir. Şimdiye kadar yapılan bitüm deneyleri de bu fikri desteklemektedir. Bitümün kıvamının sertleşmesi, viskozitesinin artması ve yüksek sıcaklık PG sınıfının yükselmesi gibi katkının etkisi ile ilgili hususlar önceki deney sonuçlarıyla irdelenmişti.

Katkıların kendi içindeki kılcal çatlak veya boşlukları (şekil 4.49) ve gözenekleri (şekil 4.48) gibi fiziksel durumlar şekillerden gözlemlenmiştir. Plastiklerin eriyik halden katı hale geçerken kendi içindeki büzölmeleri sebebiyle malzeme içinde oluşan iç gerilmelerden dolayı, bu durumların oluştuğu söylenebilir. Bitüme ilave edilen katkı miktarının artışı ile tane boyutları büyüyen ve tane miktarları da artan şekilde farklı partiküller halinde katkı parçacıklarının bitüm matrisi içerisinde dağınık olarak kalması, “(katkı)/bitüm” etkileşiminin fiziksel bir olay olduğunu gösterir. Ayrıca; katkı-bitüm birleşimindeki ve yakınlarındaki kısmi çatlaklar ile katkının kendi içindeki fiziksel durumları, bitüm matrisinde fiziksel olayın gerçekleştiği sonucunu güçlendirmektedir. Bununla birlikte, bazı katkı parçacıklarının bitüm içine gömülmesi ve yüzeyde olanların da bitümle iyi etkileşimi ile katkının yeterince bitüme bağlandığı da söylenebilir.

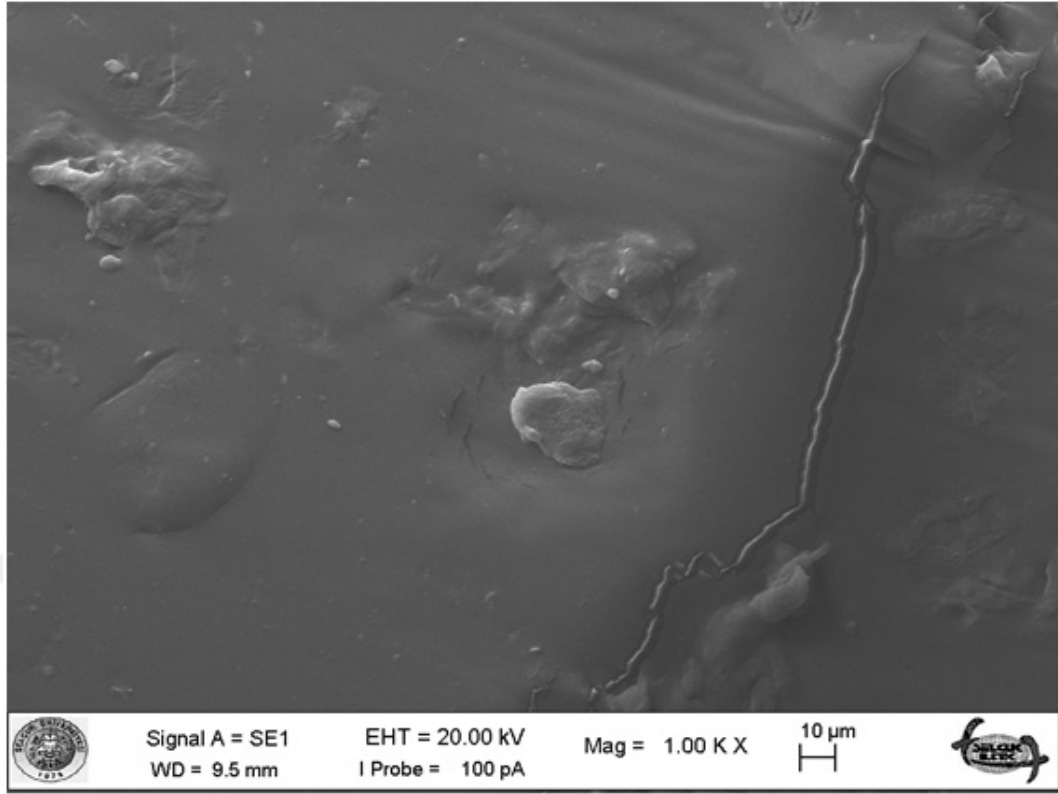
4.4.1.2. Grup 2 (PP–PET) katkıli bitümlerin SEM görüntüleri



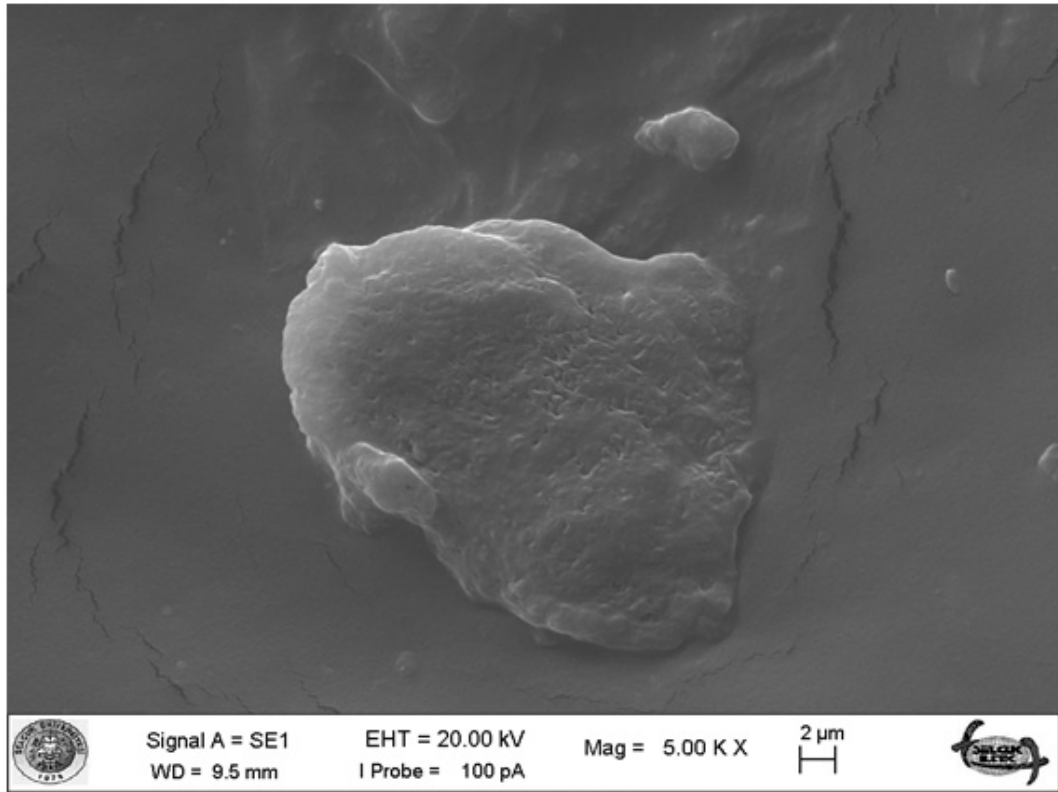
Şekil 4.50. % 2 PP–PET katkıli bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)



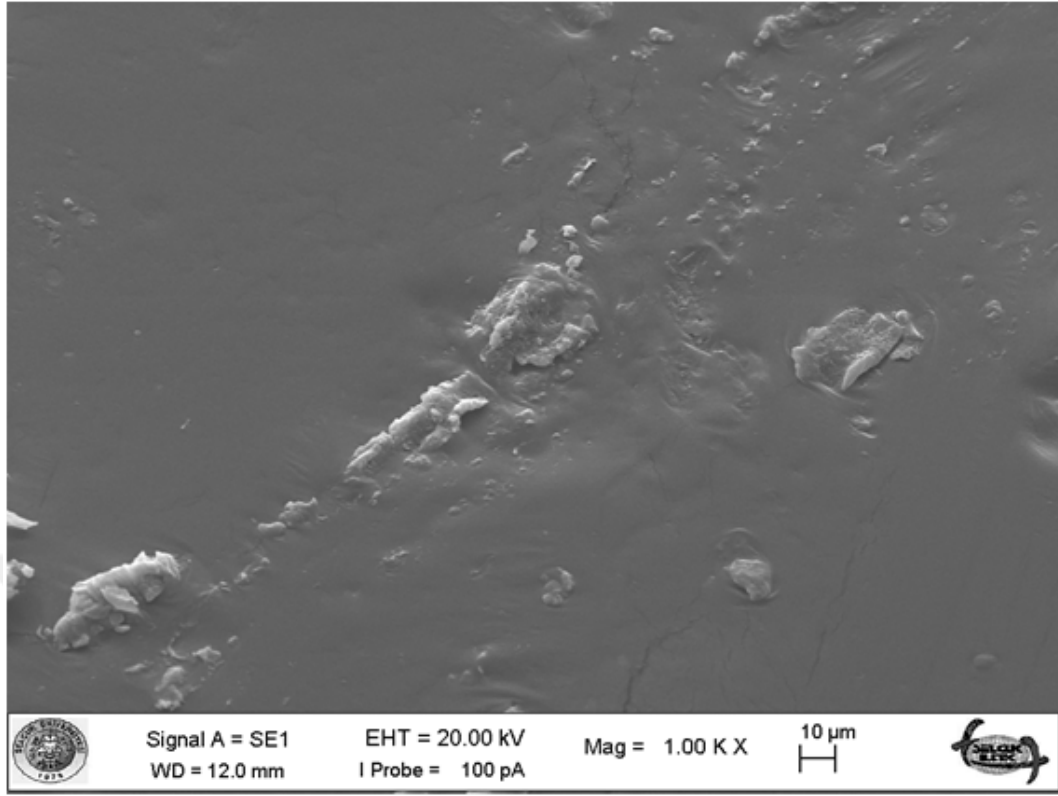
Şekil 4.51. % 2 PP–PET katkıli bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)



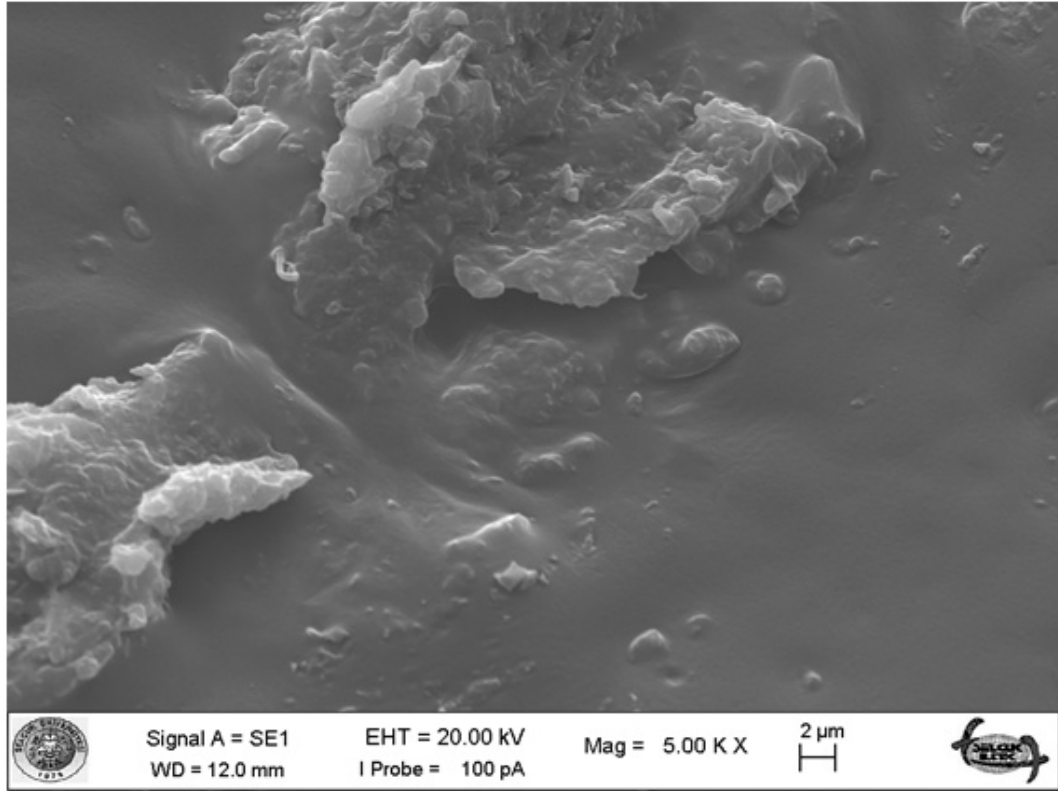
Şekil 4.52. % 4 PP–PET katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)



Şekil 4.53. % 4 PP–PET katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)



Şekil 4.54. % 6 PP–PET katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (1,000 X=1 KX)



Şekil 4.55. % 6 PP–PET katkılı bitümlü bağlayıcının SEM görüntüsü (5,000 X=5 KX)

Şekil 4.50 ve 4.51, 4.52 ve 4.53, 4.54 ve 4.55’de sırasıyla % 2, 4 ve 6 PP–PET katkılı bitümlerin 1.0 ve 5.0 KX büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. PP–PET katkı partiküllerinin, bitüm matrisinden açıkça ayrıldığı şekillerden görülmektedir ve katkı ilavesiyle bitümden ayrı olan parçacıkların miktarı artmaktadır.

Çok küçük boyutlardan yaklaşık 20–25 µm boyutlarına kadar değişik boyutlarda katkı parçacıklarının % 2 PP–PET katkılı bitümde dağıldığı şekil 4.50’den tespit edilmiş ve bazı katkıların yakınında çatlakların oluştuğu ve o bölgenin çukurlaştığı görülmüştür. Görüntünün büyütülmesi ile katkının ve kanal şeklinde uzanan çatlakların durumu, şekil 4.51’de daha iyi görülmektedir.

% 4 katkılı bitümde; küçük boyutlardan yaklaşık 50–60 µm boyutlarına kadar değişik boyutlarda katkı parçacıklarının, % 2 katkıya göre daha büyük parçacıklar şeklinde bitüm üzerinde dağıldığı veya gömüldüğü şekil 4.52’de görülmüş, katkıların yakınındaki çatlakların giderek derinleşerek geniş kanallara dönüştüğü ve yüzeydeki çukurlardan dolayı da düzgünlüğün kaybolduğu görülmüştür. Kanal şeklinde uzanan çatlakların ve yüzeydeki çukurlukların durumu, şekil 4.53’de daha iyi görülmektedir.

% 6 katkılı bitümde ise; bütünleşmiş kütle olarak yaklaşık 90 µm boyutuna kadar belli bir kısımda yoğunlaşarak birçok boyuta kadar katkı parçacıklarının, değişik boyutlarda ve diğer katkılı bitümlere göre daha fazla alanı kaplayarak bitüm üzerinde yayıldığı şekil 4.54’den görülmüştür. Görüntünün büyütülmesi ile yüzeyde yoğunlaşan katkının durumu, şekil 4.55’de daha iyi görülmektedir.

Şekiller incelendiğinde; katkı ilavesi sonucunda bitümün sertleşmesi ve katkılı bitümlerde çatlakların oluşması, katkıların kendi içindeki kılcal çatlak veya boşlukları (gözenekleri) gibi fiziksel durumların malzemedeki iç gerilmelerden oluşması, bitüme ilave edilen katkı miktarının artışı ile tane boyutları büyüyen ve tane miktarları da artan şekilde farklı partiküller halinde katkı parçacıklarının bitüm matrisi içerisinde dağınık olarak kalması ve “katkı/bitüm” etkileşiminin fizikselliği (bağlayıcı matrisinde uzun polimer zincirlerinin oluşması, kristalleşme vb.) gibi PP–YPE katkısı olarak belirtilen hususların genel olarak PP–PET katkısı için de geçerli olduğu söylenebilir.

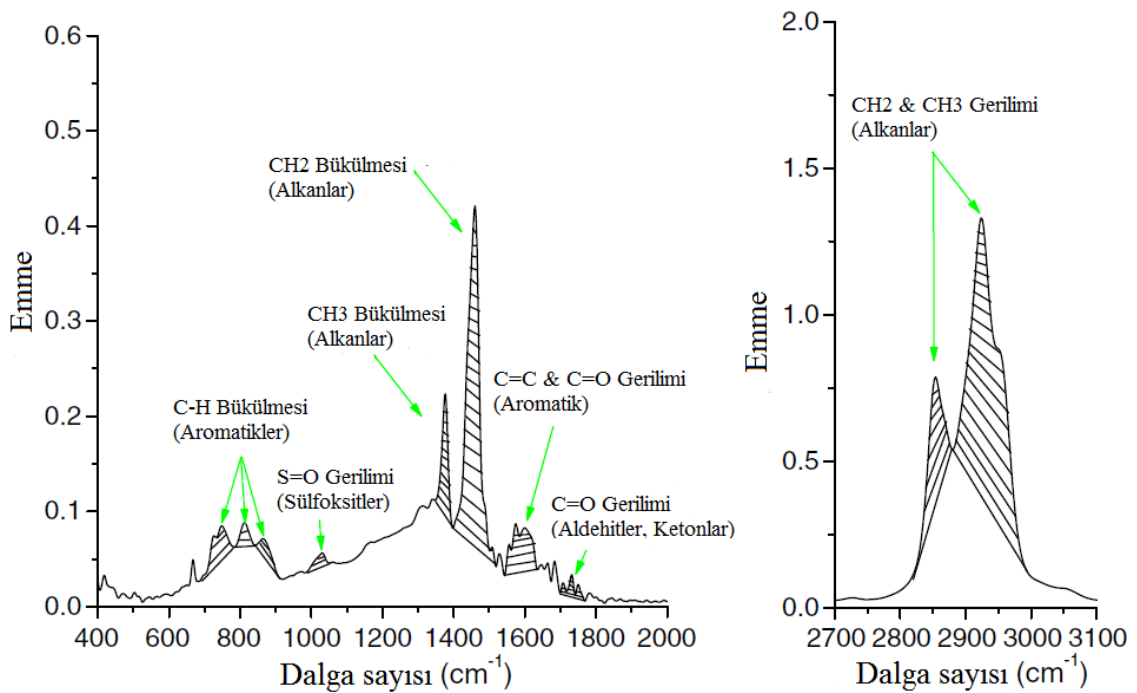
Diğer katkıdan farklı olarak; PP–PET katkısının SEM görüntülerinde, çukurların daha derinleşerek uzun kanallara dönüşmesi ve yüzeydeki seviye farklılıkların daha bariz bir şekilde belirmesi (şekil 4.52) gibi durumlar tespit edilmiştir. PP–PET katkılı bitümün diğer bitüme göre daha gevrek (sert) yapıya sahip olması, bu durumun sebebi olarak söylenebilir. Ayrıca, bazı parçacıklarının bitüm içine gömülmesi ve yüzeyde olanların da bitümle iyi etkileşimi ile katkının yeterince bitüme bağlandığı söylenebilir.

4.4.2. FTIR (fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) analiz sonuçları

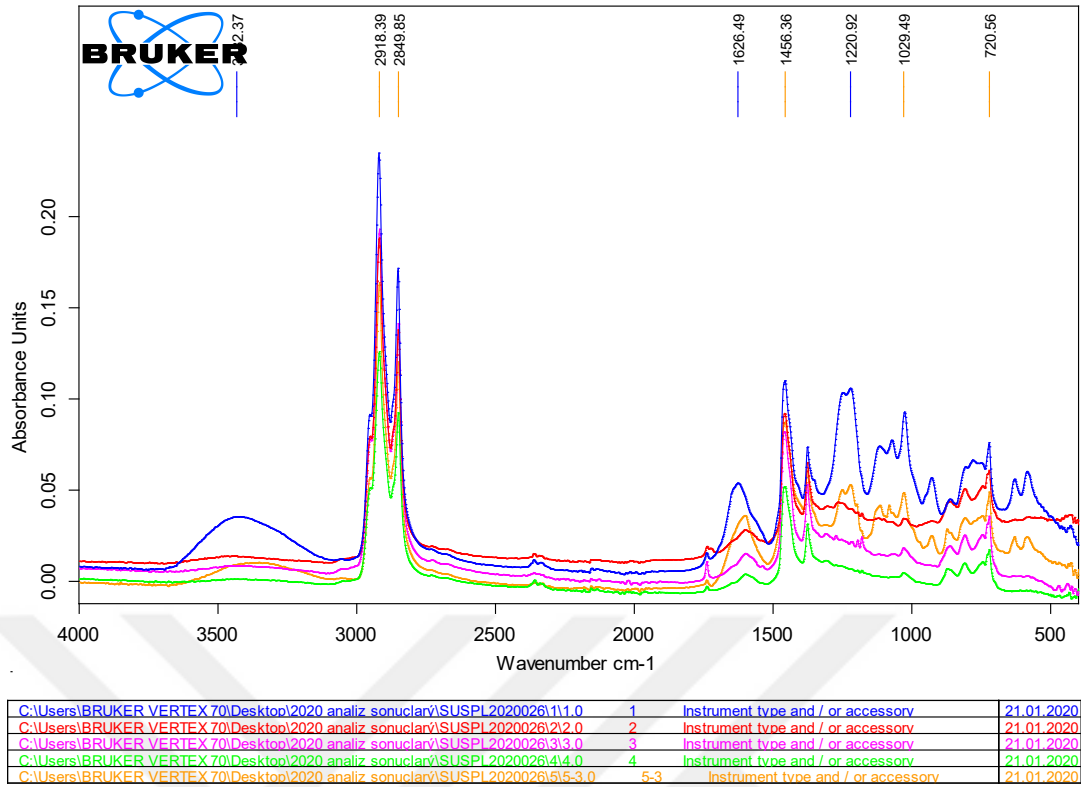
Katkı ilavesi sonucu bitüm moleküllerindeki fonksiyonel grupların durumu ve bunların bağlanma şekilleri gibi numune yapılarının tayini için, saf ve % 2, 4, 5 ve 6 PP–YYPE ile PP–PET katkılı bitümler olmak üzere toplam 9 farklı bağlayıcıya FTIR analizi yapılmıştır. FTIR analizleri için, numuneler “1x1x1 cm” ebadında hazırlanarak İLTEK’e teslim edilmiş ve ilgili işlemlerden sonra numunelere analizler uygulanmıştır.

FTIR analizinde, numuneden geçirilen ışımının dalga boyu değiştirilir ve numune tarafından farklı dalga boylarında soğurulan (emilen) ışının miktarı ölçülür. Numunedeki moleküller, infrared (IR–kızılötesi) ışınları tarafından titreşim ile uyarılır. Moleküllerin her birisinin enerjisi farklı olduğu için, numuneye gelen ışınların titreşimleri hangi molekülün enerji seviyesinde ise o molekül uyarılacak ve uyarılan molekülde ilgili dalga boyunda pik oluşacaktır.

FTIR analizleri, $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ (dalga sayısı) spektral aralığında yapılmıştır. FTIR spektrumunda, bitümlü bağlayıcıdaki fonksiyonel gruplar şekil 4.56’da (Yang ve ark., 2014) gösterilmiştir. Bitümün yapısındaki C–H (2 veya 3 bağlı CH_2 ve CH_3), S=O, C=C, C=O gibi kimyasal bağların ve değişik isimlerdeki farklı grupların pik seviyeleri şekil 4.56’da görülmektedir. Ayrıca, saf bitümle birlikte olacak şekilde PP–YYPE katkılı bitümlerin FTIR analizi sonuçları şekil 4.57’de verilmiştir.



Şekil 4.56. Bitümlü bağlayıcıların FTIR spektrumu olarak tipik fonksiyonel grupları (Yang ve ark., 2014)

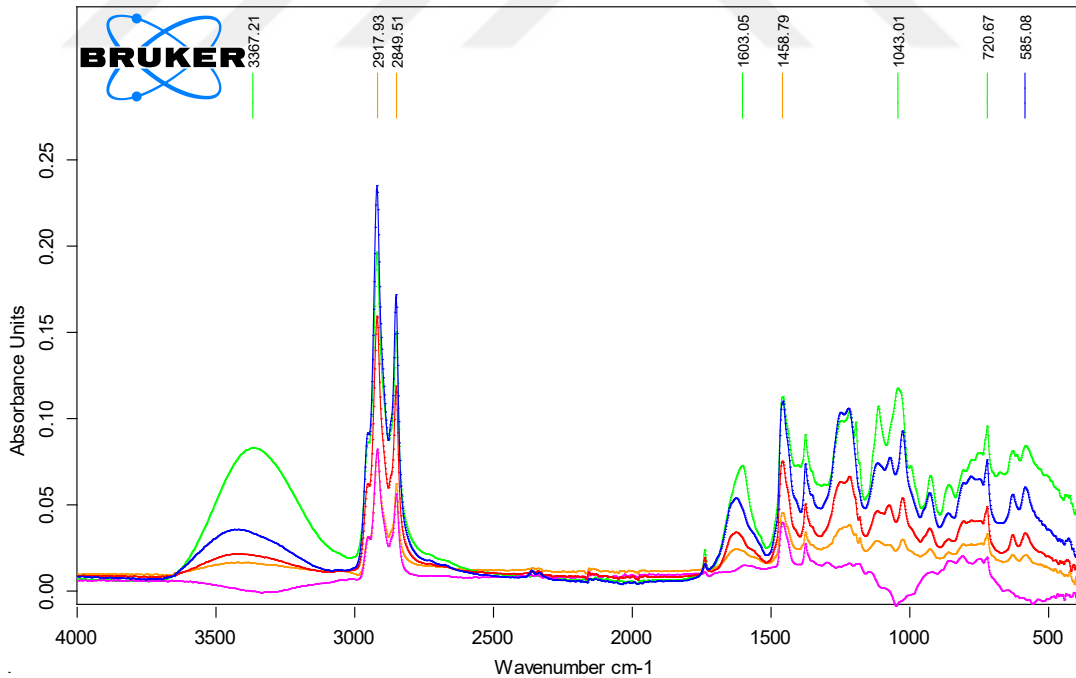


Şekil 4.57. Saf (1) ile % 2 (2), % 4 (3), % 5 (4) ve % 6 (5) PP-YYPE katkılı bitümlerin FTIR spektrumu

Şekil 4.57 incelendiğinde; saf ve katkılı bitümlerde, çeşitli dalga sayılarında kimyasal grupların varlığıyla piklerin oluştuğu görülmektedir. 3432 cm^{-1} civarındaki tepe noktaları, O–H bağının gerilme titreşimini ifade eder. Tüm bitümlerde bağın varlığı görülmektedir fakat katkılı bitümlerdeki pikler saf bitüme kıyasla çok daha düşük emme (absorbance) değerleri gösterdiğinden, katkı ilavesi ile O–H bağı yoğunluğunun azaldığı söylenebilir. 2918 ile 1375 cm^{-1} ve 2849 ile 1456 cm^{-1} civarında pik noktaları, sırasıyla CH_3 ve CH_2 bağlarının gerilme ve bükülme titreşimini gösterir. 1738 cm^{-1} ve 1626 cm^{-1} civarında tepe noktaları, sırasıyla C=O ve C=C bağlarının gerilme titreşimini tanımlar. CH_3 , CH_2 ve C=O bağları piklerinin, tüm bitümlerde oldukça yakın emme değerleri gösterdikleri ve saf bitüme kıyasla katkı oranına göre, C=C bağlarına ait piklerin emme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Böylece, C=C bağ yoğunluğunun katkı ilavesi ile azaldığı ve CH_3 , CH_2 ve C=O bağlarının tüm bitümlerde aynı yoğunluklarda olduğu söylenebilir. 1029 cm^{-1} civarında S=O bağ gerilimini ifade eden tepe noktalarının da, saf bitüme göre azalan özellik taşıdığı tespit edilmiş ve O–H ile C=C bağlarında olduğu gibi, katkı ilavesiyle değişmekle birlikte S=O bağ yoğunluğunda azalma görülmüştür. 720 cm^{-1} civarında C–H bükülmesini tanımlayan pik noktalarında, oldukça yakın emme değerleri görülmüştür. Bitümlerin aynı C–H yoğunluğuna sahip oldukları söylenebilir.

1375 cm^{-1} civarındaki pik noktalarından sonra, katkılı bitümlere ait piklerin ve eğri dalgalanmasının saf bitüme kıyasla düşük emme değerlerine doğru yöneldiği şekil 4.57'deki FTIR spektrumunda görülmektedir. Ayrıca sadece saf ve % 6 katkılı bitümde 1220 cm^{-1} ve 585 cm^{-1} civarında yeni pikler gözlenmiştir. Fakat malzeme hakkında tanı niteliği taşıyan ve kimyasal grupların yoğunlaştığı 1300 cm^{-1} 'den büyük olan kısımda yeni bir pik ortaya çıkmamıştır. FTIR spektrumunda, bu değerden daha küçük kısımlar, her maddenin kendisine özgü niteliklerinin çoğaldığı spektrum bölgesidir. Dolayısıyla bazı tepe konumları olarak bitümlerin sahip olduğu emme değerlerindeki farka rağmen, katkı ilavesi sonucunda genel olarak yeni kimyasal grupların oluşmadığı söylenebilir.

Katkı/bitüm etkileşiminin daha çok fiziksel nitelik taşıdığı bulgusuna SEM görüntüleri ile ulaşılmıştı. Böylece; FTIR analizi sonuçları, bu sonucu teyit etmektedir. Ancak bağlayıcının katkı ile etkileşimi nedeniyle düşük dalga sayılarında bazı emme zirvelerinin ortadan kalkması ve eğrilerin birbirinden uzaklaşması, bazı kimyasal bağ yapılarının yoğunluğunun azalması vb. durumlar, bitüme katkı ekleme işleminin kısmi olarak kimyasal bir süreç içerdiğini göstermektedir. Saf bitümle birlikte olacak şekilde PP-PET katkılı bitümlerin FTIR analizi sonuçları şekil 4.58'de verilmiştir.



C:\Users\BRUKER VERTEX 70\Desktop\2020 analiz sonuçları\SUSPL2020026\1\1.0	1	Instrument type and / or accessory	21.01.2020
C:\Users\BRUKER VERTEX 70\Desktop\2020 analiz sonuçları\SUSPL2020026\6\6.0	6	Instrument type and / or accessory	21.01.2020
C:\Users\BRUKER VERTEX 70\Desktop\2020 analiz sonuçları\SUSPL2020026\7\7.0	7	Instrument type and / or accessory	21.01.2020
C:\Users\BRUKER VERTEX 70\Desktop\2020 analiz sonuçları\SUSPL2020026\8\8.0	8	Instrument type and / or accessory	21.01.2020
C:\Users\BRUKER VERTEX 70\Desktop\2020 analiz sonuçları\SUSPL2020026\9\9.0	9	Instrument type and / or accessory	21.01.2020

Şekil 4.58. Saf (1) ile % 2 (6), % 4 (7), % 5 (8) ve % 6 (9) PP-PET katkılı bitümlerin FTIR spektrumu

Şekil 4.58 incelendiğinde; saf ve katkılı bitümlerde, çeşitli dalga sayılarında kimyasal grupların varlığıyla piklerin oluştuğu görülmektedir. 3367 cm^{-1} civarındaki tepe noktaları, O–H bağının gerilme titreşimini ifade eder. 2917 ile 1375 cm^{-1} ve 2849 ile 1458 cm^{-1} civarındaki noktalar, sırasıyla CH_3 ve CH_2 bağlarının gerilme ve bükülme titreşimini gösterir. 1738 cm^{-1} ve 1603 cm^{-1} civarındaki noktalar, sırasıyla C=O ve C=C bağlarının gerilme titreşimi olarak tanımlanır. 1043 ve 720 cm^{-1} civarındaki noktalar, sırasıyla S=O bağ gerilimini ve C–H bağ bükülmesini tanımlar.

Tüm bitümlerde şekil 4.58’de görüleceği gibi, yukarıda belirtilen noktalarda aynı pikler görülmüştür fakat katkılı bitümlerdeki pikler saf bitüme göre daha düşük emme değerleri gösterdiğinden, katkı ilavesi ile kimyasal bağ yoğunluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Emme değerleri olarak, sadece 1738 cm^{-1} civarında olan C=O bağlarında yakınlık görülmektedir. Ayrıca; saf bitümde var olup, PP–YYPE katkılı bitümlerde olmayan 1220 cm^{-1} ve 585 cm^{-1} civarındaki pik noktaları PP–PET katkılı bitümlerde gözlenmiştir. Bununla birlikte, % 5 katkılı bitümlerde tepe noktalarında diğerlerine göre yüksek emme ve % 4 katkılı bitümlerde tersi olarak düşük emme değerleri görülmüştür.

Genel olarak değerlendirildiğinde; saf bitüme göre, tepe konumları olarak PP–PET katkılı bitümlerin sahip olduğu emme değerlerindeki farka rağmen, katkı ilavesi sonucu yeni kimyasal grupların oluşmadığı bulgusuna ulaşılmıştır. Ancak bitümün katkı ile etkileşimi nedeniyle FTIR eğrilerinin birbirinden uzaklaşması ve kimyasal bağ yoğunluklarının azalması gibi durumlar, diğer katkıya benzer şekilde, bitüme katkı ekleme işleminin kısmi olarak kimyasal bir süreç içerdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak; her iki katkı için de geçerli olmak üzere katkılı bitümlerdeki SEM ve FTIR sonuçları bütün olarak incelendiğinde, katkı ilavesinin kısmi olarak kimyasal etkileri var olsa da, bu işlemin daha ziyade fiziksel bir nitelik taşıdığı görülmüştür.

4.5. Marshall Karışım Tasarımı Sonuçları

Marshall karışım tasarım yöntemi, yoğunluk–boşluk analizi ve stabilite–akma deneyi olmak üzere iki temel kısımdan oluşmaktadır. Tasarım deney süreçleri ile gerekli hesaplamalar konusundaki hususlar ve ilgili formüller, tez metninin 3.bölümü “3.2.3.1.” konu başlığı altında detaylı olarak sunulmuştur. Buradan hareketle, tasarım süreçlerine genel olarak baktığımızda; Marshall tasarımı ile ilgili sonuçları çeşitli başlıklar altında sunmak daha uygun olarak değerlendirilmiştir. Tasarım deney süreçleri olarak yapılan çalışmalar, aşağıda ifade edilen 6 ana başlık altında ele alınabilir:

- Agreg a karışım grubunun oluşturulması,
- BSK'yı oluşturan her bir farklı materyalin (kaba agreg a, ince agreg a, mineral filler ve bitümlü bağlayıcı) özgül ağırlıklarının belirlenmesi,
- BSK'nın hazırlanması süreci olarak deney parametrelerinin belirlenmesi,
- Hazırlanan (sıkıştırılmış) BSK'ya gerekli deney işlemlerinin yapılması,
- Tüm deney verilerinin elde edilmesi sonucunda, "bitüm oranına" karşılık olarak gerekli grafiklerin çizilmesi,
- Tüm deney sonuçlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi ve tasarımı yapılan BSK'nın optimum bitümlü bağlayıcı oranının belirlenmesi.

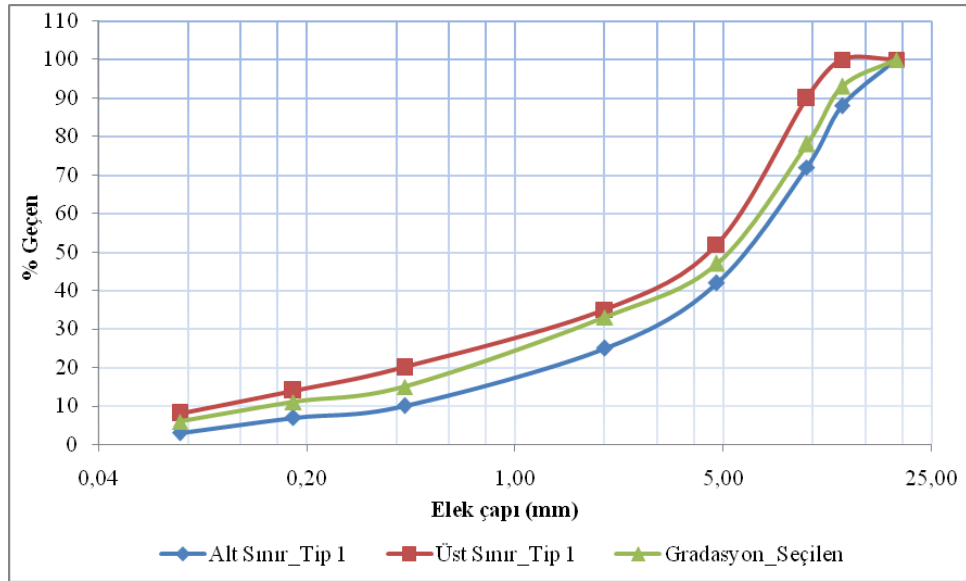
4.5.1. BSK içindeki agreg a karışım grubunun oluşturulması

Çalışma kapsamında kullanılan kalker (kireçtaşı) türündeki agreg alar, Konya il sınırları içindeki bir taş ocağından farklı tane boyutları olarak temin edilmiştir. Çizelge 4.41'deki boyutlara göre, 19.0–4.75 ve 4.75–0.075 mm. elek takımları ve mekanik elek sallayıcı yardımıyla ASTM C136 standardına göre kaba ve ince agreg alar elenmiş ve Marshall karışım tasarımı için farklı boyutlarda agreg a grupları hazırlanmıştır.

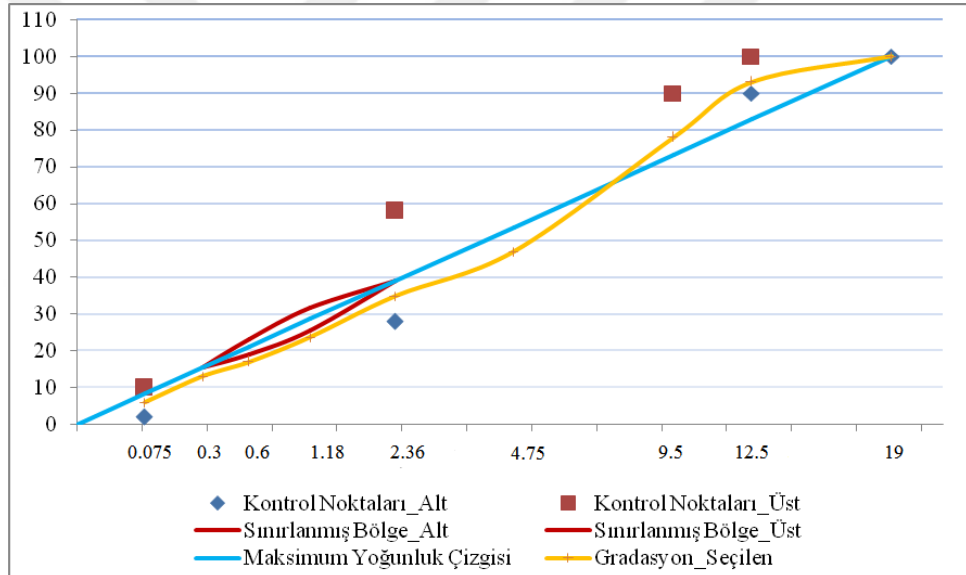
BSK tasarım agreg a gradasyonunda, Karayolu Teknik Şartnamesi (Tip 1) (2013) ve Superpave tasarım yöntemi gradasyon kriterleri dikkate alınmıştır. Yöntemlere göre belirlenen agreg a gradasyon ve şartname kriterleri, çizelge 4.41'de; KGM ve Superpave yöntemine göre granülometri eğrileri de sırasıyla, şekil 4.59 ve 4.60'da verilmiştir.

Çizelge 4.41. BSK tasarımı için gradasyon limitleri (her iki yöntem) ve tasarım (seçilen) gradasyon

Elek Boyu (mm)	Superpave Yöntemi (NMAS=12.5 mm için)				KGM_Şartname		Agrega Tasarım Gradasyonu
	Kontrol Noktaları (%)		Sınırlanmış Bölge (%)		Tip-1 (% Geçen)		
	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır	
19.00	100				100		100.0
12.50	90	100			88	100	93.00
9.500		90			72	90	78.00
4.750					42	52	47.00
2.360	28	58	39.1	39.1			34.83
2.000					25	35	33.00
1.180			25.6	31.6			23.63
0.600			19.1	23.1			17.00
0.425					10	20	15.00
0.300			15.5	15.5			13.00
0.180					7	14	11.00
0.075	2	10			3	8	6.000



Şekil 4.59. BSK tasarımı granülometri eğrisi (Karayolu teknik şartnamesi_2013'e göre)



Şekil 4.60. BSK tasarımı granülometri eğrisi (Superpave yöntemine göre)

4.5.2. BSK'yı oluşturan materyallerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Tane boyutu dağılımına göre 4.75 mm. elek üzeri kaba agrega, 4.75–0.075 mm. elekler arası ince agrega ve 0.075 mm. elek altı mineral filler olmak üzere, karışımda kullanılan agregalar üç kısma ayrılır. Bir önceki konuda ifade edilen tasarım agrega gradasyonuna göre; BSK numunesi içerisindeki agrega gruplarının oranının % 53 kaba agrega, % 41 ince agrega ve % 6 mineral filler olduğu görülmektedir. Tasarım süreci ile ilgili gerekli hesaplamaların yapılarak BSK numunelerine ait yoğunluk ve boşlukların belirlenmesi için, BSK'yı oluşturan agrega grubunun ve bitümün özgül ağırlıklarının

bilinmesi gerekmektedir. Agregalar karışım grubunun özgül ağırlığının belirlenmesi için de; kaba, ince agregalar ve mineral fillerin özgül ağırlıkları ayrı ayrı tespit edilmelidir. Agregalara uygulanan özgül ağırlık deney sonuçları, çizelge 4.42’de verilmiştir.

Çizelge 4.42. Agregaların hacim ve zahiri özgül ağırlıkları

Malzeme	Hacim Özgül Ağırlık	Zahiri Özgül Ağırlık
Kaba agregalar	2.656	2.720
İnce agregalar	2.620	2.715
Mineral filler	-	2.717
Agregalar karışım grubu	2.644	2.718

Tez kapsamındaki bitümlü bağlayıcı deneyleri sonucunda, seçilen PP–YYPE ve PP–PET katkılarının optimum oranları % 5 olarak bulunmuştur (Bu husus, sonraki konu olan deney parametreleri kısmında detaylı olarak anlatılacaktır).

Optimum oranların bulunmasıyla; saf ve % 5 PP–YYPE ile % 5 PP–PET katkılı bitümler kullanılarak, 3 farklı bitümlü bağlayıcı için Marshall karışım tasarım analizleri yapılmıştır. Bunun için, her bitümlü bağlayıcıya özgül ağırlık deneyi uygulanmıştır.

Yapılan özgül ağırlık deneyleriyle; saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET katkılı bitümlerin özgül ağırlık değerleri sırasıyla 1.032, 1.035 ve 1.037 olarak bulunmuştur.

4.5.3. BSK numuneleri için deney parametrelerinin belirlenmesi

PP–YYPE ve PP–PET katkıları ile hazırlanan katkılı bitümlerin RV deneyi sonuçları, tez metninin 4.bölümünde sırasıyla “4.2.3.1” ve “4.2.3.2” konu başlığı altında sunulmuştur. Bu katkıların bitüme hangi oranlarda eklenmesinin daha uygun olduğu da bu bölümde irdelenmiştir. Bu amaçla; PP–YYPE için “4.2.3.1” konu başlığı altında verilen “çizelge 4.7” ve PP–PET için “4.2.3.2” konu başlığı altında verilen “çizelge 4.9” yardımıyla, katkıların bitüm içerisindeki optimum oranları bulunmuştur.

Her bir katkı maddesi için ayrı ayrı olmak üzere, bitüme ilave edildiğinde en fazla davranış değişikliği oluşturan en düşük katkı maddesi oranı araştırılmış ve bu oranın ilgili katkı maddesi için bitüme ilave edilecek optimum miktar olduğu kabul edilmiştir. Optimum miktar belirlenirken bitüme ilave edilen katkı miktarındaki birim değişim için, viskozitede meydana gelen değişim yüzde (oransal) olarak hesaplanmıştır. Buradan hareketle, her iki katkı için de geçerli olmak üzere hesaplama aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan hesaplama yöntemi çizelge 4.43’de gösterilmiştir (Arslan, 2010).

Çizelge 4.43. PP–YYPE ve PP–PET katkıları için hesaplama aralıkları ve yöntemi (Arslan, 2010)

Hesaplama Aralıkları	Hesaplama Yöntemi
% 0 – % 2	(Saf ve % 2 katkılı bitümlerin viskoziteleri arasındaki yüzde değişim) / 2
% 2 – % 4	(% 2 ve % 4 katkılı bitümlerin viskoziteleri arasındaki yüzde değişim) / 2
% 4 – % 5	% 4 ve % 5 katkılı bitümlerin viskoziteleri arasındaki yüzde değişim
% 5 – % 6	% 5 ve % 6 katkılı bitümlerin viskoziteleri arasındaki yüzde değişim

Çizelge 4.43’de sunulan hesaplama aralıkları ve hesaplama yönteminden yola çıkarak, PP–YYPE katkılı bitümlerin viskozitelerindeki yüzde (oransal) değişimler, tüm sıcaklıklar olarak çizelge 4.44’de verilmiştir.

Çizelge 4.44. “PP–YYPE” katkısının ilavesiyle her bir aralıkta viskozite değişimi (%)

Sıcaklık (°C)	Hesaplama Aralıklarına Göre Viskozite Değişimi (%)			
	% 0 – % 2	% 2 – % 4	% 4 – % 5	% 5 – % 6
60	14.66	12.75	12.09	4.19
75	15.04	6.31	17.41	4.09
90	7.62	3.26	8.97	3.86
105	3.75	0.83	4.65	3.37
120	1.46	1.21	2.92	2.44
135	1.40	1.28	2.42	1.31
150	0.52	0.54	2.00	1.36
165	0.51	0.68	1.72	0.88

Hesaplama aralıkları dikkate alındığında, katkılı bitümlerin viskozitelerinde en yüksek değişimin olduğu durumlar koyu renkli olarak çizelge 4.44’de gösterilmiştir. Çizelge 4.44 incelendiğinde; 60 °C’de viskozitedeki en iyi değişimin % 2 katkı oranında olduğu fakat diğer % 4 ve % 5 oranlarının da bu değişime oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. 60 °C’deki viskozite dışında diğer 7 farklı sıcaklıktaki sonuçlara göre, en iyi değişimin “% 4 – % 5” aralığında olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle; bitüme % 5 oranında katkı ilavesi, viskozitede en yüksek değişime sebep olmuştur. Böylece; % 5 katkı oranı PP–YYPE katkısı için optimum oran olarak belirlenmiştir.

Eğer; viskozitede en yüksek değişim % 0 (saf–katkı ilavesiz) ve % 6 aralığında olmamış olsaydı veya bu değişim son aralık olan “% 5 – % 6” aralığında olmuş olsaydı, katkının daha fazla oranı için de RV deneyleri devam etmiş olacaktı. RV sonuçlarında görüleceği gibi; tüm katkıları (4 katkı) için geçerli olmak üzere, viskozite katkı oranına göre sürekli artan veya azalan şekilde bir durum göstermektedir. Dolayısıyla; viskozite değerleri, grafik üzerinde (tüm sıcaklıklardaki viskozite grafikleri 4 katkı için, bölüm “4.2.4” konu başlığı altında sunulmuştur) pik oluşturmamaktadır. Yani; grafik eğrileri, belli bir noktaya kadar artan ve sonra azalan veya tersi olarak bir durum sergilemediği ve böylelikle grafiklerde en yüksek veya en düşük noktalar olmadığı için; hesaplama

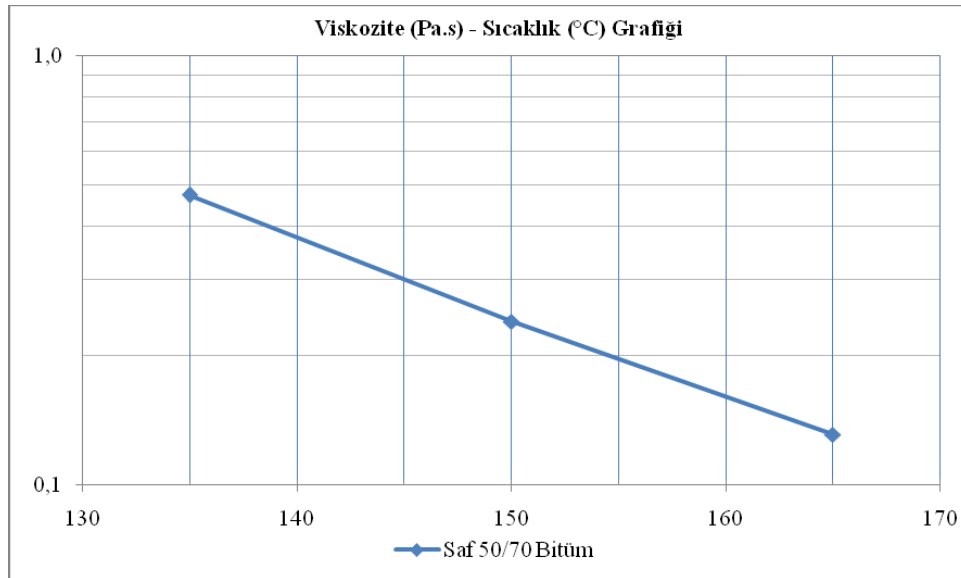
adımlarında ifade edildiği gibi, her bir katkı oranı aralığı olarak en yüksek değişimi oluşturan (grafikte artan veya azalan doğrunun en yüksek eğimli bölgesi) nokta katkının optimum oranı olarak düşünülebilir.

Çizelge 4.43’de sunulan hesaplama aralıkları ve hesaplama yönteminden yola çıkarak, PP–PET katkılı bitümlerin viskozitelerindeki yüzde değişimler çizelge 4.45’de verilmiştir. Çizelge 4.45 incelendiğinde; tüm sıcaklıklarda, viskozitedeki en yüksek değişimin “% 4 – % 5” aralığında olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Böylelikle; PP–PET katkısı için de % 5 katkı oranı, optimum oran olarak belirlenmiştir.

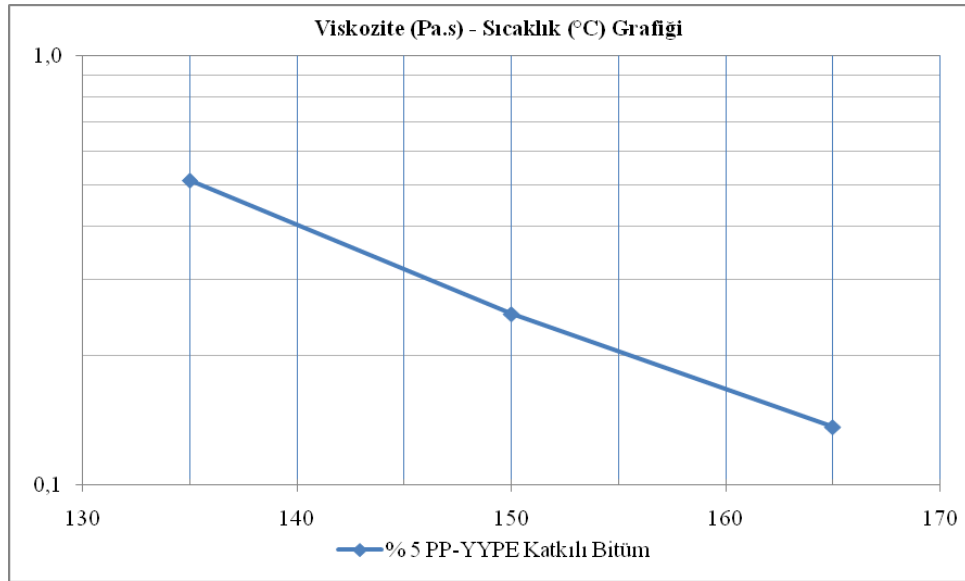
Çizelge 4.45. “PP–PET” katkısının ilavesiyle her bir aralıkta viskozite değişimi (%)

Sıcaklık (°C)	Hesaplama Aralıklarına Göre Viskozite Değişimi (%)			
	% 0 – % 2	% 2 – % 4	% 4 – % 5	% 5 – % 6
60	20.00	21.66	30.39	18.68
75	16.18	10.36	31.94	23.75
90	9.95	8.14	17.45	12.30
105	6.63	5.10	8.26	3.71
120	5.78	3.71	8.52	3.43
135	6.28	3.86	8.85	5.37
150	1.40	0.84	2.15	1.30
165	0.62	1.51	2.27	1.62

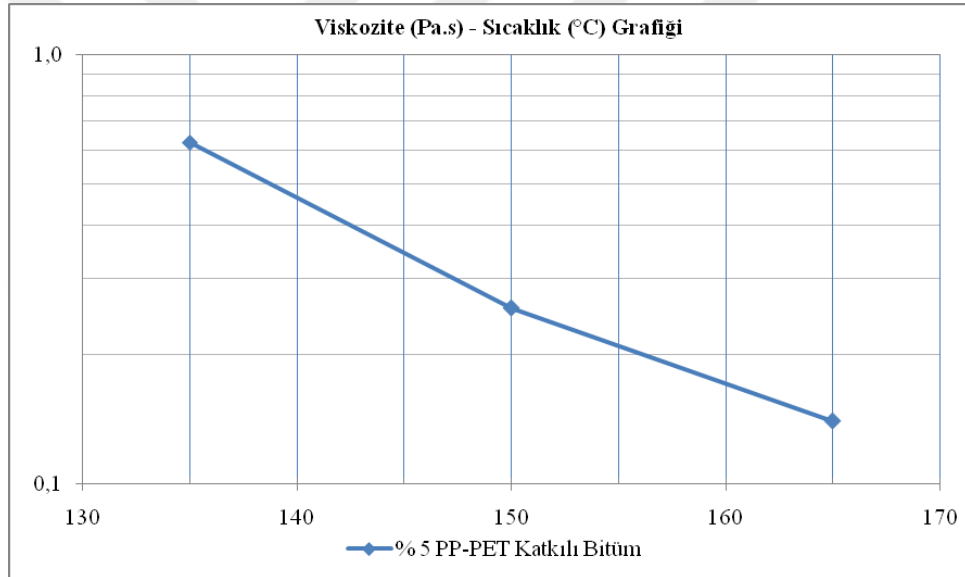
Marshall numunesi hazırlama sürecinde en önemli aşamalardan birisi, agrega ile bitümün doğru sıcaklıklarda karıştırılması ve sıkıştırılmasıdır. Bunun için, RV deneyleri ile karıştırma ve sıkıştırma viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklıklar belirlenmiştir.



Şekil 4.61. Saf bitümün 135, 150 ve 165 °C olarak viskozite–sıcaklık grafiği (Pa.s–°C)



Şekil 4.62. % 5 PP-YYPE katkılı bitümün 135, 150 ve 165 °C olarak viskozite-sıcaklık grafiği (Pa.s-°C)



Şekil 4.63. % 5 PP-PET katkılı bitümün 135, 150 ve 165 °C olarak viskozite-sıcaklık grafiği (Pa.s-°C)

Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63’de sırasıyla saf, % 5 PP-YYPE ve % 5 PP-PET katkılı bitümlere ait sıcaklık-viskozite grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklere göre bulunan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da çizelge 4.46’da sunulmuştur.

Çizelge 4.46. Saf, % 5 PP-YYPE ve PP-PET katkılı bitümlerin Marshall deney sıcaklıkları (°C)

Bitümlü Bağlayıcı	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)
Saf (50/70) Bitüm	156 – 162.5	144.5 – 149.0
% 5 PP-YYPE Katkılı	157 – 163.5	146.0 – 150.0
% 5 PP-PET Katkılı	158 – 164.0	147.0 – 150.5

Çizelge 4.46’da görüldüğü gibi, bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları birbirlerine yakındır. Çizelgede verilen sıcaklık aralıklarına dikkat edilerek, her bir bitüme ait deney numuneleri hazırlanmış ve Marshall tasarımları yapılmıştır.

4.5.4. BSK numunelerinin hazırlanması ve gerekli deneylerin uygulanması

Marshall deneyleri olarak; her bir bitüm için % 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 ve 5.5 oranları seçilmiş, her bir oranda 4’er numune olmak üzere bir Marshall serisi olarak 20 numune üretilmiştir. ASTM D6926 standardı doğrultusunda, bir bitüm kullanılarak hazırlanan sıkıştırılmış 20 Marshall BSK numunesi ile ASTM D6927 standardına göre uygulanan yüklemekten sonra bu BSK numunelerinin durumları şekil 4.64’de görülmektedir.

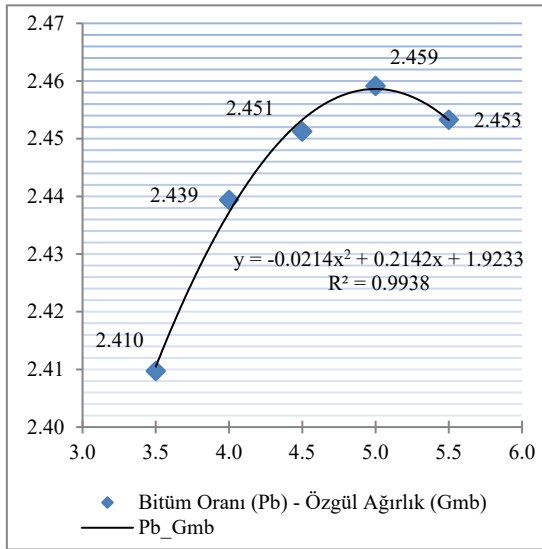
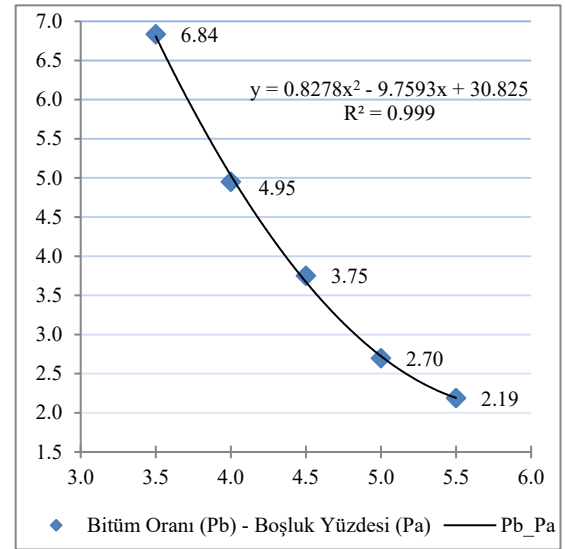
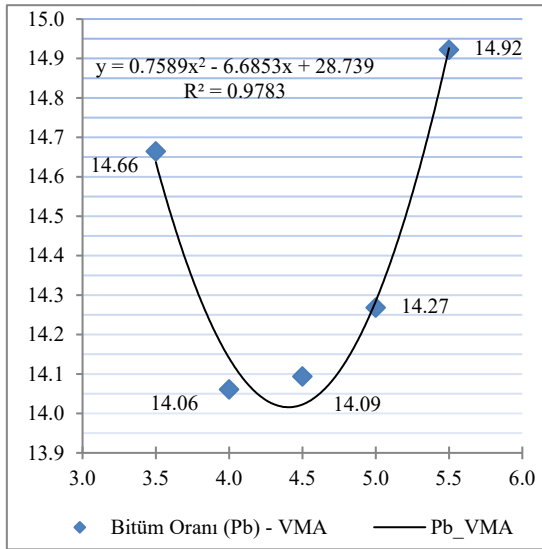
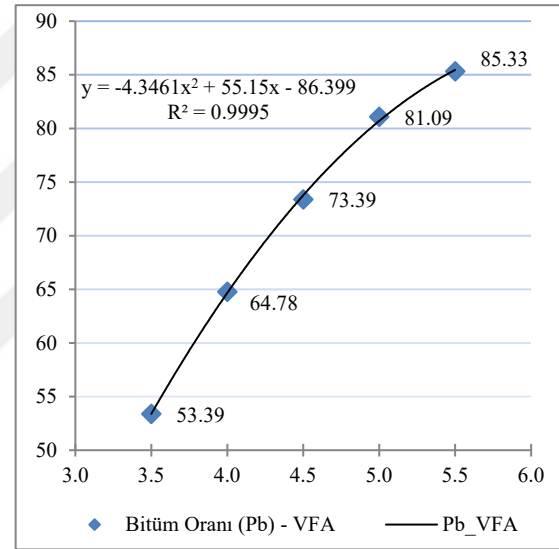
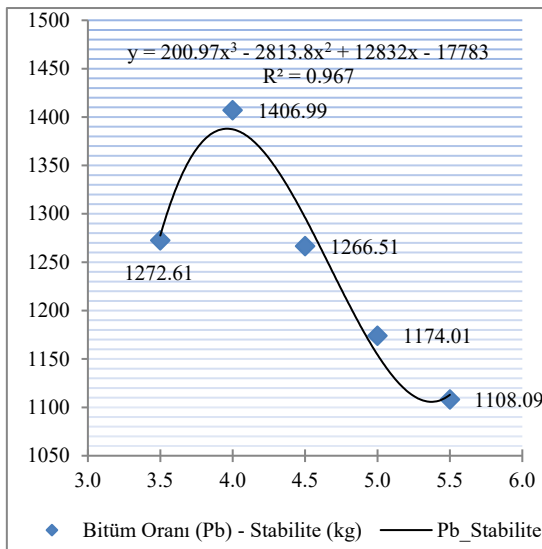
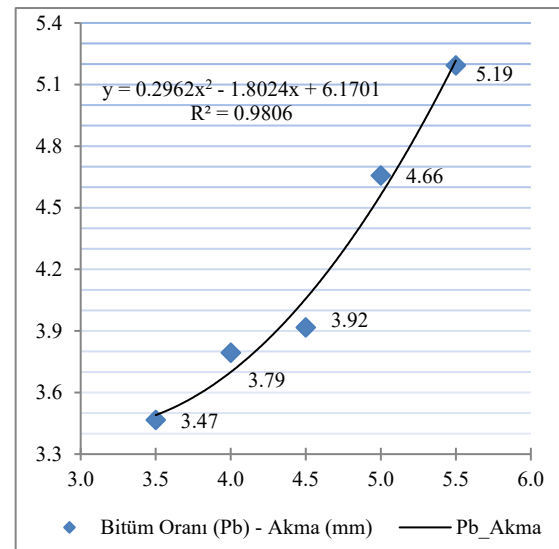


Şekil 4.64. Bir bitüme ait (örnek) deney numuneleri ve numunelerin yüklenmesinden sonraki durumu

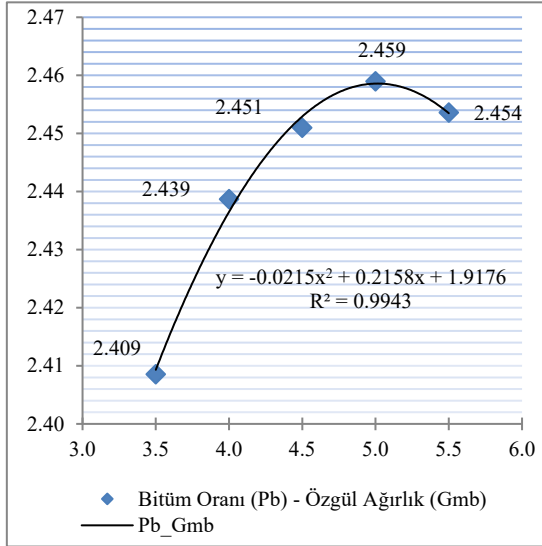
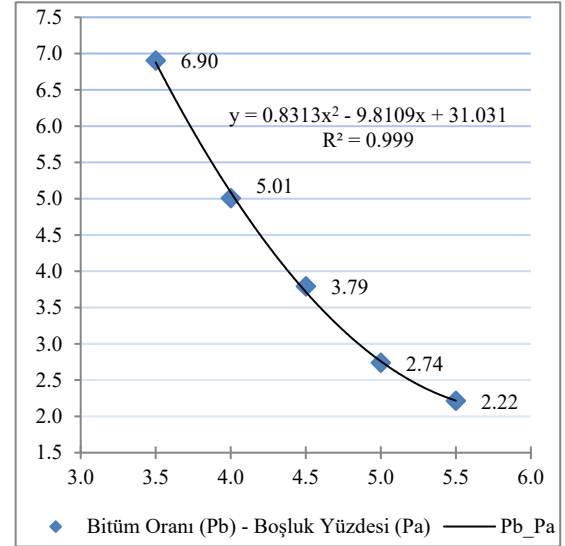
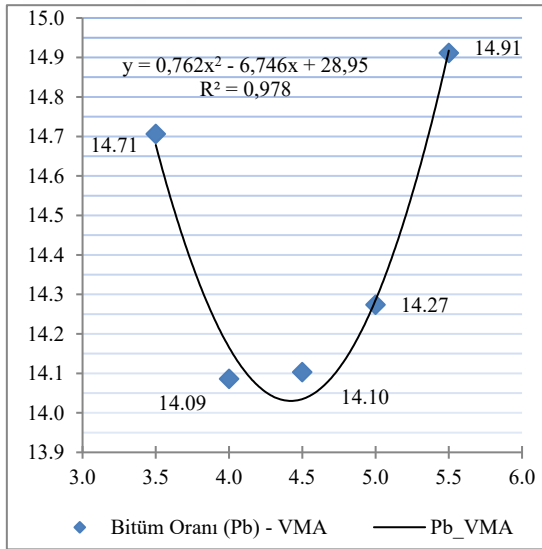
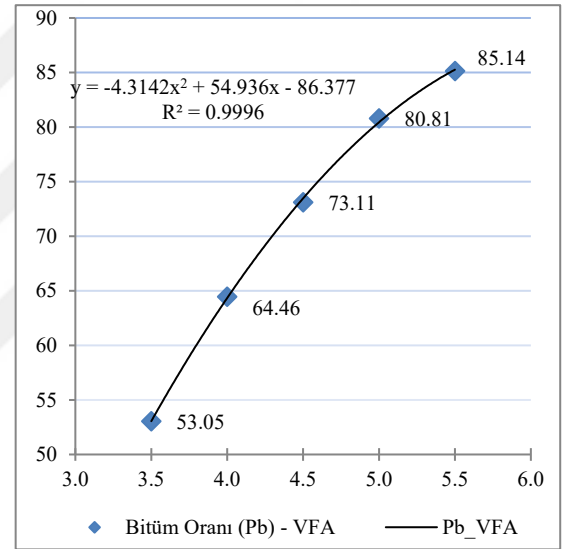
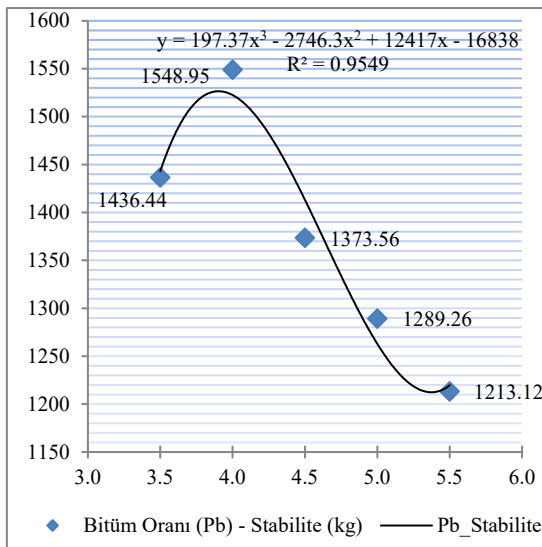
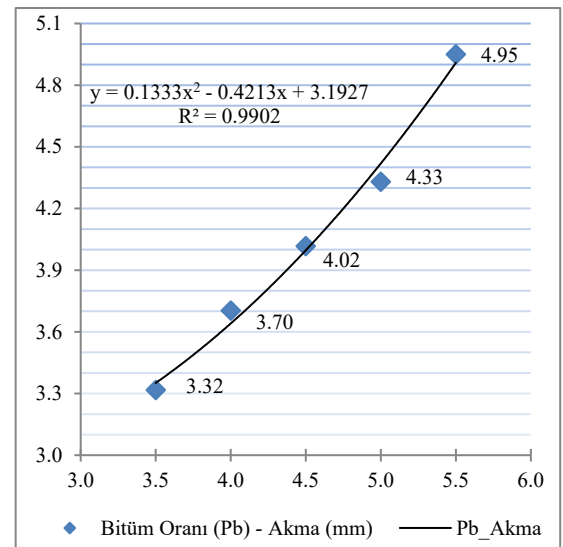
4.5.5. Deneyler sonrasında grafiklerin çizilmesi

Tasarım sürecindeki tüm deneyler sonucunda; her bir BSK numunesi olarak elde edilen veriler Marshall için hazırlanmış tabloya işlenmiş, tez metninin “3.2.3.1” konu başlığı altında sunulan formüller de kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve aynı bitüm oranındaki BSK numunelerine ait değerlerin ortalaması alınarak bitüm oranına (P_b) karşılık stabilite, akma, hacim özgül ağırlık (G_{mb}), boşluk yüzdesi (P_a), mineral agregalar arası boşluk (VMA), bitüm ile dolu boşluk (VFA) grafikleri çizilmiştir.

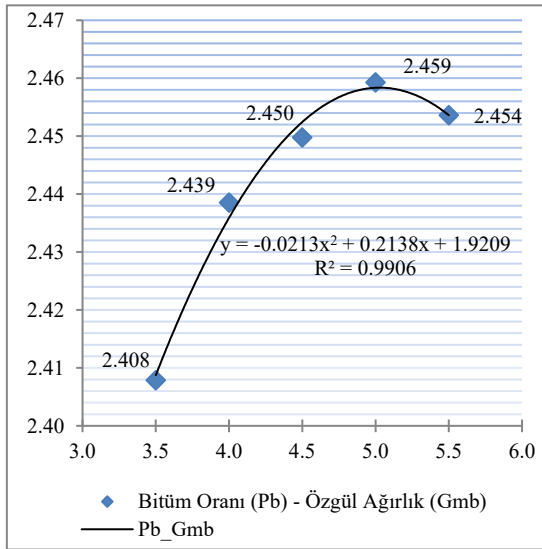
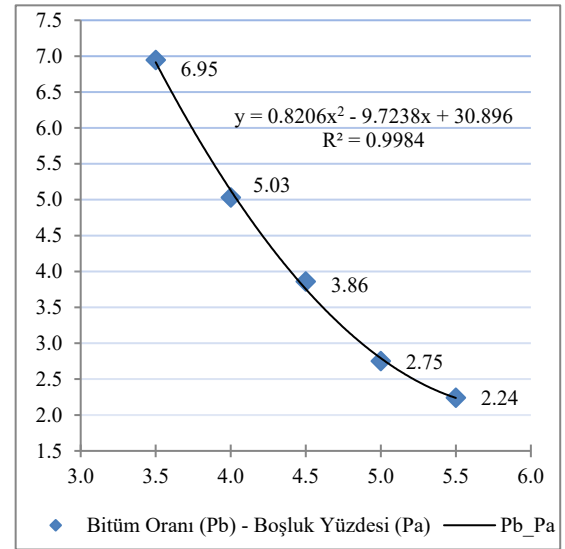
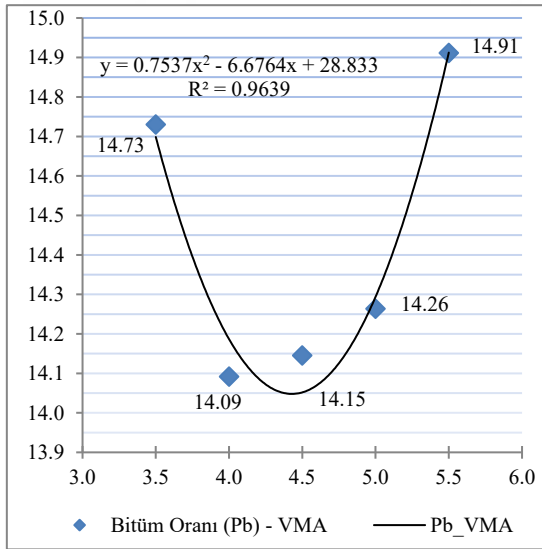
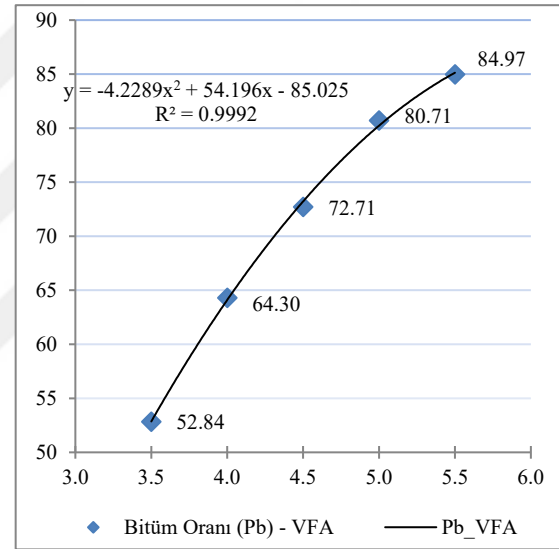
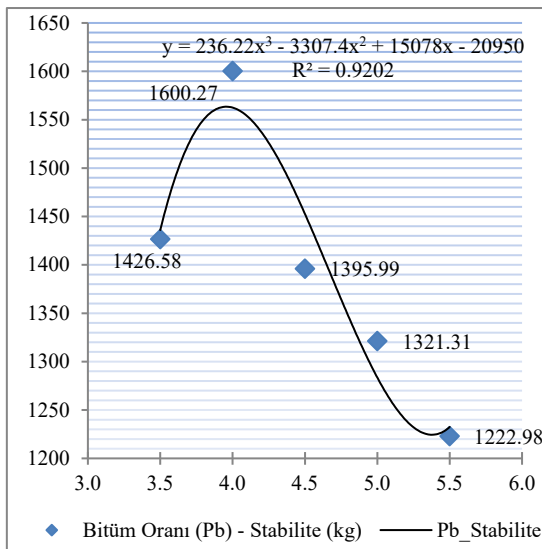
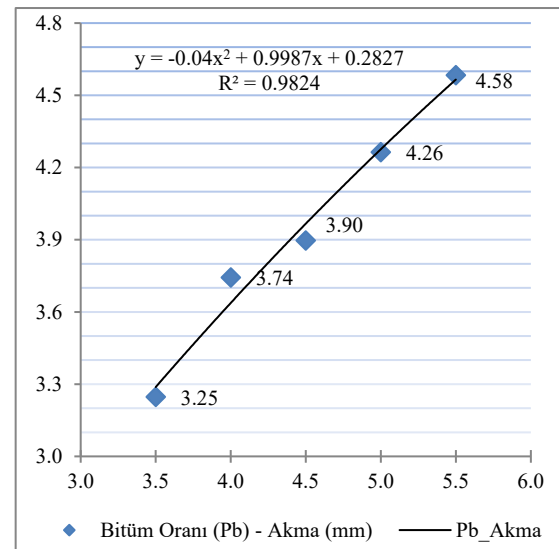
Saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET bitümleri kullanılarak hazırlanan karışım numunelerinin Marshall tasarımı sonuçlarına bağlı olarak çizilen grafikleri sırasıyla şekil 4.65, 4.66 ve 4.67’de sunulmuştur. Ayrıca, tasarım grafik değerleri saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET için sırasıyla çizelge 4.47, 4.48 ve 4.49’da verilmiştir.

a. Saf BSK "P_b-G_{mb}" grafiğib. Saf BSK "P_b-P_a" grafiğic. Saf BSK "P_b-VMA" grafiğid. Saf BSK "P_b-VFA" grafiğie. Saf BSK "P_b-Stabilite" grafiğif. Saf BSK "P_b-Akma" grafiği

Şekil 4.65. Marshall tasarımı sonucunda saf BSK'ya ait elde edilen grafikler

a. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-G_{mb}” grafiğib. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-P_a” grafiğic. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-VMA” grafiğid. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-VFA” grafiğie. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-Stabilité” grafiğif. % 5 PP-YYPE BSK “P_b-Akma” grafiği

Şekil 4.66. Marshall tasarımı sonucunda % 5 PP-YYPE katkılı BSK’ya ait elde edilen grafikler

a. % 5 PP-PET BSK "P_b-G_{mb}" grafiğib. % 5 PP-PET BSK "P_b-P_a" grafiğic. % 5 PP-PET BSK "P_b-VMA" grafiğid. % 5 PP-PET BSK "P_b-VFA" grafiğie. % 5 PP-PET BSK "P_b-Stabilite" grafiğif. % 5 PP-PET BSK "P_b-Akma" grafiği

Şekil 4.67. Marshall tasarımı sonucunda % 5 PP-PET katkılı BSK'ya ait elde edilen grafikler

Çizelge 4.47. Saf bitümle hazırlanan karışımın Marshall tasarım sonuçları (grafik değerleri)

P _b (%)	G _{mb}	P _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
3.5	2.410	6.84	14.66	53.39	1,272.61	3.47
4.0	2.439	4.95	14.06	64.78	1,406.99	3.79
4.5	2.451	3.75	14.09	73.39	1,266.51	3.92
5.0	2.459	2.70	14.27	81.09	1,174.01	4.66
5.5	2.453	2.19	14.92	85.33	1,108.09	5.19

Çizelge 4.48. % 5 PP–YYPE bitümle hazırlanan karışımın Marshall tasarım sonuçları (grafik değerleri)

P _b (%)	G _{mb}	P _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
3.5	2.409	6.90	14.71	53.05	1,436.44	3.32
4.0	2.439	5.01	14.09	64.46	1,548.95	3.70
4.5	2.451	3.79	14.10	73.11	1,373.56	4.02
5.0	2.459	2.74	14.27	80.81	1,289.26	4.33
5.5	2.454	2.22	14.91	85.14	1,213.12	4.95

Çizelge 4.49. % 5 PP–PET bitümle hazırlanan karışımın Marshall tasarım sonuçları (grafik değerleri)

P _b (%)	G _{mb}	P _a (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
3.5	2.408	6.95	14.73	52.84	1,426.58	3.25
4.0	2.439	5.03	14.09	64.30	1,600.27	3.74
4.5	2.450	3.86	14.15	72.71	1,395.99	3.90
5.0	2.459	2.75	14.26	80.71	1,321.31	4.26
5.5	2.454	2.24	14.91	84.97	1,222.98	4.58

Yoğun gradasyonlu (kullanılan eleklerin tümünde iyi dağılmış gradasyona sahip) BSK için, Marshall tasarımı grafik eğrilerinin makul derecede tutarlı bir seyir izlediği bulunmuştur ve genel olarak grafik eğilimleri şu şekildedir:

- ❖ Belli bir seviyeye kadar bitüm içeriği arttıkça stabilite değeri artar, ardından bitüm içeriği arttıkça stabilite azalır.
- ❖ Akma değeri, artan bitüm içeriğiyle birlikte sürekli olarak artar.
- ❖ Karışımın birim ağırlığı (G_{mb}) eğrisi, stabilite eğrisine benzer bir eğilim izler. Normalde (ancak her zaman değil) maksimum G_{mb}, maksimum stabiliteden biraz daha yüksek bitüm içeriğinde meydana gelir.
- ❖ Hava boşluk yüzdesi P_a, bitüm içeriğinin artmasıyla birlikte sürekli olarak azalır ve sonuçta minimum boşluk içeriğine yaklaşılır.
- ❖ Mineral agregalar arası boşluk yüzdesi VMA, genellikle (daha iyi sıkıştırma nedeniyle) minimum değere düşer ve daha sonra bitüm içeriğinin artmasıyla artar, çünkü agrega karışımındaki aşırı bağlayıcı tarafından itilmeye başlar.
- ❖ Bitüm ile doldurulmuş boşluk yüzdesi VFA, artan bitüm içeriğiyle birlikte sürekli artar, çünkü VMA bitümle doldurulmaktadır (Buncher ve ark., 2014).

Şekil 4.65 (saf), 4.66 (% 5 PP–YYPE) ve 4.67 (% 5 PP–PET) incelendiğinde; “a” olarak ifade edilen “ G_{mb} ” grafiklerinin, belli bir noktada pik yapacak şekilde eğilime sahip olduğu görülmektedir. BSK’dan beklenen özellikler olarak, “ G_{mb} ” değeri yüksek karışımların daha iyi davranış sergileyeceği düşüncesiyle, optimum bağlayıcı oranının tespitinde “max. G_{mb} ” değerine karşılık gelen bitüm oranı dikkate alınır.

Ayrıca; saf ve katkılı BSK karışımlarının G_{mb} değerlerinin aynı veya çok yakın olduğu, çizelge ve şekillerden görülmektedir. “4.5.3” konu içeriğinde belirtildiği gibi, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları saf ve katkılı bitümler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. BSK numunelerinin hazırlanması aşamasında sıcaklıklara titizlikle riayet gösterilmiştir. Dolayısıyla; tüm BSK numuneleri, bitümlerin aynı akıcılığa sahip oldukları durumda hazırlanmıştır. Agrega dağılımı (gradasyon) tüm BSK numuneleri için aynı olduğuna göre, bağlayıcının viskozluğu karışımın yoğunluğuna etki eden temel faktör olarak düşünülebilir. Buradan hareketle, “ G_{mb} ” değerlerinin tüm BSK numuneleri için aynı veya yakın seyirler göstermesi beklenebilir.

Şekil 4.65, 4.66 ve 4.67 incelendiğinde; “b” olarak tanımlanan “ P_a ” grafiklerinin bitüm oranına göre azalan ve “d” olarak tanımlanan “VFA” ile “f” olarak tanımlanan “akma” grafiklerinin bitüm oranına göre artan şekilde görüntü arz ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, katkılı bitümlerde akma değerlerinin saf bitüme göre azaldığı ve PP–PET katkılı BSK’nın en düşük akma değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bitümlü bağlayıcı deneylerinde, katkılı bitümlerin kıvamının saf bitüme göre daha sert ve PP–PET katkılı bitümün en sert kıvamdaki bitüm olduğu tespit edilmiştir. Akma değerlerinin bu şekilde düşmesinin nedeni olarak, bu durumlar söylenebilir.

Şekil 4.65, 4.66 ve 4.67 incelendiğinde; “c” olarak anılan “VMA” grafiklerinin beklenildiği gibi, azalan ve artan şekilde bir eğriye sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 4.65, 4.66 ve 4.67 incelendiğinde; “e” olarak isimlendirilen “stabilite” grafiklerinin “ G_{mb} ” grafiklerine benzer olarak, belli bir noktada pik yapacak şekilde bir eğriye sahip olduğu görülmektedir. Stabilitesi yüksek karışımların yük altında dirençleri daha iyi olacağı için, optimum bağlayıcı içeriğinin tespitinde “max. stabilite” değerine karşılık gelen bitüm oranı dikkate alınır.

Saf ve % 5 PP–YYPE ile % 5 PP–PET katkılı BSK’ların Marshall tasarımları sonucunda, hem her bir farklı bitümden oluşan karışımların tasarım analizleri yapılmış hem de analiz sonuçlarından elde edilen bulgularla karışımların stabilitesine ve hacimsel özelliklerine katkılarının etkisi incelenmiştir. Saf ve katkılı BSK’ların stabilite değerleri ve katkılı BSK stabilitelerindeki artış yüzdeleri çizelge 4.50’de verilmiştir.

Çizelge 4.50. Saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET BSK’ların Marshall stabilitesi ve stabilite değişimi

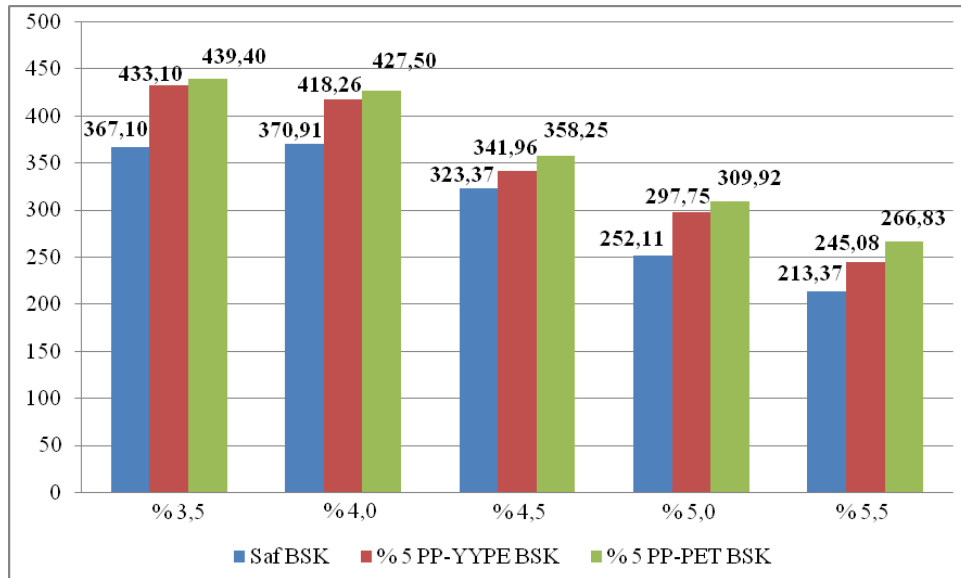
P _b (%)	Stabilite (kg)			Saf Bitüme Göre Değişim (%)	
	Saf	% 5 PP–YYPE	% 5 PP–PET	% 5 PP–YYPE	% 5 PP–PET
3.5	1,272.61	1,436.44	1,426.58	12.87	12.10
4.0	1,406.99	1,548.95	1,600.27	10.09	13.74
4.5	1,266.51	1,373.56	1,395.99	8.45	10.22
5.0	1,174.01	1,289.26	1,321.31	9.82	12.55
5.5	1,108.09	1,213.12	1,222.98	9.48	10.37

Yukarıda “G_{mb}” kısmında ifade edildiği gibi, hacimsel özellikler (G_{mb}, P_a, VMA, VFA) olarak, saf ve katkılı BSK’ların aynı veya yakın nitelikler taşıdığı görülmektedir. Yukarıda akma değerlendirmesinde, saf bitüme kıyasla katkılı BSK’ların daha az plastik akışa meyilli olduğu belirtilmiştir.

Marshall stabilitesi olarak da çizelge 4.50 incelendiğinde, saf BSK’ya kıyasla katkılı BSK’ların stabilitelerinin farklı seviyelerde arttığı gözlenmiştir. Aynı zamanda, stabiliteye etki anlamında katkılar yakın nitelikler göstermiş fakat PP–PET katkısında daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

% 5 PP–YYPE katkılı BSK’nın stabilitesinin saf BSK’ya göre % 8.45–12.87 oranları arasında arttığı ve en yüksek ile en düşük artışların sırasıyla % 3.5 ve % 4.5 bitüm içeriklerinde olduğu çizelge 4.50’den görülmektedir.

% 5 PP–PET katkılı BSK’nın stabilitesinin saf BSK’ya göre % 10.22–13.74 oranları arasında arttığı, en yüksek ve en düşük artışların sırasıyla % 4.0 ve % 4.5 bağlayıcı içeriklerinde olduğu çizelge 4.50’den görülmektedir.

**Şekil 4.68.** Saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET BSK’ların bitüm oranlarındaki MQ (kg/mm) değerleri

Karışım rijitliğinin ve BSK'nın yük altındaki deformasyon direncinin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerleri şekil 4.68'de verilmiştir. Her bir bitüm oranındaki (% 3.5–5.5) stabilite (kg) değerinin akma (mm) değerine bölünmesiyle, MQ (kg/mm) değerleri bulunmuştur. Stabilite, BSK'nın yük altındaki direncini ve akma ise, bu yük altındaki deformasyonu (plastik akışı) ifade ettiği için, daha yüksek MQ değeri rijit ve dirençli bir karışımı göstermektedir.

Şekil 4.68 incelendiğinde; stabilite değişimine benzer şekilde MQ değerlerinin % 5 PP–PET BSK'larda en yüksek ve saf BSK'larda en düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, katkılı BSK'ların saf BSK'ya kıyasla daha rijit ve dirençli oldukları ve PP–PET katkısının bu anlamda daha etkili olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

4.5.6. Optimum bitüm oranlarının bulunması

Marshall karışım tasarımı kapsamında çizilen ve bir önceki konuda gösterilen grafiklerde; maksimum stabilite, maksimum hacim özgül ağırlık, minimum VMA, % 4 boşluk yüzdesi ve % 70 VFA'ya karşılık gelen bitüm oranları 3 farklı BSK için de tespit edilmiştir. Bu değerlerin ortalaması alınarak; saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET katkılı BSK'ların her biri için optimum bitüm içerikleri hesaplanmıştır. Tüm BSK'ların toplu sonuçları ve her bir BSK için optimum bitüm oranı çizelge 4.51'de sunulmuştur.

Çizelge 4.51. Optimum bitüm oranları için grafik değerleri ve BSK optimum bitüm oranları

Tasarım Parametresi	Optimum Bitüm Koşulu	Saf BSK Optimum Koşul Bitüm Oranı (%)	% 5 PP–YYPE BSK Optimum Koşul Bitüm Oranı (%)	% 5 PP–PET BSK Optimum Koşul Bitüm Oranı (%)
Stabilite (kg)	Maksimum değer	3.965 (şekil 4.65 e)	3.901 (şekil 4.66 e)	3.959 (şekil 4.67 e)
G _{mb} (birimsiz)	Maksimum değer	5.095 (şekil 4.65 a)	5.119 (şekil 4.66 a)	5.071 (şekil 4.67 a)
VMA (%)	Minimum değer	4.410 (şekil 4.65 c)	4.427 (şekil 4.66 c)	4.433 (şekil 4.67 c)
P _a (%)	% 4 değer karşılığı	4.357 (şekil 4.65 b)	4.382 (şekil 4.66 b)	4.394 (şekil 4.67 b)
VFA (%)	% 70 değer karşılığı	4.278 (şekil 4.65 d)	4.296 (şekil 4.66 d)	4.310 (şekil 4.67 d)
Optimum oran (%)	Ortalama değer	4.421* (5'inin ortalaması)	4.425* (5'inin ortalaması)	4.433* (5'inin ortalaması)

*: Yüzde (%) birimi, toplam karışım ağırlığıdır. Optimum bitüm oranları karışım ağırlığının yüzdesidir.

Her bir BSK grubu için tespit edilen optimum bitüm oranlarında, çizelge 4.52'de sunulan “KGM Teknik Şartname (2013)” kriterleri sağlanmalıdır. Böylece; yapılan

analizler sonunda, tasarım bağlayıcı içeriklerindeki değerler ilgili grafiklerden tespit edilmiş ve şartname kriterlerinin sağlanma durumu kontrol edilmiştir. Tasarım bitüm içeriğine karşılık grafiklerden okunan parametre değerleri ve KGM_Şartname kriterleri, çizelge 4.52’de gösterilmiştir.

Çizelgede 1.sütunda saf BSK grafiklerinde (şekil 4.65), optimum bağlayıcı oranı olarak bulunan (çizelge 4.51–% 4.421) değere karşılık gelen; 2.sütunda % 5 PP–YYPE BSK grafiklerinde (şekil 4.66), optimum bitüm oranı olarak bulunan (çizelge 4.51–% 4.425) değere karşılık gelen; 3.sütunda % 5 PP–PET BSK grafiklerinde (şekil 4.67), optimum bitüm oranı olarak bulunan (çizelge 4.51–% 4.433) değere karşılık gelen tasarım parametre değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.52. Optimum bitüm oranlarındaki grafik değerleri ve KGM_Şartname limitleri

Tasarım Parametre	Saf BSK Optimum Bitüm Oranındaki Değer	% 5 PP–YYPE BSK Optimum Bitüm Oranındaki Değer	% 5 PP–PET BSK Optimum Bitüm Oranındaki Değer	KGM_Şartname BSK Kriterleri (Aşınma Tip 1)
Stabilite (kg)	1,326.21 (şekil 4.65 e)	1,433.75 (şekil 4.66 e)	1,479.77 (şekil 4.67 e)	900– (Min.–Max.)
VMA (%)	14.01 (şekil 4.65 c)	14.02 (şekil 4.66 c)	14.03 (şekil 4.67 c)	14–16 (Min.–Max.)
P _a (%)	3.84 (şekil 4.65 b)	3.89 (şekil 4.66 b)	3.90 (şekil 4.67 b)	3–5 (Min.–Max.)
VFA (%)	72.48 (şekil 4.65 d)	72.22 (şekil 4.66 d)	72.12 (şekil 4.67 d)	65–75 (Min.–Max.)
Akma (mm)	3.99 (şekil 4.65 f)	3.93 (şekil 4.66 f)	3.92 (şekil 4.67 f)	2–4 (Min.–Max.)

Tüm deney parametrelerinin şartname kriterlerini sağladığı, çizelge 4.52’den anlaşılmaktadır. Ayrıca; tüm BSK grafikleri stabilite değerleri olarak incelendiğinde, stabilitelerin 900 kg üzeri olduğu da gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.52’de “P_a” ve “VFA” olarak sırasıyla “3–5” ve “65–75” şeklinde ifade edilen şartname kriterlerinin orta nokta değerleri alınarak, BSK’ların optimum (tasarım) bitüm oranları (içerikleri) belirlenmişti (çizelge 4.51’de görüldüğü gibi). Nitekim, tez metninin “3.2.3.1.1.2” konu başlığı altında da ifade edildiği gibi, % 4 hava boşluğu BSK için ideal bir değer olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 4.52 incelendiğinde; saf ve katkılı BSK’ların tasarım bitüm içeriklerine karşılık gelen “P_a” ve “VFA” değerlerinin, şartname limitlerinin orta noktalarına yakın ideal değerler olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.52 incelendiğinde; “VMA” ve “akma” olarak şartname kriterlerinin sağlandığı fakat sonuçların sınırlara yaklaştığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, katkılı BSK’larda akma değerlerinin daha ideal durumda olduğu da görülmektedir.

Şekil 4.65, 4.66 ve 4.67’de “c” olarak adlandırılan grafiklerdeki “VMA” eğilim çizgilerinin, şartname limiti olan 14.0 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. VMA ile ilgili olarak: saf BSK için seçilen tasarım bitüm içeriğinin (% 4.421), U şekilli grafiğin (şekil 4.65_c) minimum noktasının (çizelge 4.51-% 4.410) çok az sağında olduğu; % 5 PP–YYPE BSK için seçilen bitüm içeriğinin (% 4.425), U şekilli grafiğin (şekil 4.66_c) minimum noktasının (çizelge 4.51-% 4.427) çok az solunda olduğu; % 5 PP–PET BSK için seçilen optimum bağlayıcı içeriğinin (% 4.433), “U” şekilli grafiğin (şekil 4.67_c) minimum noktası (çizelge 4.51-% 4.433) olduğu görülmüştür.

Böylece; BSK’lar için seçilen tasarım bitüm içeriklerinin, VMA eğrilerinin minimum noktasındaki veya minimum noktanın sağ ve sol tarafına çok yakın noktadaki bitüm içerikleri olduğu görülmüştür. VMA eğrilerinin sağ veya sol taraflarından daha fazla uzaklaşmamasından dolayı, seçilen tasarım bitüm içeriklerinin ideal olduğu düşünülebilir. Esasen, seçilen bitüm içeriğinin minimum VMA’nın biraz solunda olması daha idealdir. Buradan hareketle; VMA açısından değerlendirildiğinde, % 5 PP–YYPE BSK optimum bitüm içeriği olarak ideale daha çok yaklaşmıştır.

4.6. Tekerlek İzi Deneyinin Uygulanması ve Sonuçları

Saf, % 5 PP–YYPE katkılı ve % 5 PP–PET katkılı olmak üzere; 3 farklı bitüm olarak Marshall karışım tasarımı sonunda bulunan ve çizelge 4.51’de sunulan optimum bitüm oranlarında (sırasıyla % 4.421, 4.425 ve 4.433), “Superpave Gyratory Compactor (SGC)” cihazı ile BSK numuneleri hazırlanmış ve bu numunelere tekerlek izi deneyi yapılmıştır. SGC cihazında her bir dönüşte numune yüksekliği ölçülebilmektedir. Bu özellikten dolayı, BSK numunesinin sıkışabilirlik durumu yani işlenebilirlik hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Buradan hareketle; saf ve katkılı bitümlerle hazırlanan numunelere, hem tekerlek izi deneyi uygulanarak katkıların performansları incelenmiş hem de SGC’den alınan verilerle katkıların işlenebilirliğe etkileri değerlendirilmiştir.

4.6.1. BSK numunelerinin hazırlanması ve işlenebilirlik

Tekerlek izi deneyleri kapsamında, SGC cihazında numunelerin hazırlanması için; BSK’yi oluşturan agrega karışımı içindeki kaba ile ince agrega ve mineral fillerin yüzdelerinin ve özgül ağırlıklarının, BSK’daki bağlayıcı yüzdesi ve özgül ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Böylelikle; cihazın bilgisayar programına, Marshall tasarımı

konusunda sunulan agregâ ve bitümle ilgili veriler (“4.5.2” konu başlığı) ve sıkıştırma ile ilgili parametreler girilmiştir.

Numune hazırlama sürecinde en önemli aşamalardan birisi, agregâ ile bitümün doğru sıcaklıklarda karıştırılması ve sıkıştırılmasıdır. Dolayısıyla; Marshall tasarımında numune hazırlanması ile ilgili belirtilen hususlar ve “4.5.3” konu başlığı altında sunulan deney parametreleri (her bir bitüm için sıcaklıklar), SGC cihazı ile karışım numunesi üretme aşamasında da geçerlidir.

Marshall karışım tasarımında seçilen agregâ gradasyonuna (“4.5.1” konu başlığı) göre hazırlanan 4,500 gr. agregâ karışımı ve 3 farklı bağlayıcıyla (optimum bitüm içeriklerindeki bitüm miktarı) tekerlek izi deneyleri için BSK numuneleri hazırlanmıştır.

BSK numuneleri hazırlandıktan sonra, ilgili kalıba göre kesilmiş ve tekerlek izi deneyine hazır hale getirilmiştir. Sıkıştırma parametreleri (sıkıştırma hızı, basınç, dönüş açısı, vb.) sağlanarak hazırlanan ve deney kalıbına göre kesilen numuneler şekil 4.69’da görülmektedir. Şekilde görülen 1 ve 2 saf, 3 ve 4 % 5 PP–YYPE katkı, 5 ve 6 % 5 PP–PET katkı BSK numunelerini ifade etmektedir.



a. Tekerlek izi deneyi için hazırlanan numuneler

b. Deney kalıbına göre numunenin kesilmesi

Şekil 4.69. Saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET bitümle hazırlanan numuneler ve kesilmiş numune örneği

Tekerlek izi için hazırlanan numuneler, deney kalıbı boyutlarına göre ortadan kesilmiş ve sonra kalıp kesitine uygun olarak şekil 4.69.b’de görüldüğü gibi, ortadan kesilen iki parça kenarlarından kesilmiştir. Tekerlek izi deneylerinin yanı sıra, SGC cihazının her bir dönüş sayısında hacimsel değerlerin tespit edilmesiyle, numunelere ait veriler değerlendirilmiştir.

BSK'nın bileşenlerine ait deneysel veriler (ölgül ağırlıklar, bileşen yüzdeleri vb.), sıkıştırma öncesi cihazın yazılımına işlendiği için, SGC otomatik olarak deney öncesi “ G_{mm} ” değerini hesaplamaktadır. Ayrıca, kalıba yerleştirilen numunenin kütlesi deney öncesi sisteme girilmekte ve her bir dönüşte standart çapa sahip kalıp içindeki numune yüksekliğinin tespiti de, hacim değerini elde etmemizi sağlamaktadır. Buradan hareketle, numunenin yoğunluk tespiti de yapılmış olur. Başka bir deyişle, bu “ G_{mb} ” değerinin hesaplandığı anlamına gelir. Sonuç olarak; sıkıştırma aşamasındaki her bir dönüşte, numunenin hacim ölgül ağırlık (G_{mb}) değeri, maksimum (teorik) ölgül ağırlık (G_{mm}) değerinin yüzdesi olarak SGC cihazının yazılımı tarafından kaydedilmektedir.

Tez metninin 3.bölümü “3.2.3.2” konusunda; SGC sıkıştırma seviyeleri (sayısı) olarak farklı dönüş sayıları şeklinde “ N_{ini} , N_{des} , N_{max} ” terimleri tanımlanmış ve BSK'nın sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsü olarak, “ N_{ini} ” sayısının dikkate alındığı ifade edilmiştir. Ayrıca; konu içeriğinde sunulan çizelge 3.7'deki tasarım trafik değerlerine (eşdeğer dingil yükü) göre, “ N_{ini} , N_{des} , N_{max} ” sayılarının bulunabileceği de belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, çizelge 3.7'de 3.satırda verilen tasarım kriterleri dikkate alınmış ve “ N_{ini} ” değeri 8 olarak tespit edilmiştir. BSK numunelerinin sıkıştırılabilirlik (işlenebilirlik) durumlarının incelenmesi amacıyla, “ $N_{ini} = 8$ ” dönüş sayısına kadar elde edilen deneysel sonuçlar çizelge 4.53'de sunulmuştur.

Çizelge 4.53. Saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET BSK'ların “ G_{mb} (% G_{mm})” değerleri (“ $N_{ini} = 8$ ”)

Dönüş Sayısı	Her bir dönüşteki hacim ölgül ağırlık (G_{mb}) (% G_{mm})		
	Saf BSK	% 5 PP–YYPE BSK	% 5 PP–PET BSK
1	77.45	78.29	78.69
2	80.12	80.99	81.22
3	81.86	82.60	82.83
4	83.17	83.82	84.05
5	84.23	84.80	85.03
6	85.11	85.62	85.86
7	85.86	86.33	86.57
8	86.53	86.94	87.20

Çizelge 4.53 incelendiğinde; tüm dönüş sayıları için geçerli olmak üzere, katkılı BSK'ların “ G_{mb} ” değerlerinin arttığı ve bu değerlerin küçükten büyüğe doğru saf, % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET şeklinde sıralandığı görülmektedir. Fakat “ G_{mb} ” değerlerinin tüm BSK'larda birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Marshall tasarımı ile de, tüm BSK'larda yakın birim ağırlık değerleri elde edilmiş ve numunelerin hacimsel özelliklerinin (G_{mb} , P_a , VMA, VFA) benzer nitelikler taşıdığı bulgularına ulaşılmıştır.

Çizelge 4.53’de görülen numunelere ait birbirine yakın deney sonuçları, bu tespiti destekleyen nitelik taşımaktadır.

“ G_{mb} ” değerinin artması, numunenin birim hacimde daha fazla kütle içerdiğini gösterir. Yani; birim kütle anlamında numune daha az hacme sahip olur, böylelikle sabit çaptaki kalıp içinde BSK numunesi daha az yüksekliğe sahip olur. Bu durum, aynı SGC parametrelerinde kalıp içindeki BSK numunesinin daha iyi yerleştiği (sıkıştırıldığı) anlamına gelir. Kısaca; “ G_{mb} ”nin artması ile numunenin işlenebilirliği de artar. Sonuç olarak, katkıların işlenebilirliğe kısmi de olsa, olumlu etkiler yaptığı görülmüştür.

4.6.2. Tekerlek izi deney sonuçları

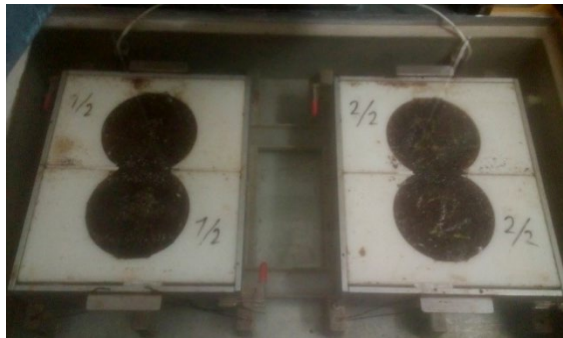


a. 50 °C sıcaklığa ulaşma ve koşullandırma süreci



b. Numune üzerinden tekerlek geçişi

Şekil 4.70. “Sıcaklık düzenleme ile 50 °C’de koşullandırma aşaması” ve “tekerlek geçişi aşaması”



a. Tekerlek izi deneyi öncesi kalıplanmış numune



b. Tekerlek izi deneyi sonrası numunelerin durumu

Şekil 4.71. HWT kalıbı ve deney kabini içine yerleştirilmiş numunelerin deney öncesi ve sonrası durumu

Numunelerin HWT (Hamburg tekerlek izi testi) deney kalıplarına göre kesilip, yerleştirilmesi ve kalıpların da kabin içine yerleştirilmesiyle deney başlatılmıştır.

Kalıba ve deney cihazına yerleştirilen deney numunelerinin, “sıcaklık düzenleme ve koşullandırma sırasındaki” ve “numuneler üzerinden tekerlek geçişi aşamasındaki”

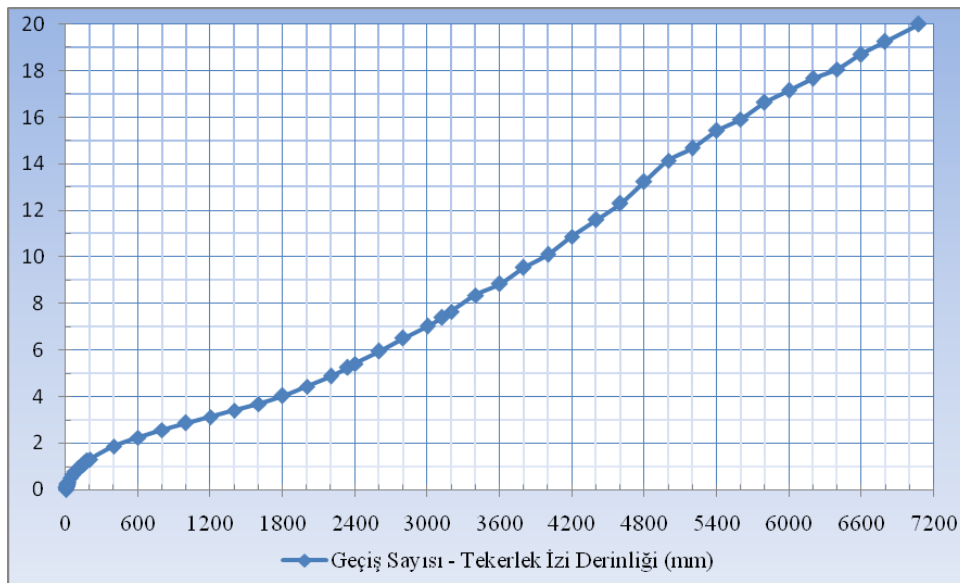
görüntüleri Şekil 4.70’de verilmiştir. Kalıp içindeki numunelerin, tekerlek izi deneyinin uygulanmasından “önceki” ve “sonraki” durumu da şekil 4.71’de gösterilmiştir.

Saf ve % 5 PP–YYPE ile % 5 PP–PET katkılı bitüm olmak üzere 3 farklı bitümle ve her bir bitümün optimum oranında hazırlanan BSK numunelerine, AASHTO T324 kriterlerine göre uygulanan tekerlek izi deneylerinin sonuçları çizelge 4.54’de sunulmuştur. 50 °C sıcaklık ve 25 devir/dakika tekerlek geçiş hızı ile yapılan deneyler neticesinde, tüm BSK numunelerinde 10,000 devire (20,000 geçişe) ulaşılmadan 20 mm deformasyonla deneylerin sonlandığı çizelgeden görülmektedir.

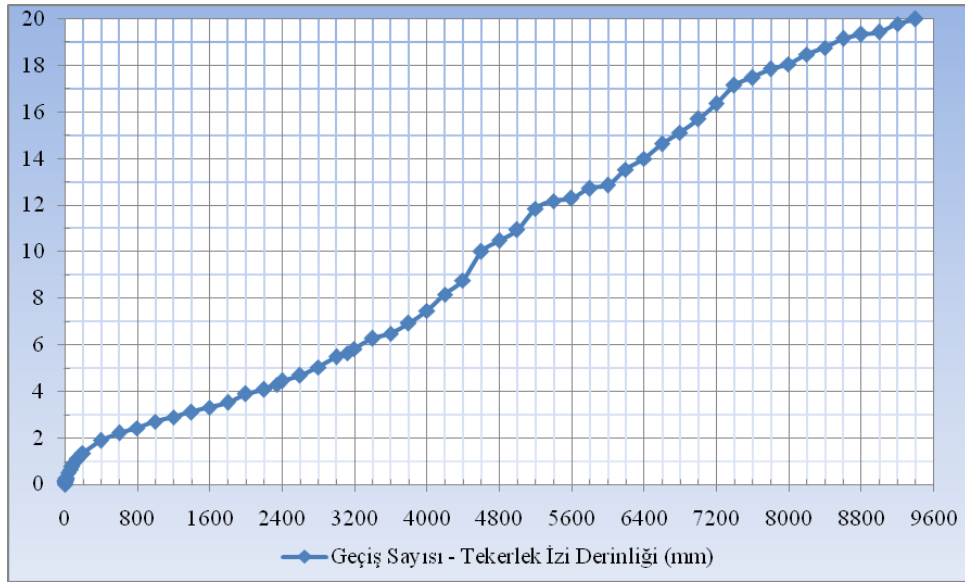
Çizelge 4.54. Saf ve % 5 PP– YYPE ile % 5 PP– PET katkılı BSK’ların tekerlek izi derinliği (mm.)

Karışım tipi	Tekerlek geçiş sayısındaki tekerlek izi derinliği (mm.)									
	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
Saf	2.87	4.44	7.03	10.1	14.1	17.2	19.8	-	-	-
% 5 PP–YYPE	2.69	3.88	5.48	7.46	10.9	12.9	15.7	18.1	19.4	-
% 5 PP–PET	2.69	3.70	5.18	7.42	10.4	12.5	14.3	15.9	17.8	19.5

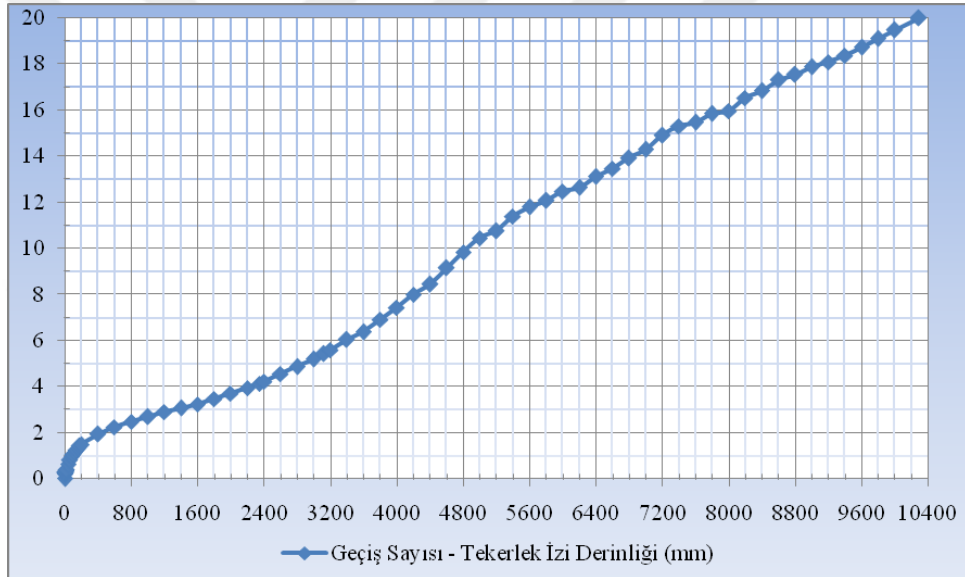
Çizelge 4.54 incelendiğinde; saf BSK’nın 7,000 geçiş, % 5 PP–YYPE BSK’nın 9,000 geçiş ve % 5 PP–PET BSK’nın ise 10,000 geçiş sonrasında 20 mm. tekerlek izi derinliğine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca; her 1,000 geçiş olarak oluşan tekerlek izi derinliklerinin büyükten küçüğe doğru saf, % 5 PP–YYPE ve % PP–PET BSK olarak sıralandığı anlaşılmaktadır. Saf ve % 5 PP–YYPE ile % 5 PP–PET katkılı BSK’larda oluşan tekerlek izi derinlikleri, “tekerlek geçiş sayısı–tekerlek izi derinliği (mm.)” olarak grafik eğrileri şeklinde sırasıyla şekil 4.72, 4.73 ve 4.74’de gösterilmiştir.



Şekil 4.72. Saf (50/70) BSK tekerlek geçiş–tekerlek izi derinliği (mm.) grafiği



Şekil 4.73. % 5 PP-YYPE katkılı BSK tekerlek geçişi-tekerlek izi derinliği (mm.) grafiği



Şekil 4.74. % 5 PP-PET katkılı BSK tekerlek geçişi-tekerlek izi derinliği (mm.) grafiği

Şekiller incelendiğinde; saf BSK numunelerinde 7,077, % 5 PP-YYPE katkılı BSK numunelerinde 9,399 ve % 5 PP-PET katkılı BSK numunelerinde ise 10,292 tekerlek geçişinde 20 mm. tekerlek izi derinliğinin oluştuğu bulgularına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar ışığında, PP-PET katkısının tekerlek izi performansını % 45.43 ve PP-YYPE katkısının da BSK tekerlek izi performansını % 32.81 oranında artırdığı ve katkıların BSK'nın kalıcı deformasyon direncine oldukça olumlu etkiler yaptığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PP, YYPE ve PET plastik atıkların belirli oranlarda karıştırılıp, ikili veya üçlü olarak birlikte piroliz işlemlerinin yapıldığı ve katkıların elde edildiği; bu katkılarla hazırlanan modifiye bitümlere ve BSK'lara bazı deneylerin uygulandığı ve katkıların bitüm ile BSK'ya olan etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, aşağıda genel hatlarıyla maddeler halinde sunulan şu bulgulara ulaşılmıştır:

- ✓ Tüm plastik karışım gruplarına uygulanan piroliz deneyleri sonucunda; tez çalışması kapsamında elde edilen PP–YYPE, PP–PET, YYPE–PET ve PP–YYPE–PET katkılarının (piroliz katı ürünleri) verimleri sırasıyla % 56.04, % 51.23, % 40.28 ve % 50.00 olarak tespit edilmiştir. Böylelikle, piroliz ürün eldesi anlamında en verimli katkının PP–YYPE olduğu görülmüştür.
- ✓ Saf bitüme kıyasla, tüm katkılı bitümlerde penetrasyon değerlerinin azaldığı ve yumuşama noktalarının arttığı gözlenmiştir. Katkıların yükselen oranları olarak da, bu artışların ve azalışların devam ettiği görülmüştür. Bağlayıcı kıvamlılıklarının yumuşaktan sert doğru saf, YYPE–PET, PP–YYPE–PET, PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümler şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir.
- ✓ Saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerde PI değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Böylece, katkıların bitümün sıcaklık hassasiyetini azalttığı ve hassasiyetteki azalmanın artan katkı miktarı ile arttığı görülmüştür.
- Tüm katkılı bitümlerde 60 ve 75 °C'deki viskozitelerin, saf bitüme kıyasla oldukça yüksek oranlarda arttığı ve bu artışların katkıların yükselen oranları ile katlanarak ilerlediği görülmüştür. 60 ve 75 °C'deki RV deneyleriyle, tüm katkı oranları da incelendiğinde, viskoziteyi en yüksek ve en düşük seviyede artıran katkılar sırasıyla PP–PET ve PP–YYPE olarak tespit edilmiştir.
- YYPE–PET katkılı bitüm dışında tüm katkılı bitümlerde 90 ve 105 °C'deki viskozitelerin, saf bitüme göre arttığı ve bu artışların katkıların ilave oranları ile devam ettiği görülmüştür. Viskoziteyi artırma anlamında; 90 °C'de en yüksek ve en düşük olan katkıların sırasıyla PP–PET ve PP–YYPE katkıları olduğu tespit edilmiş ve 105 °C'de PP–YYPE–PET katkılı bitümlerde yakın olmakla birlikte, PP–YYPE katkılı bitümlere göre viskoziteler azalmıştır.
- 120, 135, 150 ve 165 °C'deki viskoziteler olarak; saf bitüme kıyasla, sadece PP–PET ve PP–YYPE katkılı bitümlerde artışların olduğu ve bu artışların katkıların ilave oranları ile devam ettiği görülmüştür. Bu sıcaklıklarda, diğer

sıcaklıklara göre, her iki katkılı bitüm için de geçerli olmak üzere, viskozite artışlarının yüksek oranlarda olmadığı fakat 120 ve 135 °C'deki viskoziteler olarak, PP–PET katkılı bitümlerin artışının iyi seviyede olduğu görülmüştür.

- Tüm sıcaklıklardaki viskoziteler incelendiğinde; saf bitüme göre viskozite değişim oranlarının (yüzdelere) sıcaklık yükseldikçe azaldığı görülmüştür. Yani, sıcaklık yükseldikçe katkılı bitümlerin viskoziteleri saf bitüme gittikçe yaklaşmıştır. Böylelikle, 60 ve 75 °C gibi kaplamanın hizmet aşamasındaki sıcaklıklarla 150 ve 165 °C gibi kaplamanın üretim (karıştırma ve sıkıştırma) aşamasındaki sıcaklıklardaki değişimlerin oldukça farklı olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Bu durum; BSK hizmeti aşamasında yüksek sıcaklıklarda katkılı bitümlerin iyi performans göstereceği ve BSK üretimi aşamasında yaşlanma, enerji sarfıyatı ve işlenebilirlik gibi ilave problemlerin fazla oluşmayacağı olarak yorumlanmıştır. Bu özellik, RV deneyleri olarak genel anlamda, tüm katkılar için oldukça olumlu bir nitelik olarak değerlendirilmiştir.
- Katkılarının incelenmesi aşaması olarak: katkıların verimleri ve modifikasyon, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri ile bitümün kıvamına yapılan etkiler ve RV deneyleriyle 60–165 °C sıcaklıklar olarak elde edilen viskozite değerleri açısından; çalışmanın daha sonraki süreçleri için PP–PET ve PP–YYPE katkılarının seçimi uygun olarak değerlendirilmiştir. Bu katkıların, bitüm içindeki optimum oranları (her iki katkı için) % 5 olarak bulunmuştur.
- Saf, PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerde, kısa dönem yaşlandırma ile oldukça az kütle kaybı değerleri elde edilmiş ve ASTM D6373 standardında belirtilen gerekli kriterlerin (< % 1.0) sağlandığı tespit edilmiştir.
- PP–YYPE katkılı bitümlerin saf bitüme kıyasla; DSR deneyi ile elde edilen “ G^* , G' , G'' , $G^*/\sin\delta$, $G^*.\sin\delta$ ” parametre değerlerinin, orijinal, RTFOT ve RTFOT+PAV sonrası olmak üzere her 3 grup için de arttığı tespit edilmiştir. Bu artışların katkının ilave oranlarıyla da devam ettiği ve değerlerin orijinal ve RTFOT sonrası bitümlerde daha yüksek oranlarda değiştiği görülmüştür. Böylelikle; saf bitüme göre, katkılı bitümlerin tekerlek izine oldukça dirençli olduğu ve kısmi olarak yorulma direncinin zayıfladığı tespit edilmiş fakat bitümlerin gerekli deney sıcaklıklarında yorulma çatlaklarına dirençli olduğu görülmüştür. Ayrıca, her 3 grup için de geçerli olmak üzere, saf bitüme göre; katkılı bitümlerde δ değerlerinin azaldığı, bu azalışın katkı ilavesi ile devam ettiği ve böylece, katkının bitümün elastikliğini artırdığı görülmüştür.

- PP–PET katkılı bitümlerin saf bitüme kıyasla; DSR deneyi ile elde edilen “ G^* , G' , G'' , $G^*/\sin\delta$, $G^*.\sin\delta$ ” parametre değerlerinin, orijinal, RTFOT ve RTFOT+PAV sonrası olmak üzere her 3 grup için de arttığı tespit edilmiştir. Bu artışların katkının ilave oranlarıyla da devam ettiği, $G^*.\sin\delta$ değerindeki artışların saf bitüme oldukça yakın olduğu ve değerlerin orijinal ve RTFOT sonrası bitümlerde daha yüksek oranlarda değiştiği görülmüştür. Böylece; saf bitüme kıyasla, katkılı bitümlerin tekerlek izine oldukça dirençli olduğu ve kısmi olarak yorulma direncinin zayıfladığı tespit edilmiş fakat bitümlerin gerekli deney sıcaklıklarında yorulma çatlaklarına dirençli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, her 3 grup için de geçerli olmak üzere, saf bitüme göre; katkılı bitümlerde δ değerlerinin azaldığı, bu azalışın katkı ilavesi ile devam ettiği ve katkının bitümün elastikliğini artırdığı görülmüştür. Tüm deney sonuçları olarak; PP–PET katkılı bitümlerde, PP–YYPE katkılı bitümlere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- Saf bitüme kıyasla; PP–YYPE ve PP–PET katkılı bitümlerde BBR deneyi ile elde edilen sünme rijitliklerinin (S) arttığı ve tersi olarak sünme oranlarının (m) azaldığı görülmüştür. Bazı oranlarda S ve m değerleri birbirine oldukça yakın veya eşit olmakla birlikte, katkıların artan miktarlarıyla artış ve azalış durumları gözlenmiştir. Böylece; BSK’nın düşük sıcaklık çatlaklarına karşı katkıların olumsuz etki oluşturacağı deney sonuçlarıyla tespit edilmiştir fakat yüksek sıcaklıklarda katkıların yaptığı etkinin yanında, bu düşük seviyelerde kalmıştır. Tüm katkılı bitümlerde, ASTM D6373 kriterlerinin sağlandığı ve saf bitüme göre düşük sıcaklık PG sınıfların (–22) değişmediği görülmüştür.
- DSR deneyleri orijinal ve RTFOT sonrası bitümler olarak incelendiğinde; yüksek sıcaklık performansı olarak her iki katkının da oldukça iyi bir durum sergilediği ve saf bitümün 64 olan PG sınıfına kıyasla, katkı oranına göre, katkılı bitümlerin 1–2 (70 veya 76) sınıf yükseldiği bulgularına ulaşılmıştır. Ayrıca, yenilme sıcaklıkları ve PG sınıfları anlamında “PP–PET” katkısında “PP–YYPE” katkısına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- DSR deneyleri RTFOT+PAV sonrası bitümler olarak incelendiğinde; tüm bitümlerin ilgili deney (kontrol) sıcaklıklarında yorulma çatlaklarına dirençli olduğu görülmüştür. PP–YYPE katkılı bitümlerde bazı oranlarda ve tüm PP–PET katkılı bitümlerde, deney sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda dahi yorulma çatlaklarına karşı dirençlerin olduğu tespit edilmiştir.

- Katkılı bitümlerde yüksek sıcaklıkta tekerlek izi performansı olarak çok iyi düzeyde artışlar gözlenmiş olmasına ve bitümlerin PG sınıflarının artmasına rağmen, bitümlerin yorulma çatlaklarına dirençli olduğu ve saf bitümün –22 olan düşük sıcaklık PG sınıfının korunduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bitümün genel performansı olarak, her iki katkının da oldukça olumlu etkiler yaptığı bulgularına DSR, BBR, RTFOT ve PAV deneyleriyle ulaşılmıştır.
- Bitümlerin sertleşmesiyle, katkılı bitümlerde yüzey morfolojisi olarak mikro yapıda SEM ile gözlemlenen çatlaklar veya kanal şeklinde uzanan oyukların oluştuğu tespit edilmiştir. Saf bitüme kıyasla; katkılı bitümlerin kıvamlarının sertleşmesi, viskozite değerlerinin artması ve yüksek sıcaklık PG sınıflarının yükselmesi gibi durumlar bitümlü bağlayıcıları daha rijit kıldığı için, SEM ile bitüm deneylerinin birbirlerini destekleyen nitelik taşıdığı görülmüştür. Ayrıca; katkıların yeterince bitümle bağlandığı SEM ile gözlemlenmiş ve “katkı/bitüm” etkileşimlerinin daha çok fiziksel bir özellik taşıdığı sonucuna SEM görüntüleri ile ulaşılmıştır.
- FTIR spektrumlarındaki tepe konumları olarak emme değerlerindeki farklar, saf ve katkılı bitümlerin sahip oldukları aynı kimyasal grupların yoğunluk farklılıklarını göstermiştir fakat katkı ilavesi sonucu, FTIR spektrumlarında malzeme hakkında tanı niteliği taşıyan ve kimyasal grupların yoğunlaştığı bölgede yeni kimyasal grupların oluşmadığı bulgusuna ulaşılmıştır. SEM ve FTIR sonuçları bir bütün olarak incelendiğinde, her iki katkı için de geçerli olmak üzere, “katkı/bitüm” etkileşimlerinin daha ziyade fiziksel bir nitelik taşıdığı sonuçlarla tespit edilmiştir.
- ✚ Marshall tasarımı sürecinde; karışım hazırlama aşamasında saf ve % 5 katkılı (katkıların optimum oranları) BSK numuneleri, herbir bitüm için belirlenen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında yapılmıştır. Bu sıcaklıkların saf ve katkılı bitümlerde oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca; katkılı ve saf BSK’ların “ G_{mb} , P_a , VMA ve VFA” hacimsel değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu, Marshall tasarım analizleri sonucunda görülmüştür.
- ✚ % 5 PP–YYPE ve % 5 PP–PET katkılı BSK’ların Marshall stabilitelerinin, saf BSK’ya göre sırasıyla % 8.45–12.87 ve % 10.22–13.74 oranları arasında arttığı bulgusuna ulaşılmıştır. Akma değerlerindeki azalışlardan dolayı, saf BSK’ya kıyasla katkılı BSK’ların daha az plastik akışa meyilli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, katkılı bitümlerde daha yüksek MQ değerleri elde edilmiş

ve katkılı BSK'ların daha rijit ve dirençli oldukları görülmüştür. Bununla birlikte; hem Marshall stabilite hem MQ değerleri olarak, karışım rijitliği ve direnci olarak, PP-PET katkısının daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

✚ SGC cihazında saf ve % 5 PP-YYPE ile % 5 PP-PET katkılı BSK'lar olarak optimum bitüm oranlarında tekerlek izi numuneleri hazırlanmıştır. N_{ini} dönüş (sıkıştırma) sayısına kadar BSK numunelerine ait elde edilen G_{mb} (% G_{mm}) değerlerinin saf BSK'ya kıyasla katkılı BSK'larda arttığı fakat değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Böylece, katkıların kısmi de olsa, BSK işlenebilirliğine olumlu etkiler yaptığı bulgusuna ulaşılmış ve hacimsel özelliklerdeki yakınlık anlamında Marshall karışım tasarımı sonucu yapılan tespitin desteklendiği görülmüştür.

✚ HWT cihazında yapılan tekerlek izi deneyleri sonucunda; % 5 PP-YYPE ve % 5 PP-PET katkılarının sırasıyla BSK tekerlek izi performansını % 32.81 ve % 45.43 oranlarında artırdığı bulgusuna ulaşılmıştır. Böylece, BSK'nın yüksek sıcaklıktaki kalıcı deformasyon direncine katkıların oldukça yüksek seviyelerde olumlu etkiler yaptığı görülmüştür.

Tüm sonuçlar bir bitüm olarak incelendiğinde; sıcak iklimli bölgelerde ve yüksek dayanım gerektirecek kısımlarda katkıların kullanılması halinde BSK performansının artacağı söylenebilir.

Tekerlek izi deneylerinde bitümlerin yüksek kohezyonu ile, saf BSK'ya göre katkılı BSK'ların çok iyi direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat deney sulu ortamda uygulandığı için, soyulma önleyici katkıların eklenmesi ile HWT cihazında daha fazla geçişe dayanıklı kaplama ve daha iyi tekerlek izi performansı elde edilebilir.

Bunların yanı sıra; penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi ile sırasıyla saf, PP-YYPE ve PP-PET olarak daha sert kıvama doğru gidildiği gözlenmiştir. PP-PET katkılı bitümlerin, PP-YYPE katkılı bitümlerin viskozitesinden daha yüksek olduğu ve iki katkının da saf bitümün viskozitesini artırdığı bulgularına RV deneyi ile ulaşılmıştır. Her iki katkının yüksek sıcaklık bitüm PG sınıfını artırdığı ve PP-PET katkısının kısmi olarak iyi sonuç verdiği Superpave bitüm deneyleriyle görülmüştür. Her iki katkının da Marshall stabilitesini artırdığı ve PP-PET'in stabilite, karışım rijitliği ve tekerlek izi direncine daha olumlu etkiler oluşturduğu BSK deneyleriyle belirlenmiştir. Dolayısıyla, seçilen iki katkının sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; yapılan bitüm ve BSK deneyleriyle elde edilen bulguların birbirini desteklediği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdul Rahman, W. M. N. W. and Abdul Wahab, A. F., 2013, Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt, *Procedia Engineering*, 53, 124–128.
- Abreu, L. P. F., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D. and Fonseca, P. V., 2015, Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials, *Construction and Building Materials*, 84, 230–238.
- Abtahi, S. M., Ebrahimi, M. G., Kunt, M. M., Hejazi, S. M. and Esfandiarpour, S., 2011, Production of polypropylene–reinforced asphalt concrete mixtures based on dry procedure and superpave gyratory compactor, *Iranian Polymer Journal*, 20 (10), 813–823.
- Ahmad, A. F., Razali, A. R., Razelan, I. S. M., Jalil, S. S. A., Noh, M. S. M. and Idris, A. A., 2017, Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in bituminous mixture for improved performance of roads, *Materials Science and Engineering*, 203, 1–10.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Shafigh P., 2011, Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials and Design*, 32, 4844–4849.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Ahmadinia, E., 2012, Performance evaluation of utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, 36, 984–989.
- Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., Kultayev, B. and Starostenko, O., 2014, Yüzey aktivasyonlu geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilenin bitüm modifikasyonunda kullanılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 807–816.
- Ahmedzade, P., Demirelli, K., Günay, T., Biryani, F. and Alqudah, O., 2015, Effects of waste polypropylene additive on the properties of bituminous binder, *Procedia Manufacturing* 2, 165–170.
- Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T. and Grigoryeva, O., 2016, Geri dönüştürülmüş atık polipropilenin bitümlü bağlayıcılarda kullanılması, *İMO Teknik Dergi*, 7497–7513.
- Ait–Kadi, A., Brahimi, B. and Bousmina, M., 1996, Polymer blends for enhanced asphalt binders, *Polymer Engineering and Science*, 36 (12), 1724–1733.
- Al–Hadidy, A. I., 2006, Evaluation of pyrolysis polypropylene modified asphalt paving materials, *Al–Rafidain Engineering*, 14 (2), 36–50.
- Al–Hadidy, A. I. and Yi–qiu, T., 2009, Effect of polyethylene on life of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, 23, 1456–1464.

- Al-Hadidy, A. I. and Yi-qiu, T., 2009, Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements, *Materials and Design*, 30, 1133–1140.
- Al-Hadidy, A. I. and Yi-qiu, T., 2011, The effect of plastomers polymer type and concentration on asphalt and moisture damage of SMA mixtures, *Al-Rafidain Engineering*, 19 (5), 1–12.
- Ameri, M. and Nasr, D., 2016, Properties of asphalt modified with devulcanized polyethylene terephthalate, *Petroleum Science and Technology*, 34 (16), 1424–1430.
- Ameri, M. and Nasr, D., 2017, Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures, *Petroleum Science and Technology*, 35 (1), 99–104.
- Amin, M. N., Khan, M.I. and Saleem, M. U., 2016, Performance evaluation of asphalt modified with municipal wastes for sustainable pavement construction, *Sustainability*, 8, 949_1–13.
- Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N. and Tagbor, T. A., 2017, Use of waste plastic materials for road construction in Ghana, *Case Studies in Construction Materials*, 6, 1–7.
- Arabani, M. and Pedram, M., 2016, Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles, *Construction and Building Materials*, 116, 378–383.
- Arıkan, A., 2007, Sert plastik ambalajlar, *Ambalaj sanayicileri derneği iktisadi işletmesi*, İstanbul. 11–47.
- Arslan, D., 2010, Esnek üstyapıların performans özelliklerinin sentetik metal ve polibor katkı maddeleriyle geliştirilmesi, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 104–178.
- AASHTO T324–04, 2004, Standard method of test for Hamburg wheel-track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA).
- ASTM C136/C136M–14, 2014, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- ASTM C127–15, 2015, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate.
- ASTM C128–15, 2015, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.
- ASTM D2872–12^{E1}, 2012, Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin film oven test).
- ASTM D5/D5M–13, 2013, Standard test method for penetration of bituminous materials.

- ASTM D36/D36M–14^{E1}, 2014, Standard test method for softening point of bitumen (ring and ball apparatus).
- ASTM D4402/D4402M–15, 2015, Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.
- ASTM D6925–15, 2015, Standard test method for preparation and determination of the relative density of asphalt mix specimens by means of the Superpave gyratory compactor.
- ASTM D6927–15, 2015, Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures.
- ASTM D7175–15, 2015, Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer.
- ASTM D6373–16, 2016, Standard specification for performance graded asphalt binder.
- ASTM D6648–08 (Reapproved 2016), 2016, Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer–BBR.
- ASTM D6926–16, 2016, Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus.
- ASTM D2726/D2726M–17, 2017, Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted asphalt mixtures.
- ASTM D3203/D3203M–17, 2017, Standard test method for percent air voids in compacted asphalt mixtures.
- ASTM D3549/D3549M–17, 2017, Standard test method for thickness or height of compacted asphalt mixture specimens.
- ASTM D6521–18, 2018, Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV).
- ASTM D70–18, 2018, Standard test method for density of semi-solid asphalt binder (pycnometer method).
- Attaelmanan, M., Feng, C. P. and Al-Hadidy, A. I., 2011, Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, 25, 2764–2770.
- Awwad, M. T. And Shbeeb, L., 2007, The use of polyethylene in hot asphalt mixtures, *American Journal of Applied Sciences*, 4 (6), 390–396.
- Badejo, A. A., Adekunle, A. A., Adekoya, O. O., Ndambuki, J. M., Kupolati, K. W., Bada, B. S. and Omole, D. O., 2017, Plastic waste as strength modifiers in asphalt for a sustainable environment, *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 9 (2), 173–177.

- Buncher, M. and Anderson, M., 2014, MS-2 Asphalt Mix Design Methods (7th Edition), *Asphalt Institute*, USA, 1–90; 119–134.
- Costa, L. M. B., Silva, H. M. R. D., Oliveira, J. R. M. and Fernandes, S. R. M., 2013, Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6 (4), 457–464.
- Costa, L. M. B., Peralta, J., Oliveira, J. R. M. and Silva, H. M. R. D., 2017, A new life for cross-linked plastic waste as aggregates and binder modifier for asphalt mixtures, *Applied Sciences*, 7, 603_1–16.
- Dalhat, M. A. and Wahhab, H. I. A., 2017, Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia, *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (4), 349–357.
- Ergün, N., 2012, Türkiye 10. kalkınma planı (2014–2018) projeksiyonunda plastik sektörü genel değerlendirmesi taslağı, *PAGEV (Türk Plastik Sanayicileri Araştırma, Geliştirme ve Eğitim Vakfı) Yayınları*, İstanbul, 3–6.
- Fernandes, S., Costa, L., Silva H. and Oliveira J., 2017, Effect of incorporating different waste materials in bitumen, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29, e204–e209.
- Gama, D. A., Junior, J. M. R., Melo, T. J. A. and Rodrigues, J. K. G., 2016, Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer, *Construction and Building Materials*, 106, 290–295.
- Ge, D., Yan, K., You, Z. and Xu, H., 2016, Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene, *Construction and Building Materials*, 126, 66–76.
- Gibreil, H. A. A. and Feng C. P., 2017, Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 142, 101–108.
- Gonzalez, O., Pena, J. J., Munoz, M. E., Santamaria, A., Lepe, A. P., Boza, F. M. and Gallegos, C., 2002, Rheological techniques as a tool to analyze polymer-bitumen interactions: Bitumen modified with polyethylene and polyethylene-based blends, *Energy & Fuels*, 16, 1256–1263.
- Gonzalez, P. L., Perez, M. A. C., Fresno, D. C., Zamanillo A. V. and Vega, I. I., 2016, Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste, *Construction and Building Materials*, 112, 1133–1140.
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Farzanian, S. A. and Bilici, İ., 2014, An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material, *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302–310.
- Habib, N. Z., Kamaruddin, İ., Napiyah, M. and Tan, İ. M., 2010, Rheological properties of polyethylene and polypropylene modified bitumen, *International Journal of*

Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 4 (12), 381–385.

- Hassani, A., Ganjidoust, H. and Maghanaki, A. A., 2005, Use of plastic waste (polyethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management & Research*, 23, 322–327.
- Hınıslioğlu, S. and Açar, E., 2004, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, 58, 267–271.
- Hınıslioğlu, S., Aras, H. N. and Bayrak, O. Ü., 2005, Effects of high density polyethylene on the permanent deformation of asphalt concrete, *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, 12, 456–460.
- Hujuri, U., Ghoshal, A. K. and Gumma, S., 2008, Modeling pyrolysis kinetics of plastic mixtures, *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1832–1837.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S. ve Özen, H., 2001, Asfalt ve uygulamaları, 1, *İSFALT Bilimsel Yayın*, İstanbul, 22–99.
- Jain, P. K., Kumar, S. and Sengupta, J. B., 2011, Mitigation of rutting in bituminous roads by use of waste polymeric packaging materials, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 18, 233–238.
- Kalantar, Z. N., Karim, M. R. and Mahrez, A., 2012, A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, 33, 55–62.
- Karayolu teknik şartnamesi, KGM Yayınları, Ankara, Kısım–407.
- Karmakar, S. and Roy, T. K., 2016, Effect of waste plastic and waste tires ash on mechanical behavior of bitumen, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016006_1–9.
- Kathari, P. M., 2016, Rheological properties of polypropylene reinforced asphalt binder, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 3, 109–126.
- Khan, İ. M., Kabir, S., Alhussain, A. M. and Almansoor, F. F., 2016, Asphalt design using recycled plastic and crumb–rubber waste for sustainable pavement construction, *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564.
- Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V. and Bezuglyi, A., 2016, Improving quality and durability of bitumen and asphalt concrete by modification using recycled polyethylene based polymer composition, *Procedia Engineering*, 143, 119–127.
- Kiran, N., Ekinçi, E. and Snape, C. E., 2000, Recycling of plastic wastes via pyrolysis, *Resources, Conservation and Recycling*, 29, 273–283.
- Köfteci, S., 2016, Effect of HDPE based wastes on the performance of modified asphalt mixtures, *Procedia Engineering*, 161, 1268–1274.

- Modarres, A. and Hamed, H., 2014, Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes, *Materials and Design*, 61, 8–15.
- Moghaddam, T. B., Karim, M. R. and Syammaun, T., 2012, Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles, *Construction and Building Materials*, 34, 236–242.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M. and Karim, M. R., 2014, Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Materials and Design*, 53, 317–324.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M. and Karim, M. R., 2014, Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads, *Construction and Building Materials*, 65, 487–494.
- Miteva, K., Slavcho, A. and Gaceva, G. B., 2016, Kinetic analysis of pyrolysis of waste polyolefin mixture, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 2601–2609.
- Murphy, M., O'Mahony, M., Lycett, C. and Jamieson, I., 2001, Recycled polymers for use as bitumen modifiers, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 306–314.
- Naskar, M., Chaki, T. K. and Reddy, K. S., 2010, Effect of waste plastic as modifier on thermal stability and degradation kinetics of bitumen/waste plastics blend, *Thermochimica Acta*, 509, 128–134.
- Nien, Y-H., Yeh, P-H., Chen, W-C., Liu, W-T. and Chen, J-H., 2008, Investigation of flow properties of asphalt binders containing polymer modifiers, *Polymer Composites*, 518–524.
- Nejad, F. M., Arabani, M., Hamed, G. H. and Azarhoosh, A. R., 2013, Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 47, 1523–1527.
- Nejad, F. M., Azarhoosh, A. and Hamed, G. H., 2014, Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study, *Road Materials and Pavement Design*, 15(3), 746–756.
- Nejad, F. M., Gholami, M., Naderi, K. and Rahi, M., 2015, Evaluation of rutting properties of high density polyethylene modified binders, *Materials and Structures*, 48, 3295–3305.
- Othman, A. M., 2010, Impact of polypropylene application method on long-term aging of polypropylene-modified HMA, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 1012–1018.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F. and Stastna, G., 2015, A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility, *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72–112.

- Qadir, A., 2014, Rutting performance of polypropylene modified asphalt concrete, *International Journal of Civil Engineering–Transaction A: Civil Engineering*, 12 (3), 304–312.
- Rongali, U. D., Swamy, A. K. and Jain, P. K., 2016, Effect of SBS and HDPH polymer on rheological properties of asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 34(21), 1790–1796.
- Sadeque, M. and Patil, K. A., 2014, Marshall properties of waste polymer and nanoclay modified bitumen, *Architecture and Civil Engineering*, 12 (1), 1–9.
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W. and Aroua, M. K., 2016, A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326.
- Silva, H. M. R. D., Machado, A. V., Oliveira, J. R. M. and Costa, L. M. B., 2011, Waste polymers recycling in high performance asphalt mixtures, *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities–1st International Conference*, Guimaraes, Portekiz.
- Silva, J. A. A., Lucena, L. C. F. L., Rodrigues, J. K. G., Carvalho, M. W. and Costa, D. B., 2015, Use of micronized polyethylene terephthalate (Pet) waste in asphalt binder, *Petroleum Science and Technology*, 33 (15–16), 1508–1515.
- Swamy, A. K., Rongali, U. D. and Jain, P. K., 2017, Effect of HDPEH polymer on viscoelastic properties of SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 136, 230–236.
- Tapkın, S., 2008, The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, *Building and Environment*, 43, 1065–1071.
- Tapkın, S., Uşar, Ü., Tuncan, A. and Tuncan, M., 2009, Repeated creep behavior of polypropylene fiber–reinforced bituminous mixtures, *Journal Of Transportation Engineering*, 240–249.
- Tapkın, S. and Özcan, Ş., 2012, Determination of the optimal polypropylene fiber addition to the dense bituminous mixtures by the aid of mechanical and optical means, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7(1), 22–29.
- Tapkın, S., 2013, Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses, *Construction and Building Materials*, 44, 399–410.
- Tapkın, S. and Keskin, M., 2013, Rutting analysis of 100 mm diameter polypropylene modified asphalt specimens using Gyratory and Marshall compactors, *Materials Research*, 16 (2), 546–564.
- Temiz, H. ve Yaşmun, E., 2013, PET lifi ve parçalanmış taşıt lastiğinin beton asfaltın özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (2), 107–114.

Tunç, A., 2004, Esnek kaplama malzemeleri el kitabı, *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, 11–63; 89–133; 150–173; 195–249.

Uluçaylı, M., 2002, Asfalt el kitabı, 2, Yavuz, A., *İSFALT Bilimsel Yayın*, İstanbul, 63–73; 109–133; 137–166.

URL 1: www.asmud.org.tr/asfalt.php

URL 2: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>

URL 3: www.asmud.org.tr/asfalt.php?sayfa=25

URL 4:

http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/09_Kalkinma_Plani_indd_18262.pdf

URL 5:

http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/Turkiye_Plastik_Sektorui_2014.pdf

URL 6:

https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf

URL 7:

<https://www.pagev.org/upload/files/Plastik%20%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202019.pdf>

URL 8:

http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/Plastik_Ambalaj_Malzemeleri_2014.pdf

URL 9:

<https://www.pagev.org/upload/files/Plastik%20Ambalaj%20Malzemeleri%20Sekt%C3%B6r%20%20C4%B0zleme%20Raporu%202019.pdf>

URL 10:

https://www.plasticseurope.org/application/files/3715/1689/8308/2015plastics_the_facts_14122015.pdf

URL 11: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/12/20171227-12.htm>

URL 12: http://rapor.plasfed.org.tr/admin/PICS/files/plastik_insaat_2014.pdf

URL 13: app.petkim.com.tr/web/urun/File.ashx?fn=UR.15-BF-00002&l=tr&fl=msds

URL 14: https://www.selcuk.edu.tr/ileri_teknoloji_aras__uyg_mrkz_mud/Ayrinti/4024-elektron_mikroskobu

URL 15: https://www.selcuk.edu.tr/ileri_teknoloji_aras__uyg_mrkz_mud/Ayrinti/4030-spektroskopi

- Vargas, A. M., Vargas, A. M., Sanchez-Solis, A. and Manero, O., 2013, Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling, *Construction and Building Materials*, 45, 243–250.
- Wahhab, H. I. A., Dalhat, M. A. and Habib, M. A., 2017, Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic, *Road Materials and Pavement Design*, 18 (5), 1117–1134.
- Whiteoak, D., 2004, Shell bitüm el kitabı, 3, Lav, A. H. ve Lav, M. A., *İSFALT Bilimsel Yayın*, İstanbul, 47–54; 73–176; 231–240.
- Yang, X., You, Z. and Beale, J. M., 2014, Asphalt binders blended with a high percentage of biobinders: Aging mechanism using FTIR and rheology, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04014157_1–11.
- Yeh, P-H., Nien, Y-H., Chen, J-H., Chen, W-C. and Chen, J-S., 2005, Thermal and rheological properties of maleated polypropylene modified asphalt, *Polymer Engineering and Science*, 1152–1158.
- Yeh, P-H., Nien, Y-H., Chen, W-C. and Liu, W-T., 2010, Evaluation of thermal and viscoelastic properties of asphalt binders by compounding with polymer modifiers, *Polymer Composites*, 1738–1744.
- Yousefi, A. A., 2004, Rubber-polyethylene modified bitumens, *Iranian Polymer Journal*, 13 (2), 101–112.
- Ziari, H., Kaliji, A.G. and Babagoli, R., 2016, Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures, *Petroleum Science and Technology*, 34 (9), 819–823.
- Zhu, J., Birgisson, B. and Kringos, N., 2014, Polymer modification of bitumen: advances and challenges, *European Polymer Journal*, 54, 18–38.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammet Mevlüt AKMAZ
Uyruğu : T. C.
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA 23.10.1985
Telefon : 0 555 497 6271 / 0 (332) 205 1696
Faks :
E-Posta : mmakmaz@ktun.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konya Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı Program), Meram, Konya	2003
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Mühendislik–Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya	2009
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuklu, Konya	2012
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuklu, Konya	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
06/2009–03/2011	Konya Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı Yapı İşleri Şube Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
03/2011–05/2018	Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı	Araştırma Görevlisi
05/2018–...	Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI : İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı

YABANCI DİLLER : İngilizce

YAYINLAR

- Çelik, O. N., Ağırđır, M. L. ve Akmaz, M. M., 2011, Konya şehiriçi Kule Kavşağı'nın Sidra Intersection bilgisayar programı ile incelenmesi, *IV. Ulaşım Sempozyumu ve Sergisi, TRANSİST-2011*, İstanbul, 251–257.
- Çelik, O. N. and Akmaz, M. M., 2014, Some major signalized intersection examination in Konya by using Sidra Intersection 5.1 software, *International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, ICESA-2014*, Antalya, 27–32 (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır).
- Akmaz, M. M. and Çelik, O. N., 2015, Examination of signalized intersection using Sidra Intersection software, *Iconsete-2015, International Conference on Science, Ecology and Technology I*, Viyana, 336–344 (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır).
- Akmaz, M. M. and Çelik, O. N., 2016, Examination of signalized intersections according to Australian and HCM (Highway Capacity Manual) methods using Sidra Intersection software, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 10 (2), 246–259 (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır).
- Akmaz, M. M. ve Çelik, O. N., 2018, Bitümün kıvamı ve viskozitesine YYPE–PET piroliz ürününün etkisi, *3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress, IMSEC-2018*, Adana, 859–862 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Akmaz, M. M. ve Çelik, O. N., 2018, Farklı atık plastiklerin birlikte pirolizinden elde edilen katkının bitümün kıvamı ve viskozitesine etkisi, *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, EurasianSciEnTech-2018*, Ankara, 592–596 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Köse, H., Çelik, O. N. and Akmaz, M. M., 2019, The effect of liquid products obtained from pyrolysis of different plastic wastes on the performance properties of warm mix asphalts, *Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering, IV. ECOCEE-2019*, İstanbul, 608–615.
- Akmaz, M. M. and Çelik, O. N., 2019, Consistency and viscosity of polyolefin modified bitumen, *International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, ICivilTech-2019*, Afyonkarahisar, 805–811 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- Çelik, O. N., Köse, H. and Akmaz, M. M., 2019, Investigation of the liquid product obtained from co-pyrolysis of high density polyethylene–polypropylene plastic pair as a warm mix asphalt additive, *International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, ICivilTech-2019*, Afyonkarahisar, 812–822.
- Akmaz, M. M. and Çelik, O. N., 2020, Effect of polyolefin modified bitumen on Marshall stability, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 20 (1), 90–95 (Doktora tezinden yapılmıştır).
- (Bu yayın, “*ICivilTech-2019*” sempozyumunda sunulmuş ve bildiri özeti, “*Özet Kitabı–Abstract Book*”nda yayınlanmıştır. Bilim Kurulu tarafından seçilen bildiri, “*Bildiriler Kitabı–Book of Proceedings*”nda yer almayıp, dergide makale olarak yayınlanmıştır).