



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**FARKLI PLASTİK ATIKLARIN
PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN ÜRÜNLERİN
BİTÜMLÜ İLİK KARIŞIMLARIN
PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Hüseyin KÖSE

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüseyin KÖSE tarafından hazırlanan “Farklı Plastik Atıkların Pirolizinden Elde Edilen Ürünlerin Bitümlü Ilık Karışımların Performans Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması 16/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri 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. Murat GÜLER

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

.....

Üye

Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ

.....

Üye

Doç. Dr. Cahit GÜRER

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması, Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) Koordinatörlüğü tarafından 2016-ÖYP-050 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.

Hüseyin KÖSE

Tarih:23.05.2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI PLASTİK ATIKLARIN PİROLİZİNDEN ELDE EDİLEN ÜRÜNLERİN BİTÜMLÜ ILIK KARIŞIMLARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Hüseyin KÖSE

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2022, 208 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Murat GÜLER
Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ
Doç. Dr. Cahit GÜRER
Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN

Ilık karışım asfalt (IKA), geleneksel bitümlü sıcak karışımdan (BSK) daha düşük sıcaklıklarda serim-sıkıştırma işlemine imkan veren bir karışım türüdür. Bu çalışmada, atık plastiklerin pirolizinden elde edilen ürünlerin ılık karışım asfalt (IKA) performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atık plastiklerden polipropilen (PP) ve polistiren (PS) tek başına, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polietilen tereftalat (PET) ise birlikte (Ağırlıkça YYPE %67, PET ise %33 oranında) piroliz edilmiştir. Piroliz işlemleri sonucu elde edilen katı (K) ve sıvı (S) ürünler ile bitüm modifiye edilerek, ürünlerin bitüm ve bitümlü karışım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca ticari IKA katkısı olarak Sasobit® kullanılmıştır. Saf (B50/70) ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, rotasyonel viskozimetre, kısa-uzun dönem yaşlandırma testleri ile Dinamik Kesme Reometresi (DSR) ve Kiriş Eğme Reometresi (BBR) gibi reolojik testler yapılmıştır. Bunların dışında, katkı-bitüm etkileşimi Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ve Zeta Potansiyel analizi testleriyle incelenmiştir. BSK (referans karışım) ve IKA'ların optimum bitüm oranları, yoğunluk-boşluk ve stabilite-akma analizleri Marshall tasarımı ile belirlenmiştir. Tekerlek izi deneyi ile karışımların yüksek sıcaklık performansı değerlendirilmiştir. Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi (TSRST) ile karışımların soğuk hava çatlaklarına karşı direnci test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, saf bitüme PP %6K-%6S, YYPE-PET %6K-%6S, PS %6K-%6S ve Sasobit® %3 ilavesi ile bitümlü karışımın karıştırma-sıkıştırma sıcaklığı sırasıyla 14°C, 10°C, 15°C ve 9°C azalmıştır. Bu koşullarda hazırlanan bitümlü karışımlardan IKA-1 (PP) ve IKA-4 (Sasobit®)'in yüksek sıcaklık performansının, BSK'dan daha iyi olduğu, IKA-2 (YYPE-PET)'in performansının BSK'ya hemen hemen eşit olduğu, IKA-3 (PS)'nin performansının ise BSK'ya oldukça yakın olduğu Marshall tasarımı ve tekerlek izi test sonuçlarından anlaşılmıştır. Marshall tasarımından ayrıca, IKA'ların optimum bitüm oranlarının BSK'dan daha düşük veya BSK'ya çok yakın (IKA-3 'teki gibi) olduğu görülmüştür. Piroliz katkılı IKA'ların tamamının soğuk hava performansının BSK'dan daha iyi olduğu, IKA-4'ün ise BSK'ya yakın performans sergilediği TSRST ile ortaya çıkmıştır. Katkı maddelerinin; bitüm içerisinde uniform dağıldığı, topaklanıp çökelmediği, bitümün içinde 80-140°C aralığında eriyerek viskozite azaltmaya sebep olduğu ve katkı-bitüm modifikasyon mekanizmasının daha çok fiziksel yönde olduğu sırasıyla SEM, Zeta Potansiyel, DSC ve FTIR analizleri ile anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık plastik, ılık karışım asfalt, modifiye bitüm, piroliz, polietilen tereftalat, polipropilen, polistiren, yüksek yoğunluklu polietilen.

ABSTRACT

PhD THESIS

THE EFFECT OF PRODUCTS OBTAINED FROM PYROLYSIS OF DIFFERENT PLASTIC WASTES ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF WARM MIX ASPHALTS

Hüseyin KÖSE

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2022, 208 Pages

Jury

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Murat GÜLER
Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ
Assoc. Prof. Dr. Cahit GÜRER
Asst. Prof. Dr. Deniz ARSLAN

Warm mix asphalt (WMA) is a new technology that can be mixed and compacted at lower temperatures than hot mix asphalt (HMA). In this study, the effect of the products obtained from the pyrolysis of waste plastics on the performance of WMA was investigated. Among the waste plastics, polypropylene (PP) and polystyrene (PS) were pyrolyzed individually, while high density polyethylene (HDPE) and polyethylene terephthalate (PET) were pyrolyzed together (67% for HDPE and 33% for PET). Both solid (K) and liquid (S) products obtained from pyrolysis were modified with bitumen, and the effects of the products on the bitumen and the bituminous mixture were investigated. Sasobit[®] was also used as a commercial WMA additive in this study. Penetration, softening point, rotational viscometer, short and long term aging tests and rheological tests such as Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Bending Beam Rheometer (BBR) were performed on base (B50/70) and modified bitumen. Besides, the additive-bitumen interaction was investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis, Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis and Zeta Potential analysis. Design binder content, density-void and stability-flow analyzes of HMA (reference mixture) and WMA mixtures were determined by Marshall design. The high temperature performance of the mixtures was evaluated by the rutting test. Low temperature cracking resistance of the mixtures was tested with the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST). Test results show that, the mixing-compaction temperature of the bituminous mixture decreased by 14°C, 10°C, 15°C and 9°C, respectively, with the addition of PP 6K-6S%, HDPE-PET 6K-6S%, PS 6K-6S% and Sasobit[®] 3% to the base bitumen. Marshall design and rutting test results show that the high temperature performance of WMA-1 (PP) and WMA-4 (Sasobit[®]) is higher than HMA, the performance of WMA-2 (YYPE-PET) is almost comparable to HMA and the performance of WMA-3 (PS) is quite close to HMA. Also from the Marshall design, it was observed that the design binder contents of WMA mixtures are lower than or very close to HMA (as in WMA-3). TSRST revealed that the low temperature performance of all WMA mixtures with pyrolysis additives is better than HMA, and that WMA-4 performs close to HMA. It was understood by SEM, Zeta Potential, DSC and FTIR analyzes that the additives are uniformly dispersed and suspended in the bitumen, melt in the bitumen at the range of 80-140°C and cause viscosity reduction and that the additive-bitumen modification mechanism is physical.

Keywords: High density polyethylene, modified bitumen, polyethylene terephthalate, polypropylene, polystyrene, pyrolysis, warm mix asphalt, waste plastic.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın oluşturulmasında, yürütülmesinde ve tez sürecinde karşılaştığım her problemde bilgi ve tecrübesi ile beni aydınlatan, olumlu ve sıcak yaklaşımı ile desteğini her zaman hissettiğim çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasını, 2016-ÖYP-050 proje numarası ile destekleyen Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) Birimi'ne teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında, belirttiği her görüş ile çalışmayı bir üst seviyeye taşımamı sağlayan çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı büyük bir özveri ile takip eden, takıldığım her noktada yardımcı olan çok kıymetli hocam Doç. Dr. Cahit GÜRER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Soğuk hava testlerini yapmamda bana çok kıymetli vaktini ayırıp yardımcı olan pek saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat GÜLER'e ve bu imkanı bana sağladığı için Orta Doğu Teknik Üniversitesi'ne sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez kapsamında yaptırmış olduğum karakteriasyon analizlerindeki katkılarından dolayı Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Yapmış olduğum karakterizasyon analizlerine değerli yorumlarıyla katkıda bulunan hocalarımdan, Konya Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Erol PEHLİVAN'a, Prof. Dr. Hüseyin DEVECİ'ye, Selçuk Üniversitesi Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mustafa YILMAZ'a ve Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Metin GÜRÜ'ye saygı ve minnetimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca gerek fiziksel gerekse de zihinsel destekleri ile her zaman yanımda olan kıymetli mesai arkadaşlarım ve hocalarım Dr. Muhammet Mevlüt Akmaz'a ve Dr. Neslihan ATASAĞUN'a saygı ve minnetimi sunarım.

Çalışmalarım süresince desteklerinden faydalandığım, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Başmühendisi Mustafa Sinan KUFACI'ya, Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvarı Şefi Musa SELEK'e, laboratuvar çalışanları Hümeysra GÜNAYDIN'a, Kübra ŞİMŞEK'e, Hasan Cengiz NOYAL'a ve Ömer GÜVEN'e sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Tez çalışmam kapsamında, kullanmış olduğum Sasobit® ticari katkı maddesini tedarik eden TEKNOMET firmasına çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvar sorumlusu Sayın Yüksel ÇİFTÇİ'ye ve Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvar sorumlusu Sayın İbrahim KÜÇÜK'e teşekkürleri sunarım.

Aldığım her kararda yanımda olan ve bugünlere gelmemde sonsuz emeği olan sevgili aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Hüseyin KÖSE
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1 Atık Plastiklerin Bitümde veya Bitümlü Karışımda Doğrudan Kullanıldığı Araştırmalar	7
2.2 Atık Plastiklerin Bitümde veya Bitümlü Karışımda Kimyasal Bir Süreçten Geçirildikten Sonra Kullanıldığı Araştırmalar	15
2.3 Organik Yöntemle Elde Edilmiş İKA ile İlgili Yapılmış Güncel Çalışmalar	18
2.4 Ilık Karışım Asfalt ve Ilık Karışım Asfaltı Oluşturan Temel Malzemeler Hakkında Yapılan Literatür Araştırması.....	25
2.4.1 Agrega.....	25
2.4.2 Bitümlü bağlayıcı.....	29
2.4.3 Ilık karışım asfalt teknolojisi	42
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	74
3.1. Materyal	74
3.1.1 Tez kapsamında kullanılan plastikler	74
3.2 Metot	75
3.2.1 Piroliz yöntemi.....	76
3.2.2 Karakterizasyon deneyleri	77
3.2.3 Bitümlü bağlayıcı deneyleri.....	80
3.2.4 Bitümlü karışım deneyleri	86
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....	96
4.1 Nihai Piroliz Ürünlerinin Belirlenmesi.....	96
4.1.1 Farklı türden plastik atıkların kopirolizinden elde edilen sıvı ürünlerin bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....	96
4.1.2 YYPE-PP ve PP-PET sıvı katkılı ılık karışımların Marshall performansı ..	100
4.1.3 PP, YYPE, PS, PET tekli pirolizlerinden elde edilen katı ve sıvı ürünlerin bitümlü bağlayıcı ve İKA üzerindeki etkilerinin incelenmesi	103
4.2 Piroliz Yöntemi ile Katkıların Elde Edilmesi	105
4.2.1 PP pirolizi sonuçları.....	105
4.2.2 YYPE-PET birlikte pirolizi sonuçları.....	106
4.2.3 PS pirolizi sonuçları.....	107
4.3 Sıvı Piroliz Ürünlerinin Damıtma (Distilasyon) Sonuçları.....	109

4.4 Bitümlü Bağlayıcı Test Sonuçları.....	111
4.4.1 Piroliz katkılı bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi	111
4.4.2 Sasobit® katkılı modifiye bitümün penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite test sonuçları.....	135
4.4.3 Optimum parametrelerle hazırlanan piroliz katkılı modifiye bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite test sonuçları.....	136
4.4.4 Bitümlerin DSR, BBR, RTFOT ve PAV sonuçları	140
4.5 Bitümlü Karışım Test Sonuçları	157
4.5.1 BSK ve IKA'ların Marshall tasarımlarının yapılması	158
4.5.2 Tekerlek izi deneyi sonuçları	164
4.5.3 TSRST (Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi) sonuçları.....	170
4.6 Bitümlü Bağlayıcılara ve Piroliz Ürünlerine Yapılan Karakterizasyon Test Sonuçları	173
4.6.1 SEM analizi sonuçları	174
4.6.2 FTIR analizi sonuçları	175
4.6.3 Zeta Potansiyel analizi sonuçları	176
4.6.4 DSC analizi sonuçları	177
4.7 BSK ve IKA'ların Maliyet Analizi	179
4.7.1 Karışımlardaki agrega ve bitüm maliyetlerinin belirlenmesi	179
4.7.2 Bitümlü karışımlara ait enerji maliyetlerinin belirlenmesi	180
4.7.3 Piroliz katkı maliyeti ve piroliz tesis maliyetinin belirlenmesi	181
4.7.4 BSK ve IKA'lara ait toplam üretim maliyetinin belirlenmesi.....	182
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	184
5.1 Sonuçlar	184
5.2 Öneriler	190
KAYNAKLAR	191
EKLER	206

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

G^*	: Kayma modülü (kPa)
G_b	: Bitümün özgül ağırlığı
G_{ia}	: İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı
G_{ib}	: İnce agreganın hacim özgül ağırlığı
G_{fa}	: Fillerin zahiri özgül ağırlığı
G_{ka}	: Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı
G_{kb}	: Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı
G_{mm}	: Gevşek karışımın maksimum özgül ağırlığı
G_{mb}	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
G_{sa}	: Agreganın zahiri özgül ağırlığı
G_{sb}	: Agreganın hacim özgül ağırlığı
G_{se}	: Agreganın efektif özgül ağırlığı
$N_{initial}$: Başlangıç yoğurma sayısı
$N_{tasarım}$: Tasarım yoğurma sayısı
P	: İçi su ile dolu piknometre ağırlığı (gr)
P'	: İçi su ve numune ile dolu piknometre ağırlığı (gr)
P''	: Piknometrenin boş ağırlığı (gr)
P'''	: İçi numune ile dolu piknometre ağırlığı (gr)
R^2	: Korelasyon değeri
S	: Rijitlik modülü (N/mm^2)
α	: Termal katsayı ($1/^\circ C$)
σ	: Gerilme (N/mm^2)
ϵ	: Şekil değiştirme oranı
ω	: Açısal hız (rad/s)
θ	: Konik tabanın yatayla yaptığı açı (derece)
Δ	: faz açısı (derece)
®	: Tescilli ürün
™	: Ticari Marka

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ABS	: Akrilonitril Butadien Stiren
ABS-PC	: Akrilonitril Butadien Stiren Polikarbonat
ASTM	: American Society for Testing and Materials
AYY	: Atık Yemeklik Yağ
BBR	: Bending Beam Rheometer-Kiriş Eğme Reometresi
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
DAT	: Dispersed Asphalt Technology- Ayrık Asfalt Teknolojisi
DSC	: Differential Scanning Calorimetry-Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DSR	: Dynamic Shear Rheometer-Dinamik Kayma Reometresi
DYPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
DYPEV	: Düşük Yoğunluklu Polietilen Vaks
EBS	: Ethylene-Bis-Stearamide
EVA	: Etilen Vinil Asetat
ET	: Emülsiyon Teknolojisi
FST	: Frequence Sweep Test
FT	: Fischer-Tropsch
FTIR	: Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre-Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GDA	: Geri Dönüştürülmüş Asfalt
GDAŞ	: Geri Dönüştürülmüş Asfalt Şıngıl
GO	: Grafen Oksit
HIPS	: High Impact Polystyrene-Yüksek darbeye dayanıklı polistiren
IKA	: Ilık Karışım Asfalt
KTŞ	: Karayolu Teknik Şartnamesi
KV	: Kömür Vaksı
LAS	: Lineer Amplitude Sweep
LEA	: Low Energy Asphalt-Düşük Enerjili Asfalt
LEAB	: Laag Energie Asfalt Beton-Düşük Enerjili Asfalt Betonu
LEA-CO	: Low Energy Asphalt Company
LK	: Lastik Kırıntısı
LPG	: Likit Petrol Gazı
MQ	: Marshall Quotient- Marshall Oranı
MSCR	: Multiple Stress Creep Recovery- Çoklu Gerilmeli Sünme Geri Dönme
NYYPE	: Nano Boyutta Yüksek Yoğunluklu Polietilen
OPEV	: Oksitlenmiş Polietilen Vaks
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
ÖTPEV	: Özel Tasarım Sıvı Polietilen Vaks
PE	: Poelietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PEV	: Polietilen Vaks
PG	: Performance Grade-Performans Sınıfı
PI	: Penetrasyon İndeksi
PP	: Polipropilen
PPA	: Polifosforik Asit
PS	: Polistiren
PV	: Polipropilen Vaks

PVN	: Penetrasyon Viskozite Numarası
RTFOT	: Rolling Thin Film Oven Test-Döner İnce Film Etüvü Testi
RV	: Rotasyonel Viskozimetre
SBS	: Stiren Bütadien Stiren
SDYK	: Suya Doygun Yüzey Kuru
SEM	: Scanning Electron Microscope-Taramalı Elektron Mikroskobu
SPEV	: Sıvı Polietilen Vaks
TLA-X	: Trinidad Lake Asphalt Plus Modifier- Katkılı Trinidad Göl Asfaltı
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TPEV	: Topak Polietilen Vaks
TSR	: Tensile Stress Ratio-Çekme Gerilmesi Oranı
TSRST	: Thermal Stress Restrained Specimen Test-Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
VFA	: Voids Filled with Asphalt-Asfaltla Dolu Boşluk
VMA	: Voids in Mineral Aggregate-Mineral Agregalar Arası Boşluk
VOC	: Volatile Organic Compounds- Uçucu Organik Bileşikler
VTS	: Viskozite Sıcaklık Hassasiyeti
WAM-Foam	: Warm Asphalt Mix Foam
WMA	: Warm Mix Asphalt-Ilık Karışım Asfalt
XPE	: Çapraz Bağlı Polietilen
XRD	: X-Ray Diffraction
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

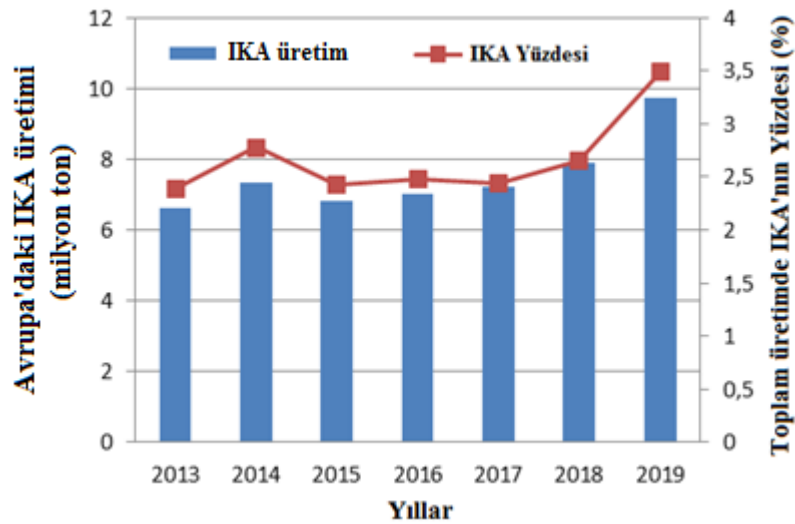
1. GİRİŞ

Karayolu, ülkemizde hem yük hem de yolcu taşımacılığında en yüksek paya sahip olan ulaştırma sistemidir. Taşımacılığın yoğun bir şekilde karayolu üzerinden yapılması ve artan nüfusla birlikte araç trafiğinin de artması, yol üstyapısının gittikçe ağır trafik yüklerine maruz kalmasına yol açmıştır. Günümüzde, yol kaplama tabakasında bitümlü sıcak karışım (BSK) kullanılarak, artan bu trafik yükleri güvenli bir şekilde karşılanmaktadır. Sıcak karışım asfalt, özellikle stabilite açısından iyi bir performansa sahiptir. Ancak, bu karışım tipi üretim ve serim esnasında önemli ölçüde çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, karışımın üretilmesi sırasında harcanan enerji ve serim-sıkıştırma işlemi esnasında işçilerin zor koşullarda çalışmaları, bitümlü sıcak karışımın bir başka olumsuz özelliğidir. Bunun üzerine araştırmacıların ilgisi, BSK'ya alternatif olabilecek yeni bir karışım tipi olan ılık karışım asfalt (IKA) teknolojisine kaymıştır. Ilık karışım asfalt, adından da anlaşılacağı üzere geleneksel sıcak karışım asfalttan daha düşük sıcaklıklarda üretim ve serim-sıkıştırma işlemine müsaade eden yeni bir uygulamadır. Bütün bu süreçlerde sıcaklığın daha düşük seviyelerde olması, bitümlü sıcak karışımlarda görülen problemlerin aza indirilmesine veya ortadan kaldırılmasına yardımcı olmaktadır.

Ilık karışım asfalt, sıcak karışım asfalta göre daha düşük sıcaklıklarda üretilmesi ile hem enerji maliyetlerini azaltmakta hem de yüksek sıcaklıkta ortaya çıkan gaz salınımlarını düşürmektedir. Yapılan araştırmalarda, plent sıcaklığındaki her 10°C'lik sıcaklık düşüşü için, yakıt sarfiyatındaki azalmanın karışımın tonu başına 0.25-0.4 lt olduğu ve CO₂ salınımindaki azalmanın ise yaklaşık 1 kg olduğu belirtilmektedir (Tutu ve Tuffour, 2016; Olard ve ark., 2008; Ripoll ve Farré, 2008; Nicholls ve James, 2013). Ayrıca, IKA teknolojisi asfaltın serim sezonunu da arttırmaktadır. Şöyle ki, IKA'nın üretim sıcaklığı ile ortamın sıcaklığı birbirine BSK'ya göre daha yakın olduğundan, IKA'nın inşa sırasındaki sıcaklık kaybı, BSK'ya göre daha az olmaktadır. Sıcaklıklardaki bu yakınlık sayesinde, asfaltın serim sezonu da uzamış olmaktadır. Ayrıca, bu özellik malzemenin daha uzun mesafelere taşınmasına da olanak sağlamaktadır.

Ilık karışım asfalt, bu avantajları sayesinde dünya genelinde, asfalt üretimindeki yerini yavaş yavaş almaya başlamıştır. Şekil 1.1'de, Avrupa'daki IKA üretiminin özellikle 2017'den sonra hız kazandığı görülmektedir. Ayrıca, 2017 yılında, IKA'nın toplam üretimdeki payı %2.5 iken, 2019'da bu oran %3.5 seviyelerine kadar çıkmıştır.

Çizelge 1.1’de ise, 2015-2019 yılları arasında ülkemizde yapılan bitümlü karışım uygulamaları ve kullanılan bitüm miktarları görülmektedir. Veriler incelendiğinde görülüyor ki, ülkemizde IKA teknolojisi hala çok yeni bir teknoloji olup, kullanımı oldukça sınırlıdır.



Şekil 1.1. Avrupa'daki toplam IKA üretimi ve IKA'nın toplam üretimdeki payı (Anonymous, 2019)

Çizelge 1.1. Türkiye’de son 5 yılda yapılan asfalt uygulamaları ve bitüm tüketimi (Anonim,2020a; Anonymous, 2019)

Yıllar	Sathi Kaplama (km ²)	Bitümlü Sıcak Karışım (milyon ton)	Soğuk Karışım Asfalt (milyon ton)	Ilık Karışım Asfalt (milyon ton)	Bitüm tüketimi (milyon ton)
2015	269.2	37.9	0.783	0.08	2.726
2016	306.4	40.4	0.544	0.151	2.931
2017	268.4	46.9	1.048	0.077	3.9
2018	136.6	41.7	0.707	0	2.91
2019	140.9	23.5	0.905	0	1.5

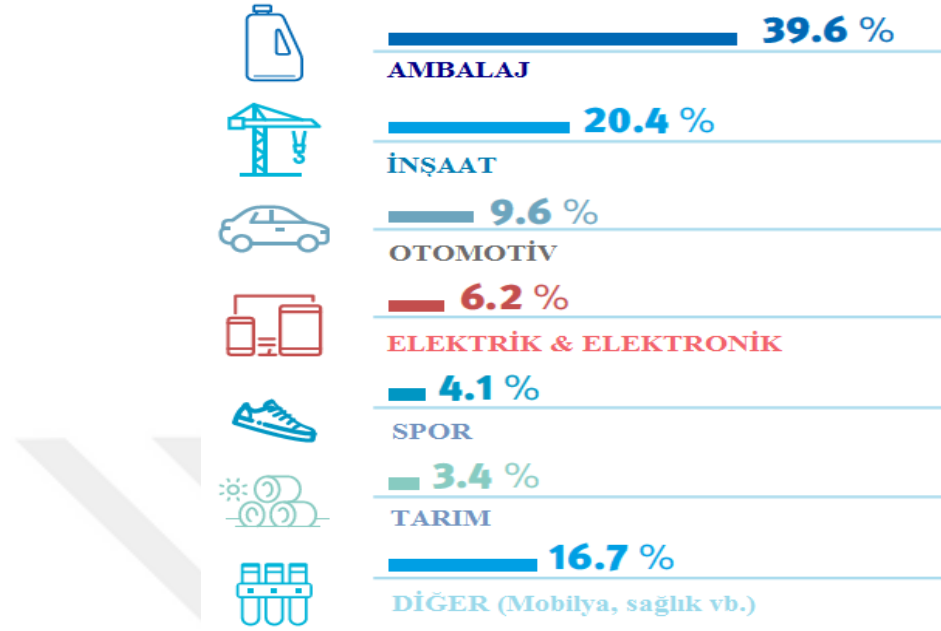
Ilık karışım asfalt teknolojisi 3 temel yöntemle üretilmektedir. Bunlardan ilki, organik katkı maddelerinin kullanıldığı yöntemdir. Bu uygulamada, bitümlü bağlayıcı ile modifiye edilen organik katkıları, bitümün viskozitesini düşürerek karışımın daha düşük sıcaklıklarda üretilmesini sağlamaktadır. İkincisi, köpükleme metodudur. Bu uygulamada, karışıma doğrudan veya dolaylı eklenen suyun, karışım içinde buharlaşarak köpükleme etkisi oluşturması sağlanır. Köpükleme etkisi ile bağlayıcının viskozitesinin azaltılması ve karışımındaki agregayı düşük plent sıcaklıklarında iyi bir şekilde sarması sağlanır. Kimyasal katkı uygulaması ise ılık karışım üretimindeki üçüncü yöntemdir. Bu yöntemde, diğer iki yöntemden farklı olarak bitümün

viskozitesinin azaltılmasına ihtiyaç duyulmaz. Kullanılan yüzey aktif maddeler, emülgatörler sayesinde karışımın işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve yapışkanlık özellikleri artırılır.

Tez çalışması kapsamında, ılık karışım asfalt üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmak üzere **atık plastikler** tercih edilmiştir. Plastik atıklar, **piroliz yöntemi** ile kimyasal olarak bozundurulmuş ve ortaya çıkan katı ve sıvı ürünler IKA katkı maddesi olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan katkıları organik maddeler olup bitümlü bağlayıcının viskozitesini düşürerek karışımın üretim sıcaklığını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sebeple, bu çalışmada ılık karışım asfalt üretim yöntemi olarak **organik katkılı yöntemin** kullanıldığı söylenebilir.

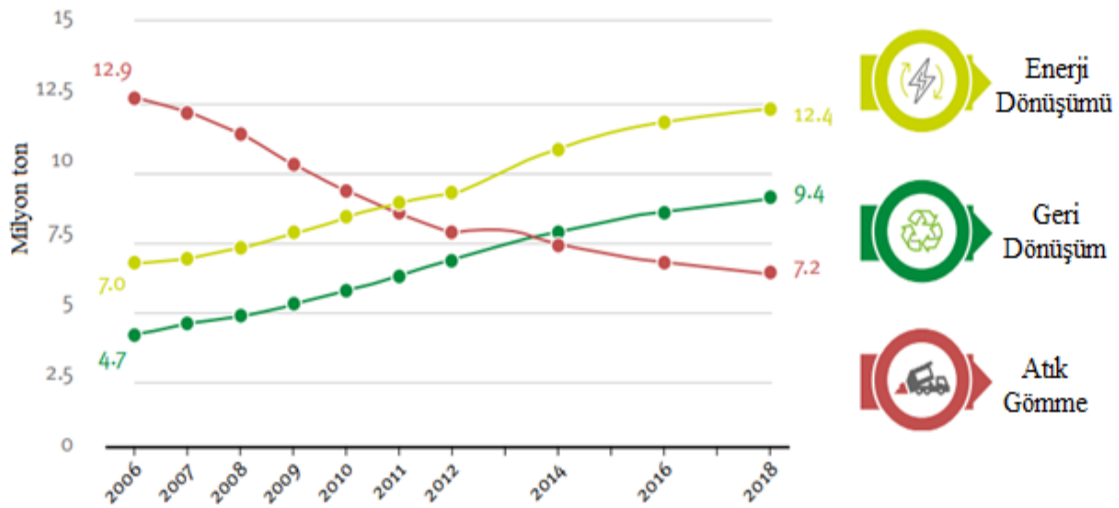
Atık plastikler hem çevreyi hem de insan sağlığını tehdit etmesi sebebiyle dünya genelinde büyük bir sorun teşkil etmektedir. Plastiğe olan talebin son yıllarda çok artması atık plastik miktarını da önemli ölçüde arttırmıştır. Dünya genelinde, 1950'li yılların başında 1,5 milyon ton olan plastik üretimi 2018 yılı itibariyle 359 milyon ton üretim kapasitesine ulaşmıştır. Plastik üretimindeki 200 katlık bu artış, plastiğin hem düşük maliyet ve yüksek verimde üretilebilirliğine hem de çok çeşitli sektörlerde kolaylıkla kullanılabilirliğine bağlanabilir. Şekil 1.2'de, Avrupa'daki plastik kullanımının sektörel dağılımı gösterilmiştir. Buna göre, Avrupa'da plastiğin en yaygın kullanıldığı alanın **ambalaj sektörü** (%39,6) olduğu görülmektedir. Aynı durum ülkemiz özelinde de geçerlidir. Türkiye plastik sektör izleme raporu verileri, tüm plastik sektörünün yaklaşık olarak %42'sini ambalaj sektörünün oluşturduğunu göstermektedir (Anonim, 2020b). Plastik gerek hafif olması gerekse de değerli ürünleri dış etkilerden ekonomik bir şekilde koruyabilmesi sebepleri ile ambalaj sektöründe yüksek oranda tercih edilmektedir. Ambalaj için kullanılan plastikler, diğer sektörlerde kullanılan plastiklerden daha kısa ömürlüdür. Ambalaj plastiklerinin tüketici tarafından kullanım süresi çok kısa olduğundan (örn, plastik su şişesi) **atık olma potansiyeli de çok yüksektir**. Avrupa plastik üreticileri birliğinin 2020 yılında yayınlanan raporuna göre, 2018 yılında Avrupa'da 61.8 milyon ton plastik üretimi gerçekleşmiş olup, bunun 29 milyon tonu atık olarak geri toplanmıştır. Toplam atık plastik miktarının ise 17.8 milyon tonunu (%61.4) ambalaj grubu plastikleri oluşturmuştur (Anonymous, 2020a). Bu sebeplerden dolayı, **çalışma kapsamı** ambalaj grubu plastikler olarak belirlenmiştir. Bu grubun içinden de, en hızlı büyüyen sektörlerden biri olan **sert ambalaj grubu plastikleri** seçilmiştir. Bu plastik grubundan **polipropilen (PP)**, **yüksek yoğunluklu**

polietilen (YYPE), polietilen tereftalat (PET) ve polistiren (PS) bu tez kapsamında kullanılmasına karar verilen plastik türleridir.



Şekil 1.2. Avrupa'daki plastik kullanımının sektörel dağılımı (Anonymous, 2020a)

Plastiklerin geri dönüşümü, üzerinde durulması gereken başka bir önemli konudur. Son yıllarda gelişen teknolojilerle birlikte kullanım ömrü tamamlanan plastiklerin geri dönüşüm yoluyla yeniden üretime dahil edilmesi veya enerjiye dönüştürülmesi yaygınlaşmaya başlamıştır. Ancak hala önemli miktardaki plastik, atık olarak doğaya bırakılmaktadır. Şekil 1.3'te atık plastiklerin Avrupa'da nasıl değerlendirildikleri gösterilmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere, 2006 yılından bu yana ortaya çıkan plastik atıkların enerji dönüşümü olarak ve geri dönüşüm olarak değerlendirilme oranında önemli gelişmeler kaydedilmiştir. 2018 yılında toplanan 29 milyon tonluk plastik atığın 21.8 milyon tonu (%75) gerek enerji dönüşümü gerekse de geri dönüşüm olarak değerlendirilmiştir. 7.2 milyon ton gibi büyük miktarda plastik atık ise gömülmek üzere uygun çöp sahalarına götürülmüştür. Çöp sahaları, atık malzeme miktarının artması ile gittikçe azalmakta ve vergileri pahalı hale gelmeye başlamaktadır. Ayrıca, gömülen plastiklerin tamamen çözünmesi çok uzun yıllar aldığından, toprakta ve yer altı sularında kirlilik düzeyi önemli ölçüde artmaktadır. Bütün bunlar plastiğin gömülmek yerine geri dönüşümüne odaklanmanın önemini göstermektedir.



Şekil 1.3. Avrupa'da atık plastiklerin değerlendirilmesindeki gelişim (Anonymous, 2020a).

Atık plastiklerin geri dönüşümü veya enerji dönüşümü farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Atık ürünün yakılması, en yaygın kullanılan enerji dönüşüm yöntemidir. Ancak, gerek atık malzemelerin çok yüksek sıcaklıklara (800-900°C) kadar ısıtılmasında çok enerji gerekmesi gerekse de süreç sonunda havaya zararlı gaz (CO₂) ve partiküllerin (Polisiklik aromatik hidrokarbonlar) salınması, yöntemi oldukça dezavantajlı hale getirmektedir. Bu yöntemle alternatif olabilecek gazlaştırma yöntemi ile atık ürünlerden emisyonu daha düşük sentez gazlar üretilmekte ve bu gazlar kullanılarak enerji dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Atık plastiklerin geri dönüşümünde ise, plastikler makinelerde kırılıp küçük parçalara ayrılır. Üreticiler bu ürünü orijinal hammadde ile birlikte kullanabilir veya eritip içine çeşitli katkı maddeleri katarak ikinci sınıf mamul olarak da değerlendirebilir. Bu işlemlerin dışında, atık plastikler çeşitli kimyasal süreçlerle daha küçük moleküllü yapılara ayrıştırılarak da geri dönüştürülebilmektedir. Bu yöntemlerden biri olan piroliz yöntemi, organik maddelerin oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıkta (>300 °C) bozundurulması işlemidir. Piroliz ile atık ürünler katı, sıvı ve gaz fazına dönüştürülebilmektedir. Elde edilen katı ve sıvı ürünler, katkı malzemesi ve değerli yakıt olarak değerlendirilebilirken, gaz ürünler yine enerji üretimi için kullanılabilir.

Tez çalışmasında, hem atık olarak doğada bulunan plastiklerin geri dönüşümüne katkı sağlanması hem de atık maddelerin ılık karışım asfalt katkısı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Tezin ikinci bölümünde, bu konu hakkında yapılan literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, tez kapsamında kullanılan malzeme ve yöntemler ele alınmıştır. Tez çalışmasının dördüncü bölümü olan araştırma

ve bulgular kısmının ilk aşamasında, bitümlü bağlayıcılara yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, rotasyonel viskozimetre (RV), dönen ince film etüvü testi (RTFOT), dinamik kayma reometresi (DSR), kiriş eğme reometresi (BBR) test sonuçlarına yer verilmiştir. Pirolizden elde edilen katkı maddelerinin tez çalışmasına uygunluğu, katkıların bitüm üzerindeki fiziksel ve reolojik etkileri bu testlerle detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümün ikinci aşamasında, karışım deneyi sonuçları ele alınmıştır. Hazırlanan karışımlardaki optimum bağlayıcı oranları, Marshall Metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bundan sonraki süreçte, optimum katkı oranında ve optimum bitümlü bağlayıcı oranında her bir IKA ve BSK numune serisine karışım performans deneyleri (tekerlek izi deneyi ve termal gerilme kısıtlı numune testi) uygulanmıştır. Bu bölümün devamında, katkı-bitüm etkileşimi incelenmiştir. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ve Zeta Potansiyel Analizi deneylerinden elde edilen sonuçlar bu kısımda değerlendirilmiştir. Bu bölümün son aşamasında ise, BSK ve IKA'lara yapılan maliyet analizine yer verilmiştir. Tez çalışmasının beşinci bölümünde ise, çalışmadan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ilık karışım asfalt, birçok avantajı nedeniyle son yıllarda popülerliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Dünya genelinde birçok araştırmacı ılık karışım asfalt ile ilgili çalışmalar yürütmüştür. Bu tez çalışmasında da, çeşitli plastik atıkların (YYPE, PP, PET ve PS) pirolizinden elde edilen katı ve sıvı ürünlerin IKA katkısı olma potansiyeli incelenmiştir. Literatür incelendiğinde, plastik atıkların asfalt çalışmalarında katkı malzemesi olarak kullanıldığı araştırmalara rastlamak mümkündür. Bu araştırmalarda, plastik atıkların **herhangi bir kimyasal süreçten geçirilmeden** doğrudan bitüme (ıslak metot) veya karışıma (kuru metot) dahil edildiği çalışmaların **yoğunlukta** olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu çalışmaların önemli bir kısmının BSK performansını geliştirmek üzere yapıldığı da gözden kaçmamaktadır. Atık plastiklerin pirolizinden elde edilen ürünlerin kullanıldığı çalışmaların ise literatürde **oldukça az** olduğu görülmüştür. Al-Hadidy (2006) ile Al-Hadidy ve Tan (2009) yaptıkları araştırmalarda, pirolitik ürünlerin BSK performansına etkisini ele almıştır. Shang ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada ise XPE (çapraz bağlı polietilen) pirolizinden elde edilen vaks ürününün IKA performansına etkisi incelenmiştir. Özetle, literatürde plastiklerin pirolizinden elde edilen ürünlerin IKA katkısı olarak kullanılması konusunda ciddi bir eksik söz konusudur. Bu tez çalışması, literatüre bu konuda katkı yapmayı amaçlamaktadır. Bu bölümde, plastik atıkların doğrudan karışıma veya bitüme dahil edildiği çalışmalar ile plastiklerden çeşitli kimyasal yöntemlerle (piroliz de dahil olmak üzere) elde edilen ürünlerin kullanıldığı çalışmalar ayrı ayrı ve detaylı olarak ele alınmıştır. Devamında, organik yöntemle hazırlanmış IKA ile ilgili yapılmış güncel çalışmalara yer verilmiştir. Bu bölümünün son kısmında ise, IKA ve IKA'yı oluşturan temel bileşenler (agrega ve bitümlü bağlayıcı) hakkında geniş bir literatür araştırmasına yer verilmiştir.

2.1 Atık Plastiklerin Bitümde veya Bitümlü Karışımda Doğrudan Kullanıldığı Araştırmalar

Abed ve Bahia (2020), nano boyutta yüksek yoğunluklu polietilen (NYYPE) ve stiren bütadien stiren (SBS) katkı maddelerinin, bitümlü karışımlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, PG (Performance Grade) 64-16 sınıfı saf bitüm %3 NYYPE ve %5 SBS ile ayrı ayrı modifiye edilmiştir. Katkıların etkisi; RV, DSR, BBR gibi

bitümlü bağlayıcı testlerinin yanı sıra, tekerlek izi ve dolaylı çekme testi gibi karışım deneyleri ile de araştırılmıştır. DSR sonuçlarına göre, NYYPE katkı ilavesi ile bitümlü bağlayıcının performans derecesi önemli ölçüde gelişmiştir. Ancak bu gelişim SBS katkısından daha iyi değildir. RV sonuçlarına göre ise NYYPE modifiyeli bitümün viskozitesi SBS modifiyeli bitüme göre daha düşük değerdedir. Buradan, NYYPE'li karışımların karıştırma-sıkıştırma sıcaklığının SBS'li karışımlardan daha düşük olduğu sonucuna varılabilir. DSR sonuçlarının aksine tekerlek izi direncinde NYYPE katkısı SBS'den daha iyi sonuç vermiştir. Dolaylı çekme testi sonuçlarına göre ise, her iki katkı ile üretilen modifiye karışımların performansı, katkısız karışımlardan daha iyi sonuç vermiştir. NYYPE ile hazırlanan karışım SBS modifiyeli karışımdan az bir farkla daha yüksek sonuç vermiştir. Özetle, NYYPE ile hazırlanan karışımların, SBS modifiyeli karışımlardan hem üretim sıcaklığı daha düşüktür hem de tekerlek izi direnci ve dayanım performansı SBS modifiyeli karışımlardan daha yüksektir.

Haider ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, iki farklı atık plastik (YYPE ve DYPE-Düşük yoğunluklu polietilen) malzeme bitümlü karışıma ıslak ve kuru metotla katılarak, bu katkı maddelerinin bitüm-agrega adezyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada 4 farklı tipte agrega (Kalsiyum karbonat, dolomit, dolerit ve granit) kullanılmıştır. Yapılan deneylerden Modifiye Lotman deneyi sonuçlarına göre, dolerit tipi agrega ve YYPE kullanılan (ıslak metot) karışımlar nem hasarına karşı en dirençli grup olmuştur. Kalsiyum karbonat ve dolomit agrega grubu ile hazırlanan karışımlar, her iki atık plastiğin kullanıldığı durumda da limitlerin üzerinde sonuç vermiştir. Ancak granit tipi agreganın kullanıldığı karışımlar (hangi plastik katkının kullanıldığı fark etmeksizin) neme en hassas karışım tipi olmuştur. Bunun sebebi, granit tipi agreganın asidik özelliğe sahip olması, daha az kutuplu olması ve su emici özelliğinin yüksek olmasıdır. Hamburg tekerlek izi sonuçlarına göre ise, ıslak metotla oluşturulan karışımlarda (tüm agrega grupları için) tekerlek izi derinliği, kuru metotla hazırlanan karışımlardan daha az çıkmıştır. Sonuç olarak, ıslak metot kullanılarak oluşturulan YYPE modifiyeli karışımın, agrega-bitüm adezyonu en iyi olan karışım olduğu tespit edilmiştir.

Ebrahim ve Karim (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı tipte katkıların (SBS, kauçuk kırıntısı ve PP), geri dönüştürülmüş asfalt (GDA) ile hazırlanan karışımlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, GDA oranı %40 olarak belirlenmiştir. Kalan kısım yaşlanmamış yeni malzeme olarak kullanılmıştır. Seçilen katkıları %3, %5 ve %7 (bitüm ağırlığınca) oranlarında karışıma dahil edilmiştir.

Çalışmada, GDA'lı karışımların nem hassasiyeti durumunu tespit etmek için dolaylı çekme testi yapılmıştır. Araştırmanın sonucunda, optimum katkı oranları SBS için %7, kauçuk kırıntısı için %3 ve PP için %5 olarak belirlenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti oranları incelendiğinde, katkısız GDA'lı karışım için bu oran %82.2 iken; %7 SBS, %3 kauçuk ve %5 PP için oranlar sırasıyla %99.7, %97.1 ve %90.7 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, ilgili katkıların GDA'lı karışımlarda nem hasarı direncini arttırdığı anlaşılmıştır.

Costa ve ark. (2019) yaptıkları bir çalışmada, atık polimerlerden EVA (Etilen vinil asetat) ve YYPE'nin, 35/50 penetrasyon dereceli bitüm üzerindeki morfolojik ve reolojik etkilerini incelemiştir. Ayrıca, SBS modifiyeli bitümle de karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada, penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite gibi klasik testlerin yanı sıra depolama stabilitesi, DSR ve MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) gibi testlerle de katkıların etkisi değerlendirilmiştir. Bitümlerin morfolojik yapısı ise florasan mikroskobu altında analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, EVA ve SBS modifiyeli bitümün viskozite ve reolojik özellikler açısından birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Buna ilaveten, EVA'nın SBS'den daha iyi depolama stabilitesi değerlerine ulaştığı görülmüştür. Buna sebep olarak, EVA'nın bitüm içerisindeki dağılımının daha homojen olması gösterilmektedir. Öte yandan, YYPE modifiyeli bitümün penetrasyon-yumuşama noktası sonuçlarının umut vadecici olduğu, fakat MSCR sonuçlarının istenilen düzeyde olmadığı tespit edilmiştir.

El-Naga ve Ragab (2019) yaptıkları bir çalışmada, PET'in bitümlü bağlayıcının özellikleri ve asfalt karışımın performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. PET, yüksek sıcaklıkta sıvılaştırılmış ve bitüme karıştırılarak modifiye edilmiştir. Çalışmada, bağlayıcı testleri olarak penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri, karışım testleri olarak da Marshall, dolaylı çekme ve tekerlek izi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, PET modifiyeli bitümün penetrasyon değeri saf bitüme göre düşük çıkarken, yumuşama noktası ve viskozite değerleri yüksek çıkmıştır. Buradan, katkı maddesinin bitümü sertleştirdiği sonucuna varılabilir. Karışım sonuçlarına göre ise, saf bitüme PET ilavesi ile asfalt karışımın Marshall stabilite değeri artmış, tekerlek izi derinliği önemli ölçüde azalmıştır. Dolaylı çekme testinde, katkı oranı %12 olduğunda karışımın dayanımının maksimum olduğu belirlenmiştir.

Bala ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, nanosilika partiküllerinin polipropilen modifiyeli asfalt karışım üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, 80/100 penetrasyon dereceli bitüm ile polipropilen ve nanosilika modifiye edilerek

karışımlar hazırlanmıştır. Nanosilika malzeme, bitüm ağırlığınca %1-4 aralığında kullanılarak bitümlü sıcak karışımdaki etkisi incelenmiştir. Karışım performans testleri olarak 4 nokta eğilme testi, dolaylı çekme testi ve süzülme testi yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları şöyle özetlenebilir: Eğilme testi ile PP modifiyeli karışıma nanosilika ilavesinin (%3 oranına kadar) karışımın yorulma ömrünü uzattığı tespit edilmiştir. Süzülme testi sonuçlarından görülmüştür ki, karışıma nanosilika ilavesi ile bitümün agregadan ayrılma oranı azalmıştır. Yapılan testlerden elde edilen başka bir sonuç ise, karışımda %4 oranında nanosilika kullanılması, karışımın düşük sıcaklık performansını olumsuz etkilemiştir. Genel olarak bütün test koşullarını sağlayan optimum nanosilika oranı %2 olarak tespit edilmiştir.

Maharaj ve ark. (2018), PET ve lastik kırıntısının bitümlü sıcak karışımın performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, saf bitüm olarak 60/70 penetrasyon dereceli bitüm (%75) ile Trinidad göl asfaltı (%25) birlikte kullanılmıştır. Her iki katkı maddesi de kuru metotla karışıma dahil edilmiştir. Marshall testi ile katkı maddelerinin etkisi incelenmiştir. Araştırmanın sonucuna göre, katkı maddeleri %6 (bitüm ağırlığınca) oranında kullanıldığında en yüksek Marshall Quotient (MQ) oranı yakalanmıştır. Bu katkı oranlarıyla hazırlanan modifiye karışımların MQ değerleri, saf bitümle hazırlanan kontrol karışımına göre %21-22 artış göstermiştir.

Appiah ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, YYPE ve PP cinsinden atık plastiklerin bitüm üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanılan plastikler doğranmış ve ardından 170-180°C'de penetrasyon derecesi AC-20 olan saf bitüme karıştırılarak modifiye edilmiştir. Çalışmada, hem saf bitüme hem de modifiye bitüme penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite testi ve ayrıca FTIR testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, atık plastiklerin ilavesi bitümü sertleştirmiştir, dolayısıyla bitümün viskozite, yumuşama noktası değerlerini arttırmış, penetrasyon değerini ise düşürmüştür. Öte yandan FTIR sonuçları ise her iki atık plastiğin de, bitümle karışımının başarılı olduğunu göstermiştir.

Moubark ve ark. (2017), PP modifiyeli bitümlü sıcak karışımın mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, %5 ve %7 oranlarında PP ıslak yöntemle karışıma dahil edilmiştir. Hazırlanan karışımlara Marshall ve dolaylı çekme testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre, Marshall testinde, %5 PP modifiyeli karışım en yüksek stabilite değerine ulaşmıştır. Benzer durum dolaylı çekme test sonuçlarında da görülmüştür. Özetle, %5 PP modifiyeli karışımın her iki testte de saf bitümle hazırlanan kontrol karışımdan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

González ve ark. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, 4 farklı plastik türünün (Poelietilen (PE), PP, Ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) ve PS) asfalt karışım performansına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, bahsi geçen plastikler filler yerine %1 oranında karışıma dahil edilmiştir. Tekerlek izi ve 4 nokta eğilme testleri ile karışımların plastik deformasyona karşı direnci ve eğilme rijitlikleri belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre, ÖTL içerikli karışım, plastik deformasyona karşı direnci ve eğilme rijitliği değerini kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %30 ve %50 oranında arttırmıştır. PP katkılı karışım ise, eğilme rijitliğini %60 oranında arttırırken, plastik deformasyona karşı direnci geliştirememiştir. PE içerikli karışım, eğilme rijitliğini %60 oranında arttırmakla birlikte plastik deformasyona karşı direnci de yine %60 oranında (en yüksek oran) yükseltmeyi başarmıştır. PS katkılı karışım grubu, eğilme rijitliğini %15 oranında arttırabilirken, plastik deformasyona karşı direnci ise düşürmüştür. Özetle, PE, PP ve ÖTL katkı maddelerinin asfalt karışımların performansına olumlu etki ettiği görülmüştür. PS katkı maddesi ise diğer 3 katkıdan daha kötü sonuçlar verdiği için, bu katkı maddesinin üzerinde çalışılmaya devam edilmesi gerekmektedir.

Hasan ve ark. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, bitüm modifikasyonunda elektronik cihazların plastik atıkları kullanılmıştır. Bu plastik türleri sırasıyla şöyledir: ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), ABS-PC (Akrilonitril Butadien Stiren Polikarbonat) ve HIPS (Yüksek darbeye dayanıklı polistiren). Çalışmada, atık plastikler bitüme katılmadan önce kümen peroksit ile kimyasal bir reaksiyona sokulmuştur. Bu işlemle, plastik ve bitüm arasında daha iyi bir kovalent bağ kurulması amaçlanmıştır. Dolayısıyla, modifiye bitümlerin yarısı kimyasal süreçten geçirilen katkılarla, diğer yarısı ise kimyasal süreçten geçmeyen katkılarla hazırlanmıştır. Modifiye bitümlere ve saf bitüme DSR ve BBR testleri yapılmıştır. Deneylerde, katkıların bitüm ağırlığınca oranı %5 olarak seçilmiştir. Deney sonuçları gösteriyor ki, her 3 katkı da bitümün kompleks modülünü ve elastik özelliğini arttırmıştır. Dahası, katkıların kimyasal süreçten geçirilerek kullanıldığı modifiye bitümlerde bu etki katlanarak artmıştır. Dolayısıyla, bahsi geçen bu kimyasal süreç sayesinde plastik-bitüm arasında daha güçlü bağlar oluşturulmuştur.

Arabani ve Pedram (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, YYPE atık plastiğinin ve atık camın BSK'nın performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada, atık cam maksimum 4.75 mm boyutta doğrudan karışıma dahil edilirken, YYPE 0.075-0.15 mm boyutlarında bitüme ilave edilmiştir. YYPE oranları bitüm ağırlığınca %2-4-6-8-10 olarak seçilmiştir. Hazırlanan modifiye karışımlara ve kontrol

karışıma Marshall, dolaylı çekme, dolaylı çekme yorulma ve dinamik sünme testleri yapılmıştır. Dolaylı çekme test sonuçlarına göre, 5°C'de yapılan testte YYPE katkılı karışımların elastisite modülü kontrol numunesinden düşük çıkarken, 25 ve 40°C'de yapılan deneylerde, YYPE ilavesi ile karışımın elastisite modül değerleri kontrol karışımını geçmiştir. Yazarlar, 5°C'de düşük sonuç alınmasını, düşük sıcaklıkta modifiye bitümün hidro-karbonik yapıdaki davranış değişikliğine bağlamaktadır. Dolaylı çekme yorulma testinde ise, YYPE miktarı arttıkça karışımın yorulmaya karşı direncinin arttığı, optimum dozajın ise %6-10 arasında olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar dinamik sünme testinde de elde edilmiştir.

Abtahi ve ark. (2013), cam fiber ve PP fiber modifiyeli bitümlü karışımın performans özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, %2, 4, 6 oranlarında PP fiber ıslak metotla, %0.05, 0.1, 0.2 oranlarda cam fiber kuru metotla karışıma dahil edilmiştir. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve duktilite testleri yapılmıştır. Bitümlü karışımlara ise Marshall testi yapılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki, PP fiber ilavesi bitümün penetrasyon ve duktilite değerini düşürürken yumuşama noktasını arttırmaktadır. PP ve cam fiber ilavesi, Marshall stabilite değerini de geliştirmiştir. %6 PP ve %0.1 cam fiber kullanımı ile maksimum Marshall stabilitesi elde edilmiştir. Kontrol karışıma göre %25'lik bir artış sağlanmıştır.

Ahmadinia ve ark. (2012), PET plastik şişe atığının taş mastik asfaltın (TMA) performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, PET %0, 2, 4, 6, 8, 10 oranlarında (bitüm ağırlığınca) bitüme katılmıştır. Hazırlanan karışımlara tekerlek izi, nem hassasiyeti, süzülme ve esneklik modülü deneyleri yapılmıştır. Esneklik modülü sonuçlarına göre, %6 PET ilavesi ile karışımın esneklik modülü %16 artarak maksimum değerine ulaşmıştır. Tekerlek izi sonuçları ise, %4 PET ilavesi ile en düşük tekerlek izi derinliği oluştuğunu göstermektedir. Kontrol karışıma göre tekerlek izindeki iyileşme %29 olarak belirlenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti oranı ise, karışımdaki PET içeriği arttıkça azalmıştır. Ancak, bütün değerler limitlerin üzerinde sonuç vermiştir. Öte yandan, karışıma PET ilavesinin bitüm süzülme miktarını da azalttığı gözlenmiştir. Bütün bu sonuçlardan, optimum PET içeriğinin %4-6 aralığında olduğuna karar verilmiştir.

Colbert ve You (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, bilgisayar atıkları (ABS ve HIPS) kullanılarak hazırlanan modifiye bitümlerin performansı incelenmiştir. Çalışmada, her iki katkının da içeriği %2.5, 5, 15 (bitüm ağırlığınca) olarak belirlenmiştir. Hazırlanan modifiye bitümlere ve saf bitüme (PG 58-28) RV, DSR ve

BBR testleri yapılmıştır. Bitümdeki katkı oranı arttıkça, bitümün viskozitesinin de arttığı RV testi ile görülmüştür. DSR sonuçları incelendiğinde, %5 ve %15 katkılı bitümlerin saf bitümün yüksek sıcaklık PG sınıfını 2 derece yükselttiği görülmüştür. BBR sonuçlarına bakıldığında ise, modifiye bitümlerin %5 katkı oranına kadar düşük sıcaklık sınıfını (-28) koruduğu gözlenmiştir. Bu orandan sonra, saf bitüme kıyasla düşük sıcaklıkta kötü sonuçlar alınmıştır. Dolayısıyla, ABS ve HIPS modifiyeli bitümlerde hem yüksek hem de düşük sıcaklık sınıfı kriterleri birlikte düşünüldüğünde, en etkili sonuçların %5 katkı oranında alındığı ortaya çıkmaktadır.

Attelman ve ark. (2011) yaptıkları bir çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) plastiğinin bitümlü sıcak karışımın performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, B80/100 saf bitüme farklı oranlarda (%1, 3, 5, 7) YYPE ilave edilerek modifiye bitümler oluşturulmuştur. Hem saf hem modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama, duktilite gibi bağlayıcı testleri yapılmıştır. Bu test sonuçlarından şunlar belirlenmiştir: Karışımındaki YYPE oranı arttıkça bitümlü bağlayıcı sertleşmekte, dolayısıyla bağlayıcının yumuşama noktası değeri artarken, penetrasyon ve duktilite değeri azalmaktadır. %5 YYPE oranından sonra duktilite değeri, şartnamenin (25°C-100+cm) altında kalmıştır. Karışım testleri olarak ise Marshall, nem hassasiyeti, eğilme rijitliği ve esneklik modülü testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, YYPE ilavesi ile karışımın Marshall stabilitesi yükselmiştir. Marshall oranındaki en büyük artış (%55), %5 YYPE ilavesi sonucu gerçekleşmiştir. YYPE içerikli karışımların dolaylı çekme gerilmesi oranı %85'ten daha fazla çıkmıştır. Bu sonuç, bu tip modifiye karışımların nem hassasiyetine karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. YYPE ilavesi ile karışımın düşük sıcaklıktaki (-10°C) kopma modülü ve rijitlik değerleri artmıştır. Ayrıca, modifiye karışımın yüksek sıcaklıktaki (25°C) esneklik modülü değeri de kontrol numunesinden daha yüksek çıkmıştır.

Tapkın (2008) yaptığı bir çalışmada, polipropilen fiberin asfalt performansı üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada, 60/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcıya %0.3, %0.5 ve %1 oranlarında PP fiber katılarak modifiye karışımlar oluşturulmuştur. Marshall ve tekrarlı yük dolaylı çekme testleri ile PP fiberin asfalt karışım performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, PP fiber içeriği arttıkça karışımın Marshall stabilite değeri artış göstermiş, %1 PP fiber içerikli karışımda ise bu artış %58 seviyesine ulaşmıştır. Ayrıca, %1 PP fiber ilavesi ile karışımın yorulma ömrü %27 oranında uzamıştır.

Hınışlıoğlu ve Ağar (2004), YYPE içeren plastik atıkların, BSK'da polimer katkısı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, YYPE içeren modifiye bitümler farklı oranlarda (%4, 6, 8), farklı karıştırma sıcaklıklarında (145, 155, 165°C) ve farklı sürelerde (5, 15, 30 dk) hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara ve saf bitümlerle hazırlanan kontrol karışımına Marshall testi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, optimum modifikasyon parametreleri %4 YYPE, 165°C karıştırma sıcaklığı ve 30 dk karıştırma süresi olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde hazırlanan karışımın MQ değeri, kontrol numunesinden %50 daha yüksek çıkmıştır. Buradan, YYPE modifiyeli karışımların kalıcı deformasyonlara karşı direnci arttırdığı sonucuna varılabilir.

Almeida ve ark. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE türünde plastik film atığının IKA ve BSK üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, DYPE bitüm ağırlığınca %6 oranında kuru yöntemle IKA ve BSK'ya dahil edilmiştir. IKA katkısı olarak Sasobit-Redux® kullanılmış olup, karışımdaki oranı (ıslak yöntem) bitüm ağırlığınca %1.5 olarak belirlenmiştir. BSK numuneleri 165°C'de ve IKA numuneleri 100°C'de hazırlanmıştır. Karışımlar hem plastik katkılı hem de plastik katkısız olarak toplam 4 çeşit (BSK, BSK-%6 plastik, IKA ve IKA-%6 plastik) hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara, Marshall, tekerlek izi, 4 nokta eğilme testi, dolaylı çekme mukavemeti oranı testi ve tek eksenli dinamik sünme testi yapılmıştır. Test sonuçlarından şu çıkarımlar yapılmıştır: Marshall testi incelendiğinde, IKA ve IKA-%6 plastik karışımların BSK'ya göre yaklaşık %30 oranında bir stabilite kaybı olduğu görölmüştür. Ortaya çıkan bu kaybın temel sebebi, plastiklerin 100°C'deki IKA karışım koşullarında yeterince bitümlerle modifiye olamaması ve boşluk yüzdesinin fazla olması olarak açıklanmıştır. Tekerek izi testinde, IKA numuneleri BSK'dan çok daha başarılı sonuç vermiştir. Tekerek izindeki azalmanın BSK'ya göre %67 oranlarında olduğu belirtilmiştir. Plastik ilavesi ile hem BSK'da hem de IKA'da iyileşmeler görölmüştür. Dinamik sünme testinde ise, tekerlek izi sonuçlarının tam aksine IKA numuneleri en kötü sonucu veren numuneler olmuştur (Sonraki çalışmalarda bu durumun araştırılması planlanmaktadır). 20°C'de yapılan 4 nokta eğilme testinde esneklik modölü tayini yapılmıştır. Test sonuçlarında, plastik ilavesinin IKA esneklik modölüne (6000 MPa) arttırdığı ancak BSK'ya (8000 MPa) erişemediği görölmüştür. Dolaylı ekme testi sonuçlarında, IKA'nın plastik ilavesi ile dolaylı çekme mukavemeti oranının (ITSR) ok az miktarda düştüğu ama her iki IKA'nın da %80 limitini sağladığı görölmüştür. BSK'da bu değerler IKA'dan daha yüksek çıkmıştır.

Mosa ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, ılık karışım asfalta öğütülmüş PET plastik katarak IKA'nın performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, PET plastik malzemesi, maksimum boyutu 2.36 mm olacak şekilde, ince agregaya yerine % 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 ve 1.1 (agrega ağırlığına) oranlarında karışıma dahil edilmiştir. Ayrıca IKA katkısı olarak Asphamin® zeolit (karışım ağırlığının %0.3'ü oranında) kullanılmıştır. Hazırlanan IKA'lara; Marshall, tekerlek izi ve dolaylı çekme testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, karışımda kullanılacak optimum PET katkı oranı %0.5 olarak tespit edilmiştir. Bu katkı oranında hazırlanan karışımların, Marshall stabilite değerlerinde, dolaylı çekme, nem hasarı ve tekerlek izi direncinde artış gözlenmiştir.

2.2 Atık Plastiklerin Bitümde veya Bitümlü Karışımda Kimyasal Bir Süreçten Geçirildikten Sonra Kullanıldığı Araştırmalar

Çalışmanın bu bölümünde, plastik atıkların çeşitli kimyasal yöntemlerle (piroliz, glikoliz, aminoliz, devulkanizasyon vb.) işlenip, daha sonra bitümle veya bitümlü karışımla kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir. Bu konu üzerine yapılan literatür taramasında, aşağıda detaylı olarak açıklanan şu çalışmalara rastlanmıştır:

Leng ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, PET plastik su şişelerini aminoliz yöntemi ile katkı maddesine dönüştürmüş ve GDA ile birlikte kullanımını incelemiştir. Hazırlanan modifiye bitümlerde, PET katkısı %2 oranında ve GDA'dan ayrıştırılan yaşlanmış bitüm ise %15, 25, 40 oranlarında (bitüm ağırlığına) kullanılmıştır. Kontrol numunesi olarak katkısız saf bitüm ve %2 PET katkılı modifiye bitüm kullanılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümlere, DSR, BBR, FTIR analizi ve florasan mikroskop ile görüntü analizi yapılmıştır. Ayrıca bitümlü karışıma soyulma testi yapılmıştır. DSR sonuçlarında modifiye bitümler, tekerlek izi direncini en az %15 geliştirirken, orta sıcaklık yorulma direncini ise %60'a kadar arttırmayı başarmıştır. BBR sonuçlarına bakıldığında, GDA ve PET ilavesi ile modifiye bitümün düşük sıcaklık özellikleri saf bitüme yakın değerler vermiştir. Öte yandan, kullanılan katkıları ile bitümün soyulmaya karşı direnci de artmıştır. FTIR sonuçlarından, PET katkısının, GDA içerikli modifiye bitümlerdeki oksidatif ürün miktarını azalttığı sonucuna varılmıştır. Modifiye bitümlerin saf bitüm ile yakın davranış sergilediği anlaşılmıştır. Buradan, PET katkısının gençleştirici özellikte olabileceği görülmüştür. Florasan mikroskopu ile yapılan görüntü analizinde ise, PET katkısının bitüm içinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür.

Ameri ve Nasr (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, devulkanize edilerek geri dönüştürülmüş PET plastik atığının bitümlü karışım performansına etkisi incelenmiştir. Bitüm ağırlığınca farklı oranlarda (%0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15) katkı maddesi ile bitüm modifiye edilmiştir. Kontrol ve modifiye karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri Marshall, dolaylı çekme mukavemeti ve tekerlek izi testleri ile incelenmiştir. Marshall sonuçları incelendiğinde, tüm katkılı karışımlar, kontrol karışımından daha iyi stabilite değerleri vermiştir. Maksimum stabilite değerine %10 oranında ulaşılmıştır. Bu orandan sonra bitümün viskozitesindeki artış, karışımın sıkışabilirliğini azaltmış ve boşluk yüzdesini arttırmıştır. Dolaylı çekme test sonuçları incelendiğinde, modifiye karışımların tamamının, kontrol karışımından daha yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu testteki optimum katkı oranı ise %7.5 olarak saptanmıştır. Tekerlek izi sonuçlarında da, %7.5 katkı oranına kadar tekerlek izi değerleri azalmakta, ardından artışa geçmektedir. Ancak, katkılı karışımların tamamı kontrol karışımından çok daha düşük tekerlek izi derinliğine sahiptir. Bütün sonuçlar incelendiğinde, %7.5 ve %10 katkı oranındaki karışımların en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Avsenik ve Tušar (2016) yaptığı bir çalışmada, araba lastiğini ve az miktarda plastiği birlikte piroliz etmiştir. PP1 ve PP2 olarak iki farklı ürün elde edilmiştir. Bu ürünlerden ilki ikincisine göre daha yumuşak bir üründür. Piroliz sonucu elde edilen ürünler hem bitüme katılmaksızın doğrudan bağlayıcı olarak, hem de bitümle belli oranlarda karıştırılarak çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Kontrol numunesi olarak B70/100 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre, PP1'in, B70/100 bitümün yerine doğrudan bağlayıcı olarak kullanılmasının uygun olabileceği görülmüştür. Çünkü bu ürün, mekanik özellikler açısından B70/100 bitümle aynı veya daha iyi performans göstermiştir. PP1'in en önemli dezavantajı, B70/100 bitüme göre yumuşama noktasının düşük ve frass kırılma noktasının yüksek olmasından dolayı sıcaklık aralığının dar olmasıdır. PP2'nin ise doğrudan bitüm yerine kullanılmak için çok sert bir malzeme olduğu gözlenmiştir. PP2'nin yumuşama noktası değerleri diğer numuneler arasında en yüksek sonucu vermiştir. Ayrıca PP2'nin de frass kırılma noktası yüksek çıkmıştır. Piroliz ürünlerinin bireysel performanslarının yanı sıra bitümle karışımları (%50PP1+B50/70 veya %50PP2+B50/70) da test edilmiştir. Karışımın özellikleri bitüme yakın çıkmıştır. Ayrıca agrega-bağlayıcı uyumunda saf bitüme göre daha iyi bir performans gözlenmiştir.

Gürü ve ark. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, atık PET şişelerin glükolizinden elde edilen ürünlerin BSK performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, atık PET şişeler glükoliz işlemine tabi tutulmuş olup, reaksiyon sonucu viskoz PET ve sıvı polyol PET olmak üzere iki adet katkı elde edilmiştir. Bu katkı maddeleri, saf bitüme %1, 2, 3, 5, 10 oranlarında (bitüm ağırlığına) ilave edilmiştir. Hazırlanan saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, RV, DSR, BBR, SEM ve FTIR testleri yapılmıştır. Karışım testleri olarak ise, Marshall ve Nicholson soyulma testi yapılmıştır. Test sonuçları gösteriyor ki, her iki katkı maddesi de bitümün düşük sıcaklık performansını ve yorulma direncini arttırmıştır. Ayrıca, ilgili katkı maddelerinin ilavesi ile bitümün soyulma direnci önemli ölçüde artmıştır. Marshall stabilite değerlerine bakıldığında ise, sıvı polyol PET katkılı karışımlarda, düşük bitüm oranlarında stabilite değerleri saf bitümle hazırlanan BSK'ya kıyasla artmıştır. Viskoz polyol PET katkılı bitümlerde ise Marshall stabilite değerlerindeki artış, daha geniş bitüm oranı aralığında görülmüştür.

Shang ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, geri dönüştürülmüş PEX maddesinin pirolizinden elde edilen vaks ürününün ılık karışım asfalt performansı incelenmiştir. Elde edilen piroliz ürününün hem saf bitüm hem de SBS modifiyeli bitüm üzerindeki etkileri araştırılmıştır. PEX pirolitik katkı maddesinin hem saf hem de SBS katkılı bitümün viskozitesini önemli ölçüde düşürdüğü gözlenmiştir. Ayrıca bu katkının ilavesi ile bitümün yumuşama noktası artmış, penetrasyon değeri ise azalmıştır. Ayrıca yapılan DSR deneyi sonucuna göre, PEX katkı maddesi hem saf bitümün hem de SBS modifiyeli bitümün kompleks modül değerini arttırmış, faz açısını ise azaltmıştır.

Al-Hadidy ve Tan (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, DYPE atık plastiğin pirolizinden elde edilen katı ürünün TMA üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, bitüm ağırlığına %2, 4, 6, 8 oranında DYPE katkısı ile bitüm modifiye edilmiştir. Hazırlanan karışımlara, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, Marshall ve dolaylı çekme testi yapılmıştır. Test sonuçları gösteriyor ki, DYPE ilavesi bitümün penetrasyon değerini düşürürken, yumuşama noktası değerini arttırmıştır. %6 DYPE oranına kadar duktilite sonuçları şartname limitlerini sağlamıştır. Yine %6 oranında DYPE kullanımı ile Marshall stabilitesi (en yüksek değerine ulaşarak) saf bitüme kıyasla %58 daha yüksek sonuç vermiştir. Bu katkı içeriği ile diğer şartname limitleri de sağlanmıştır. Dolaylı çekme mukavemeti oranları incelendiğinde, kontrol karışımında bu oran %56 iken, %6 DYPE içerikli karışımın oranı %94 olmuştur. Sonuçlar bütünüyle

değerlendirildiğinde, %6 katkı içeriğinde yüksek performanslı ve durabil karışımlar elde edildiği görülmüştür.

Al-Hadidy (2006) yaptığı bir çalışmada, PP plastiğinin pirolizinden elde edilen katı ürünün sıcak karışım asfaltta kullanılabilirliğini incelemiştir. Araştırmada, PP pirolizinden elde edilen katı ürün, bitüm ağırlığına %1, 2, 3, 4, 6, 8 oranlarında bitüme katılmıştır. Çalışmada, bağlayıcı testleri olarak penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri tercih edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışımdaki PP oranı arttıkça bitüm sertleşmiş dolayısıyla penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktası değeri artmıştır. Düktilite limit değerleri ise %4 katkı oranı ile sağlanmıştır. Marshall testi ile karışımdaki optimum bitümlü bağlayıcı oranı %5 olarak tespit edilmiştir. Optimum bağlacı oranında yapılan testlerde maksimum stabilite-minimum akma parametreleri %2 PP kullanılan karışımlarda elde edilmiştir. Özetle, %2 PP kullanımı karışımın Marshall testi özelliklerini geliştirmiştir. Yapılan dolaylı çekme testi sonuçlarına göre ise, karışıma PP ilavesi agrega-asfalt adezyonunu arttırmış, asfalt karışımın yanıl deformasyonunu azaltmıştır. Bütün bunlar, karışımın çekme modülü değerini arttırmıştır.

2.3 Organik Yöntemle Elde Edilmiş İKA ile İlgili Yapılmış Güncel Çalışmalar

Tez kapsamında, plastiğin pirolizinden elde edilen katkıları, ticari bir katkı olan Sasobit® ile karşılaştırılmıştır. Bu sebeple, çalışmanın bu aşamasında Sasobit® ve diğer organik vaks türündeki katkıların (Polietilen vaks, polipropilen vaks, Montan Vaks® vb.) İKA üzerindeki etkilerinin araştırıldığı makalelere yer verilmiştir. Ayrıca, bitümlü karışımlarda yüksek sıcaklık performansını geliştiren katkıları olan SBS ve lastik kırıntısının Sasobit® ile kullanımı üzerine yapılan çalışmalara da literatürde sıklıkla rastlanılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarında bu bölümde yer verilmiştir. İlgili çalışmalar şu şekildedir:

Yue ve ark. (2021) yaptıkları bir çalışmada, farklı türde polimer modifiye bitümlerin (SBS, lastik kırıntısı (LK) ve LK+SBS) yorulma ve iyileşme özellikleri üzerinde Sasobit®'in etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, hazırlanan modifiye bitümler şu şekildedir: %4 SBS, %4 SBS+%3 Saso, %15 LK, %15 LK+%3 Saso, %3 SBS+%10 LK ve %3 SBS+%10 LK+%3 Saso. Bu modifiye bitümler RTFOT ve ultraviyole ışın yöntemleri ile yaşlandırılmıştır. Hazırlanan tüm modifiye bitümlere ve saf bitüme frequency sweep test (FST), linear amplitude sweep (LAS) test, X-Ray Diffraction

(XRD) ve FTIR testleri yapılmıştır. XRD ve FTIR sonuçları, Sasobit®'in polimer modifiye bitümlerde herhangi bir kimyasal reaksiyona sebep olmadığını göstermiştir. Ancak, bitümün bileşenlerinden biri olan doygunlara karşılık gelen bazı pik değerlerini yükseltmiştir. Bu durum, karışımın viskozitesindeki azalma ile ilişkilendirilmiştir. FST sonuçlarından, modifiye bitümlerde yüksek frekanslarda, yüksek elastiklik davranışı görülmüştür. Sasobit®'in karışımlara dahil olması ile, bu davranış daha da belirgin hale gelmiştir. Psödo-gerinim enerji teoremi baz alınarak bitümlerin yorulma davranışı LAS test ile incelenmiştir. Test sonuçlarına göre, Sasobit®'in ilavesi ile SBS, LK ve SBS+LK modifiyeli yaşlandırılmamış bitümlerin yorulma dirençleri sırasıyla 3.3, 1.9 ve 1.1 kat artmıştır. Numunelerin kendiliğinden iyileşme özellikleri yine LAS test ile araştırılmıştır. Sasobit®'in, tüm modifiye bitümlerin kendiliğinden iyileşme özelliklerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Zhang ve ark. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, polietilen vaks (PEV) IKA katkısının, modifiye bitüm ve bitümlü karışımların performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen vaks (DYPEV), yüksek yoğunluklu polietilen vaks (YYPEV) ve oksitlenmiş polietilen vaks (OPEV) olmak üzere 3 farklı PEV kullanılmıştır (Bu katkıların içinde ise molekül ağırlığına göre 3 farklı türde YYPEV ve 2 farklı türde DYPEV kullanılmıştır). Ayrıca, PEV katkılarını karşılaştırmak için Sasobit® ve Montan Vaks® ticari IKA katkıları kullanılmıştır. Katkıların etkisi şu deneylerle araştırılmıştır: Performans sınıfı testleri (DSR-BBR), depolama stabilitesi, viskozite, işlenebilirlik, Hamburg tekerlek izi ve dolaylı çekme testi. Ayrıca, katkıların modifikasyon mekanizmasını araştırmak için florasan mikroskobu analizi yapılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki, katkıların tamamı yüksek sıcaklık stabilitesini ve nem hasarı direncini artırırken, düşük sıcaklık stabilitesini azaltmıştır. Molekül ağırlığındaki artış, bitümlerin viskozitelerini, nem hasarı direncini ve düşük sıcaklık stabilite değerlerini geliştirmiş, ancak depolama stabilite değerlerini düşürmüştür. PEV katkıları, düşük sıcaklık stabilite değerleri açısından hem Sasobit® hem de Montan Vaks®'tan daha iyi sonuçlar vermiştir. Florasan mikroskobu sonuçlarına göre ise, bitümle en uyumlu olan (mikroyapı açısından) katkının OPEV olduğu anlaşılmıştır.

Ameri ve ark. (2020) yaptıkları bir çalışmada, polipropilen vaks (PV) ve kömür vaksının (KV), lastik kırıntısı (LK) modifiyeli bitümlerin performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, PG64-22 sınıfına ait bitüm, kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler şu şekildedir: PG 64-22 + %15 LK , PG

64-22 + %15 LK + PV (%2, %4, %6) ve PG 64-22 + %15 LK + KV (%2, %4, %6). Hazırlanan bitümlere, RV, DSR, MSCR, FTIR ve LAS testi yapılmıştır. RV sonuçlarına bakıldığında, her iki IKA katkısı da LK modifiyeli bitümlerin viskozite değerlerini düşürmüştür. Ancak, PV katkısının diğerine göre çok daha etkili olduğu görülmüştür (PV %6 ilavesi ile LK modifiyeli bitümün 135°C'deki viskozite değeri yarı yarıya azalmıştır). FTIR sonuçlarından, her iki IKA katkısının da yapıda kimyasal bir değişiklik oluşturmadığı anlaşılmıştır. DSR sonuçlarından, %2 PV ilavesi ile LK modifiyeli bitümün yüksek sıcaklık PG sınıfı 70'ten 76'ya çıkmıştır. Öte yandan, KV ilavesi, LK modifiyeli bitümün PG sınıfını düşürmüştür. Ancak yine de %6 KV ilavesinde PG sınıfı saf bitümle aynı çıkmıştır. MSCR testine göre, %2 PV modifiyeli bitüm, LK modifiyeli bitümün Jnr değerini %49 düşürerek ve R değerini %46 arttırarak en yüksek tekerlek izi direnç faktörüne sahip karışım olmuştur. KV katkısı ise LK modifiyeli bitümlerin tekerlek izi direncini azaltmıştır. LAS test sonuçlarına göre, %6 oranında ilave edilen KV katkısı, LK modifiyeli bitümün yorulma direncini %2.5 ve %5 gerinim seviyelerinde sırasıyla %71 ve %33 arttırmayı başarmıştır. PV katkılı bitümler ise LK modifiyeli bitümlere göre düşük yorulma direnci performansı sergilemiştir.

Zhu ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, nano boyutta kullanılan grafen oksit (GO) malzemesinin BSK ve IKA karışım performansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. IKA katkısı olarak Sasobit® (%3) ve atık yemeklik yağ (AYY) (%5), saf bitüm olarak ise 60/70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. GO malzemesi ise bitüm ağırlığınca %0.05 oranında kullanılmıştır. Çalışmada, karışımlara; Marshall testi, nem hassasiyeti testi, tekerlek izi deneyi, 3 nokta eğilme testi, kayma direnci testi ve yaşlanma testi yapılmıştır. Yapılan Marshall testinin sonuçlarına göre, grafen oksit ve Sasobit® modifiyeli IKA₁, 13.52 kN ile en yüksek stabilite değerini vermiştir. AYY ve GO modifiyeli diğer karışım olan IKA₂ ise 10.32 kN değerinde kalmıştır. Saf bitüm ile hazırlan BSK ise 9.31 kN stabilite değeri vermiştir. Marshall testi sonuçları, en başarılı alternatifin B60/70+GO+Sasobit® karışımı olduğunu göstermiştir. Yapılan diğer testlerde ise şu sonuçlara ulaşılmıştır: Karışımlara GO ilavesi; karışımların nem hasarı direnci, tekerlek izi direnci ve asfalt esneklik modülü değerlerini geliştirmiştir. Karışıma Sasobit® ilavesi (IKA₁) ile karışım performansları daha da yükselmiştir. Ancak düşük sıcaklık çatlak direncinde GO+Sasobit® ilavesinin önemli bir etkisi olmamıştır. Düşük sıcaklıktaki çatlak direncini GO+AYY katkı kombinasyonu (IKA₂), açık bir şekilde geliştirmiştir.

Ahmed ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, 3 farklı tipte (topak, sıvı, özel tasarım sıvı) Polietilen vaks (PEV) ile hazırlanan ılık karışım asfaltların (IKA) yaşlanma özelliklerini ve nem direncini incelemiştir. Araştırmada, 3 farklı bölgeden (Minnesota, Ohio ve Iowa) asfalt karışım numunesi alınmıştır. Bu numunelerde IKA katkısı olarak sırasıyla topak polietilen vaks (TPEV), sıvı polietilen vaks (SPEV) ve özel tasarım sıvı polietilen vaks (ÖTPEV) kullanılmıştır. Bu bölgelerden ayrıca bitümlü sıcak karışım (BSK) asfalt numuneleri de alınarak IKA numuneleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Alınan numunelere ekstraksiyon işlemi yapılarak bitümlü bağlayıcı ve agregaya ayrışımı sağlanmıştır. Geri dönüştürülmüş bitümlü bağlayıcıların yaşlanma özelliklerini değerlendirmek amacıyla DSR ve BBR testleri yapılmıştır. Araştırmacılar karışımların nem hassasiyetini incelemek için, Asfalt Bağ Dayanımı (ABD) deneyi yapmıştır. Test, hem kuru şartlarda koşullandırılmamış hem de nemli koşullarda bekletilmiş karışımlara uygulanmıştır. ABD testi sonuçlarına göre, hem IKA hem de BSK numunelerinin hepsinde kuru koşullarda hazırlanan karışımlar nemli koşullardaki karışımlardan daha iyi sonuç vermiştir. TPEV ve SPEV ile üretilen IKA'ların neme karşı direnci BSK'lardan daha kötüdür. Başka bir deyişle, bu katkılar bitümlü karışımın neme karşı direncini geliştirememiştir. ÖTPEV ile oluşturulan IKA'nın ise nem direnci BSK'dan daha iyi bir sonuç vermiştir. Buradan ÖTPEV katkı maddesinin hem bitümlü bağlayıcının yaşlanmasını geciktirdiği hem de karışımın nem direncini kontrol numunesine kıyasla arttırdığı tespit edilmiştir.

Gao ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit® ve Deurex (Şeker kamışı parafini) katkılı asfaltların yüksek sıcaklıktaki performansları ölçülmüştür. Bitümlü bağlayıcıya uygulanan geleneksel testlerin yanı sıra, viskozite testi, DSR testi ve FTIR testleri de bu çalışmada yapılmıştır. Viskozite testi sonuçlarına göre hem Sasobit® hem de Deurex katkılı bitümün viskozite değeri katkısız bitüme göre daha düşük çıkmıştır. DSR sonuçlarına göre ise, tekerlek izi faktörü $G^*/\sin\delta$ değerleri her iki katkı kullanımında da katkısız numuneye göre artış göstermiştir. Başka bir deyişle, yüksek sıcaklık koşulları altında her iki katkı da karışımın deformasyon direncini ve elastik performansını iyileştirmektedir. Bu çalışmada, katkıları ayrı ayrı bitüme katılıp değerlendirme yapıldığı gibi birlikte kullanılarak da performansları gözlenmiştir. En iyi sonucun %2 Deurex ve %2-3 Sasobit®'in birlikte kullanılması ile elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca FTIR testleri ile bu iki katkının karışabilirlik özelliklerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Nakhaei ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, Polietilen vaks (PEV) ve Ethylene-bis-stearamide (EBS) vaks katkılı ılık karışım asfaltların nem hassasiyeti özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, modifiye bitümlere DSR, BBR ve FTIR testleri yapılmıştır. Bu katkılarla hazırlanan IKA'lara ise Modifiye Lotman deneyi yapılmıştır. Bağlayıcı testlerinden DSR sonuçlarına göre, EBS katkı miktarı arttıkça kompleks modül değeri önemli ölçüde artarken, faz açısı da düşmüştür. Bu durum, EBS modifiyeli karışımların tekerlek izi direncinin yüksek olabileceğinin bir göstergesidir. PEV katkısının etkisi ise bu testte ihmal edilecek düzeyde kalmıştır. BBR sonuçlarına göre, EBS katkı ilavesi bitümlü bağlayıcının PG sınıfını -22'den -16'ya arttırmıştır. Bu sonuç EBS'nin rijit yapısından kaynaklanmıştır. Bu katkı -22°C'de başarılı sonuç verememiştir. Ilık karışımların nem hassasiyeti özelliklerine bakıldığında, karışımda EBS oranı arttıkça (%2'ye kadar) karışımın çekme gerilmesi oranı (TSR), kontrol numunesine kıyasla %10 artış göstermiştir. PEV katkı maddesinin ilavesi ile ise, TSR değeri azalmıştır. Bu durumun sebebinin, EBS katkı maddesinin yapısında bulunan ve soyulmaya karşı direnç sağlayan N-H bağ grubu olduğu düşünülmektedir. Bu bağ yapısının PEV katkı maddesinde olmadığı FTIR test sonuçları ile görülmüştür. Özetle, EBS katkı maddesi karışımın hem tekerlek izi hem neme karşı direncini geliştirirken, PEV katkı maddesi her iki parametrede de kötü performans sergilemiştir.

Topal ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, Sasobit® içeren ılık karışım asfaltın özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, Sasobit® bitüm ağırlığınca %3 oranında kullanılmıştır. Saf ve modifiye bitümlere geleneksel testlerin yanı sıra DSR ve RV testi yapılmıştır. Hazırlanan bitümlü karışımların tasarımı, Marshall metoduna göre yapılmıştır. Karışımların performansı dolaylı çekme mukavemeti deneyi ve tekerlek izi deneyi ile değerlendirilmiştir. RV sonuçlarından, saf bitüme %3 Sasobit® katılması ile karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarında 12°C azalma olduğu tespit edilmiştir. Marshall tasarımına göre optimum bitüm içeriği BSK'da %4.76 ve IKA'da %4.25 olarak belirlenmiştir. 20, 25 ve 30°C'de yapılan dolaylı çekme test sonuçlarından, her sıcaklıkta IKA'nın BSK'dan daha yüksek dolaylı çekme mukavemetine sahip olduğu anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar, tekerlek izi test sonuçlarında da görülmüştür (20000 çevrimde, IKA'nın tekerlek izi derinliği BSK'nın neredeyse yarısı seviyesindedir).

Wen ve ark. (2018) yaptıkları bir araştırmada, LK modifiyeli bitümlerin, iki çeşit IKA katkısı (Sasobit® ve PEV) etkisindeki performanslarını incelemiştir. Çalışmada LK, bitüm ağırlığınca %18 oranında 3 farklı boyutta (30-50 meş-LK1, 50-100 meş-LK2 ve 100-200 meş-LK3) bitüme ilave edilmiştir. Referans bitüm olarak

B60-70 bitüm kullanılmıştır. Her iki IKA katkısı da bitüm ağırlığınca %4 oranında kullanılarak bitüm modifiye edilmiştir. Hazırlanan bitümlere, depolama stabilitesi, DSR RV, BBR testleri yapılmıştır. Ayrıca, LK+IKA karışım maliyetleri LK modifiyeli BSK karışım ile karşılaştırılmıştır. Gaz emisyonu ve enerji tüketim hesaplamaları da bu aşamada yapılmıştır. Yapılan deneylerden ve hesaplamalardan şu sonuçlara varılmıştır: Depolama stabilitesi sonuçlarına göre, LK partikülleri 100-200 meş gibi çok küçük boyutlarda bitüme katılsa dahi, tam manasıyla bitüm ile modifiye olamamıştır. IKA katkı maddelerinin ilavesi, yumuşama noktası farklarını azaltmıştır. LK modifiyeli bitümlere Sasobit® ilavesi ile karıştırma sıcaklığı 10°C azalırken, PEV ilavesi ile 5°C azalmıştır. DSR sonuçlarına göre Sasobit®, LK modifiyeli bitümün yüksek sıcaklık PG sınıfını iki seviye arttırırken, düşük sıcaklık sınıfını bir seviye düşürmüştür. LK modifiye bitüme PEV ilavesi ise tam tersi bir etki yapmıştır (PG yüksek sıcaklık sınıfı bir seviye azalmış, düşük sıcaklık sınıfı değişmemiştir). BSK'ya göre IKA katkılı karışımların hem gaz emisyonları hem de enerji tüketimleri azalmıştır. Sasobit® bu kalemde, PEV'den daha başarılı sonuç vermiştir. Ancak, toplam maliyetler düşünüldüğünde PEV katkılı karışımlar, Sasobit® katkılı karışımlardan daha ekonomik bir tablo çizmiştir. Bunun temel sebebi, Sasobit®'in birim maliyetinin (3,614.4 \$/ton), PEV birim maliyetinden (1,355.4 \$/ton) çok yukarıda olmasıdır.

Ge ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit® ve polifosforik asit (PPA) katkılı modifiye bitümün laboratuvar performansı ve modifikasyon mekanizması araştırılmıştır. Saf bitüme %3 oranında Sasobit® katılarak ılık karışım asfalt elde edilmiştir ve sonrasında 4 farklı oranda (%0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0) PPA ile bu karışım modifiye edilmiştir. Asfaltın fiziksel ve reolojik özellikleri geleneksel testler, DSR ve BBR ile tespit edilmiştir. Bunun dışında asfaltın fonksiyonel bağ yapısı FTIR testi ile belirlenmiştir. Deneyler farklı yaşlanma düzeyindeki bitümlere uygulanmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre Sasobit® ve PPA katkılı bitümlerin özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir. Modifiye bitümün penetrasyon değeri azalmış, yumuşama noktası değeri artmıştır. PPA oranının %1'den az olduğu durumlarda duktilite değeri istenilen seviyelere düşmüştür. Bitümün farklı yaşlanma koşulları için, modifiye bitümün yüksek sıcaklıkta deformasyon direncinde ve yaşlanma direncinde gelişme gözlenmiştir. Asfaltın düşük sıcaklıklarda performansının istenilen düzeyde olması için, katılan PPA oranının %1.5 değerini geçmemesi istenmektedir. FTIR sonuçlarına göre saf bitümün Sasobit® ve PPA ile uyumu ve karışabilirliği yüksektir.

Kök ve ark. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, saf bitüme farklı oranlarda SBS ve Sasobit® katılarak, modifiye bitümün reolojik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, katkıların hem ayrı ayrı hem de birlikte etkileri gözlenmiştir. Karışımlara geleneksel deneylerin yanı sıra RV ve DSR deneyleri de yapılmıştır. Geleneksel deneylerden elde edilen sonuçlara göre sadece Sasobit® katılı bitümün yumuşama noktası saf bitüme göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra sadece Sasobit®'in kullanımı, bitümün sıcaklık hassasiyeti üzerinde olumlu etki yapmıştır. Her iki katkının birlikte kullanılması, sıcaklık hassasiyeti açısından önemli bir etki oluşturmamıştır. Hem SBS hem de Sasobit® katkısı, bitümün tekerlek izi direncini geliştirmiştir. Saf bitüme göre; %4 katılı SBS'nin tekerlek izi parametre değerleri 3.77 kat, %4 katılı Sasobit®'nin tekerlek izi parametre değerleri 1.64 kat daha iyi çıkmıştır. Bu da, SBS'nin tekerlek izi parametrelerinin Sasobit®'ten daha iyi olduğunu göstermektedir. Eğer iki katkı bu oranlarda karıştırılırsa, tekerlek izi performansı maksimum değerine ulaşmaktadır. Katkılar birlikte kullanıldığında, Sasobit®'in SBS katılı bitümün esneklik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Viskozite deneyine bakıldığında, Sasobit® kullanımının karışımın viskozite değerini düşürdüğü, SBS katkısının ise karışımdaki oranı arttıkça karışımın viskozitesini eksponansiyel olarak arttırdığı gözlenmiştir. Katkılar birlikte kullanıldığında Sasobit®'in bu eksponansiyel artışı lineer artışa çevirdiği ve karışım sıcaklığını da önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Edwards ve ark. (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit® ve PEV IKA katkı maddelerinin, 3 farklı bitümlü bağlayıcının düşük sıcaklık performansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada B160/220 sınıfında 3 çeşit bitüm kullanılmıştır. Bunlar; doğal vaks içeriğine sahip olmayan bitüm (NV), doğal vaks içeriği %3.8 olan bitüm (ME) ve doğal vaks içeriği %2 olan bitüm (WB) şeklindedir. Karışımların düşük sıcaklık performansını tespit etmek için termal gerilme kısıtlı numune testi (TSRST), dinamik sünme testi ve kompleks modül testi yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcılara ise geleneksel testler (penetrasyon, yumuşama, duktilite vb.) ile birlikte düşük sıcaklık performansını gözlemlemek için BBR testi yapılmıştır. Karışım testlerinden TSRST testinde 3 farklı koşul incelenmiştir. İlk koşulda, numuneler 85°C'de 42 gün bekletilmiş ve sonrasında bu test yapılmıştır. İkinci durumda ise, numuneler 1 gün süre ile -25°C'de bekletilmiş, ardından deney gerçekleştirilmiştir. 3.durumda ise numuneler koşullandırılmamıştır. Deneyin sonuçlarına göre, koşullandırılmamış NV tipi bitüme %6 Sasobit® ilavesi TSRST kırılma sıcaklığını -

34°C'den -32°C'ye yükseltmiştir. PEV ilavesi ise NV bitümünde herhangi bir değişikliğe yol açmamıştır. 42 gün bekletilmiş numunelerde kırılma sıcaklığı, koşullandırılmamış olanlara göre 1-5°C artış göstermiştir. Bu deneyde en iyi sonuç -25°C'de koşullandırılmış numunelerde alınmıştır. Kırılma sıcaklığı, koşullandırılmamış numunelerden 3-7 °C daha düşük çıkmıştır. Düşük sıcaklık kırılmasına en dirençli karışımdan en zayıf olanına doğru sıralama yapılırsa sonuç şöyledir: NV > NV + 6% PEV > ME + 6% PEV > WB + 6% PEV > NV + 6% S. Dinamik sünme testi sonucuna göre ise, NV+S karışımının en düşük deplasmana sahip karışım olduğu görülmüştür. Bu karışımın tekerlek izi direncinin de yüksek olması beklenmektedir. Kompleks modül testinde ise her iki vaks ilavesi de karışımın modül değerini arttırırken, faz açısını azaltmıştır. Sasobit® katkılı karışımın PEV katkılı karışımdan daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

2.4 Ilık Karışım Asfalt ve Ilık Karışım Asfaltı Oluşturan Temel Malzemeler Hakkında Yapılan Literatür Araştırması

2.4.1 Agregalar

Agregalar, hem bitümlü sıcak karışımın hem de ılık karışım asfaltın ağırlıkça yaklaşık %90-95'ini ve hacimce %75-85'ini oluşturur. Dolayısıyla, agregalar asfalt karışımının davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Asfaltın davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için agreganın özelliklerini ve kökenini iyi bilmek gerekmektedir (Read ve Whiteoak, 2003). Agregalar doğal, işlenmiş ve sentetik olmak üzere 3 gruba ayrılabilir:

Doğal agreganın kaynağı kayalarlardır. Kayalar, jeolojik oluşum şekline göre magmatik, tortul ve metamorfik kayalar olarak 3 gruba ayrılır.

Magmatik kayalar, magmanın yeryüzüne çıkarak soğuması sonucunda oluşur. Yeryüzüne ulaşmadan, yavaş bir şekilde soğuyan magmadan türeyen kayalara plutonik kayalar, yeryüzüne ulaşıp hızlı soğuyan magmadan meydana gelen kayalara ise volkanik kayalar denmektedir. Plutonik kayalara örnek olarak; granit, siyenit, diorit verilebilirken, volkanik kayalara diyabaz, bazalt ve fonolit örnek olarak verilebilir (Read ve Whiteoak, 2003).

Tortul kayalar, küçük parçaların farklı etkenlerle bir yerden farklı bir yere taşınarak birikmesi sonucu oluşan bir kaya türüdür. Biriken parçalar çok uzun yıllar

boyunca yerine oturarak kayaçları meydana getirir. Yağmur suları, erimiş buzullar, rüzgar gibi etkenler gevşek malzemeleri sürükleyerek dere, deniz veya okyanus yataklarına depolar. Bu şekilde meydana gelen kayaçlara mekanik tortul kayaç adı verilir. Çakıl, konglomera bu gruba örnek olarak verilebilir. Sudaki ölü organizmaların iskelet parçalarının suda zamanla çökmesi sonucu biyolojik tortul kayaçlar meydana gelir. En bilinen örneği kireç taşıdır. Bu tez kapsamında da kullanılan agrega türüdür. Bunun dışında, çözülmüş vaziyette bulunan minerallerin suda çökmesi ile de kimyasal tortul kayaçlar meydana gelir. Bu kayaçlara örnek olarak dolomit ve kaya tuzu verilebilir.

Metamorfik kayaçlar, magmatik kökenli kayaçların sıcaklık, basınç gibi etkenlerle dönüşüm geçirmesi sonrasında oluşurlar. Mermer, gnays bu gruba örnek olarak verilebilir.

Yuvarlak yüzeyle doğal agregalar, birbirlerine kenetlenmesi zayıf olan agregalardır. Bu özellikteki agregalar asfalt karışımlarda kullanıldığında, karışımın dayanımının düşmesine sebep olur. Bu sorunu ortadan kaldırmak için agregalar kırılarak köşeli hale getirilirler. Bu agregalara işlenmiş agrega adı verilir (Fwa, 2006).

Sentetik agregalar, imalat ürünü olan yapay agrega grubudur. Yüksek fırın cürufu, geri dönüştürülmüş yapı malzemeleri bu gruba örnek olarak verilebilir. Sentetik agregaların özellikleri kökenine göre değişmektedir. Asfaltta kullanılabilmesi için, her sentetik agrega grubunun ayrı ayrı test edilmesi gerekir.

2.4.1.1 Agregaların özellikleri

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar boyutlarına göre şu şekilde sıralanır (Orhan, 2012):

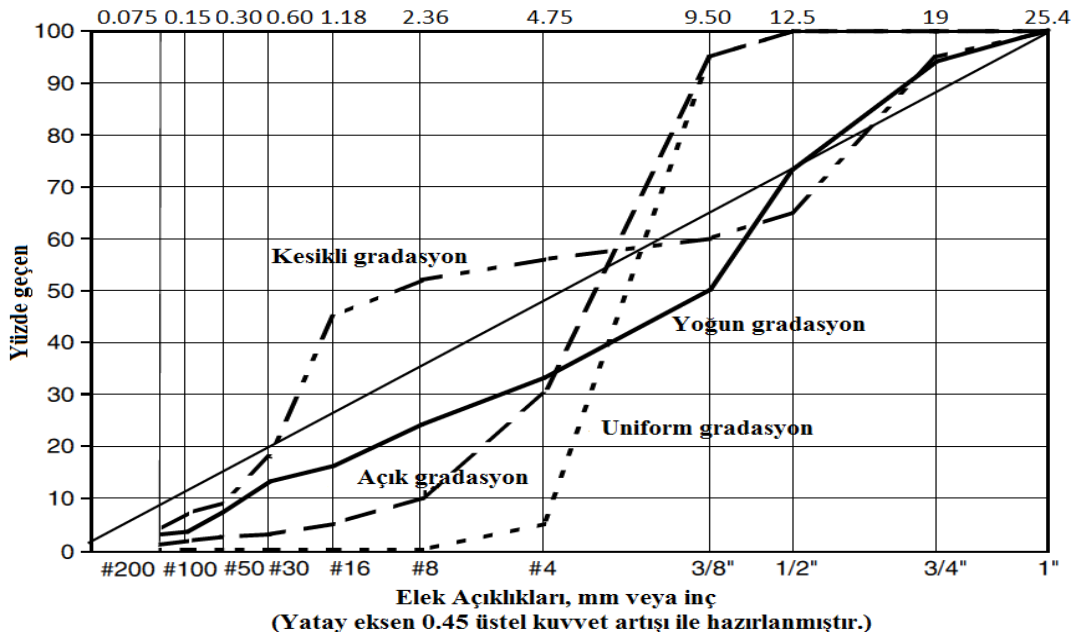
- İri agrega, 4.75 mm açıklıklı elek (No.4) üzerinde kalan agrega grubudur.
- İnce agrega, 4.75 mm – 0.075 mm (No.200) açıklıklı elekler arasında kalan agregalardır.
- Mineral filler, 200 nolu elekten geçen agregadır.

Bitümlü karışımlarda kullanılan her bir agrega grubunun farklı görevleri vardır. İri agrega, karışımı çevreleyen bir iskelet görevi görür. İnce agrega, iri agregalardan oluşan boşlukları doldurarak karışımı yoğunlaştırır. Boşluklar azaldıkça karışımın dayanımı da artar. Mineral filler, asfalt karışımındaki bağlayıcının viskozitesinin artmasında önemli etkiye sahiptir. Serim esnasında karışımın sert bir yapıya ulaşmasına

katkı sağlar (Tia, 2003). Agregaların bitümlü karışımlardaki görevlerini yerine getirebilmeleri için aşağıda belirtilen özelliklere sahip olmaları gerekmektedir:

- *Dane şekli:* Agregaların şekli, karışımın sıkışabilirliğine ve stabilitesine etki eder. Köşeli, kırılmış taneli agregalar tercih edilir. Uzun ve düz agregalar karışımın stabilitesine olumsuz etki yapmasından dolayı istenmez. Agreganın bu özelliği yassılık indeksi testi ile ölçülür (TS EN 933-3).
- *Yüzey dokusu:* Agregaların yüzeyinin pürüzlü olması istenir. Çok pürüzlü yüzeylere sahip agregalar, kayma gerilmelerine karşı yüksek direnç gösterir. Agregada yüzey pürüzlülüğü azaldıkça cilalanma artar. İstenmeyen bir durumdur. Cilalanma testi ile agregaların cilalanma değerleri tespit edilir (TS EN 1097-8). Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ), bu değerlerin aşınma tabakası için %50'in altında olmasını istemez. Şartname limitinin sağlanmadığı zorunlu hallerde, çeşitli pürüzlendirme malzemeleri kullanılarak istenilen pürüzlülük sağlanmaktadır (Anonim, 2013).
- *Gözeneklilik:* Bitüm emilimini etkileyen bir özelliktir. Agregaların bitüm adezyonunun güçlü olması için agregaların bir miktar gözenekli yapıda olması istenir.
- *Dayanım:* Agregalar, gelen yükleri kırılmadan veya ufalanmadan karşılayabilmeleri gerekir.
- *Dayanıklılık:* Agregaların su ve don etkisiyle ayrışmaması istenir. Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) veya sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltileri kullanılarak agregaların donma ve çözölmeye karşı dayanıklı olup olmadığı tespit edilir. Yapılan test sonucunda aşınan agreganın % olarak oranı tespit edilerek agreganın dayanıklılığı ortaya çıkarılır (TS EN 1367-2). Bunun dışında, bitümlü kaplandığında suyun etkisiyle soyulmaması da agregadan beklenen özellikler arasındadır. Soyulma mukavemeti testi ile agreganın bu özelliği belirlenir (TS EN 12697-11). Karayolu Teknik Şartnamesi'nde, test sonucunda bitümden soyulmadan kalan agreganın en az %60 olması istenir. Su ve don etkisi dışında agregaların parçalanmaya karşı da dayanıklı olması istenmektedir. Agregalardaki bu özelliğin kontrolü için parçalanma direnci (Los Angeles) testi yapılır. Bu testin sonunda parçalanmış agrega miktarı, % cinsinden bulunarak agreganın parçalanmaya karşı dayanıklılığı tespit edilmiş olur (TS EN 1097-2).

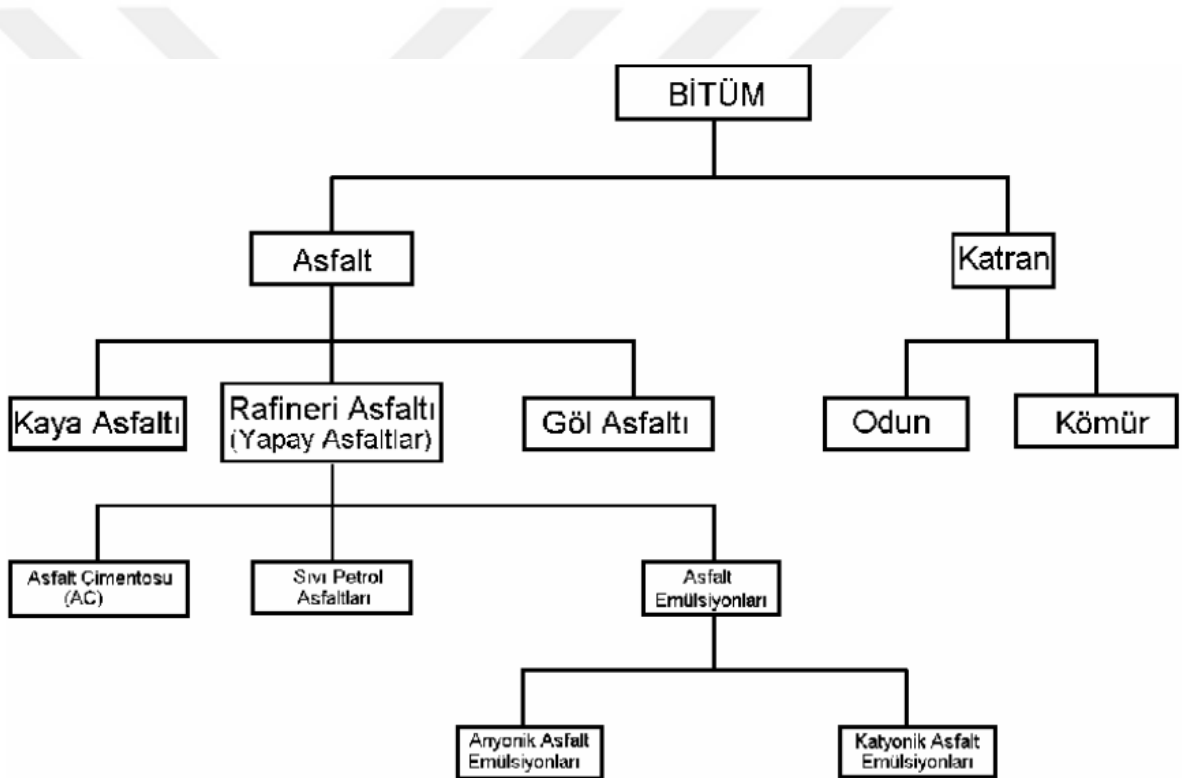
- *Agreganın temizliği*: Agregada karışımında kil topağı, organik madde veya zararlı maddeler olmamalıdır.
- *Gradasyon (Dane dağılımı)*: Agregaların dane boyutu dağılımına verilen isimdir. Elek analizi ile belirlenir. Belirli çaplardaki eleklerden geçen agregaların ağırlıkça yüzdeleri dikkate alınarak gradasyon dağılımı belirlenir. Bitümlü karışımlarda kullanılan gradasyon tipleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 2.1’de de her bir gradasyona ait eğri gösterilmiştir:
 - Yoğun gradasyonlu karışım: Her boyutta agregaya içeren karışımdır. Boşluk oranı düşük olduğundan bu gradasyonla hazırlanan karışımların stabilitesi yüksektir.
 - Kesik gradasyonlu karışım: Gradasyonda ara boyutta agregayı hiç içermeyen veya çok az içeren agregaya karışım tipidir. Gradasyon eğrisinde, eğrinin orta kısmı düz olarak çizilir.
 - Açık gradasyonlu karışım: İnce boyutta agregaya veya filler içermeyen veya çok az içeren gradasyon türüdür.
 - Uniform (Tek boyutlu) gradasyon: Yaklaşık olarak aynı tane boyutuna sahip agregaların oluşturduğu gradasyon türüdür. Gradasyon eğrisi dike yakın bir formdadır.



Şekil 2.1. Agregada gradasyon tipleri (Fwa, 2006)

2.4.2 Bitümlü bağlayıcı

Bitüm, doğal yollarla veya ısı etkisiyle oluşan ağırlıklı olarak hidrokarbon molekülleri içeren organik bir maddedir. Rengi koyu kahverengi veya siyahtır. Viskoz sıvı veya katı hallerde bulunabilir. Yapıştırıcı özelliği yüksektir. Kendi içerisinde asfalt bağlayıcı ve katran olarak iki gruba ayrılır. Petrol kökenli olanlar asfalt, odun ve kömür kökenli olanlar katran olarak ifade edilir. Asfalt ise kendi içerisinde doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılır. Göl asfaltı, kaya asfaltı, gilsonit doğal asfalt örnek olarak verilebilir. Yapay asfalt, rafinerilerde ham petrolün damıtılması yoluyla elde edildiğinden rafineri asfaltı olarak da isimlendirilir. Şekil 2.2 bitümlü bağlayıcı türlerini göstermektedir.



Şekil 2.2. Bitümlü bağlayıcıların türleri (Arslan, 2010)

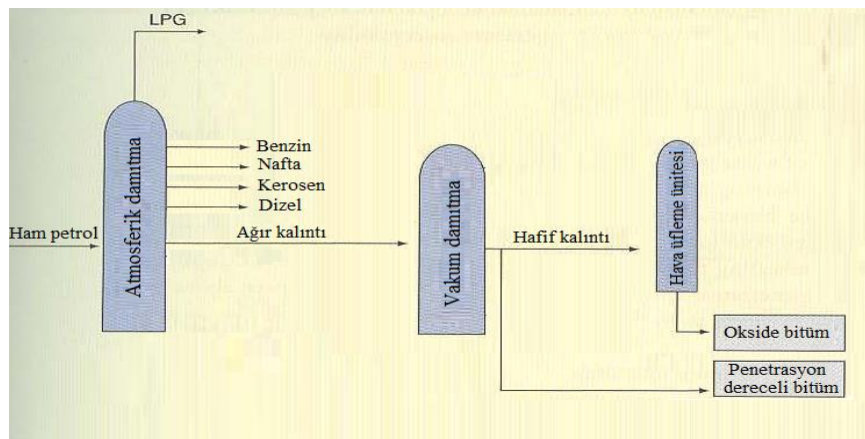
Katran; odun, kömür, şeker gibi organik maddelerin damıtılması sonucu elde edilen siyah bir sıvıdır. Karayolunda bağlayıcı olarak genellikle kömür katranı tercih edilmektedir. Katran doğal olarak bulunmaz. Damıtılarak elde edilmesi gerekir. Asfalttan en temel farkı budur. Bunun yanı sıra katranın formu viskoz sıvı iken, asfalt farklı koşullarda katı veya yarı katı formlarında da bulunabilir.

Asfalt hem doğada hazır olarak bulunan hem de damıtılarak elde edilebilen bir bitüm türüdür. Doğal asfalt, petrolün içindeki uçucu maddelerin uzun yıllar sonrasında kaybolması ile arta kalan kalıntılardır. Bu asfalt türü, kayaların içindeki gözeneklerde hapsolmuş şekilde bulunabileceği gibi, çok büyük miktarda asfalt birikintileri barındıran göllerin içinde de bulunabilir. Avrupa’da kaya asfaltı rezervinin en zengin olduğu bölgeler Val de Travers-İsviçre, Seyssel-Fransa ve Ragusa-İtalya’dır. Bu bölgelerde kaya asfaltı, kireçtaşı veya kumtaşından elde edilmektedir. Kayalarda bulunan asfalt oranı %12’ye ulaşabilmektedir. Bunun yanı sıra Kuzey Amerika bölgesinde de kaya asfaltına rastlanmaktadır. Sunnyside-Utah bölgesinde, kumtaşı rezervlerinde 800 milyon ton civarında kaya asfaltı olduğu tahmin edilmektedir. Göl asfaltının en çok olduğu bölge, Orta Amerika’daki Trinidad bölgesidir. Trinidad gölünde 10 milyon ton dolaylarında asfalt olduğu tahmin edilmektedir. Gölden çıkarılan malzeme ısıtılarak suyu buharlaştırılır, yabancı ve bitkisel maddelerden arındırılır. Arta kalan madde Trinidad Göl Asfaltı olarak isimlendirilir. Trinidad göl asfaltı penetrasyonu 2, yumuşama noktası 95°C olan oldukça sert bir bitümdür. Karayolu üstyapısında, 160/220 penetrasyon dereceli bitümle karıştırılarak kullanılır. Göl asfaltı ile 160/220 penetrasyon bitüm karıştırıldığında penetrasyonu 50 olan bir bitüm elde edilmiş olur (Read ve Whiteoak, 2003). Gilsonit bir diğer doğal asfalt türü olup ABD’de Utah ve Colorado bölgesinde bulunmaktadır. Doğal halde oldukça sert bir bitüm olup, penetrasyonu 0-3 dolaylarında, yumuşama noktası ise 120-180°C arasındadır. Rafineri bitümünü sertleştirmek için katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Arslan, 2010).

Yapay asfalt, ham petrolün damıtılması sonucu elde edilir. Damıtma işleminde ham petrol 350-380°C aralığında ısıtılır. Ham petrolün bileşenleri sıcaklık arttıkça gazla dönüşür, damıtma kulesinde yükselir ve soğutucularda yoğunlaştırılarak ayrıştırılır. Bu ayrışma işlemi, kaynama noktası düşük olan üründen yüksek olan ürüne doğru şu sırayla gerçekleşir: LPG (Likit Petrol Gazı), Benzin, Nafta, Kerosen ve Dizel. İşlem sonunda, kulenin dibinde yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşan ağır bir kalıntı kalır. Bu ağır kalıntı da yeniden damıtılarak (daha düşük basınçta) çeşitli yağlar ve hafif kalıntı ürün elde edilir. Bu hafif kalıntı yapay asfalt başka bir deyişle esnek yol üstyapısında kullanılan penetrasyon dereceli bitüm olarak adlandırılır. Asfalt çimentosu olarak da isimlendirilmektedir. Ham petrolün kökenine, damıtma esnasındaki sıcaklık ve basınca bağlı olarak farklı penetrasyon değerlerinde bitüm elde edilir. Bunun dışında, hafif kalıntı ürüne hava üflenerek okside bitümler de elde edilmektedir. Bu bitümlerin penetrasyonu düşük, yumuşama noktası ise oldukça yüksektir. Bu yöntemle, bitümlerin

ısıya olan hassasiyetleri önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ham petrolün damıtılması süreci Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmiştir (Read ve Whiteoak, 2003).

Asfalt çimentosu uygun çözücülerle karıştırıldığında sıvı asfalta dönüşür. Burada amaç, asfaltı ısıtmadan akışkan hale getirmektir. Bu özellik, düşük sıcaklıklarda karışım hazırlanması olanağı sağlar. Sıvı asfalt üç farklı şekilde hazırlanabilir. Bunlardan ilki, asfalt çimentosuna çok uçucu çözücüler olan benzin veya nafta eklenerek hazırlanan çabuk kür olan sıvı asfalttır. Orta hızda kür olan sıvı asfalt üretmek için asfalt çimentosuna uçuculuğu daha az olan gaz yağı eklenir. Eğer asfalt çimentosu ağır yağlar kullanılarak inceltirse bu defa yavaş hızda kür olan sıvı asfalt elde edilmiş olur. Asfalt çimentosunu akıcı forma getirmenin bir diğer yolu da asfalt çimentosunun emülgatörler yardımıyla küçük küreler halinde su içinde dağılmasını sağlamaktır. Böylece asfalt emülsiyonu elde edilir. Bu yöntemde, asfalt su içinde çözünmeden kalır. Asfalt emülsiyonu ile agrega bir araya geldiğinde asfalt tanecikleri sudan ayrılarak agregaya yapışır. Serbest kalan su ise buharlaşarak ortamdan uzaklaşır. Bu işlem, emülsiyonun kesilmesi olarak adlandırılır. Kesilme hızına göre emülsiyonlar çabuk kesilen, orta hızda kesilen ve yavaş kesilen olarak 3 sınıfa ayrılır. Bunun yanı sıra emülsiyonlar, kullanılan emülgatörün türüne göre de anyonik veya katyonik olarak iki sınıfa ayrılır (Akmaz, 2020).



Şekil 2.3. Ham petrolün damıtılması (Read ve Whiteoak, 2003)

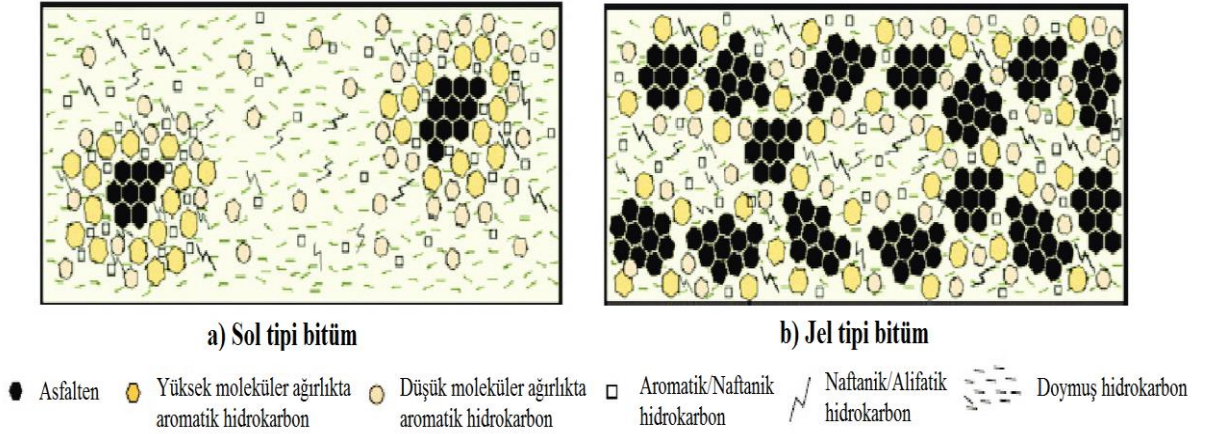
2.4.2.1 Bitümün kimyasal yapısı

Bitüm, çoğunluğu hidrokarbon moleküllerinden ve az bir miktarı da azot, oksijen ve sülfür atomlarının oluşturduğu değişik halkalı (heterosiklik) ve fonksiyonel gruplardan oluşan karmaşık kimyasal bir karışımdır. Bitümün yapısında ayrıca eser

miktarda vanadyum, nikel, demir, magnezyum ve kalsiyum gibi metaller de bulunmaktadır. Çok çeşitli ham petrolerden üretilen bitümlerin elementel analizleri yapıldığında şu sonuçla karşılaşılmıştır:

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

Bitüm, asfalten ve malten olarak iki gruba ayrılır. Maltenler ise kendi içerisinde aromatikler, doymun hidrokarbonlar ve reçineler olarak 3 alt gruba ayrılır. Asfalt ve bitüm türlerinin tamamı bu 4 gruptan (asfalten, aromatikler, doymun hidrokarbonlar ve reçineler) en az 3 tanesini içermektedir. Sıvı asfalt gibi bazı asfalt türlerinde asfalten içeriği yok denecek kadar az olabilmektedir. *Asfalten* molekül ağırlığı yüksek olup, düşük molekül ağırlıklı ve sürekli bir faz olan yağlı reçine (malten grubu) malzemesi içinde dağılan bir yapıdadır. Bitümün içinde inceden iri taneye kadar farklı boyutlarda katı formda bulunur. Bitümün %5-25'ini oluşturur. Asfalten içeriğinin artması bitümü daha sert ve daha viskoz hale getirir. *Reçineler* yarı katı veya katı formda olan bir gruptur. Rengi koyu kahverengidir. Asfalten için dağıtıcı katkı maddesi görevi görmektedir. Asfalten ve reçinenin bitüm içerisindeki oranı o bitümün solüsyon (sol) veya jelatin (jel) özellikte olmasını sağlamaktadır. Sol bitümde reçine oranı daha yüksek olduğundan, asfalten bitüm içerisinde iyi dağılmaktadır. Jel tipi bitümde ise reçine miktarı daha az olduğundan asfaltenler yeterince dağılamaz ve bitüm içerisinde kümelenmiş vaziyette kalır (Şekil 2.4). Reçine miktarının artması bitümü daha viskoz bir hale getirir ve bitümün adezyonunun artmasını sağlar. *Aromatikler* ise molekül ağırlığı en düşük olan gruptur. Bitümün içinde koyu kahverengi viskoz sıvı şeklinde bulunur. Asfaltenin yayılması için gerekli ortamı sağlar. Bitümün %40-65'ini oluşturur. *Doymun hidrokarbonlar* renksiz yağlı yapıdadır. Bitümün %5-20'sini oluşturur. Doymuş hidrokarbon miktarının artması bitümün penetrasyon değerini arttırırken, yumuşama noktasını düşürmektedir (Speight, 2016).

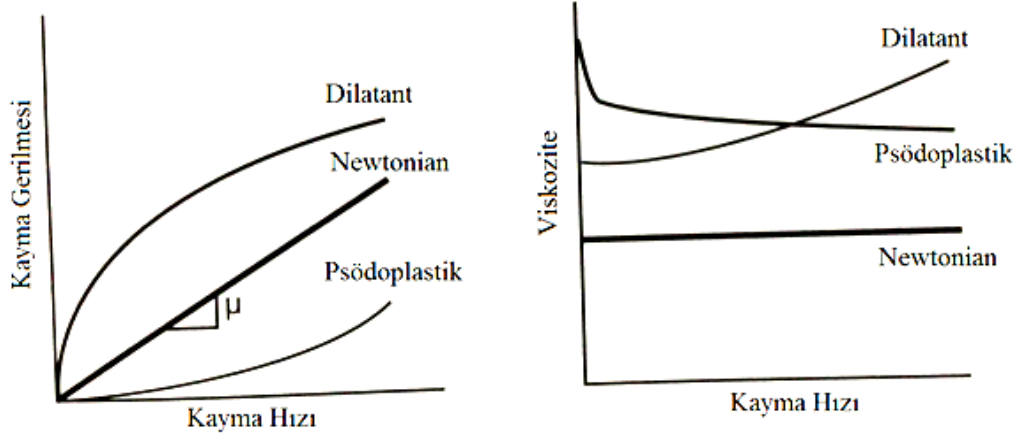


Şekil 2.4. Sol ve jel tipi bitümlerin şematik gösterimi (Boucherba ve ark., 2017)

2.4.2.2 Bitümün reolojisi

Reoloji, malzemelerin şekil değiştirme davranışlarını yük ve zaman faktörü altında inceleyen bilim dalıdır. Bitüm, farklı yükleme süresi ve miktarına göre farklı deformasyon özellikleri gösteren reolojik bir malzemedir. Bitümün gerilme-deformasyon ilişkisinde önemli rol oynayan parametrelerden biri de sıcaklıktır. Bitüm, kısa süren yüklemelerde veya düşük sıcaklıklarda elastik bir katı malzeme gibi davranırken, uzun süreli yüklemelerde veya yüksek sıcaklıklarda viskoz akışkan bir malzemeye dönüşür. Bu sebeple bitüm, viskoelastik bir malzeme olarak anılır.

Viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskoz malzemeler kayma hızı ile viskozite arasındaki ilişkiye bağlı olarak newtonian veya newtonian olmayan özellik sergilemektedir. Newtonian malzemelerin viskozitesi kayma hızına bağlı olarak değişmezken, newtonian özellik göstermeyen viskoz malzemelerde kayma hızı arttıkça malzemenin viskozitesi artar veya azalır. Viskozitesi artan malzemelere *dilatant* (kayma ile genişleyen), viskozitesi azalan malzemelere ise *psödoplastik* (yapay plastik) malzeme denilmektedir (Şekil 2.5). Sıcaklığı 60°C'den yüksek olan saf bitümlü bağlayıcı, genellikle newtonian davranış sergilerken, bazı modifiye bitümlerin newtonian olmayan davranışlar sergilediği görülmüştür (Anderson, 2007).



Şekil 2.5. Kayma hızı ve kayma gerilmesine bağlı olarak bitümün davranışı (Anderson, 2007)

Soğuk hava koşullarında veya kısa süreli yüklemelerde bitüm elastik katı özelliğine bürünür. Yani, yükleme kalktığında malzemede kalıcı deformasyon oluşmaz. Ancak, bu koşullar altında bitüm gevrek bir davranış sergiler. Dolayısıyla gelen yükler malzemenin kendi dayanım yükünü aştığında asfalt kaplamada çatlama, kırılma gibi problemler görülebilir. Bu problemler, gerek trafik yüklerinden gerekse de soğuk hava koşulları sebebiyle yapıda oluşan içsel gerilmelerden meydana gelir.

2.4.2.3 Bitümün mühendislik özellikleri

Bitüm, yol inşaatının en temel yapı malzemelerinden biridir. İnşa edilen yolun maruz kalacağı çevresel koşullara (trafik yükü, sıcaklık, nem vb.) karşı bitümün nasıl tepki verdiği, o bitümün mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi ile anlaşılabilir. Sıcaklığa karşı duyarlılık, rijitlik modülü, kohezyon, adezyon, durabilite bitümün mühendislik özellikleri arasında sayılabilir. Bu bölümde bitümün mühendislik özellikleri ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.4.2.3.1 Sıcaklık hassasiyeti

Bitüm, sıcaklık arttıkça yumuşayıp viskoz akışkan hale geçen, sıcaklık azaldıkça da sertleşip elastik katı formuna geçen bir malzemedir. Her bitümün sıcaklık değişimine karşı verdiği tepki, elde edildiği kaynağın özelliklerine bağlı olarak farklılık arz eder. Bazı bitümler sıcaklığa karşı çok hassas olup hemen formunu değiştirirken, sıcaklığa daha az hassas olan bitümlerde bu değişim daha geç olur. Bitümlerin sıcaklık

hassasiyetini derecelendirmek için farklı metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

$$\text{Penetrasyon İndeksi (PI)} = \frac{20-500A}{1+50A}, \quad (A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{YN} - 25}) \quad (2.1)$$

$$\text{Viskozite-Sıcaklık Hassasiyeti (VTS)} = \frac{\log \log(V_{T_2^{\circ}C}) - \log \log(V_{T_1^{\circ}C})}{T_2^{\circ}C - T_1^{\circ}C} \quad (2.2)$$

$$\text{Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN)} = -1.5 \frac{4.258 - 0.7967 \log P_{25} - \log V_{135^{\circ}C}}{0.795 - 0.1858 \log P_{25}} \quad (2.3)$$

Eşitliklerde; P_{25} : 25°C'deki penetrasyon değerini, T_{YN} : Yumuşama noktasını, $V_{T_2^{\circ}C} - V_{T_1^{\circ}C}$: T_2 ve T_1 sıcaklıklarındaki viskozite değerini ifade etmektedir.

Penetrasyon indeksi (PI), bitümün sıcaklık hassasiyetini belirlemede kullanılan en yaygın metottur. PI değerini hesaplamak için Eşitlik 2.1'de de görüleceği üzere bitümün 25°C'deki penetrasyon değerinin ve yumuşama noktasının belirlenmesi gerekir. Bu sayede A değeri belirlenir ve buradan da PI değeri hesaplanır. PI değeri arttıkça bitümün ısıya karşı hassasiyetinin azaldığı anlaşılır.

Viskozite-sıcaklık hassasiyeti (VTS), bitümlü bağlayıcının sıcaklık değişimine karşı viskozitesindeki değişimi gösterir. Eşitlik 2.2 ile hesaplanır. Formülde belirtilen sıcaklıklar genellikle 60°C ve 135°C olarak alınır. VTS değeri azaldıkça, bitümün sıcaklık hassasiyeti artar (McLeod, 1989).

Bitümün sıcaklık hassasiyetini belirlemede kullanılan bir başka yöntem ise PVN (Penetrasyon-Viskozite Numarası) yöntemidir. Eşitlik 2.3 ile PVN değeri hesaplanır. Bu formül, düşük sıcaklıklarda meydana gelen kaplama çatlaklarından edinilen tecrübelerle ampirik olarak oluşturulmuştur. PVN değeri arttıkça bitümün sıcaklık hassasiyetinin azaldığı anlaşılır (Yamaç ve ark., 2018).

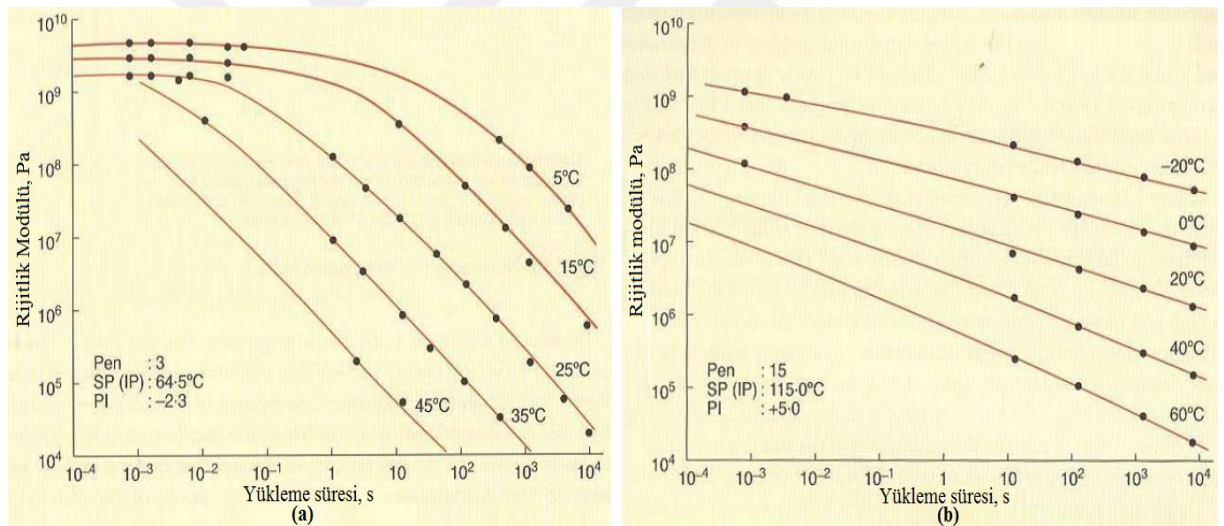
2.4.2.3.2 Rijitlik modülü

Bitümün rijitlik modülü, uygulanacak gerilmenin yanı sıra yükleme süresi ve sıcaklığa da bağlıdır. Eşitlik 2.4, rijitlik modülünün temel bağıntısını göstermektedir (Read ve Whiteoak, 2003):

$$S_{t,T} = \frac{\sigma}{\epsilon_{t,T}} \quad (2.4)$$

Burada, t : yükleme süresini, T : sıcaklığı, σ : gerilmeyi, ϵ : şekil değiştirme oranını ifade etmektedir. Rijitlik modülüne etkiyen bir diğer faktör de bitümün sıcaklığa olan hassasiyetidir. Rijitlik modülü statik-dinamik sünme testleri ile belirlenebilmektedir. Bunun yanı sıra DSR testi ile de kayma modülü belirlenmekte, buradan rijitlik modülüne geçiş yapılabilmektedir.

Şekil 2.6'da, farklı sıcaklık ve yükleme sürelerinde iki farklı bitüme ait rijitlik modülleri gösterilmektedir. (a) grafiğinde, penetrasyon indeksi -2.3 olan sıcaklık hassasiyeti yüksek bitümün rijitlik modül değerleri görülürken, (b) grafiğinde sıcaklığa hassasiyeti daha düşük olan bitümün ($PI=+5.0$) rijitlik modül değerleri görülmektedir. Her iki grafikte de sıcaklık ve yükleme süresi arttıkça bitümlerin rijitlik modülleri azalmaktadır. Bunun yanı sıra her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, aynı koşullar altında (b) grafiğindeki bitümünün rijitlik modülünün, (a) grafiğindeki bitümden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2.6. İki farklı bitümün rijitlik modülleri (a: Isıya hassasiyeti yüksek, b: Isıya hassasiyeti düşük) (Read ve Whiteoak, 2003)

2.4.2.3.3 Adezyon ve kohezyon

Adezyon, farklı tür moleküllerin birbirini çekmesidir. Bitümlü karışımda, bu farklı yapılar agrega ve bitümdür. Bitüm agregayı ne kadar iyi sararsa iki malzeme arasındaki adezyon da o kadar güçlü olur. Kohezyon ise aynı tür moleküllerin birbirini çekmesidir. Bitümün kendi içerisindeki çekim kuvvetinin yüksek olması, kohezyonunun yüksek olduğu anlamına gelir. Yük taşıma kapasitesinin agrega iskeleti tarafından

sağlandığı ve trafik yüklerini sönmleme görevini de bitümlü bağlayıcının üstlendiği düşünüldüğünde, hem adezyonun hem de kohezyonun eşit düzeyde önemli olduğu anlaşılmaktadır. Stabil ve durabil bir bitümlü karışım hazırlayabilmek için bu iki özelliğin yeterli düzeyde olması gerekir (Huang ve Benedetto, 2015).

Düktilite testi, bitümlerin kohezyon özelliğini belirlemede kullanılan bir testtir. Bu test ile bitümlü bağlayıcının standart bir sıcaklıkta (25°C) uzama miktarı ölçülür. Bu değer ne kadar yüksekse bitüm o kadar sünektir ve dolayısıyla kohezyonu da yüksektir. Kohezyonu etkileyen faktörler arasında bitümün viskozitesi, kaplama sıcaklığı ve trafik hızı sayılabilir. Bu faktörlerden viskozite ve trafik hızı arttıkça bitümün kohezyonu artarken, kaplama sıcaklığı arttıkça bitümün kohezyonu azalır (Kizirgil, 2013).

Bitüm, yapıştırıcı özelliği (adezyon) sayesinde agregaları bir arada tutar. Bitümün agregaları iyi sarması, gelen yükler karşısında agrega-bitüm ayrışmasını engellemekte ve karışımın stabilitesini arttırmaktadır. Bunun dışında, karışımındaki iyi adezyon, agregaların suyun etkisiyle bitümden sıyrılmasını da zorlaştırmaktadır. Adezyonu etkileyen en önemli faktör, bitümün agregayı ıslatabilme yeteneğidir. Bitümün viskozitesi düştükçe agregayı ıslatma özelliği artar. Sert bitümlerin viskozitesi yüksek olduğundan agrega ile yapışması zordur. Bu durumlarda su etkisi ile soyulmalar sıklıkla görülmektedir. Bunun önüne geçmek için kireç, hidrokarbon esaslı yağlı amin gibi soyulma önleyici katkı maddeleri kullanılabilir. Bunun yanı sıra, bazı kimyasal katkıları ile bitüm-agrega arasındaki yüzey gerilimi düşürülerek adezyon artırılabilir. Adezyon özelliği, statik-dinamik soyulma deneyi, Modifiye Lotman deneyi, tekerlek izi deneyi gibi mekanik deneylerle ölçülebildiği gibi, agrega-bitüm arasındaki bağ enerjisinin belirlenebildiği Wilhelmy plaka testi, yüzey lazer ışın saçılımı testi gibi testlerle de ölçülebilmektedir. Bunun yanı sıra, atomsal kuvvet mikroskobu gibi gelişmiş cihazlar ile bitümün mikro yapısı incelenerek agrega-bitüm arasındaki temas açıları, bitümün agregayı ıslatma kalitesi gibi özellikler incelenmekte ve bitümün adezyon kalitesi tespit edilebilmektedir (Arslan, 2010; Huang ve Benedetto, 2015) .

2.4.2.3.4 Durabilite

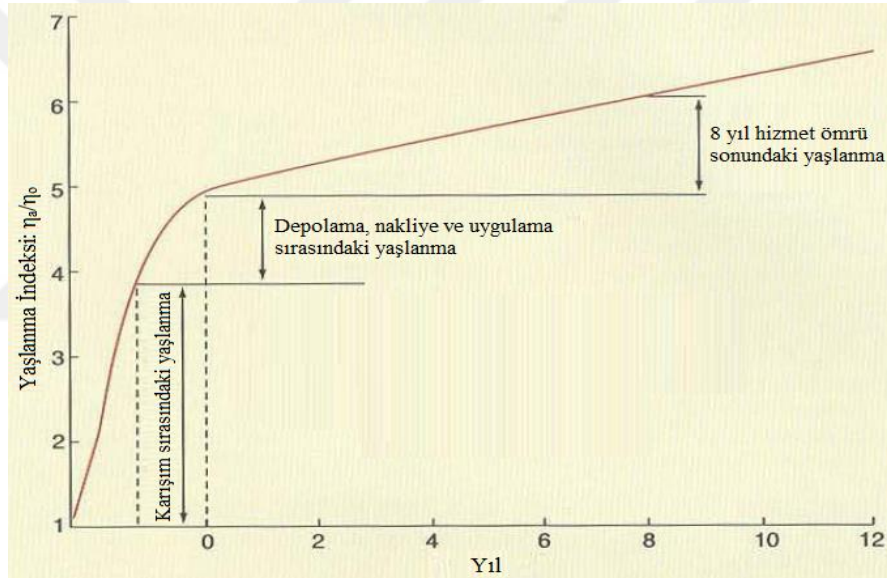
Durabilite, bir malzemenin işlevini servis ömrü boyunca bozulmadan sürdürebilme yeteneğidir. Bitümlü bağlayıcıda servis ömrü boyunca ortaya çıkan bozulma ise yaşlanma olarak ifade edilmektedir. Bitüm yaşlanmaya karşı ne kadar dirençli ise durabilitesi de o kadar yüksektir. Bitüm birçok organik bileşenden

oluştduğundan, dış ortamda var olan oksijen, ultraviyole radyasyon ve sıcaklık değişiminden etkilenir. Bu dışsal faktörler, bitümün sertleşmesine (başka bir ifade ile yaşlanmasına) ve buna bağlı olarak penetrasyon değerinin azalmasına, yumuşama noktasının ve viskozitesinin ise artmasına yol açar. Böylece bitüm daha sert ve kırılgan bir yapıya bürünür. Bu durum, kaplamada çatlama oluşma riskini artırır. Ayrıca bitümün adezyon kabiliyetini ve su etkilerine karşı direncini de azaltır. Bitümün yaşlanma mekanizması 4 ana grupta incelenebilir:

- *Oksitlenme*: Bitümün oksijenle etkileşimi sonucu meydana gelir. Bitümün yapısındaki sülfür, oksijenle tepkimeye girerek sülfür oksite dönüşür. Bunu takiben karbonil, anhidritler ve karboksilik asitler oluşur. Böylece bitümün yapısında daha karmaşık ve büyük moleküller oluşmuş olur. Bütün bu değişimler, bitümün viskozitesinin artmasına ve bitümün sertleşmesine sebep olur. Sıcaklık arttıkça oksitlenme etkisi artar. 100°C'nin üzerindeki her 10°C'lik sıcaklık artışında oksitlenme iki katına çıkmaktadır. Sıcaklığın yanı sıra bitümün miktarı, film kalınlığı ve oksitlenme süresi de bitümün sertleşmesine etki eden faktörler arasındadır.(Lesueur ve Youtcheff, 2013; Read ve Whiteoak, 2003).
- *Uçucu bileşen kaybı*: Bitümün yapısında bulunan uçucu maddeler sıcaklık ve diğer dışsal faktörlerin etkisiyle bitümden ayrılır. Bu durum bitümün sertleşmesine yol açar. Penetrasyon dereceli bitümlerde uçucu bileşen kaybına çok rastlanmamaktadır.
- *Fiziksel ve yapısal sertleşme*: Oda sıcaklığında veya daha düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcının viskozitesi veya diğer mekanik özellikleri incelendiğinde, zamanla bitümün sertleştiği görülmektedir. Bu sertleşme yavaştır ve bitüm ısıtıldığında eski özelliklerini geri kazanır. Düşük sıcaklıklarda oluşan sertleşmeye fiziksel, yüksek sıcaklıklarda oluşana ise yapısal sertleşme adı verilir. Ortaya çıkan sertleşme miktarı bitümün kökenine göre farklılık gösterebilmektedir. Yapılan bir araştırmada, 25°C'de 2000 saat bekletilen farklı kökenlere sahip bitümlerin viskozitelerindeki artışın %10 ile %200 arasında değiştiği gözlenmiştir. Bunun yanı sıra -15°C'de 3 gün süre ile bekletilen bitümlerin bazılarında rijitlik modülünün iki katına çıktığı, bazılarında ise herhangi bir değişim olmadığı belirlenmiştir (Lesueur, 2009; Lesueur ve Youtcheff, 2013).

- *Sızma (eksüdatif) sertleşmesi*: Sızma sertleşmesi, bitümün içinde bulunan yağlı bileşenlerin zamanla agrega içindeki boşluklara sızması sonucu oluşur. Agreganın porozitesi yüksekse sızma sertleşmesi görülme ihtimali artar.

Bitümlü bağlayıcıda meydana gelen yaşlanmanın büyük bir kısmı, karışımın üretilmesi, taşınması, serimi ve sıkıştırılması esnasında meydana gelmektedir. Bu evrede oluşan yaşlanma, kısa dönem yaşlanma olarak isimlendirilir. Karışımın yola serildikten sonra hizmet ömrü boyunca yaşlanması ise uzun dönem yaşlanma olarak isimlendirilir ve bu safhadaki yaşlanma, ilk safhaya göre çok daha azdır. Kısa dönem yaşlanmanın daha yüksek olmasının temel sebebi, bitümün ilk evrede daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmasındandır. Şekil 2.7 bitümün yıllara göre yaşlanma indeksini göstermektedir.



Şekil 2.7. Bitümün yaşlanma-zaman grafiği (Read ve Whiteoak, 2003)

2.4.2.4 Modifiye edilmiş bitümler

Modifiye bitümler, saf bitüme farklı türde katkı maddeleri eklenerek elde edilir. Bu sayede bitümün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri kullanım amacına göre değiştirilir. Bu yöntemle, bitümün saf haldeki eksiklikleri giderilmeye çalışılır. Çok farklı amaçlarla modifiye bitümler hazırlanabilmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur:

- Yüksek sıcaklıklarda daha sert karışımlar oluşturmak ve tekerlek izi direncini arttırmak.

- Düşük sıcaklıklarda meydana gelen termal çatlakları azaltmak için daha yumuşak karışımlar hazırlamak.
- Plent sıcaklıklarını azaltmak.
- Karışımın stabilite değerini yükseltmek.
- Karışım yorulma direncini arttırmak.
- Hizmet ömrü sonunda yaşlanmış bitümü yeniden genç hale getirmek.
- Bitümün yaşlanmaya karşı direncini arttırarak hizmet ömrünü uzatmak.
- Bitüm-agrega adezyonunu arttırarak bitümün agregadan soyulmasını zorlaştırmak.

Modifiye bitüm hazırlamak için kullanılan katkı maddeleri çok çeşitlidir. Bunlara örnek olarak polimerler, antioksidanlar, soyulma önleyiciler, kimyasal katkıları ve vaks tipi katkıları verilebilir. Edinilen tecrübeler arttıkça ve teknoloji geliştikçe, katkı türlerinin de artması muhtemeldir.

2.4.2.4.1 Polimerler

Polimerler, bitüm modifiyesinde kullanılan en yaygın katkı gruplarından biridir. Elastomerler (kauçuklar veya elastikler) ve plastomerler (plastikler) en çok kullanılan polimer tipleridir. Stiren bütadien kauçuk, stiren bütadien stiren ve lastik kısıntısı elastomer grubuna örnek olarak verilebilir. Plastomerlerin bitüm modifikasyonunda kullanımı elastomerlere göre daha sınırlıdır. Polietilen türü plastik, farklı formları (Düşük yoğunluklu, yüksek yoğunluklu ve lineer düşük yoğunluklu gibi) ile birlikte bitüm modifiyesi için en yaygın kullanılan plastomer türüdür. Bunun dışında polipropilen, etilen propilen kopolimer ve EVA kopolimeri de asfalt endüstrisinde kullanılan plastomerlerden bazılarıdır. Polimerler bitümün PG yüksek sıcaklık sınıfını arttırmak için kullanılır. Bu sayede karışımın stabilite değeri artarken tekerlek izi derinliği düşmektedir.

2.4.2.4.2 Antioksidanlar

Asfalt kaplamasının uzun dönem yaşlanmasının temel sebebi oksidasyondur. Oksitlenme ile bitüm sertleşir ve nihayetinde kaplamada çatlaklar meydana gelir. Antioksidanlar, bitümün yaşlanmasını geciktirici rol oynayarak kaplamasının ömrünün

artmasına yardımcı olur. Lignin (odun özü), en çok çalışılan antioksidan katkıdır. Yapılan araştırmalarda, ligninin bitümün düşük ve orta sıcaklık performansını geliştirdiği anlaşılmıştır (Williams ve McCready, 2008). Bunun yanı sıra, fenol bazlı katkıların da bitümün düşük ve orta sıcaklık özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Dessouky ve ark., 2015).

2.4.2.4.3 Soyulma Önleyiciler

Soyulma önleyici katkılar, bitümün agregadan soyulmasını azaltan veya tamamen ortadan kaldıran katkılardır. Bazı sıvı katkılar ve sönmüş kireç, karışımda soyulmaya karşı direnç sağlayabilmektedir. Sıvı katkıların çoğu, yüzey aktif maddeler olup, bitümle karıştığında yüzey gerilimini azaltmaktadır. Bu sayede agrega-bitüm adezyonu artmaktadır. Bu katkıların kimyasal yapısı, üretici firmalar tarafından gizli tutulmakla birlikte önemli bileşenlerinden birinin aminler olduğu bilinmektedir. Amidoaminler ve poliaminler bu gruba örnek olarak verilebilir. Bunların dışında imidazolinler, organo metalikler, çeşitli türde asitler ve sönmüş kireç soyulma önleyici katkıları arasında yer almaktadır.

2.4.2.4.4 Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar, karışımlarda farklı amaçlarla kullanılabilir. En yaygın kullanılan kimyasal katkı polifosforik asittir. Bu katkı, polimerle birlikte kullanıldığında bitümün yüksek sıcaklık performansını arttırmaktadır. Kimyasal katılardan bir diğeri olan hidrokarbonlar ise bitümü hem yumuşatmak hem de sertleştirmek için kullanılabilir. Plent sıcaklığını düşürmek amacıyla kullanılan kimyasal katkıları da piyasada mevcuttur. Bu tarz katılara Evotherm[®], Rediset ve Cecabase örnek olarak verilebilir.

2.4.2.4.5 Vaks Tipi Katkılar

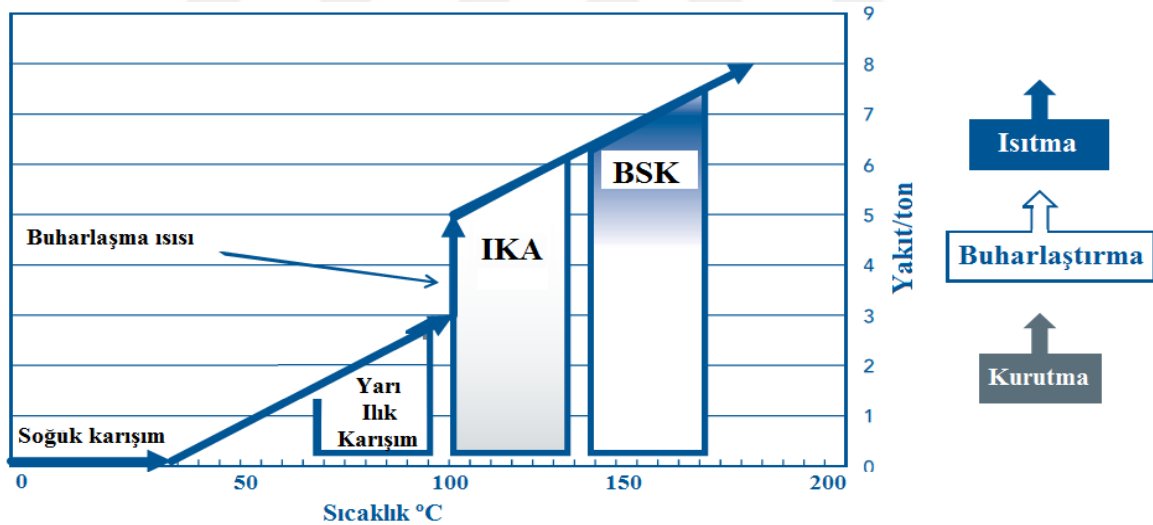
Vaks katkıları tıpkı kimyasal katılarda olduğu gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Sasobit[®], Montan Vaks[®] gibi katkıları ılık karışım asfalt katkıları olarak bilinir ve bitüm viskozitesini azaltarak karışımın plent sıcaklığını düşürmektedir. Bunun

yanı sıra Polietilen vaks gibi katkıları ise bitümü sertleştirerek bitümün yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmektedir.

Bu çalışma, plant sıcaklığını düşürme ve karışımın stabilite değerini koruma amacı taşımaktadır. Bu sebeple çalışmada, ılık karışım asfalt özelliği bulunan modifiye bitümler ve karışımlar merkeze alınmıştır. Ilık karışım asfalt konusu bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2.4.3 Ilık karışım asfalt teknolojisi

Ilık karışım asfalt, üretim ve serim sıcaklığı bitümlü sıcak karışımından, 20-40°C daha düşük olan bir karışım teknolojisidir. IKA teknolojisi ile düşük plant sıcaklıklarında, agregaların tamamen bitümle kaplanması sağlanmaktadır. Bu sayede IKA, en az BSK kadar iyi bir karışım performansı sergileyebilmektedir. IKA'dan daha düşük plant sıcaklıklarında üretilebilen karışımlar da mevcuttur. Şekil 2.8, karışım türlerinin üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırmasını göstermektedir.



Şekil 2.8. Yakıt tüketimi ve üretim sıcaklığı açısından asfalt karışım türleri (D'Angelo ve ark., 2008).

Şekil 2.8'den görüldüğü üzere, üretim sıcaklığı arttıkça kullanılan yakıt da artmaktadır. Soğuk karışım 0-40°C'lerde üretildiğinden ısıtma için herhangi bir yakıt sarfiyatı söz konusu değildir. Ancak, sıcaklığın düşük seviyelerde kalması soğuk karışımda agrega-bitüm kaplanma problemini beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla, IKA teknolojisi burada hem soğuk karışımdan kaynaklı adezyon problemlerini çözme noktasında hem de BSK'dan daha az enerji ile üretim noktasında optimum karışım

olarak görünmektedir. Ilık karışım asfaltın, BSK'ya göre daha düşük sıcaklıklarda üretilmesi, bu teknolojinin birçok avantajını beraberinde getirmektedir. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- Düşük sıcaklıklarda serim-sıkıştırma işleminden dolayı gaz salınımı daha azdır.
- Zararlı gazların azalmasından dolayı daha iyi çalışma koşulları sağlanır.
- Karışımın üretilmesi daha az enerjiyle gerçekleştirilir.
- Karışımın serilmesi işleminden kısa bir süre sonra yol trafiğe açılır.
- Karışım daha uzun mesafelere taşınabilir.
- Yol inşa sezonu uzar.

IKA'nın bu avantajlarının yanı sıra henüz çözüm bulunamayan bazı dezavantajları da mevcuttur:

- Bazı IKA türleri, ilave ekipman gerektirdiğinden üretim maliyeti yüksek olabilmektedir.
- Yeni bir teknoloji olduğundan, uzun dönem performansı hakkında yeterli veri yoktur.
- Düşük sıcaklıklarda nem hassasiyeti fazladır.
- Kaplama ve aderans problemi gözlenebilmektedir.

2.4.3.1 IKA tarihçesi

Araştırmacılar, gerek çevreyi koruma gerekse de doğal kaynakları daha az sarf etme adına uzun süredir daha düşük plent sıcaklıklarında karışım üretme çabası içinde olmuşlardır. Bu noktada, araştırmacılar ilk olarak sıcak bitüme su püskürterek karışımın sıcaklığını düşürmeyi hedeflemişlerdir. Ancak, kaplamanın servis ömrünün çok kısa olduğu fark edilmiştir (Bu yöntem zamanla daha da geliştirilerek günümüzdeki haliyle kullanılmaktadır). Aynı şekilde, soğuk karışım asfaltın da agrega-bitüm adezyonu problemlerinden dolayı çok başarılı olmadığı görülüp, daha iyi bir teknoloji olan IKA'ya yönelinmiştir. Çizelge 2.1, IKA'nın 1950'li yıllardan günümüze nasıl geldiğini göstermektedir.

IKA teknolojisi günümüzde hala yeni bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Araştırmacılar, bu teknolojinin hem bitümlü bağlayıcı hem de karışım üzerindeki etkilerini incelemeyi sürdürmektedir.

Çizelge 2.1. IKA Tarihçesi

1956	<ul style="list-style-type: none"> İlk IKA çalışması Prof. Csanyi tarafından Iowa Devlet Üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Csanyi, bir kabin içerisinde bulunan sıcak bitümlü bağlayıcıya su püskürterek bitümü köpüklendirmiş ve bitümün viskozitesini düşürmeyi başarmıştır (Görkem, 2014).
1970	<ul style="list-style-type: none"> 1970’li yıllarda Chevron, asfalt emülsiyonları ile ilgili bazı araştırmalar yürütmüştür. Chevron, asfalt emülsiyonları ile hazırlanan karışımların daha düşük sıcaklıklarda üretilebildiğini, dolayısıyla nakliyelerinin daha kolay ve daha uzun mesafelere yapılabileceğini çalışmalarında vurgulamıştır.
1994	<ul style="list-style-type: none"> Köpükleme yöntemini kullanarak soğuk asfalt karışım üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmalar neticesinde, karışımların daha düşük sıcaklıklarda üretilebileceği, dolayısıyla emülsiyonların daha düşük seviyelere çekilebileceği görülmüştür.
1995	<ul style="list-style-type: none"> Shell bitüm ve Kolo Veideke firmaları tarafından Asphamin® zeolit kullanılarak köpük yöntemi ile WAM-FOAM adı ile IKA geliştirilmiştir. Bu karışım, 1996 yılında Norveç’te bir test yolunda denenmiştir.
1997	<ul style="list-style-type: none"> Sasol Wax firması tarafından Almanya’da, organik bazlı IKA katkısı olan Sasobit® geliştirilmiştir. Fischer-Tropsch sentezi ile geliştirildiğinden, katkı bu isimle de anılmaktadır.
2000	<ul style="list-style-type: none"> Jenkins ve ark. (2000), yarı ılık karışım asfalt üzerine araştırmalar yapmıştır. Çalışmalarında, 100°C’ye kadar ısıttıkları agregalar ile daha önceden köpüklendirilmiş bitüm karıştırılmıştır. Böylece yarı ılık karışım asfalt konsepti elde edilmiştir. Bu yöntemle agrega-bitüm adezyonunun güçlendiği ve karışımın çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Koenders ve ekibinin yoğun gradasyonlu karışım tercihlerinden farklı olarak kendi çalışmalarında taş mastik asfalt karışımını kullanmışlardır. Bu karışım tipinde de IKA’nın başarıyla uygulanabileceğini göstermişlerdir (Sargand ve ark., 2009).
2004	<ul style="list-style-type: none"> MeadWestvaco şirketi tarafından Evotherm® kimyasal IKA katkı maddesi tanıtılmıştır. Bu katkı ile hazırlanan IKA, Florida ve Kuzey Carolina’da test edilmiştir.
2008	<ul style="list-style-type: none"> ABD’deki IKA teknik çalışma grubu tarafından ılık karışım asfalt şartnamesi yayınlanmıştır (Prowell ve ark., 2012).

2.4.3.2 IKA teknoloji türleri

Bitümlü ılık karışımları sınıflandırmada kullanılan en yaygın yöntem, kullanılan teknolojiye göre sınıflandırma yapmaktır. Bu yöntemle IKA 3 gruba ayrılır:

- Köpükleme yöntemi (kendi içerisinde su içerikli ve su bazlı olarak ayrılır).
- Organik katkı ilaveli (Fischer Tropsch sentez parafini, yağ asit amitleri ve Montan parafini).
- Kimyasal katkı ilaveli (Genellikle emülgatör veya polimer kullanılır).

2.4.3.2.1 Köpükleme yöntemi

Bu yöntemde, az miktarda su sıcak karışıma katılır. Bu işlem, ya bağlayıcıya suyun enjekte edilmesi ile ya da doğrudan karışım haznesine suyun koyulmasıyla olur. Su sıcak bağlayıcıya katıldığında, yüksek sıcaklığın etkisiyle katılan su buharlaşır ve buhar bağlayıcıda hapsolür. Böylece büyük bir hacimde köpük üretilmiş olur. Bu köpük, geçici olarak bağlayıcının hacmini artırır ve karışımın viskozitesini düşürür. Bu etki, karışımın kaplanma ve işlenebilirlik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Köpüklenme etkisinin geçici olmasından dolayı karışım üretildikten kısa bir süre sonra serilip sıkıştırılmalıdır. Bu süreçte dikkat edilmesi gereken nokta, eklenen suyun miktarıdır. Gereğinden fazla su konulursa, bitümün agregadan soyulması problemiyle karşılaşılabilir.

Köpükleme işlemi, su bazlı (doğrudan metot) ve su içerikli (dolaylı metot) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilir. Çizelge 2.2’de dünya genelinde köpükleme yöntemiyle üretilen bazı IKA teknolojileri özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Köpükleme yöntemiyle IKA teknolojisi çeşitleri (D’angelo ve ark., 2008)

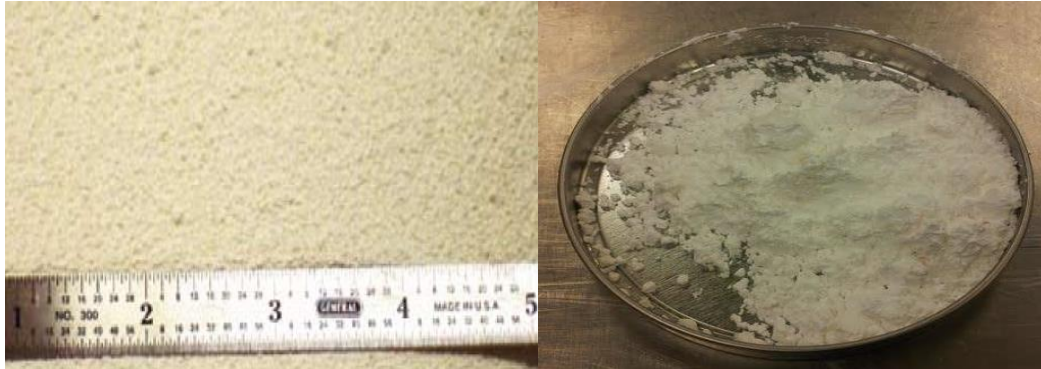
IKA Ürünü	Şirket	Katkı Oranı	Maddesi	Üretim Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yerler	Üretim miktarı (ton)
Aspha-min® (zeolit) (Su İçerikli)	Eurovia ve MHI	Toplam karışım ağırlığının %0.3’ü oranında katılır.		BSK’dan 20-30°C daha düşüktür.	Fransa, Almanya ve ABD.	300,000 tondan fazla.
Low Energy Asphalt® (LEA), (Su bazlı)	LEACO	Bitüm ağırlığının %0.5’i oranında soyulma önleyici katkı bitüme eklenir		<100°C	Fransa, İspanya, İtalya ve ABD	>100,000 ton
LT Asfalt® (Su bazlı)	Nynas	Nem tutar filler malzemesi bitüm ağırlığının %0.5-1’i oranında katılır.		90°C	Hollanda ve İtalya	Bilinmiyor.
WAM-Foam (Su bazlı)	Kolo Veidekke ve Shell Bitumen	Sert bağlayıcı malzemenin %2-5’i oranında su katılarak köpüklendirme işlemi yapılır.		110-120°C	Fransa, Hollanda, Norveç, İtalya, Kanada, İsveç.	>60,000 ton
Double Green® (Su bazlı)	Barrel Astec Industries	Karışımın tonu başına 0.5 kg su katılır.		-	ABD	-
LEAB® (Su bazlı)	BAM	-		-	Hollanda	-

2.4.3.2.1.1 Su içerikli köpüklenme yöntemi

Günümüzde iki farklı tipte (*Aspha-min*[®] ve *Advera*[®]) su içerikli IKA katkısı mevcuttur (Şekil 2.9). Her iki teknoloji de sentetik zeolit kullanır. Bu ürün, alkali metallerin alümino silikatlarının bir bileşimidir ve hidrotermal kristal yapıdadır. Kristal yapının bünyesinde sıcaklık arttıkça buharlaşan su bulunmaktadır. Buharlaşan suyun etkisi ile asfalt karışımında 6-7 saat süren mikro köpüklenme işlemi gerçekleşir. Bu köpüklenme işleminin etkisi ile bitümlü bağlayıcının viskozitesi azalır. Dolayısıyla karışımın üretim sıcaklığı da düşürülmüş olur. Zeolitlerin yapısında su moleküllerini tutan büyük boşluklar bulunur. Bu sayede, su absorbe edildiğinde veya dışarı salındığında kristal yapı zarar görmez.

2.4.3.2.1.2 Su bazlı köpüklenme yöntemi

Bu yöntemde köpüklenme etkisi oluşturmak için ihtiyaç duyulan su, özel enjektörler yardımıyla doğrudan karışıma ilave edilir. Su hızlı bir şekilde buharlaştıkça, büyük hacimli köpük elde edilir. Bu yöntem, karışımı hazırlamak için kullanılan ürün tipine göre alt gruplara ayrılır:

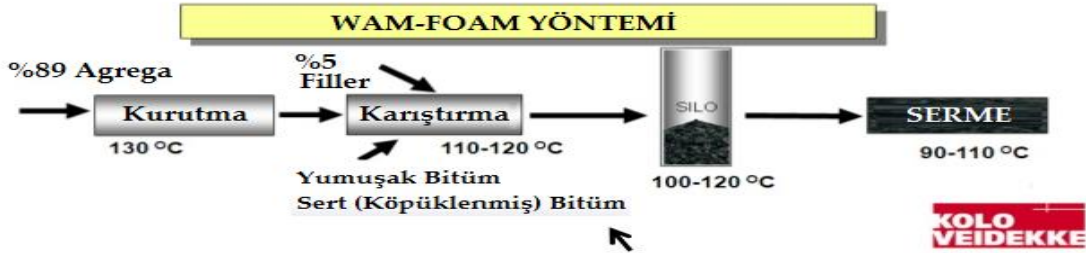


Şekil 2.9. Aspha-min (solda) ve Advera (sağda) IKA katkı maddeleri (Prowell ve ark., 2012; Buss, 2014)

2.4.3.2.1.2.1 WAM-Foam yöntemi

Bu yöntemde, biri sert biri yumuşak olmak üzere iki farklı bitüm kullanılır. Yumuşak bağlayıcı ve sert bağlayıcı üretim esnasında farklı zamanlarda karışıma ilave edilir. Öncelikle, yumuşak bitüm eklenerek agregaların kaplanması sağlanır. Daha sonra sert bitüme ağırlığının %2-5'i oranında su katılarak köpüklendirme işlemi

gerçekleştirilir. Ardından köpüklenmiş sert bitüm karışıma dahil edilir. Bu sayede karışımın ihtiyacı olan işlenebilirlik, viskozite düşürülerek sağlanmış olur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. WAM-FOAM üretim sürecinin şematik gösterimi (Birgisson, 2011)

2.4.3.2.1.2.2 Düşük enerjili asfalt (LEA) yöntemi

LEA yönteminde, ıslak ince agrega, sıcak bitümle daha önceden kaplanmış iri agrega ile karıştırılarak köpüklenme işlemi sağlanır. Islak agregadaki su buharlaştığında agrega kurumuş olur. Son nem içeriği genellikle 85°C'de %0.5 civarındadır ki bu değer karışımın işlenebilirliği ve sıkıştırılması için yeterli bir seviyedir.

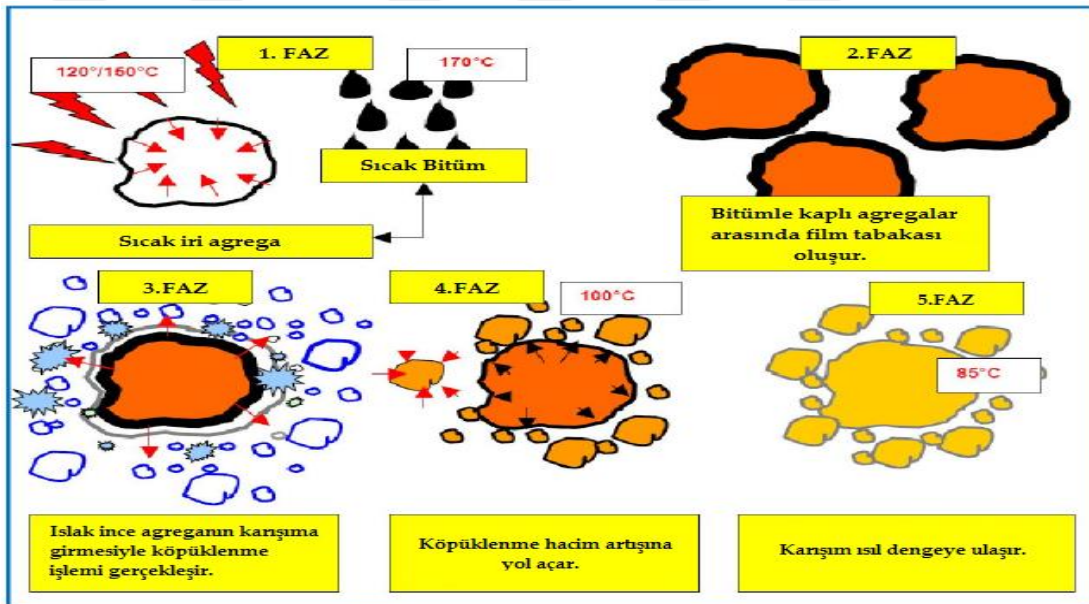
LEA-CO isimli Fransız bir firma bu köpüklenme yöntemi için Şekil 2.11'de görülen ekipmanı hazırlamıştır. Bu sistemde, bir besleme hunisi yardımıyla soğuk ince agrega karışıma dahil edilir. Eğer ince agrega yeterince nemli değilse, karışıma su püskürtülerek agregaların ıslanması sağlanır. Sistem, geri dönüştürülmüş asfalt kullanımı için de uygun olup, doğrudan karışıma eklenebilir.



Şekil 2.11. LEA yönteminde ince agreganın nemlendirilerek karışıma dahil edilmesi (Prowell ve ark., 2012)

Şekil 2.12'deki LEA üretim süreci aşağıdaki işlem adımları ile şöyle özetlenebilir:

- 1.Faz: İri agrega ve filler içermeyen ince agreganın bir kısmı 150-160°C civarında ısıtılır.
- 2.Faz: Normal karışım sıcaklığında ısıtılan bitüme, soyulma önleyici katkı maddesi katılır (Bitüm ağırlığının %0.5'i oranında). Ardından, katkılı bitüm ısıtılmış agregalar ile karıştırılır.
- 3.Faz: Nem içeriği %3 olan ıslak ince agrega ve filler grubu, karışıma dahil edilir. Eğer ince agrega grubu çok kuru ise sisteme su püskürtülür. Bu işlem sonucunda karışım köpüklenir.
- 4.Faz: Köpüklenme etkisi ile karışımın hacim artışı olur, karışımın işlenebilirliği ve sıkışabilirliği artar.
- 5.Faz: Karışım 100°C'den daha düşük bir sıcaklıkta ısıl dengeye ulaşır.



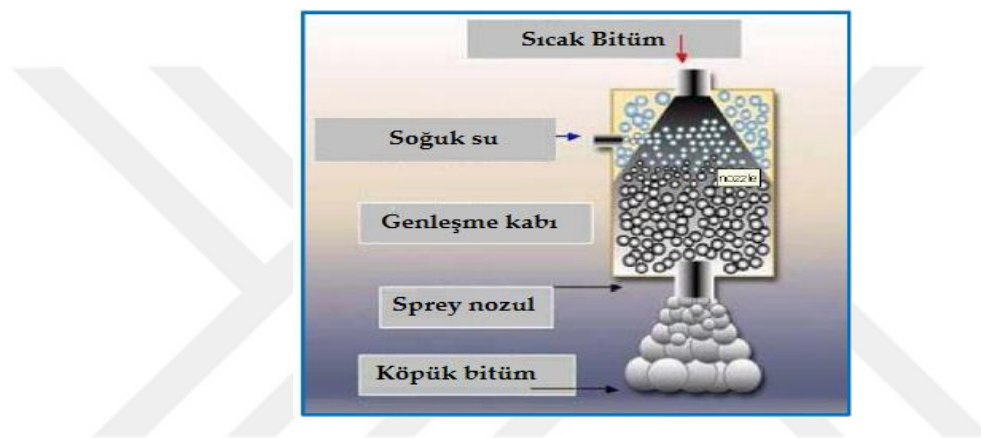
Şekil 2.12. LEA üretim şeması (Prowell ve ark., 2012)

2.4.3.2.1.2.3 Düşük sıcaklıkta asfalt (LT) yöntemi

İsveç'te bulunan Nynas isimli bitüm firmasının geliştirmiş olduğu bir teknolojidir. Bu yöntemde, bitümü köpüklemek için su tutucu özelliğe sahip filler malzeme (bitüm ağırlığının %0.5-1'i oranında) kullanılmaktadır. LT üretim sürecinde, önce agregalar 90°C'ye kadar ısıtılır, ardından bitüm özel su püskürtücü ekipmanlar yardımıyla köpüklenir ve nem tutucu özel fillerle birlikte karışıma dahil edilir. Son durumda karışım sıcaklığı 90°C olmaktadır.

2.4.3.2.1.2.4 LEAB (Laag Energie Asphalt Beton-Düşük Enerjili Asphalt Betonu) yöntemi

Hollanda'da bulunan BAM isimli inşaat firması tarafından geliştirilen bir İKA teknolojisidir. Bu yöntemde %50 oranında GDA kullanılmaktadır. LEAB üretim sürecinde, agregalar 95°C'ye kadar, GDA ise 110°C'ye kadar ayrı bir ortamda ısıtılır. Ardından, bitüm soğuk suyla karıştırılarak karışıma eklenir (Şekil 2.13). Bitümün eklenmesinin hemen ardından adezyon arttırıcı katkı maddesi de karışıma dahil edilir. Bu katkı maddesi aynı zamanda köpüklenme sürecini arttırmaya da yardımcı olur.

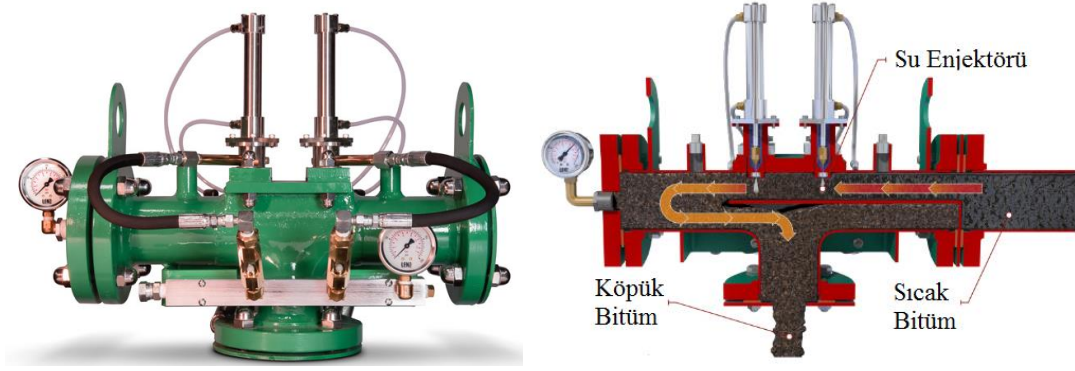


Şekil 2.13. LEAB üretim süreci (Zaumanis, 2010)

2.4.3.2.1.2.5 Double barrel green yöntemi

Astec Firmasının geliştirmiş olduğu bu yöntemde, bitümlü bağlayıcı su ile mikroskobik ölçekte köpüklenir. Bu yöntemde, karışımın tonu başına yaklaşık 0.5 kg su kullanılmaktadır. Şekil 2.14'ten de görüldüğü üzere sıcak bitüm hava/su karışımı ile köpüklenilerek agrega ile karıştırılır. Bu süreçte, köpüklenen bitümün hacminin 18 kat arttığı tespit edilmiştir (Middleton ve Forfylow, 2009). Son durumda, karışım sıcaklığının BSK'dan 20-35°C daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Bu yöntemlerin dışında dünya genelinde kullanılan Aquablack, Ultrafoam GX, Terex WMA gibi farklı köpüklenme teknolojileri de mevcuttur. Bu yöntemlerde, karışıma suyun enjekte edilme şekilleri farklı olsa da, temel prensip aynıdır. Birkaç enjektör yardımıyla su, köpük oluşturmak için bağlayıcıya katılmakta ve karışım sıcaklığı düşürülmektedir.



Şekil 2.14. Double Barrel Green Sistemi genel görünüm (solda) ve çalışma prensibi (sağda) (Anonymous, 2020b)

2.4.3.2.2 Organik katkı ilaveli IKA yöntemi

Organik IKA katkıları yapısında parafin veya amit bileşeni içermektedir. Bu yöntemde, sıcaklığın artması ile organik katkı eriyerek bitümün viskozitesini düşürür. Karışım soğudukça, katkı malzemesi mikroskobik boyutlarda katılaşır ve karışım içinde uniform olarak dağılır. Böylece bağlayıcının rijitliğinde artış sağlanır. Sıcaklıkla ilgili sorun yaşamamak için parafin tipi dikkatli seçilmelidir. Özellikle parafinin erime sıcaklığı, servis sıcaklıklarından düşük olduğunda çeşitli problemler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, parafinin doğru seçimi karışımın düşük sıcaklıklarda gevrekleşmesini de önlemektedir. Bu nedenle parafinler, servis sıcaklıklarında katı ve dirençli olmalıdır.

Bu teknolojide kullanılan parafinler erime noktası 80-120°C olan yüksek moleküler karbon zincirlerinden meydana gelir ve orijinal bağlayıcı özelliklerine etki edebilir. Katılacak parafin miktarı, genellikle toplam bağlayıcı ağırlığının %2-4'ü arasında değişmektedir. Bu yöntemle karışım sıcaklığı BSK'ya göre 20-30°C düşürülmektedir. Organik katkı tipine göre 3 farklı yöntem bulunmaktadır: *Fischer-Tropsch parafini*, *Yağ asidi amitleri* ve *Montan parafini*. Çizelge 2.3, dünya genelinde kullanılan organik katkılu IKA teknoloji çeşitlerini göstermektedir.

2.4.3.2.2.1 Fischer tropsch parafini

Fischer-Tropsch (FT) parafini, hidrokarbonlar ve diğer alifatik bileşenlerin bir sentezidir. Bu ürün, yüksek kimyasal stabiliteye ve yaşlanmaya karşı dirence sahiptir. Saf halde 100°C'de erimesine rağmen, bitümlle karıştırıldığında erime noktası 80-

85°C'lere düşer. Bu özellik, asfaltın düşük sıcaklıklarda sıkıştırılabilmesine imkan sağlar. Karışım soğudukça, kristalleşme işlemi başlar (105°C) ve bu işlem 65°C'de tamamlanır. Araştırmalar gösteriyor ki, FT parafini oksidasyon ve yaşlanmaya karşı dirençlidir ve çok uzun süreler depolanabilir (Rubio ve ark, 2012).

Sasobit[®], Sasol firması tarafından FT yöntemi ile sentezlenen organik bir IKA katkısıdır. Dünya genelinde en yaygın kullanılan IKA katkılarından biridir. Sasobit[®], uzun molekül zincirli alifatik hidrokarbon bir yapıya sahiptir. Molekül zincirinin uzun olması, malzemenin erime noktasının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Sasobit[®]'in erime sıcaklığı 98°C olarak tespit edilmiştir (Bu sıcaklık, daha kısa molekül zincirine sahip doğal parafınların erime sıcaklığından daha yüksektir). 115°C'de ise karışımda tamamen çözüldüğü görülmüştür. Sasol firması katkı oranını, bağlayıcı oranının %2.5'i olarak önermektedir. Şekil 2.15'te, Sasobit[®]'e ait genel bir görünüme ve SEM analizi görüntüsüne yer verilmiştir.

Çizelge 2.3. Organik katkılı IKA Teknolojileri (D'angelo ve ark., 2008)

IKA Ürünü	Şirket	Katkı Maddesi	Üretim Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yerler	Üretim miktarı (ton)
Sasobit [®] (Fischer-Tropsch wax)	Sasol	Bağlayıcı ağırlığının %2.5'i oranında katılır. ABD'de bu oran %1-1,5.	BSK'dan 20-30°C daha düşüktür. Alman tasarım rehberi önerisi: 130-170°C	Almanya ve 20'den fazla ülkede kullanılmaktadır.	Dünya genelinde 10 milyon tondan fazla.
Asphaltan-B [®] (Montan wax)	Romonta	Bağlayıcı ağırlığının %2.5'i oranında katılır.	Sasobit [®] ile aynı koşullar geçerlidir.	Almanya	Bilinmiyor.
Licomont [®] BS 100	Clariant	Bağlayıcı ağırlığının yaklaşık %3'ü oranında katılır.	Sasobit [®] ile aynı koşullar geçerlidir.	Almanya	1994'ten beri 322,500 m ² üretilmiştir.
3E LT or Ecoflex [®] (proprietary)	Colas	-	Sasobit [®] ile aynı koşullar geçerlidir	Fransa	Bilinmiyor.



Şekil 2.15. Sasobit® genel görünüm (solda), katılaştıktan sonra oluşan ağsı yapı (sağda) (Butz, 2008)

2.4.3.2.2 Montan parafinleri

Özel mumsu linyitlerden çıkarılır. Montan parafinleri; uzun zincirli gliserit olmayan karboksilik asit esterleri, serbest uzun zincirli organik asitler, uzun zincirli alkoller, ketonlar, hidrokarbonlar ve reçinelerden oluşur. Piyasada kullanılan türlerine *Romonta N*, *Asphaltan A* ve *Asphaltan B* örnek olarak verilebilir (Zaumanis, 2010).

Romonta N ve Asphaltan A, erime noktası sırasıyla 78°C ve 125°C olan Montan parafinleridir. Belirli tipteki linyit kömüründen çıkarılan sert parafinlerdir. FT parafinlerine benzer özellikler gösterir. Almanya'da mastik asfalt katkısı olarak kullanılmaktadır.

Asphaltan B® ise rafine Montan parafininin doymuş yağ asit amitleri ile karıştırılması sonucu elde edilir. Erime noktası 100°C'nin biraz altındadır. Düşük sıcaklıklarda bitümün akışkan hale gelmesini sağlar. Ancak bu özelliği FT parafinleri kadar etkili değildir.

2.4.3.2.3 Yağ asidi amitleri

Amit parafinleri, sentetik yağ asit amitleridir. Bunlar, sentetik olarak aminler ile yağ asitlerinin reaksiyona sokulması sonucu elde edilirler. Genellikle, erime sıcaklıkları 140-145°C arasında olmaktadır. Katılma işlemi 135-145°C'de gerçekleşir. Son yıllarda bitüm modifiyesi için ve çatı kaplama işlemlerinde kullanılmaktadır. Yağ asidi amitleri soğudukça, bitüm içinde katılarak, bitümlü karışımın stabilitesini ve deformasyon direncini artırır. Licomont BS 100, bu grupta yer alan bir IKA katkı maddesidir.

Bu 3 gruba dahil olmayıp piyasada kullanılan başka organik IKA katkıları da mevcuttur. Bunlardan bazıları şöyle açıklanabilir:

- *BituTech Per*[®]: Bu organik IKA katkısı, yüksek GDA içerikli karışımlarda gençleştirici olarak kullanılmaktadır. BituTech Per, bitümlü bağlayıcının malten fazını taklit etmek amacıyla tasarlanmıştır. Katkı, GDA içerikli karışıma katıldığında, asfaltın yapısındaki asfaltlerin dağılmasına yardımcı olmakta, dolayısıyla karışımın viskozitesi azalmaktadır. Katkı oranı, karışım ağırlığının % 0.5-0.75'i aralığında değişmektedir. BituTech Per yalnızca GDA içerikli karışımlarda kullanılmaktadır (Prowell ve ark., 2012).
- *Leadcap*[®]: Kore İnşaat Teknoloji Enstitüsü ve Kumho Petrokimya şirketi tarafından geliştirilmiş organik bir IKA katkı maddesidir. Parafin bazlı bir katkı maddesi olup, yapısında adezyon artırıcı ve kristal düzenleyici bileşenler bulunmaktadır. Kristal düzenleyici özelliği sayesinde parafindeki belli kimyasal bağlar engellenir ve kristalleşme azalır. Bu özellik asfalttaki düşük sıcaklık çatlağının önlenmesine yardımcı olur. Leadcap katkı maddesinin erime sıcaklığı, normal BSK karışım sıcaklığının altındadır. Üretici firma tarafından tavsiye edilen katkı miktarı, bağlayıcı ağırlığının %1.5-2'si kadardır. Karışım sıcaklığında 30°C düşüş sağlamaktadır (Kim ve ark., 2013).
- *Shell Thiopave*[®]: Shell firmasının patentli organik IKA katkısıdır. Shell Thiopave, kükürt bazlı bir katkı maddesidir. Erime noktası 120°C civarındadır. Karışıma toprak halinde (bitümle daha önce karıştırılmadan) dahil edilir. Karıştırma sıcaklığı yaklaşık 140°C olarak tespit edilmiştir. Katkı maddesinin yapısındaki kükürdün bir kısmı sıcaklığın etkisiyle bitüm içerisinde çözülür ve bitümün viskozitesini düşürür. Böylece karıştırma sıcaklığı da aşağı çekilmiş olur. Kükürdün bitümde çözülmeden kalan kısmı ise karışımın rijitliğini arttırmaya yardımcı olur. Üretici firma katkı oranını bitüm ağırlığınca %15-20 olarak belirlemiştir. Katkı maddesi bu oranlarda bitümle ikame edilmektedir (Nicholls, 2009).
- *SonneWarmix*[®]: Bu ürün, 91-93°C erime sıcaklığına sahip hidrokarbon bir parafindir. Karışıma bitüm ağırlığının %0.5-1.5'i oranında katılır. Genellikle GDA ile birlikte kullanılmakta olup, saf bitümlü karışıma katılacağına katkı oranı %0.75'i geçmemelidir (West ve ark., 2014). Karıştırma sıcaklığında 28°C düşüş sağlayabilmektedir (Prowell ve ark., 2012).

- *TLA-X[®] (Trinidad Lake Asphalt plus modifier)*: Trinidad Göl Asfaltından elde edilen bir IKA katkısıdır. Karışıma hem bitümle önceden karıştırılarak hem de doğrudan bitüm-agrega karışımı esnasında katılabilmektedir. Karışım sıcaklığını 15-30°C düşürdüğü belirtilmektedir (Saboori ve ark., 2012).

2.4.3.2.3 Kimyasal katkılı IKA teknolojileri

Kimyasal yolla IKA üretim sürecinde, hem ıslak hem de kuru karışım yöntemi kullanılabilir. Bu süreçte, karışımın üretim ve sıkıştırma sıcaklığını düşürmek için viskozite azaltmaya veya köpükleme işlemine ihtiyaç duyulmaz. Onun yerine, yüzey etkinleştirici maddeler, polimerler, emülgatörler kullanılarak karışımın işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik ve yapışkanlık özellikleri artırılır. Dünya genelinde yaygın kullanılan kimyasal IKA katkıları Çizelge 2.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Kimyasal IKA teknolojisi çeşitleri (D’angelo ve ark., 2008; Kuang, 2012; Prowell ve ark., 2012)

IKA Ürünü	Şirket	Katkı Maddesi	Üretim Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yerler	Üretim miktarı (ton)
Evotherm [®] ET (Emülsiyonla sıcak agrega kaplama)	Mead-Westvaco	Kimyasal Bitüm Emülsiyonu	BSK’ya göre sıcaklık 55°C daha düşüktür.	Fransa, Kanada, Çin, Güney Afrika ve ABD	17,000 tondan fazla.
Evotherm [®] DAT	Mead-Westvaco	Suyla seyreltilmiş emülsiyon	BSK’ya göre sıcaklık 45-55°C daha düşüktür	ABD	-
Evotherm [®] 3G	Mead-Westvaco	Bitüm Emülsiyonu	BSK’dan 33-45°C düşüş	ABD	-
Cecabase [®]	Ceca	Bitüm ağırlığının %0.2-0.5’i oranında kullanılır.	BSK’ya göre sıcaklık 30°C daha düşüktür.	ABD ve Fransa	-
Rediset [®]	Akzo Nobel	Katyonik yüzey etkinleştirici ve organik katkılar kullanılır.	BSK’ya göre sıcaklık 30°C daha düşüktür.	ABD ve Norveç	-
Revix [®]	Mathy-Ergon	Yüzey etkinleştirici, parafin ve polimerler kullanılır.	BSK’ya göre sıcaklık 15-25°C daha düşüktür.	ABD	-
HyperTherm [®]	Coco Asphalt Engineering	Yüzey etkinleştirici etken maddeler.	BSK’ya göre sıcaklık 25-30°C daha düşüktür.	Kanada	-
Iterlow T [®]	Iterchimica	Yüzey aktif maddeler.	BSK’ya göre 40°C düşüktür	İtalya	-

2.4.3.2.3.1 Evotherm®

MeadWestvaco firması tarafından geliştirilmiş kimyasal bir katkı maddesidir. Yapısında emülsiyonlaştırıcı ve soyulma önleyici etken maddeler bulunmaktadır. Bu sayede düşük sıcaklıklarda agrega, bitümlü bağlayıcı ile kolaylıkla kaplanabilmektedir. Bu ürün günümüze 3 versiyonda ulaşmıştır.

- İlk olarak *Evotherm® Emülsiyon Teknolojisi* (ET) olarak 2004 yılında piyasaya sürülmüştür. Bu versiyonda, geliştirilen emülsiyonla sıcak agrega karıştırılarak karışım sıcaklığı düşürülmüştür.
- Katkı maddesinin ikinci versiyonu *Evotherm® DAT* (Dispersed Asphalt Technology-Ayrık Asphalt Teknolojisi) adıyla piyasaya sunulmuştur. Bu aşamada, ET sürecindeki aynı kimyasal katkı karışım esnasında az miktarda suyla seyreltilerek karışıma uygulanmıştır. Kullanılan katkı maddesi miktarı bitümlü bağlayıcı ağırlığının %5'i kadardır.
- 3.Nesil teknoloji olan *Evotherm® 3G* (Third Generation), Mathy Teknoloji-Mühendislik firması ve Paragon Teknik Hizmetleri firmasının Meadwestvaco firmasıyla işbirliğinde üretilmiştir (Şekil 2.16). Bu yöntemde, kimyasal katkı maddesi su içermez ve hem bitümlü bağlayıcıya hem de doğrudan karışıma dahil edilebilir. Tavsiye edilen katkı miktarı, bitüm ağırlığının %0.25-0.75'i aralığındadır.

Evotherm® DAT ve Evotherm® 3G'nin başarılı sonuçlarının ardından Evotherm® ET artık günümüzde kullanılmamaktadır. Karışım sıcaklığını düşürme noktasında Evotherm® DAT'ın, Evotherm® 3G'den daha başarılı olduğu görülmüştür (Behnood, 2020).



Şekil 2.16. Evotherm® 3G katkısı (Leng ve ark., 2014)

2.4.3.2.3.2 Cecabase®

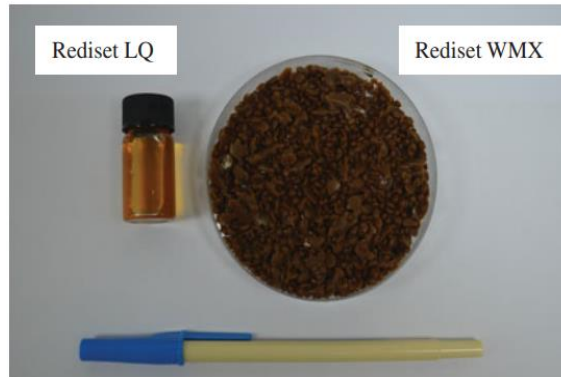
Cecabase RT®, Ceca firması tarafından Fransa’da geliştirilmiş kimyasal bir katkı maddesidir. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunmaktadır (Şekil 2.17). Ürünün yapısında bulunan yüzey aktif maddeler, agrega-bitüm arasındaki yüzey gerilimini düşürerek düşük sıcaklıklarda kaplanmayı sağlamaktadır. Katkı maddesinin standart dozajı bitüm ağırlığınca %0.2-0.5 olarak önerilmektedir (Goh ve ark., 2013). Cecabase® RT katkı maddesinin karışım sıcaklığını 30°C düşürdüğü belirtilmektedir.



Şekil 2.17. Cecabase RT® katkı maddesi (Goh ve ark., 2013)

2.4.3.2.3.3 Rediset®

Rediset®, AkzoNobel firması tarafından geliştirilen bir katkı maddesidir. 2007 yılında Rediset® WMX adıyla katı olarak, 2011 yılında ise Rediset® LQ adıyla sıvı olarak üretilmiştir (Şekil 2.18). Her iki katkı maddesinde de su bulunmamaktadır. Yağlı poliamin, polimer ve katyonik bileşenlerden oluşmaktadır. Erime noktası 85°C civarında olup, yüksek kesmeli mikserde ihtiyaç duymadan rahatlıkla bitümlü bağlayıcı içinde çözülebilmektedir. Bağlayıcının PG sınıfını değiştirmez (Hamzah ve ark., 2014). Tavsiye edilen katkı miktarı; katı ürün kullanılacaksa bitüm ağırlığının %1.5-2’si, sıvı ürün kullanılacaksa bitüm ağırlığınca %0.4-0.75 oranındadır. Karıştırma sıcaklığında sağladığı düşüş 30-35°C aralığındadır (Prowell ve ark., 2012).



Şekil 2.18. Sıvı ve katı formdaki Rediset® (Hamzah ve ark., 2014)

2.4.3.2.3.4 Revix®

Revix®, kimyasal bazlı bir katkı maddesi olup Mathy Teknoloji-Mühendislik firması ve Paragon Teknik Hizmetleri firması tarafından ABD’de geliştirilmiştir. Revix®, diğer kimyasal IKA katkı maddelerinde olduğu gibi bitümlü bağlayıcının viskozitesini düşürmez veya karışımı köpüklendirmez. Bunun yerine, yapısında bulunan çeşitli yüzey aktif maddeler, parafinler ve polimerler yardımıyla karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını BSK’ya göre 15-25°C düşürmektedir (Chowdhury ve Button, 2008).

2.4.3.2.3.5 HyperTherm/QualiTherm®

HyperTherm®, özel saha projelerinde kullanılan susuz bir kimyasal katkı maddesidir. Bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeden karışımın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını düşürebilmektedir. Soğuk hava koşullarında karışımın sıkıştırılabilirliğini artırma, yüksek GDA içerikli karışımlarda işlenebilirliği artırma gibi amaçlarla ABD ve Kanada’da kullanılmaktadır. ABD’de QualiTherm ismi ile bilinmektedir. HyperTherm®’in tavsiye edilen katkı oranı %0.2-0.3 (bitüm ağırlığına) olup, karıştırma sıcaklığını 130°C’ye kadar düşürebildiği belirlenmiştir (Lavorato ve ark., 2011).

2.4.3.2.3.6 Iterlow T™

Iterchimica firması tarafından İtalya’da geliştirilen kimyasal bir IKA katkısıdır. Iterlow T™, doğrudan bitümlü bağlayıcının yüzey gerilimine etki etmektedir.

Dolayısıyla bitümlü bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmez. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunmaktadır. Iterlow TTM'nin önerilen dozajı bitüm ağırlığınca %0.3-1 aralığında değişmektedir. Karıştırma sıcaklığını yaklaşık 40°C dūřürdüęü belirtilmiştir (Anonymous, 2020c).

2.4.3.3 Ilık karışım asfalt teknolojisinin avantajları ve dezavantajları

IKA'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının BSK'dan daha dūřük olması, potansiyel birçok faydayı beraberinde getirmektedir. Daha az emisyonlar, dūřük yakıt tüketimi, daha uzun mesafelere karışımın taşınabilmesi ve işçilerin çalışma koşullarındaki iyileşmeler IKA'nın faydalarına örnek olarak verilebilir. Ancak, IKA teknolojisinin henüz yeni olması, birçok farklı problemin henüz çözülemediğini ve araştırılması gerektiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra her ne kadar yakıt tüketimleri azalsa da, IKA'nın uygulanması sürecinde ortaya çıkan ek maliyetler de dikkate alınması gerekir. Bu kısımda, IKA'nın faydaları ve eksik yönleri ele alınacaktır.

2.4.3.3.1 IKA'nın avantajları

IKA, çok çeşitli işlemlerin ve farklı malzemelerin kullanıldığı bir teknoloji olduğu için tek bir grupta faydalarını sıralamak kolay değildir. Ancak geniş perspektifte ve yüzeysel olarak bakıldığında BSK'dan ayrılan pozitif yönlerini şu şekilde sıralamak mümkündür:

- 1. *Çevresel Faydaları*: Dūřük miktarda duman ve emisyon.
- 2. *Ekonomik Faydaları*: Enerji tüketimi ve finansal masrafların daha az olması.
- 3. *Kaplama Açısından Faydaları*: İşlenebilirlik ve sıkıştırma özelliklerinin etkin olması, karışımı uzun mesafelere taşıma imkanı, hızlı soğuma özelliğinden dolayı yolun trafiğe kısa sürede açılması.
- 4. *Üretim Açısından Faydaları*: Kentsel alanlarda kullanılabilme avantajı ve geri dönüştürülebilir asfaltın kullanılabilme oranının fazla olması.

2.4.3.3.1.1 Çevresel faydaları

Bitüm Forumu'ndan elde edilen verilere göre, asfalt karışım 80°C'nin altındaki sıcaklıklarda serildiğinde hemen hemen hiç emisyon görülmemektedir. Hatta 150°C'lerde bile ortaya çıkan emisyon miktarı sadece 1 mg/sa değerindedir. 180°C civarlarında önemli miktarda emisyon değerleri kaydedilmiştir. Bu sebeple, IKA kullanımı emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır. Çizelge 2.5, bu konuda farklı araştırmacılar tarafından yapılan bir araştırmayı göstermektedir (Rubio ve ark., 2012).

Meadwestvaco IKA firmasının saha testi raporuna göre, karışım sıcaklığındaki 35°C'lik düşüş, salınan CO₂ ve SO₂ emisyonunu %45, NO_x emisyonunu ise %60 azaltmaktadır. Toplam organik madde miktarındaki azalma ise %41 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, çözülebilir benzen fraksiyonunun tespit edilebilir seviyenin altında olduğu belirtilmiştir (Button ve ark., 2007). Bahsedilen emisyonların azalması, işçilerin daha kaliteli çalışma koşullarında serim-sıkıştırma işlemlerini yapmasını sağlamaktadır (Şekil 2.19). İşçilerin maruz kalacağı madde miktarı azaldığından, sağlık yönünden ortaya çıkabilecek olumsuzluklar da önemli ölçüde azalacaktır. Ayrıca, tünel vb. yapılarda serim işlemi açık havada gerçekleşmediğinden emisyonların azalması, bu tür yapılarda çok daha fazla öneme sahiptir. Özellikle bu bölgelerde IKA'nın kullanımının faydası göze çarpmaktadır.

Çizelge 2.5. IKA'nın gaz emisyonlarını azaltma oranları (Rubio ve ark., 2012)

Gaz Emisyonları	(Vaitkus ve ark., 2009)	(Bueche, 2009)	(Larsen, 2001)	(D'angelo ve ark, 2008)	Evotherm websitesi
CO ₂	%30-40	%30-40	%31	%15-40	%46
SO ₂	%35	-	-	%20-35	%81
VOC	%50	%50	-	gt ; %50	%30
CO	%10-30	-	%29	%10-30	%63
NO _x	%60-70	-	%62	%60-70	%58
Toz	%20-25	-	-	%25-55	-

Prowell ve ark. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, asfalt karışımı esnasında ortaya çıkan emisyonlardan, kanserojen özellikte olan polisiklik aromatik hidrokarbon dumanları ile aerosollerin IKA sürecinde %30-50 oranında azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 2.19. Köpüklenme yöntemi ile üretilen IKA serimi (solda), BSK serimi (sağda) (Zaumanis, 2014)

Kriech ve ark. (2011), 3 farklı IKA karışımı ve standart bir BSK karışımının Griffith, Indiana ve New York bölgelerinde yola serilmesi esnasında ortaya çıkan emisyonların ölçümünü yapmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, IKA ile yapılan yollarda tespit edilen toplam organik madde miktarının BSK ile yapılan yoldan %36 daha düşük olduğu belirlenmiştir. İnsan sağlığına zarar veren 4-6 halkalı polisiklik aromatik hidrokarbona ise IKA serimi yapılan yollarda rastlanmamıştır.

Tutu ve Tuffour (2016) tarafından yapılan araştırmaya göre, IKA üretimi %20-35 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu da, IKA üretimi tonu başına 4.1 kg ile 5.5 kg daha az CO₂ salınmasını sağlamaktadır. Tutu ve Tuffour (2016), Nicholls ve James (2013) isimli araştırmacılara göre, Almanya'da yıllık 63 milyon ton olan asfalt üretiminin tamamı BSK yerine IKA ile yapılsaydı, 400,000 ton daha az CO₂ atmosfere salınacaktı. Tutu ve Tuffour (2016), Ripoll ve Farré (2008) yaptıkları bir araştırmada farklı üretim sıcaklıklarında ortaya çıkan gaz emisyonlarındaki değişimi incelemişlerdir. Üretim sıcaklığındaki 25°C'lik düşüşün %5.7 daha az emisyon oluşturacağı sonucuna varılmıştır. Araştırmayla ilgili veriler Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 Karışım sıcaklığına göre emisyonlardaki değişim (kg/ton) (Tutu ve Tuffour (2016), Ripoll ve Farré (2008))

Karıştırma Sıcaklığı (°C)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eşdeğeri	155°C'ye göre değişim (%)
175	36.3	0.0018	7	36.6	4.6
155	34.7	0.0018	7	35.0	0
130	32.7	0.0018	7	33.0	-5.7

2.4.3.3.1.2 Ekonomik faydaları

Ilık karışım asfalt teknolojisinin en temel faydalarından biri şüphesiz enerji kullanımını azaltmasıdır. Karışımın üretiminde enerji tüketiminin azalması ise, doğrudan karışım sıcaklığının düşürülmesi ile ilgilidir. Bu bağlamda, İKA üretimi için harcanan enerjinin kullanılan teknolojiye bağlı olarak BSK için harcanan enerjiden %11-35 oranında daha az olduğu belirtilmiştir. Ancak bu oranın LEA, LEAB gibi İKA yöntemlerinde %50'ye kadar çıkabileceği de belirtilmektedir (D'Angelo ve ark., 2008).

Olard ve ark. (2008) yapmış oldukları bir çalışmada, 160°C'de üretilen BSK için yakıt tüketiminin 7.27 lt/ton olduğunu, 130°C'de üretilen İKA için ise bu değer 6.07 lt/ton olduğunu belirlemiştir. Dolayısıyla 30°C'lik sıcaklık düşüşü için, yakıt sarfiyatındaki azalmanın 1.2 lt/ton (%16.5) olduğu ortaya çıkmaktadır. Üretim sıcaklığı 100°C'nin biraz altında olan LEA yönteminde ise enerji kazanımı %51.6 olarak hesaplanmıştır.

Prowell ve ark. (2012) çalışmalarında, İKA üretimi ile ortalama %23 daha az enerji harcandığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, üretim sıcaklığı 100°C'nin altında olan İKA teknolojilerinde bu oran %50-60 aralığına kadar artmaktadır.

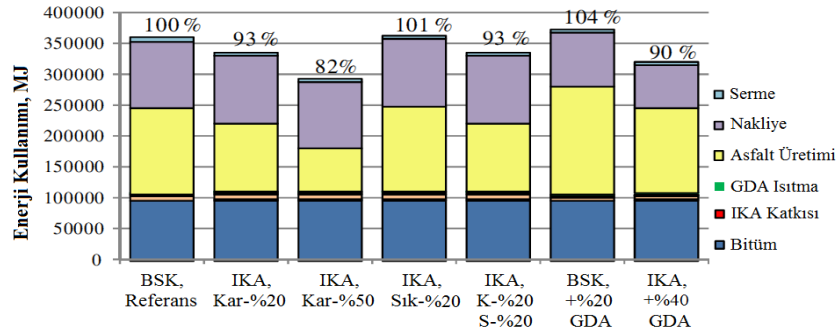
Nicholls ve James (2013), yaptıkları literatür araştırmasında, üretim sıcaklığındaki her 10°C'lik düşüşün %3-4 enerji tasarrufu sağladığını belirtmiştir. Bu da, asfalt tonu başına 0.25 lt yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir.

WAM-Foam İKA teknolojisi kullanılan bir asfalt tesisinde yapılan ölçümler ile, tesiste kullanılan dizel yakıt miktarının %40 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (Chowdhury ve Button, 2008).

Hamzah ve ark. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, Sasobit®'in enerji tasarrufu üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, %1-2-3-4 oranlarında Sasobit® ile bitüm modifiye edilmiştir. Orta sıcaklıkta (16-31°C) yapılan DSR testleri ile bağlayıcının yorulma davranışı incelenerek, optimum katkı oranı %1.6 olarak belirlenmiştir. Bu oranda, karıştırma sıcaklığındaki azalma yaklaşık 6 °C, enerji sarfiyatındaki azalma ise %4.9 olarak tespit edilmiştir.

Zaumanis ve ark. (2011) yaptıkları bir çalışmada, İKA ve BSK'nın yaşam döngü maliyet analizini yapmışlardır. Çalışmada, ılık karışım üretim enerjisinin %20 ve %50 azaldığı durumlarla hem üretim hem de sıkıştırma enerjisinin %20 azaldığı durum, BSK ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca GDA kullanımı durumunda ortaya çıkacak maliyetler

de incelenmiş, bu sonuçlar da araştırmaya dahil edilmiştir. Şekil 2.20’de de görüleceği üzere, IKA’nın üretim enerjisindeki %20’lik azalma, toplam ömür döngü maliyetini BSK’ya göre %7 azaltırken, üretim enerjisinin %50 azalması durumunda bu oran %18’e çıkmaktadır. %40 GDA kullanılan IKA karışımlarında ise toplam maliyet, standart BSK’ya göre %10 azalmıştır.



Şekil 2.20. Farklı koşullarda hazırlanmış IKA ve standart BSK için enerji ihtiyaç grafiği (Zaumanis ve ark., 2011)

2.4.3.3.1.3 Kaplama açısından faydaları

Karışımın yola serilmesi ile ilgili faydalar, IKA teknolojisinin farklı yöntemlerle karışımın işlenebilirliği ve sıkıştırılabilirliğini artırması ile ilgilidir. Bu sayede, sıkıştırma işlemi için harcanan enerji azalır. Nitekim, Sasobit® katkılı bir karışımın sıkıştırılması için gerekli silindir pas sayısında standart BSK’ya göre %40 azalma olduğu rapor edilmiştir (Kristjansdottir, 2006). Literatürde IKA’nın sıkışmayı kolaylaştırdığı ile ilgili şu çalışmalara da rastlanmıştır:

Faheem ve ark. (2018), Tao ve ark. (2009) yaptıkları bir çalışmada, %100 GDA karışımların birim hacim ağırlıkları ile IKA katkılı GDA karışımların birim hacim ağırlıklarını karşılaştırmıştır. Araştırmada, GDA karışıma farklı oranlarda Sasobit® (%1.5, %2.0 ve %5.0) ve Advera zeolite (%0.3, %0.5 ve %0.7) katılarak IKA katkılarının karışımın sıkıştırılmasına karşı performansları incelenmiştir. Hem katkısız hem de IKA katkılı GDA karışımlar 120°C’de hazırlanmıştır. Sonuçlara göre, karışımda Sasobit® oranı arttıkça karışımın birim hacim ağırlığı artmakta ve her durumda katkısız karışımın birim hacim ağırlığından daha yüksek sonuç vermektedir. Başka bir deyişle, Sasobit®’in karışımdaki oranı arttıkça karışımın sıkışma özelliği de artmaktadır. %0.3 Advera zeolite katkılı karışımlarda, elde edilen birim hacim ağırlığı katkısız karışımı geçerken, katkı oranı arttıkça karışımın birim hacim ağırlığı düşmüştür. Araştırmacılar

aynı zamanda, bu karışımlara tork testi yaparak karışımların işlenebilirlik özelliğini de ölçmüşlerdir. Karıştırma işleminin hemen ardından (110°C) yapılan testlerde her iki IKA katkılı karışımda katkısız karışımdan daha iyi sonuç vermiştir. Ancak, karışım işleminden 1 saat sonra (80°C) yapılan testlerde, her iki IKA katkılı karışımın da işlenebilirliği önemli ölçüde azalmış ve referans numunenin gerisinde kalmıştır.

Bennert (2017) yapmış olduğu bir çalışmada, Evotherm ve SonneWarmix IKA katkılarının, Geri Dönüştürülmüş Asfalt Şıngıl (GDAŞ) içerikli karışımların sıkıştırılabilirliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, PG64-22 saf bitümlü karışıma %7.5 ve %15 oranlarında GDAŞ eklenerek hazırlanan karışımların boşluk yüzdesi tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra karışımlara %0.6 oranında Evotherm ve %1 oranında SonneWarmix ilave edilmiş ve IKA katkılı karışımların da boşluk yüzdesi tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, her iki IKA katkısı da GDAŞ ilaveli karışımların boşluk yüzdesini önemli ölçüde düşürmeyi başarmıştır. Bu sonuçlardan, bu katkıların özellikle GDAŞ ilaveli karışımlarda sıkışmayı kolaylaştırdığı anlaşılmıştır.

Faheem ve ark. (2018), Solaimanian ve ark. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı IKA teknolojilerinin (Evotherm, Sasobit® ve köpük yöntemi), karışımların sıkıştırılabilirlik özelliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca %35 oranında GDA, IKA katkılı karışımlara ve referans karışıma dahil edilmiştir. Böylece IKA katkılarının hem GDA'sız hem de GDA'lı karışımların sıkıştırılabilirlik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçları Çizelge 2.7'de gösterilmiştir. Buradan, IKA katkılarının GDA içerikli karışımlarda, hava boşluğunu önemli ölçüde düşürerek karışımların daha kolay sıkıştırılabilmesine yardımcı olduğu görülmüştür. GDA kullanılmayan karışımlarda ise IKA'lar ile BSK arasında hava boşluğu yönünden ciddi bir fark gözlenmemiştir.

Çizelge 2.7. Farklı IKA karışımları için hava boşluk yüzdesi (Solaimanian ve ark., 2011)

IKA Teknolojisi	%0 GDA %35 GDA Bitüm İçeriği = %5.4	
	Hava boşluğu (%)	Hava boşluğu (%)
BSK	5.6	4.1
Evotherm™	5.6	3.6
Sasobit®	5.4	3.5
Köpükleme	5.8	3.7

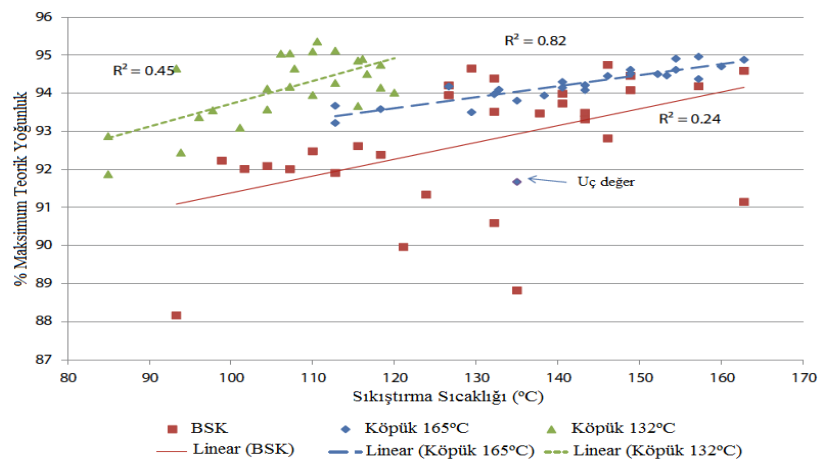
IKA'nın bir diğer önemli faydası ise, soğuk havalarda da serim-sıkıştırma işlemlerinin yapılabilmesidir. Bunu sebebi, karışım sıcaklığı ile ortam sıcaklığının

birbirine BSK'ya göre daha yakın olmasıdır. Böylece, IKA'nın mevcut sıcaklığı işlem esnasında daha az düşmektedir. Sıcaklıklardaki bu yakınlık sayesinde, asfaltın serim sezonu uzamış olur. Ayrıca, bu özellik malzemenin daha uzun mesafelere taşınmasını da sağlar. Bu özellik sayesinde, asfalt üretim tesislerinin yolun inşa edileceği yere yakın olması zorunluluğu da ortadan kalkar. Buna örnek olarak, ABD'de Rhode Adasında inşa edilen bir yol projesi verilebilir. Bölgede herhangi bir asfalt tesisi bulunmadığından, hazırlanan asfalt 3 saatlik bir mesafeden inşaat alanına taşınmıştır. Burada, Advera katkılı IKA karışım kullanılmıştır (Prowell ve ark., 2012).

Nippo inşaat firmasının yapmış olduğu bir araştırmada, mekanik köpükleme sisteminin standart BSK'dan daha iyi sıkıştırma sağladığı belirtilmiştir. Şekil 2.21'de farklı sıkıştırma sıcaklıklarındaki asfalt karışımların eriştikleri yoğunluklar karşılaştırılmıştır. Grafikten görüleceği üzere köpükleme teknolojisi ile daha düşük sıcaklıklarda, karışımlarda daha yüksek yoğunluklar elde edilmiştir.

2007 yılında yapılan Avrupa IKA araştırma turu esnasında, araştırmacılar soğuk iklim koşullarında asfalt dökümünü de incelemişlerdir. Almanya'da farklı IKA teknolojileri ile üretilmiş asfalt karışımlar düşük ortam sıcaklıklarında (-3 ila +4°C) serim-sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Sonucunda, BSK'dan daha yoğun karışımlar elde edilmiştir (Prowell ve ark., 2012).

2008 yılında Lane İnşaat firması, Teksas bölgesinde 17,000 ton IKA (Evotherm DAT) ile yol inşa etmiştir. Bu süreçte, IKA 60 mil uzaklıktaki inşaat alanına taşınmıştır. Yerinde yapılan ölçümlerde, IKA yoğunluğunun maksimum teorik yoğunluğun %93.5'ine eriştiği anlaşılmıştır (Prowell ve ark., 2012).



Şekil 2.21. Düşük ve yüksek sıcaklıkta köpük yöntemi ve BSK'nın sıkışabilirliği (Prowell ve ark., 2012)

IKA'da üretim ve ortam sıcaklıklarının birbirine yakın olmasının bir diğer avantajı ise, inşa işlemi tamamlandıktan kısa bir süre sonra yolun trafiğe açılabilmesidir. Özellikle havaalanı rehabilitasyon çalışmalarında ve yüksek kapasiteli karayollarında bu çok aranan bir özelliktir. Bu konuyla ilgili, Zaumanis (2014) yapmış olduğu bir literatür araştırmasında, IKA serimi yapıldıktan 2 saat sonra yolun trafiğe açıldığını rapor etmiştir. Ayrıca yine aynı derleme çalışmada, Frankfurt havalimanında IKA kullanılarak yapılan bir rehabilitasyon çalışmasının başarıyla tamamlandığı belirtilmiştir. Çalışmada, beton yol üzerine IKA kaplaması gece saat 10³⁰ ile sabah saat 6⁰⁰ arasında gerçekleştirilmiştir. 80°C'den daha düşük bir sıkıştırma sıcaklığı çalışmayı gerçekleştirmek için yeterli olmuştur.

2.4.3.3.1.4 Üretim açısından faydaları

Bu konuda IKA'nın en önemli avantajı, karışımda geri dönüştürülebilir asfaltın kullanılabilirliğinin yüksek olmasıdır. GDA kullanımı, karışımın üretimi esnasında ortaya çıkan maliyetleri dengelemeye yardımcı olur. Bunun yanı sıra, çevrenin korunması ve işlevini tamamlamış asfaltın değerlendirilmesi açısından da faydalıdır (Vaitkus ve ark., 2009; D'angelo ve ark., 2008). Ayrıca, GDA ilavesi, ılık karışımın yüksek sıcaklık performansına da olumlu etki yapmaktadır. Bu faydaları sebebiyle GDA, birçok yol projesinde IKA ile birlikte kullanılmıştır. Bunlardan bazıları şöyledir:

ABD'nin Güney Carolina bölgesinde uygulanmak üzere, Double Barrel Green teknolojisi ile üretilmiş ılık karışımlarda %50 GDA kullanılmıştır. Hollanda'da, LEAB köpükleme IKA teknolojisi ile birlikte yine %50 oranında GDA kullanıldığı rapor edilmiştir. Öte yandan, Almanya'da yapılan saha çalışmalarında, Asphamin® katkılı karışımlarda %90'a varan oranlarda GDA kullanıldığı belirlenmiştir (Prowell ve ark., 2012). ABD'nin Maryland bölgesinde yapılan bir yol kesiminde de, Sasobit® katkılı IKA karışımda %35 oranında GDA kullanıldığı belirtilmiştir. Bunun dışında Orlando'da yapılan bir yol projesinde, Zeolit katkılı karışımlarda %20 oranında GDA kullanılmıştır (Farooq ve Mir, 2017).

IKA'nın üretim açısından bir diğer faydası ise, tesislerin kentsel alanlarda konumlandırılabilmesidir. IKA teknolojisi düşük sıcaklıklarda üretildiğinden, üretim esnasında düşük emisyonlar meydana gelir. Dolayısıyla, salınan zararlı gazlar kentler için belirlenen limitlerin altında kalır. Bu durum, IKA'nın kentsel alanlarda da üretilebilmesini mümkün kılar.

2.4.3.3.2 İKA'nın dezavantajları

İKA'nın farklı açılardan birçok önemli avantajının yanı sıra, üzerinde durulması gereken bazı dezavantajları da mevcuttur. *Tekerlek izi, nem hassasiyeti ve uzun dönem performans özellikleri*, İKA'nın problemlerinin başında gelmektedir. Teknolojinin görece henüz yeni olması sebebiyle, hem saha hem de laboratuvar ölçeğinde İKA ile ilgili yeterli veri bulunmamaktadır. Bu sebeple, özellikle bahsi geçen konularda daha çok araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

2.4.3.3.2.1 Tekerlek izi direnci

Yolda meydana gelen düşey kalıcı deformasyon olarak tanımlanan tekerlek izi, İKA'da görülen önemli problemlerden biridir. Tekerlek izi direnci, bitümlü bağlayıcı sınıfında ve karışımın hacimsel özelliklerinde çeşitli düzenlemeler yapılarak artırılabilir (Martin ve ark., 2014). Bu düzenlemeleri şöyle sıralamak mümkündür:

- Bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesinin 1 sınıf yükseltilmesi, tekerlek izi direncini 2 kat arttırabilmektedir.
- %25-30 GDA kullanımı, bağlayıcının yüksek sıcaklık performans derecesini 1 sınıf arttırmaktadır.
- İnce eleklerin (0.075 mm, 0.15 mm ve 0.3 mm) yüzde geçen değerlerinin toplamının 50'ye çıkarılması, tekerlek izi direncini 2 kat arttırabilmektedir.
- VMA (Agregalar arası boşluk) değerinin %1 azaltılması, tekerlek izi direncini 1.2 kat arttırmaktadır.
- $N_{\text{tasarım}}$ değerinin 1 seviye yükseltilmesi, tekerlek izi direncini yine 1.2 kat arttırmaktadır.

Literatürde, İKA'nın tekerlek izi direncinin incelendiği araştırmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

Rezapour ve Wulff (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, Evotherm 3G katkılı İKA'nın tekerlek izi performansı incelenmiştir. Çalışmada, ABD'nin Valley City bölgesinde 3 yıldır hizmet veren bir yoldan alınan, hem İKA hem de BSK numuneleri üzerinde APA tekerlek izi testi yapılmıştır. Sonuçlar, 3 yıl önce genç numunelerle yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Böylece, çalışmada hem İKA-BSK karşılaştırması hem de yaşlanmış-genç numune karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına

göre, hem genç numunelerde hem de yaşlanmış numunelerde IKA'nın tekerlek izi derinliği BSK'dan daha fazla çıkmıştır. Yaşlanmış IKA numunelerinin tekerlek izi derinliği (ıslak koşulda), genç IKA'lardan %25 daha düşük çıkmıştır. Bu oran BSK numunelerde ise %21 olarak belirlenmiştir.

Bairgi ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, kimyasal katkı IKA'ların tekerlek izi performansı incelenmiştir. Araştırmada 3 farklı tipte kimyasal IKA katkısı (Evotherm-IKA₁, Polimerize olmayan Cecabase-IKA₂ ve Polimerize Cecabase-IKA₃) kullanılmıştır. Ayrıca her IKA karışıma %35 GDA ve %1 sönmüş kireç ilave edilmiştir. Çalışmada, 3 IKA ve BSK'ya Hamburg tekerlek izi testi yapılmıştır. Deneyin sonucuna göre, tekerlek izi direnci en güçlü karışım IKA₃ olurken, tekerlek izine en hassas karışımın IKA₂ olduğu saptanmıştır. Karışımlardan sadece IKA₂, BSK'dan daha yüksek (%5) tekerlek izi sonucu vermiştir.

Topal ve ark. (2017) yaptıkları bir araştırmada, farklı tipteki IKA'ların tekerlek izi performansını incelemişlerdir. Çalışmada, IKA katkısı olarak Sasobit[®], Rediset, Advera ve doğal zeolit kullanılmıştır. Hem IKA hem de BSK numunelere Hamburg tekerlek izi testi yapılmıştır. Test sonuçları, IKA'ların hepsinin BSK'dan daha iyi tekerlek izi performansı sergilediğini göstermiştir.

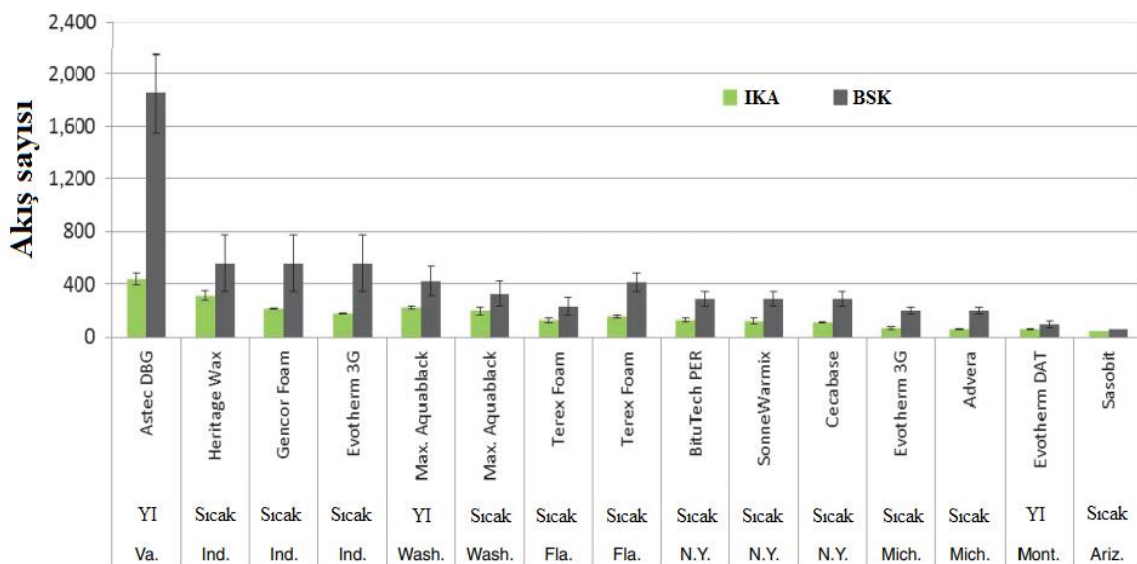
Behbahani ve ark. (2017) yapmış oldukları bir çalışmada, Zycotherm ve Sasobit[®] katkı IKA'lar ile BSK'nın tekerlek izi performansını karşılaştırmışlardır. Ayrıca hem IKA hem de BSK karışımlara belirli oranlarda (%25, %50 ve %75) GDA katarak, GDA'nın etkisini de incelemişlerdir. Çalışmanın sonucuna göre, Sasobit[®] katkı IKA karışımının tekerlek izi performansı hem diğer IKA'dan hem de BSK'dan daha iyi sonuç vermiştir. Zycotherm katkı IKA ile BSK'nın tekerlek izi sonucu ise birbirine çok yakın çıkmıştır. Karışımlara GDA'nın dahil edilmesi ile ise, tekerlek izi derinlikleri hangi karışım olduğu fark etmeksizin önemli ölçüde azalmıştır.

Rodezno ve ark. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı tipteki IKA'lar, tekerlek izi performansı açısından standart BSK ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 12 farklı IKA'nın tekerlek izi performansı, akış sayısı testi ile belirlenmiş olup sonuçlar Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Karışımların tamamı, ilgili bölgelerdeki plentlerden alınmış ve mobil laboratuvarlarda ya sıcak halde ya da yeniden ısıtılarak sıkıştırılmıştır. Şekil 2.22 incelendiğinde görülüyor ki, IKA'ların tamamı BSK'lardan daha düşük akış sayısına sahiptir. Akış sayısı ile tekerlek izi direnci arasında doğru orantı olduğu düşünüldüğünde, hiçbir IKA, BSK'dan daha iyi tekerlek izi performansı sergileyememiştir. Ancak, Sasobit[®] ve Evotherm DAT katkılarının kullanıldığı IKA

karışımların tekerlek izi sonuçları ile BSK sonuçları arasında istatistiksel bir fark olmadığı da çalışmada ifade edilmiştir.

Özetle, son yapılan araştırmalara bakıldığında şunları söylemek mümkündür:

- IKA karışımlara GDA ilavesi, tekerlek izi direncini geliştirmektedir.
- Yoldan alınan numuneler incelendiğinde, en az birkaç yıl hizmet ömrüne sahip yaşlanmış IKA'ların, genç IKA'lardan daha iyi tekerlek izi direnci oluşturduğu görülmüştür.
- Sasobit[®], Rediset, Zycotherm gibi katkılarla hazırlanan IKA'ların en az BSK kadar iyi tekerlek izi direnci sergilediği tespit edilmiştir.
- Köpükleme yöntemi (Astec Double Barrel Green, Aquablack vb.) ile üretilen ılık karışımlarda ve bazı kimyasal IKA'larda ise, tekerlek izine hassasiyetin oldukça fazla olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.22. IKA ve BSK'nın akış sayısı test sonuçları (YI: Yeniden Isıtılmış, Va: Virginia, Ind:İndiana, Wash: Washington, Fla:Florida, N.Y: New York, Mich: Michigan, Mont: Montana, Ariz: Arizona) (Rodezno ve ark., 2015)

2.4.3.3.2.2 Nem hasarı

Nem hasarı, su veya su buharının etkisiyle, bağlayıcı-agrega ara yüzeyindeki adhezif bağın veya bağlayıcının kendi içindeki kohezif bağın kırılması ile sonuçlanan bir hasardır. Nem hasarı sebebiyle bitümlü bağlayıcıda oluşan kohezyon kaybı, bağlayıcının yumuşamasına ve dolaylı olarak karışımın stabilitesinin azalmasına yol açar. Adezyon kaybı ise, bitümün agregadan soyulmasına neden olur. Bu durum,

karışımın stabilitesine olumsuz etki eder. Nem hasarı, IKA kaplamalarda BSK'ya kıyasla daha büyük sorunlar oluşturmaktadır. Bunun temel sebepleri şöyle sıralanabilir (Diab ve ark., 2016):

- IKA'da kullanılan bitüm, BSK'ya göre daha yumuşaktır.
- Bazı IKA teknolojilerinde (köpükleme yöntemi) üretimin doğrudan veya dolaylı olarak su kullanılarak yapılmasıdır.
- IKA düşük karıştırma sıcaklıklarında üretildiğinden, karışımdaki agregalar tam olarak kurumamaktadır.

Nem hassasiyetini azaltmak için, karışımın tasarımı çok iyi yapılmalıdır. Nemin varlığından dolayı ortaya çıkan agrega-bitüm soyulmasını önlemek için, karışıma soyulma önleyici katkı malzemesi katılması en yaygın metotlardan biridir. Ancak, katılacak soyulma önleyici katkının doğru seçimi çok önemlidir. Nitekim, sıvı olarak kullanılan bazı soyulma önleyici katkı maddelerinin karışımın kimyasal bağ yapısını bozduğu ve buna bağlı olarak agrega-bitüm aderansının kaybolduğu tespit edilmiştir (Rubio ve ark., 2012). Farklı IKA katkılarının ve farklı ortam koşullarının etkisi altında, karışımlarda nem hassasiyetinin incelendiği araştırmalardan bazıları şu şekildedir:

Ji ve ark. (2019) yaptıkları bir çalışmada, agregalardaki farklı nem içeriğinin (%0, 1, 2, 3) IKA'nın nem hassasiyeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, bir polietilen vaks türü olan RH organik IKA katkısı ile oluşturulmuş karışımlar kullanılmıştır. Farklı nem içeriklerindeki IKA'ların nem hassasiyeti, Modifiye Lottman testi ile belirlenmiştir. Ayrıca, nem içeriği ve karışımdaki hava boşluğu yüzdesi arasındaki ilişki de X-Ray tomografi teknolojisi yardımıyla belirlenmiştir. X-ray sonuçları, karışımlardaki hava boşluğu boyutunun 0-5 mm³ ile 5-10 mm³ arasında değiştiğini göstermiştir. Donma çözülme çevrimlerinden sonra hava boşluğu boyutunun arttığı, hava boşluğu sayısının ise azaldığı tespit edilmiştir. Modifiye Lottman testi sonuçlarına göre ise, agregalardaki nem içeriği arttıkça TSR değerinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Sonuçlara göre, karışımdaki nem içeriği %0'dan %3'e çıktığında TSR değeri %78'den %61'e gerilemiştir. Bu çalışmadan, karışımdaki agregaların iyi kurumamasının ne kadar nem hasarına yol açabileceği görülmektedir.

Albayati ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, IKA'da iri agrega yerine kullanılacak beton atığının, IKA'nın nem hassasiyetine nasıl etki ettiği incelenmiştir. Çalışmada, iri agrega yerine kullanılacak beton atığı, farklı oranlarda (%0, 20, 40, 60, 80 ve 100) IKA'ya dahil edilmiştir. IKA katkısı olarak Asphamin® kullanılmıştır. Marshall ve indirekt çekme deneyi yapılarak karışımlar incelenmiştir.

Deney sonuçları gösteriyor ki, beton atığı kullanılmayan karışımlarda TSR oranı standartların altında kalmıştır. Ancak iri agreganın tamamen beton atığı ile değiştirildiği karışımlarda, TSR oranı %28 artış göstererek şartname limiti olan %80 değerini sağlamıştır. Marshall stabilite değeri ise yine aynı koşulda %13 artmıştır. Buradan, beton atığının IKA'da nem hassasiyetini önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır. Ancak araştırmacılar, beton atığının karışımdaki oranının artmasının, optimum bitüm içeriğini de artırdığını tespit etmişlerdir.

Hasan ve ark. (2015) yaptıkları bir çalışmada, farklı IKA türlerinin nem hassasiyetini incelemişlerdir. Çalışmanın amaçları şu şekildedir: i) Soyulma önleyici katkı maddesi olarak kullanılan sönmüş kirecin IKA'lardaki nem hassasiyetine etkisini incelemek. ii) Çoklu donma-çözünme çevrimlerinin nem hassasiyetine olan etkisini incelemek. Çalışmada IKA katkısı olarak Advera, Sasobit® ve Cecabase RT kullanılmıştır. Numunelerde suya doymuş yüzey kuru (SDYK) agrega kullanılarak, düşük sıcaklıklarda agregaların tam kurumaması durumunun sonuca nasıl yansıdığı bu çalışmada ele alınmıştır. Nem hassasiyeti, Modifiye Lottman testi ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, SDYK agregalarının kullanıldığı tüm IKA numunelerinin TSR değeri, minimum değer olan %80'in altında kalmıştır. Bu durum, tam kurumayan agreganın karışımda nem hasarına yol açtığı şeklinde yorumlanmıştır. Sönmüş kireç ilavesi ile tüm karışımlarda TSR değeri %80'in üzerine çıkarılmıştır. Çoklu donma-çözünme çevrimleri altında ise IKA numuneler, BSK kontrol numunesi kadar iyi performans sergileyememiştir.

Nem hasarına karşı direnci arttıran bir başka yöntemin ise GDA kullanımı olduğu bazı çalışmalarda tespit edilmiştir (Goli ve Latifi, 2020; Hill, 2011). Ancak Guo ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, GDA'nın %30-50 oranından fazla kullanılmasının, nem direncine olumsuz etki ettiği de görülmüştür.

2.4.3.3.2.3 Uzun dönem performansı

IKA teknolojisi BSK'ya göre oldukça yeni bir teknolojidir. Bu yöntemle yol inşasına Avrupa'da 1997 yılında, ABD'de ise 2004 yılında geçilmiştir (Prowell ve ark., 2012). Dolayısıyla IKA teknolojisinin uzun dönem performans özellikleri ile ilgili bilgilere araştırmacılar yeni yeni ulaşmaktadır. 2007 yılında ABD'den bir araştırma ekibi, Avrupa IKA araştırma projesinde elde edilen uzun dönem performans verilerinden (tekerlek izi, nem hasarı, yanal-boyuna çatlaklar vb) IKA'nın en az BSK

kadar iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir (D'angelo ve ark., 2008). Öte yandan 2011 yılında ABD'de yapılan bir saha araştırmasında, 2006 yılında inşa edilen bir yol kesimi incelenmiştir. Bu yol kesiminde 3 farklı IKA teknolojisi (Asphamin[®], Evotherm[®] ve Sasobit[®]) ile üretilmiş esnek kaplamalar ile yine aynı kesimde inşa edilen referans BSK esnek kaplama karşılaştırılmıştır. Yolun hizmete açılmasından 5 yıl sonra BSK'da ağır yansıma çatlakları olduğu görülmüştür. IKA kaplamalarda oluşan yansıma çatlaklarının ise BSK'daki kadar ciddi olmadığı ve çatlak uzunluğunun 2 inç değerini geçmediği saptanmıştır. Yapılan diğer güncel araştırmalardan bazıları ise şu şekildedir:

Zhang ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada, farklı tipteki IKA karışımların uzun dönem performanslarını incelemişlerdir. Çalışmada, 13 farklı sahada 34 IKA kaplaması (organik, kimyasal ve köpükleme yöntemleri ile üretilmiş), yanal çatlak, boyuna çatlak ve tekerlek izi kriterleri açısından incelenmiştir. IKA kaplamaların trafik altındaki hizmet süreleri 0-8 yıl aralığında değişmektedir. Çalışmanın sonuçlarına göre, organik modifiyeli IKA kaplamalarda yanal ve boyuna çatlakların diğer IKA kaplamalardan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun temel sebebi, organik IKA karışım çatlama yoğunluğunun ve bağlayıcı kırılma enerjisinin diğer katkılardan daha düşük olmasıdır. Tekerlek izi sonuçları ise, tüm IKA kaplamalarda birbirine yakın çıkmıştır.

Luo ve ark. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı iklim koşulları altında IKA'ların uzun dönem mekanik özellikleri incelenmiş ve referans BSK ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testlerde IKA ve BSK numuneler üzerinde 15 donma-çözünme çevrimi, 12 su emdirme çevrimi (nemli iklim koşulları için), tuzlu suda 12 ıslak-kuru çevrimi (tuzlu iklim koşulu için) ve 12 adet ısıl çevrim (yüksek sıcaklık koşulu için) yapılmıştır. Ayrıca, karışımların uzun dönem performans özelliklerini arttırmak için çimento, sönmüş kireç ve fiber kullanılmıştır (Bu kısım çalışmanın ikincil amacıdır). Test sonuçlarına göre, IKA'ların hepsinin uzun dönem mekanik özellikleri (hava boşluğu ve çekme dayanımı) BSK'dan daha kötü çıkmıştır. IKA türleri içerisinde en kötü sonucu veren Asphamin[®] katkılı IKA grubu olmuştur. Uzun dönem performansı arttırmada en başarılı ilave katkı malzemesi ise fiber olmuştur.

Shen ve ark. (2017) yaptıkları bir çalışmada, IKA teknolojisi ile hazırlanmış esnek kaplamaların uzun dönem performans özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar ayrıca BSK kaplamaların performansı ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 28 farklı IKA kaplaması (organik, kimyasal ve köpükleme yöntemleri ile üretilmiş), nem hasarı, yanal

çatlak, boyuna çatlak ve tekerlek izi kriterleri açısından incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, IKA'ların referans BSK ile benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ne BSK ne de IKA karışımlarda nem hasarına rastlanmamıştır. Enine çatlamların daha çok 4 veya daha fazla süre hizmet veren kaplamalarda olduğu görülmüştür. Boyuna çatlakların ise çoğunlukla yolun trafiğe açılmasından 4 yıl sonra başladığı ve 6 yılın sonunda maksimum seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Tekerlek izi derinliklerinin erken yolun servis ömrünün 3.yılında başladığı ve 0.1 inç veya üzeri derinliklere servis ömrünün en az 6.yılında ulaştığı belirlenmiştir.

Özetle, IKA projelerinin uzun dönem performans özellikleri, saha gözlemleri ile sürekli incelenmelidir. Bu gözlemler, iki sebepten dolayı çok önemlidir: 1) Eğer IKA'nın uzun dönem performansı BSK'dan daha kötü ise, kaplama servis ömrü boyunca daha sık yenilenir. Bu durum, IKA'nın potansiyel çevresel faydalarının önüne geçebilir. 2) IKA'nın uzun dönem performansı daha da geliştirilebiliyorsa (çatlakların azaltılması gibi), bu durum IKA'nın mevcut ekstra maliyetlerini tolere edebilir.

2.4.3.4 Ilık karışım asfalt teknolojilerinin maliyetlerinin BSK ile karşılaştırılması

Yapılan araştırmalar, ılık karışım asfalt üretiminde harcanan enerjinin standart bitümlü sıcak karışım üretiminde harcanan enerjiden %11-50 oranında daha az olduğunu göstermektedir (Bu konu, *Bölüm 2.4.3.3.1.2*'de detaylı bir şekilde incelenmiştir). Enerji tüketimindeki bu azalma, kullanılan IKA teknolojisine göre değişmektedir. Burada üzerinde düşünülmesi gereken konu, IKA'nın beraberinde getirdiği ek maliyetleri, enerji tasarrufu sebebiyle elde edilen ekonomik kazanımların dengeleyip dengelemediğidir. Bu konu üzerine Kristjansdottir (2006) yaptığı bir çalışmada, 3 farklı IKA ile BSK'yı ekonomik olarak karşılaştırmıştır. Çalışmada, WAM-Foam, Asphamin® ve Sasobit® IKA teknolojileri ekonomik analize dahil edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarının gösterildiği Çizelge 2.8'den, Asphamin® ve Sasobit® katkılı IKA'ların BSK'dan daha pahalı yöntemler olduğu anlaşılmaktadır. WAM-Foam teknolojisi ise, her ne kadar enerji tasarrufu sebebiyle geleneksel BSK'dan daha ekonomik görünse de, maliyetlere ilave ekipman gideri eklendiğinde BSK'dan daha pahalı hale gelmektedir. Ancak, WAM-Foam ilerleyen yıllarda ilave ekipman masrafı gerektirmeyeceğinden BSK'dan daha ekonomik hale gelecektir.

Çizelge 2.8 WAM-Foam, Asphamin[®] ve Sasobit[®] yöntemleri ile hazırlanan IKA üretimi ile geleneksel BSK üretiminin ekonomik analizi (Kristjansdottir, 2006)

	BSK	WAM Foam	Asphamin[®]	Sasobit[®]
Karışımın tonu başına ilave katkı maliyeti (\$)		0.3	4.0	3.5
Karışımın tonu başına enerji maliyeti (\$)	6.5	4.9	4.9	4.9
BSK'ya kıyasla enerji maliyetindeki azalma (\$)		1.6	1.6	1.6
Karışımın tonu başına toplam maliyet (\$)	89	87.7*	91.4	90.9
% Değişim		-%1.5	+%2.7	+%2.1
Ekipman maliyeti ve lisans bedeli (\$)		45,000- 55,000 (+5,000 \$/yıl)		
30,000 ton üretim için toplam maliyet (1.yıl) (\$)	2,670,000	2,677,000	2,742,000	2,727,000
30,000 ton üretim için toplam maliyet (2.yıl) (\$)	2,670,000	2,631,000	2,742,000	2,727,000

*Bu maliyete ekipman maliyeti ve lisans bedeli dahil değildir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez kapsamında, çeşitli plastik atıkların pirolizinden elde edilen ürünlerin IKA katkısı olma potansiyeli araştırılmıştır. Plastik atıklardan polipropilen (PP) ve polistiren (PS) tekli olarak piroliz edilmiştir. Diğer atık plastiklerden yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polietilen tereftalat (PET) ise birlikte piroliz edilmiştir. Piroliz işlemleri sonucu elde edilen katı ve sıvı ürünler, bitümlü bağlayıcının modifiyesi işleminde kullanılmıştır. Modifiye bitümlere yapılan testlerle, katkıların bağlayıcı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bitümlü bağlayıcıda katkı-bitüm etkileşiminin incelenmesi için ise çeşitli karakterizasyon testleri yapılmıştır. Ardından, modifiye bitümlerle hazırlanan IKA'lara ve referans BSK'lara karışım testleri uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerle ilgili açıklamalara *Bölüm 3.1*'de, yapılan deneysel çalışmalar ile ilgili ayrıntılı bilgilere ise *Bölüm 3.2*'de yer verilmiştir.

3.1. Materyal

Çalışmada plastik atık olarak PP, YYPE, PET ve PS kullanılmıştır. Plastik atıklar Konya'da farklı sanayi bölgelerinden temin edilmiştir. Kullanılan agrega kalker olup, Konya Karaömerler taş ocağından temin edilmiştir. Bitümlü bağlayıcı olarak, Kırıkkale rafinerisinden temin edilen 50/70 sınıfında bitüm tercih edilmiştir.

3.1.1 Tez kapsamında kullanılan plastikler

Tez çalışmasında, sert ambalaj grubu plastiklerinden **polipropilen, yüksek yoğunluklu polietilen, polietilen tereftalat ve polistiren** kullanılmıştır (Şekil 3.1). Malzemeler Konya'da bulunan farklı sanayi bölgelerinden temin edilmiştir. Seçilen plastiklerin özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



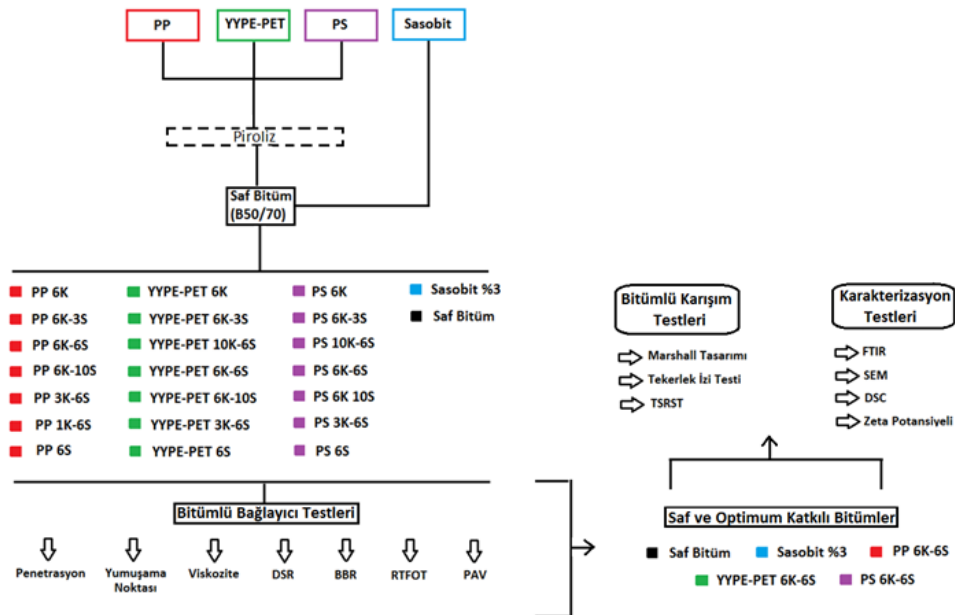
Şekil 3.1. Tez kapsamında kullanılan plastik atıklar (Soldan sağa doğru: PP Siyah kasa, YYPE Siyah bidon, PET şişe, PS elektronik cihaz atığı) (Anonim, 2021)

Çizelge 3.1 Tez kapsamında kullanılan plastiklerin özellikleri (Akmaz, 2020)

Malzeme	Hammadde	Üretim Şekli
Siyah renkli kasalar (PP)	Blok kopolimer polipropilen	Enjeksiyon kalıplama
Siyah renkli bidonlar (YYPE)	Yüksek yoğunluklu polietilen (Tür: Petilen YY S)	Şişirme kalıplama
Berrak renkli PET şişeler	Polietilen tereftalat	Enjeksiyon–streç–şişirme–kalıplama
Elektronik cihaz atıkları (PS)	Darbeye dirençli antişok polistiren	Termoform (ısıl şekillendirme)

3.2 Metot

Çalışmanın bu bölümünde, tez kapsamında izlenen yöntemlere yer verilmiştir. Bu bölüm, *piroliz yöntemi*, *karakterizasyon deneyleri*, *bitümlü bağlayıcı deneyleri* ve *bitümlü karışım deneyleri* olmak üzere 4 ana başlıkta ele alınmıştır. *Piroliz yöntemi* bölümünde, tez kapsamında kullanılan piroliz sistemi hakkında bilgiler yer almaktadır. *Karakterizasyon deneyleri* bölümünde, FTIR, SEM, Zeta Potansiyeli ve DSC deneyleri hakkında teorik bilgilere yer verilmiştir. *Bitümlü bağlayıcı deneyleri* bölümünde ise, geleneksel bitüm deneylerinin (penetrasyon ve yumuşama noktası) yanı sıra RV, DSR, BBR, RTFOT ve PAV gibi superpave deneyleri yer almaktadır. Bu bölümün son ana başlığı olan *bitümlü karışım deneylerini* ise, Marshall tasarım yöntemi, Hamburg tekerlek izi deneyi ve TSRST deneyi oluşturmaktadır. Şekil 3.2’de tez kapsamında takip edilen deney akış şeması gösterilmiştir.

**Şekil 3.2.** Tez kapsamında takip edilen deney akış şeması

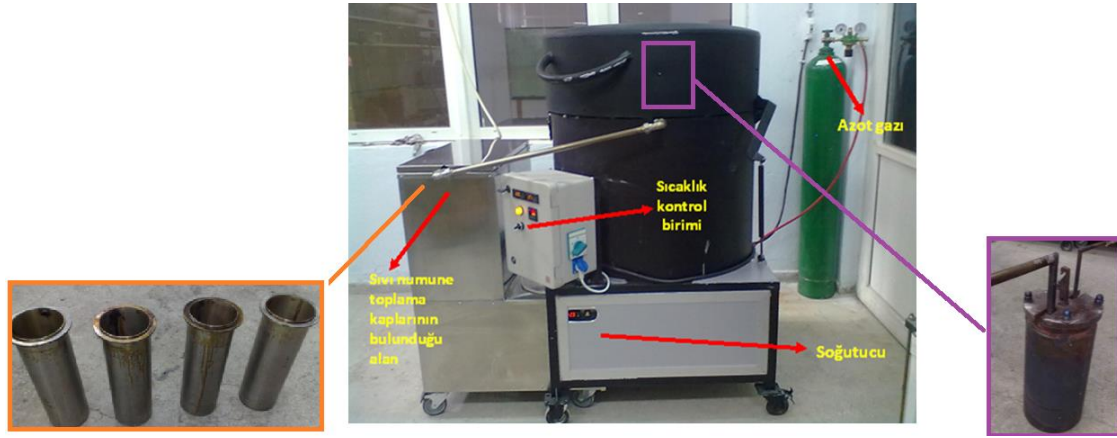
3.2.1 Piroliz yöntemi

Piroliz, oksijensiz ortamda uzun zincirli polimer moleküllerin ısıtılarak daha küçük ve daha az karmaşık moleküllere dönüştürülmesi işlemidir. Termokimyasal bir süreçtir. Bu sebeple sistemin yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması gerekmektedir. Deney sonunda, katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilmektedir. Elde edilen ürünlerin verimleri deneyde ulaşılan son sıcaklık, ısıtma hızı, ürünün alıkonma süresi, sürükleyici gaz türü ve miktarı, katalizör türü, sistemin basınçlı olup olmaması ve reaktör tipi gibi parametrelere bağlıdır (Sharuddin ve ark., 2016).

Piroliz kendi içerisinde ısıtma hızına göre yavaş, hızlı ve flaş piroliz olarak kabaca 3 gruba ayrılabilir. Yavaş piroliz sürecinde ısıtma hızı düşük ($10-30^{\circ}\text{C}/\text{dk}$) ve malzemenin alıkonma süresi yüksek olmaktadır (saatler/günler). Kullanılan malzemeye göre farklılık göstermekle birlikte katı, sıvı ve gaz ürün verimleri sırasıyla %25-35, %20-30 ve %25-35 arasında değişmektedir. Hızlı ve flaş pirolizde ise ısıtma hızları çok yüksek olup ($>100^{\circ}\text{C}/\text{sn}$), malzemenin alıkonma süreleri çok kısadır (saniye/milisaniye). Bu yöntemlerde maksimum sıvı verimi ($>60\%$) hedeflenmektedir (Kambo ve Dutta, 2015). Piroliz sürecinde katalizörler de kullanılabilir. Katalizör kullanımı ile hem reaksiyon için gerekli olan aktivasyon enerjisi düşürülebilmekte (böylece deney daha az enerji ile gerçekleştirilmektedir) hem de geleneksel yakıtlara (benzin, dizel vb.) daha yakın özellikler sergileyen sıvı ürünler elde edilmektedir (Sharuddin ve ark., 2016).

Bu çalışmada, yavaş piroliz yöntemi kullanılarak katkı maddeleri üretilmiştir. Konya Teknik Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı'nda bulunan piroliz deney seti ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te görülen bu piroliz sistemi, ürünün ısıtıldığı fırın, sıcaklık kontrol birimi ve soğutma ünitesinden oluşmaktadır. Deneyde, katkı üretimi yapılacak malzemeler, yüksekliği 30 cm ve iç çapı 10 cm olan silindirik çelik bir reaktöre konmaktadır. Ardından reaktör ısıtılmak üzere fırın bölümüne konulur. Isınan malzemedan çıkan gazlar ilave borular yardımıyla sıcaklığı -15°C olan soğutucu banyoya aktarılır. Burada, gazlar sıvılaşıp sıvı toplama kaplarında birikir. Borularda tıkanma olmaması için deney boyunca sürekli ısıtılır. Ayrıca, sistemi oksijensiz hale getirmek için Şekil 3.3'te görülen yeşil tüpten azot gazı (N_2) sisteme verilir. Bu işlem deney öncesinde yaklaşık 20-25 dk boyunca uygulanır. Sıcaklık kontrol biriminden istenilen sıcaklık ve ısıtma hızı ayarlanarak deney gerçekleştirilir. Sistem yükselbileceği son sıcaklığa ulaşp soğumaya geçtiği anda deney sonlandırılır. Yavaş

piroliz yöntemi tercih edildiğinden ısıtma hızları düşük olup 3-5°C/dk arasında değişmektedir. Ürünün alıkonma süresi ise 12-15 saat arasındadır.



Şekil 3.3. Piroliz sistemi (Sıvı toplama kapları solda, genel görünüm ortada, reaktör sağda)

3.2.2 Karakterizasyon deneyleri

Bu bölümde, piroliz yöntemi ile elde edilen katkıların bitümün yüzeyinde ve yapısında oluşturduğu değişiklikleri incelemek için yapılan karakterizasyon deneyleri (FTIR, SEM, Zeta Potansiyeli ve DSC analizi) hakkında teorik bilgilere yer verilmiştir.

3.2.2.1 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi analizi

FTIR spektroskopisi testi, moleküllerdeki bağların titreşim frekansını ölçerek yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri ve fonksiyonel gruplar hakkında bilgi verir. Deneyde, numunenin üzerine belli bir frekans bandında (15 cm^{-1} ile $28,000 \text{ cm}^{-1}$ arasında) kızıl ötesi ışın gönderilir. Numunenin emdiği ışın miktarına (absorbsiyon pikleri) göre yapıdaki kimyasal bağlar veya fonksiyonel gruplar belirlenmiş olur. Çalışmada, kullanılan FTIR test cihazı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. İlgili deney, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yapılmıştır.



Şekil 3.4. Bruker Vertex 70 FTIR ATR Spektroskopisi test cihazı

3.2.2.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi

SEM analizi ile malzemenin yüzey morfolojisi (biçimi) hakkında bilgi edinilmektedir. Bu analiz yönteminde, numune yüzeyine elektronlar gönderilir. Numunedeki atomlarla etkileşime giren elektronlar, numune yüzeyindeki topografi hakkında sinyaller üretir. Bu sinyaller dedektörler ile alınarak görüntüye dönüştürülür.

Çalışmada, SEM analizi için 1x1x1 cm boyutlarında numuneler hazırlanmış, deney öncesinde liyofilizatör kurutmada (vakum altında) yaklaşık 1 gün bekletilmiştir. Bu sayede, numunelerdeki nem giderilmiştir. Ardından, numunelere altın kaplama işlemi yapılarak deneye hazır hale getirilmiştir. SEM görüntüleme işlemi, 1000-5000 büyütmede ve 15 kV voltajda gerçekleştirilmiştir (Yusoff ve ark., 2014; Vassaux ve ark., 2017). Deney için, Şekil 3.5'te görülen ve Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Zeiss EVO LS 10 marka cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Zeiss EVO LS 10 SEM analiz cihazı

3.2.2.3 Zeta Potansiyel Analizi

Zeta potansiyel analizi ile kolloidal bir sistemin kararlılığı ölçülür. Kolloidal sistemler, taneciklerin çok ince boyutlarda dağıtıcı bir ortam içerisinde asılı kaldığı heterojen karışımlardır. Tanecikleri çevreleyen dağıtıcı ortam iki bölgeden oluşur: İç bölgede, dağıtıcı ortamdaki iyonlar tanecik yüzeyine sıkıca tutunur. Dış bölgede ise iyon ile tanecik arasındaki bağ daha zayıftır. Bu sebeple bu bölgede iyonlar dağılmış haldedir. Bu iki bölge arasında kayma düzlemi adı verilen bir sınır vardır. Sınırdaki

potansiyele zeta potansiyeli adı verilir. Zeta potansiyeli mutlak değerce ne kadar büyük olursa kolloidal sistem o kadar kararlı olur. Kararlı sistemlerde, tanecikler dağıtıcı faz içerisinde çok iyi dağılır, dolayısıyla taneciklerin çökmesi veya topaklanması sorunları görülmez. Zeta potansiyeli, içerisinde iki adet elektrot bulunan bir hücre içerisinde ölçülmektedir. Bu hücreye, ölçümü yapılacak numunenin de içinde bulunduğu çözelti eklenir. Elektrotlara voltaj uygulanarak taneciklerin zıt yüklü elektrota doğru hareket etmesi sağlanır. Doppler adı verilen bir teknik kullanılarak taneciklerin hızı (elektroforetik hareketlilik) ölçülür. Taneciklerin hızı, sıvı viskozitesi, sıvı dielektrik sabiti gibi parametreler kullanılarak zeta potansiyeli belirlenir (Selvamani, 2019).

Tez çalışması kapsamında, Malvern Zeta Sizer test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Saf ve katkılı bitümler, trikloretilen çözücüsünde 200 kat seyreltilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Numune hazırlığı, literatürde daha önce yapılmış çalışmalar örnek alınarak yapılmıştır (Shan ve ark., 2021; Pinto ve Buss, 2020). İlgili deney, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda yapılmıştır.



Şekil 3.6. Malvern Zeta Sizer test cihazı

3.2.2.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre, bir maddenin ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimini inceleyen termal analiz yöntemidir. DSC analizinde, deney numunesi ile referans numune kontrollü bir sıcaklık ortamında ısıtılır. Numuneler arasındaki ısı enerjisi farkı sürekli kaydedilir ve sıcaklığa bağlı bir grafik haline getirilir. Bu grafiğe termogram ismi verilir. Bir termogramda, numunenin erime, kristallenme, oksitlenme gibi fiziksel ve kimyasal değişimlerini gösteren endotermik ve ekzotermik pikler gözlenir. Bazı numunelerde ekzotermik ve endotermik reaksiyonların her ikisi de görülürken, bazı numunelerde sadece biri gözlenir veya hiçbir pik gözlenmez.

Tez çalışması kapsamında, hem piroliz katkı ürünlerine hem de bitümlü bağlayıcılara DSC analizi yapılmıştır. Ölçümler, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan STAR^e System (Mettler Toledo Company) cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.7). Deneilerde ısıtma hızı 10°C/dk, sıcaklık aralığı ise -80 ila 200°C arasında seçilmiştir. Deney, miktarı 5-25 mg arasında değişen numunelere uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Tez kapsamında kullanılan DSC analiz cihazı

3.2.3 Bitümlü bağlayıcı deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde, piroliz deneylerinden elde edilen katkı ürünleri ve Sasobit[®] ile saf bitüm modifiye edilmiştir. Modifiye edilen bitümlü bağlayıcılara ve saf bitüme geleneksel deneylerin (penetrasyon ve yumuşuma noktası deneyi) yanı sıra dönel viskozimetre deneyi, dönen ince film etüvü deneyi, basınçlı yaşlandırma kabı deneyi, dinamik kesme reometresi ve kiriş eğme reometresi deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler ile ilgili detaylı bilgiler bu bölümde ele alınmıştır.

3.2.3.1 Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi

Penetrasyon testi, bitümün kıvamını ölçmek için kullanılan bir testtir. Yüksek penetrasyon değerleri malzemenin yumuşak bir kıvama sahip olduğunu gösterir. Standart bir penetrasyon deneyinde, akışkan hale getirilen bitüm uygun bir kaba dökülerek oda sıcaklığında soğuması sağlanır. Bu süre yaklaşık olarak 1-1.5 saattir. Ardından 25°C sıcaklıktaki su banyosunda dışarıda durduğu süre kadar bekletilir. Deneye bu şekilde hazırlanan bitüme, standart bir penetrasyon iğnesi 5 sn boyunca

batırılır (penetre ettirilir). Numuneye uygulanan yük 100 gr'dır. İğnenin batma derinliği penetrasyon değerini verir. Penetrasyonun birimi milimetrenin onda biridir. Bazı özel durumlarda deney daha soğuk veya daha sıcak koşullarda da yapılabilir. Örneğin, deney 0°C'de yapılacaksa yükleme süresinin 60 s ve uygulanan yükün 200 g olması önerilmektedir. Eğer 45°C'de yapılacaksa yükleme süresi 5 s ve uygulanan yük 50 g olmalıdır (ASTM D5/D5M-13).

Bitüm, erime noktası net bir şekilde belli olmayan viskoelastik bir malzemedir. Sıcaklık arttıkça, malzeme yavaş yavaş yumuşar ve aynı şekilde viskozitesi de azalır. Bu sebeple, malzemenin yaklaşık olarak yumuşadığı sıcaklığın tayin edilmesi için yumuşama noktası testi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, testi yapılacak bitüm akışkan hale gelene kadar ısıtılır ve ardından iç çapı 19 mm ve yüksekliği 6.4 mm olan 2 adet pirinç yüzüğe dökülür. Numune oda sıcaklığında soğutulur. Daha sonra hem numuneler hem de deney esnasında numunelerin üzerinde duracak 3.5g ağırlığındaki bilyeler 5°C su banyosunda 15 dk süre ile bekletilir (Bu koşullar yumuşama noktasının 80°C'yi aşmadığı numuneler için uygulanır. Aksi durumda su yerine gliserin kullanılır ve banyo sıcaklığı da 15°C'de tutulur). Sonrasında, numuneler 5°C/dk artış hızına sahip bir ısıtıcı ile ısıtılır. Numunenin (üzerinde duran bilyelerin de etkisi ile), 25 mm altındaki plakaya temas ettiği sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir (ASTM D36/D36M-14).

İlgili deneyler, Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında bulunan penetrasyon ve yumuşama noktası deney aletleri ile yapılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Penetrasyon (solda) ve yumuşama noktası (sağda) test cihazları

3.2.3.2 Rotasyonel (Dönel) viskozimetre deneyi

Viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Malzeme yumuşadıkça viskozitesi de azalır. Dönel viskozimetre deneyinde, bitümün belirli bir sıcaklıktaki viskozitesi saptanabilir. Bu yöntemde, tabanı konik biçimli bir aparat istenilen sıcaklığa kadar ısıtılan bitüm numunesine daldırılır. Cihaz istenilen bir hızda bu aparatı numune içerisinde döndürür. Numunenin dönmeye karşı gösterdiği bu direnci cihaz tork cinsinden kaydeder. Elde edilen tork, hız ve aparatın geometrik bilgileri kullanılarak malzemenin viskozitesi pascal saniye veya centipoise cinsinden tespit edilir (Eşitlik 3.1, 3.2 ve 3.3). Çalışmada Brookfield viskozimetre cihazı kullanılmış olup Şekil 3.9’da gösterilmiştir (ASTM D4402/D4402M-15).

$$\text{Kayma gerilmesi (dyne/cm}^2\text{)} = \frac{T}{2/3 \pi r^3} \quad (3.1)$$

$$\text{Kayma hızı (s}^{-1}\text{)} = \frac{\omega}{\sin\theta} \quad (3.2)$$

$$\text{Viskozite (centipoise veya mPa.s)} = \frac{\text{Kayma gerilmesi} \times 100}{\text{Kayma hızı}} \quad (3.3)$$

Burada,

T: Uygulanan tork (dyne-cm)

r: Konik tabanın yarıçapı (cm)

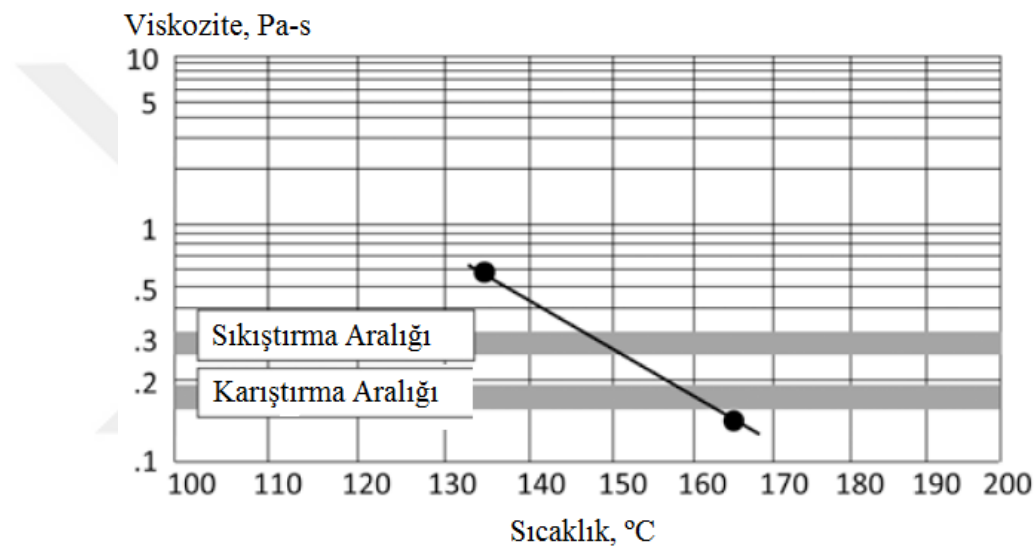
ω : Aparatın hızı (rad/s)

θ : Konik tabanın yatayla yaptığı açı (derece)



Şekil 3.9. Brookfield viskozimetre test cihazı

Bu deney ile belirlenen viskozite değerleri kullanılarak, bitümlü bağlayıcının agrega ile hangi sıcaklıkta karıştırılıp sıkıştırılacağı da tayin edilebilmektedir. Eşdeğer viskoz yöntemi ile sıcaklık-viskozite grafiği çizilerek karışımın, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilmektedir (Şekil 3.10). Bu yöntemde, 0.17 ± 0.02 Pas değerlerine karşılık gelen aralık, karıştırma sıcaklık aralığı olarak kabul edilmektedir. Sıkıştırma sıcaklık aralığı için belirlenen viskozite değer aralığı ise 0.28 ± 0.03 Pas'dir. Tespit edilen bu sıcaklıklar, laboratuvar ölçeğinde üretilen numunelerin hacimsel özelliklerinin tespiti için geçerli olup, saha koşullarındaki karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarını temsil etmemektedir (Anonymous, 2014).



Şekil 3.10. Karıştırma-Sıkıştırma sıcaklık aralığının tayini (Anonymous, 2014)

3.2.3.3 RTFOT (rolling thin film oven test: dönen ince film etüvü testi) ve PAV (pressure aging vessel: basınçlı yaşlandırma kabı) deneyleri

RTFOT testi, ince film kalınlığındaki bitüm üzerinde ısı ve havanın etkisini belirlemek amacıyla yapılır. Bu testte, cam tüplere konulan bitüm numunesi 163°C 'de (BSK için standart sıcaklık) 85 dk boyunca döndürülür. Döndürülen tüplerdeki bitüm numunesi hem kap kenarında ince film tabakası oluşturur hem de hava üfleyen vananın önünden eşit süre ile geçmiş olur. Böylece sağlıklı bir şekilde numunelere yaşlandırma işlemi uygulanır (Şekil 3.11). Deney sonunda numunenin kütle kaybı belirlenerek malzemenin uçuculuğu kontrol edilebilir. Ayrıca, viskozite, penetrasyon ve yumuşama noktası gibi testler de yapılarak malzemede oluşan yaşlanmanın etkisi incelenebilir (ASTM D2872_12^{E1}). Bu deney, bitümlü karışımın hazırlanması, depolanması,

taşınması ve serilip sıkıştırılması sürecini temsil ettiğinden kısa dönem yaşlandırma testi olarak da anılır (Bell, 1989).

PAV testi, karışımın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı oksidatif yaşlanmayı temsil etmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu nedenle bu test, uzun dönem yaşlandırma test metotlarından biridir. Bu test sonrasında elde edilen numune üzerinde çeşitli kimyasal ve fiziksel testler yapılarak, asfaltın yola serildikten birkaç yıl sonraki durumu hakkında fikir edinilebilir. Bu yöntemde, plentteki yaşlanma durumunu da dikkate almak için RTFOT testinden çıkan numuneler deneye tabi tutulur. Deney esnasında, karışımın hizmet ömrü boyunca maruz kalacağı yaşlanmayı temsil etmek için, 2.1 MPa basınca sahip hava, numuneye uygulanır. Deney süresi 20 saat olup, sıcaklık 90-110°C aralığında bitümlü bağlayıcı sınıfına göre seçilir (ASTM D6521-18). Şekil 3.12’de bu çalışma için kullanılan PAV deney cihazı ve numunelerin konulduğu kaplar görülmektedir. İlgili deneyler, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü’nde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. RTFOT cihazı dış (solda) ve iç görünümü (sağda)



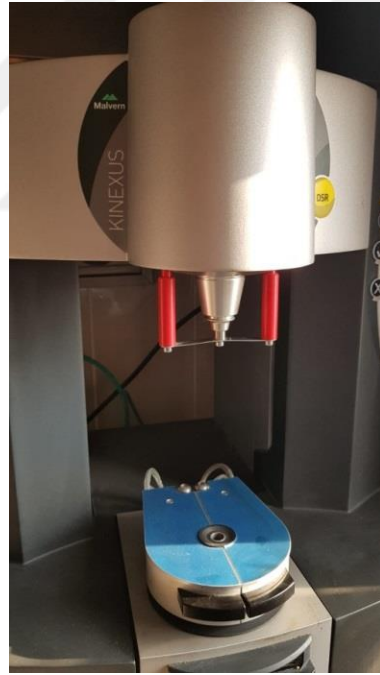
Şekil 3.12. PAV deney cihazı (solda) ve konulan numuneler (sağda)

3.2.3.4 DSR (Dynamic shear rheometer: Dinamik kayma reometresi) deneyi

DSR, bitümün kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirlemek için yapılan salınımlı bir testtir. Deneyde, iki paralel plaka arasına yerleştirilen bitümün, belirli bir açısal hızda (10 rad/s) ve sabit bir burulma kuvveti (gerilme kontrollü) altında döndürülmesi ile ilgili parametreler elde edilir (Deplasman kontrollü cihazlarda burulma

kuvveti yerine oluşacak deplasman sabit tutulur). Bu deney ile bitümün hem viskoz hem de elastik davranışı hakkında bilgi edinilir. Faz açısı arttıkça, malzemenin viskoz davranışının arttığı anlaşılır (ASTM D7175-15; Arslan, 2010).

DSR, bitümün orta ve yüksek sıcaklık performansını belirlemede kullanılan bir deneştir. Yüksek sıcaklıkta yapılan deney ile asfalt karışımın tekerlek izine karşı oluşturacağı direnç tahmin edilmektedir. Deney ölçümlerinden elde edilen parametrelerle hesaplanan $G^*/\sin\delta$ değerinin tekerlek izi direnci için bir faktör olduğu belirtilmektedir. Bu değer ne kadar büyükse bitümün tekerlek izine karşı direnci de o kadar fazladır. Orta sıcaklıkta yapılan deneyde ise, malzemenin yorulma çatlaklarına karşı direnci belirlenebilmektedir. Testin bu versiyonunda, $G^*\sin\delta$ değeri hesaplanır. Bu değer ne kadar küçükse bitümün yorulmaya karşı direnci de o kadar fazladır. DSR testi, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü'nde bulunan ve Şekil 3.13'te görülen cihaz kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.13. Malvern Knexus DSR cihazı

3.2.3.5 BBR (Bending beam rheometer: Kiriş eğme reometresi) deneyi

Bu test, bitümün eğilme sünme rijitliğini (S) ve m değerini (yük-deformasyon grafiğindeki eğriden elde edilen eğim) belirlemek amacıyla yapılır. BBR testi, bitümün soğuk havadaki davranışını belirlemeye yönelik bir test olduğundan deney sıcaklıkları

genellikle -6°C 'den başlayarak daha düşük sıcaklıklara doğru devam eder. Sıcaklık azaldıkça bitümde termal çatlak oluşma riski de artar. Bu testte, bitümde ölçülen S ve m değerleri ile malzemenin hangi sıcaklıklara kadar termal çatlaklara dayanıklı olduğu hakkında bilgi edinilir. Deneyde, kırıç formunda dökülen bitüm, istenilen sıcaklığa kadar soğutulduktan sonra, 3 nokta eğilme testi yapılarak ilgili parametreler hesaplanır. Deney süresi 240 s'dir. Deney, S değerinin 300 MPa değerini aştığı ve m değerinin 0.3'ün altında kaldığı sıcaklığa kadar devam eder (ASTM D6648-08). Şekil 3.14'te tez kapsamında kullanılan BBR test cihazı görülmektedir. İlgili deney, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü'nde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. ATS BBR 2S test cihazı (solda) ve numunenin test edilişi (sağda)

3.2.4 Bitümlü karışım deneyleri

Tez kapsamında, üretilen bitümlü karışımların hacimsel özelliklerinin belirlenmesinde ve optimum bitüm içeriği tayininde Marshall tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem hem referans BSK numunelerine hem de IKA numunelerine ayrı ayrı uygulanmıştır. Ardından, her bir karışım grubu için elde edilen optimum bitüm içeriği kullanılarak gyratory yoğurmalı sıkıştırma cihazında numuneler hazırlanmış ve bunlar Hamburg tekerlek izi cihazında test edilmiştir. Son olarak, üretilen asfalt numunelerin düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncini belirlemek amacıyla TSRST (termal gerilme kısıtlı numune testi) yapılmıştır. Bu bölümde, bahsi geçen deneylerle ilgili detaylı bilgilere yer verilmiştir.

3.2.4.1 Marshall tasarım yöntemi

Marshall tasarım yöntemi, belirli bir gradasyona sahip asfalt karışımının optimum bitüm içeriğini tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu yöntemde aynı gradasyonda 5 farklı bitüm içeriğinde, her bir oran için en az 3 numune üretilir. Sonuçlar, şartlara uygun hazırlanan her 3 numunenin ortalaması alınarak belirlenir. Optimum bitüm oranının belirlenmesinde, trafiğin durumu, iklim ve kullanılan malzemeler ile ilgili tecrübeler etkili rol oynamaktadır. Çoğu durumda, optimum bitüm içeriği %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı olarak kabul edilir. Bu yöntemde, standart boyutlarda (çap: 101.6 mm ve yükseklik: 63.5 mm) silindirik asfalt numuneler (briket) kullanılır. Dolayısıyla briket hazırlanmasında malzemelerin ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması prosedürlerinin bilinmesi gereklidir. Briket üretiminde kullanılacak bitümlerin özelliği değiştikçe bu prosedürlerde kullanılacak sıcaklıklar da değişmektedir. Marshall metodunun *yoğunluk-boşluk* ve *stabilite-akma* olmak üzere iki temel analizi mevcuttur. Yoğunluk-boşluk analizinde; karışıma ait zahiri ve hacim özgül ağırlıklar, karışımın boşluğu, mineral agregalar arası boşluk ve asfaltla dolu boşluk gibi parametreler hesaplanır. Stabilite-akma analizinde ise, briketlerin maksimum yük direnci ve bu yük karşısında oluşan deformasyon değeri tespit edilir.

Marshall tasarımı aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılabilir:

- i) Agregası ve bitüm özgül ağırlıklarının tayini
- ii) Agregası ve bitümün ısıtılması, karıştırılması ve sıkıştırılması
- iii) Yoğunluk-boşluk ve stabilite-akma analizlerinin yapılması

3.2.4.1.1 Agregası ve bitüm özgül ağırlıklarının belirlenmesi

Marshall briketi üretiminde kullanılan agregası karışımı iri agregası, ince agregası ve fillerden oluşmaktadır. Dolayısıyla her bir agregası grubunun özgül ağırlıklarının ayrı ayrı belirlenmesi gerekir. Bu kısımda, zahiri ve hacim olmak üzere iki farklı özgül ağırlık hesabı yapılmaktadır. Agregalar mineral yapısı gereği boşluklu malzemeler olduğundan iki farklı özgül ağırlık hesabı ortaya çıkmaktadır. *Zahiri özgül ağırlık*, belirli bir süre su içinde tutulan agregadaki boşlukların dikkate alınmadan hesap yapıldığı özgül ağırlık iken, *hacim özgül ağırlık* bu boşlukların dikkate alınarak hesaplamasının yapıldığı özgül ağırlıktır. Dolayısıyla agreganın zahiri özgül ağırlık değerinin, hacim özgül ağırlık değerinden fazla çıkması beklenir. Ancak agregası-bitüm karışımında, agregalar su yerine

bitümlü beraber olacağından agreganın bitümü emmesi, su emmesi kadar yüksek değildir (su emiliminin %40-80'i arasında değiştiği tahmin edilmektedir). Dolayısıyla, karışım hesabında zahiri veya hacim özgül ağırlığı almak uygun olmayacaktır. Bu sebeple, agreganın bitümlü bağlayıcı nüfuz ettirildikten sonra ortaya çıkan boşlukları dikkate alan bir başka özgül ağırlık değeri olan *efektif özgül ağırlığın* da bilinmesi gerekmektedir. Bu değer, hacim ve zahiri özgül ağırlık arasında bir değer olup, gevşek karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının belirlenmesi (ASTM D2041-03a) ile elde edilir. Bu deney yapılmadığında, efektif özgül ağırlık, hacim ve zahiri özgül ağırlığın ortalaması alınarak hesaplanabilir. Aşağıda verilen Eşitlik 3.4-7 ile kaba agrega, ince agrega ve fillerin hacim-zahiri özgül ağırlıkları belirlenebilmektedir (ASTM C127, ASTM C128).

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

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

G_{ka} =Kaba agreganın zahiri özgül ağırlığı

G_{kb} =Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı

A= Kaba agreganın kuru ağırlığı, gr

B= Kaba agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığı, gr

C= Kaba agreganın sudaki ağırlığı, gr

$$G_{ia} = \frac{A}{P+A-(P')} \quad (3.6)$$

$$G_{ib} = \frac{A}{P+B-(P')} \quad (3.7)$$

G_{ia} =İnce agreganın zahiri özgül ağırlığı

G_{ib} =İnce agreganın hacim özgül ağırlığı

A= İnce agreganın kuru ağırlığı, gr

B= İnce agreganın suya doymuş yüzey kuru ağırlığı, gr

P= İçi su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

P'= İçi su ve numune ile dolu piknometre ağırlığı, gr

Agrega karışımının son bileşeni olan filler malzemesinde hacim özgül ağırlığını belirlemek kolay olmadığından sadece zahiri özgül ağırlık (Eşitlik 3.6) belirlenir. Karışım hesaplarının bu şekilde yapılması büyük bir hata oluşturmaz. Bu bilgiler ışığında agrega karışımının hacim ve zahiri özgül ağırlıkları Eşitlik 3.8 ve 3.9 yardımıyla şu şekilde belirlenir.

$$G_{sa} = \frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%I}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (3.8)$$

$$G_{sb} = \frac{\%K + \%I + \%F}{\frac{\%K}{G_{kb}} + \frac{\%I}{G_{ib}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad (3.9)$$

G_{sa} = Agregaların zahiri özgül ağırlığı

G_{sb} = Agregaların hacim özgül ağırlığı

$\%K, \%I, \%F$ = Karışımdaki agregaların ağırlıkça yüzdeleri

G_{ka}, G_{ia}, G_{fa} = Agregaların zahiri özgül ağırlıkları

G_{kb}, G_{ib} = Agregaların hacim özgül ağırlıkları

Asfalt karışımının son bileşeni olan bitümün özgül ağırlığı ise Eşitlik 3.10 ile şöyle belirlenir (ASTM D70-18).

$$G_b = \frac{E}{(P - P'') - (P' - P''')} \quad (3.10)$$

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

E = Bitüm ağırlığı, gr

P = İçi su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

P' = İçi su ve numune ile dolu piknometre ağırlığı, gr

P'' = Piknometrenin boş ağırlığı, gr

P''' = İçi numune ile dolu piknometre ağırlığı, gr

3.2.4.1.2 Asfalt briketlerin hazırlanması

Asfalt briketleri, 5 farklı bitüm içeriğinde hazırlanmaktadır. Deney öncesinde tecrübeler veya çeşitli ampirik formüller kullanılarak optimum bağlayıcı oranı tahmin edilir. Bu oranın %0.5 ve %1 altında ve üstünde bağlayıcı oranına sahip numuneler hazırlanır. Örneğin, optimum bitüm oranı %4.5 (agrega ağırlığınca) olarak tahmin edilen bir seride kullanılacak bitüm oranları %3.5-%4-%4.5-%5-%5.5 şeklinde belirlenir. Her oran için en az 3 briket üretilir. Üretim sürecinde, öncelikle agrega ve bitüm uygun karıştırma sıcaklığına kadar ısıtılır. Ardından, elle veya uygun bir mikser yardımıyla hızlı bir şekilde agregaların tamamı bitümle kaplanacak şekilde karıştırılır. Hazırlanan karışım, yine daha önce ısıtılmış olan kalıplara dökülür ve Marshall tokmağında sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi 4536 gr ağırlığındaki tokmağın, 45.7 cm

yükseklikten serbest düşüş yapması ile sağlanır. Sıkıştırma sayısı asfalt kaplamanın maruz kalacağı trafik yüküne göre 35, 50 veya 75 vuruş olabilmektedir. Bu vuruş sayısı, briketin her iki yüzüne de uygulanır. Oda sıcaklığında soğutulan briketler, bir kriko yardımıyla kalıplarından çıkarılır (ASTM D6926-16). Deneyde kullanılan tokmak ve asfalt mikseri Şekil 3.15’te görülmektedir.



Şekil 3.15. Marshall tokmağı (solda) ve asfalt mikseri (sağda)

3.2.4.1.3 Yoğunluk-boşluk ve stabilite-akma analizlerinin yapılması

Numune hazırlanması aşamasının ardından, her briketin yükseklik ölçümleri yapılır. Havada, suda ve suya doygun halde ağırlıkları ölçülür. Bu sayede, her bir briketin hacim özgül ağırlıkları (G_{mb}) belirlenir (Eşitlik 3.5). Teorik maksimum özgül ağırlık (G_{mm}) ise daha önce de belirtildiği gibi ilgili deney (ASTM D2041-03a) ile belirlenebilir veya kullanılacak efektif özgül ağırlık, hacim ve zahiri özgül ağırlığın ortalaması alınarak Eşitlik 3.11’de görüldüğü şekilde hesaplanır.

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\%S}{G_{se}} + \frac{\%B}{G_b}} \quad (3.11)$$

G_{mm} = Teorik maksimum özgül ağırlık

$\%S, \%B$ = Karışımdaki agrega ve bitümün yüzdesi (ağırlıkça)

G_{se} = Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b =Bitümün özgül ağırlığı

Bu bilgiler ışığında, briketlerin boşluk yüzdesi, mineral agregalar arası boşluk yüzdesi ve asfaltla dolu boşluk yüzdesi aşağıdaki Eşitlik 3.12-14 yardımıyla şöyle hesaplanır.

$$V=100-\frac{G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \quad (3.12)$$

$$VMA=100-\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \%S \quad (3.13)$$

$$VFA=100 \times \frac{VMA-V}{VMA} \quad (3.14)$$

G_{mm} = Teorik maksimum özgül ağırlık

G_{mb} = Hacim özgül ağırlık

V= Boşluk yüzdesi

%S=Karışımdaki agrega yüzdesi (ağırlıkça)

VMA=Mineral agregalar arası boşluk yüzdesi

VFA=Asfaltla dolu boşluk yüzdesi

Stabilite-akma analizinde, Şekil 3.16'da görülen cihazda, 60°C su banyosunda 30-40 dk bekletilen briketler stabilite testine tabi tutulur. Bu testte, cihazın alt plakası 50±0.05 mm/dk hızla yukarı yönde hareket ederek numuneyi sıkıştırır. Bu esnada, briketin taşıdığı yük ve oluşan deformasyon göstergede takip edilir. Briketin taşıyabildiği maksimum yük, *Marshall stabilitesi* ve bu esnada oluşan deformasyon *akma* değeri olarak kaydedilir. Briket yüksekliği standart değer olan 63.5 mm'den farklı çıktığında stabilite değeri uygun bir düzeltme faktörü ile düzeltilir. Böylece stabilite-akma analizi de tamamlanmış olur (ASTM D6927-15). *Optimum bitüm oranı* konunun başında da belirtildiği üzere çoğu durumda %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı olarak tayin edilir. Ancak, bu değer VMA, VFA, stabilite ve akma kriterlerini de ilgili şartname limitleri açısından sağlaması beklenir.



Şekil 3.16. Marshall stabilite cihazı

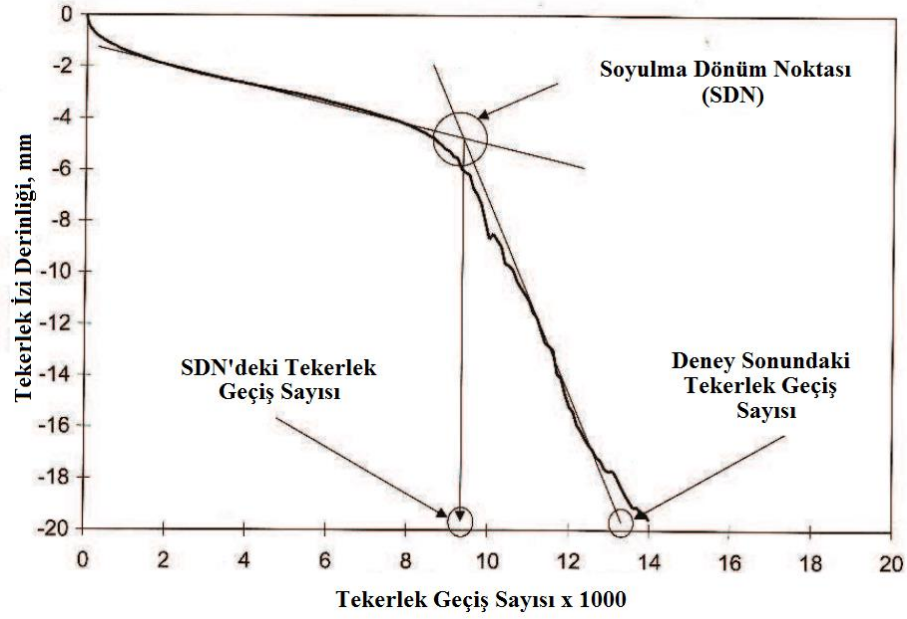
3.2.4.2 Hamburg tekerlek izi deneyi

Bu deney, karışımın tekerlek izi direncinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Deneyde, sabit bir sıcaklıkta tekerleğin belirli bir sayıda geçişi sonucu yük altında numune üzerinde oluşan tekerlek izi derinliği ölçülür. Deney kuru veya sulu ortamda gerçekleştirilebilir. Sulu ortamda yapılan deney ile karışımın tekerlek izi direnci ile birlikte nem hassasiyeti de değerlendirilir. (Tez kapsamında da deney sulu ortamda yapılmıştır).

Şekil 3.17’de görülen tekerlek izi cihazında, deneyin yapılacağı kabinin içerisinde paslanmaz çelikten yapılmış 203 mm çapında ve 47 mm genişliğinde çift tekerlek bulunur. Tekerlek yükü 705 N’dur. AASHTO T324-04, sulu ortamda yapılacak deneyde, suyun sıcaklığının 25–70 (± 1) °C aralığında olmasını önermektedir. Deney numuneleri üzerinde hareket eden tekerlekler, sabit bir yatay düzlemde geriye ve ileriye doğru 230 mm hareket eder. Dakikada 20–30 döngü (40–60 geçiş) arasında değişebilen değerlere göre tekerlek geçiş hızı ayarlanabilir. Deneyde iki numuneye aynı anda test uygulanabilmektedir. 20,000 geçiş (10,000 devir) veya numunede 20 mm deformasyon meydana gelene kadar deney devam eder. Bunların hangisi önce gerçekleşirse deney ona göre sonlanır (Anonymous, 2014). Deney sonunda tekerlek izi geçişine göre deformasyon eğrisi elde edilir. Şekil 3.18’de görülen bu eğride, tekerlek izi derinliğinin ani artış göstermeye başladığı nokta *soyulma dönüm noktası* olarak isimlendirilir. Bu noktaya karşılık gelen tekerlek geçiş sayısı ne kadar yüksek ise karışımın nem hassasiyetinin o kadar düşük olduğu yorumu yapılır.



Şekil 3.17. Hamburg tekerlek izi cihazı



Şekil 3.18. Tekerlek izi derinliğine göre deformasyon eğrisi (AASHTO T324-04)

Tekerlek izi deneyi numuneleri, Şekil 3.19'da görülen yağürmalı sıkıştırma cihazında hazırlanmıştır. Bu cihaz, silindirik numuneyi 1.16° açıyla, 30 devir/dk hızda döndürerek sıkıştırır. Sıkıştırma esnasında uygulanan basınç 600 kPa'dır (ASTM D6925-15). Bu yöntemin, arazide silindir ile sıkıştırma işlemini en iyi temsil eden yöntemlerden biri olduğu düşünülmektedir (Dessouky ve ark., 2004; Fattah ve ark., 2019). Bu yöntemin diğeri bir önemli özelliği de, sıkıştırma işlemi boyunca, numunenin yoğunluk ve boşluk bilgilerinin anlık olarak takip edilebiliyor olmasıdır.



Şekil 3.19. Controls marka yağürmalı sıkıştırma cihazı ve üretilen bir numune

Bu çalışmada, tekerlek izi deneyi için 150 mm çapında 115-120 mm yüksekliklerinde numuneler hazırlanmıştır. Numunelerdeki sıkıştırma dönüş sayıları, boşluk oranı %7±2 olacak şekilde ayarlanmıştır.

Hem yoğurmalı sıkıştırma cihazında numune hazırlanması işlemi hem de tekerlek izi deneyi Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3.2.4.3 TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test-Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi)

TSRST, bitümlü karışımların düşük sıcaklıklardaki gerilme davranışını belirlemek amacıyla yapılır. Bu deneyde, numuneler Şekil 3.20'de görülen bir hazne içerisinde alttan ve üstten tutulu halde bulunur. Deney öncesi, numuneler 4°C'de 3 saat boyunca koşullandırma işlemine tabi tutulur. Ardından, sıcaklık sabit bir hızda (10°C/sa) düşürülerek numunelerin gerilme-sıcaklık davranışı incelenir. Haznedeki hava soğudukça, numune büzölmeye zorlanır ancak tutulu olması sebebiyle zamanla numunede termal gerilmeler artar. Termal gerilmelerin numune çekme dayanımını aşması ile numune kırılır ve deney sonlanır.

Deney sonunda numuneye ait kırılma sıcaklığı ve kırılma sıcaklığında meydana gelen gerilme değeri tespit edilir (Şekil 3.21). Numunenin kırıldığı sıcaklık düştükçe, soğuk hava koşullarına karşı dayanıklılığının arttığı kabul edilir. Ayrıca, numunenin koşullandırılması süreci sonunda termal katsayı değeri Eşitlik 3.15 yardımıyla belirlenir. Bu katsayı ile numunenin hacimsel genleşme/büzölme davranışı hakkında bilgi sahibi olunur. İlgili deney, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T} = \frac{\Delta L/L_{ilk}}{T_{son} - T_{ilk}} \quad (3.15)$$

Burada,

α : Termal katsayı (1/°C)

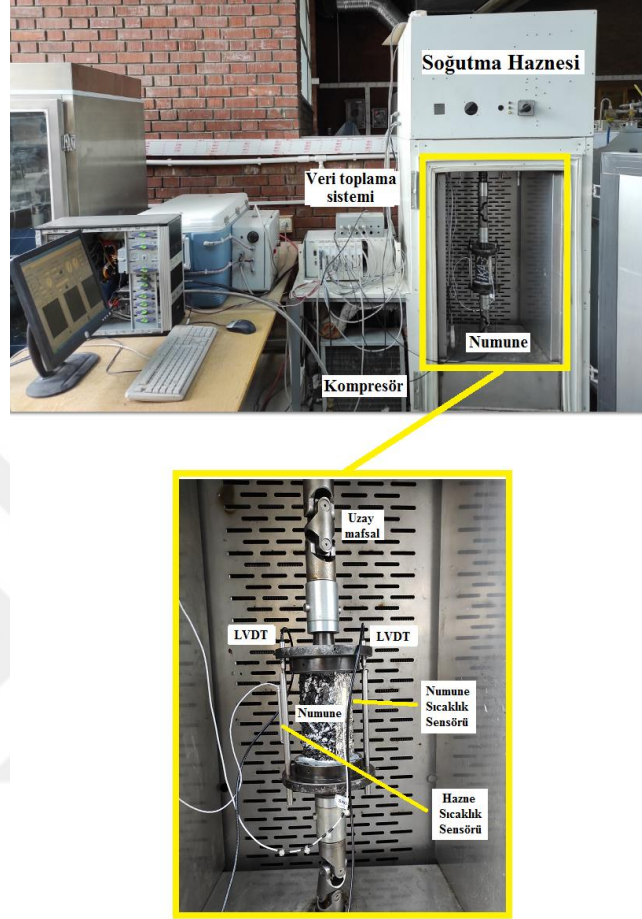
ε : Şekil değıştirme oranı

ΔL : Numunedeki boy değışimi (mm)

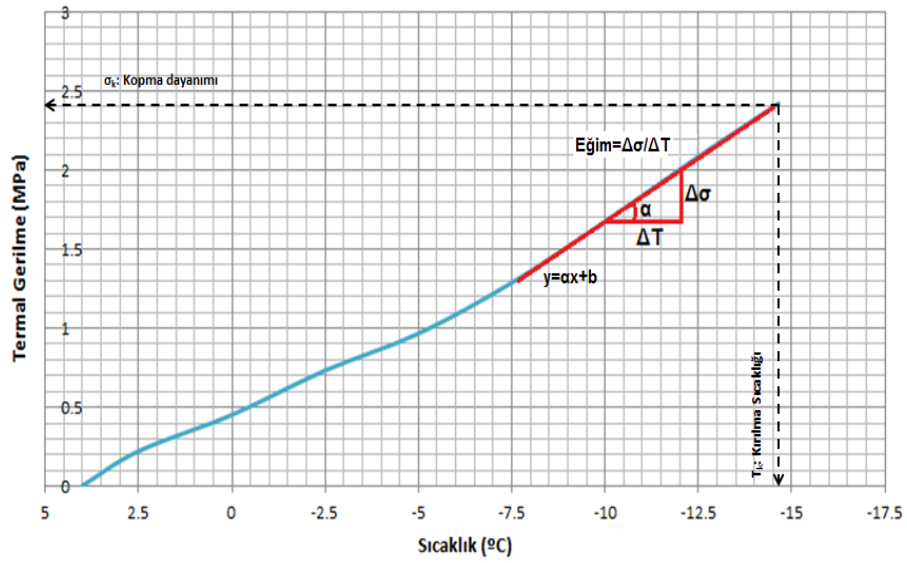
L_{ilk} : Numunenin ilk boyu (mm)

ΔT : Numunedeki sıcaklık değişimi ($^{\circ}C$)

T_{ilk} , T_{son} : Numunenin ilk ve son sıcaklığı ($^{\circ}C$)



Şekil 3.20. TSRST deney sistemi (üstte), soğutma haznesinin içi (altta)



Şekil 3.21. TSRST sonucu elde edilen termal gerilme-sıcaklık grafiği

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Tez çalışmasında, plastik atıkların pirolizinden elde edilen ürünler IKA katkı maddesi olarak değerlendirilmiştir. Pirolizden elde edilen ürünlerin IKA katkı maddesi olarak seçilmesinde şu iki kriter dikkate alınmıştır:

- Piroliz ürünleri ile bitüm modifiye edildiğinde, bitümün viskozitesi ve karışımın plent sıcaklığı önemli ölçüde azalmalıdır.
- Piroliz modifiyeli ılık karışım asfaltların karışım performansı (stabilite, tekerlek izi direnci vb.) en az BSK kadar iyi olmalıdır.

Tezin amacına uygun nihai piroliz ürünleri, belirli aşamalardan sonra tespit edilebilmiştir. Bu bağlamda, kullanılacak katkı maddelerinin piroliz veya kopiroliz (birlikte piroliz) yolu ile mi elde edileceği, pirolitik ürünlerin hangi fazlarının (sadece sıvı veya katı+sıvı vb.) kullanılacağı ve bitümle hangi koşullarda modifiye edileceği tez döneminin ilk 1-1.5 yıllık sürecinde belirlenmiştir. Bu süreç, hem yukarıdaki soruları cevapladığından hem de katkı ürünlerinde ortaya çıkan eksikliklere nasıl çözüm bulunduğunu ele aldığından bu bölümün ilk aşamasında *4.1 Nihai Piroliz Ürünlerinin Belirlenmesi* başlığı altında, detaylı olarak ele alınmıştır.

4.1 Nihai Piroliz Ürünlerinin Belirlenmesi

Çalışmanın ilk aşamasında, farklı türden plastik atıkların (PP–YYPE, PP–PET, YYPE–PET ve PP–YYPE–PET) kopirolizi sonucu elde edilen **sıvı ürünler** incelenmiştir. Bahsi geçen kopiroliz ürünleri Akmaz (2020) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında üretilmiş olup, ilgili çalışmada sadece katı ürünler kullanılmıştır. Sıvı ürünler ise bu tez çalışmasının ilk aşamasında, IKA katkısı olma potansiyelini değerlendirmek üzere ele alınmıştır.

4.1.1 Farklı türden plastik atıkların kopirolizinden elde edilen sıvı ürünlerin bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Birlikte piroliz edilen plastik türlerinin oransal olarak kullanımı parantez içinde şu şekilde gösterilmiştir: PP (%60)-YYPE (%40), PP (%75)-PET (%25), YYPE (%67)-PET (%33) ve PP (%50)-YYPE (%33)-PET (%17). Bu oranlar, ilgili plastiklerin sektördeki kullanım oranları dikkate alınarak oluşturulmuştur (Çizelge 4.1). İlgili plastik

gruplarının pirolizi sonucu elde edilen sıvı ürünler ile bitüm modifiye edilmiştir. Bu süreçte, hem plastik atıkların (PP, YYPE ve PET) bitümle karıştırılması üzerine yapılan araştırmalar (genellikle katkı oranları %4-8 arasında değişmektedir) hem de “Piroliz yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış atıklarla modifiye edilen bitümlü karışımların mühendislik özellikleri” isimli 112M116 No’lu TÜBİTAK 1001 projesi baz alınarak ilk aşamada katkı oranları, katkı maddelerinin genel davranışını tespit etmek amacıyla bitüm ağırlığınca %6 olarak seçilmiştir (Mashaan ve ark., 2021; Ebrahim ve Kerim, 2019; Maharaj ve ark., 2018; Moubark ve ark., 2017; Çelik ve ark., 2016; Hasan ve ark., 2016; Abtahi ve ark., 2013; Sk ve Prasad, 2012).

Çizelge 4.1. Plastiklerin sektör içindeki kullanım oranları (Akmaz, 2020)

Plastik Türü	Plastik Türü Kullanım Oranı (%)
PP (Polipropilen)	19.3
YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen)	12.2
PET (Polietilen tereftalat)	7.7

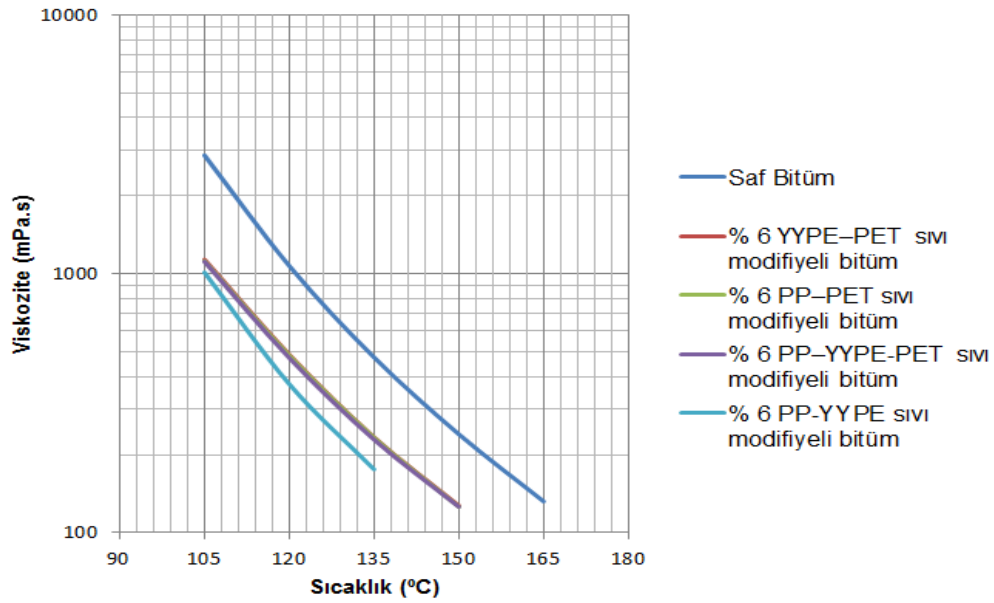
Saf bitüme (B50/70) ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası ve rotasyonel viskozimetre testleri yapılmıştır. Penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları Çizelge 4.2’de, viskozite sonuçları ise Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi sonuçları

Bitümlü Bağlayıcı	Penetrasyon Değeri (0.1 mm)	Yumuşama Noktası (°C)
50/70 Saf Bitüm	58	52
% 6 YYPE–PET Sıvı Katkılı Bitüm	128	45
% 6 PP–PET Sıvı Katkılı Bitüm	198	42
% 6 PP–YYPE–PET Sıvı Katkılı Bitüm	212	41
% 6 PP–YYPE Sıvı katkı Bitüm	244	38

Çizelge 4.2 incelendiğinde görülüyor ki, sıvı katkıların ilavesi ile bitümün penetrasyon değerleri yükselirken, yumuşama noktası değerleri düşmüştür. Bu sonuçlardan, sıvı katkıların bitümü önemli ölçüde yumuşattığı anlaşılmaktadır.

Şekil 4.1’e bakıldığında ise, katkıli bitümlerin tamamının saf bitüme (koyu mavi eğri) göre daha düşük viskozite değerlerine sahip olduğu görülmektedir. YYPE-PET, PP-PET ve PP-YYPE-PET karışımlarının birbirine çok yakın viskozite davranışına sahip olduğu yine ilgili grafikten anlaşılmaktadır. PP-YYPE karışımı (açık mavi eğri) ise biraz daha düşük viskozite değeri ile bu 3 karışım grubundan ayrılmaktadır.



Şekil 4.1. Saf ve katkıli bitümlere ait viskozite-sıcaklık grafiği

Bunun yanı sıra viskozite-sıcaklık grafiğinden faydalanılarak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları da tespit edilmiştir. Karıştırma sıcaklığı için 170 ± 20 mPa.s değerine karşılık gelen sıcaklık aralığı, sıkıştırma sıcaklık aralığı için ise 280 ± 30 mPa.s değerine karşılık gelen sıcaklık aralığı belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Saf bitüm ve katkıli bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Bitümlü bağlayıcı	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
B50/70 (Saf bitüm)	156-161	147-151
% 6 YYPE-PET	139.5-144.4	129.6-134
% 6 PP-PET	139-144	129.2-133.5
% 6 PP-YYPE-PET	138.8-142.8	128.9-133
% 6 PP-YYPE	134-138	125-129

Çizelge 4.3 incelendiğinde görülüyor ki, YYPE-PET, PP-PET ve PP-YYPE-PET katkı grupları saf bitüme katıldığında karışımın hem karıştırma hem de sıkıştırma sıcaklığını 17°C azaltmıştır. Bu değer PP-YYPE katkı grubu için ise 22°C 'dir.

Çalışmada ayrıca en düşük viskozite değerini veren PP-YYPE karışımının farklı oranlardaki davranışı da incelenmiştir. Bitüm ağırlığınca %4-6-8-10 oranlarında PP-YYPE katkısı ile bitüm modifiye edilmiş ve katkıli bitümlere, penetrasyon, yumuşama noktası (Çizelge 4.4) ve RV (Çizelge 4.5) testleri yapılmıştır.

Çizelge 4.4. PP-YYPE modifiyeli bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi sonuçları

Bitümlü bağlayıcı	Penetrasyon (0.1 mm)	Yumuşama noktası (°C)
B50/70 (Saf bitüm)	56 (25°C)	51.5
4% YYPE-PP	172 (25°C)	42
6% YYPE-PP	244 (25°C)	37.5
8% YYPE-PP	370 (25°)	35.5
10% YYPE-PP	>500 (25°C)	33.5

Çizelge 4.5. PP-YYPE modifiyeli bitümlerin RV deneyi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Viskozite sonuçları (cp = mPa.s)				
	Saf bitüm	4% YYPE-PP	6% YYPE-PP	8% YYPE-PP	10% YYPE-PP
105	2897	1134.7	1012	743.6	582.4
120	1084	434.2	374.3	337.2	272.1
135	474.2	211.8	175.5	147	142.5
150	241.2	127.1	-	-	-

Çizelge 4.6. Saf bitüm ve YYPE-PP katkılı bitümlerin karıştırma-sıkıştırma sıcaklık aralıkları

Bitümlü bağlayıcı	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
B50/70 (Saf bitüm)	156-161	147-151
% 4 PP-YYPE	136-140	127-131
% 6 PP-YYPE	134-138	125-129
% 8 PP-YYPE	130-135	121-125
% 10 PP-YYPE	128-133	118-122

Çizelge 4.4'ten görüleceği üzere katkı miktarındaki artış, bitümün penetrasyon değerini arttırırken, viskozite ve yumuşama noktası değerini ise azaltmıştır. Çizelge 4.5, 105-150°C aralığındaki viskozite sonuçlarını göstermektedir. Katkı oranının artması ile her sıcaklıkta viskozitede önemli azalmalar görülmüştür. Bu viskozite verileri kullanılarak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları tespit edilmiş olup Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Sonuçlara göre, saf bitüme %4-6-8-10 oranlarında YYPE-PP katıldığında karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri saf bitüme kıyasla sırasıyla 20, 22, 26 ve 28°C düşmüştür.

Bu noktaya kadar elde edilen bulgular değerlendirildiğinde görülmüştür ki, incelenen 4 farklı piroliz sıvı ürünü de, bitümün viskozitesini ve karışımın plant sıcaklığını önemli ölçüde azaltmayı başarmıştır. Başka bir deyişle, bu bölümün başında ifade edilen IKA katkısı olma kriterlerinden ilkinin bütün ürünler sağlamıştır.

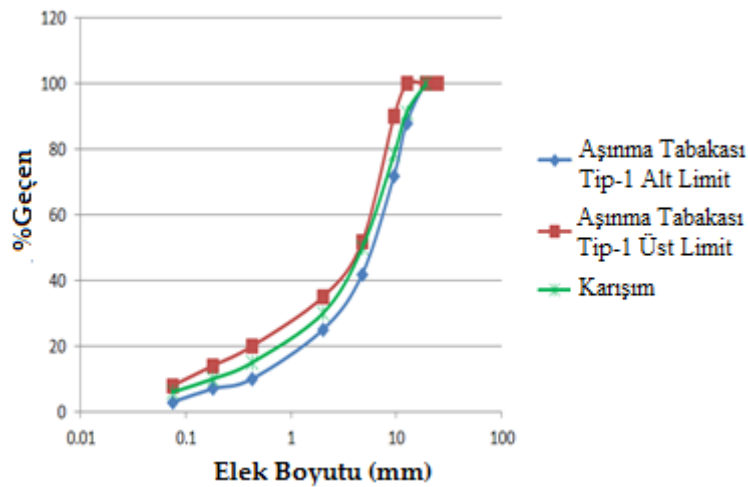
4.1.2 YYPE-PP ve PP-PET sıvı katkılı ılık karışımların Marshall performansı

İncelenen 4 sıvı piroliz ürününden plent sıcaklığını en çok düşüren (YYPE-PP) ile en az düşüren (YYPE-PET) katkı grubu seçilerek tespit edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında, ılık karışım asfalt numuneler hazırlanmıştır. Burada amaç, katkı seçiminde dikkate alınan ikinci kriterin (en az BSK kadar iyi karışım performansı) sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmektir.

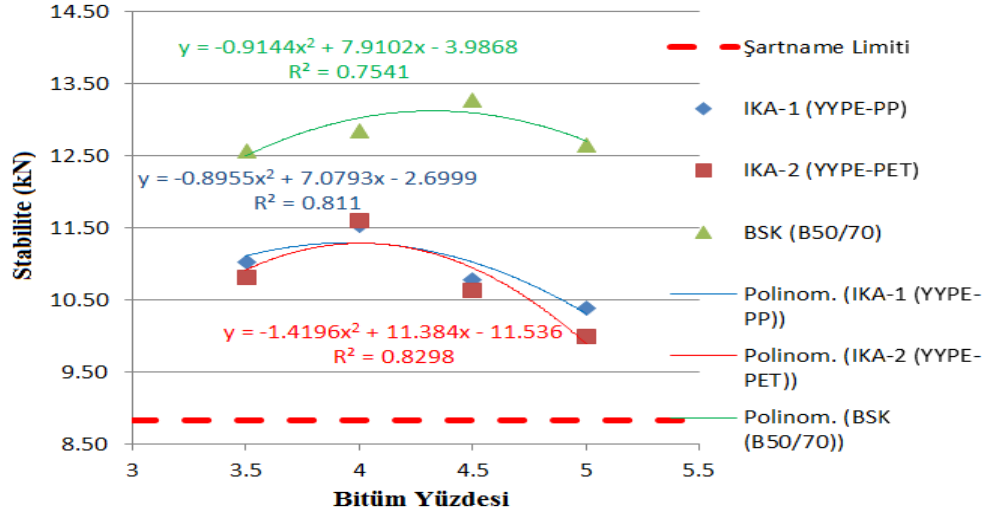
Bu bağlamda, hem IKA hem de BSK'ya ait test numuneleri ASTM D6926-D6927 şartnameleri uyarınca hazırlanmıştır. Karışımlarda %3.5-4-4.5-5 oranlarında bitüm kullanılmıştır. Tercih edilen agrega tipi kalkerdir. BSK B50/70 saf bitüm ile 157°C karışım sıcaklığında, IKA₁ ise YYPE-PP (bitüm ağırlığınca % 6) modifiyeli bitüm ile 135°C karışım sıcaklığında ve IKA₂, YYPE-PET (bitüm ağırlığınca % 6) modifiyeli bitüm ile 140°C karışım sıcaklığında hazırlanmıştır (Şekil 4.2). Ayrıca Şekil 4.3'te, karışımda kullanılan agregaya ait elek analizi sonucu görülmektedir. Her bir grubun Marshall stabilite sonuçları ise Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.2. IKA₁ (solda), IKA₂ (ortada) ve BSK (sağda) Marshall numuneleri.



Şekil 4.3. Hazırlanan agrega karışımına ait granülometri eğrisi



Şekil 4.4. Katkılı ve saf bitümlü karışımların Marshall stabilite grafikleri

Şekil 4.4 incelendiğinde, BSK'nın Marshall stabilite değerlerinin her bitüm oranında piroliz katkı IKA'lardan daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Grafikten maksimum stabilite değerleri BSK, IKA₁ ve IKA₂ için sırasıyla 13.12, 11.29 ve 11.29 kN olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla sadece piroliz sıvısı kullanılarak hazırlanan IKA'ların karışım performansı (stabilite açısından) kontrol numunesi BSK'ya göre %14 daha azdır. Buradan, sadece sıvı ürünler kullanılarak hazırlanacak IKA'ların BSK'ya yakın bir performans sergilemesinin zor olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple, IKA'ların **piroliz katı** ürünleri ile de desteklenmesi kararlaştırılmıştır. Bu sayede, karışım performans özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

4.1.2.1 YYPE-PET (Katı+Sıvı) katkılı ılık karışımın Marshall performansı

YYPE-PET katı+sıvı modifiyeli bitümle IKA₃ Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Bu bağlamda, YYPE-PET pirolizinden elde edilen hem katı hem de sıvı ürün, bitümü modifiye etmek için kullanılmıştır. Literatür incelemesinin ardından, modifiye bitümün **iki ayrı sıcaklıkta** hazırlanmasına karar verilmiştir. İlk aşamada, bitüm ağırlığınca %6 katı ürün **160°C'de** saf B50/70 bitüme katılmıştır. İkinci aşamada, karışım yavaş yavaş **120°C'ye** soğutulurken bitüm ağırlığınca %6 sıvı ürün bitüme ilave edilmiştir (Liu ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2017; Ge ve ark., 2017; Ameri ve Nasr, 2017). Hazırlanan modifiye bitüme ait viskozite sonuçları ve buna bağlı olarak tespit edilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, YYPE-PET katı ve sıvı modifiyeli bitümün karıştırma-sıkıştırma

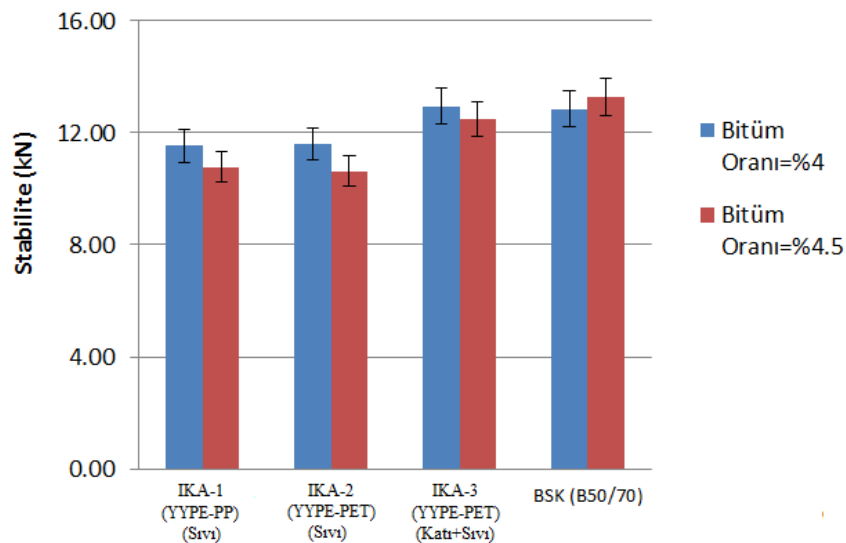
sıcaklık değerleri, YYPE-PET sıvı modifiyeli bitümden yaklaşık 7°C daha yüksek çıkmıştır. Buradan, katı ürün ilavesiyle bitümlü bağlayıcının viskozitesinin arttığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.7. YYPE-PET (%6 Katı + %6 Sıvı) modifiyeli bitüm viskozite sonuçları

Sıcaklık (°C)	Viskozite (mPa.s)	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)
120	727.7		
135	285		
150	151.05	145-150	134-138
165	90.63		

IKA₃ Marshall numuneleri, katkı ürününün etkisini hızlı bir şekilde görebilme adına Çizelge 4.7’de belirtilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarında sadece %4 ve %4.5 bitüm oranlarında hazırlanmış ve stabilite değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.5’te, IKA₃ ve diğer hazırlanan karışımların Marshall stabilite değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde görülüyor ki, IKA₃ (YYPE-PET Katı+Sıvı) BSK’ya oldukça yakın bir stabilite performansı (BSK’ya %94 oranında yaklaşmıştır) göstermiştir. Sadece sıvı YYPE-PET piroliz ürünü kullanılarak hazırlanan IKA₂’den ise %11 daha yüksek stabilite değeri vermiştir.

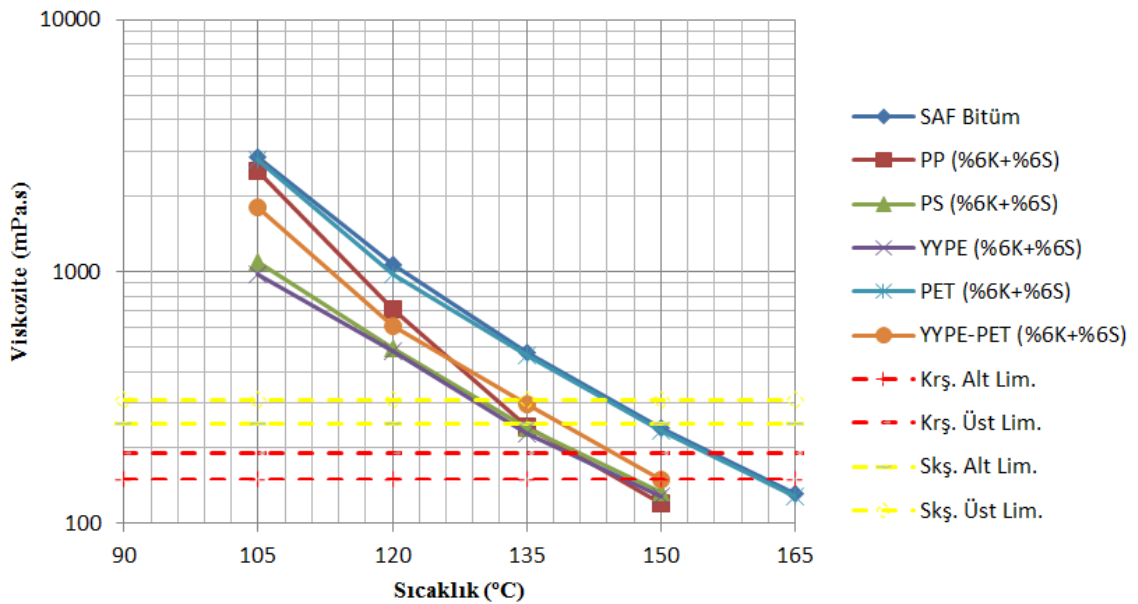
Elde edilen bu sonuçların ardından, IKA katkısı olarak piroliz ürünlerinden **hem katı hem de sıvı fazın birlikte kullanılmasının** tezin amacına daha uygun olduğuna karar verilmiştir.



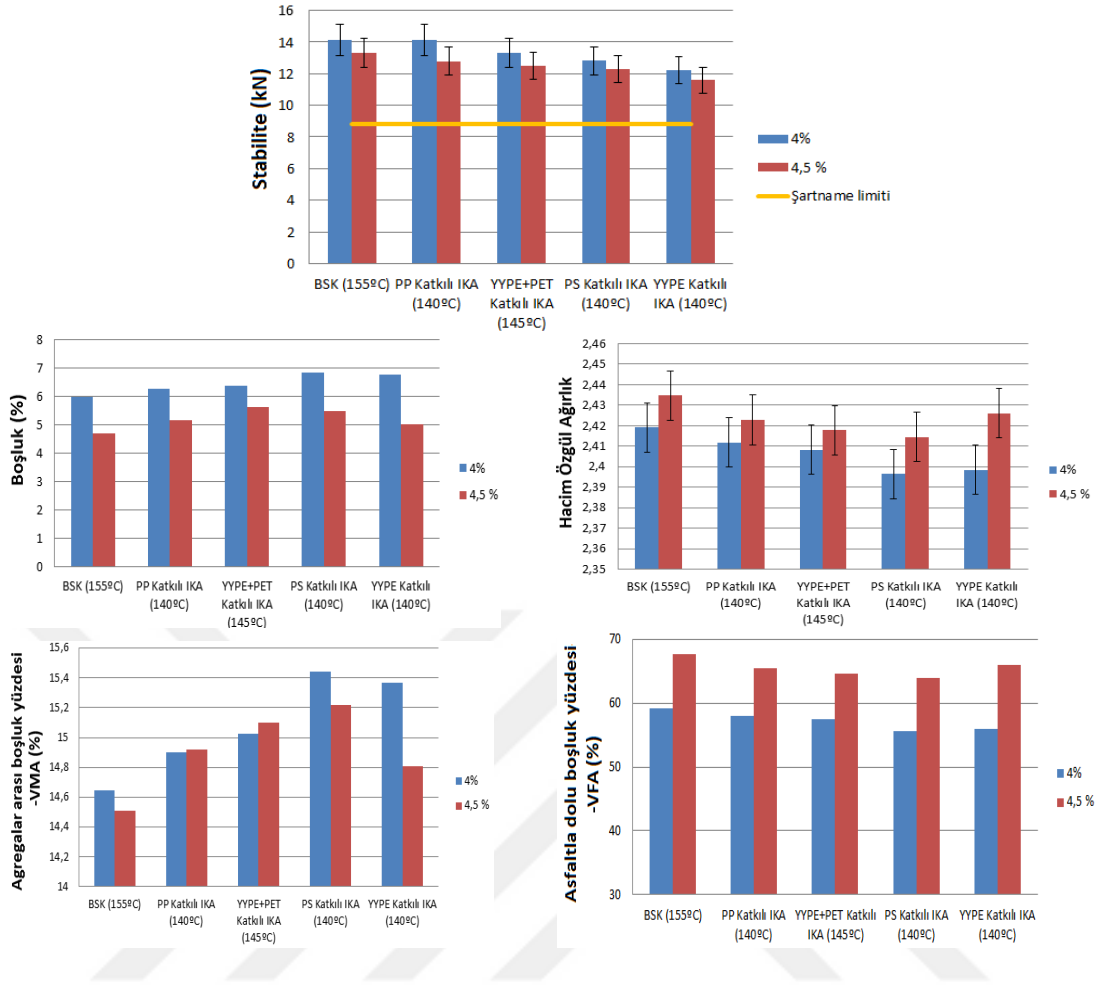
Şekil 4.5. Farklı fazlarda hazırlanan IKA'lara ve BSK'ya ait Marshall stabilite sonuçları

4.1.3 PP, YYPE, PS, PET tekli pirolizlerinden elde edilen katı ve sıvı ürünlerin bitümlü bağlayıcı ve IKA üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Nihai piroliz ürünlerinin tespitinde, birlikte piroliz sonucu elde edilen ürünlerin yanı sıra, piroliz ürünlerinde kullanılan plastik türlerinin nasıl bir etki oluşturduğunu daha net anlayabilmek adına **tekli pirolizler** de yapılmış ve bu ürünler de çalışmada denenmiştir. Bu bağlamda, PP, YYPE, PET ve PS atık plastikleri tekli olarak piroliz edilmiş ve elde edilen katı ve sıvı ürünler (bitüm ağırlığına %6 oranında) ile bitüm modifiye edilerek, katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcının viskozitesi üzerindeki etkileri RV testi ile değerlendirilmiştir. Şekil 4.6'daki viskozite-sıcaklık grafiğine göre, katkı gruplarından, YYPE, PS, PP ve YYPE-PET saf bitümün karıştırma sıcaklığını sırasıyla 16, 15, 14 ve 10°C düşürmeyi başarmıştır. PET katkıli bitümün viskozite değerleri ise saf bitüme yakın sonuç vermiştir. Dolayısıyla, PET katkısının tek başına tezin amacına uygun bir katkı özelliği taşımadığına karar verilmiştir. Bu sebeple, PET dışındaki diğer katkıli bitümlerle IKA Marshall numuneleri hazırlanarak stabilite performansları araştırılmıştır. Katkıların etkisini hızlı bir şekilde görebilmek için, tam bir Marshall tasarımı yapılmamıştır. Bunun yerine sadece %4 ve %4,5 bitüm oranlarında 4'er adet Marshall numunesi hazırlanmış ve IKA'ların Marshall tasarım kriterleri birbirleriyle ve referans BSK ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.7 bu sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.6. Farklı pirolitik ürünlerle modifiye edilen bitümlerin viskozite sonuçları



Şekil 4.7. BSK ve farklı tip IKA'ların Marshall tasarım kriterleri

Şekil 4.7 incelendiğinde şu sonuçlara varılabilir:

- PP katkılı IKA ile BSK'nın stabilite değeri %4 bitüm içeriğinde birbirine eşit çıkmıştır. BSK ile IKA_{PP}'nin diğer parametrelerde de yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum **PP'yi en başarılı IKA katkısı** yapmaktadır. Tez kapsamında yola devam edilecek katkılardan biri olarak kabul edilmiştir.
- YYPE-PET katkılı IKA karışımı PP'den sonra en iyi stabilite değerine sahip karışım olmuştur. Stabilite değeri BSK'dan sadece %6 daha düşüktür. Diğer parametrelerin de (boşluk yüzdesi, birim hacim ağırlık vb.) stabilite sonucunu desteklediği ve diğer karışımlardan daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla tez çalışmasında kullanılmasına karar verilen **2.katkı YYPE-PET** katkısı olmuştur.
- Diğer tekli piroliz ürünleri ile hazırlanan IKA'ların Marshall stabilitesi açısından BSK'ya yakınlıkları PS (%91) ve YYPE (%86) şeklinde olmuştur. Bu gruptan da **PS katkısı** ile tez çalışmasına devam edilmesine karar verilmiştir.

4.2 Piroliz Yöntemi ile Katkıların Elde Edilmesi

Piroliz ürünlerinin elde edilmesi sürecinde, ilk aşamada atık plastik ürünler, Şekil 4.8’de görüldüğü üzere küçük parçalara ayrılmış biçimde Konya’daki farklı sanayi bölgelerinden temin edilmiştir. Bölüm 4.1’de yapılan ön araştırmalar sonucu tespit edilen atık plastik ürünler (PP, YYPE-PET ve PS) katı ve sıvı pirolitik ürünler elde edilmek üzere piroliz işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.8. Tez çalışmasında kullanılması kararlaştırılan atık plastik ürünler

4.2.1 PP pirolizi sonuçları

Çalışmada, siyah renkli kasalardan temin edilen blok kopolimer türünde polipropilen atığı kullanılmıştır (Şekil 4.8). Pirolizden çıkan katı ve sıvı ürünün her ikisi de çalışma kapsamında kullanılacağı için ürünlerin piroliz koşulları (verimi maksimize etmek amacıyla) ayrı ayrı oluşturulmuştur. Pirolizde ürün verimini en çok etkileyen parametreler şunlardır: Sıcaklık, reaktör tipi, basınç miktarı, katalizör tipi, sürükleyici gaz türü ve miktarı vb. Sıcaklık, polimer zincirinin parçalanma reaksiyonunu doğrudan etkilediği için, ürün verimini kolaylıkla değiştirebilen en önemli parametrelerden biridir (Sharuddin ve ark., 2016) Ayrıca, bu tez çalışmasındaki mevcut sistemde kolaylıkla değiştirilip ürün üzerindeki etkinin hızlıca gözleneceği parametre de yine sıcaklıktır. Bu sebeplerle, yapılan ön piroliz çalışmalarında farklı sıcaklıklarda denemeler yapılmış, diğer piroliz koşulları (reaktör tipi, ısıtma hızı, sürükleyici gaz türü ve miktarı vb.) sabit tutulmuştur

PP katı ürün pirolizinde, son sıcaklık **300-350°C** aralığında seçilmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda, bu sıcaklık aralığından daha düşük sıcaklıkta yapılan pirolizlerden elde edilen katı ürünün yeterince bozunmadığı (reaktöre koyulan kütlenin neredeyse hiç değişmediği) anlaşılmıştır. Belirtilen sıcaklık aralığından daha yüksek

sıcaklıklarda ise reaktörde kalan katı ürünün toza dönüştüğü tespit edilmiştir. Gerek katı ürün veriminin çok azalması gerekse de modifiye bitümde bu toz ürünün istenilen etkiyi gösterememesi, yukarıda bahsi geçen sıcaklık aralığının tercih edilmesinde etkili olmuştur.

PP sıvı ürün pirolizinde, tercih edilen sıcaklık aralığı **450-500°C'dir**. Yapılan piroliz ön denemelerinde görülmüştür ki, sıcaklık arttıkça sıvı ürün verimleri de artmakta, buna bağlı olarak katı ürün verimleri azalmaktadır. 450-500°C sıcaklık aralığında sıvı ürün verimi yaklaşık olarak % 70 değeri ile maksimuma ulaşmıştır. Bu sıcaklık aralığından sonra sıvı veriminin azalmaya başladığı, bunun yerine gaz ürün miktarının artış gösterdiği görülmüştür. Benzer sonuçlara Fakhrhoseini ve Dastanian (2013) 500°C'de yaptıkları PP pirolizinde de ulaşmıştır (sıvı verimini %82.12 elde ederek). Ayrıca, Demirbaş (2004), 740°C'de yaptığı PP pirolizi ile gaz ürün verimini % 49.6 ve sıvı ürün verimini %48.8 olarak tespit etmiştir. Demirbaş (2004), çalışmanın sonucunda, 500°C'den daha yüksek sıcaklıklarda, sıvı ürün veriminin önemli ölçüde azaldığı çıkarımını yapmıştır. Bu sebeplerle, PP sıvı pirolitik ürünleri 450-500°C aralığında elde edilmiştir. PP pirolizinden elde edilen ürünlerin verimleri Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 PP piroliz sonuçları

Ürün fazları	Deney Sıcaklıkları	
	300-350°C	450-500°C
Katı Verimi (%)	51.6-62.9	12.2-26.2
Sıvı Verimi (%)	22.6-30.7	58.5-70.3
Gaz Verimi (%)	6.4-25.8	10.3-29.3

4.2.2 YYPE-PET birlikte pirolizi sonuçları

Bölüm 4.1'de yapılan ön araştırmalar sonucu, YYPE ile PET atık plastiklerin birlikte pirolizinden elde edilen ürünlerin çalışma amacına daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, YYPE-PET (2/1) birlikte piroliz edilmiştir. Parantez içerisinde pirolizde kullanılan atık plastiklerin birbirine oranı (ağırlıkça) belirtilmiştir. Atık plastiklerden YYPE; siyah renkli bidonlardan, PET ise su şişelerinden temin edilmiştir. PP pirolizinde olduğu gibi YYPE-PET pirolizinde de katı ve sıvı ürünler farklı sıcaklıklarda yapılan pirolizlerden elde edilmiştir.

YYPE-PET katı ürün pirolizinde, belirlenen sıcaklık aralığı **300-350°C** olmuştur. 300°C'nin altında yapılan ön deneme pirolizlerinde, reaktörde kalan katı ürün

miktarının %90'ların üzerinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık 300-350°C aralığına getirildiğinde ise katı ürün veriminin keskin bir şekilde %50-55 dolaylarına düştüğü gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlardan, katı ürün pirolizi açısından kritik sıcaklık aralığının 300-350°C olduğu tespit edilmiştir.

YYPE-PET sıvı ürün verimini maksimize etmek için yapılan pirolizlerde ise, sıcaklık aralığı **400-450°C** seçilmiştir. Yapılan ön denemelerde, 400-450°C sıcaklık aralığına kadar sıvı veriminin artarak %33-35 değerlerine ulaştığı görülmüştür. 450-500°C aralığında yapılan deneylerde ise sıvı veriminin %26-30 değerleri arasında seyrettiği gözlenmiştir. Bu sebeplerle, sıvı ürün üretimi için piroliz sıcaklık aralığı 400-450°C olarak belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde, YYPE pirolizinden elde edilen sıvı ürün veriminin (%80-85) 400-550°C aralığında maksimuma ulaştığı görülmüştür (Kumar ve Sing, 2011; Marcilla ve ark., 2009). PET'in 500°C'de gerçekleştirilen pirolizinden elde edilen ürünlerde ise gaz ürün veriminin çok yüksek olduğu (%76), sıvı ürün veriminin ise %23 dolaylarında olduğu görülmüştür (Çepelioğullar ve Pütün, 2013). Dolayısıyla, bu çalışmada gerçekleştirilen YYPE-PET pirolizinde, PET bileşeninin etkisi ile sıvı ürün veriminin düşük olup, gaz ürün veriminin yüksek olduğu yorumu yapılabilir. Belirlenen sıcaklıklar ile yapılan YYPE-PET pirolizlerinden elde edilen ürün verimleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 YYPE-PET piroliz sonuçları

Ürün fazları	Deney Sıcaklıkları	
	300-350°C	400-450°C
Katı Verimi (%)	50.6-52.4	10.3-11.9
Sıvı Verimi (%)	6.3-7.9	33.6-35.4
Gaz Verimi (%)	39.7-43.1	52.7-56.1

4.2.3 PS pirolizi sonuçları

PS pirolizinde, elektronik cihaz atıklarından temin edilen antişok polistiren kullanılmıştır. PS pirolizi ile elde edilen katı ve sıvı ürünlerin sonuçları şu şekildedir:

PS katı ürün verimini yüksek tutmak için yapılan pirolizlerde, sıcaklık **250-300°C** aralığında tutulmuştur. Bu sıcaklık aşıldığında, katı verimi hızla azalmıştır. Örneğin, 287°C'de yapılan bir deneyde elde edilen katının miktarı %42 dolaylarında iken, sıcaklık 336°C'ye yükseldiğinde bu oran %25 değerine düşmüştür. Daha düşük sıcaklıklarda ise, önceki plastik pirolizlerinde olduğu gibi ürün neredeyse bozunmadan kalmıştır.

PS sıvı ürün pirolizinde ise, piroliz sıcaklığının **450-500°C** aralığında olmasına karar verilmiştir. Bahsi geçen sıcaklıklara kadar sıvı ürünün veriminin yükseldiği (%53-55), daha yüksek sıcaklıklarda ise, sıvı miktarının artık azaldığı görülmüştür. Benzer sonuçlara Demirbaş (2004)'in çalışmasında da rastlanmıştır. Araştırmacı, 581°C'de yaptığı PS pirolizinde sıvı veriminde (daha düşük sıcaklıklarda yapılan pirolizlere kıyasla) azalma olduğunu belirlemiş ve 500°C'den daha yüksek sıcaklıklarda PS pirolizinin sıvı ürün açısından verimli olmadığı sonucuna ulaşmıştır. Pirolizlerden elde edilen PS ürün verimleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

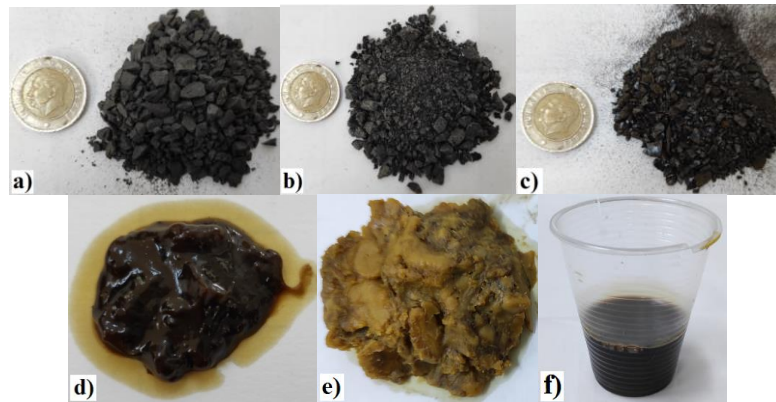
Çizelge 4.10 PS piroliz sonuçları

Ürün fazları	Deney Sıcaklıkları	
	250-300°C	450-500°C
Katı Verimi (%)	39.8-41.6	3.9-5.2
Sıvı Verimi (%)	34.7-37.2	52.8-55.2
Gaz Verimi (%)	21.2-25.5	40.9-42

Çizelge 4.11, tez çalışmasında kullanılacak katı ve sıvı piroliz ürünlerinin üretildiği piroliz koşullarını göstermektedir. Elde edilen ürünlere ait görseller ise Şekil 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4.11. Pirolitik İKA katkılarının piroliz üretim koşulları

Plastik Türü	Katı ürün			Sıvı Ürün		
	Sıcaklık (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Azot gazı süresi (dk)	Sıcaklık (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Azot gazı süresi (dk)
PP	300-350			450-500		
YYPE-PET	300-350	3-5	25	400-450	3-5	25
PS	250-300			450-500		



Şekil 4.9. Piroliz ürünleri (a-PP katı, b-YYPE-PET katı, c-PS-katı, d-PP sıvı, e-YYPE-PET sıvı, f-PS sıvı)

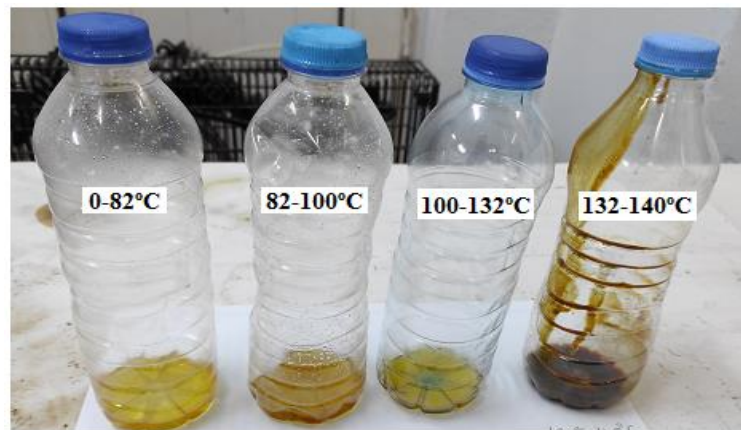
4.3 Sıvı Piroliz Ürünlerinin Damıtma (Distilasyon) Sonuçları

Damıtma, kaynama noktası farklı iki veya daha fazla bileşen içeren bir karışımın ısıtılarak birbirinden ayrıştırılması işlemidir. Çalışmada kullanılan katkı maddelerinin uçuculuk özelliklerinin tespit edilmesi için damıtma testinden faydalanılmıştır. Bu doğrultuda, PP, YYPE-PET ve PS piroliz sıvı ürünleri kaynama noktasına göre ayrıştırılmıştır. Damıtma sürecinde katkı malzemesi ılık karışım asfaltta kullanılacağı düşünüldüğü için yaklaşık 140-145°C sıcaklık aralığına kadar ısıtılmış ve malzemelerin davranışları gözlenmiştir. Testlerin sonuçları kısaca şöyledir:

- PP sıvı piroliz ürünü için damıtma işlemi yapılmış ve 140°C üzerinde, ısıtma kabında çok az bir ürün (%5.2) kaldığı gözlenmiştir. Deney sonunda bu ürünün ısıtma kabında katılaşmış durumda olduğu görülmüştür. PP sıvı ürününün detaylı damıtma sonucu Çizelge 4.12’de, elde edilen fraksiyonlar ise Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. PP sıvı piroliz ürünü damıtma sonucu

Sıcaklık aralığı (°C)	Ürün Verimi (%)
0-82	34.4
82-100	31.8
100-132	10.1
132-140	7.8
140 sonrası	5.2
Kayıp	10.7
TOPLAM	100



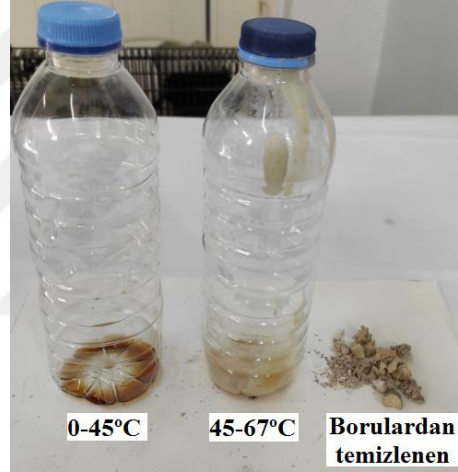
Şekil 4.10. PP sıvı ürününün damıtılması sonucu elde edilen ürünler

- YYPE-PET piroliz sıvı ürünü için yapılan damıtma işleminde, ürün oda sıcaklığında hemen donan vaks kıvamında bir malzeme olduğundan deney

esnasında borularda sürekli tıkanmalar meydana gelmiştir. Tıkanmaların temizlenmesi sürecinde ise önemli miktarda numune kaybolmuştur. Bu sebeple bu ürünün distilasyonu sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilememiştir. Damıtma sonucu elde edilen ürün verimleri Çizelge 4.13'te ve kaplarda toplanabilen ürünler ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. YYPE-PET sıvı piroliz ürünü damıtma sonucu

Sıcaklık aralığı (°C)	Ürün Verimi (%)
0-45	8.0
45-67	13.0
Borulardan temizlenen	36.5
140 sonrası	7.1
Kayıp	35.4
TOPLAM	100



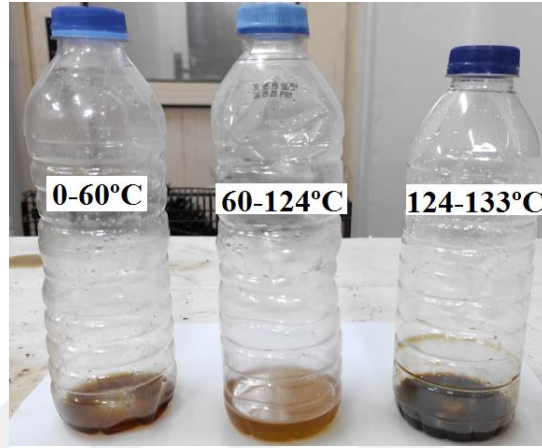
Şekil 4.11. YYPE-PET sıvı ürününün damıtılması sonucu elde edilen ürünler

- PS sıvı piroliz ürünü için yapılan damıtma işleminde, ürünün oldukça uçucu olduğu ve 140°C üzerindeki sıcaklıkta, damıtma kabında buharlaşmadan kalan ürünün toplam ürün miktarına oranının %4 olduğu anlaşılmıştır. Çizelge 4.14 detaylı damıtma sonuçlarını ve Şekil 4.12 ise damıtma sonucu elde edilen ürünleri göstermektedir.

Plastiklerin pirolizlerinden elde edilen sıvı ürünlerin damıtma testleri sonucunda, 140°C sıcaklık sonrasında, kapta kalan ürün miktarının her 3 sıvı üründe de çok az olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla, modifiye bitüm hazırlanması sürecinde, sıvı ürünlerin tamamı kendi içerisinde homojen bir şekilde karıştırılarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.14. PS sıvı piroliz ürünü damıtma sonucu

Sıcaklık aralığı (°C)	Ürün Verimi (%)
0-60	16.0
60-124	46.6
124-133	23.4
140 sonrası	4.0
Kayıp	10.0
TOPLAM	100



Şekil 4.12. PS sıvı ürünün damıtılması sonucu elde edilen ürünler

4.4 Bitümlü Bağlayıcı Test Sonuçları

Plastik pirolizlerinden elde edilen katı ve sıvı ürünlerin bitüm üzerindeki etkileri bitümlü bağlayıcı testleri ile incelenmiştir. Bu bölümde, ilk aşamada pirolitik ürünlerin bitümle hangi koşullarda karıştırılacağı (ıslak karışım) konusu üzerinde durulmuştur. Katkı-bitüm karışım parametrelerinin (karıştırma sıcaklığı, karıştırma hızı, süresi ve katkı oranı) bitüm üzerinde oluşturduğu etkiler penetrasyon, yumuşama noktası ve RV testleri ile incelenmiş ve optimum parametreler tespit edilmiştir. Devamında ise RTFOT, PAV, DSR ve BBR testleri hem saf hem de katkılı bitümlere uygulanmıştır. Bu testlerle, saf ve katkılı bitümlerin düşük, orta ve yüksek sıcaklık aralığındaki reolojik davranışları incelenmiş ve bitümlerin hangi performans sınıfında yer aldıkları tespit edilmiştir.

4.4.1 Piroliz katkılı bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi

Piroliz ürünleri ile hazırlanan katkılı bitümlerin üretim parametrelerinin (sıcaklık, süre, hız ve oran) belirlenmesi için farklı koşullarda katkılı bitümler

hazırlanmıştır. Parametrelerin hangi aralıklarda seçileceğini belirlemek için, plastiklerin bitümle karıştırılması ile ilgili literatür incelenmiştir. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

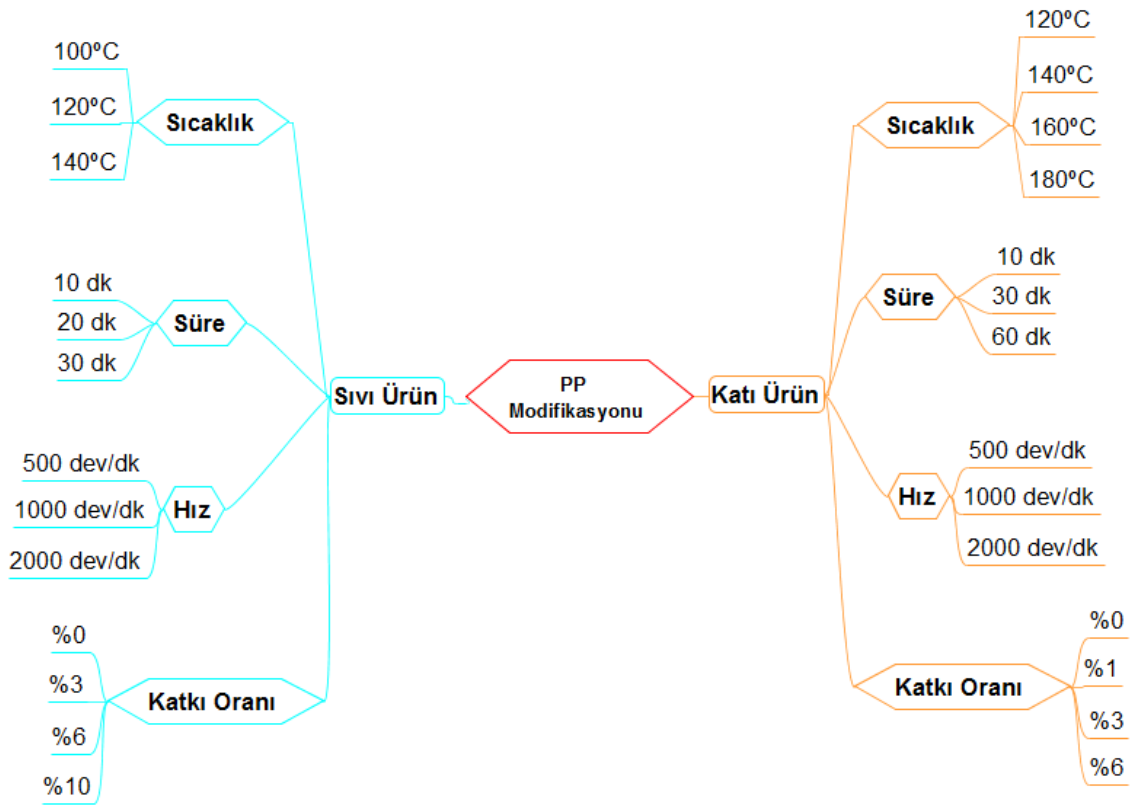
- Al-Hadidy (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, PP pirolizinden elde edilen katı ürün, sıcak karışım performansını arttırmak için kullanılmıştır. Katkılı bitüm üretim parametrelerinden katkı miktarı, bitüm ağırlığınca %1, 2, 3, 4, 6 ve 8 oranlarında tercih edilmiştir. Karışım sıcaklığı 160°C ve karıştırma süresi ise 7 dk olarak belirlenmiştir.
- Al-Hadidy ve Tan (2009) tarafından yapılan bir çalışmada ise, düşük yoğunluklu polietilen piroliz katı ürününün, TMA karışım özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada modifiye bitüm hazırlanırken tercih edilen parametreler şöyledir: Katkı oranı bitüm ağırlığınca %2, 4, 6 ve 8. Karıştırma hızı 1750 dev/dk. Karıştırma sıcaklığı 160°C ve karıştırma süresi 3-5 dk'dır.
- Shang ve ark. (2011) yaptıkları bir çalışmada, çapraz bağlı polietilenin pirolizinden elde edilen vaks ürününün, IKA performans özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, bitüm ağırlığınca %1, 3, 5 ve 7 oranlarında XPE kullanılmıştır. Katkı maddesi bitüm ile 150°C'de, 400 dev/dk hızda ve 30 dk boyunca karıştırılmıştır.
- Appiah ve ark. (2017) tarafından yapılan bir araştırmada, PP ve YYPE plastik atıkları eritilerek bitüme katılmıştır. Karıştırma sıcaklıkları sırasıyla 160 ve 170°C'dir. Karıştırma hızı 120 dev/dk'nin üzerinde tutulmaya çalışılmıştır. Katkı oranları bitüm ağırlığınca %0.5-3 arasında olup, karıştırma süresi PP için 30 dk ve YYPE için 1 saat olarak tercih edilmiştir.
- Abed ve Bahia (2020) yaptıkları bir çalışmada, asfalt karışımının kalıcı deformasyon özelliklerini iyileştirmek için nano boyutta YYPE katkısı kullanmışlardır. Çalışmada, bitüm ağırlığınca %3-5 oranlarında katkı maddesi kullanılmıştır. Karışım hızı olarak 2200 dev/dk tercih edilmiştir. Karışım sıcaklığı 150±10°C ve karıştırma süresi 15 dk olarak belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde, gerek plastiklerin öğütülmüş hallerinin gerekse de piroliz ürünlerinin bitüm ile karıştırılma sıcaklıklarının 150-160°C aralığında değiştiği görülmüştür. Karıştırma süresinin plastik tipine göre 5 dk ile 60 dk arasında değiştiği tespit edilmiştir. Katkı oranlarının bitüm ağırlığınca %1-8 arasında değiştiği görülmüştür. Karıştırma hızının ise çok farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu durumun kullanılan mikserlerin özellikleri ile ilgili olduğu tahmin edilmektedir.

Tez çalışmasında kullanılacak her bir katkılı bitüme ait üretim parametreleri ayrı ayrı belirlenmiştir.

4.4.1.1 PP katkıli bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi

Literatürdeki araştırmalar ve yapılan ön deneyler ışığında, PP katkıli bitümlerin hazırlanmasında dikkate alınan parametreler ve değer aralıkları Şekil 4.13'te görüldüğü gibi belirlenmiştir.

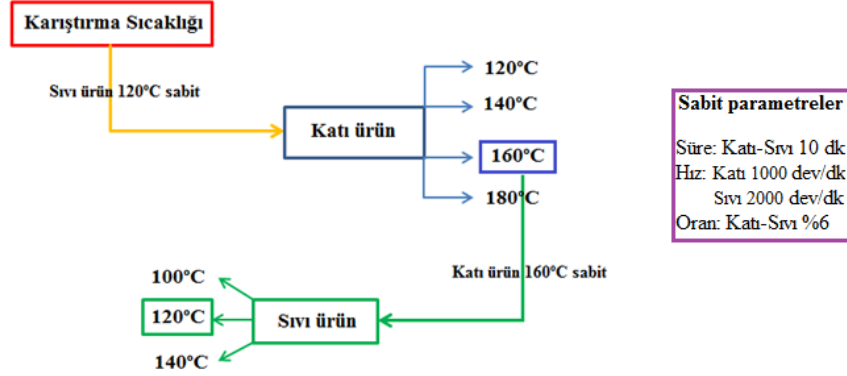


Şekil 4.13. PP katkıli bitümlerin hazırlanmasında kullanılan parametreler ve değer aralıkları

4.4.1.1.1 PP katkıli bitümlerin karıştırma sıcaklığının tayini

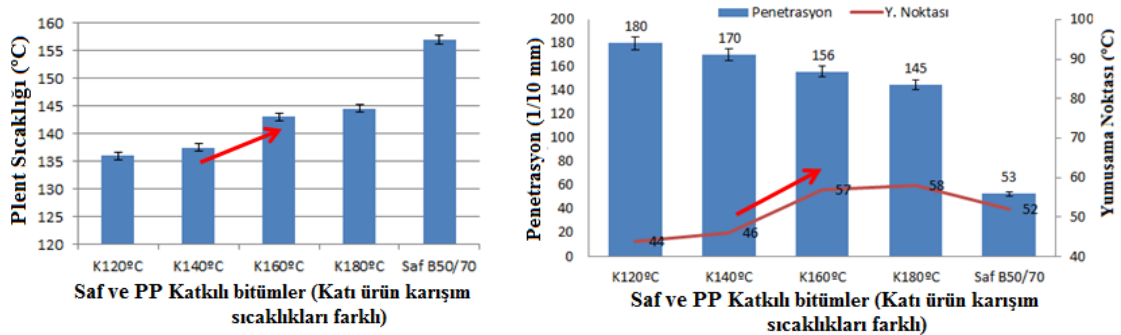
PP katkıli bitümler üzerinde, karıştırma sıcaklığının etkisini belirleyebilmek için, Şekil 4.13'te belirtilen sıcaklıklar kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Katı ve sıvı ürünün optimum karıştırma sıcaklıkları sırayla tespit edilmiştir. İlk aşamada sıvı ürün tek bir sıcaklıkta modifiye edilirken, katı ürün farklı sıcaklıklarda modifiye edilmiş ve optimum değer bulunmuştur. Ardından, aynı işlem sıvı ürün için tekrarlanmıştır. Diğer parametreler ise bu aşamada sürekli sabit tutulmuştur (Şekil 4.14). Hazırlanan her

bir karışıma penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılmıştır (Viskozite sonuçlarından belirlenen plent sıcaklıkları grafiklere koyulmuştur). Bu testlerden elde edilen sonuçlarla optimum modifiye karıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir.



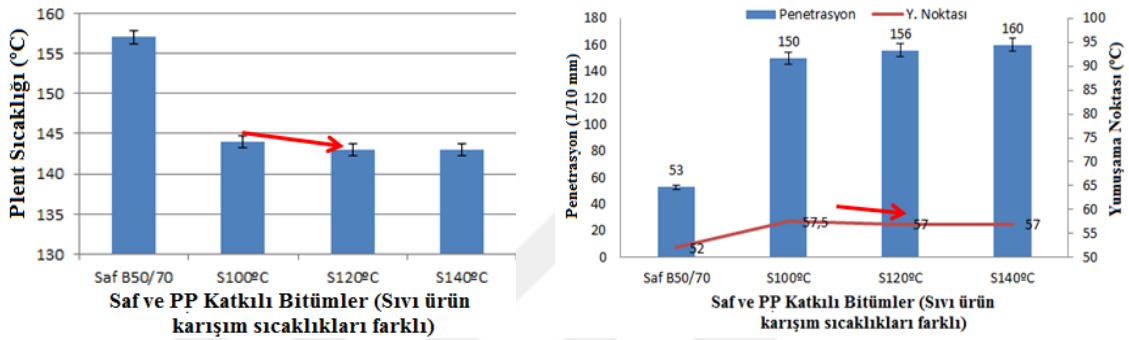
Şekil 4.14. PP katkıli bitümlerde karıştırma sıcaklığı tayini için hazırlanan deney şeması

Katı ürüne ait optimum karıştırma sıcaklığını belirlemek için yapılan testlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bu deney grubunda (PP₁), sıvı ürünün karıştırma sıcaklığı 120°C'de sabit tutulurken, katı ürün 120, 140, 160 ve 180°C'lerde bitümle karıştırılmıştır. Şekil 4.15 incelendiğinde, plent sıcaklığı ve penetrasyon-yumuşama noktası değerlerindeki en büyük değişimin 140-160°C aralığında olduğu görülmüştür (Grafiklerde kırmızı okla gösterilmiştir). 160°C'den sonra grafiklerin yatıklaştığı anlaşılmaktadır. Optimum karıştırma sıcaklığı bu sebeple 160°C olarak belirlenmiştir. Aynı sıcaklık değerine, Al-Hadidy (2006) ve Al-Hadidy ve Tan (2009) tarafından da ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 4.15. Modifiye bitümlerin (PP₁) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

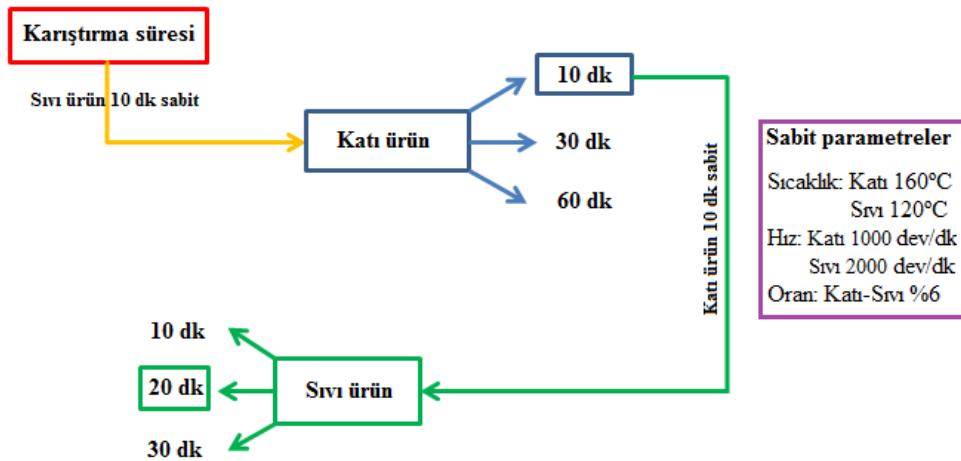
Şekil 4.16 ise, sıvı ürün karıştırma sıcaklığını tayin etmek için yapılan deneylerin sonuçlarını göstermektedir. Bu deney grubunda (PP₂), katı ürün karıştırma sıcaklığı 160°C’de sabit tutulurken, sıvı ürün 100, 120 ve 140°C’lerde modifiye edilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, karışımların plent sıcaklığı ve penetrasyon-yumuşama noktası değerlerindeki değişimin 100-120°C arasında olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple, sıvı ürün için optimum karıştırma sıcaklığının **120°C** olmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.16. Modifiye bitümlerin (PP2) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

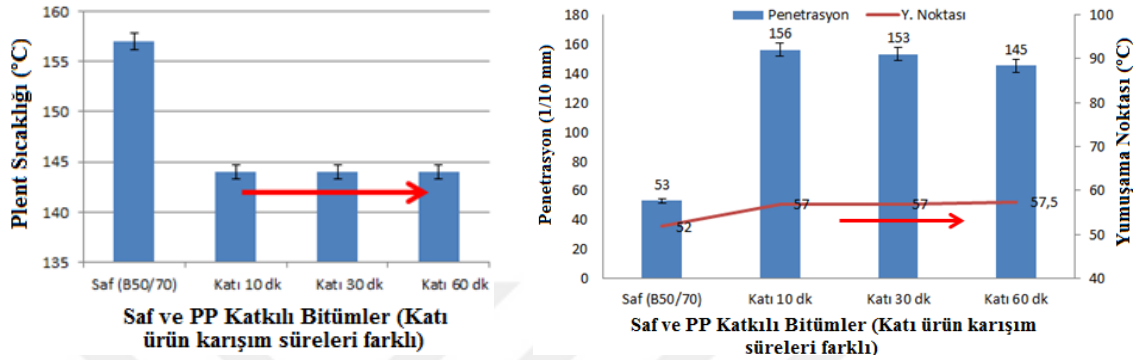
4.4.1.1.2 PP katkıli bitümlerin karıştırma süresinin tayini

PP modifiyeli bitümlerin karıştırma süresini belirlerken izlenen deney akış şeması Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Bu deney grubunda, yalnızca katı ve sıvı ürünlerin karıştırma süreleri (biri sürekli sabit tutularak) değiştirilirken, diğer parametreler bir önceki deney grubunda olduğu gibi sürekli sabit tutulmuştur.



Şekil 4.17. PP katkıli bitümlerde karıştırma süresinin tayini için hazırlanan deney şeması

Katı ürün için karıştırma süresi tayininde; 10, 30 ve 60 dk olmak üzere 3 farklı süre seçilmiştir. Sıvı ürün karıştırma süresi 10 dk olarak sabit tutulmuştur. Süre tayini için hazırlanan numunelere (PP₃) yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.18'de gösterilmiştir



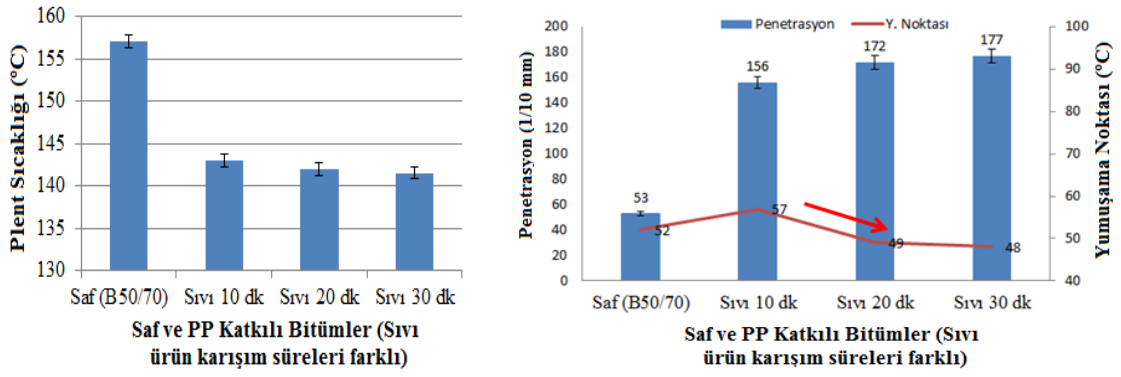
Şekil 4.18. Modifiye bitümlerin (PP₃) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Şekil 4.18'deki grafiklerden görüldüğü üzere, katı ürün karıştırma süresinin karışımın plent sıcaklığına önemli bir etkisi olmamıştır. Yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple katı ürün karıştırma süresi **10 dk** olarak belirlenmiştir. Tespit edilen bu sürenin, literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (Al-Hadidy, 2006; Al-Hadidy ve Tan, 2009).

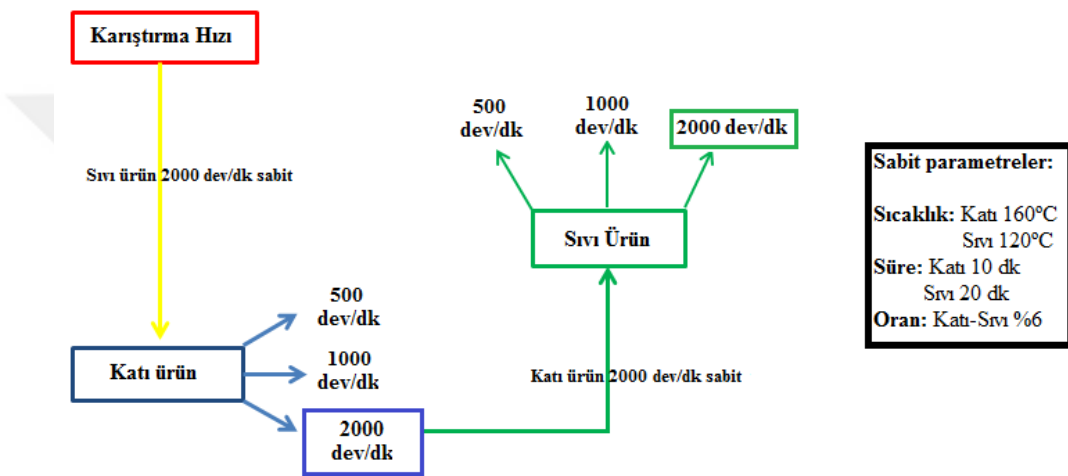
PP₄ isimli deney grubunda, katı ürün karıştırma süresi 10 dk olarak sabit tutulurken, sıvı ürün karıştırma süresi 10, 20 ve 30 dk olarak seçilmiştir. Sıvı ürünün karıştırma süresi **arttıkça**, karışımın viskozitesinin **azaldığı** buna bağlı olarak, plent sıcaklığı ve yumuşama noktası değerlerinin düştüğü Şekil 4.19'daki grafiklerden görülmektedir. Değişimin en büyük olduğu kısmın 10-20 dk arasında olması ve 20 dk'dan sonra değerlerin sabitleşmesi sebepleriyle sıvı ürün için optimum karıştırma süresi **20 dk** olarak tayin edilmiştir.

4.4.1.1.3 PP katkıli bitümlerin karıştırma hızının tayini

Bu deney gruplarında (PP₅ ve PP₆) yalnızca katı ve sıvı ürünlerin karıştırma hızları değiştirilirken, diğer parametreler önceki deney gruplarında olduğu gibi sürekli sabit tutulmuştur. Şekil 4.20, ilgili deney akış şemasını göstermektedir.

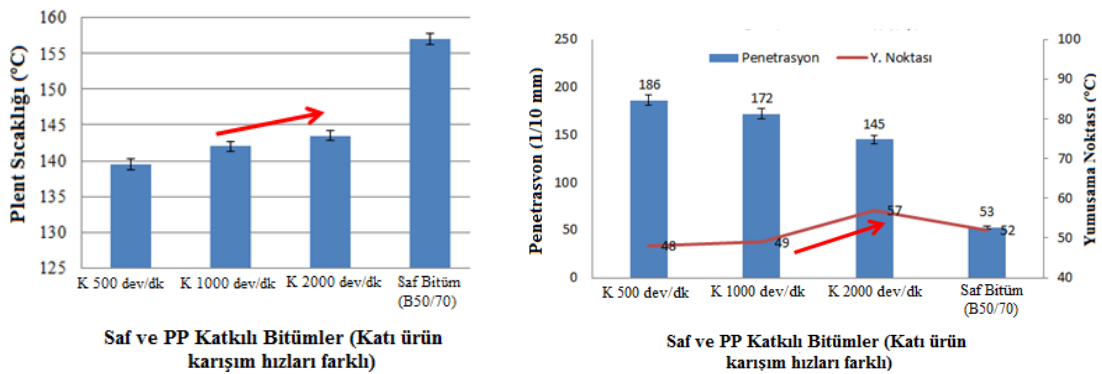


Şekil 4.19. Modifiye bitümlerin (PP₄) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)



Şekil 4.20. PP katkılı bitümlerde karıştırma hızının tayini için hazırlanan deney şeması

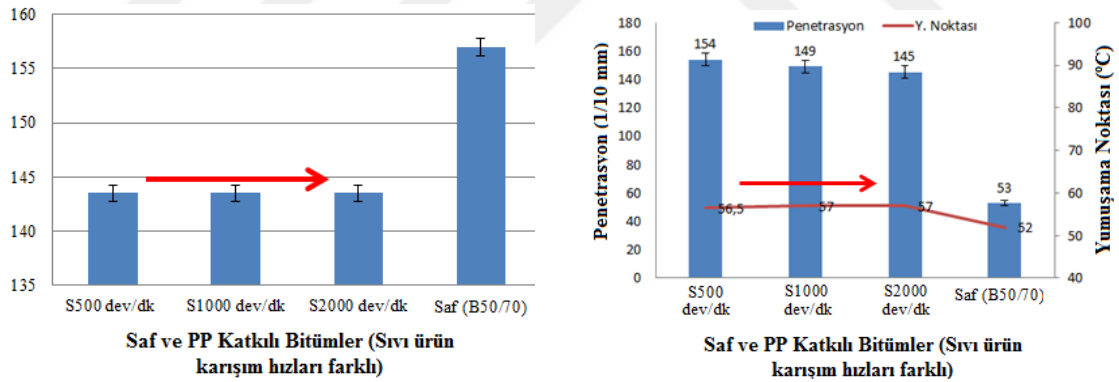
Katkı ürün karıştırma hızını belirlemek için, sıvı ürün karıştırma hızı 2000 dev/dk'de sabit tutulmuştur. Katı ürün karıştırma hızı ise 500, 1000 ve 2000 dev/dk olarak seçilmiştir. Bu gruba (PP₅) yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Modifiye bitümlerin (PP₅) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Şekil 4.21'deki grafiklerden görüldüğü üzere, karıştırma hızı arttıkça bitüm sertleşmekte, buna bağlı olarak plent sıcaklığı ve yumuşama noktası değerleri artmaktadır. Değerlerdeki en büyük değişim, hızın 1000 dev/dk'den 2000 dev/dk'ye çıkması durumunda olmuştur. Bu sebeple optimum hız **2000 dev/dk** olarak seçilmiştir. Cihazın maksimum kapasitesi 2000 dev/dk olduğundan daha yüksek hızlarda deneme yapılamamıştır.

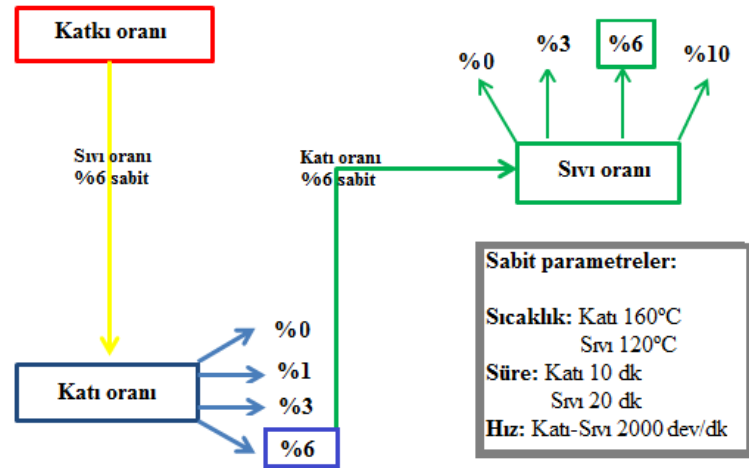
Sıvı üründe karıştırma hızının etkisini görebilmek için 500, 1000 ve 2000 dev/dk olarak farklı hızlar seçilmiştir. Bu grupta (PP₆), katı ürün karıştırma hızı 2000 dev/dk'de sabit tutulmuştur. Deney sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sıvı ürünün karıştırma hızının, karışımın özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu noktada literatürde yapılan çalışmalara (Gao ve ark., 2018; Chen ve ark., 2018; Tang ve ark., 2018; Ge ve ark., 2017; Zhao ve ark., 2017) bakıldığında 2000 dev/dk veya daha yüksek karıştırma hızlarının tercih edildiği gözlenmiştir. Bu sebeple bu çalışmada da karıştırma hızı 2000 dev/dk olarak tercih edilmiştir.



Şekil 4.22. Modifiye bitümlerin (PP₆) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

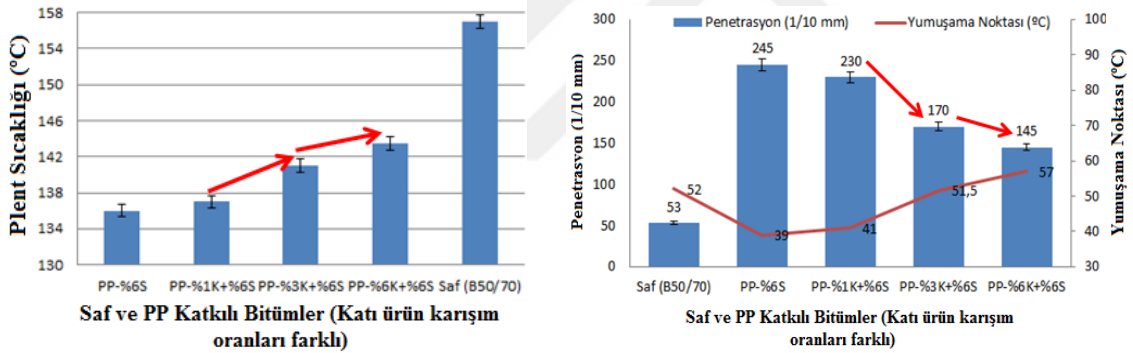
4.4.1.1.4 PP katkılı bitümlerde katkı oranı tayini

Bu aşamada, hem katı hem de sıvı ürün için uygun oran belirlenmiştir. Bu doğrultuda Şekil 4.23'teki deney şemasına göre testler yapılmıştır.



Şekil 4.23. PP katkıli bitümlerde katkı oranı tayini için hazırlanan deney şeması

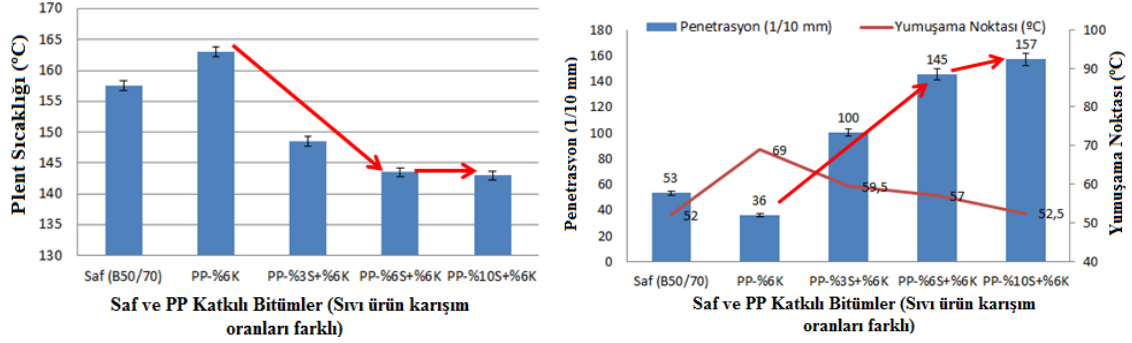
Katı ürün miktarını belirlemek için, bitüm ağırlığınca %0, 1, 3, 6 oranlarındaki PP katısı ile bitüm modifiye edilmiştir. Sıvı ürün miktarı %6 olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.24, bu gruba (PP₇) yapılan deneylerin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.24. Modifiye bitümlerin (PP₇) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Elde edilen sonuçlardan, etkili değişimin %1 katı oranından %3'e çıktığı durumda gerçekleştiği görülmektedir. Katı oranı %6'ya çıkarıldığında ise sonuçlardaki değişimin azaldığı görülmüştür. Bu noktada, PP %3K-%6S modifiye bitümle Marshall briketleri hazırlanmış (%4 ve %4.5 bitüm oranlarında) ve daha önce hazırlanan PP %6K-%6S ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, PP %3K-%6S'nin stabilitesi PP %6K-%6S'den %10 daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, PP %3K-%6S'nin plent sıcaklığı 141°C iken, PP %6K-%6S'nin plent sıcaklığı 143°C olarak belirlenmiştir. Yani, katı miktarını yarı yarıya azaltmak plent sıcaklığına da çok olumlu yansımamıştır. Bu sebeplerle, **optimum katı ürün oranı %6** olarak belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde, PP plastik atığın gerek orijinal haliyle gerekse de piroliz katı ürünü

olarak kullanıldığı çalışmalarda optimum oranın %5-6 arasında değiştiği görülmüştür (Abtahi ve ark., 2013; Ebrahim ve Karim, 2019; Al-Hadidy, 2006 ve Moubark ve ark., 2017).



Şekil 4.25. Modifiye bitümlerin (PP₈) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

PP₈ isimli deney grubunda, optimum sıvı ürün miktarı belirlenmiştir. Bu grupta, katı ürün miktarı % 6'da sabit tutulurken, sıvı ürün miktarı bitüm ağırlığınca %0, 3, 6, 10 oranlarında seçilmiştir. Yapılan testlerin sonuçları Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

Şekil 4.25'ten görüleceği üzere, sıvı katkı miktarı arttıkça bitüm yumuşamakta ve buna bağlı olarak plent sıcaklığı ve yumuşama noktası azalırken, penetrasyon değeri artmaktadır. Bu değişim sıvı oranı %6'dan %10'a çıktığında oldukça yavaşlamakta ve grafiklerde sabitleşmeler görülmektedir. Bu sebeple **optimum sıvı ürün miktarı %6** olarak alınmıştır.

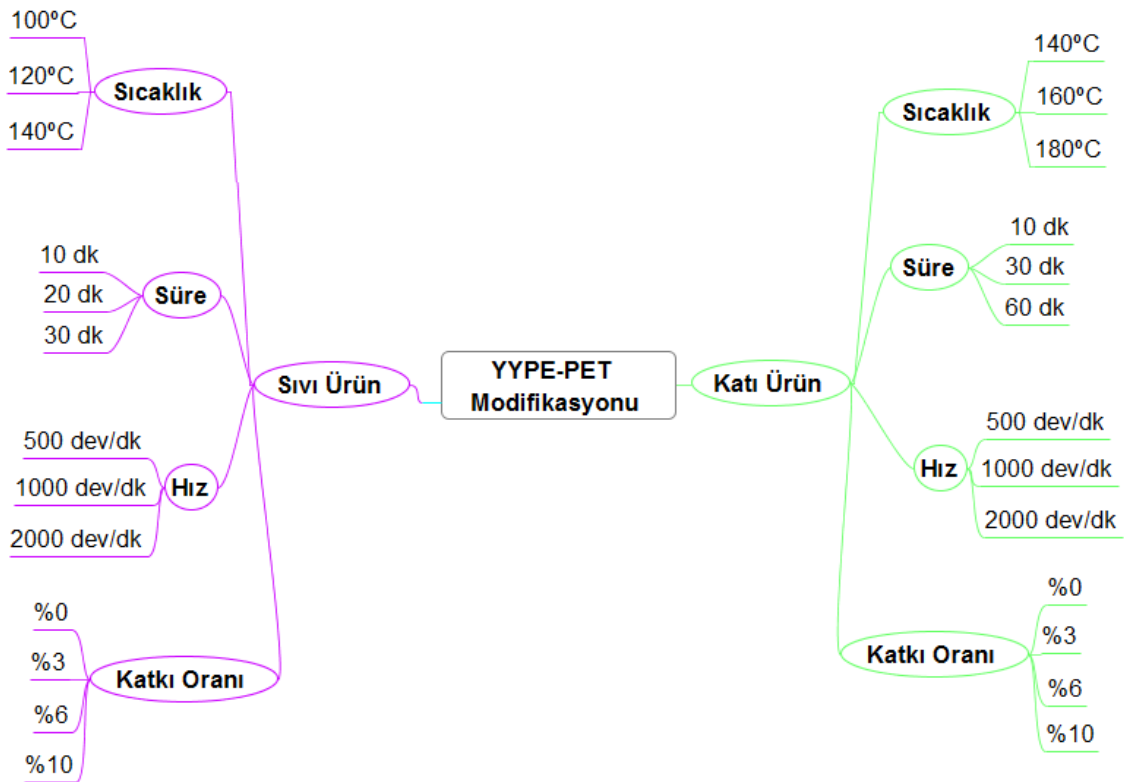
Özetle, PP modifiyeli bitüm hazırlanmasında kullanılacak parametreler, Çizelge 4.15'te görüldüğü gibi netleşmiştir. Bu parametrelerinin belirlenmesi aşamasında yapılan deneylerin toplu sonuçları EK.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. PP modifiyeli bitümün optimum üretim parametreleri

Parametreler	Katı	Sıvı
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	160	120
Karıştırma Süresi (dk)	10	20
Karıştırma Hızı (dev/dk)	2000	2000
Katı Oranı (%)	6	6
Plent Sıcaklığındaki Azalma	14°C	

4.4.1.2 YYPE-PET katkıli bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi

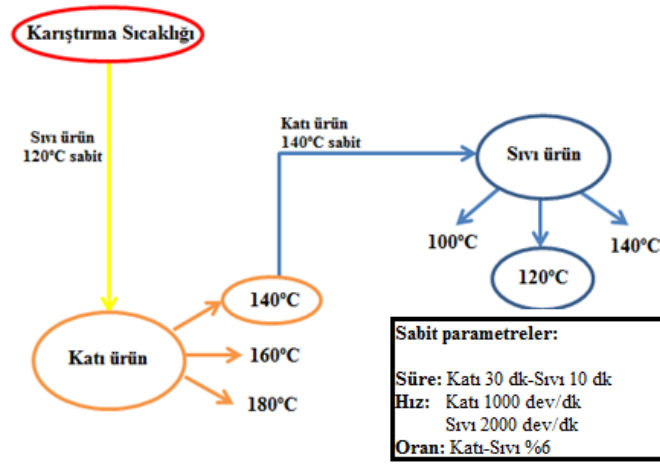
YYPE-PET katkıli bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi için farklı koşullarda (karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi, karıştırma hızı ve katkı oranı) modifiye bitümler hazırlanmıştır. Sonuçlar toplu halde Ek.2’de gösterilmiştir. Modifiye bitümlerin hazırlanmasında kullanılan parametre aralıkları Şekil 4.26’daki gibi belirlenmiştir.



Şekil 4.26. YYPE-PET katkıli bitümlerin hazırlanmasında kullanılan parametreler ve değer aralıkları

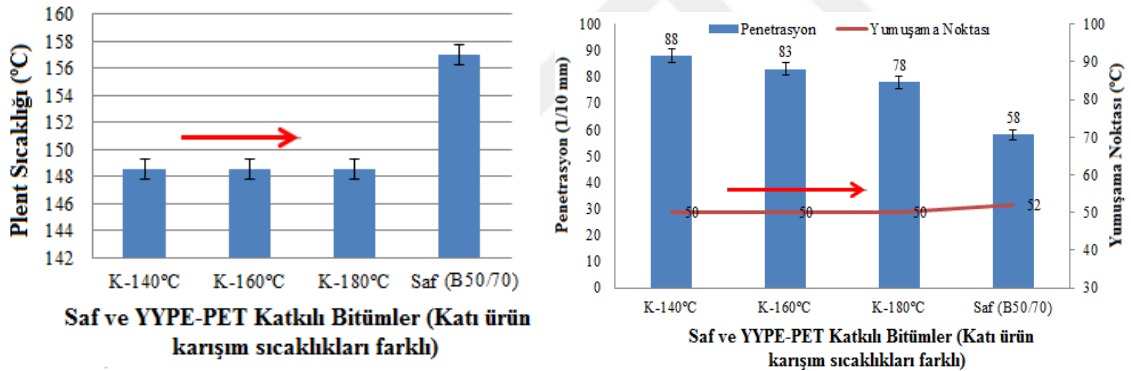
4.4.1.2.1 YYPE-PET katkıli bitümlerin karıştırma sıcaklığının tayini

YYPE-PET katkı ürünlerinin bitümlerle karışım sıcaklığının tayini için izlenecek deney akışı Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu aşamada yalnızca katı ve sıvı ürünlerin karıştırma sıcaklıkları değiştirilirken, diğer parametreler önceki deney gruplarında olduğu gibi sürekli sabit tutulmuştur.



Şekil 4.27. YYPE-PET katkıli bitümlerde karıştırma sıcaklığı tayini için hazırlanan deney akış şeması

Katı ürünün bitümle modifiyesinde karıştırma sıcaklığının etkisini araştırmak için sıvı ürün modifiye sıcaklığı 120°C’de sabit tutulurken, 140, 160 ve 180°C olmak üzere 3 farklı katı ürün modifiye sıcaklığı tercih edilmiştir. Bu gruba (YP₁) yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de sunulmuştur.

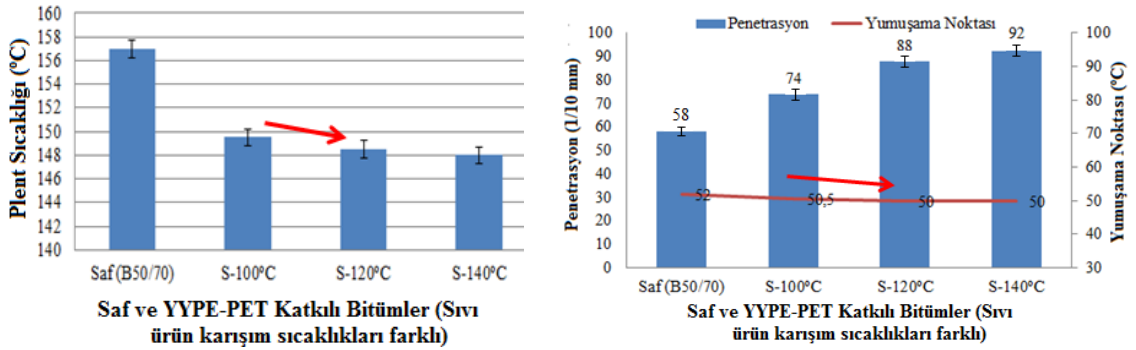


Şekil 4.28. Modifiye bitümlerin (YP₁) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Şekil 4.28’deki grafikler incelendiğinde, katı ürün karıştırma sıcaklığının, karışımın plent sıcaklığına **önemli bir etkisi olmadığı** görülmüştür. Yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple, katı ürün için karıştırma sıcaklığı 140 °C olarak seçilmiştir. Benzer sonuca Abed ve Bahia (2020) tarafından da ulaşıldığı görülmüştür.

Sıvı ürün karıştırma sıcaklığı tayini için hazırlanan deney grubunda (YP₂), katı ürün karıştırma sıcaklığı 140°C olarak sabit tutulurken, sıvı ürün 100, 120 ve 140°C’lerde modifiye edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, karışımların, plent sıcaklığı ve penetrasyon-yumuşama noktası

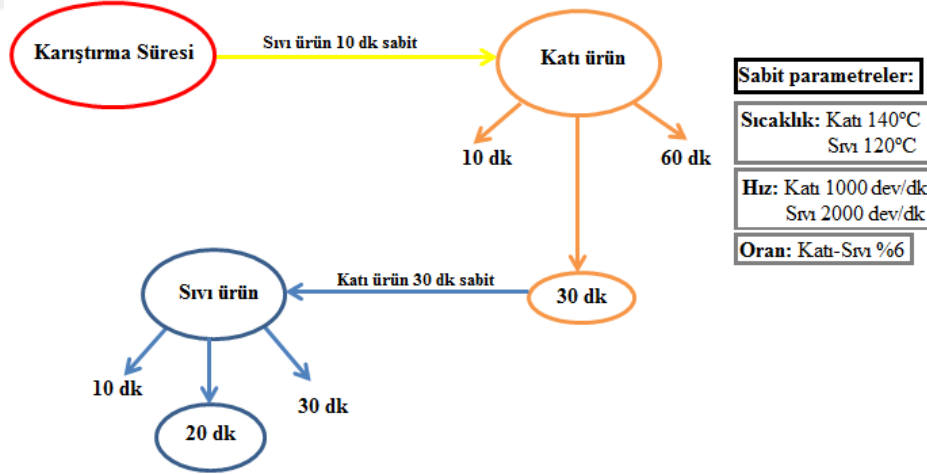
değerlerindeki **etkili değişimin** 100-120°C arasında olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple, sıvı ürün için optimum karıştırma sıcaklığının **120°C** olmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.29. Modifiye bitümlerin (YP₂) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

4.4.1.2.2 YYPE-PET katkıli bitümlerin karıştırma süresinin tayini

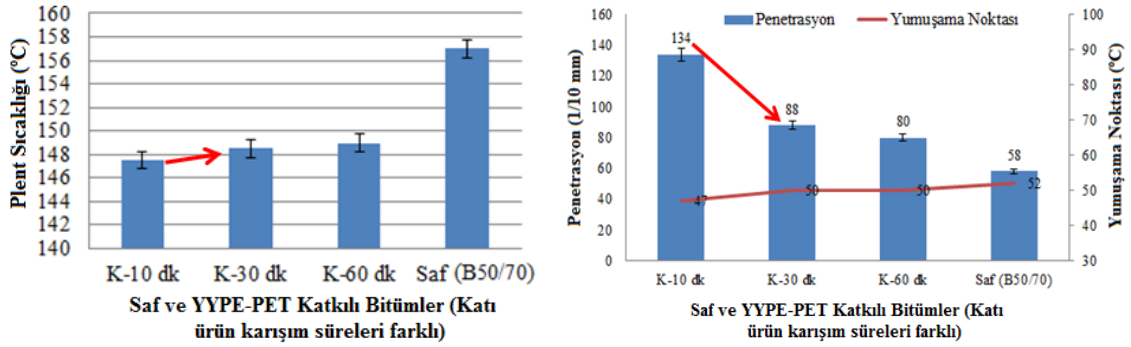
Katı ve sıvı katkı ürünlerinin karıştırma sürelerini belirlemek için Şekil 4.30'daki deney şablonu takip edilmiştir.



Şekil 4.30. YYPE-PET katkıli bitümlerde karıştırma süresinin tayini için hazırlanan deney akış şeması

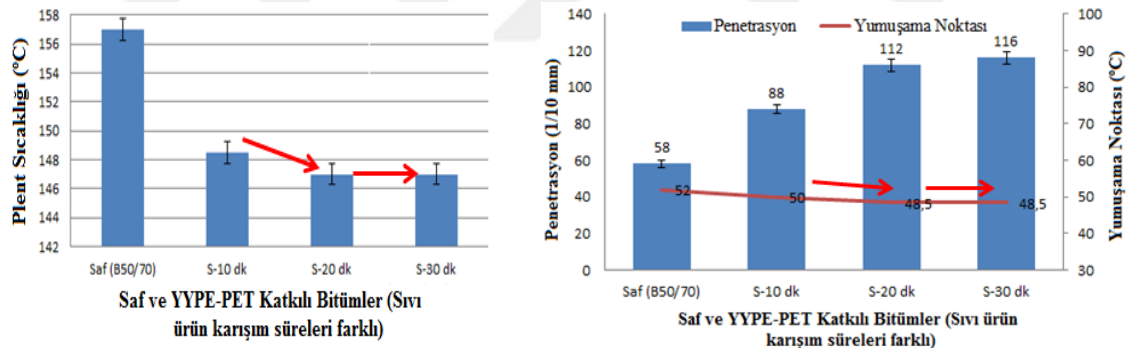
Katı ürün için karıştırma süresi tayininde (YP₃ grubu); 10, 30 ve 60 dk olmak üzere 3 farklı süre seçilmiştir. Sıvı ürün karıştırma süresi 10 dk olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.31'deki grafiklerden görüldüğü üzere, karıştırma süresinin 10 dk'dan 30 dk'ya çıkması, sonuçlar üzerinde etkili değişim oluşturmuştur. Bu sebeple katı ürün karıştırma süresi **30 dk** olarak belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde, Shang ve ark. (2011) ve

Hınıslioğlu ve Ağar (2004) tarafından yapılan çalışmalarda da ürünün aynı sürede karıştırıldığı görülmüştür.



Şekil 4.31. Modifiye bitümlerin (YP₃) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

YP₄ deney grubunda ise, katı ürün karıştırma süresi 30 dk olarak sabit tutulurken, sıvı ürün karıştırma süresi 10, 20 ve 30 dk olarak seçilmiştir. Şekil 4.32’de, bu parametrelerle ile hazırlanan modifiye bitümlere yapılan test sonuçları görülmektedir.

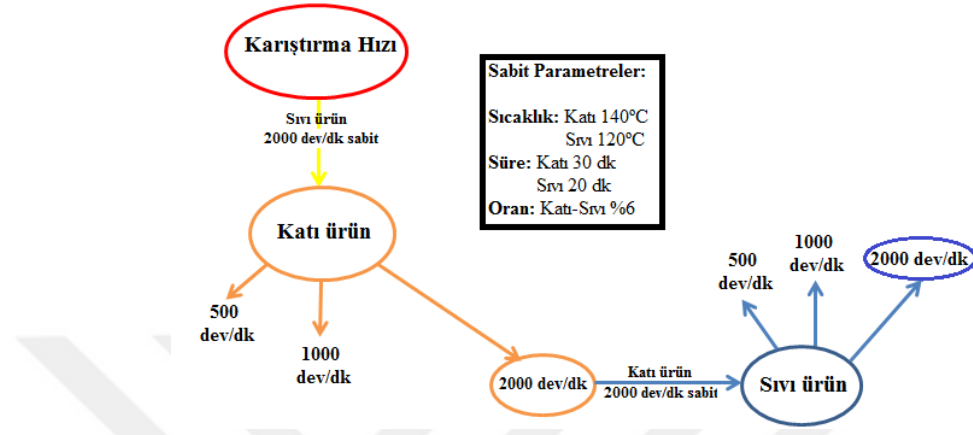


Şekil 4.32. Modifiye bitümlerin (YP₄) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Sıvı ürünün karıştırma süresi arttıkça, karışımın viskozitesinin azaldığı buna bağlı olarak, plent sıcaklığı ve yumuşama noktası değerlerinin düştüğü, Şekil 4.32’deki grafiklerden görülmektedir. Değişimin en büyük olduğu kısmın 10-20 dk arasında olması ve 20 dk’dan sonra değerlerin sabitleşmesi sebepleriyle sıvı ürün için optimum karıştırma süresi **20 dk** olarak tayin edilmiştir.

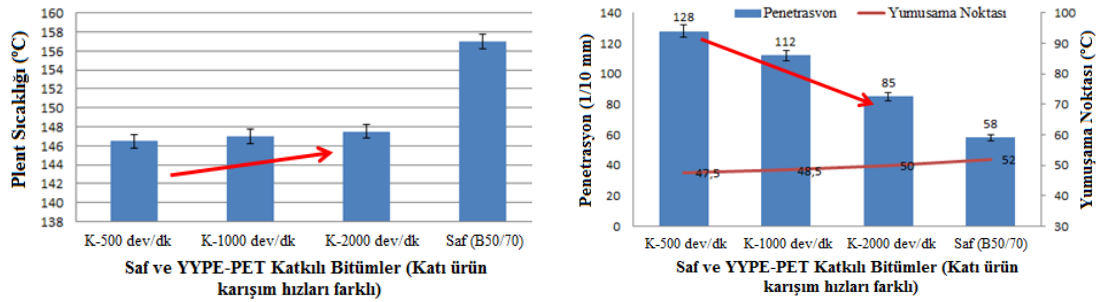
4.4.1.2.3 YYPE-PET katkıli bitümlerin karıştırma hızının tayini

YYPE-PET katkısı için katı ve sıvı katkı ürünlerinin karıştırma hızları, Şekil 4.33'teki deney düzeni takip edilerek belirlenmiştir.



Şekil 4.33. YYPE-PET katkıli bitümlerde karıştırma hızının tayini için hazırlanan deney akış şeması

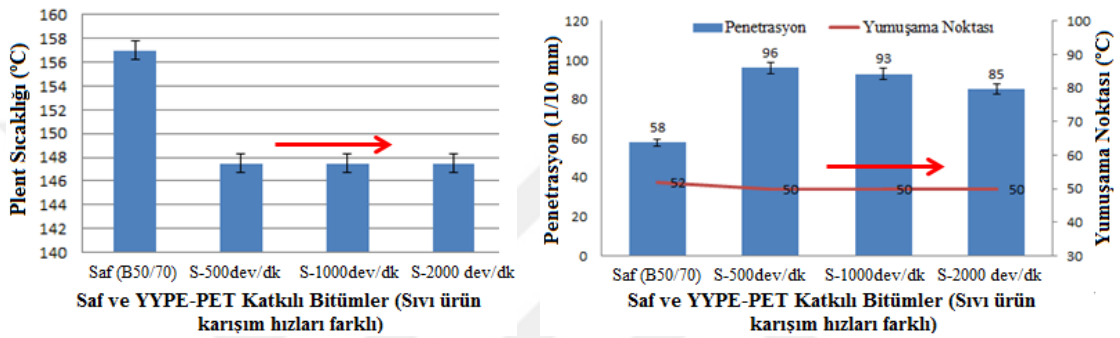
Katı ürün karıştırma hızı tayininde, sıvı ürün 2000 dev/dk hızda karıştırılmıştır. Katı ürün karıştırma hızı ise 500, 1000 ve 2000 dev/dk olarak seçilmiştir. Bu deney grubuna (YP₅) yapılan testlerden elde edilen sonuçlara Şekil 4.34'te yer verilmiştir.



Şekil 4.34. Modifiye bitümlerin (YP₅) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Şekil 4.34'teki grafikler gösteriyor ki, karıştırma hızı arttıkça ürün sertleşmekte, buna bağlı olarak plent sıcaklığı ve yumuşama noktası değerleri artmaktadır. Cihazın maksimum kapasitesi 2000 dev/dk olduğundan daha yüksek hızlarda deneme yapılamamış ve grafiklerde sabitleşme görülememiştir. Bu sebeple optimum hız **2000 dev/dk** olarak seçilmiştir.

Sıvı üründe karıştırma hızının etkisini görebilmek için; 500, 1000 ve 2000 dev/dk olarak farklı hızlar seçilmiştir. Burada, katı ürün karıştırma hızı 2000 dev/dk'de sabit tutulmuştur. Şekil 4.35'teki deney sonuçlarından (YP₆ grubu) görüleceği üzere, sıvı ürünün karıştırma hızının, karışımın özellikleri üzerinde **önemli bir etkisinin olmadığı** tespit edilmiştir. Modifikasyon işlemlerinde yüksek hızların tercih edildiği çalışmalara literatürde de rastlandığından **2000 dev/dk** ile yola devam edilmesine karar verilmiştir (Gao ve ark., 2018; Chen ve ark., 2018; Tang ve ark., 2018; Ge ve ark., 2017; Zhao ve ark., 2017).



Şekil 4.35. Modifiye bitümlerin (YP₆) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

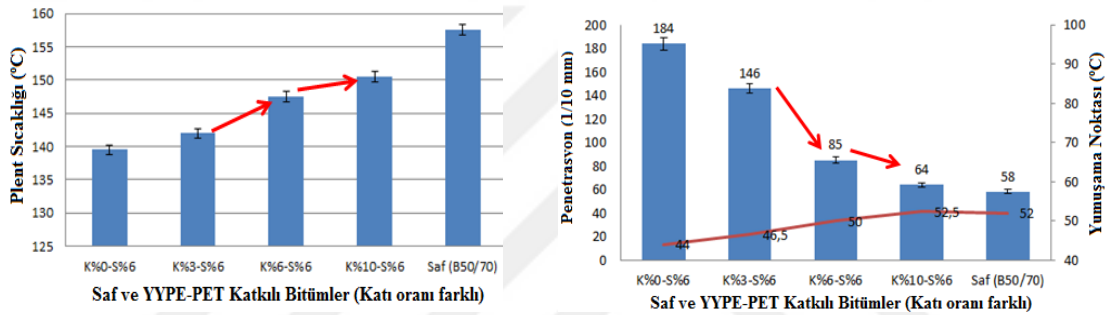
4.4.1.2.4 YYPE-PET katkıli bitümlerde katkı oranı tayini

Katkı oranı belirlenirken dikkate alınan deney şeması Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu şemaya göre hem katı hem de sıvı ürün oranları sırasıyla %0, 3, 6, 10 oranlarında değiştirilerek ürün miktarlarının modifikasyona olan etkisi incelenmiştir.



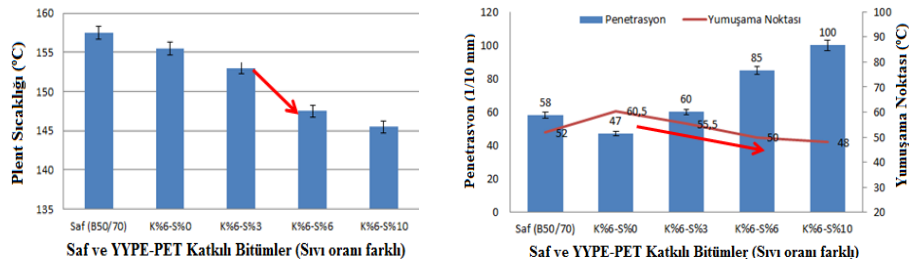
Şekil 4.36. YYPE-PET katkıli bitümlerde katkı oranı tayini için hazırlanan deney akış şeması

Katı ürün miktarındaki değişimi görebilmek için, sıvı ürün %6'da sabit tutulmuştur. Katı ürün %0, 3, 6, 10 aralığında değiştirilerek değişim incelenmiştir. Şekil 4.37'deki grafiklerden görüleceği üzere katı ürünün artması karışımı sertleştirmektedir. Sonuçlardaki en büyük değişimin, katı ürün miktarının %3'ten %6'ya çıktığı modifiye bitümde olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla optimum katı ürün oranı %6 olarak seçilmiştir. YYPE ve PET plastik atığının kullanıldığı çalışmalara bakıldığında çoğunlukla en uygun katkı oranının %6-8 arasında değiştiği görülmüştür (Ahmadinia ve ark., 2011; Maharaj ve ark., 2018; Mashaan ve ark., 2021). Ancak, YYPE plastiğinin kullanıldığı bazı çalışmalarda optimum katkı miktarının %4-5 arasında olduğuna da rastlanılmıştır (Costa ve ark., 2019; Hımslıoğlu ve Açar, 2004).



Şekil 4.37. Modifiye bitümlerin (YP₇) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

YP₈ karışım grubunda ise, sıvı ürün miktarı, grafiklerden (Şekil 4.38) görüleceği üzere bitüm ağırlığınca %0, 3, 6, 10 oranlarında tercih edilmiştir. Katı ürün %6 oranında sabit tutulmuştur. Grafikler gösteriyor ki, sıvı ürün miktarı arttıkça bitüm yumuşamakta ve buna bağlı olarak plent sıcaklığı ve yumuşama noktası değerleri düşmektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere etkili değişim, modifiye bitümlerde sıvı ürün oranının %3'ten %6'ya çıktığı durumda gerçekleşmiştir. %6'dan sonra değerler sabitleşmeye başlamıştır. Bu sebeple optimum sıvı ürün oranı %6 olarak tercih edilmiştir.



Şekil 4.38. Modifiye bitümlerin (YP₈) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

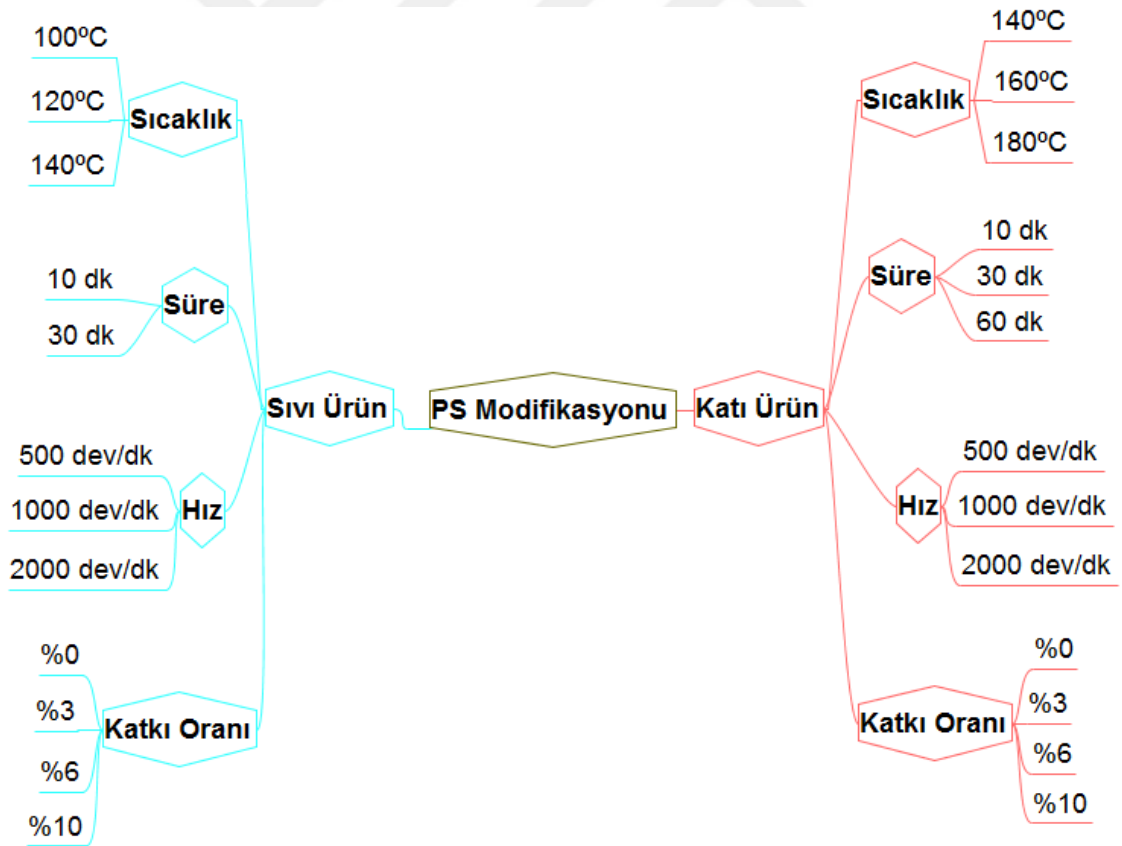
Özetle, YYPE-PET modifiyeli bitümün hazırlanmasında kullanılan optimum parametreler, Çizelge 4.16’da görüldüğü gibi netleşmiştir.

Çizelge 4.16. YYPE-PET modifiyeli bitüme ait optimum parametreler

Parametreler	Katı	Sıvı
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	140	120
Karıştırma Süresi (dk)	30	20
Karıştırma Hızı (dev/dk)	2000	2000
Katkı Oranı (%)	6	6
Plant Sıcaklığındaki Azalma	10°C	

4.4.1.3 PS katkılı bitümlerin üretim parametrelerinin belirlenmesi

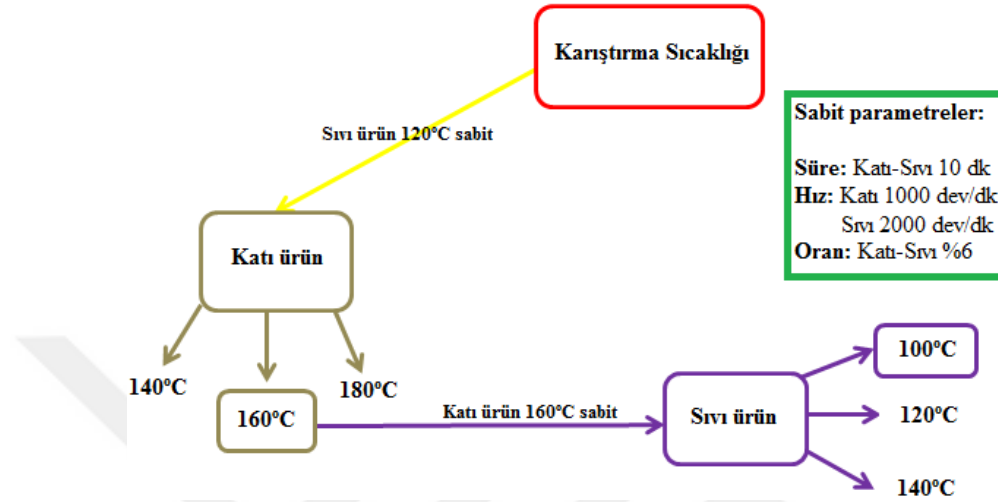
PS modifiyeli bitümün üretim parametreleri de diğer katkılı bitümlerin üretim sürecine benzer şekilde belirlenmiştir. Katkılı bitümlerin hazırlanmasında tercih edilen parametreler ve değer aralıkları Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



Şekil 4.39. PS katkılı bitümlerin hazırlanmasında kullanılan parametreler ve değer aralıkları

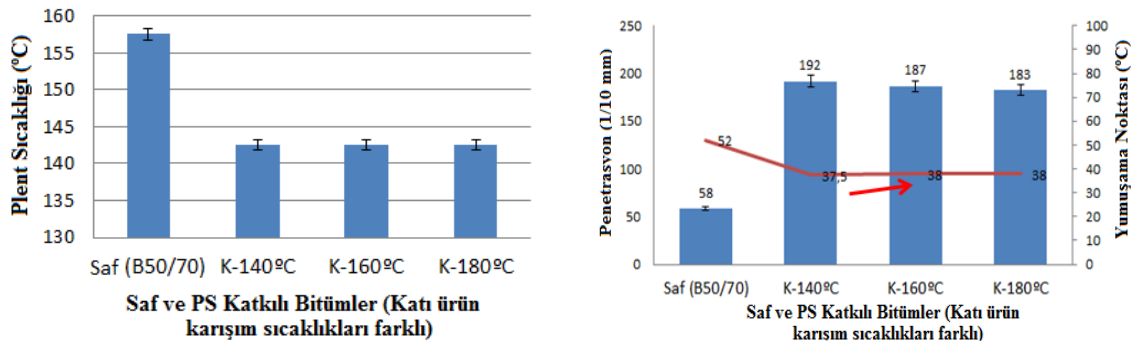
4.4.1.3.1 PS katkılı bitümlerin karıştırma sıcaklığının tayini

Katı ve sıvı katkı ürünlerinin karıştırma sıcaklığını belirlemek için Şekil 4.40'daki deney şablonu takip edilmiştir.



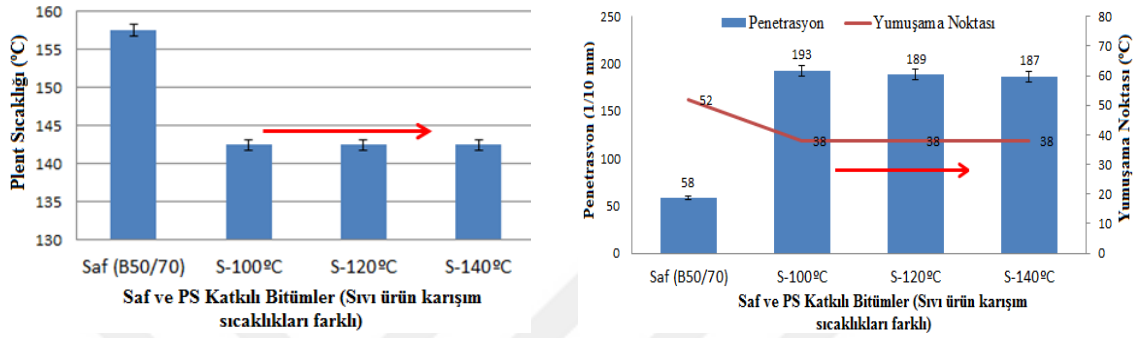
Şekil 4.40. PS katkılı bitümlerde karıştırma sıcaklığı tayini için hazırlanan deney şeması

PS₁ grubunda, katı ürün 140, 160 ve 180°C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta modifiye edilmiştir. Bu süreçte sıvı ürün sıcaklığı 120°C'de sabit tutulmuştur. Hazırlanan modifiye bitümlere yapılan testlerin sonuçları Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, katı ürün karıştırma sıcaklığının karışımın plent sıcaklığına önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Yumuşama noktası ve penetrasyon değerlerinde etkili değişimin 140-160°C arasında olduğu saptandığından, katı ürün için karıştırma sıcaklığı **160°C** olarak seçilmiştir.



Şekil 4.41. Modifiye bitümlerin (PS₁) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

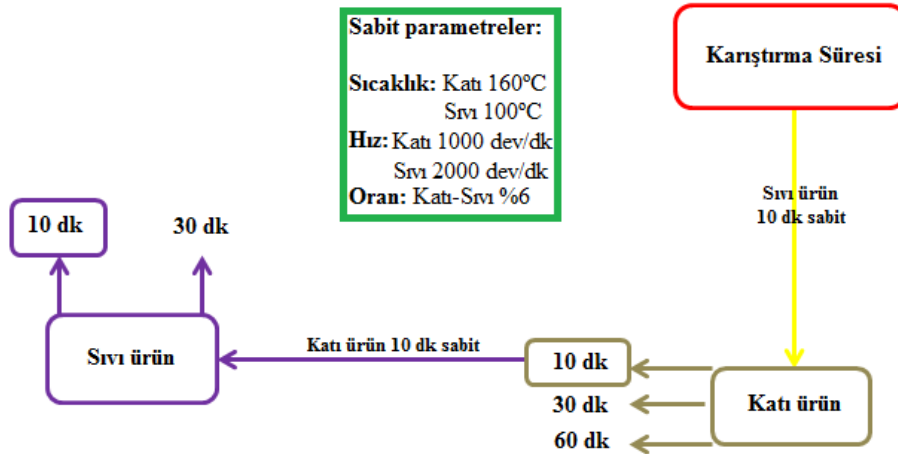
Sıvı ürünün karıştırma sıcaklığının tayin edildiği bu deney grubunda (PS₂), katı ürün karıştırma sıcaklığı 160°C olarak sabit tutulurken, sıvı ürün 100, 120 ve 140°C’lerde modifiye edilmiştir. Şekil 4.42’den görüldüğü üzere, sıvı karıştırma sıcaklığının plent sıcaklığı veya penetrasyon-yumuşama noktası değerleri üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Bu sebeple, sıvı ürün için karıştırma sıcaklığı 100°C olarak seçilmiştir.



Şekil 4.42. Modifiye bitümlerin (PS₂) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

4.4.1.3.2 PS katkılı bitümlerin karıştırma süresinin tayini

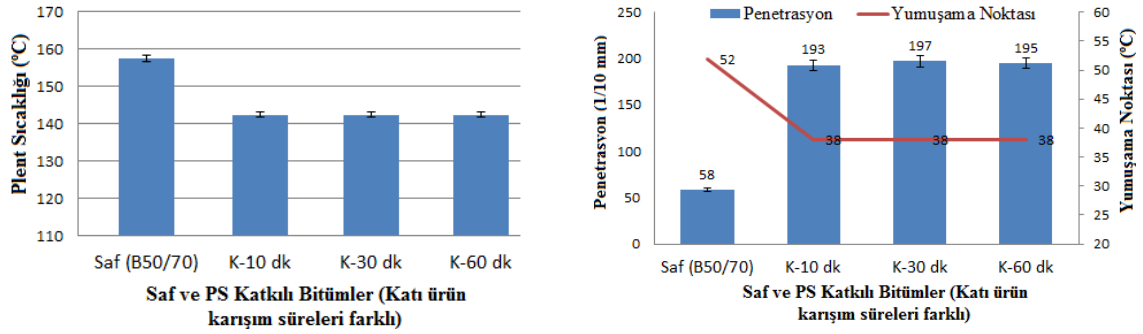
PS katkı grubunun karıştırma süresi tayininde takip edilen deney şeması Şekil 4.43’te gösterilmektedir.



Şekil 4.43. PS katkılı bitümlerde karıştırma süresi tayini için hazırlanan deney şeması

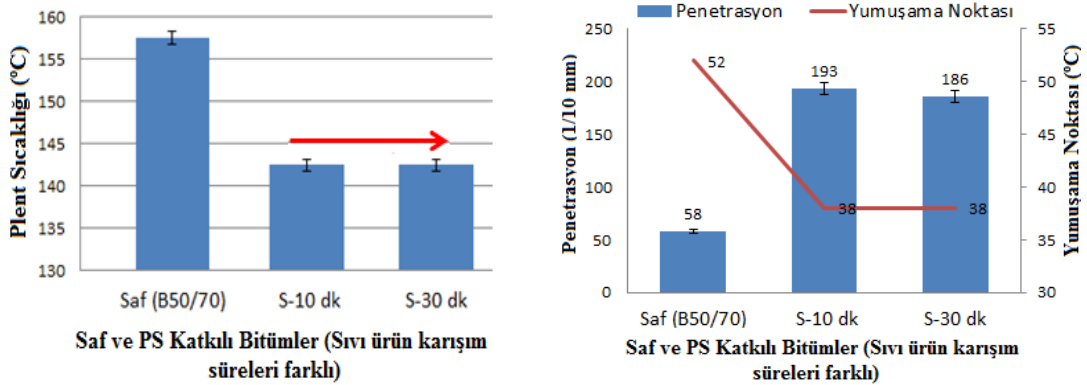
Katı ürün için karıştırma süresi tayininde; 10, 30 ve 60 dk olmak üzere 3 farklı süre seçilmiştir. Sıvı ürün karıştırma süresi 10 dk olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.44’teki deney sonuçlarından görüleceği üzere, katı ürün karıştırma süresinin modifiye

bitümler üzerinde herhangi **bir etkisi olmamıştır**. Bu sebeple katı ürün karıştırma süresi **10 dk**'da tutulmuştur.



Şekil 4.44. Modifiye bitümlerin (PS₃) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

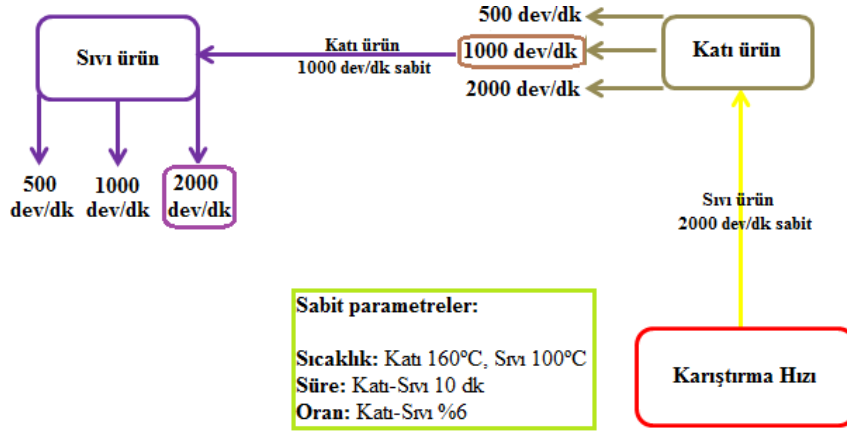
PS₄ deney grubunda sıvı ürün için karıştırma süresi belirlenmiştir. Bu grupta katı ürün karıştırma süresi 10 dk olarak sabit tutulurken, sıvı ürün karıştırma süresi için 10 ve 30 dk seçilmiştir. Sıvı ürün karıştırma süresinin, deney sonuçları üzerinde etkili olmadığı Şekil 4.45'teki grafiklerden görülmektedir. Bu sebeple sıvı ürün karıştırma süresi **10 dk** olarak tayin edilmiştir.



Şekil 4.45. Modifiye bitümlerin (PS₄) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

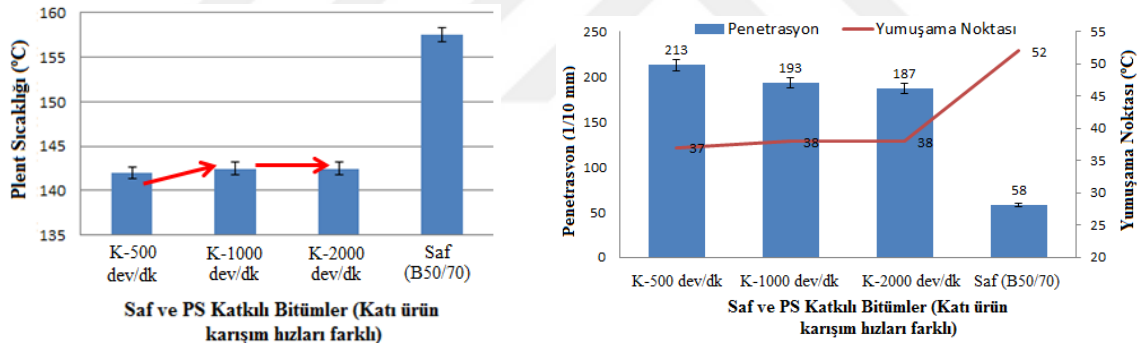
4.4.1.3.3 PS katkıli bitümlerin karıştırma hızının tayini

Katı ve sıvı katkı ürünlerinin karıştırma hızları Şekil 4.46'daki deney düzeni takip edilerek belirlenmiştir.



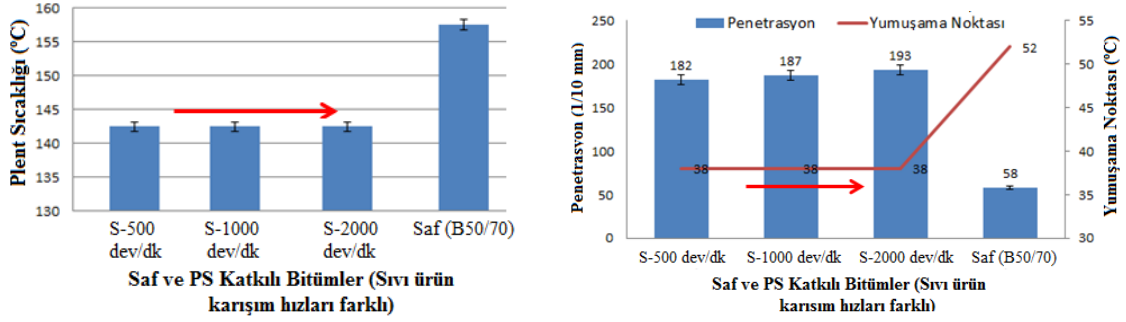
Şekil 4.46. PS katkılı bitümlerde karıştırma hızı tayini için hazırlanan deney şeması

Katı ürün karıştırma hızı tayininde (PS₅ grubu), sıvı ürün karıştırma hızı 2000 dev/dk değerinde sabit tutulmuştur. Katı ürün karıştırma hızı ise 500, 1000 ve 2000 dev/dk olarak seçilmiştir. Karıştırma hızının 500 dev/dk'den 1000 dev/dk'ye çıkması, sonuçlar üzerinde etkili değişim oluşturmuştur (Şekil 4.47). Bu sebeple katı ürün için optimum karıştırma hızı **1000 dev/dk** olarak seçilmiştir.



Şekil 4.47. Modifiye bitümlerin (PS₅) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

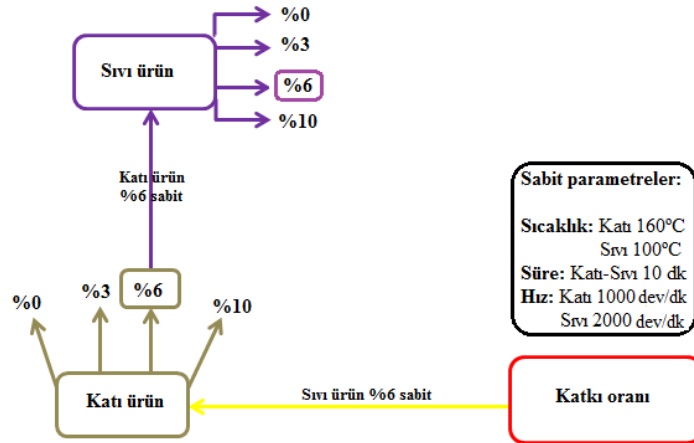
PS₆ grubunda sıvı ürün için karıştırma hızının etkisini görebilmek amacıyla 500,1000 ve 2000 dev/dk olarak farklı hızlar seçilmiştir. Burada, katı ürün karıştırma hızı 1000 dev/dk'de sabit tutulmuştur. Grafikler incelendiğinde (Şekil 4.48), sıvı ürünün karıştırma hızının, karışımın özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Daha önce yapılan modifikasyonlarda kullanılan değer olan 2000 dev/dk ile yola devam edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 4.48. Modifiye bitümlerin (PS6) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

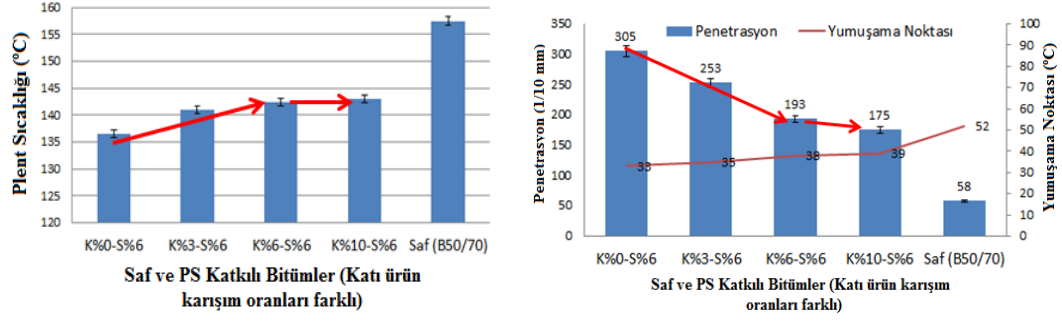
4.4.1.3.4 PS katkıli bitümlerde katkı oranı tayini

PS katkı miktarını belirlemek için hem katı ürün hem de sıvı ürün diğer deneylerde olduğu gibi biri sürekli sabit tutularak %0, 3, 6, 10 oranlarında bitüme ilave edilmiştir. İlgili deney dizini Şekil 4.49'da şematize edilmiştir.



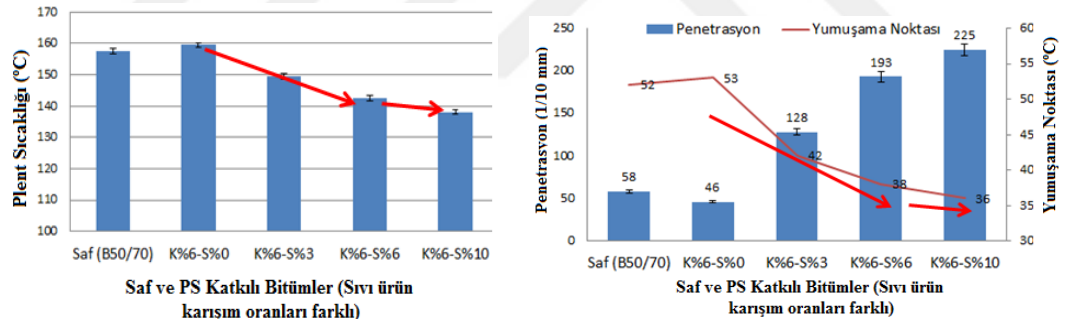
Şekil 4.49. PS katkıli bitümlerde katkı oranı tayini için hazırlanan deney şeması

Katı ürün miktarındaki değişimi görebilmek için (PS₇ grubu) sıvı ürün %6'da sabit tutulmuştur. Katı ürün %0, 3, 6, 10 aralığında değiştirilerek değişim incelenmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere katı ürünün artması karışımı sertleştirmektedir. Katı oranı %6 olana kadar sonuçlardaki değişim devam etmekte, %6'dan sonra oldukça yavaşlamaktadır (Şekil 4.50). Dolayısıyla **optimum katı ürün oranı %6** olarak seçilmiştir. Colbert ve You (2012) ve Hasan ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da oldukça yakın sonuçlar (bitüm ağırlığınca optimum oran %5) elde edilmiştir.



Şekil 4.50. Modifiye bitümlerin (PS₇) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Sıvı ürünün miktarını belirlemek için bu karışım grubunda (PS₈) kıta ürün %6 oranında sabit tutulmuştur. Sıvı ürün miktarı, Şekil 4.51'den görüleceği üzere %0, 3, 6, 10 oranlarında bitüme eklenmiştir. Grafikler gösteriyor ki, sıvı ürün miktarı arttıkça bitüm yumuşamakta ve buna bağlı olarak plent sıcaklığı düşmektedir. Bu sonuçlardan etkili değişimin, sıvı ürün oranı %6 oluncaya kadar devam ettiği anlaşılmaktadır. %6'dan sonra değerler sabitleşmeye başlamıştır. Bu sebeple **optimum sıvı ürün oranı %6** olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.51. Modifiye bitümlerin (PS₇) plent sıcaklıkları (solda) ve penetrasyon-yumuşama noktası değerleri (sağda)

Özetle, PS modifiyeli bitüme ait optimum üretim parametreleri Çizelge 4.17'de görüldüğü gibi netleşmiştir. Üretim parametrelerinin belirlenmesi aşamasında yapılan deneylerin toplu sonuçları EK.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. PS modifiyeli bitüme ait optimum parametreler

Parametreler	Kıta	Sıvı
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	160	100
Karıştırma Süresi (dk)	10	10
Karıştırma Hızı (dev/dk)	1000	2000
Katkı Oranı (%)	6	6
Plent Sıcaklığındaki Azalma	15°C	

4.4.2 Sasobit® katkıli modifiye bitümün penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite test sonuçları

Tez çalışmasında, piroliz ürünleri kullanılarak hazırlanan modifiye bitümlerin test sonuçları hem saf bitümle hem de ticari IKA katkısı olan Sasobit® modifiyeli bitümle karşılaştırılmıştır. Bu kısımda, Sasobit® modifiyeli bitümler hazırlanarak penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite testleri yapılmıştır.

Sasobit® modifiyeli bitüm hazırlanmasında, üretim koşulları ayrıca belirlenmemiştir. Bu konuda literatür incelemesi yapılarak ilgili parametreler aşağıda gösterildiği gibi belirlenmiştir:

- *Karıştırma Sıcaklığı:* 150°C (Liu ve ark., 2018; Gao ve ark., 2018; Ge ve ark., 2017; Qin ve ark., 2014)
- *Karıştırma Süresi:* 1 saat (Qin ve ark., 2014 ve Kök ve ark., 2014)
- *Karıştırma Hızı:* 2000 dev/dk (Literatürde 3000-4000 dev/dk arasında değişmektedir.)
- *Katkı oranı:* Bitüm ağırlığına %3 (Liu ve ark., 2018; Ge ve ark., 2017)

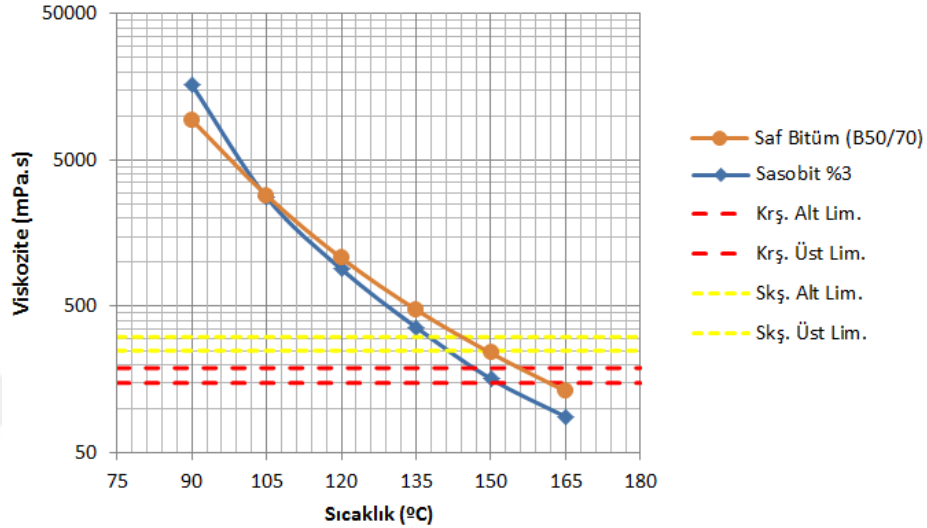
Yukarıda belirtilen üretim koşulları ile hazırlanan Sasobit® modifiyeli bitümlere ait penetrasyon ve yumuşama noktası test sonuçları Çizelge 4.18’de, viskozite sonuçları ise Şekil 4.52’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Saf ve Sasobit® modifiyeli bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları

Bitüm Tipi	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama Noktası (°C)
Saf bitüm (B50/70)	58	52
%3 Sasobit® modifiyeli bitüm	32	85

Çizelge 4.18 incelendiğinde, Sasobit® katkısının ilavesi ile bitümün sertleştiği ve buna bağlı olarak penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktası değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.52’ye göre ise, Sasobit® katkısı bitümün yüksek sıcaklıklardaki viskozitesini azaltarak plent sıcaklığının azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca yine aynı grafikten, 105°C’de saf ve Sasobit® modifiyeli bitümün viskozitelerinin neredeyse eşitlendiği, bu sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda ise Sasobit® modifiyeli bitümün daha viskoz bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, Sasobit®’in bitüm içerisinde 90°C’den sonra erimeye başladığını göstermektedir. Bu sonuç, Sasobit®’in

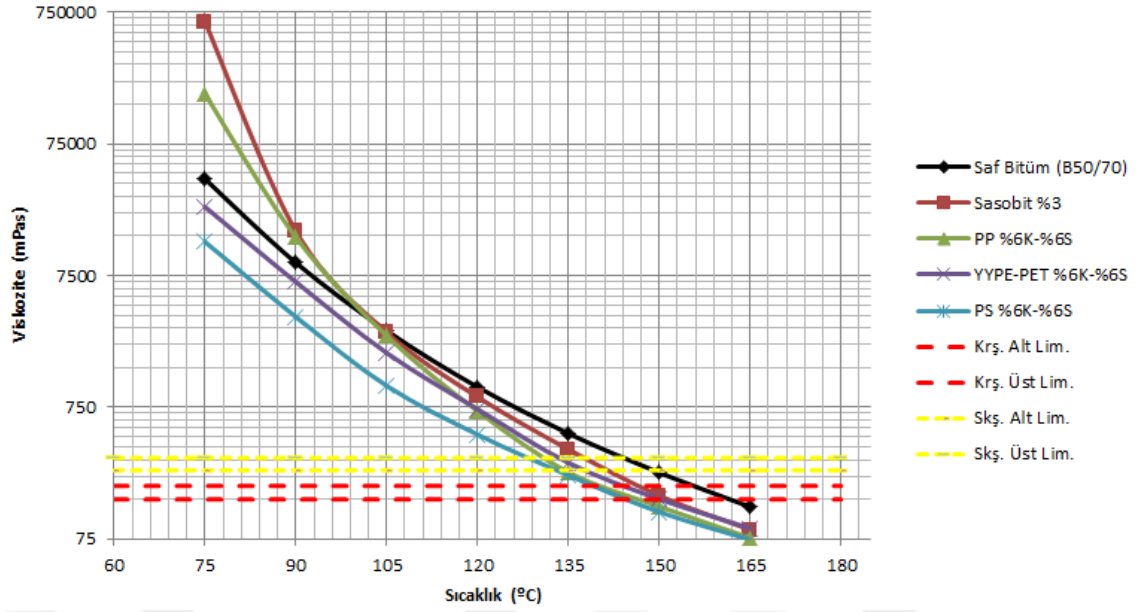
literatürde belirtilen erime sıcaklık değerleri ile de uyum göstermektedir (D'angelo ve ark., 2008; Rubio ve ark., 2012). Ayrıca, düşük sıcaklıklarda Sasobit® modifiyeli bitümün daha viskoz davranış sergilemesi, penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları ile de örtüşmüştür.



Şekil 4.52. Sasobit® modifiyeli ve saf bitümün viskozite-sıcaklık grafiği

4.4.3 Optimum parametrelerle hazırlanan piroliz katkıli modifiye bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite test sonuçları

Piroliz katkıları ile optimum üretim koşullarında hazırlanan modifiye bitümlerin, saf bitümün ve Sasobit® modifiyeli bitümün viskozite sonuçları birlikte Şekil 4.53'te sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde görülmüştür ki, katkıli bitümlerin tamamı yüksek sıcaklıklarda saf bitümün viskozitesini ve dolayısıyla plent sıcaklığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Piroliz katkıli bitümlerden, PP %6K-%6S modifiyeli bitüm, düşük sıcaklıklarda (75-105°C) saf bitümden daha viskoz davranış sergilerken, yüksek sıcaklıklarda saf bitüme göre çok daha akışkan özellik göstermektedir. Bu sonuçlarla, PP %6K-%6S katkısının, Sasobit® IKA katkısına çok benzer bir viskozite-sıcaklık davranışı sergilediği söylenebilir. Diğer piroliz katkıları ile hazırlanan modifiye bitümler ise, düşük sıcaklık bandında saf bitüme yakın viskozite değerlerine sahip iken, sıcaklık arttıkça katkıli bitümlerin viskozitelerinin saf bitümden daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. İlgili bitümlere ait karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ile penetrasyon ve yumuşama noktası sonuçları Çizelge 4.19'da toplu olarak sunulmuştur.

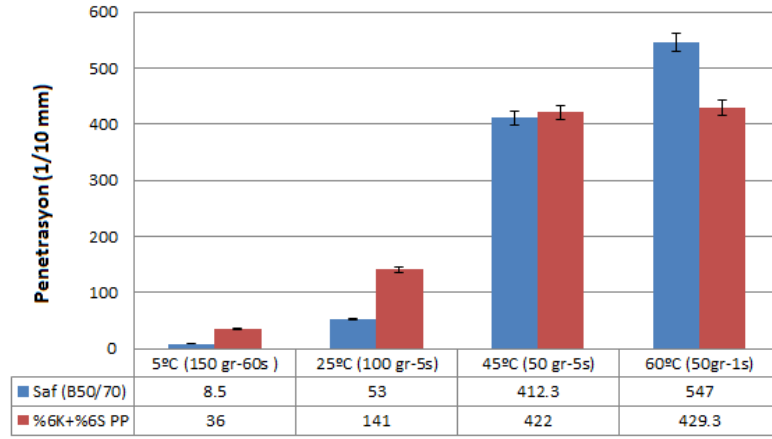


Şekil 4.53. Saf ve katkıli bitümlerin viskozite-sıcaklık grafiği

Çizelge 4.19. Saf ve modifiye bitümlere ait toplu deney sonuçları

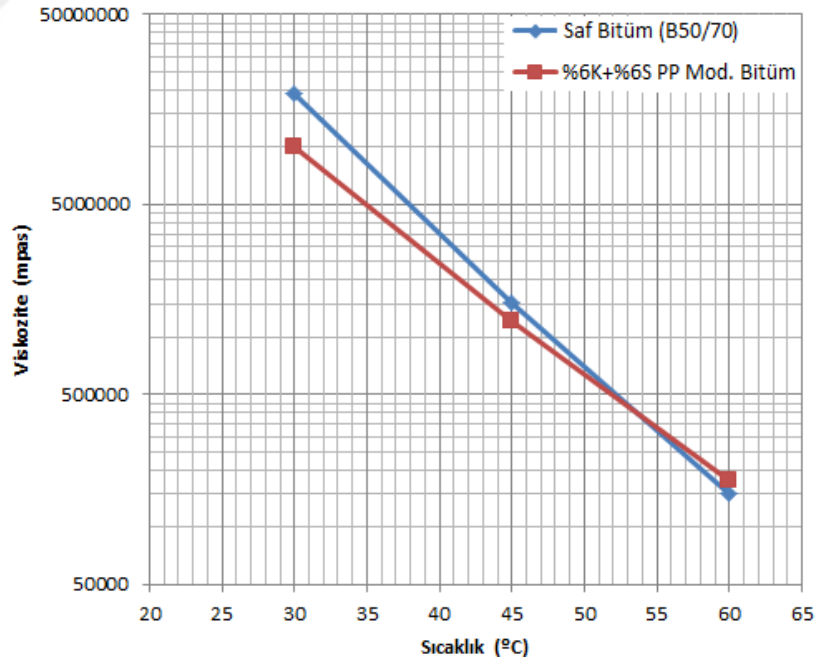
Bitüm Tipi	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama Noktası (°C)	Karıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklık Aralığı (°C)
Saf bitüm (B50/70)	58	52	155-160	146-150
%3 Sasobit® modifiyeli bitüm	32	85	146-152	138-141
PP modifiyeli bitüm (%6K-6S)	145	57	141-146	131-135
YYPE-PET modifiyeli bitüm (%6K-6S)	85	50	145-150	134-138
PS modifiyeli bitüm (%6K-6S)	193	38	140-145	130-134

Çizelge 4.19’da piroliz katkıli bitümlerin penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerine bakıldığında, piroliz ürünlerinin bitümü yumuşattığı ve dolayısıyla penetrasyon değerlerini arttırdığı söylenebilir. Benzer şekilde bu durum yumuşama noktası değerlerinin de düşmesiyle sonuçlanmıştır. Burada, PP %6K-%6S modifiyeli bitüm için farklı bir durum oluşmuştur. Çizelgeden görüleceği üzere, PP %6K-%6S modifiyeli bitümün hem penetrasyon değeri hem de yumuşama noktası saf bitümden daha yüksek sonuç vermiştir. Bu sık karşılaşılan bir durum değildir. Bu sebeple, bu farklı durumu derinlemesine incelemek için farklı sıcaklıklarda ve yükleme koşullarında penetrasyon testleri yapılmıştır. Şekil 4.54, bu test sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.54. Saf ve PP katkılı bitüme farklı koşullarda yapılan penetrasyon testi sonuçları

Şekil 4.54'ten çıkarılacak sonuç şudur: Penetrasyon testinin yapıldığı sıcaklık arttırıldığında, saf bitümün penetrasyon değeri (mavi sütun) gittikçe katkılı bitüme (kırmızı sütun) yaklaşmakta ve sıcaklık 60°C'ye geldiğinde artık saf bitümün penetrasyon değeri katkılı bitümü geçmektedir. Yani sıcaklık arttıkça, **saf bitüm** katkılı bitüme göre **daha hızlı yumuşamaktadır**. Bu durum Şekil 4.55'te gösterilen, düşük sıcaklıklarda (30, 45 ve 60°C) yapılan viskozite-sıcaklık grafiğinde de görülmüştür.



Şekil 4.55. Saf ve PP katkılı bitüme düşük sıcaklıklarda 07 nolu spindle kullanılarak yapılan viskozite testi sonuçları

Şekil 4.55'teki viskozite-sıcaklık grafiği incelendiğinde görülüyor ki, saf bitüm düşük sıcaklıklarda katkılı bitümden daha viskoz davranış sergilemektedir. Ancak

sıcaklık yaklaşık olarak 50°C'yi geçtiğinde katkılı bitümün saf bitümden daha viskoz davranış gösterdiği grafikten görülmektedir.

Bu durumu daha derinlemesine incelemek için, katkılı ve saf bitümlere ilave testler (FTIR, SEM, Zeta Potansiyeli ve DSC) yapılmıştır. Bu testlerin ayrıntılı sonuçlarına *Bölüm 4.6'da* yer verilmiştir. Bu farklı durum özelinde, ilgili test sonuçları şu şekilde yorumlanmıştır:

- PP katkı maddelerinin (katı ve sıvı ürün) bitüm içerisinde uniform dağıldığı ve toplanmadığı SEM analizi ile görülmüştür. Ayrıca, Zeta Potansiyeli ölçümü ile katkı maddelerinin bitüm içerisinde çökelmediği (askıda kaldığı) ve dağılımının kararlı hale oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, penetrasyon-yumuşama noktası deneylerinden elde edilen beklenmedik sonuçların, katkı maddelerinin bitüm içerisindeki dağılma, çökme veya toplanma probleminden kaynaklanmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, saf ve katkılı bitümlere yapılan FTIR testi ile katkı-bitüm modifikasyon mekanizmasının fiziksel olarak gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu sonuç, piroliz ürünlerinin bitümün kimyasal bağ yapısında bir değişiklik meydana getirmediği şeklinde yorumlanmıştır.
- SEM görüntülerinden görüleceği üzere (Şekil 4.97), piroliz katı ürünü oda sıcaklığında bitüm içerisinde katı formda ve taneli yapıdadır. PP piroliz sıvı ürünü ise bu sıcaklıkta bitüm içerisinde eriyik formdadır (Katkı maddelerinin erime sıcaklıkları DSC testi ile tespit edilmiştir). 25°C'de gerçekleştirilen penetrasyon deneyi esnasında, iğne bitüm içerisinde sıvı piroliz ürününün baskın etkisi ile rahatlıkla yol almış, dolayısıyla katkılı bitümün penetrasyon değerini yükseltmiştir. Başka bir ifade ile katkılı bitüm, saf bitüme kıyasla bu sıcaklıkta yumuşak kıvamda kalmıştır. Sıcaklığın artması ile katı ürünün pelteleşmeye başlamış olabileceği (40-60°C aralığı) ve bu sayede bitümün kıvamında artış gözlemlendiği yorumu yapılabilir. Bu durum ise, katkılı bitümün hem yumuşama noktasını arttırmış hem de benzer sıcaklıklarda yapılan penetrasyon testinde iğnenin batmasını zorlaştırarak penetrasyon değerini düşürmüştür. Saf bitüme kıyasla katkılı bitümdeki bu kıvam artışı, 50-60°C aralığındaki viskozite sonuçlarına da yansımıştır.

4.4.4 Bitümlerin DSR, BBR, RTFOT ve PAV sonuçları

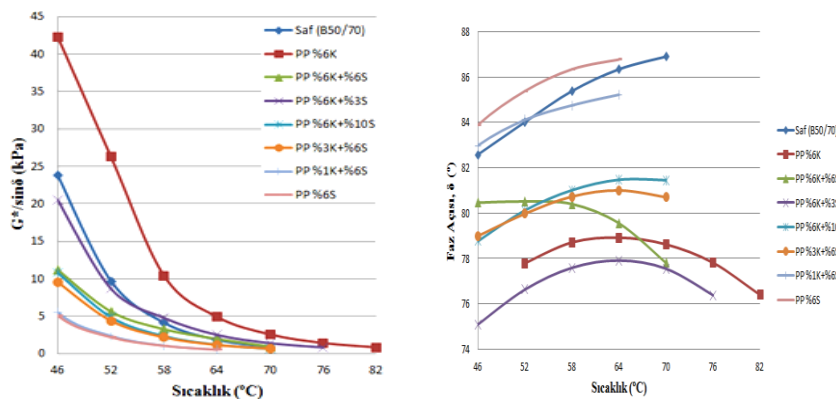
PP, YYPE-PET ve PS modifiyeli bitümlere, Sasobit® katkılı bitüme ve saf bitüme DSR ve BBR deneyleri yapılmıştır. DSR deneyi orijinal (yaşlandırılmamış), RTFOT ile yaşlandırılmış ve PAV ile yaşlandırılmış numunelere yapılırken, BBR deneyi PAV ile yaşlandırılmış numunelere yapılmıştır. Modifiye bitümler 7 farklı oranda teste tabi tutularak, sonuçların değişimine katkı oranlarının etkisi, reolojik testlerle de detaylı olarak incelenmiştir.

4.4.4.1 PP katkılı bitümlere ait sonuçlar

Çizelge 4.15'te belirlenen modifikasyon parametreleri kullanılarak DSR ve BBR testleri için PP katkılı modifiye bitümler hazırlanmıştır. Bu bölümde, **katkı oranlarının reolojik sonuçlara etkisini** de ayrıntılı olarak incelemek amacıyla sadece optimum katkı oranı olan PP %6K-%6S modifiye bitümü kullanılmamış, buna ilave olarak şu oranlarda hazırlanan modifiye bitümlere de yer verilmiştir: PP %6K, PP %6K+%3S, PP %6K+%10S, PP %3K+%6S, PP %1K+%6S, PP %6S. Modifiye bitümler saf bitümle karşılaştırılarak reolojik özellikleri değerlendirilmiştir.

4.4.4.1.1 PP katkılı orijinal bitümlerin DSR sonuçları

PP katkılı bitümler ile saf bitüm, ilk aşamada yaşlandırılmadan DSR testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda her bir bitüme ait kompleks modül ve faz açısı değerleri tespit edilmiş ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir.

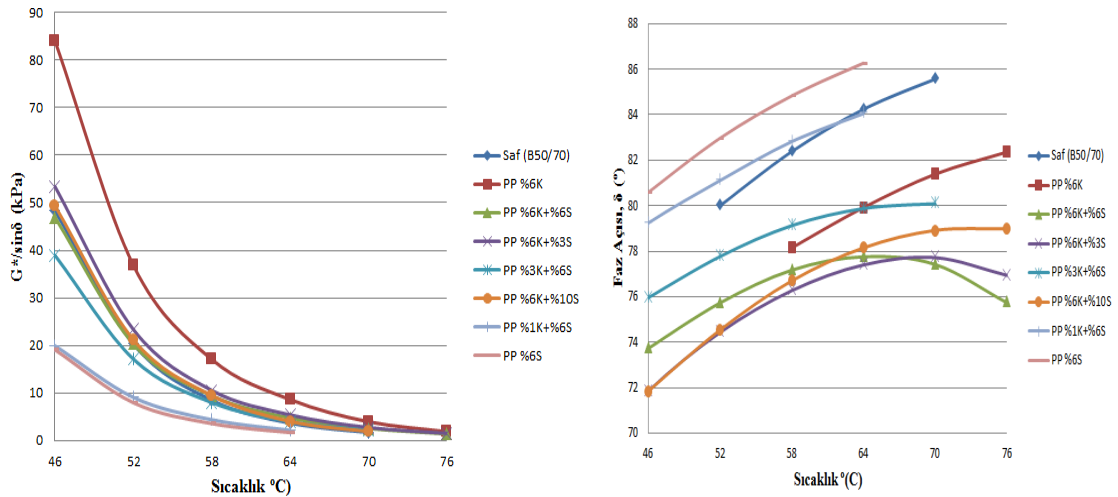


Şekil 4.56. PP modifiyeli orijinal bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

Şekil 4.56'daki grafiklerden görüldüğü üzere, katkıli bitümlerde katı ürün miktarı arttıkça veya sıvı ürün miktarı azaldıkça $G^*/\sin\delta$ değeri (tekerlek izi faktörü) artmakta ve faz açıları azalmaktadır. Saf bitümün yenilme sıcaklığını PP %6K, PP %6K+%3S ve PP %6K+%6S sırasıyla 11.1, 4.9 ve 0.2°C arttırmıştır. Benzer sonuçlara Atasağun (2017) ve Schaur ve ark. (2021) tarafından da ulaşılmıştır.

4.4.4.1.2 PP katkıli bitümlerin RTFOT sonrası DSR sonuçları

PP katkıli modifiye bitümler bu bölümde, ilk önce RTFOT testi ile kısa dönem yaşlandırılmış, ardından DSR testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar Şekil 4.57'deki grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerden, $G^*/\sin\delta$ -Sıcaklık grafiğine bakıldığında, orijinal bitüm DSR sonuçlarından farklı olarak, PP %6S ve PP %1K+%6S haricindeki tüm katkıli bitümler, RTFOT sonrası testlerde saf bitümden daha iyi sonuçlar vermiştir. Faz açısı-sıcaklık grafiğinde ise yine PP %6S ve PP %1K+%6S haricindeki katkıli bitümler, saf bitüme kıyasla faz açısını düşürerek daha elastik davranış sergilemiştir. Çizelge 4.20'de ise, PP katkıli bitümlere ait kütle kayıp oranları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında görülüyor ki, sadece katı piroliz ürününün kullanıldığı PP %6K modifiye bitümde kütle kaybı oluşmazken, modifiye bitümde sıvı piroliz ürünü oranı arttıkça kütle kayıplarının da arttığı görülmektedir.



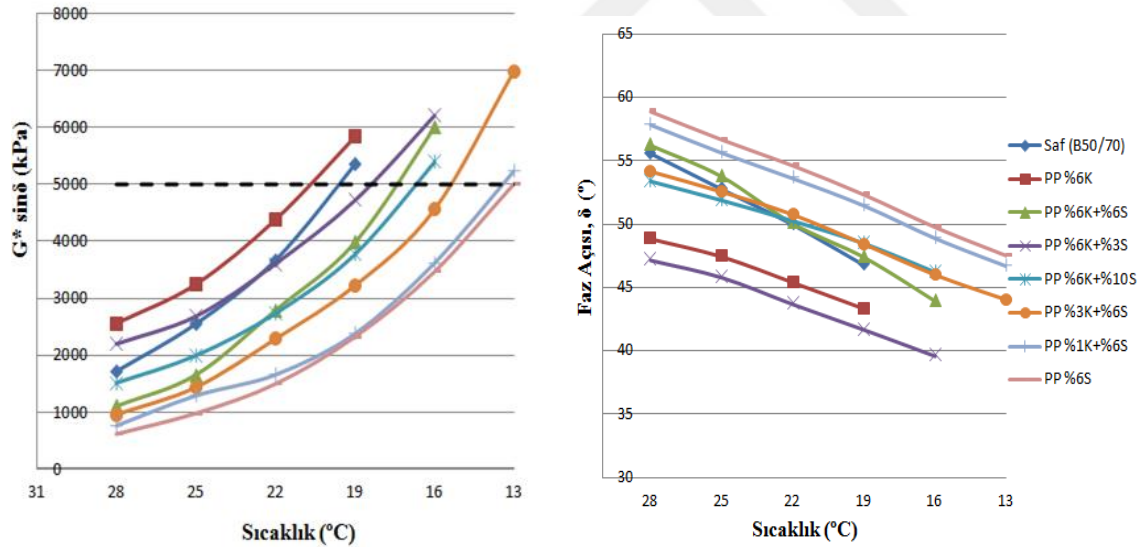
Şekil 4.57. RTFOT sonrası PP modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

Çizelge 4.20. PP katkıli bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıp oranları

Modifiye Bitümler	PP %6K	PP %6K+%3S	PP %6K+%6S	PP %6K+%10S	PP %3K+%6S	PP %1K+%6S	PP %6S
Kütle Kayıpları (%)	0.00	1.09	1.58	2.93	1.69	2.15	2.36

4.4.4.1.3 PP katkıli bitümlerin PAV sonrası DSR sonuçları

RTFOT sonrası elde edilen numunelere uzun dönem yaşlanmayı temsil etmek amacıyla PAV yaşlandırma deneyi yapılmış ve numunelere DSR deneyi yapılmıştır. DSR deneyi ile bu aşamada, bitümlü malzemenin yorulma performansı araştırılmıştır. Şekil 4.58'deki deney sonuçlarına göre, katkıli bitümlerde kullanılan sıvı ürün miktarı arttıkça $G^* \sin \delta$ değeri azalmakta ve buna bağlı olarak bitümlerin orta sıcaklık performansları iyileşmektedir. Saf bitümün yorulma sıcaklığını en az geliştiren 1.1°C ile PP %6K+%3S katkıli bitüm olurken, en çok geliştiren 6.4°C ile PP %6S olmuştur. PP %6K ise, saf bitümün bu özelliğini geliştirememiştir.



Şekil 4.58. PAV sonrası PP modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

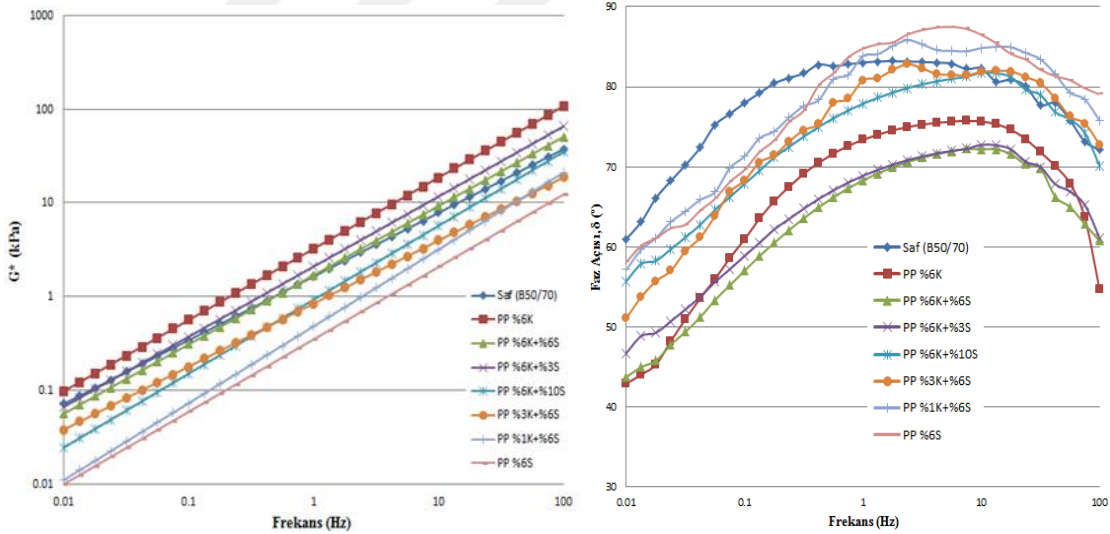
4.4.4.1.4 PP katkıli bitümlerin frekans sweep analizi sonuçları

Frekans sweep analizi (FSA), bitümlü bağlayıcının sabit bir sıcaklıkta frekans değişimine karşı nasıl davranış sergilediğini belirlemek amacıyla yapılır. Düşük frekans değerleri gerçek koşullarda yavaş akan trafiği, yüksek frekans değerleri ise hızlı

seyreden trafiği temsil etmektedir. Bu sayede, bitümün farklı trafik koşullarına karşı vereceği sonuçlar tespit edilmiş olur.

Frekans sweep analizi, yaşlanmamış PP katkılı bitümlere ve saf bitüme 64°C’de ve 0.01-100 Hz aralığında yapılmıştır (FSA’da strain değerine lineer amplitude sweep test ile karar verilmiş olup PP katkılı bitümler için bu değer %0.25, saf bitüm için ise %0.1 alınmıştır). Sonuçlar Şekil 4.59’daki grafiklerde sunulmuştur. Grafiklerden yapılan çıkarımlar şu şekildedir:

- Frekans değeri arttıkça G^* değerleri artmaktadır.
- PP %6K ve PP %6K+%3S, saf bitümden her frekans aralığında daha iyi sonuç vermektedir. Saf bitüme en yakın sonuç veren katkılı bitüm ise PP %6K+%6S olmuştur.
- Faz açısı-Frekans grafiğinde ise, faz açıları frekans değeri yaklaşık olarak 10 Hz olana kadar artmakta, ardından azalmaktadır. Katkılı bitümlerde, katı oranı arttıkça veya sıvı oranı azaldıkça faz açılarının da azaldığı gözlenmektedir.

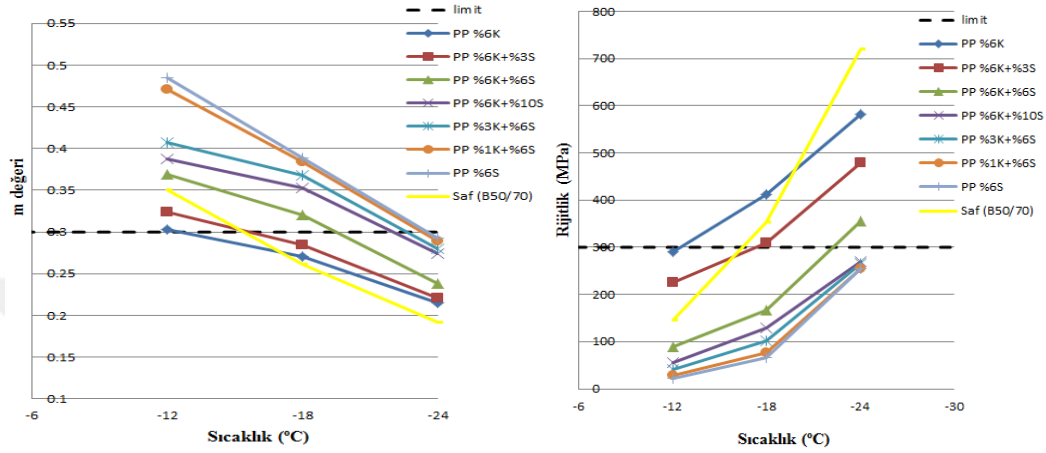


Şekil 4.59. PP katkılı bitümlerin 64°C’de Frekans Sweep Analizi sonuçları

4.4.4.1.5 PP katkılı bitümlerin BBR sonuçları

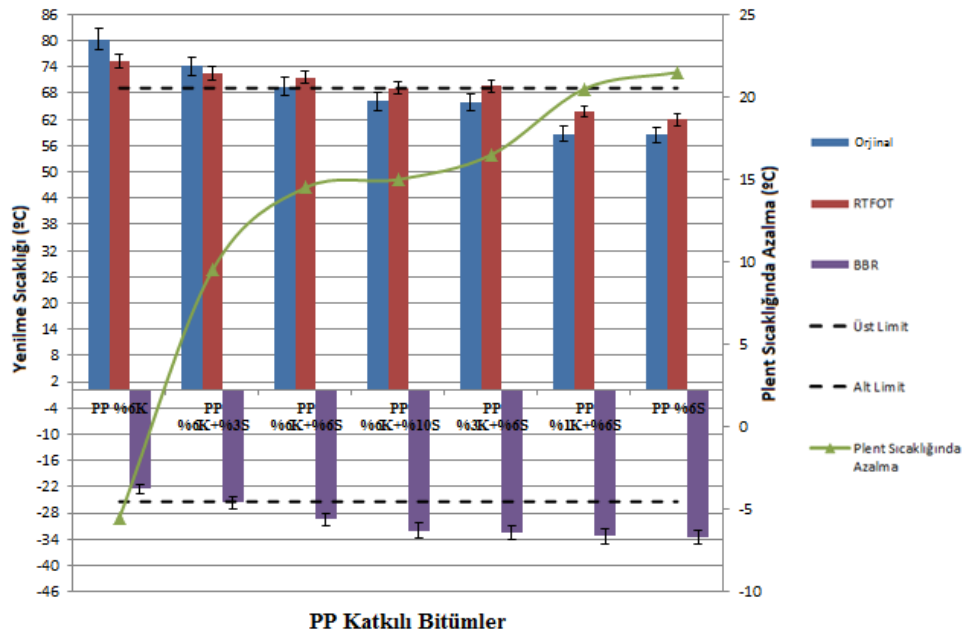
PAV deneyi sonrası elde edilen numunelere DSR’nin yanı sıra BBR deneyi de yapılmıştır. Bu deney -12, -18 ve -24°C’de yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen rijitlik ve m değerleri Şekil 4.60’ta gösterilmiştir. m değeri-Sıcaklık grafiğine bakıldığında, saf bitümün, PP %6K ve PP %6K+%3S’nin -18°C’de şartname limitini sağlamadığı görülmektedir. Diğer katkılı bitümler ise rahatlıkla -18°C’deki limit m

değerini sağlamaktadır. Bu sonuçlar, PP katkıli bitümlerin (6K ve 6K+3S haricindeki) saf bitüme göre daha soğuk iklim koşullarında kullanılabilceği anlamına gelmektedir. Benzer durum Rijitlik-Sıcaklık grafiğinde de görülmektedir. Katkıli bitümlerdeki sıvı içeriği arttıkça yenilme sıcaklığı da azalmaktadır. Benzer sonuca, Guarin ve ark. (2016) ve Kebritchi ve ark. (2022) tarafından da ulaşılmıştır.



Şekil 4.60. PAV sonrası PP modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün m değeri (solda) ve rijitlik değeri (sağda)

PP katkıli modifiye bitümler için elde edilen DSR ve BBR sonuçları birleştirilerek tek bir grafikte Şekil 4.61’de sunulmuştur.



Şekil 4.61. Farklı oranlardaki PP modifiyeli bitümlerin yenilme sıcaklıkları ve plent sıcaklığını azaltma değerleri

Şekil 4.61'deki grafikten şu çıkarımlar yapılmıştır:

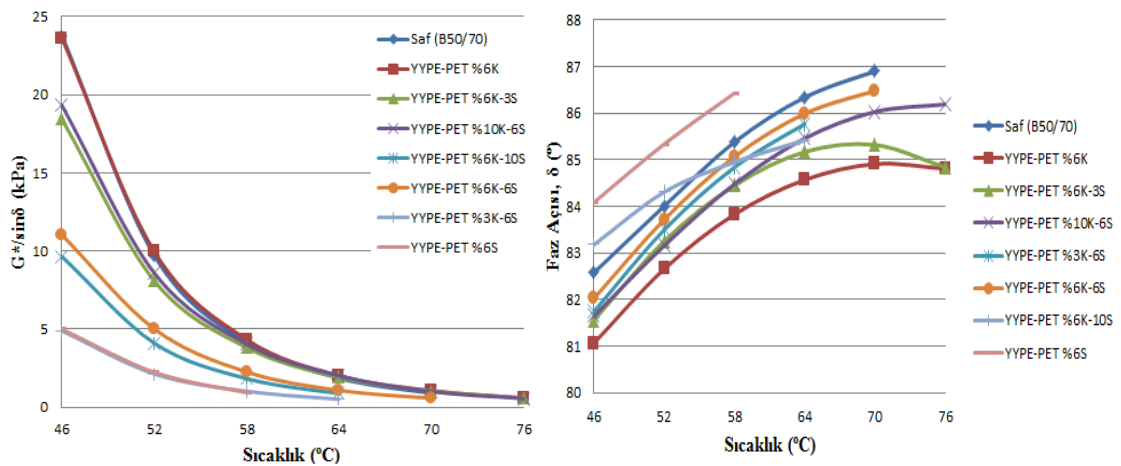
- Hem orijinal (kırmızı sütun) hem de RTFOT sonrası (mavi sütun) testlerde, yenilme sıcaklığı saf bitüme (siyah kesikli çizgi-üst limit) eşit veya daha iyi sonuç veren 3 adet katkılı bitüm tespit edilmiştir. Bunlar PP %6K, PP %6K+%3S ve PP %6K+%6S.
- Bunların içerisinde hem plent sıcaklığını azaltma (yeşil eğri) konusunda hem de BBR yenilme sıcaklığını (alt limit) geliştirme konusunda en başarılı olan katkılı bitüm **PP %6K+%6S'dir**.

4.4.4.2 YYPE-PET katkıli bitümlere ait sonuçlar

PP katkıli bitümlerde olduğu gibi YYPE-PET katkıli bitümlerde de, DSR-BBR testleri için 7 farklı oranda katkıli bitüm hazırlanmıştır. Kullanılan modifiye bitümler şu şekildedir: YYPE-PET %6K, YYPE-PET %6K+%3S, YYPE-PET %10K+%6S, YYPE-PET %6K+%6S, YYPE-PET %6K+%10S, YYPE-PET %3K+%6S, YYPE-PET %6S.

4.4.4.2.1 YYPE-PET katkıli Orijinal Bitümlerin DSR Sonuçları

YYPE-PET katkıli bitümler yaşlandırma işlemine tabi tutulmadan önce orijinal halleri ile DSR testine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.62'de gösterilmiştir.

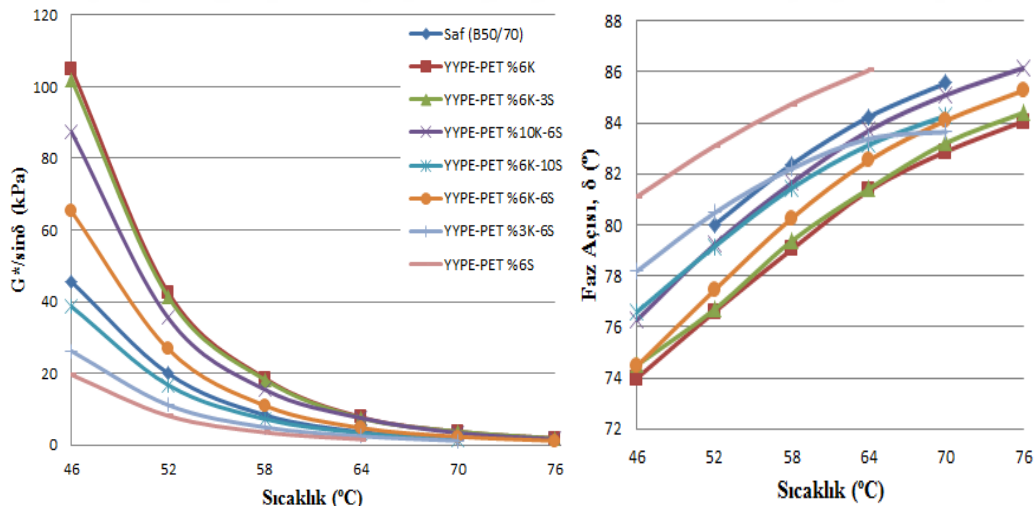


Şekil 4.62. YYPE-PET modifiyeli orijinal bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

Şekil 4.62'deki $G^*/\sin\delta$ -Sıcaklık grafiğinden görüldüğü üzere, katkıli bitümlerden YYPE-PET %6K, YYPE-PET %10K+%6S ve YYPE-PET %6K+%3S saf bitümün yenilme sıcaklığını sırasıyla 1.6, 1.3 ve 1.1°C arttırmıştır. Faz açısı-sıcaklık grafiğinden ise, yenilme sıcaklığı yüksek olan katkıli bitümlerin faz açılarının düşük olduğu görülmüştür. YYPE ve DYPE atık plastiğinin kullanıldığı çalışmalarda da (Liu ve ark., 2019; Punith ve Veeraragavan, 2011; Yan ve ark., 2015) katkı oranı arttıkça bitümün kompleks modülünün arttığı ve buna bağlı olarak faz açısının azaldığı görülmüştür.

4.4.4.2.2 YYPE-PET katkıli bitümlerin RTFOT sonrası DSR sonuçları

YYPE-PET katkıli bitümlere RTFOT deneyi yapılmış ve sonrasında elde edilen bitümlere de DSR testi yapılmıştır. RTFOT sonrası DSR sonuçlarında, saf bitümün yenilme sıcaklığını geliştiren katkılar grubuna (YYPE-PET %6K, YYPE-PET %10K+%6S ve YYPE-PET %6K+%3S), **YYPE-PET %6K+%6S** katkıli bitüm (grafikteki sarı renkli eğri) de dahil olmuştur. Bu durum, YYPE-PET %6K+%6S katkıli bitümün faz açısını da azaltmıştır. Sonuçlar, Şekil 4.63'te sunulmuştur.



Şekil 4.63. RTFOT sonrası YYPE-PET modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

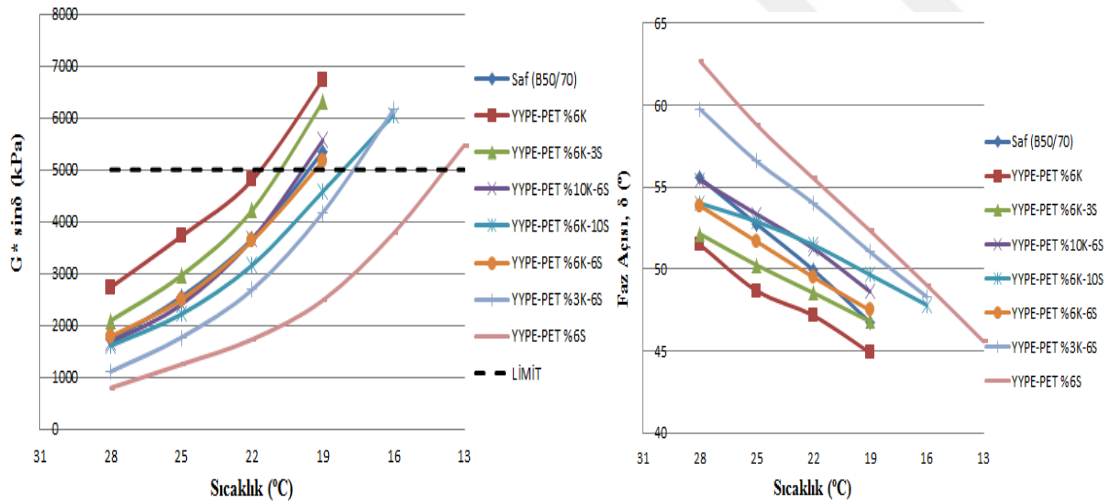
Çizelge 4.21. YYPE-PET katkıli bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıp oranları

Modifiye Bitümler	YYPE-PET %6K	YYPE-PET %6K+%3S	YYPE-PET %10K+%6S	YYPE-PET %6K+%10S	YYPE-PET %6K+%6S	YYPE-PET %3K+%6S	YYPE-PET %6S
Kütle Kayıpları (%)	0.19	1.11	2.00	2.14	1.77	2.29	2.38

Çizelge 4.21’de, YYPE-PET katkıli bitümlere ait RTFOT sonrası kütle kayıp oranları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, modifiye bitümlerdeki sıvı katkı oranı arttıkça kütle kayıpları artmaktadır. Sadece katı ürünün kullanıldığı YYPE-PET %6K katkıli bitümde, kütle kaybı oldukça az olmuştur. Diğer bitümlerin hepsi şartname limitlerinin üzerinde sonuç vermiştir.

4.4.4.2.3 YYPE-PET katkıli bitümlerin PAV sonrası DSR sonuçları

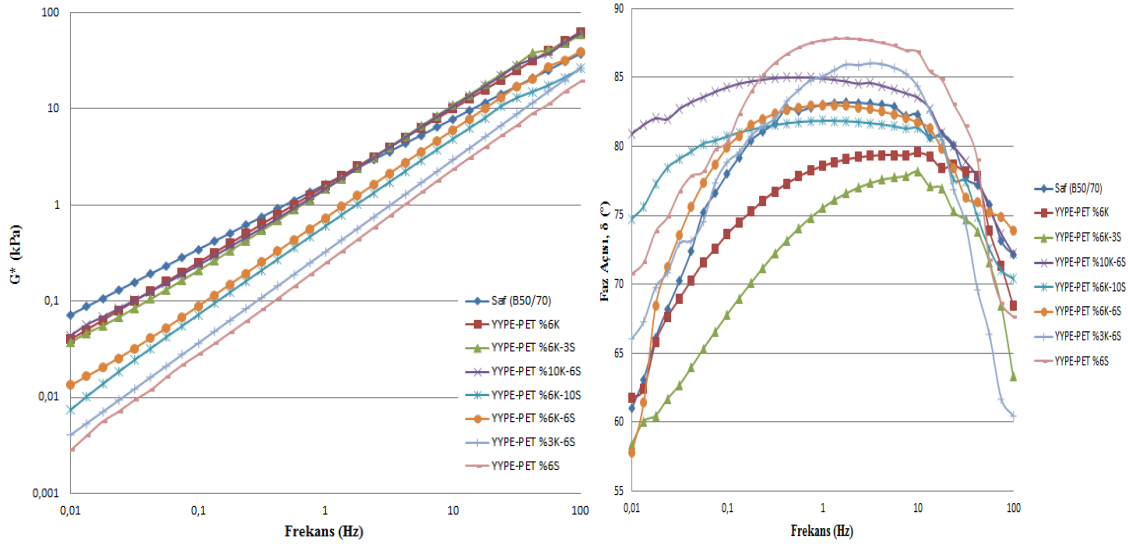
Bitümlü malzemenin yorulma performansının incelendiği PAV sonrası DSR sonuçları Şekil 4.64’te görülmektedir. $G^* \sin \delta$ -Sıcaklık grafiği incelendiğinde, saf bitümün 19.5°C dolaylarında **limit değeri aştığı** görülmektedir. Saf bitümün orta sıcaklık performansını **geliştiren** katkıli bitümler ve yenilme sıcaklıkları ise sırasıyla YYPE-PET %6S (13.9°C), YYPE-PET %3K+%6S (17.6 °C), YYPE-PET %6K+%10S (18.1°C) ve YYPE-PET %6K+%6S (19.2°C) şeklinde olmuştur. Katkıli bitümlerden YYPE-PET %6S ve YYPE-PET %3K+%6S haricindekilerin faz açılarının saf bitümden daha düşük olduğu da diğer grafikte görülmektedir.



Şekil 4.64. PAV sonrası YYPE-PET modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

4.4.4.2.4 YYPE-PET katkıli bitümlerin frekans sweep analizi sonuçları

YYPE-PET katkıli bitümlere ve saf bitüme 64°C’de ve 0.01-100 Hz aralığında yapılan frekans sweep analizi sonuçları Şekil 4.65’te sunulmuştur. Bu analizde strain değeri, YYPE-PET katkıli bitümler için %0.8, saf bitüm için %0.1 alınmıştır.



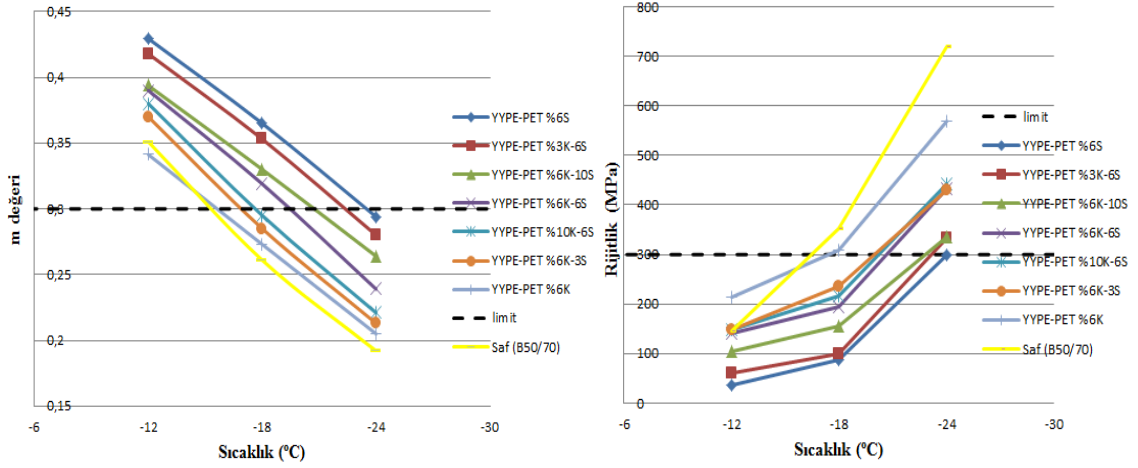
Şekil 4.65. YYPE-PET Katkılı Bitümlerin 64°C’de Frekans Sweep Analizi Sonuçları

Şekil 4.65’teki grafiklerden yapılan çıkarımlar şunlardır;

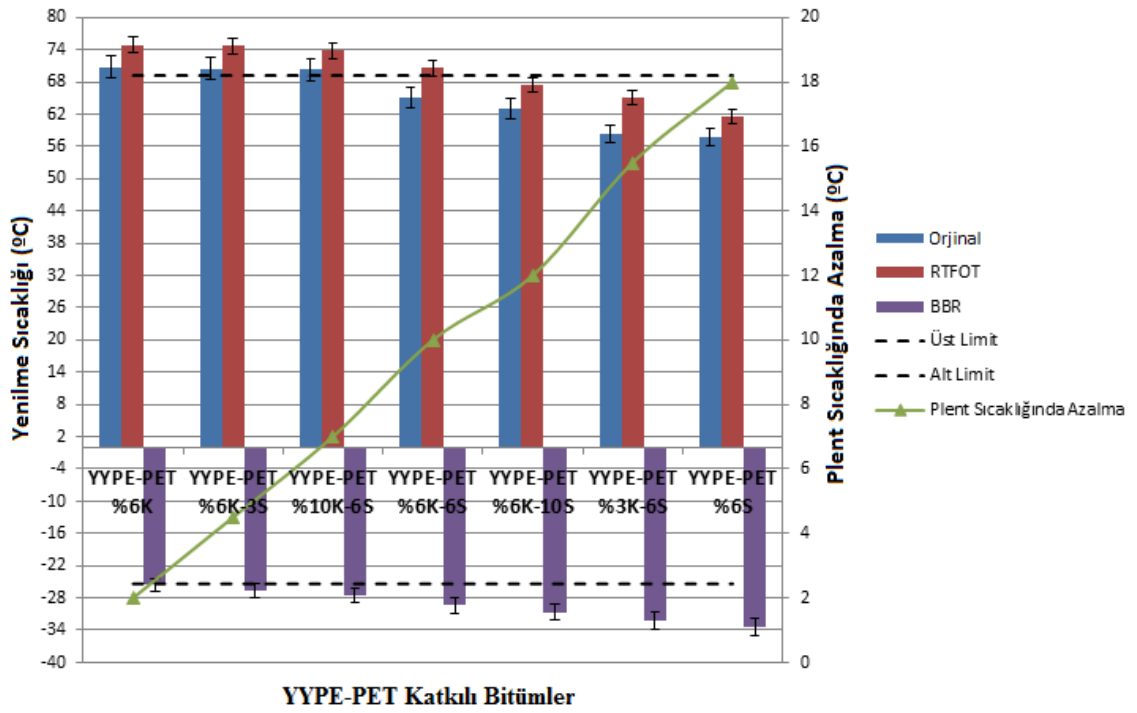
- Kompleks modül-Frekans Grafiği incelendiğinde, düşük frekanslarda saf bitümün tüm katkılı bitümlerden daha yüksek kompleks modül değerine sahip olduğu görülmektedir.
- Yüksek frekans değerlerinde ise YYPE-PET %6K, YYPE-PET %10K+%6S ve YYPE-PET %6K+%3S’nin saf bitümden daha yüksek G^* değerlerine ulaştığı görülmüştür.
- Faz açısı-frekans grafiğine bakıldığında ise, frekans değeri arttıkça faz açıları artmakta ve yaklaşık 10 Hz değerinde zirve değerine ulaşmaktadır. Bu değerden sonra faz açılarının hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir.

4.4.4.2.5 YYPE-PET katkılı bitümlerin BBR sonuçları

YYPE-PET katkılı bitümlere, -12 °C, -18 °C ve -24°C sıcaklıklarda BBR testi yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.66’da sunulmuştur. Şekil 4.66’daki her iki grafik incelendiğinde, saf bitümün -18°C’de şartname limitlerini sağlamadığı görülmüştür. Bu sıcaklıkta her iki şartname limitini ($m \geq 0.3$ ve $S \leq 300$ MPa) sağlayabilen katkılı bitümler ise YYPE-PET %6S, YYPE-PET %3K+%6S, YYPE-PET %6K+%10S ve YYPE-PET %6K+%6S şeklindedir. Şekil 4.67 ise, YYPE-PET katkılı modifiye bitümler için elde edilen DSR ve BBR sonuçlarını tek bir grafikte özetlemektedir.



Şekil 4.66. PAV sonrası YYPE-PET modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün m değeri (solda) ve rijitlik değeri (sağda)



Şekil 4.67. Farklı oranlardaki YYPE-PET modifiyeli bitümlerin yenilme sıcaklıkları ve plent sıcaklığını azaltma değerleri

Şekil 4.67'deki grafikten şu çıkarımlar yapılmıştır:

- Hem orijinal (kırmızı sütun) hem de RTFOT sonrası (mavi sütun) testlerde, yenilme sıcaklığı saf bitüme (siyah kesikli çizgi) eşit veya daha iyi sonuç veren katkıli bitümler şunlardır: YYPE-PET %6K, YYPE-PET %6K+%3S ve YYPE-PET %10K+%6S.

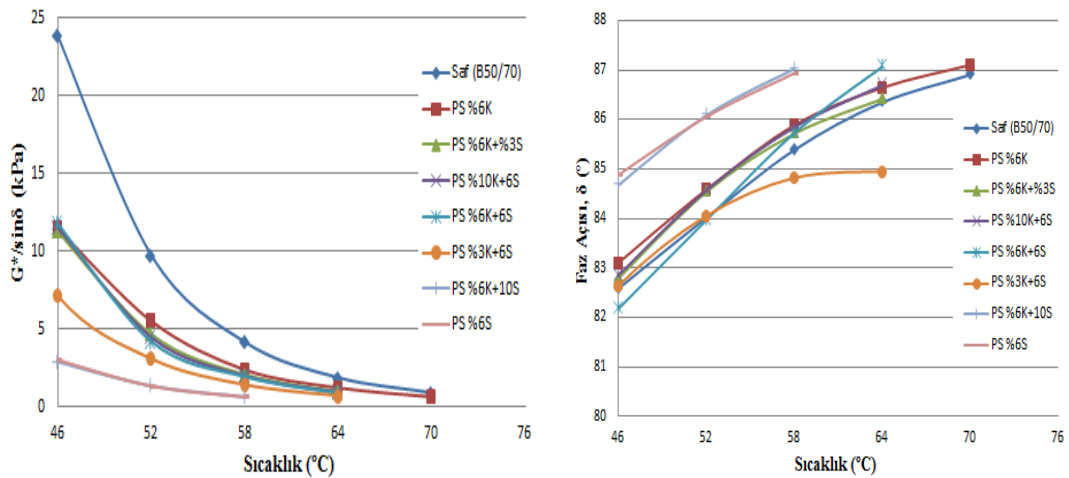
- Ancak bu katkıli bitümler ile plent sıcaklığı (yeşil eğri) en fazla 7°C düşürülebilmektedir. Ayrıca, bu katkı oranları ile saf bitümün PG alt sınıfı da geliştirilememiştir.
- Bu sebeple, hem plent sıcaklığını 10°C düşürebilen hem RTFOT sonrası testlerde yenilme sıcaklığı saf bitüme eş değer olan hem de PG alt sınıfını -22'den -28'e geliştirmeyi başaran **YYPE-PET %6K+%6S**'nin amaca en uygun katkıli bitüm olduğu görülmüştür.

4.4.4.3 PS katkıli bitümlere ait sonuçlar

DSR-BBR testleri için kullanılan PS modifiyeli bitümler şu şekildedir: PS %6K, PS %6K+%3S, PS %10K+%6S, PS %6K+%6S, PS %6K+%10S, PS %3K+%6S, PS %6S. Saf bitüme ve PS katkıli modifiye bitümlere yapılan deneylerden elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur.

4.4.4.3.1 PS katkıli orjinal bitüm DSR sonuçları

PS modifiyeli bitümler diğer katkıli bitümlerde olduğu gibi ilk aşamada herhangi bir yaşlandırma süreci uygulanmadan DSR testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.68'te gösterilmiştir. PS katkı grubu bitümün viskozitesini **en çok düşüren** katkı grubu olduğundan $G^*/\sin\delta$ değerleri saf bitümden daha düşüktür. Faz açısı-sıcaklık grafiğine bakıldığında ise, PS %6K+%10S ve PS %6S haricindeki katkıli bitümlerin saf bitüme yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

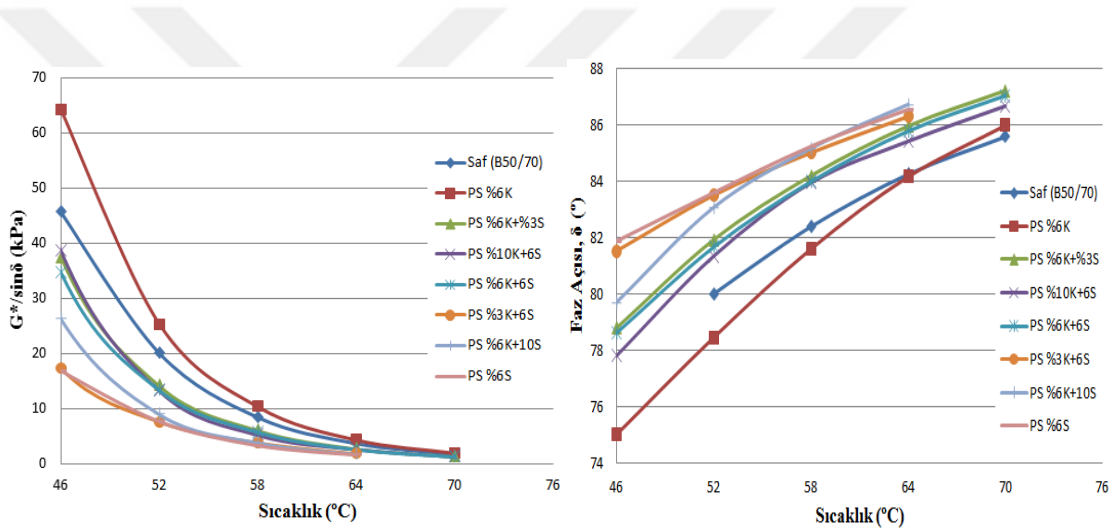


Şekil 4.68. PS modifiyeli yaşlanmamış bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

4.4.4.3.2 PS katkıli bitümlerin RTFOT sonrası DSR sonuçları

PS modifiyeli bitümlerin RTFOT deneyi sonrası yapılan DSR testi sonuçlarına, Şekil 4.69'da yer verilmiştir. DSR sonuçlarından, PS %6K katkıli bitümün $G^*/\sin\delta$ değerinin, saf bitümden daha iyi olduğu görülmektedir. Diğer PS katkıli bitümlerin ise orijinal DSR sonuçlarına kıyasla saf bitüme daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum faz açısı değerlerini de aşağı çekmiştir.

Çizelge 4.22'de ise, PS katkıli bitümlere ait kütle kayıp oranları verilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki, modifiye bitümlerde sıvı oranı arttıkça kütle kayıp miktarlarında da artışlar olmaktadır. PS modifiyeli bitümlerin diğer katkıli (PP ve YYPE-PET) bitümlerden kütle kaybına karşı daha hassas olduğu görülmüştür.



Şekil 4.69. RTFOT sonrası PS modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

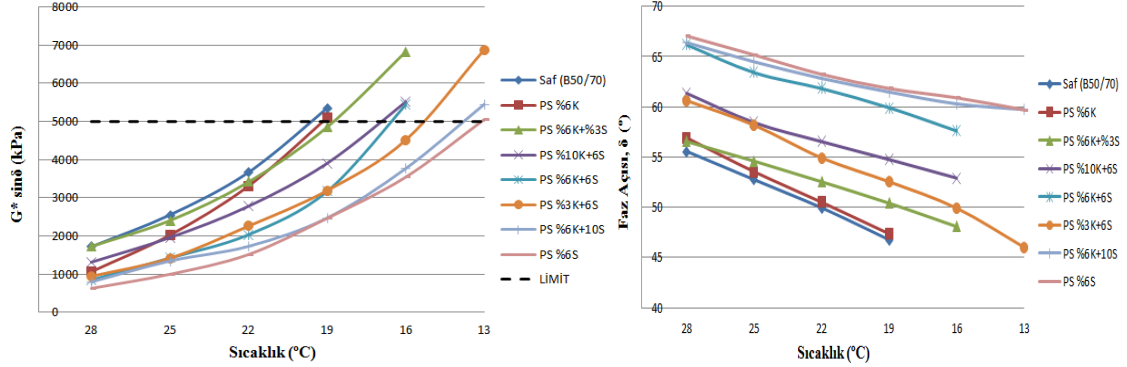
Çizelge 4.22. PS katkıli bitümlerin RTFOT sonrası kütle kayıp oranları

Modifiye Bitümler	PS %6K	PS %6K+%3S	PS %10K+%6S	PS %6K+%10S	PS %6K+%6S	PS %3K+%6S	PS %6S
Kütle Kayıpları (%)	0.31	1.49	2.74	4.42	2.66	2.95	3.44

4.4.4.3.3 PS katkıli bitümlerin PAV sonrası DSR sonuçları

PAV sonrası yapılan DSR test sonuçlarından $G^*\sin\delta$ -Sıcaklık grafiği incelendiğinde, PS katkıli bitüm grubunun **tamamının** saf bitümün orta sıcaklık performansını (19.5°C) **geliştirdiği** görülmüştür. PS katkıli bitümlerin yorulma sıcaklık

değerleri 13.1°C (PS %6S) ile 19.1°C (PS %6K) arasında değişmektedir. PS %6S katkılı bitümden, PS %6K katkılı bitüme doğru faz açısının azaldığı, faz açısı-sıcaklık grafiğinden görülmektedir (Şekil 4.70).

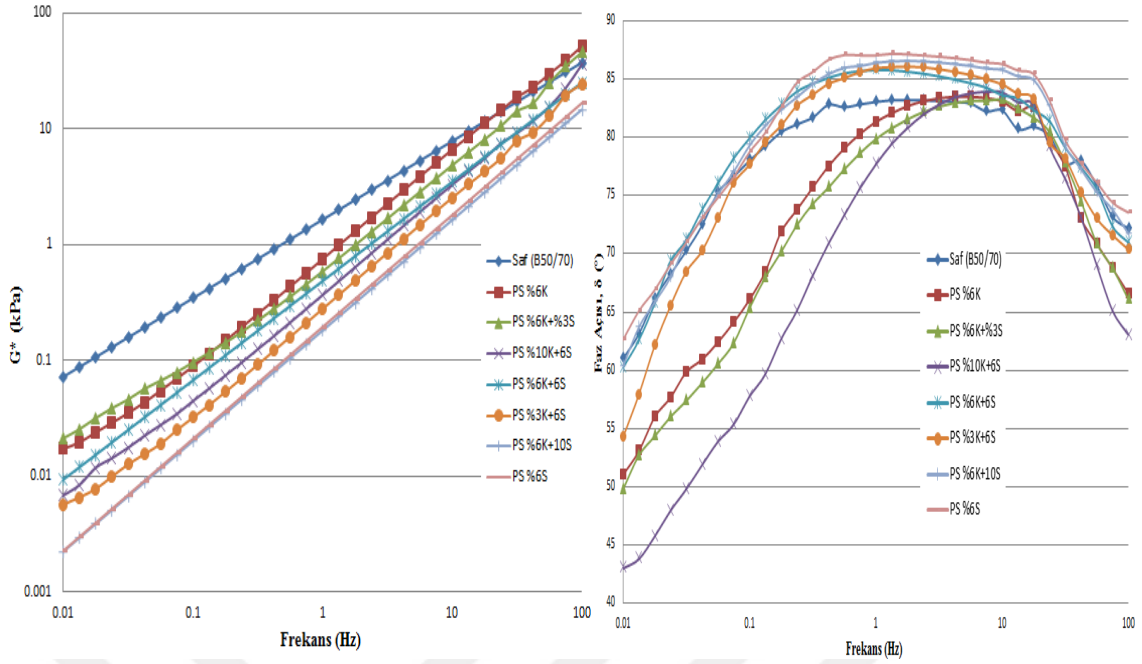


Şekil 4.70. PAV sonrası PS modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün kompleks modül (solda) ve faz açısı sonuçları (sağda)

4.4.4.3.4 PS katkılı bitümlerin frekans sweep analizi sonuçları

PS katkılı bitümlere 64°C’de, 0.01-100 Hz aralığında ve %0.3 strain değerinde yapılan frekans sweep analizi sonuçları değerlendirilmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

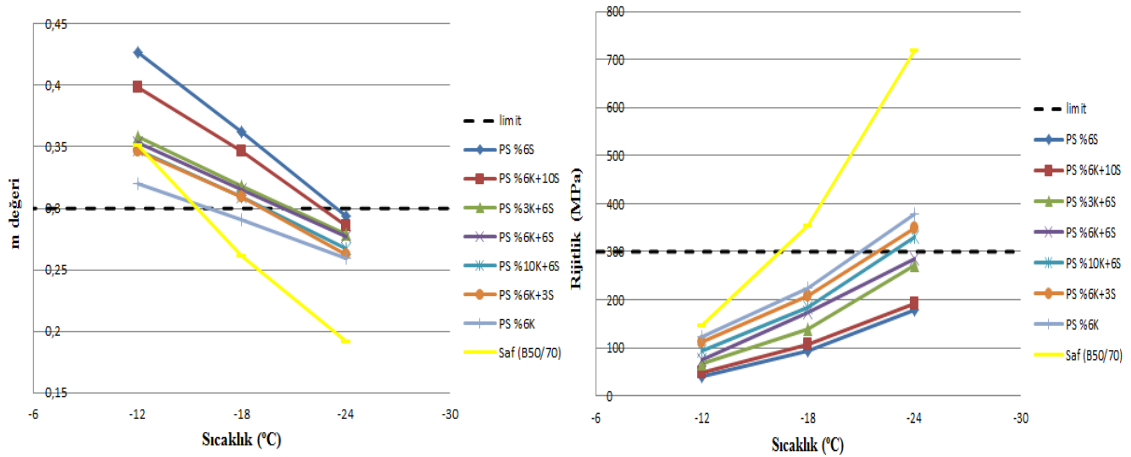
- Kompleks modül-Frekans Grafiği incelendiğinde (Şekil 4.71 soldaki grafik):
 - Düşük frekans aralığında, saf bitüm tüm PS katkılı bitümlerden daha yüksek kompleks modül değerine sahiptir.
 - Ancak, PS katkılı bitümlerin frekans değerine karşı G^* değerlerindeki **artış hızı** saf bitüme göre **daha yüksektir**. Bu sayede yüksek frekans aralığında (10-100 Hz) PS katkılı bitümlerin G^* değerleri saf bitüme yaklaşmıştır.
- Faz açısı-frekans grafiğinde (Şekil 4.71 sağdaki grafik):
 - Diğer katkılı bitümlerde olduğu gibi PS katkılı bitümlerde de frekans **10 Hz** değerine ulaşıncaya kadar faz açıları **artmakta**, ardından hızlı bir şekilde **düşmektedir**. Katkılı bitümlerde katı oranı arttıkça veya sıvı oranı azaldıkça faz açılarının da azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.71. PS Katkılı Bitümlerin 64°C'de Frekans Sweep Analizi Sonuçları

4.4.4.3.5 PS katkıli bitümlerin BBR sonuçları

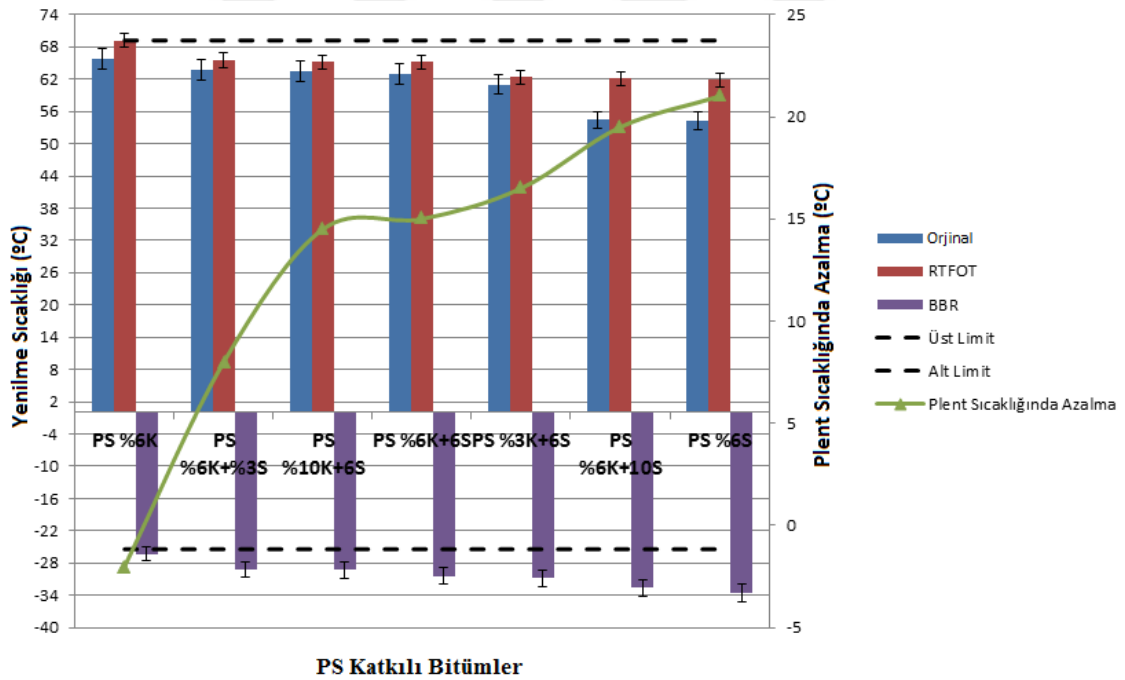
Diğer katkıli bitümlere olduğu gibi PS katkıli bitümlere de -12, -18 ve -24°C'de BBR testi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.72'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, PS %6K haricinde tüm modifiyeli bitümlerin -18°C'de şartnameyi sağladığı görülmektedir. Saf bitümün ise -18°C'de limit değeri aştığı ve dolayısıyla şartnameyi sağlamadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar PS katkısının, bitümü soğuk hava koşullarına **daha dayanıklı** hale getirdiğini göstermektedir.



Şekil 4.72. PAV sonrası PS modifiyeli bitümlerin ve saf bitümün m değeri (solda) ve rijitlik değeri (sağda)

Şekil 4.73 ise PS katkıli modifiye bitümler için elde edilen DSR ve BBR sonuçlarını tek bir grafikte özetlemektedir. Grafik incelendiğinde şu çıkarımlar yapılmıştır:

- PS katkıli bitümlerin hiçbiri orijinal veya RTFOT sonrası yenilme sıcaklıklarında saf bitüme eşit performans sergileyememiştir (PS %6K hariç).
- PS %6K'nın plent sıcaklığını **azaltmadığı** grafikteki yeşil eğriden anlaşılmaktadır. Bu sebeple tez kapsamında kullanıma uygun değildir.
- Orijinal ve RTFOT sonrası yenilme sıcaklıkları dikkate alındığında üst limit değerine en yakın katkıli bitümlerin PS %6K+%3S, PS %10K+%6S ve PS %6K+%6S olduğu görülmüştür. Bu grup içerisinde plent sıcaklığını **en çok azaltan 15°C ile PS %6K+%6S** olmuştur.
- Geriye kalan diğer 3 katkıli bitüm (PS %6S vb.) plent sıcaklığını daha fazla azaltsa da, üst limit değerinden oldukça uzak kalmaktadır. Dolayısıyla, **bu katkıli bitümler de amaca uygun değildir.**



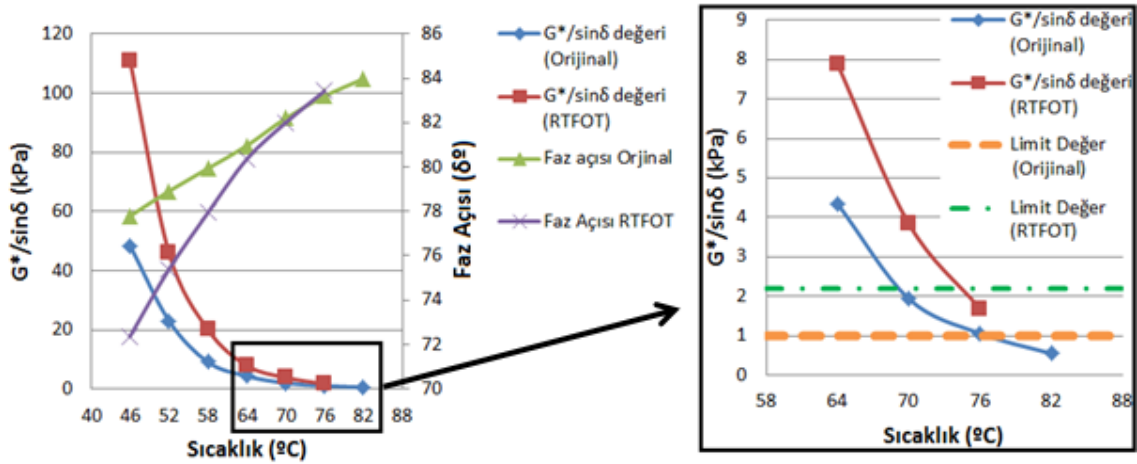
Şekil 4.73. Farklı oranlardaki PS modifiyeli bitümlerin yenilme sıcaklıkları ve plent sıcaklığını azaltma değerleri

4.4.4.4 Sasobit® katkıli bitümlere ait sonuçlar

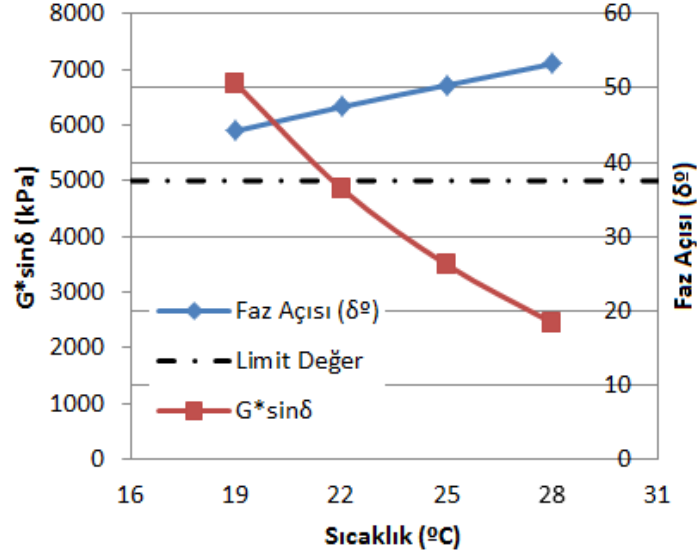
Piroliz katkıli bitümler dışında, Sasobit® katkıli bitümlere de RTFOT, PAV, DSR ve BBR testleri yapılmıştır. Şekil 4.74'te yaşlanmamış (orijinal) Sasobit® katkıli bitüme ve RTFOT sonrası yaşlandırılmış katkıli bitüme yapılan DSR sonuçları, Şekil 4.75'te ise PAV ile yaşlandırılmış Sasobit® katkıli numuneye ait DSR sonuçları görülmektedir.

Şekil 4.74'te soldaki grafik, geniş sıcaklık aralığındaki (46-82°C) $G^*/\sin\delta$ sonuçlarını göstermektedir. Hemen sağdaki grafikte ise sonuçlar daha detaylı olarak ele alınmıştır. Grafiklerden, Sasobit® katkıli bitümün orijinal ve RTFOT sonrası yenilme sıcaklıkları değerleri sırasıyla 76.6 ve 74.2°C olarak belirlenmiştir. Katkisiz bitümün yenilme sıcaklığının 69°C olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Sasobit® katkısının bitümün yüksek sıcaklık performansını geliştirdiği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.75'teki PAV sonrası DSR sonuçlarından, Sasobit® katkıli bitümün yenilme sıcaklığı 21.7°C olarak hesaplanmıştır. Saf bitümün yenilme sıcaklığı ise daha önce yapılan testlerden 19.5°C olarak belirlenmişti. Bu sonuç ile Sasobit® katkıli bitümün, saf bitümün orta sıcaklık performansını geliştiremediği yorumu yapılabilir. Benzer sonuca Liu ve ark. (2018) tarafından da ulaşılmıştır.

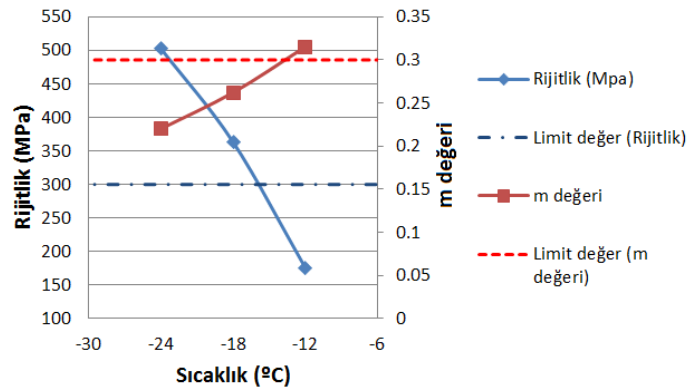


Şekil 4.74. Sasobit® katkıli bitümlere (Orijinal ve RTFOT sonrası) ait DSR sonuçları (solda) ve detay grafiği (sağda)



Şekil 4.75. PAV sonrası Sasobit® katkıli bitüme ait DSR sonuçları

Şekil 4.76'daki grafikte ise BBR sonuçları görülmektedir. Sasobit® katkıli bitümün rijitlik (S) ve m değeri sonuçlarına bakıldığında, şartname limitlerini ($S \leq 300$ MPa ve $m \geq 0.3$) en düşük -12°C 'de sağladığı görülmektedir. Grafik yardımıyla yenilme sıcaklıkları, S ve m değerleri için sırasıyla -16.0°C ve -13.7°C olarak belirlenmiştir. Saf bitüm için yenilme sıcaklıkları ise yine S ve m değerleri için sırasıyla -16.5°C ve -15.4°C olarak belirlenmiştir (Şekil 4.72'deki grafik yardımıyla). Bu sonuçlardan, Sasobit® katkıli bitüm ile saf bitümün yenilme sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu çıkarımı yapılabilir. Benzer sonuçlara Edwards ve ark. (2006) tarafından da ulaşılmıştır.



Şekil 4.76. Sasobit® katkıli bitüme ait BBR sonuçları

4.4.4.5 Saf ve katkıli bitümlerin PG sınıflarının belirlenmesi

Saf ve katkıli bitümlerin PG alt ve üst sınıfları DSR ve BBR test sonuçları doğrultusunda belirlenmiştir. PG üst sınıf tespitinde, orijinal ve RTFOT sonrası bitümlere yapılan DSR testlerinden, orijinal bitüm için $G^*/\sin\delta \leq 1$ kPa ve RTFOT sonrası bitüm için $G^*/\sin\delta \leq 2.2$ kPa şartını sağlayan en yüksek sıcaklıklar yenilme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu iki sıcaklıktan küçük olanı, PG üst sınıfı belirlemek için kullanılmıştır. PG alt sınıfı için ise BBR test sonuçlarından rijitlik (S) ve m değeri şartname limitlerini ($S \leq 300$ MPa ve $m \geq 0.3$) sağlayan en düşük sıcaklıklar tespit edilmiştir. Bunların içinden yüksek olanı PG alt sınıf tespiti için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.77’de sunulmuştur. Tablolarda koyu renkle işaretlenen 5 farklı bitüm tipi (1 saf + 4 katkıli) ile karışım testleri yapılmasına karar verilmiştir.

PG			ÜST			ALT		
SAF (B50/70)			64			-22		
PG			ÜST			ALT		
SASOBİT %3			70			-22		

PP KATKILI BİTÜMLERİN PG SINIFLARI			YYPE-PET KATKILI BİTÜMLERİN PG SINIFLARI			PS KATKILI BİTÜMLERİN PG SINIFLARI		
	ÜST	ALT		ÜST	ALT		ÜST	ALT
PP 6K	70	-22	YYPE-PET 6K	70	-22	PS 6K	64	-22
PP 6K+3S	70	-22	YYPE-PET 6K+3S	70	-22	PS 6K+3S	58	-28
PP 6K+6S	64	-28	YYPE-PET 10K+6S	70	-22	PS 10K+6S	58	-28
PP 6K+10S	64	-28	YYPE-PET 6K+6S	64	-28	PS 6K+6S	58	-28
PP 3K+6S	64	-28	YYPE-PET 6K+10S	58	-28	PS 3K+6S	58	-28
PP 1K+6S	58	-28	YYPE-PET 3K+6S	58	-28	PS 6K+10S	52	-28
PP 6S	58	-28	YYPE-PET 6S	52	-28	PS 6S	52	-28

Şekil 4.77. Katkıli bitümler ve saf bitüme ait PG sınıf tabloları

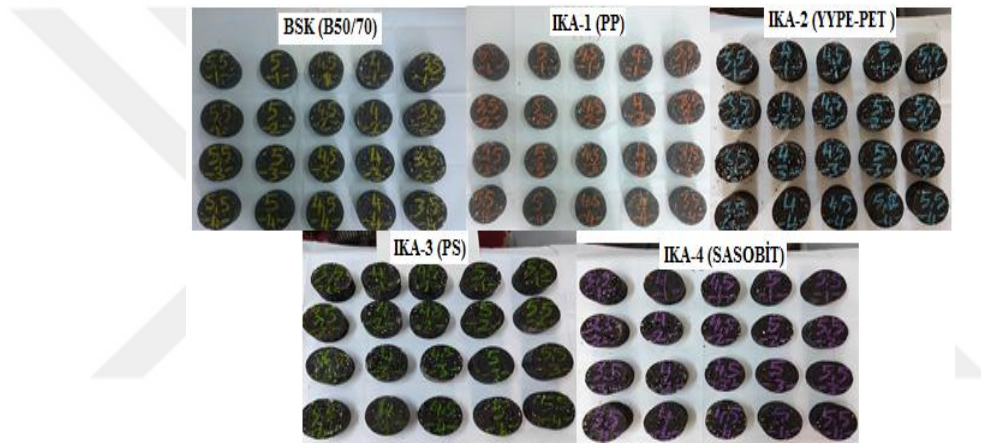
4.5 Bitümlü Karışım Test Sonuçları

Saf ve katkıli bitümlerle hazırlanan BSK ve İKA'lara yapılan deneyler aşağıda belirtildiği gibidir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara bu bölümde detaylı olarak yer verilmiştir:

- Marshall tasarımı
- Tekerlek izi deneyi
- TSRST deneyi

4.5.1 BSK ve IKA'ların Marshall tasarımlarının yapılması

Saf ve katkıli bitümler (PP, YYPE-PET ve PS) için, optimum bitüm oranlarının tayin edilmesi amacıyla Marshall tasarımı yapılmıştır (ASTM D6926-D6927). Ayrıca bu aşamada ticari IKA katkısı olan Sasobit® ile de Marshall tasarımı yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Optimum bitüm oranı tayini için %3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 bitüm oranlarında 4'er briket hazırlanmıştır (Şekil 4.78). Katkı oranları piroliz katkıları için %6 (hem katı hem sıvı faz), Sasobit® için ise %3 (tavsiye edilen) seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda **%4 hava boşluğuna karşılık gelen** bitüm değeri, her bir katkı grubu için optimum bitüm oranı olarak kabul edilmiştir (Anonymous, 2014).



Şekil 4.78. Her bir karışım grubuna ait Marshall briketleri

Çalışmada kullanılan agrega ve bitümlerin özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. Agregaların hacim ve zahiri özgül ağırlıkları

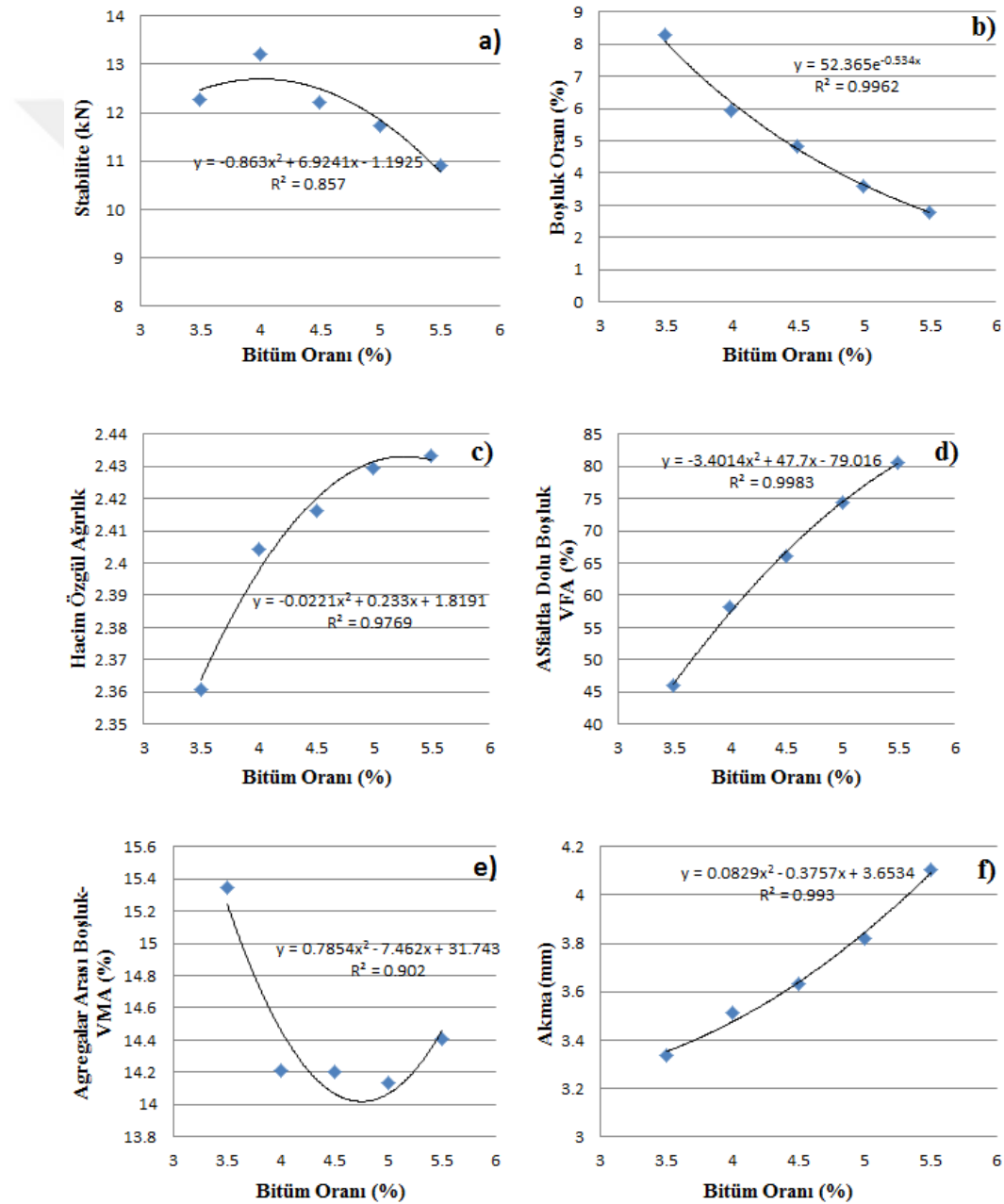
Agrega Tipi	Hacim özgül ağırlık	Zahiri özgül ağırlık
İri	2.713	2.745
İnce	2.669	2.733
Filler	-	2.736
Karışım	2.695	2.739

Çizelge 4.24. Bitümlerin özgül ağırlık değerleri

Bitüm Tipi	Özgül ağırlık
Saf (B50/70)	1.0310
PP modifiyeli bitüm	1.0340
YYPE-PET modifiyeli bitüm	1.0204
PS modifiyeli bitüm	1.0342
Sasobit® modifiyeli bitüm	1.0135

4.5.1.1 Saf bitümle hazırlanan BSK'ya ait Marshall sonuçları

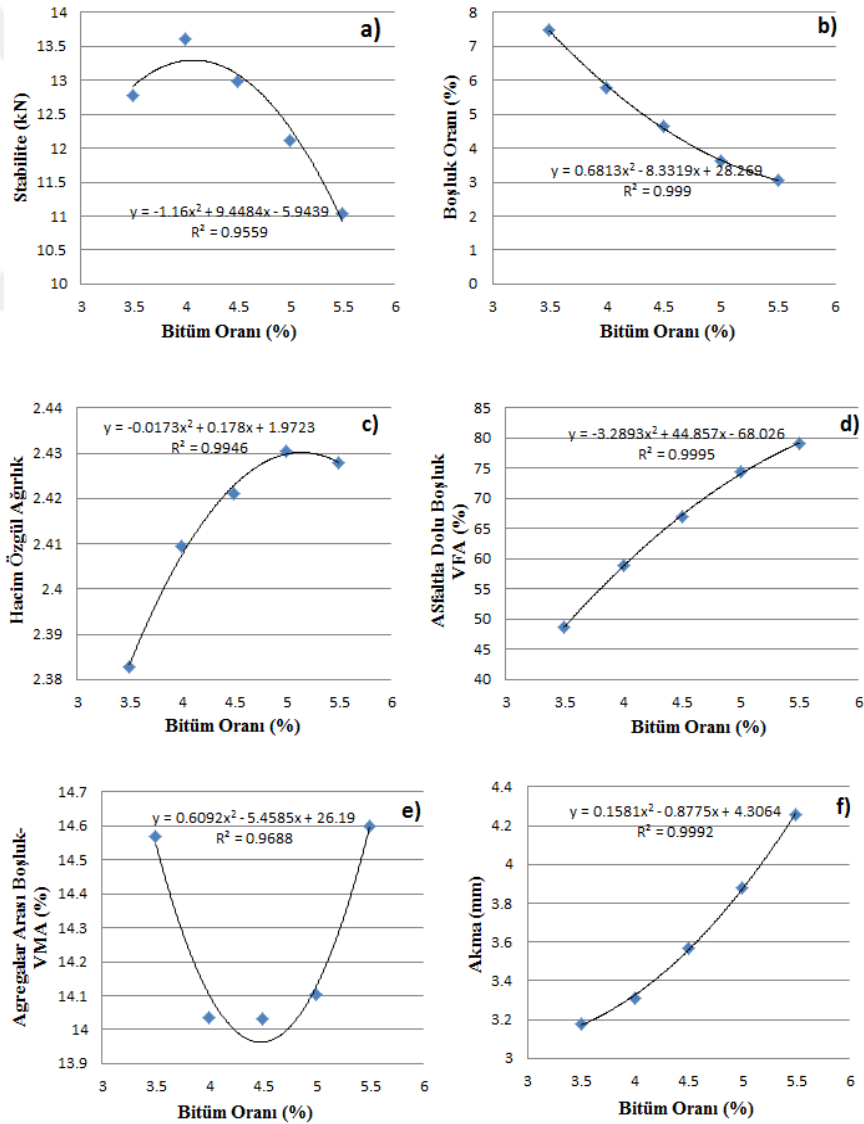
Saf bitümle hazırlanan BSK numunelerine ait Marshall sonuçları Şekil 4.79a-f'de gösterilmiştir. Şekil 4.79b'den %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranının %4.82 olduğu hesaplanmıştır. Bu oranın diğer tasarım kriterlerini (Stabilite, VMA, VFA ve akma) de Karayolu Teknik Şartnamesi aşınma tabakası limitlerine (Anonim, 2013) göre sağladığı görülmüştür. Bu sebeple **optimum bitüm oranı %4.82** (agrega ağırlığına) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.79. Saf bitümle hazırlanan BSK numunelerine ait Marshall sonuçları

4.5.1.2 PP katkılı bitümle hazırlanan ılık karışım asfalta (IKA-1) ait Marshall sonuçları

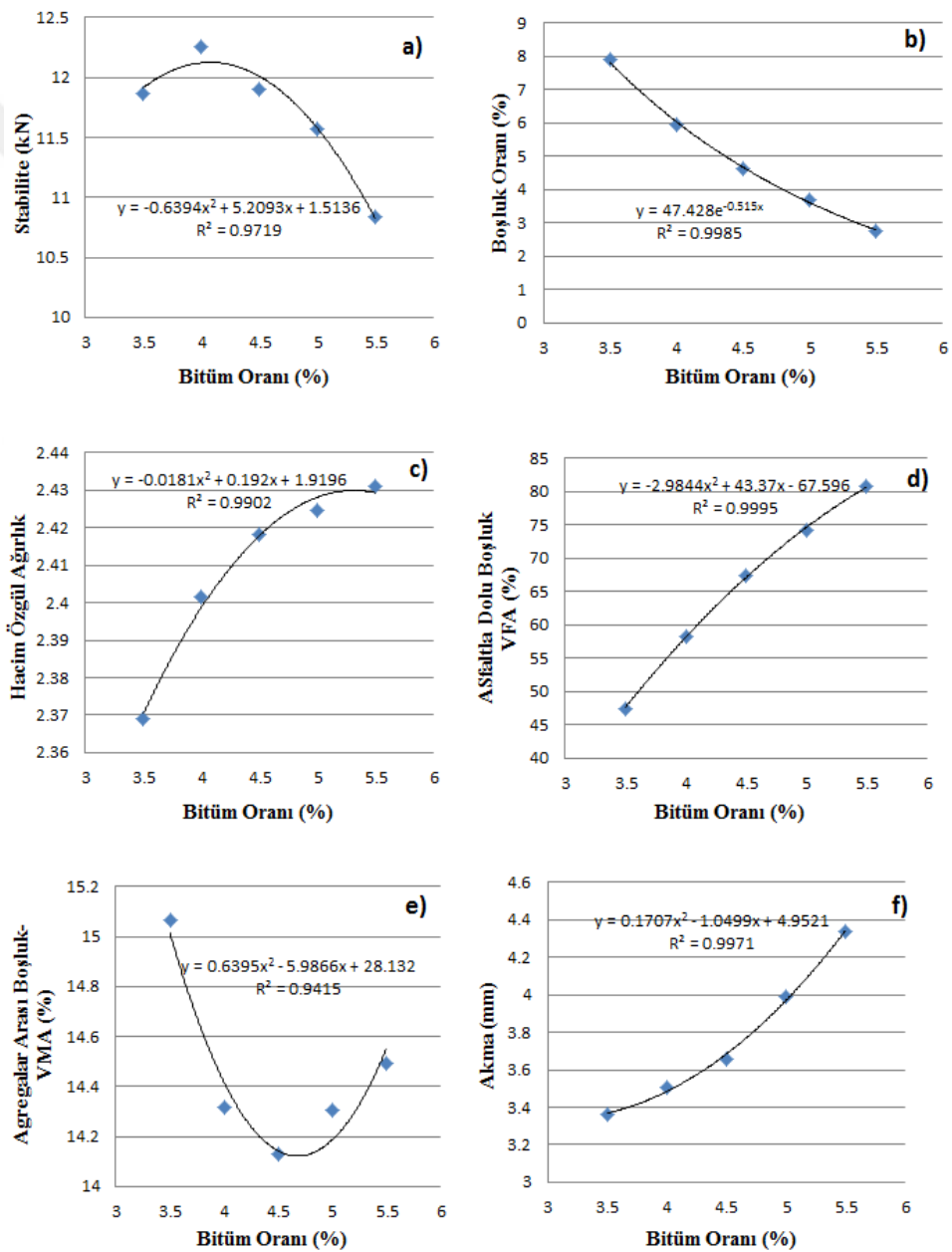
PP modifiyeli bitüm ile BSK'dan 14°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan IKA-1'in Marshall sonuçları Şekil 4.80a-f'de verilmiştir. Şekil 4.80b'deki Boşluk Oranı-Bitüm Oranı grafiği kullanılarak, %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranı %4.77 olarak hesaplanmıştır. Bu değer diğer grafiklerdeki parametreler için de limit değerleri sağladığı görülmüştür. Bu sebeple **optimum bitüm oranı %4.77** (agrega ağırlığınca) olarak seçilmiştir. Ayrıca Şekil 4.80a'daki stabilite-bitüm oranı grafiğine bakıldığında PP katkılı IKA'nın stabiliteyi saf bitüme kıyasla **%4.9 oranında arttırdığı** da görülmektedir.



Şekil 4.80. IKA-1 (PP) numunelerine ait Marshall sonuçları

4.5.1.3 YYPE-PET katkıli bitümle hazırlanan IKA-2'ye ait Marshall sonuçları

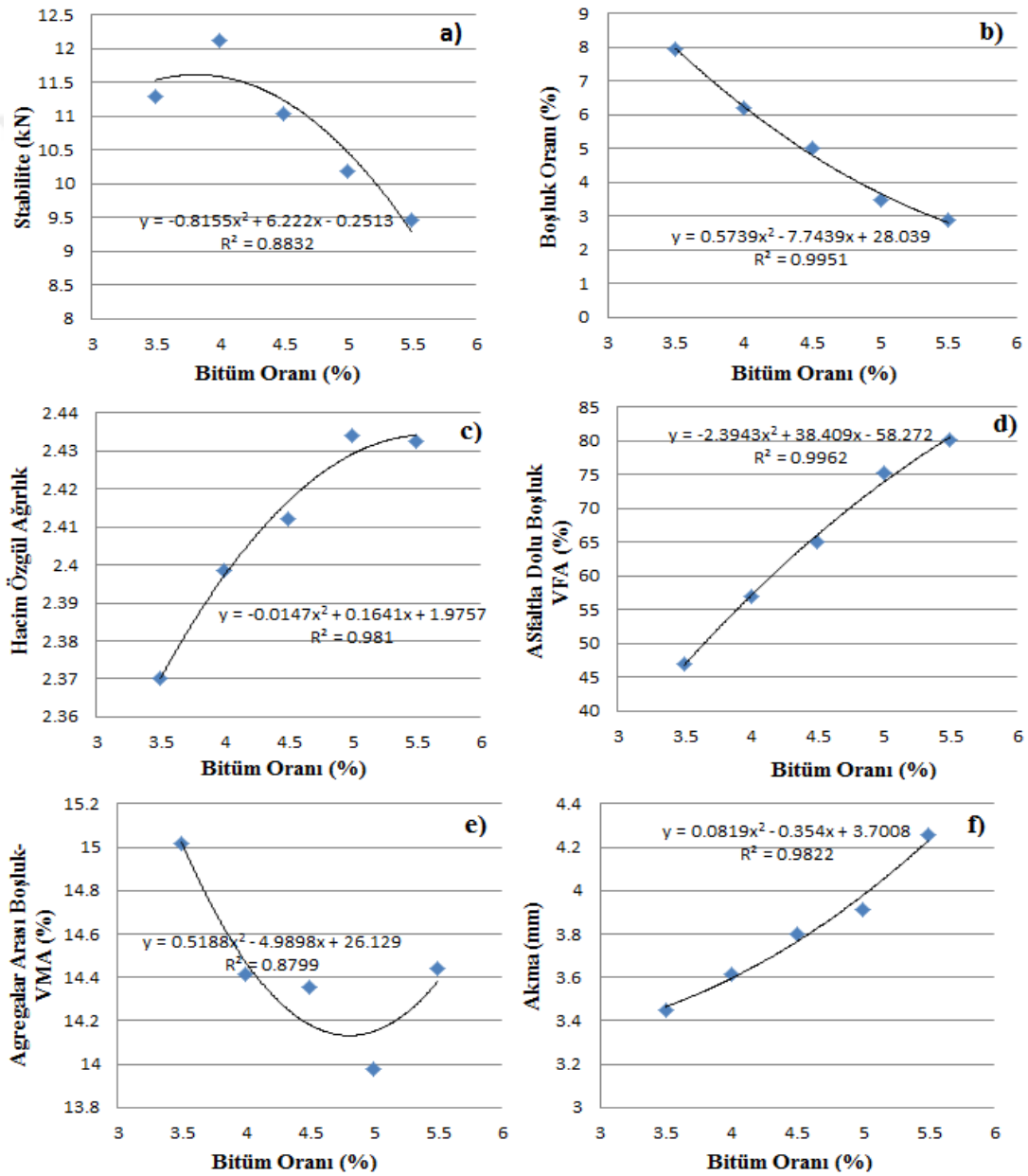
YYPE-PET modifiyeli bitüm ile BSK'dan 10°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan IKA-2'nin Marshall sonuçları Şekil 4.81a-f'de verilmiştir. Şekil 4.81b'den, YYPE-PET katkıli IKA-2'nin **optimum bitüm oranı %4.80** olarak belirlenmiştir. Bu bitüm oranının diğer parametreler için şartname limitleri arasında sonuç verdiği görülmüştür. Stabilitate grafiği incelendiğinde (Şekil 4.81a) ise, sonuçların **BSK'ya oldukça yakın (optimum bitüm oranlarında BSK stabilitesine yakınlık %97)** olduğu görülmektedir.



Şekil 4.81. IKA-2 (YYPE-PET) numunelerine ait Marshall sonuçları

4.5.1.4 PS katkılı bitümle hazırlanan IKA-3'e ait Marshall sonuçları

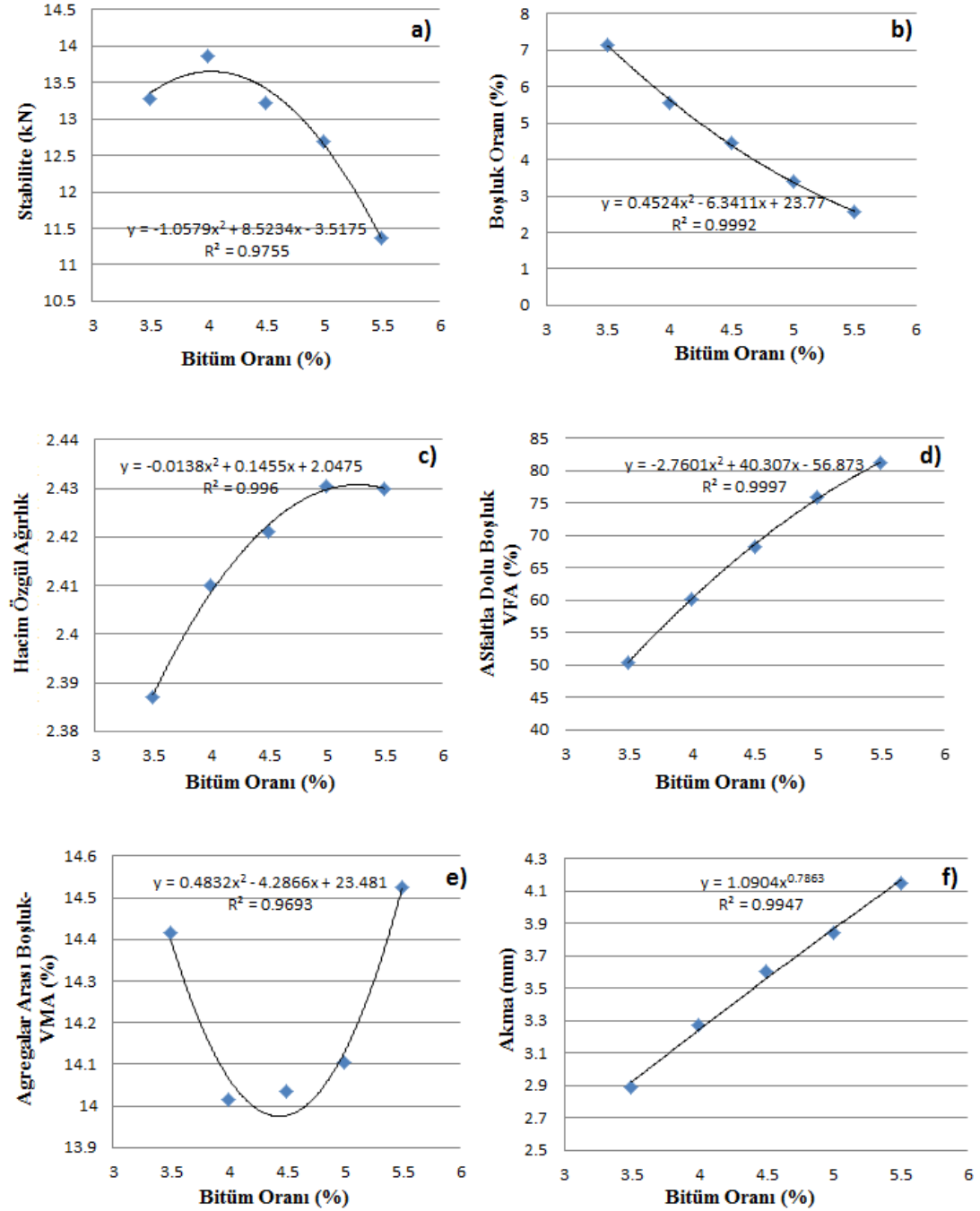
PS modifiyeli bitüm ile BSK'dan 15°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan IKA-3'ün Marshall sonuçları Şekil 4.82a-f'de verilmiştir. Şekil 4.82b'den IKA-3'ün **optimum bitümlü bağlayıcı oranı %4.83** olarak tespit edilmiştir. Bu oran ile diğer grafiklerde de şartname limitlerini sağlayan sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca IKA-3'ün stabilite değerlerinin **BSK ile yakın olduğu (optimum bitüm oranlarında BSK stabilitesine yakınlık %89)** Şekil 4.82a'dan görülmüştür.



Şekil 4.82. IKA-3 (PS) numunelerine ait Marshall sonuçları

4.5.1.5 Sasobit® katkılı bitümle hazırlanan IKA-4'e ait Marshall sonuçları

Organik IKA katkısı olan Sasobit® modifiyeli bitümle BSK'dan 8°C daha düşük sıcaklıkta hazırlanan IKA-4'ün Marshall sonuçları Şekil 4.83a-f'de verilmiştir. IKA-4 için optimum bitüm oranı %4.70 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.83b). Ayrıca IKA-4'ün BSK'ya göre stabilite değerini yaklaşık olarak % 8.6 oranında arttırdığı gözlenmiştir.

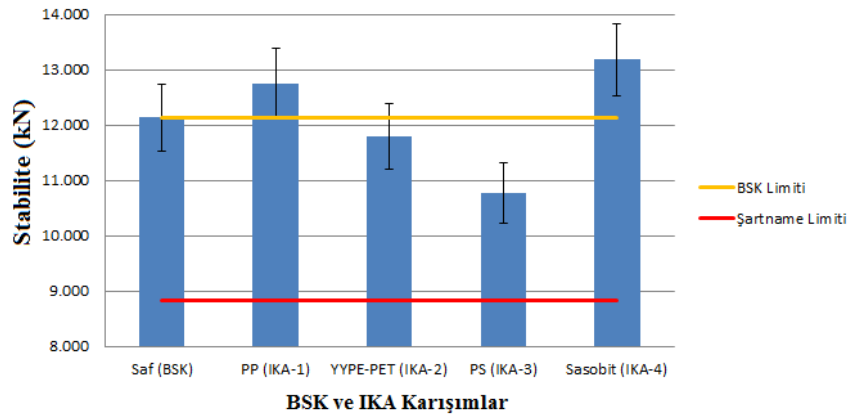


Şekil 4.83. IKA-4 (Sasobit®) numunelerine ait Marshall sonuçları

Marshall tasarımı sonuçları incelendiğinde hem piroliz sonucu elde edilen katkılarla hazırlanan IKA'ların hem de Sasobit® ile hazırlanan IKA'nın Marshall hacimsel özelliklerinin BSK'ya oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu durumun daha önce yapılan çalışmalar (Hurley ve Prowell, 2005; Kridan ve ark., 2010; Cooper, 2009; Jamshidi ve ark., 2013) ile benzerlik taşıdığı da yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. Her bir karışımın optimum bitüm oranında ortaya çıkan sonuçlarının, şartname limitlerini sağladığı görülmüştür (Çizelge 4.25). Karışımların stabilite sonuçları, kıyaslamayı daha net yapmak için Şekil 4.84'te de ayrıca sunulmuştur. Şekil 4.84'e göre, IKA ve BSK karışımların hepsi şartname limitinin üstünde sonuç vermiştir. IKA karışımlardan IKA-1 (PP) ve Sasobit® (IKA-4) BSK'dan sırasıyla %4.9 ve %8.6 oranlarında daha iyi stabilite sonucu vermiştir.

Çizelge 4.25. BSK ve IKA karışımların Marshall sonuçları (Şartname limitleri ile birlikte)

Parametreler	Saf (BSK)	PP (IKA-1)	YYPE-PET (IKA-2)	PS (IKA-3)	Sasobit® (IKA-4)	Min. Limit	Maks. Limit
Bitüm (Agrega ağırlığınca, %)	4.82	4.77	4.80	4.83	4.70	4	7
Stabilite (kN)	12.13	12.73	11.79	10.78	13.17	8.83	-
VMA (%)	14.02	14.01	14.13	14.13	14.01	14	16
VFA (%)	71.88	71.10	71.82	71.39	71.70	65	75
Hacim Özgül Ağırlık	2.429	2.428	2.424	2.425	2.427	-	-
Akma (mm)	3.77	3.72	3.85	3.90	3.68	2	4

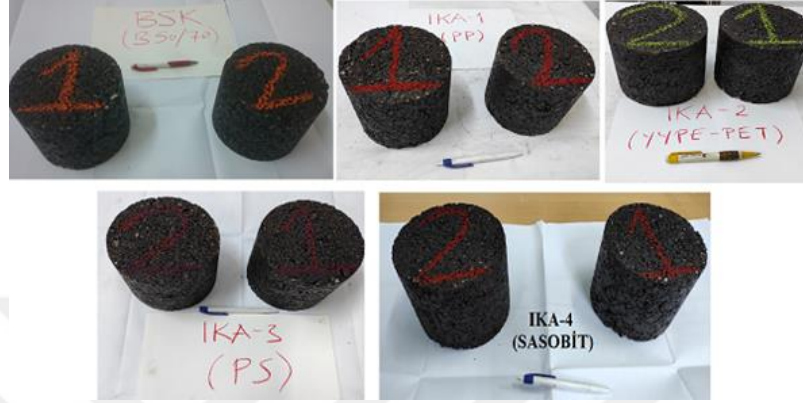


Şekil 4.84. Karışımların stabilite sonuçlarının karşılaştırılması

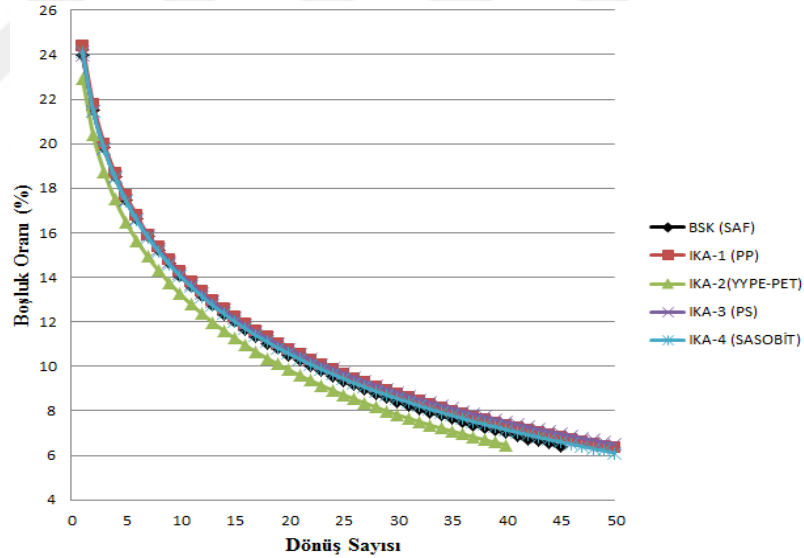
4.5.2 Tekerlek izi deneyi sonuçları

BSK ve IKA'ların yüksek sıcaklık performansı, tekerlek izi deneyi ile belirlenmiştir. Tekerlek izi deneyi için, çapı 15 cm ve yüksekliği yaklaşık 12 cm olan

silindirik numuneler, yoğurmalı sıkıştırma cihazında hazırlanmıştır (Şekil 4.85). Numuneler kendine ait karıştırma- sıkıştırma sıcaklıklarında ve daha önce belirlenen optimum katkı ve bitüm oranlarında hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanması esnasında elde edilen dönüş sayısı-boşluk oranı grafiği Şekil 4.86’da, ayrıntılı sonuçlar ise Çizelge 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.85. Tekerlek izi deneyi için hazırlanan numuneler



Şekil 4.86. BSK ve IKA numunelere ait dönüş sayısı-boşluk oranı değerleri

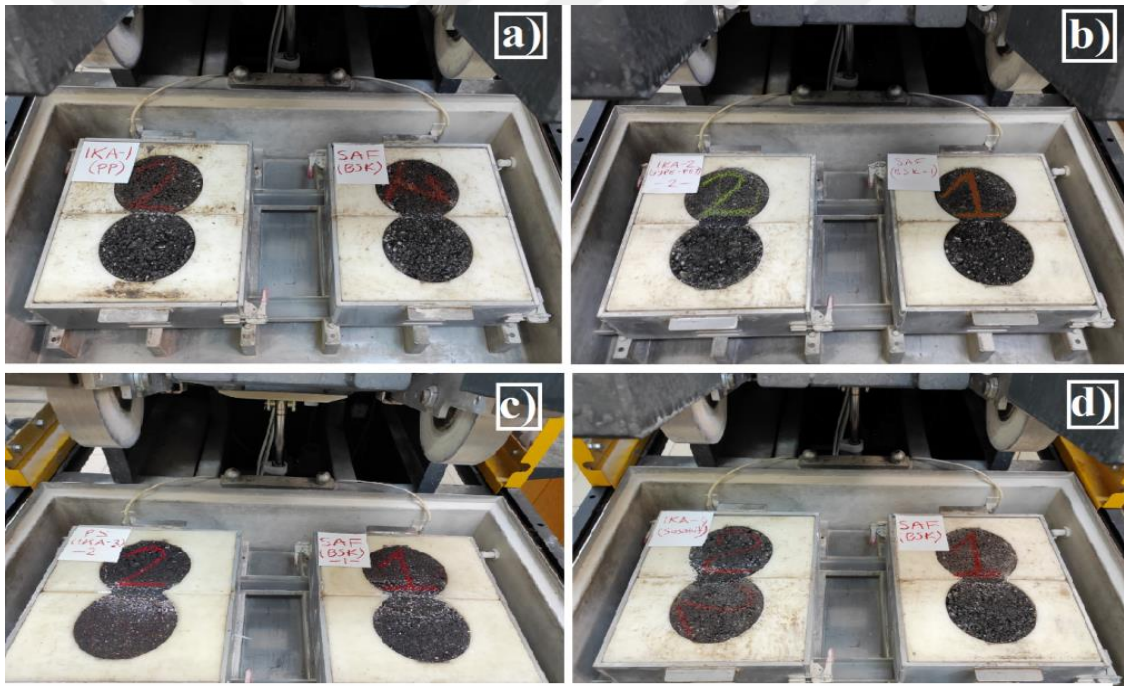
Çizelge 4.26. BSK ve IKA karışımların yoğurmalı sıkışma sonuçları

Karışım tipi	Boşluk Oranı (%)	Mevcut Boşluk Oranlarındaki Dönüş Sayısı	$N_{initial}=7^*$ dönüş sayısındaki boşluk oranı
BSK (Saf)	6.41	45	15.85
IKA-1 (PP)	6.32	50	15.91
IKA-2 (YYPE-PET)	6.47	40	14.93
IKA-3 (PS)	6.50	50	15.89
IKA-4 (Sasobit®)	6.10	50	15.81

$N_{initial}=7^*$ değeri, eşdeğer dingil yükü 0.3-3 milyon arası trafik koşulları varsayılarak seçilmiştir.

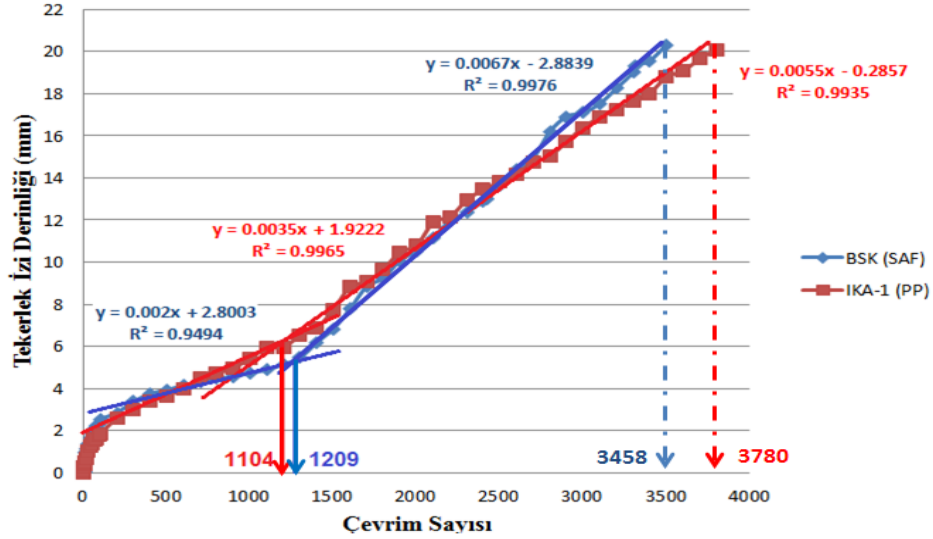
Şekil 4.86 ve Çizelge 4.26 birlikte incelendiğinde, IKA-2 (YYPE-PET) haricindeki diğer tüm karışımların, boşluk oranı-dönüş sayısı sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Burada, IKA-2 (YYPE-PET)'nin, hem mevcut boşluk oranındaki dönüş sayısı hem de 7.dönüş sayısındaki boşluk oranı (Anonymous, (2014)'e göre sıkışabilirliğin bir ölçüsü olarak) diğer karışımlara göre belirgin bir şekilde daha azdır. Bütün bunlar, IKA-2'nin diğer karışımlardan daha kolay sıkışabildiğini göstermektedir.

Hamburg tekerlek izi deneyi için, yoğurtmalı sıkıştırma cihazında hazırlanan silindirik numuneler iki parçaya ayrılıp (her bir parça 6 cm yüksekliğinde) Şekil 4.87'de görüldüğü üzere cihaza yerleştirilmiştir. Deneyler 50°C sıcaklıkta ve sulu ortamda gerçekleştirilmiş, sonuçlar Şekil 4.88-91'de sunulmuştur.



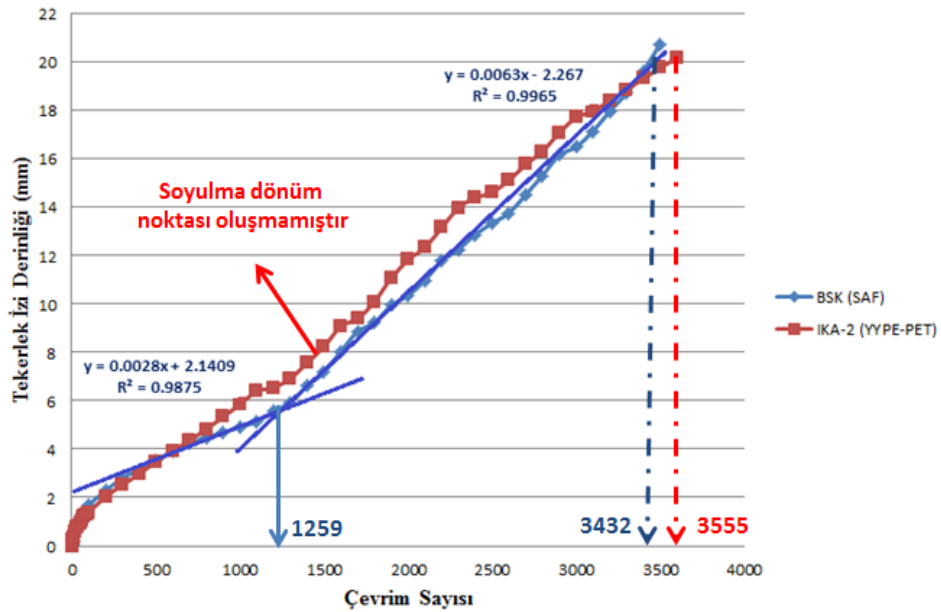
Şekil 4.87. Tekerlek izi deneyine hazır hale getirilmiş BSK ve IKA numuneleri, a) BSK-IKA₁, b) BSK-IKA₂, c) BSK-IKA₃ ve d) BSK-IKA₄

Şekil 4.88 incelendiğinde görülüyor ki, IKA-1 (PP), BSK'ya göre daha fazla geçiş sayısında 20 mm tekerlek izi derinliğine ulaşmıştır. Geçiş sayılarına bakıldığında, IKA-1'in (PP) BSK'nın tekerlek izi direncini **%9 oranında geliştirdiği** görülmektedir. Bu sonuçlar, PP modifiyeli bitümlerin DSR testinden elde edilen tekerlek izi faktörü ile de uyum göstermektedir. Ayrıca grafiklerden IKA-1 ve BSK için soyulma dönüm noktaları sırasıyla 1104 ve 1209 çevrim sayısı olarak belirlenmiştir. Buradan, karışımların soyulma dirençlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.88. BSK ve IKA-1 (PP) tekerlek izi deneyi sonuçları

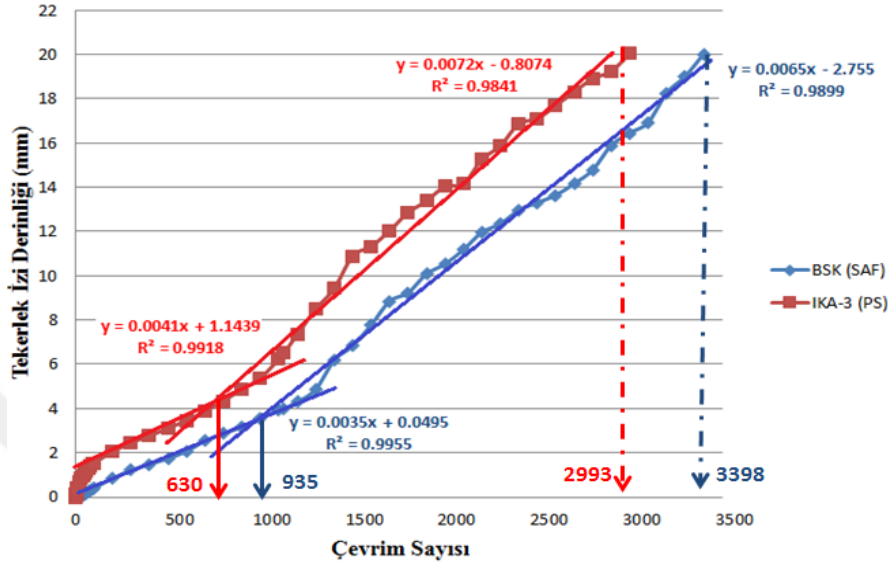
Şekil 4.89 incelendiğinde, IKA-2 ile BSK'nın 20 mm tekerlek izi derinliğindeki çevrim sayılarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Buradan, IKA-2'nin tekerlek izi direnci açısından BSK ile **hemen hemen aynı performansa sahip** olduğu söylenebilir. Bunun dışında IKA-2'de belirgin bir soyulma dönüm noktası oluşmadığı da tespit edilmiştir.



Şekil 4.89. BSK ve IKA-2 (YYPE-PET) tekerlek izi deneyi sonuçları

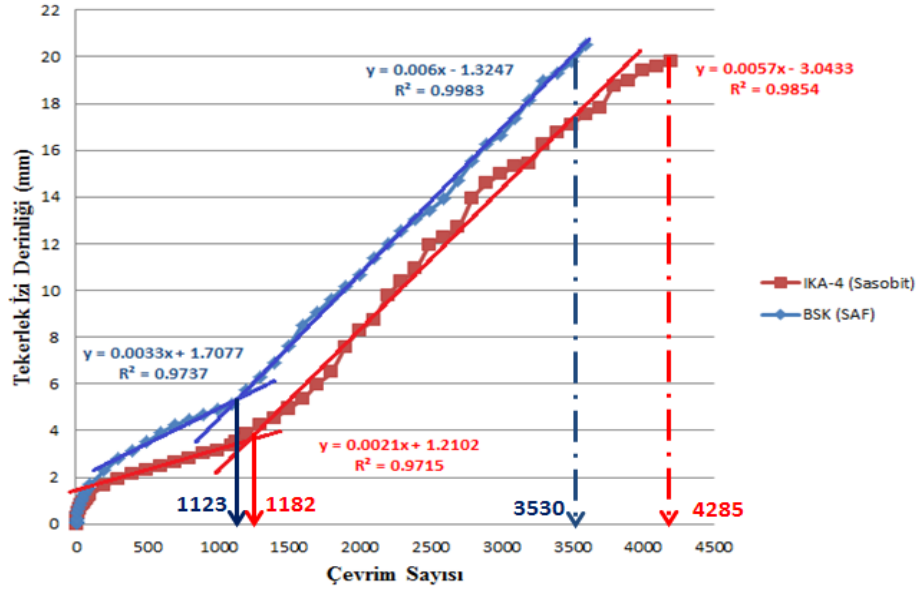
Şekil 4.90'dan, IKA-3'ün (PS) tekerlek izi direncinin BSK'ya göre daha düşük (%11 oranında) olduğu görülmüştür. Bu sonuç, ilgili modifiye bitümün DSR test

sonuçları ile de örtüşmektedir. Soyulma dönüm noktası değerlerine bakıldığında ise, IKA-3'ün BSK'ya göre daha düşük çevrim sayılarında soyulmaya başladığı görülmüştür. IKA-3 karışımın, soğuk hava testlerinde daha başarılı sonuç vermesi beklenmektedir.



Şekil 4.90. BSK ve IKA-3 (PS) tekerlek izi deneyi sonuçları

Şekil 4.91 incelendiğinde, IKA-4'ün (Sasobit®) tekerlek izi direncinin BSK'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Belirgin bir şekilde, Sasobit® ilavesi ile bitümlü karışımın yüksek sıcaklık performansının geliştiği anlaşılmaktadır. **Tekerlek izi direncindeki artışın** BSK'ya kıyasla %21 dolaylarında olduğu belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde, Sukhija ve Saboo (2021) tarafından yapılan bir derleme çalışmada Sasobit® katkılı IKA'ların tekerlek izi direncini, BSK'ya göre %11 ila %52 oranlarında geliştirdiği tespit edilmiştir. Benzer sonuçlara, Baek ve ark. (2018) ve Amelian ve ark. (2018) tarafından da ulaşıldığı görülmüştür. Karışımların soyulma direncine bakıldığında ise, IKA-4'ün BSK'dan %5 daha fazla çevrim sayısında soyulma dönüm noktasına ulaştığı görülmüştür. Bu konu ile ilgili benzer sonuçlara ise, Perkins (2009) ve Hurley ve Prowell (2005) tarafından ulaşıldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada IKA-4 (Sasobit®) ile ilgili elde edilen tekerlek izi test sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.91. BSK ve IKA-4 (Sasobit®) tekerlek izi deneyi sonuçları

Çizelge 4.27’de, karışımlara ait tekerlek izi sonuçları ile birlikte Marshall stabilite değerleri ve karışımların hazırlandığı bitümlere ait tekerlek izi faktörüne bağlı olarak hesaplanan orjinal ve RTFOT sonrası yenilme sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 4.27. BSK ve IKA karışımlara ait tekerlek izi, Marshall stabilite sonuçları ve ilgili bitümlere ait tekerlek izi faktörüne bağlı yenilme sıcaklığı değerleri

Karışım tipi	20 mm tekerlek izi derinliğindeki çevrim sayısı	Marshall Stabilite Değeri (kN)	Orijinal Bitüm DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	RTFOT Sonrası Bitüm DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)
BSK (Saf)	3455	12.13	69.2	68.0
IKA-1 (PP)	3780	12.73	69.4	71.6
IKA-2 (YYPE-PET)	3555	11.79	65.1	70.6
IKA-3 (PS)	2993	10.77	63.0	65.2
IKA-4 (Sasobit®)	4285	13.17	76.6	74.2

Çizelge 4.27 incelendiğinde, tekerlek izi direnci ile Marshall stabilite değeri ve DSR yenilme sıcaklıkları arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Tekerlek izi direnci ile RTFOT sonrası yenilme sıcaklık değerleri arasındaki lineer ilişkinin oldukça yüksek olduğu ($R^2 = 0.95$) tespit edilmiştir. Onu tekerlek izi direnci-Marshall Stabilite ilişkisi $R^2 = 0.91$ ile takip etmiştir. Tekerlek izi direnci-Orijinal bitüm yenilme sıcaklığı arasındaki ilişkinin ise %85 düzeyinde olduğu görülmüştür. Buradan, RTFOT sonrası DSR sonuçlarının tekerlek izi direncini daha iyi temsil ettiği yorumu yapılabilir.

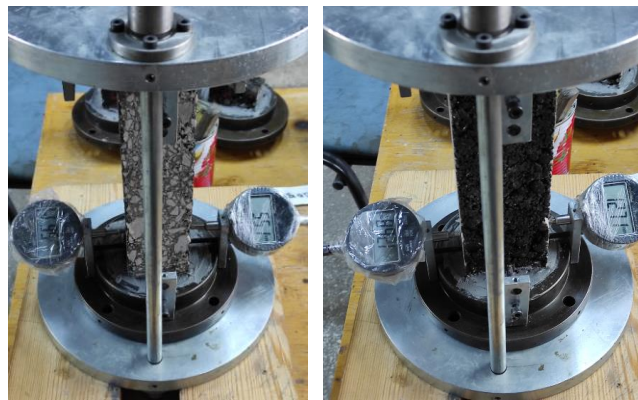
4.5.3 TSRST (Termal Gerilme Kısıtlı Numune Testi) sonuçları

Çalışmanın bu kısmında, TSRST deneyi için BSK ve IKA (PP, YYPE-PET, PS ve Sasobit® katkı) numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Karayolları 3.Bölge Müdürlüğü'nde bulunan slab compactor kullanılarak sıkıştırılmış ve 5x6.5x25 cm boyutlarında prizmatik kiriş formunda kesilmiştir (Şekil 4.92). Numuneler yaklaşık %6-7 hava boşluğunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı'nda test edilmiştir.



Şekil 4.92. Slab compactor (solda), TSRST numuneleri (sağda)

Numunelerde aksenal kayma olmaması için, deney öncesinde epoksi ile alttan ve üstten yapıştırılmıştır. Şekil 4.93'te gösterildiği gibi deplasman ölçerler yardımıyla da aksenal olarak düzgünlüğü kontrol edilmiştir.

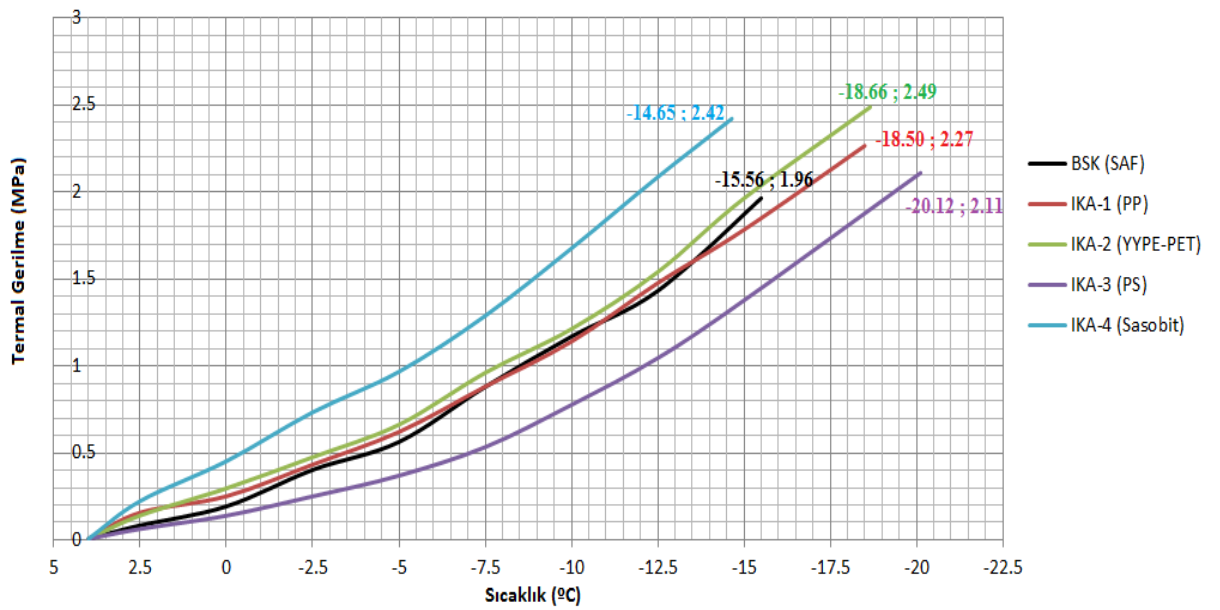


Şekil 4.93. TSRST öncesi numunelerin hazırlanışı

Şekil 4.94'te görüldüğü gibi, numuneler soğutma kabineye yerleştirilmiş ve 3 saatlik koşullandırma sürecinin (4°C'de) ardından sabit bir hızda (10°C/sa) soğutulmuş ve numunelerin gerilme-sıcaklık davranışı gözlenmiştir. Numunelerin kırılması ile deney sonlanmıştır. Deneyden elde edilen kırılma sıcaklığı ve kopma dayanımı değerleri Şekil 4.95'te gösterilmiştir.



Şekil 4.94. Numunenin deney öncesindeki (solda) ve sonrasındaki görünümü (sağda)



Şekil 4.95. BSK ve IKA karışımlara ait kırılma sıcaklığı-kopma dayanımı eğrileri

Şekil 4.95'te görüldüğü üzere, sıcaklık azaldıkça karışımların maruz kaldığı gerilme değerleri artmaktadır. Grafik incelendiğinde görülüyor ki, **piroliz katkılı** IKA'ların hepsi, saf bitümlü hazırlanan BSK'dan hem **daha düşük sıcaklıkta** hem de **daha yüksek gerilme** değerlerinde kırılmıştır. Sasobit® ile hazırlanan IKA-4 ile BSK'nın kırılma sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu (yaklaşık -15°C) görülmüştür. BSK'nın düşük sıcaklık performansını, kırılma sıcaklığı açısından en çok geliştiren karışım grubu ise -20°C sıcaklık değeri ile IKA-3 (PS) olmuştur. Onu sırasıyla -18.6°C ile IKA-2 (YYPE-PET) ve -18.5 °C ile IKA-1 (PP) takip etmiştir. Karışımların kopma dayanımları ele alındığında ise, YYPE-PET katkılı IKA-2'nin 2.49 MPa değeri ile BSK'yı (1.96 MPa) en çok geliştiren karışım grubu olduğu görülmüştür. Onu sırasıyla IKA-4 (Sasobit®), IKA-1 (PP) ve IKA-3 (PS) izlemiştir. İlgili karışımların kopma dayanımları ise sırasıyla şu şekildedir: 2.42, 2.27 ve 2.11 MPa. Bu sonuçlardan hareketle, tez kapsamında üretilen IKA-1, IKA-2 ve IKA-3 karışımlarının hepsinin **soğuk hava performansının BSK'dan daha iyi** olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.28'de ilgili karışımların kırılma sıcaklığı ve kopma dayanımlarının yanı sıra boşluk oranı, termal katsayı ve eğim değerleri de verilmiştir. Ayrıca, karışımlarda kullanılan bitümlü bağlayıcılara ait BBR sonuçları da ilgili çizelgeden görülmektedir. Termal katsayı değeri, karışımın sıcaklık etkisiyle hacimsel değişimini göstermektedir. Bu değer arttıkça, karışım sıcaklık değişimine daha fazla tepki (hacimsel değişim açısından) vermektedir. Termal katsayı ile kırılma sıcaklığının doğru orantılı olduğu sonuçlardan görülmektedir. Ancak, burada çok güçlü bir korelasyon ($R^2=0.62$) oluşmadığı gözlenmiştir. Eğim değeri ise, karışımın düşük sıcaklıklardaki termal kırılma hassasiyetini gösteren bir değerdir. Bu değer artması, karışımın düşük sıcaklık çatlaklarına direncinin azaldığı şeklinde yorumlanmaktadır (Edwards ve ark., 2006). Nitekim bu çalışmada da, eğim ve kırılma sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki ($R^2=0.85$) olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, BBR sonuçları incelendiğinde, $S \geq 300$ MPa ve $m \leq 0.3$ koşulları dikkate alınarak tespit edilen yenilme sıcaklıkları ile TSRST deneyinden elde edilen kırılma sıcaklıkları arasında çok yüksek oranda (sırasıyla $R^2=0.95$ ve $R^2=0.97$) doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişki, BBR ile TSRST sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.28. BSK ve IKA karışımların TSRST sonuçları ile bitümlü bağlayıcıların BBR sonuçları

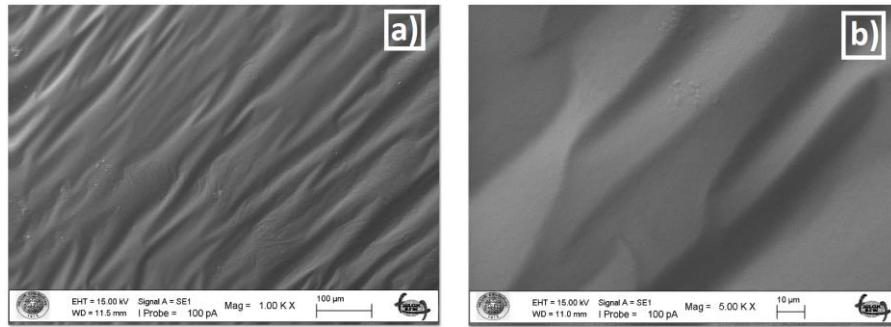
Numune	Hava boşluğu (%)	Termal Katsayı (1/°C) (10 ⁻⁶)	Eğim (kPa/°C)	Kırılma Sıcaklığı (°C)	Kopma Dayanımı (MPa)	Yenilme Sıcaklığı °C (S≥300 MPa)	Yenilme Sıcaklığı °C (m≤0.3)
BSK (SAF)							
Ortalama	6.51	27.15	129.5	-15.56	1.96	-16.45	-15.40
Standart Sapma	0.59	10.17	4.95	0.37	0.28	-	-
Varyasyon katsayısı (%)	9.02	37.45	3.82	2.41	14.04	-	-
IKA-1 (PP)							
Ortalama	6.55	26.86	122.2	-18.50	2.27	-22.25	-19.46
Standart Sapma	0.08	3.67	4.17	0.02	0.27	-	-
Varyasyon katsayısı (%)	1.19	13.67	3.41	0.11	12.10	-	-
IKA-2 (YYPE-PET)							
Ortalama	5.93	25.37	126.1	-18.66	2.49	-20.67	-19.43
Standart Sapma	0.19	1.68	9.42	1.00	0.23	-	-
Varyasyon katsayısı (%)	3.22	6.63	7.47	5.34	9.10	-	-
IKA-3 (PS)							
Ortalama	6.84	20.42	116.3	-20.12	2.11	-24.76	-20.37
Standart Sapma	0.55	0.92	7.34	0.19	0.25	-	-
Varyasyon katsayısı (%)	8.06	4.54	6.31	0.95	11.90	-	-
IKA-4 (Sasobit®)							
Ortalama	5.95	27.62	142.0	-14.65	2.42	-15.96	-13.70

4.6 Bitümlü Bağlayıcılara ve Piroлиз Ürünlerine Yapılan Karakterizasyon Test Sonuçları

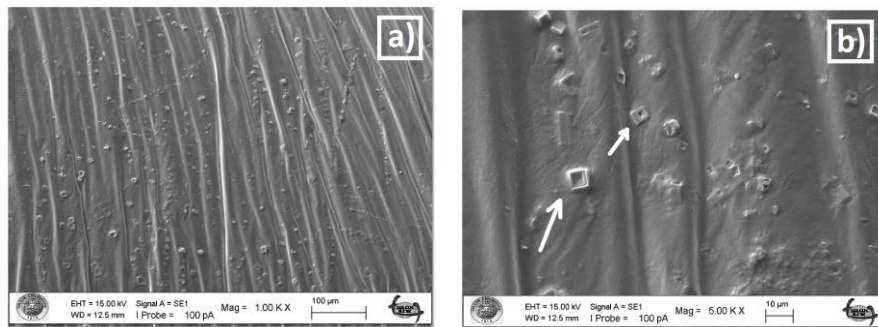
Tez çalışması kapsamında, bitümlerin yüzey morfolojisi SEM analizi ile incelenmiştir. Saf ve katkı bitümlerin yapısındaki fonksiyonel bağların durumu FTIR testi ile araştırılmıştır. Öte yandan, piroliz katkı maddelerinin bitüm içerisindeki dağılıma mekanizması Zeta Potansiyeli analizi ile irdelenmiştir. Ayrıca, DSC analizi ile katkı maddeleri ve bitümlerin farklı sıcaklıklardaki ısı kapasiteleri araştırılmıştır.

4.6.1 SEM analizi sonuçları

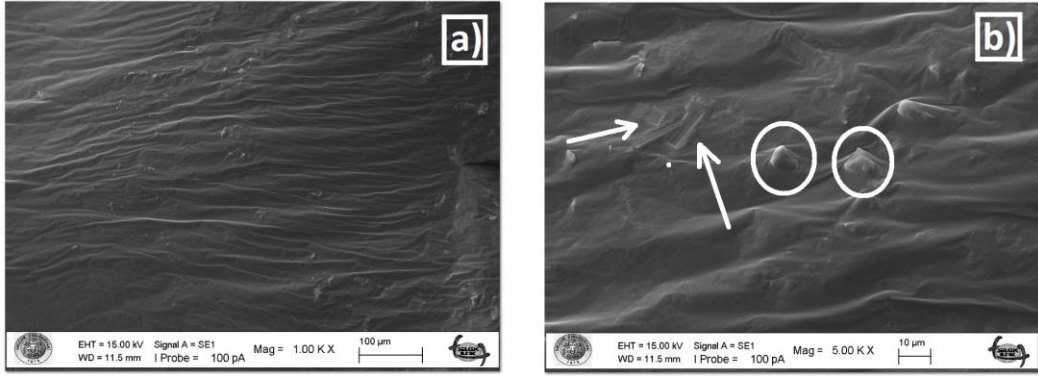
Saf ve katkılı bitümlere yapılan SEM analizleri, 1000 ve 5000 büyütmede elde edilen görüntüler üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.96a ve Şekil 4.96b, saf bitüme ait SEM görüntüleri olup hemen her noktada homojen bir görüntü elde edilmiştir. Şekil 4.97a ve Şekil 4.98a incelendiğinde, 1000 büyütmeden elde edilen görüntülerden PP %6K-%6S ve YYPE-PET %6K-%6S katkı maddelerinin bitüm içerisinde uniform bir şekilde dağıldığı anlaşılmıştır. 5000 büyütmeden elde edilen görüntüler (Şekil 4.97b ve Şekil 4.98b) incelendiğinde ise, katkı maddesi sınırlarının net bir şekilde görülebildiği (beyaz okla gösterilmiştir), dolayısıyla katkı maddelerinde herhangi bir topaklanma olmadığı söylenebilir. Şekil 4.98b’de beyaz çember içerisine alınan bölgelerde, modifiye bitüm bünyesinde bulunan sıvı ürünün vakum etkisi ile buharlaşmaya devam ettiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.97b’de gözlenmemiştir. 5000 büyütmedeki görüntülerden ayrıca katkı maddesi boyutunun 10 µm civarına kadar küçüldüğü de görülmektedir. Çalışmada kullanılan modifiye bitümlerden PS %6K-%6S’den, analiz esnasında vakum etkisi ile yüzeyde gaz çıkışının devam etmesi sebebiyle sağlıklı görüntü alınamamıştır.



Şekil 4.96. Saf bitüme ait SEM görüntüleri a) 1000 büyütme, b) 5000 büyütme

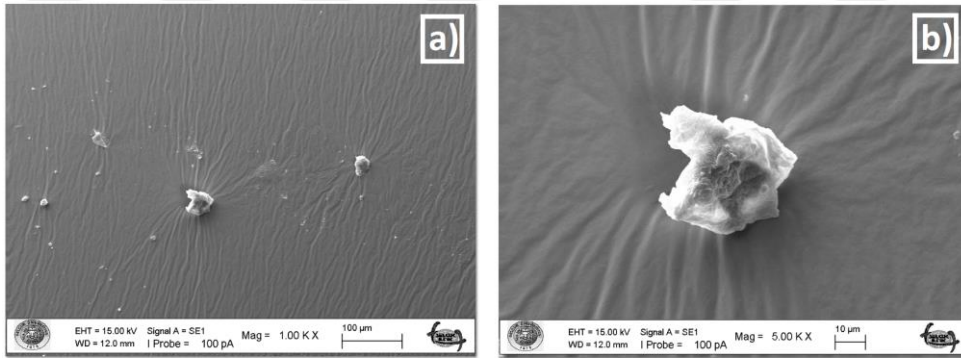


Şekil 4.97. PP %6K-%6S katkılı bitüme ait SEM görüntüleri a) 1000 büyütme, b) 5000 büyütme



Şekil 4.98 YYPE-PET %6K-%6S katkılı bitüme ait SEM görüntüleri a) 1000 büyütme, b) 5000 büyütme

Sasobit[®] modifiyeli bitüme ait SEM görüntüleri (Şekil 4.99a ve Şekil 4.99b) incelendiğinde, 1000 büyütmedeki görüntüden katkı maddesinin bitüm içerisinde kısmen uniform olarak dağıldığı söylenebilir. 5000 büyütme sonucu ortaya çıkan görüntüden, katkı maddesinin net bir şekilde görülebildiği dolayısıyla herhangi bir topaklanma oluşmadığı anlaşılmaktadır. Katkı boyutunun ise 40-45 µm olduğu tespit edilmiştir. Literatür incelendiğinde, benzer sonuçlara Fazaeli ve ark. (2016) tarafından da ulaşıldığı görülmüştür.



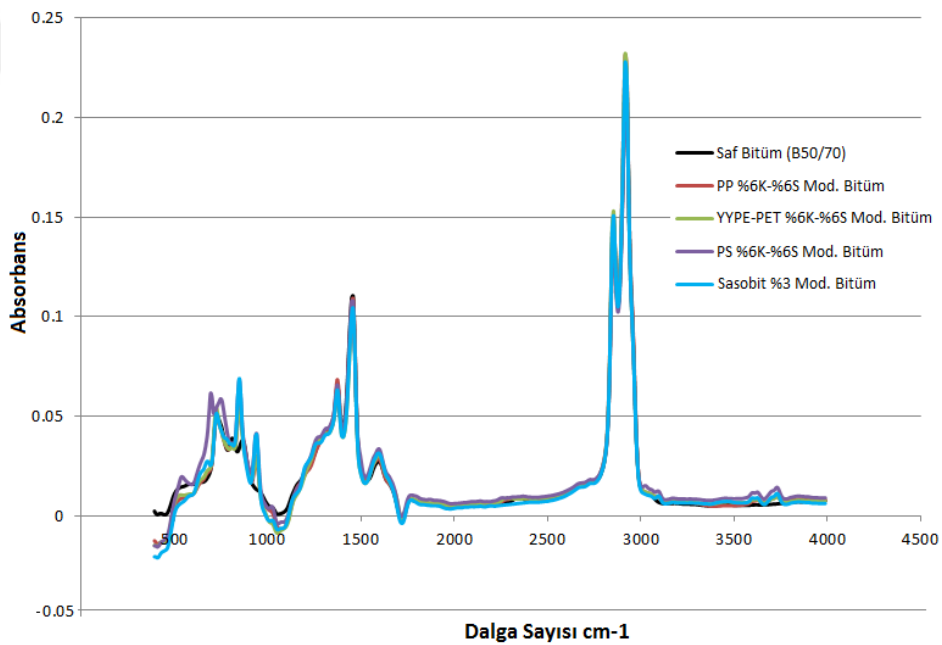
Şekil 4.99. Sasobit[®] %3 katkılı bitüme ait SEM görüntüleri a) 1000 büyütme, b) 5000 büyütme

4.6.2 FTIR analizi sonuçları

FTIR analizi 400-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında saf ve katkılı bitümlere (PP %6K-%6S, YYPE-PET %6K-%6S, PS %6K-%6S ve Sasobit[®] %3) yapılmıştır. Analiz sonuçları toplu olarak Şekil 4.100'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, bitümlü bağlayıcılara ait çeşitli dalga sayılarındaki fonksiyonel gruplar görülmektedir. Bunlardan, 2850-2970 cm^{-1} aralığında olanların C-H alkan grubunu, 1690-1760 cm^{-1} aralığında olanların aldehitler-ketonlar grubunu, 1500-1600 cm^{-1} aralığında olanların

C=C aromatik halkaları, 1340-1470 cm^{-1} aralığında olanların C-H aromatik halkaları ve 995 cm^{-1} dalga sayısının aşağısında olanların ise C-H alkenleri temsil ettiği söylenebilir (Gündüz, 2002).

Şekil 4.100'den ayrıca şu yorumları da yapmak mümkündür: Katkılı bitümlerin spektral eğrilerindeki pik pozisyonlarının saf bitümle hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Başka bir ifade ile katkı maddelerinin bitüme katılması ile yeni pikler oluşmamış veya mevcut pikler ortadan kaybolmamıştır. Bitümlerin pik şiddetlerinin de yine birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Dolayısıyla tez kapsamında kullanılan katkı maddeleri ile bitüm modifikasyonun fiziksel olarak gerçekleştiği yorumu yapılabilir. Benzer sonuçlara Ge ve ark. (2017) tarafından da ulaşıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.100. Saf ve katkıli bitümlere ait FTIR sonuçları

4.6.3 Zeta Potansiyel analizi sonuçları

Çizelge 4.29'da saf ve katkıli bitümlere ait zeta potansiyel değerleri görülmektedir. Çizelge incelendiğinde, saf bitümün zeta potansiyel değerinin mutlak değerce en büyük olduğu, dolayısıyla en kararlı karışım olduğu görülmektedir. Saf bitüme piroliz katkıları ve Sasobit® ilavesi ile bitümün zeta potansiyeli azalmış, ancak sonuçlar 20 mV değerinden çok uzaklaşmamıştır. Bu sonuçlardan hareketle, modifiye bitümlerin kararlı yapıya yakın bir davranış sergilediği (Zeta potansiyel değeri sıfıra yaklaştıkça karışım kararsız hale geçmektedir) ve bitüm içerisindeki katkı maddelerinin

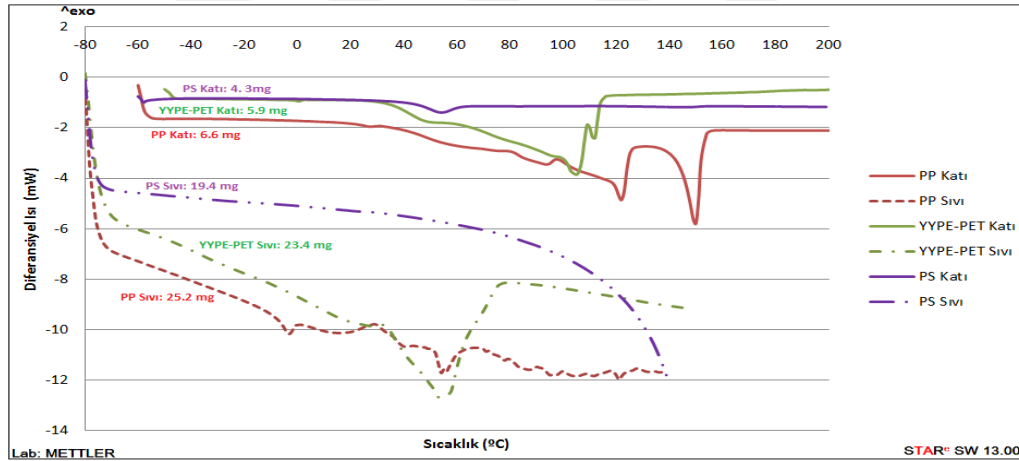
çökelmediği (askıda kaldığı) yorumları yapılmıştır (Shnoudeh ve ark., 2019; Joseph ve Singhvi, 2019).

Çizelge 4.29. Saf ve katkılı bitümlere ait Zeta Potansiyel değerleri

Bitüm türü	Zeta Potansiyeli (mV)
Saf Bitüm (B50/70)	-27.0
PP %6K-%6S modifiyeli bitüm	17.8
YYPE-PET %6K-%6S modifiyeli bitüm	23.1
Sasobit® modifiyeli bitüm	20.7

4.6.4 DSC analizi sonuçları

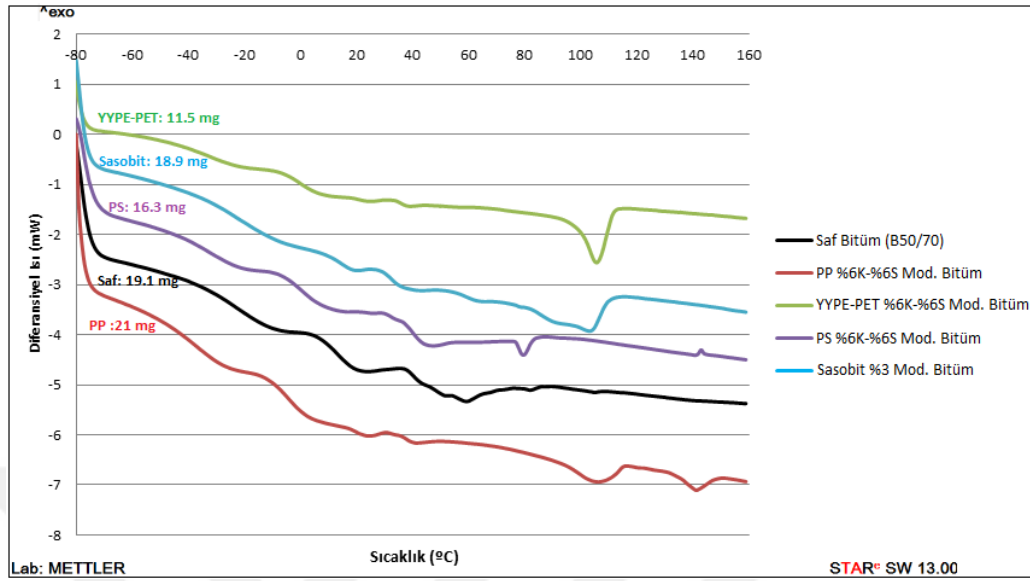
DSC ölçümleri, STAR^e System (Mettler Toledo Company) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık aralığı, numuneler arasında değişkenlik göstermekle birlikte genel olarak -80°C ila 200°C olarak seçilmiştir. Sıcaklık artış hızı olarak ise 10°C/dk tercih edilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4.101-102’de gösterilmiştir.



Şekil 4.101. Piroliz katı ve sıvı ürünlere yapılan DSC deney sonuçları

Şekil 4.101’de, piroliz katı ve sıvı ürünlerine yapılan DSC sonuçları görülmektedir. Grafiklerden, PP piroliz katısının (kırmızı sürekli çizgi) yumuşadığı sıcaklığın 145°C yakınlarında olduğu tespit edilmiştir. PP piroliz sıvısı (kırmızı kesikli çizgi) için ise bu sıcaklık değerleri -3°C ve 55°C olarak belirlenmiştir. YYPE-PET piroliz katı ürünü (yeşil sürekli çizgi) incelendiğinde, grafikten pik değerinin 105°C yakınlarında olduğu anlaşılmıştır. YYPE-PET piroliz sıvı (yeşil kesikli çizgi) ürününe bakıldığında ise ürünün yumuşama sıcaklığının 55°C dolaylarında olduğu gözlenmiştir. PS katı ürününün (mor sürekli çizgi) yumuşama değerinin ise grafikten

55°C ve 145°C olarak tespit edilmiştir. PS sıvı ürününde (mor kesikli çizgi) ise, herhangi bir pik gözlenmemiştir.



Şekil 4.102. Saf ve katkıli bitümlere ait DSC sonuçları

Şekil 4.102'deki ısı-sıcaklık grafiklerinden saf ve katkıli bitümlerde meydana gelen pikler görülmektedir. Bitümlere ait piklerin net bir şekilde görülmesi için, her bir eğri y eksenini doğrultusunda, bir alttaki eğriye göre 0.5 mW değerinde yukarı ötelenmiştir. PP %6K-%6S, YYPE-PET %6K-%6S ve Sasobit® %3 modifiyeli bitümlerin ısı-sıcaklık eğrilerinde 100-110°C aralığında pikler gözlenmiştir. Bu sıcaklık aralığında katkı maddelerinin katı formdan uzaklaşıp yumuşamaya başladığı anlaşılmıştır (Şekil 4.101). PP %6K-%6S modifiyeli bitümde, diğer bitümlerden farklı olarak ayrıca 140°C civarında da bir pik gözlenmiştir (Bitümdeki bu pik değerinin, ilgili sıcaklıkta PP katı ürününün yumuşamaya başlaması sebebi ile olduğu düşünülmektedir). PS %6K-%6S modifiyeli bitümde meydana gelen pikler diğer katkıli bitümlerden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, ayrıca Şekil 4.53'te sunulan viskozite-sıcaklık grafiği ile de tutarlılık göstermektedir.

Saf bitüme ait olan pikler ise 20-60°C aralığında gözlenmiştir. Saf bitümde görülen bu piklerin, bitüm içerisinde mevcut olan doğal vakslardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Lu ve ark. (2005) tarafından yapılan bir çalışmada da bitüm içerisindeki vaksın 60°C sıcaklığa kadar eridiği, bazı durumlarda bu sıcaklığın 80°C'leri bulabileceği belirtilmiştir. Benzer sonuçlara Edwards ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada da rastlanılmıştır.

4.7 BSK ve IKA'ların Maliyet Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, BSK ve IKA'ların üretimi esnasında ortaya çıkan maliyetler belirlenmiş olup, karışımların nakliyesi, serilip-sıkıştırılması gibi ilave maliyetler dikkate alınmamıştır. Maliyet hesaplarında, karışımlarda kullanılan agrega ve bitüm maliyetlerinin yanı sıra kullanılan katkı maddelerinin bedeli ve her bir karışıma ait enerji maliyeti dikkate alınmıştır. Bunun dışında, piroliz tesis maliyeti de çalışmaya dahil edilerek piroliz katkılı IKA'ların karlılık durumu araştırılmıştır. Maliyet analizinde hesaplamalar karşımın tonu başına olmak üzere hem Türk Lirası (TL) hem de Amerikan Doları (\$) para biriminde belirlenmiş olup, dolar kuru 02.07.2022 tarihi itibari ile 1\$=16.76 TL olarak dikkate alınmıştır.

4.7.1 Karışımlardaki agrega ve bitüm maliyetlerinin belirlenmesi

BSK ve IKA'larda kullanılan agrega maliyetleri KGM4104 (12.5 mm üstü agrega hazırlanması), KGM4106 (9.5 mm üstü agrega hazırlanması) ve KGM4107 (4.75 mm ve daha küçük agrega hazırlanması) nolu poz birim maliyet bilgileri kullanılarak elde edilmiştir. Ortaya çıkan birim maliyetler, ilgili pozlar için sırasıyla 80.13 TL/ton (4.78 \$/ton), 85.11 TL/ton (5.08 \$/ton) ve 88.38 TL/ton (5.27 \$/ton) şeklindedir. BKS ve IKA karışımlarda kullanılan agregaların maliyet hesapları, aşağıda belirtilen agrega oranları dikkate alınarak yapılmıştır:

- 12.5 mm üstü: %8.7 (agrega ağırlığınca)
- 9.5 mm üstü: %12.8 (agrega ağırlığınca)
- 4.755 mm ve altı: %78.5 (agrega ağırlığınca)

Karışımlarda kullanılan bitüm maliyetleri, *Bölüm 4.5.1'de* yapılan Marshall tasarımından elde edilen optimum bitümlü bağlayıcı oranları dikkate alınarak hesaplanmıştır. *Bölüm 4.5.1'de* agrega ağırlığınca belirlenen optimum oranlar, karşımın tonu başına maliyet analizi yapılacağından, çalışmanın bu kısmında *karışım ağırlığınca* olmak üzere yeniden düzenlenerek, BSK, IKA-1 (PP), IKA-2 (YYPE-PET), IKA-3 (PS) ve IKA-4 (Sasobit®) için sırasıyla %4.6, %4.55, %4.58, %4.61, %4.49 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bitüm miktarlarına, katkılı bitümlerde katkı miktarı da dahildir. Katkı bedeli ayrıca hesaplanacağından tespit edilen bitüm miktarlarından katkı miktarları bu bölümde çıkarılmıştır. Bitüm fiyatı 9,522.8 TL/ton (568.19 \$/ton) olarak

alınmıştır. Bu bilgiler ışığında karışımlardaki agrega ve bitüm maliyetleri şu şekilde hesaplanmıştır:

- BSK için agrega maliyeti: $(0.954 \times 0.087 \times 80.13) + (0.954 \times 0.128 \times 85.11) + (0.954 \times 0.785 \times 88.38) = 83.23 \text{ TL/ton (4.97 \$/ton)}$
bitüm maliyeti: $0.046 \times 9,522.8 = 438.05 \text{ TL/ton (26.14 \$/ton)}$
- IKA-1 (PP) için agrega maliyeti: $(0.9545 \times 0.087 \times 80.13) + (0.9545 \times 0.128 \times 85.11) + (0.9545 \times 0.785 \times 88.38) = 83.27 \text{ TL/ton (4.97 \$/ton)}$
bitüm maliyeti: $0.0455 \times (100/112) \times 9,522.8 = 386.86 \text{ TL/ton (23.08 \$/ton)}$
- IKA-2 (YYPE-PET) için agrega maliyeti: $(0.9542 \times 0.087 \times 80.13) + (0.9542 \times 0.128 \times 85.11) + (0.9542 \times 0.785 \times 88.38) = 83.25 \text{ TL/ton (4.97 \$/ton)}$
bitüm maliyeti $0.0458 \times (100/112) \times 9,522.8 = 389.41 \text{ TL/ton (23.23 \$/ton)}$
- IKA-3 (PS) için agrega maliyeti: $(0.9539 \times 0.087 \times 80.13) + (0.9539 \times 0.128 \times 85.11) + (0.9539 \times 0.785 \times 88.38) = 83.22 \text{ TL/ton (4.97 \$/ton)}$
bitüm maliyeti $0.0461 \times (100/112) \times 9,522.8 = 391.97 \text{ TL/ton (23.39 \$/ton)}$
- IKA-4 (Sasobit®) için agrega maliyeti: $(0.9551 \times 0.087 \times 80.13) + (0.9551 \times 0.128 \times 85.11) + (0.9551 \times 0.785 \times 88.38) = 83.33 \text{ TL/ton (4.97 \$/ton)}$
bitüm maliyeti: $0.0449 \times (100/103) \times 9,522.8 = 415.12 \text{ TL/ton (24.77 \$/ton)}$

4.7.2 Bitümlü karışımlara ait enerji maliyetlerinin belirlenmesi

BSK ve IKA'lara ait enerji maliyetleri, Hamzah ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışma örnek alınarak yapılmıştır. Her bir karışıma ait enerji maliyeti, Çizelge 4.30'da gösterildiği gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.30. BSK ve IKA karışımların enerji maliyetleri (Hamzah ve ark., 2010)

Agrega Çeşidi	Bitüm Sınıfı	Sasobit® (%) (Bitüm ağırlığınca)	Plent Sıcaklığı (°C)	Enerji sarfiyatı- Dizel (lt/Ton)	Dizel birim maliyet (TL/lt)	Karışımın tonu başına enerji maliyeti (TL/ton)- (\$/ton)
		0	160	3.293		88.68-5.29
		1	155	3.160		85.10-5.08
Kalker	AC80/100	2	152	3.066	26.93	82.57-4.93
		3	150	3.024		81.44-4.86
		4	145	2.896		77.99-4.65

Çizelge 4.30 incelendiğinde, Sasobit®'in farklı oranlarında hazırlanan ılık karışım asfaltların plent sıcaklık değerleri ve buna bağlı olarak karışımların ısıtılmasında harcanan enerji miktarları (karışımın tonu başına) görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, plent sıcaklığındaki 10°C'lik düşüş, yakıt sarfiyatını karışımın tonu başına 0.269 lt azaltmıştır. Bu sonucun literatürdeki diğer çalışmalar ile de uyumlu olduğu görülmüştür (Nicholls ve James, 2013; Olard ve ark., 2008). Çizelge 4.30'da belirlenen plent sıcaklıkları ile bu tez kapsamında üretilen BSK ve IKA'ların plent sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, BSK, IKA-1 (PP), IKA-2 (YYPE-PET), IKA-3 (PS) ve IKA-4 (Sasobit®) için enerji maliyetleri aşağıda belirtildiği şekilde kabul edilmiştir:

- BSK (Tez kapsamındaki karışım sıcaklık aralığı: 155-160°C): **88.68 TL/ton (5.29 \$/ton)**
- IKA-1 PP (Tez kapsamındaki karışım sıcaklık aralığı: 141-146°C): **77.99 TL/ton (4.65 \$/ton)**
- IKA-2 YYPE-PET (Tez kapsamındaki karışım sıcaklık aralığı: 145-150°C): **81.44 TL/ton (4.86 \$/ton)**
- IKA-3 PS (Tez kapsamındaki karışım sıcaklık aralığı: 140-145°C): **77.99 TL/ton (4.65 \$/ton)**
- IKA-4 Sasobit® (Tez kapsamındaki karışım sıcaklık aralığı: 146-152°C): **81.44 TL/ton (4.86 \$/ton)**

4.7.3 Piroliz katkı maliyeti ve piroliz tesis maliyetinin belirlenmesi

Tez kapsamında kullanılan piroliz ürünlerinin, endüstriyel ölçekte üretim yapan bir piroliz tesisinde üretildiği varsayılmış ve katkı maliyeti buna göre belirlenmiştir. Plastik pirolizi yapan bu tesisin günlük üretim kapasitesinin 47 ton olduğu, sıvı ve gaz ürün veriminin toplam %95 değerine ulaşabildiği Hamid ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Bu tesiste tercih edilen piroliz sıcaklığı 400°C olarak belirtilmiştir. Çalışmada, piroliz ürünü maliyeti 106.6 \$/ton olarak hesaplanmıştır. Bu konuda, Suntivarakorn ve ark. (2018) tarafından yapılan bir literatür araştırmasında, piroliz yağı maliyetlerinin 0.108 \$/lt ile 2.357 \$/lt arasında değiştiği ifade edilmiştir. Hamid ve ark. (2021) tarafından tespit edilen piroliz ürün maliyetinin literatürdeki

sonuçlardan biraz daha düşük olduğu görülmüştür. Yazarlara göre bunun temel sebebi, düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen pirolizden çok yüksek ürün verimi elde edilmesidir.

Dolayısıyla, bu çalışmadaki maliyet analizi için piroliz katkı bedeli 1.79 TL/kg (0.107 \$/kg) olarak kabul edilmiştir. Kullanılan katkı madde miktarları, karışımda kullanılan bitüm oranına bağlı olarak değiştiğinden, katkı maliyetleri her bir karışım için ayrı ayrı olarak şu şekilde hesaplanmıştır:

- IKA-1 (PP) için $0.0455 \times 1000 \times (12/112) \times 1.79 = 8.73 \text{ TL/ton}$ (**0.520 \$/ton**)
- IKA-2 (YYPE-PET) için $0.0458 \times 1000 \times (12/112) \times 1.79 = 8.78 \text{ TL/ton}$ (**0.524 \$/ton**)
- IKA-3 (PS) için $0.0461 \times 1000 \times (12/112) \times 1.79 = 8.84 \text{ TL/ton}$ (**0.527 \$/ton**)
- Çalışma kapsamında, piroliz tesis maliyeti **4,022,400.00 TL (240,000.00\$)** olarak kabul edilmiştir (Hamid ve ark., 2021).

IKA-4 (Sasobit®) için katkı maliyeti hesabında Sasobit® katkı bedeli 43.58 TL/kg (2.6 \$/kg) olarak kabul edilmiştir. Karışımın tonu başına katkı maliyeti hesabı ise şu şekilde yapılmıştır:

- Katkı bedeli: $0.04489 \times 1000 \times (3/103) \times 43.58 = 56.98 \text{ TL/ton}$ (**3.4 \$/ton**). Literatür incelendiğinde, Görkem (2014), Kristjandottir (2006) ve Ouf ve ark. (2015) tarafından yapılan maliyet analizlerinde de Sasobit® katkı bedelinin karışımın tonu başına 3.4-3.5 \$ olarak kabul edildiği görülmüştür.

4.7.4 BSK ve IKA'lara ait toplam üretim maliyetinin belirlenmesi

Karışımlara ait, malzeme (agrega+bitüm+katkı) maliyetleri ile enerji sarfiyatından kaynaklı maliyetler toplanarak toplam üretim maliyeti belirlenmiş ve Çizelge 4.31'de sunulmuştur.

Çizelge 4.31'den, piroliz katkılı IKA'ların toplam maliyetinin BSK'dan önemli ölçüde daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Şöyle ki, IKA-1 (PP), karışımın her 1 tonu başına BSK'dan 53.12 TL (3.17 \$) daha az maliyetle üretilebilmektedir. Bu fark, yıllık 100,000 ton üretim için 5,312,396 TL'ye (316,969 \$) kadar çıkmaktadır. Piroliz tesisinin yatırım maliyetinin 4,022,400.00 TL (240,000 \$) olduğu göz önünde bulundurulduğunda, IKA-1 (PP) için sistemin kendini **amorti etme süresinin** $240,000/316,969=0.76$ yıl (**yaklaşık 9 ay**) olduğu anlaşılmaktadır. Bu süre IKA-2 (YYPE-PET) ve IKA-3 (PS) için ise sırasıyla **0.86 ve 0.84 yıl (yaklaşık 10 ay)** olarak hesaplanmıştır. IKA-4 (Sasobit®)'in toplam maliyetinin ise, karışımın tonu başına

BSK'dan %4.4 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuca Kristjandottir (2006) tarafından da ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.31. BSK ve IKA karışım hazırlama maliyetleri

	BSK	IKA-1 (PP)	IKA-2 (YYPE- PET)	IKA-3 (PS)	IKA-4 Sasobit®
Agrega maliyeti, TL/ton (\$/ton)	83.23 (4.97)	83.27 (4.97)	83.25 (4.97)	83.22 (4.97)	83.33 (4.97)
Bitüm maliyeti, TL/ton (\$/ton)	438.05 (26.14)	386.86 (23.08)	389.41 (23.23)	391.97 (23.39)	415.12 (24.77)
Katkı maliyeti, TL/ton (\$/ton)	-	8.73 (0.520)	8.78 (0.524)	8.84 (0.527)	56.98 (3.40)
Karışımın tonu başına enerji maliyeti, TL/ton (\$/ton)	88.68 (5.29)	77.99 (4.65)	81.44 (4.86)	77.99 (4.65)	81.44 (4.86)
Karışımın tonu başına toplam maliyet, TL/ton (\$/ton)	609.94 (36.39)	556.82 (33.22)	562.91 (33.59)	561.98 (33.53)	636.88 (38.00)
BSK'ya kıyasla % değişim	-	-8.71	-7.71	-7.86	+4.42
Ekipman maliyeti, TL (\$)	-	4,022,400 (240,000)			-
Yıllık 100,000 ton üretim için toplam maliyet, TL (\$)	60,994,080 (3,639,265)	55,681,684 (3,322,296)	56,291,058 (3,358,655)	56,197,501 (3,353,073)	63,688,411 (3,800,025)
Fark, TL (\$)		-5,312,396 (-316,969)	-4,703,022 (-280,610)	-4,796,579 (-286,192)	+2,694,331 (+160,760)

Maliyet analizi neticesinde, piroliz katkılı IKA'ların BSK'dan **daha az maliyetle** üretilebileceği görülmüştür. Ortaya çıkan piroliz tesis maliyetinin ise 1 yıldan daha kısa bir sürede amorti edilebileceği anlaşılmıştır. Dolayısıyla, sistemin karlı bir yatırım olabileceği görülmüştür. Yıllık IKA üretiminin daha da artmasıyla sistemin karlılık oranı da artacaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında, atık plastiklerin pirolizinden elde edilen katı ve sıvı ürünlerin ılık karışım asfalt üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atık plastikler (Polipropilen-PP, Yüksek yoğunluklu polietilen-YYPE, polietilen tereftalat-PET ve polistren-PS), Konya’da farklı sanayi bölgelerinden temin edilmiştir. Çalışmada, Kırıkkale Rafinerisi’nden temin edilen B50/70 sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agregalar kalker olup, Karaömerler taş ocağından alınmıştır. Çalışmada ayrıca IKA katkısı olarak Sasobit® kullanılmıştır. Piroliz katkılı bitümler, piroliz sonucu elde edilen katı ve sıvı ürünlerin her ikisi de kullanılarak hazırlanmıştır.

Çalışmada kullanılan piroliz ürünleri, PP ve PS’nin tekli pirolizinden, YYPE ve PET’in ise birlikte pirolizinden (YYPE %67, PET ise %33 oranında kullanılmıştır) elde edilmiştir. Bu ürünlerle hazırlanan modifiye bitümlere, saf bitüme ve Sasobit® katkılı bitümlere kıvam tayini için penetrasyon testi, sıcaklığa karşı duyarlılığın belirlenmesi için yumuşama noktası testi, akmaya karşı direncin tespiti için dönel viskozimetre testleri yapılmıştır. Ayrıca, bitümlerin düşük, orta ve yüksek sıcaklıktaki özellikleri BBR ve DSR testleri ile belirlenmiştir. Bu testler, hem orijinal hem de RTFOT ve PAV ile yaşlandırılmış numunelere uygulanmıştır. Bitümlerin yapısındaki bağların durumu ve bağlanma yerleri hakkında bilgi edinmek için FTIR testi uygulanmıştır. SEM analizi ile bitümlerin yüzey morfolojisi incelenmiştir. Öte yandan, DSC analizi ile bitümlerin sıcaklık değişimine karşı soğulan veya salınan ısı miktarları belirlenmiştir. Ayrıca, bitüm içerisindeki katkının dağılım mekanizması Zeta potansiyeli testi ile gözlenmiştir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlara ise, optimum bitüm oranı tayini için Marshall tasarımı yapılmıştır. Marshall tasarımı ile aynı zamanda karışımların yoğunluk-boşluk ve stabilite-akma analizleri gerçekleştirilmiş ve karışımlar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Tekerlek izi testi ile karışımların yüksek sıcaklık performansı belirlenmiştir. TSRST ile karışımların düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direnci tespit edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde, BSK ve IKA’lar için karışımın hazırlanması esnasında ortaya çıkacak maliyetler belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

- Piroliz katkılı bitümlere, Sasobit® katkılı bitüme ve saf bitüme yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite, DSR ve BBR testlerinden elde edilen sonuçlar toplu halde Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. PP modifiyeli bitümlere, Sasobit® katkılı bitüme ve saf bitüme ait bitümlü bağlayıcı test sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama Noktası (°C)	Viskozite (135°C) (mPa.s)	Plent Sıcaklığındaki Değişim (°C)	Orijinal DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	RTFOT DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	BBR Yenilme Sıcaklığı (°C)	PG Sınıfı
Saf Bitüm (B50/70)	58	52	474.9	-	69.2	68	-15.4	64-22
Sasobit®%3	32	85	360.1	-9	76.6	74.2	-13.7	70-22
PP 6K	36	69	565.1	+5.5	80.3	74.9	-12.5	70-22
PP 6K-3S	100	59.5	330.0	-9	74.1	72.5	-15.7	70-22
PP 6K-6S	145	57	241.4	-14	69.4	71.6	-19.5	64-28
PP 6K-10S	157	52.5	235.3	-14.5	66.1	69.1	-22.0	64-28
PP 3K-6S	170	51.5	220.3	-16	65.8	69.6	-22.6	64-28
PP 1K-6S	230	41	180.3	-20	58.7	63.8	-23.3	58-28
PP 6S	245	39	178.7	-21	58.4	61.9	-23.6	58-28

Çizelge 5.2. YYPE-PET modifiyeli bitümlere ve saf bitüme ait bitümlü bağlayıcı test sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama Noktası (°C)	Viskozite (135°C) (mPa.s)	Plent Sıcaklığındaki Değişim (°C)	Orijinal DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	RTFOT DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	BBR Yenilme Sıcaklığı (°C)	PG Sınıfı
Saf Bitüm (B50/70)	58	52	474.9	-	69.2	68	-15.4	64-22
YYPE-PET 6K	47	60.5	430.4	-2	70.8	74.9	-15.6	70-22
YYPE-PET 6K-3S	60	55.5	355.3	-4.5	70.5	74.7	-16.8	70-22
YYPE-PET10K-6S	64	52.5	315.2	-7	70.3	73.8	-17.6	70-22
YYPE-PET 6K-6S	85	50	285.4	-10	65.1	70.6	-19.4	64-28
YYPE-PET6K-10S	100	48	260.1	-12	63.1	67.5	-20.7	58-28
YYPE-PET 3K-6S	146	46.5	252.9	-15.5	58.3	65.1	-22.4	58-28
YYPE-PET 6S	184	44	194.9	-18	57.7	61.6	-23.5	58-28

- Çizelgelerden şu sonuçlara varılmıştır:
 - Piroliz katkılı bitümlerde katı bileşen azaldıkça veya sıvı bileşen arttıkça bitüm yumuşamakta, buna bağlı olarak bitümlerin penetrasyon değerleri artarken, yumuşama noktası ve viskozite değerleri azalmaktadır.
 - Viskozite değerlerindeki azalma ile karışımların plent sıcaklığında önemli ölçüde azalmalar gözlenmiştir.
 - DSR ve BBR sonuçları incelendiğinde, DSR yenilme sıcaklıkları saf bitüme en yakın olan, aynı zamanda plent sıcaklığını en çok düşüren ve BBR yenilme sıcaklığını en çok geliştiren modifiye bitümlerin **PP %6K-**

6S, YYPE-PET %6K-6S ve PS %6K-6S olduğu tespit edilmiştir. İlk karışım asfaltlar, bu modifiye bitümler kullanılarak hazırlanmıştır.

- İlgili modifiye bitümlerin plent sıcaklığı azaltma değerleri, PP %6K-6S, YYPE-PET %6K-6S ve PS %6K-6S için sırasıyla **14°C, 10°C ve 15°C** olarak belirlenmiştir.
- Çizelgelerde ayrıca modifiye bitümler ve saf bitüm için PG sınıfları gösterilmiştir. Seçilen modifiye bitümler (PP %6K-6S, YYPE-PET %6K-6S ve PS %6K-6S) ve saf bitüm için bu sınıflar sırasıyla **PG64-28, PG64-28, PG58-28 ve PG64-22** şeklindedir.
- Bu sonuçlardan, piroliz katkılarının, bitümün **düşük sıcaklık performansını geliştirdiği**, yüksek sıcaklık performansını ise **olumsuz etkilemediği** (PS %6K-6S hariç) görülmüştür.

Çizelge 5.3. PS modifiyeli bitümlere ve saf bitüme ait bitümlü bağlayıcı test sonuçları

Bitüm Türü	Penetrasyon (dmm)	Yumuşama Noktası (°C)	Viskozite (135°C) (mPa.s)	Plent Sıcaklığındaki Değişim (°C)	Orijinal	RTFOT DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)	BBR Yenilme Sıcaklığı (°C)	PG Sınıfı
					DSR Yenilme Sıcaklığı (°C)			
Saf Bitüm (B50/70)	58	52	474.9	-	69.2	68	-15.4	64-22
PS 6K	46	53	498.8	+2	65.8	69.2	-16.3	58-28
PS 6K-3S	128	42	310.0	-8	63.8	65.5	-19.1	58-28
PS 10K-6S	175	39	238.4	-14.5	63.5	65.2	-19.3	58-28
PS 6K-6S	193	38	237.5	-15	63.0	65.2	-20.4	58-28
PS 3K-6S	253	35	215.3	-16.5	61.0	62.4	-20.8	58-28
PS 6K-10S	225	36	193.2	-19.5	54.4	62.1	-22.6	52-28
PS 6S	305	33	179.2	-21	54.3	61.8	-23.5	52-28

- Sasobit® katkılı modifiye bitüme ait test sonuçları ise şu şekilde özetlenmiştir:
 - Sasobit® ilavesi ile bitüm sertleşmekte buna bağlı olarak bitümün penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktası değeri artmaktadır.
 - Sasobit®, erime noktası 85-115°C aralığında olan bir katkı maddesi olduğundan, bundan daha yüksek sıcaklıklarda bitümün viskozitesini düşürmektedir. Viskozitedeki azalma, karışımın plent sıcaklığını da azaltmaktadır. Viskozite test sonuçlarından, Sasobit® katkılı İKA'nın plent sıcaklığının, BSK'dan **9°C daha düşük olduğu** anlaşılmıştır.

- DSR ve BBR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Sasobit® katkı bitümün performans sınıfı **PG 70-22** olarak tespit edilmiştir.
- Bu sonuçlardan, Sasobit® ilavesi ile bitümün yüksek sıcaklık performansının geliştiği, düşük sıcaklık performansının ise olumsuz etkilenmediği anlaşılmıştır.
- FTIR test sonuçları incelendiğinde, saf ve katkıli bitümlerin spektral eğrilerindeki pik pozisyonlarının hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla katkı-bitüm modifikasyon sürecinin fiziksel olarak gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir.
- SEM analizi sonuçlarına bakıldığında, katkıların bitüm içerisinde uniform dağıldığı, topaklanmadığı ve katkı maddesi boyutlarının modifikasyon işlemi sonrasında piroliz ürünleri (PP ve YYPE-PET) için 10 µm, Sasobit® için 40-45 µm değerine kadar azaldığı gözlenmiştir. PS %6K-%6S modifiyeli bitümde ise, vakum etkisi esnasında üründe gaz çıkışının devam etmesi sebebiyle görüntü analizi yapılamamıştır.
- Zeta potansiyel analizi, piroliz katkı maddeleri ve Sasobit®'in bitüm içerisinde iyi dağıldığını ve çökelmediğini göstermiştir.
- Piroliz katkı maddelerine ait yumuşama sıcaklıkları DSC analizi ile PP katı ve YYPE-PET katı ürünler için sırasıyla 145°C ve 105°C olarak belirlenmiştir. PP sıvı, YYPE-PET sıvı ve PS katı ürünün yumuşama sıcaklıkları ise 55°C olarak tespit edilmiştir. PS katı üründe ayrıca 145°C civarında da küçük bir yumuşama piki görülmüştür. PS sıvı üründe ise herhangi bir pik gözlenmemiştir.
- Modifiye bitümlere yapılan DSC analizinden, PP %6K-6S, YYPE-PET %6K-6S ve Sasobit® %3 modifiyeli bitümde 105°C dolaylarında yumuşama piki olduğu gözlenmiştir. Buna ilave olarak, PP %6K-6S modifiyeli bitümde 140°C'de ekstra bir pik daha görülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle 105°C sonrasında katkıli bitümlerde meydana gelen viskozite düşüşlerini açıklamaktadır. Öte yandan, katkıli bitümler içerisinde en düşük viskoziteye sahip olan PS %6K-6S modifiyeli bitümde ise, beklendiği üzere daha düşük sıcaklıklarda (60-80°C) yumuşama pikleri gözlenmiştir.
- BSK ve IKA'lara ait Marshall tasarım sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:
 - Marshall tasarımı sonucunda BSK, IKA-1 (PP), IKA-2 (YYPE-PET), IKA-3 (PS) ve IKA-4'e (Sasobit®) ait optimum bitüm oranları sırasıyla

%4.82, %4.77, %4.80, %4.83 ve **%4.70** olarak belirlenmiştir. Piroliz katkılarının (PS haricinde) ve Sasobit®'in ilavesi ile karışımda ihtiyaç duyulan **optimum bitüm oranlarında azalma** olmuştur. PS katkılı IKA ile BSK için bu oranın birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir.

- Karışımlara ait hacimsel özellikler (boşluk, agregalar arası boşluk, asfaltla dolu boşluk) ve akma sonuçları incelendiğinde, IKA'ların tamamının şartname limitlerini sağladığı tespit edilmiştir.
- Stabilitate sonuçlarına bakıldığında, IKA karışımlardan IKA-1 (PP) ve IKA-4 (Sasobit®), BSK'dan sırasıyla **%4.9** ve **%8.6** oranlarında **daha yüksek** stabilite sonucu vermiştir. IKA-2'nin (YYPE-PET) Marshall stabilite performansının **BSK ile neredeyse aynı** olduğu görülmüştür. IKA-3 (PS) ise, stabilite açısından BSK'ya %89 oranında yaklaşmıştır.
- Karışımlara yapılan tekerlek izi testlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda belirtildiği gibidir:
 - Tekerlek izi direnci açısından karışımlar arasında şöyle bir sıralama oluşmuştur: IKA-4 (Sasobit®) > IKA-1 (PP) > IKA-2 (YYPE-PET) = BSK > IKA-3 (PS). İlık karışımlardan IKA-4 ve IKA-1'in tekerlek izi direnci BSK'dan sırasıyla **%21** ve **%9** daha yüksektir. IKA-2, Marshall stabilite değerlerinde olduğu gibi tekerlek izi direncinde de **BSK'ya yakın** sonuç vermiştir. IKA-3'ün tekerlek izi direncinin BSK'dan %11 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
 - Tekerlek izi test sonuçları ile Marshall stabilite sonuçları ve DSR testinden elde edilen yenilme sıcaklıkları (Orijinal ve RTFOT sonrası bitümler için tekerlek izi faktörüne göre) arasındaki ilişki incelendiğinde, RTFOT sonrası yenilme sıcaklık değeri ile tekerlek izi direnci arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğu ($R^2=\%95$) anlaşılmıştır. Bu lineer ilişkinin, orijinal bitümlere ait DSR yenilme sıcaklığı ile tekerlek izi direnci arasında **%85** düzeyinde olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla RTFOT sonrası yenilme sıcaklığının, tekerlek izi direnci tahmini için bu çalışmada daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Öte yandan, Marshall stabilite değerleri ile tekerlek izi direnci arasındaki lineer uyumun **%91** oranında olduğu belirlenmiştir.
- TSRST testinden elde edilen sonuçlar ise şu şekildedir:

- IKA-3 (PS), -20°C ile en düşük sıcaklıkta kırılan karışım olurken, onu sırasıyla -18.6°C ile IKA-2 (YYPE-PET) ve -18.5 °C ile IKA-1 (PP) takip etmiştir. Sasobit® ile hazırlanan IKA-4 ile BSK'nın kırılma sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu (yaklaşık -15°C) görülmüştür.
- Karışımlar, kopma dayanımları açısından değerlendirildiğinde, IKA-2, IKA-4, IKA-1 ve IKA-3'ün BSK'yi sırasıyla %27, %23, %16 ve %8 oranında geliştirdiği görülmüştür.
- Bu sonuçlardan hareketle, tez kapsamında üretilen IKA-1, IKA-2 ve IKA-3 karışımlarının hepsinin **soğuk hava performansının BSK'dan daha iyi olduğu** görülmüştür.
- Öte yandan, bitümlü bağlayıcılara yapılan BBR testinden elde edilen yenilme sıcaklıkları ($S \geq 300$ MPa ve $m \leq 0.3$ koşullarını sağlayan) ile TSRST deneyinden elde edilen kırılma sıcaklıkları arasında güçlü bir lineer ilişki olduğu ($S \geq 300$ MPa koşulundan elde edilen sıcaklık için $R^2 = \%95$ ve $m \leq 0.3$ koşulundan elde edilen sıcaklık için $R^2 = \%97$) belirlenmiştir. Bu sonuçlardan, BBR ile TSRST test sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu anlaşılmıştır.
- BSK ve IKA'ların maliyet analizlerinden şu sonuçlara varılmıştır:
 - IKA-1 (PP), IKA-2 (YYPE-PET) ve IKA-3 (PS)'nin karışım hazırlama maliyetinin, BSK'dan karışımın tonu başına sırasıyla 53.12 TL (3.17 \$), 47.03 TL (2.81 \$) ve 47.97 TL (2.86 \$) daha düşük olduğu belirlenmiştir.
 - Piroлиз tesis maliyetinin 4,022,400.00 TL (240,000 \$) olduğu göz önüne alındığında, yıllık 100,000 ton IKA üretimi için, maliyetin geri ödenme süreleri IKA-1 (PP), IKA-2 (YYPE-PET) ve IKA-3 (PS) için sırasıyla 0.76, 0.86 ve 0.84 yıl olarak belirlenmiştir. Buradan, piroliz sisteminin kendini 1 yıldan daha kısa sürede amorti edebildiği, dolayısıyla sistemin oldukça karlı bir yatırım olabileceği anlaşılmıştır.
 - IKA-4 (Sasobit®)'in maliyetinin, BSK'dan %4.4 daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.4'te, IKA'ların sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki performansı BSK'ya göre nitel olarak karşılaştırılmıştır. Çizelgeden, ticari IKA katkısı olan Sasobit® ile hazırlanan ılık karışım asfaltın yüksek sıcaklık performansının BSK'dan daha iyi olduğu, soğuk hava koşullarında ise en az BSK kadar iyi performansa sahip olabileceği yorumu yapılabilir. Öte yandan, piroliz katkılı IKA'ların tamamının **soğuk iklim**

bölgelerinde BSK'dan daha iyi performans gösterebileceği, ayrıca IKA-1 ve IKA-2'nin sıcak iklim bölgelerinde de en az BSK kadar iyi performansa sahip olabileceği görülmektedir.

Çizelge 5.4. İlk karışım asfaltların sıcak ve soğuk iklim bölgelerindeki performansının değerlendirilmesi

İlk Karışım Türü	Sıcak İklim Performansı (BSK'ya göre)	Soğuk İklim Performansı (BSK'ya göre)
IKA-1 (PP)	Yüksek	Yüksek
IKA-2 (YYPE-PET)	Eşit	Yüksek
IKA-3 (PS)	Düşük	Yüksek
IKA-4 (SASOBİT®)	Yüksek	Eşit

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PP, YYPE-PET ve PS atık plastiklerinin pirolizinden elde edilen ürünlerin, IKA katkısı olma yönünde güçlü göstergelere sahip olduğu gerek bitümlü bağlayıcı gerekse de karışım testleri sonucunda anlaşılmıştır.

5.2 Öneriler

Çalışmanın devamında, aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması önerilebilir:

- Bu çalışmada incelenenden farklı plastik türlerinin pirolizinden elde edilen ürünlerin, IKA üzerindeki etkileri araştırılarak çalışma kapsamı daha da genişletilebilir.
- Piroliz ürünlerinin GDA ile birlikte IKA veya BSK kapsamında kullanılabilirliği incelenebilir. Özellikle sıvı piroliz ürünlerinin karışımda kullanılacak GDA oranı üzerinde olumlu etki yapabileceği düşünülmektedir.
- Piroliz ürünlerinin IKA üzerindeki etkileri, ilave karışım testleri (Modifiye Lottman testi, 4 nokta eğilme testi vb.) yapılarak daha geniş bir çerçevede (soyulma direnci, yorulma direnci vb.) incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abed, A.H. and Bahia, H., 2020, Enhancement of permanent deformation resistance of modified asphalt concrete mixtures with nano-high density polyethylene, *Construction and Building Materials*, 236, 117604.
- Abtahi, S. M., Esfandiarpour, S., Kunt, M., Hejazi, S. M. and Ebrahimi, M. G., 2013, Hybrid reinforcement of asphalt-concrete mixtures using glass and polypropylene fibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 8 (2), 25-35.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Shafigh, P., 2011, Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, 32(10), 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.
- Ahmed, T.A., Lee, H.D. and Williams, R.C., 2018, Using a modified asphalt bond strength test to investigate the properties of asphalt binders with poly ethylene wax-based warm mix asphalt additive, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 28-37.
- Akmaz, M.M., 2020, Farklı plastik atıkların birlikte pirolizinden elde edilen katı ürünle modifiye edilmiş bitümlü sıcak karışımların mühendislik özellikleri, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 33-99.
- Albayati, A. H., Al-Mosawe, H. M., Allawi, A. A. and Oukaili, N., 2018, Moisture susceptibility of sustainable warm mix asphalt, *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-9.
- Al-Hadidy, A.I., 2006, Evaluation of Pyrolysis Polypropylene Modified Asphalt Paving Materials, *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 14 (2), 36-50.
- Al-Hadidy, A.I. and Tan, Y., 2009, Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (10), 618-623.
- Almeida, A., Capitão, S., Estanqueiro, C., and Picado-Santosc, L., 2021, Possibility of incorporating waste plastic film flakes into warm-mix asphalt as a bitumen extender. *Construction and Building Materials*, 291, 123384.
- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S. M. and Goli, A., 2018, Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag, *Journal of Cleaner Production*, 176, 329-337.
- Ameri, M. and Nasr, D., 2017, Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures, *Petroleum Science and Technology*, 35 (1), 99-104.

- Ameri, M., Afshin, A., Shiraz, M. E., and Yazdipanah, F., 2020, Effect of wax-based warm mix additives on fatigue and rutting performance of crumb rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 262, 120882.
- Anderson, R.M., 2007, The asphalt handbook: Petroleum asphalt, *Asphalt Institute*, Lexington, 21-107.
- Anonim, 2013, Karayolu teknik şartnamesi, *KGM Yayınları*, Ankara, Kısım 407.
- Anonim, 2020a, *Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği Bülteni*, 28, 4-5.
- Anonim, 2020b, Türkiye plastik sektör izleme raporu, *PAGEV 2020/9, Türkiye*, 12-13.
- Anonymous, 2014, MS-2 Asphalt Mix Design Methods (7th Edition), *Asphalt Institute, USA*, 77-90.
- Anonymous, 2019, Asphalt in figures 2019, *EAPA, Belgium*, 4-6.
- Anonymous, 2020a, Plastics the facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data, *PlasticsEurope, Belgium*, 24-30.
- Anonymous, 2020b, <https://www.astecinc.com/contacts/38-products/asphalt-plants/components/liquid-additives/120-warm-mix-systems.html>, [Ziyaret Tarihi: 14.03.2020].
- Anonymous, 2020c, <http://coldlay.co.uk/filestore/COLDLAYWarmmixadditive.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 25.03.2020].
- Anonim, 2021 <https://www.homedepot.com/p/reviews/GSC-Technologies-11-in-x-13-in-x-13-in-Black-Milk-Crate-MC131311-002/204793156/3>
<https://www.indiamart.com/proddetail/plastic-oil-bottle-18204863812.html>
<https://www.ofimix.com.tr/bos-pet-sise-1-litre-urun2319.html>
<https://guvengeridonusum.com/atik-elektrikli-ve-elektronik-esyalar/> [Ziyaret tarihi: 03.07.2021]
- 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.
- Arslan, D., 2010, Esnek üstyapıların performans özelliklerinin sentetik metal ve polibor katkı maddeleriyle geliştirilmesi, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-43.
- Atasağun, N., 2017, Piroliz yöntemi kullanılarak sıvılaştırılmış atıklar ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 112-124.

- AASHTO T324_04, 2004, Standard method of test for Hamburg wheel_track testing of compacted hot_mix asphalt (HMA).
- 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 D2041-03a, 2003, Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.
- 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 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 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, P.C. and AI, A., 2011, Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier, *Construction and Building Materials*, 25, 2764-2770.

- Avsenik, L. and Tušar, M., 2016, Analysis of possible use of pyrolytic products as binders in asphalt mixes, *Gradjevinar*, 68 (3), 191-198.
- Baek, J., Lee, S. Y. and Lee, H. J., 2018, Comparative evaluation of wma additives effects on conventional and polymer modified asphalt pavements, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (6), 2099-2108.
- Bairgi, B. K., Tarefder, R. A., Syed, I., Mendez, M. M., Ahmed, M., Mannan, U. A. and Rahman, M. T., 2018, Assessment of Rutting Behavior of Warm-Mix Asphalt (WMA) with Chemical WMA Additives towards Laboratory and Field Investigation, *International Conference on Transportation and Development: Airfield and Highway Pavements*, Reston, USA, 264-272.
- Bala, N., Napiyah, M. and Kamaruddin, I., 2018, Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance, *Case Studies in Construction Materials* 8, 447-454.
- Behbahani, H., Ayazi, M. J. and Moniri, A., 2017, Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement. *Petroleum Science and Technology*, 35 (15), 1556-1561
- Behnood, A., 2020, A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties, *Journal of Cleaner Production*, 259, 120817.
- Bell, C. A. (1989). Summary report on aging of asphalt-aggregate systems, *Strategic Highway Research Program*, 89 (4), USA, 72-73.
- Bennert, T., Ericson, C. and Wass Jr, E., 2017, Mixing and compaction recommendations for warm mix asphalt (WMA) with recycled asphalt shingles (RAS), *CAIT-UTC-028, Rutgers*, 2-24.
- Birgisson, B., 2011, Low energy techniques in pavement engineering and Management [online], The Royal Institute of Technology, <https://www.slideshare.net/Transportforum/session-27-bjrn-birgisson>, [Ziyaret Tarihi: 02.03.2020].
- Boucherba, M., Kriker, A. And Kebaili, N., 2017, The valorization of the plastic waste to the rheological characteristics of bituminous mixtures, *AIP Conference Proceedings*, 1814 (1), 020025.
- Bueche, N., 2009, Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy, emissions and performance, *In Young Researchers Seminar (YRS) LAVOC-CONF-2010-002*, Torino, Italy,
- Buss, A. F. (2014). Investigation of sustainable pavement technologies evaluating warm mix asphalt using recycled asphalt materials, Doctor of Philosophy Dissertation, *Iowa State University*, Iowa, 16-19.

- Button, J. W., Estakhri, C. K. and Wimsatt, A. J., 2007, A synthesis of warm-mix asphalt, *SWUTC/07/0-5597-1, Texas, USA*, 8-9.
- Butz, T., 2008, Warm Mix Asphalt Pavements Based on the Fischer-Tropsch Wax Sasobit[®], *In Pavement Performance Prediction Symposium*, 16-18.
- Chen, C., Podolsky, J. H., Williams, R. C. and Cochran, E. W., 2018, Laboratory investigation of using acrylated epoxidized soybean oil (AESO) for asphalt modification, *Construction and Building Materials*, 187, 267-279.
- Chowdhury, A. and Button, J. W., 2008, A review of warm mix asphalt, *SWUTC/08/473700-00080-1, Texas, USA*, 9-11.
- Colbert, B. W. and You, Z., 2012, Properties of modified asphalt binders blended with electronic waste powders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (10), 1261-1267.
- Cooper, S. B., 2009, Evaluation of HMA mixtures containing Sasobit[®], *06-ITA, USA*, 27-28.
- Costa, L. M. B., Silva, H. M. R. D., Peralta, J. and Oliveira, J.R.M., 2019, Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment, *Construction and Building Materials*, 198, 237–244.
- Çelik, O. N., Şen, N., Lorasokkay, M. A., Atasağun, N., Ersöz, M., Pehlivan, E., Akmaz, M. M. ve Demir, C., 2016, Piroiliz Yöntemi Kullanılarak Sıvılaştırılmış Atıklar ile Modifiye Edilen Bitümlü Karışımların Mühendislik Özellikleri, *TÜBİTAK 1001, Proje Kodu: 112M116, Konya, Türkiye*, 152-175.
- Çepelioğullar, Ö. and Pütün, A. E., 2013, Utilization of two different types of plastic wastes from daily and industrial life, *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*, 2(2), 694-706.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B., 2008, Warm-Mix Asphalt: European Practice, *FHWA-PL08-007, Alexandria, USA*, 5-59.
- Demirbaş, A., 2004, Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72 (1), 97-102.
- Dessouky, S., Masad, E. and Bayomy, F., 2004, Prediction of hot mix asphalt stability using the superpave gyratory compactor, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (6), 578-587.
- Dessouky, S., Contreras, D., Sanchez, J. and Park, D., 2015, Anti-oxidants' effect on bitumen rheology and mixes' mechanical performance, *International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation (ISSAEST), USA*, 8-18.

- Diab, A., Sangiorgi, C., Ghabchi, R., Zaman, M. and Wahaballa, A.M., 2016, Warm mix asphalt (WMA) technologies: Benefits and drawbacks—A literature review, *Functional Pavement Design*, 1145-1154.
- Ebrahim, S.M. and Karim, H.K., 2019, Effects of additive materials on indirect tensile strength and moisture sensitivity of recycled asphalt pavement (RAP), *Kurdistan Journal of Applied Research (KJAR)*, 4 (2), 70-79.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacsson, U., 2006, Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold regions science and technology*, 45 (1), 31-41.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacsson, U., 2007, Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—high and medium temperature performance, *Construction and Building Materials*, 21 (10), 1899-1908.
- El-Naga, I.A. and Ragab, M., 2019, Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures, *Construction and Building Materials* 219, 81–90.
- Faheem, A., Abboud, B., Coe, J. and Alsalihi, M., 2018, Effect of warm mix asphalt (WMA) low mixing and compaction temperatures on recycled asphalt pavement (RAP) binder replacement, *FHWA-PA-2018-002-TEM WO 008, Pennsylvania, USA*, 9-11.
- FakhrHoseini, S. M. and Dastanian, M., 2013, Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model, *Journal of Chemistry*, 2013, 1-5.
- Farooq, M. A. and Mir, M. S., 2017, Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in warm mix asphalt (WMA) pavements: A review, *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 1-9.
- Fattah, M. Y., Hilal, M. M. and Flyeh, H. B., 2019, Assessment of mechanical stability performance of asphalt mixture using Superpave gyratory compactor, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 04019004.
- Fazaeli, H., Amini, A. A., Nejad, F. M. and Behbahani, H., 2016, Rheological properties of bitumen modified with a combination of FT paraffin wax (Sasobit®) and other additives, *Journal of civil Engineering and management*, 22 (2), 135-145.
- Fwa, T.F., 2006, The handbook of highway engineering, *CRC Press Taylor & Francis Group*, Florida, 7.1-40.
- Gao, J., Yan, K., He, W., Yang, S. ve You, L., 2018, High temperature performance of asphalt modified with Sasobit® and Deurex, *Construction and Building Materials*, 164,783-791.

- Ge, D., Yan, K., You, L. ve Wang, Z., 2017, Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit[®] and Polyphosphoric acid (PPA), *Construction and Building Materials*, 143, 419-428.
- Goh, S. W., Hasan, M. R. M. and You, Z., 2013, Performances evaluation of Cecabase[®] RT in warm mix asphalt technology. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2782-2790.
- Goli, H. and Latifi, M., 2020, Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP), *Construction and Building Materials*, 247, 118526.
- González, P.L., Pérez, 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.
- Görkem, İ.Ç., 2014, Orta sıcaklıktaki asfalt karışımlarının performanslarının değerlendirilmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 35-37.
- Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., and Kringos, N., 2016, An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction, *Construction and Building Materials*, 106, 133-139.
- Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D. and Liang, M., 2020, Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review, *Journal of Cleaner Production*, 266, 121704.
- Gündüz, T., 2002, Instrumental analiz, *Gazi Kitabevi, Ankara*, 760-761.
- Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Farzarian, 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.
- Haider, S., Hafeez, I., Jamal, Ullah, R., 2020, Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 235, 17496.
- Hamid, K., Sabir, R., Hameed, K., Waheed, A. and Ansari, M.U., 2021, Economic analysis of fuel oil production from pyrolysis of waste plastic, *Austin Environ Sci*, 6 (1), 1053.
- Hamzah, M. O., Jamshidi, A. and Shahadan, Z., 2010, Evaluation of the potential of Sasobit[®] to reduce required heat energy and CO₂ emission in the asphalt industry, *Journal of Cleaner Production*, 18 (18), 1859-1865.
- Hamzah, M. O., Golchin, B., Jamshidi, A. and Chailleux, E., 2014, Evaluation of Rediset for use in warm-mix asphalt: a review of the literatures, *International Journal of Pavement Engineering*, 16 (9), 809-831.

- Hasan, M. R. M., You, Z., Porter, D., and Goh, S. W., 2015, Laboratory moisture susceptibility evaluation of WMA under possible field conditions, *Construction and building materials*, 101, 57-64.
- Hasan, M.R.M., Colbert, B., You, Z., Jamshidi, A., Heiden, P.A. and Hamzah, M.O., 2016, A simple treatment of electronic-waste plastics to produce asphalt binder additives with improved properties, *Construction and Building Materials*, 110, 79-88.
- Hınıslioğlu, S. and Açar., E., 2004, Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, 58, 367-271.
- Hill, B. (2011). Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement, Master of Science in Civil Engineering, *Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign*, Urbana, Illinois, 34-39.
- Huang, S. C. and Di Benedetto, H., 2015, Advances in asphalt materials: Road and pavement construction, *Woodhead Publishing*, Cambridge, 310-314.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D., 2005, Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt, *NCAT report 05-06*, USA, 1-27.
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O. and You, Z., 2013, Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art, *Construction and Building Materials*, 38, 530-553.
- Jenkins, K. J. (2000). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen, Doktora tezi, *Stellenbosch University*, Stellenbosch, 154-202.
- Ji, J., Yao, H., Yuan, Z., Suo, Z., Xu, Y., Li, P., and You, Z., 2019, Moisture susceptibility of warm mix asphalt (WMA) with an organic wax additive based on X-ray computed tomography (CT) technology, *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-12.
- Joseph, E. and Singhvi, G., 2019, Nanomaterials for drug delivery and therapy, Chapter 4: Multifunctional nanocrystals for cancer therapy: a potential nanocarrier, *Elsevier, Waltham*, 91-116.
- Kambo, H. S. and Dutta, A., 2015, A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378.
- Kebritchi, A., Shams, K., Firoozifar, H. and Jalali-Arani, A., 2022, Rheological analysis of bitumen modified by reclaim rubber pyrolytic oil residue. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 213, 110326.

- Kim, Y., Lee, J., Baek, C., Kwon, S., Suh, Y., and Son, J., 2013, Evaluation of warm-mix asphalt mixtures using leadcap additive. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 14(2), 67-74.
- Kizirgil, M. E., 2013, Stiren-butadien-stiren ve uçucu külün birlikte kullanılmasının bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 30-32.
- Kök, B.V., Yılmaz, M. ve Akpolat, M., 2014, Evaluation of the conventional and rheological properties of SBS + Sasobit[®] modified binder, *Construction and Building Materials*, 63, 174–179.
- Kridan, F. A. M., Arshad, A. K., and Rahman, M. Y. A., 2010, Development of warm mix asphalt and compliance with the requirements set by specifications, *European Journal of Scientific Research*, 48 (1), 118-128.
- Kristjansdottir, O., 2006, Warm mix asphalt for cold weather paving, Master of Science in Civil Engineering, *University of Washington*, Washington, 38-40.
- Kuang, Y., 2012, Evaluation of Evotherm as a WMA technology compaction and anti-strip additive, Graduate Theses and Dissertation, *Iowa State University*, Iowa, 11-15.
- Kumar, S. and Singh, R. K., 2011, Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis, *Brazilian journal of chemical engineering*, 28, 659-667.
- Kriech, A. J., Osborn, L. V., Prowell, B. D., Redman, A. P. and West, R. C., 2011, Comparison of worker breathing zone exposures between hot mix asphalt and warm mix asphalt applications, *2nd Warm Mix Conference*, St. Louis.
- Larsen, O.R., 2001, Warm Asphalt Mix with Foam- WAMFoam. IRF 2001 Partie B: Thèmes Techniques, S.00469. Kolo Veidekke, Norway.
- Lavorato, S., Manolis, S., Pahalan, A. and Reid, R., 2011, Asphalt mix performance testing for warm mix asphalt field project on ministry of transportation ontario highway 10, *The Fifty-sixth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association*, Quebec, 1-19.
- Leng, Z., Gamez, A. and Al-Qadi, I. L., 2014, Mechanical property characterization of warm-mix asphalt prepared with chemical additives, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 304-311.
- Leng, Z., Sreeram, A., Padhan, R.K. and Tan, Z., 2018, Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP), *Journal of Cleaner Production*, 196, 615-625.
- Lesueur, D., 2009, The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82.

- Lesueur, D., and Youtcheff, J., 2013, Environmental Degradation of Advanced and Traditional Engineering Materials, Chapter 24: Asphalt, *CRC Press Taylor & Francis Group*, Florida, 4-63.
- Liu, S., Zhou, S. B., Peng, A., Xuan, W., and Li, W., 2019, Analysis of the performance and mechanism of desulfurized rubber and low-density polyethylene compound-modified asphalt, *Journal of Applied Polymer Science*, 136(45), 48194.
- Liu, K., Zhang, K., Wu, J., Muhunthan, B. and Shi, X., 2018, Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives, *Journal of cleaner production*, 193, 87-96.
- Lu, X., Langton, M., Olofsson, P. and Redelius, P., 2005, Wax morphology in bitumen, *Journal of Materials science*, 40 (8), 1893-1900.
- Luo, Y., Zhang, Z., Cheng, G. and Zhang, K., 2017, The deterioration and performance improvement of long-term mechanical properties of warm-mix asphalt mixtures under special environmental conditions, *Construction and Building Materials*, 135, 622-631.
- Maharaj, R., Maharaj, C. and Hosein, A., 2018, Performance of waste polymer modified road paving materials, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 34 (1), 19-33.
- Marcilla, A., Beltrán, M. I. and Navarro, R., 2009, Thermal and catalytic pyrolysis of polyethylene over HZSM5 and HUSY zeolites in a batch reactor under dynamic conditions, *Applied Catalysis B: Environmental*, 86(1-2), 78-86.
- Martin, A.E., Arambula, E., Yin, F., Cucalon, L.G., Chowdhury, A., Lytton, R., Epps, J., Estakhri, C. and Park, E.S., 2014, Evaluation of the Moisture Susceptibility of WMA Technologies, *NCHRP 763, Washington, USA*, 27-28.
- Mashaan, N. S., Chegenizadeh, A., Nikraz, H. and Rezagholilou, A., 2021, Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer, *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (2), 1569-1574.
- McLeod, N. W., 1989, Relationship of paving asphalt temperature susceptibility as measured by PVN to paving asphalt specifications, asphalt paving mixture design and asphalt pavement performance. *In Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 58, 410-489.
- Middleton, B. and Forfylyow, R. W., 2009, Evaluation of warm-mix asphalt produced with the double barrel green process, *Transportation research record*, 2126(1), 19-26.
- Mosa, A. M., Jawad, I. T. and Salem, L. A., 2018, Modification of the properties of warm mix asphalt using recycled plastic bottles. *International Journal of Engineering*, 31 (9), 1514-1520.

- Moubark, S., Khodary, F. And Othman, A., 2017, Evaluation of mechanical properties for polypropylene modified asphalt concrete mixtures, *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 5 (12), 7797-7801.
- Nakhaei, M., Naderi, K., Nasrekani, A.A. and Timm, D.H., 2018, Moisture resistance study on PE-wax and EBS-wax modified warm mix asphalt using chemical and mechanical procedures, *Construction and Building Materials*, 189, 882–889.
- Nicholls, J. C. (2009). Review of Shell Thiopave™ sulphur-extended asphalt modifier, *TRL 672, United Kingdom*, 1-4.
- Nicholls, J.C. and James, D., 2013, Literature review of lower temperature asphalt systems, *Construction Materials*, 166 (CM5), 276–285.
- Olard, F., Le Noan, C., Beduneau, E., and Romier, A., 2008, Low energy asphalts for sustainable road construction. *Proceedings Of The 4th Eurasphalt And Eurobitume Congress*, Copenhagen, 500-028.
- Orhan, F., 2012, Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, *KGM*, Ankara, 1-38.
- Ouf, M.S., Mostafa, A. E. A. and ElOufie, A., 2015, Producing of warm mix asphalt using Sasobit®, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6 (12), 509-517.
- Perkins, S., 2009, Synthesis of warm mix asphalt paving strategies for use in Montana highway construction, *FHWA/MT-09-009/8117-38*, USA, 20-21.
- Pinto, I., and Buss, A., 2020, ζ Potential as a Measure of Asphalt Emulsion Stability. *Energy & Fuels*, 34 (2), 2143-2151.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C., & Frank, B., 2012, Warm-mix asphalt: Best practices. *National Asphalt Pavement Association*, Lanham, 11-65.
- Prowell, B., Frank, B., Osborne, L., Kriech, T., and West, R., 2014, Effects of WMA on plant energy and emissions and worker exposures to respirable fumes, *NCHRP 9-47A*, USA, 29-30.
- Punith, V. S. and Veeraragavan, A., 2011, Behavior of reclaimed polyethylene modified asphalt cement for paving purposes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 833-845.
- Qin, Q., Farrar, M. J., Pauli, A. T. and Adams, J. J., 2014, Morphology, thermal analysis and rheology of Sasobit® modified warm mix asphalt binders. *Fuel*, 115, 416-425.
- Read, J. and Whiteoak, D., 2003, The Shell bitümen handbook fifth edition, *Thomas Telford Publishing*, London, 11-185.

- Ripoll, J.O. and Farré, C.M., 2008, Evaluation of greenhouse gas emissions from the production of hot asphalt mixtures. *Proceedings of the 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Copenhagen, 500-002.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F, 2012, Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Rezapour, M., and Wulff, S. S., 2019, Rut Performance of In Situ Warm Mix Asphalt Overlays with Evotherm 3G in North Dakota, *Journal of Engineering*, 1-7.
- Rodezno, M.C., West, R. and Taylor, A., 2015, Flow number test and assessment of AASHTO TP 79-13 rutting criteria comparison of rutting performance of Hot-Mix and Warm-Mix asphalt Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2507, 100–107.
- Saboori, A., Abdelrahman, M. and Ragab, M., 2012, Warm mix asphalt processes applicable to North Dakota, *NDSU 11-01 SPR-R033 (003)*, 4-12.
- Sargand, S., Figueroa, J. L., Edwards, W. and Al-Rawashdeh, A. S., 2009, Performance assessment of warm mix asphalt (WMA) pavements, *FHWA/OH-2009/08, USA*, 3-5.
- Schaur, A., Unterberger, S. H. and Lackner, R., 2021, Impact of molecular structure of PP on thermo-rheological properties of polymer-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 287, 122981.
- Selvamani, V., 2019, Characterization and biology of nanomaterials for drug delivery, Chapter 15: Stability studies on nanomaterials used in drugs, *Elsevier, Waltham*, 425-444.
- Shan, L., Li, Z., Tian, D. and Tan, Y., 2021, Effect of anti-icing additives on the stability of emulsified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 275, 121951.
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y., 2011, Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 25 (2), 886–891.
- 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.
- Shen, S., Wu, S. and Zhang, W., 2017, Long-term Field Performance of WMA Pavements, *NCHRP 843*, 17-36.
- Shnoudeh, A. J., Hamad, I., Abdo, R. W., Qadumii, L., Jaber, A. Y., Surchi, H. S. and Alkelany, S. Z., 2019, Biomaterials and Bionanotechnology, Chapter 15: Synthesis, characterization, and applications of metal nanoparticles, *Academic Press*, 527-612.

- Sk, A. S. and Prasad, K. S. B., 2012, Utilization of waste plastic as a strength modifier in surface course of flexible and rigid pavements. *International Journal of Engineering Research Application*, 2 (4), 185-91.
- Solaimanian, M., Milander, S., Boz, I. and Stoffels, S., 2011, Development of guidelines for usage of high percent RAP in warm-mix asphalt pavements, *FHWA-PA-2011-013-PSU 032*). Pennsylvania, USA, 54-55.
- Speight, J.G., 2016, Asphalt materials science and technology, *Elsevier*, Waltham, 10-15.
- Sukhija, M. and Saboo, N., 2021, A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field, *Construction and Building Materials*, 274, 121781.
- Suntivarakorn, R., Treedet, W., Singbua, P., and Teeramaetawat, N., 2018, Fast pyrolysis from Napier grass for pyrolysis oil production by using circulating Fluidized Bed Reactor: Improvement of pyrolysis system and production cost, *Energy Reports*, 4, 565-575.
- Tang, N., Deng, Z., Dai, J. G., Yang, K., Chen, C. and Wang, Q., 2018, Geopolymer as an additive of warm mix asphalt: Preparation and properties, *Journal of cleaner production*, 192, 906-915.
- Tao, M. and Mallick, R. B., 2009, Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material, *Transportation Research Record*, 2126(1), 151-160.
- Tapkın, S., 2008, The effect of polypropylene fibers on asphalt performance, *Building and Environment*, 43, 1065–1071.
- Topal, A., Oner, J., Sengoz, B., Dokandari, P. A. and Kaya, D., 2017, Evaluation of rutting performance of warm mix asphalt, *International Journal of Civil Engineering*, 15 (4), 705-714.
- Topal, A., Kök, B.V., Kaya, D., Şengöz, B., Dokandari, P. And Yılmaz, M., 2018, Investigation of the properties of warm mix asphalt involving organic additive, *Turkish Journal of Science & Technology*, 13 (1), 45-53.
- Tia, M., 2003, The civil engineering handbook: Bituminous materials and mixtures, *CRC Press Taylor & Francis Group*, Florida, 45.1-36.
- Tutu, K.A. and Tuffour, Y.A., 2016, Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review, *Open Journal of Civil Engineering*, 6, 84-93.
- TS EN 933-3, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi.
- TS EN 1097-2, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2 : Parçalanma direncinin tayini için metotlar.

- TS EN 1097-8, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 8: Taş parlatma değerinin tayini.
- TS EN 1367-2, Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi.
- TS EN 12697-11, Bitümlü karışımlar - Deney metotları - Sıcak karışımli asfalt için - Bölüm 11: Agregada ve bitüm arasındaki bağlanmanın tayini.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A. and Perveneckas, Z., 2009, Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), 80-86.
- Vassaux, S., Gaudefroy, V., Boulangé, L., Pévère, A., Mouillet, V. and Barragan-Montero, V., 2017, Towards a better understanding of wetting regimes at the interface asphalt/aggregate during warm-mix process of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 133, 182-195.
- Wen, Y., Wang, Y., Zhao, K., Chong, D., Huang, W., Hao, G. and Mo, S., 2018, The engineering, economic, and environmental performance of terminal blend rubberized asphalt binders with wax-based warm mix additives, *Journal of Cleaner Production*, 184, 985-1001.
- West, R., Rodezno, C., Julian, G. and Prowell, D., 2014, Engineering properties and field performance of warm mix asphalt Technologies, *NCHRP (09-47A), USA*, 23-28.
- Williams, R. C., and McCready, N. S., 2008, The utilization of agriculturally derived lignin as an antioxidant in asphalt binder, *CTRE 06-260*, 3-9.
- Yamaç, Ö. E., YILMAZ, M. and Kök, B. V., 2018, Effects of the combined use of styrene-butadiene-styrene and gilsonite in bitumen modification on the stiffness and thermal sensitivity of bitumens, *Turkish Journal of Science and Technology*, 13 (1), 77-85.
- Yan, K., Xu, H. and You, L., 2015, Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene, *Construction and Building Materials*, 83, 143-149.
- Yue, M., Yue, J., Wang, R. and Xiong, Y., 2021, Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit® and polymers using linear amplitude sweep test, *Construction and Building Materials*, 289, 123054.
- Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N., Hamim, A. and Ahmad, J., 2014, The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 72, 139-147.
- Zaumanis, M., 2010, Warm mix asphalt investigation, Master of Science Thesis, *Riga Technical University Faculty of Civil Engineering Institute of Transportation*, Riga, 12-97.

- Zaumanis, M., Jansen, J., and Smirnovs, J., 2011, Calculation model of energy consumption inventory for comparison of Warm Mix Asphalt and Hot Mix Asphalt. *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*, Vilnius, 1246-1253.
- Zaumanis, M., 2014, Green Energy and Technology, Chapter 10: Warm mix asphalt, *CRC Press Taylor & Francis Group*, Florida, 313-314.
- Zhang, W., Shen, S. and Wu, S., 2018, Comparison of the relative long-term field performance among various Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements, *Transportation Research Record*, 2672(28), 200-210.
- Zhang, Y., Song, Q., Lv, Q., and Wang, H., 2021, Influence of different polyethylene wax additives on the performance of modified asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 302, 124115.
- Zhao, X., Yan, K., He, W. and Cai, C., 2017, Effects of Sasobit[®]/Deurex on amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 154, 323-330.
- Zhu, J., Zhang, K., Liu, K. and Shi, X., 2019, Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 217, 273-282.

EKLER

EK-1 Farklı modifiye koşullarında hazırlanan PP modifiyeli bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası ve plent sıcaklığı değerleri

Deney No	Parametre	Katkı Fazı	Parametre Değerleri	Plent Sıcaklığı (°C)	Değişim (%)	Penetrasyon (dmm)	Değişim (%)	Yumuşama Noktası	Değişim (%)		
1	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Katı Ürün PP ₁	K-120	136		180		44			
2			K-140	137.5	1.10	170	5.56	46	4.55		
3			K-160	143	4.00	156	8.23	57	23.91		
4			K-180	144.5	1.05	145	7.05	58	1.75		
5			S-100	144		150		57.5			
-		Sıvı Ürün PP ₂	S-120	143	0.69	156	4.00	57	0.87		
6			S-140	143	0	160	2.56	57	0		
7			Karıştırma Süresi (dk)	Katı ürün PP ₃	K-10	144		156		57	
8					K-30	144	0	153	1.92	57	0
9					K-60	144	0	145	5.23	57.5	0.88
-	Sıvı Ürün PP ₄	S-10		144		156		57			
10		S-20		142	1.39	172	10.26	49	14.04		
11		S-30	141.5	0.35	177	2.91	48	2.04			
12	Karıştırma Hızı (dev/dk)	Katı ürün PP ₅	K-500	139.5		186		48			
13			K-1000	142	1.79	172	7.53	49	2.08		
14			K-2000	143.5	1.06	145	15.70	57	16.33		
15			S-500	143.5		154		56.5			
16		Sıvı Ürün PP ₆	S-1000	143.5	0	149	3.25	57	0.88		
-			S-2000	143.5	0	145	2.68	57	0		
17			Katkı Oranı (%)	Katı ürün PP ₇	%6S	136		245		39	
18					%1K-%6S	137	0.74	230	6.12	41	5.13
19	%3K-%6S	141			2.92	170	26.09	51.5	25.61		
-	%6K-%6S	143.5			1.77	145	14.71	57	10.68		
20	%6K	163				36		69			
21	Sıvı Ürün PP ₈	%6K-%3S		148.5	8.90	100	177.78	59.5	13.77		
-		%6K-%6S		143.5	3.37	145	45.00	57	4.20		
22		%6K-%10S		143	0.35	157	8.28	52.5	7.89		

EK-2 Farklı modifiye koşullarında hazırlanan YYPE-PET modifiyeli bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası ve plent sıcaklığı değerleri

Deney No	Parametre	Katkı Fazı	Parametre Değerleri	Plent Sıcaklığı (°C)	Değişim (%)	Penetrasyon (dmm)	Değişim (%)	Yumuşama Noktası	Değişim (%)	
1	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Katı ürün YP ₁	K-140	148.5		88		50		
						0		5.68	0	
2			K-160	148.5		83		50		
						0		6.02	0	
3			K-180	148.5		78		50		
4		Sıvı Ürün YP ₂	S-100	149.5		74		50.5		
						0.67		18.92	0.99	
-			S-120	148.5		88		50		
						0.34		4.55	0	
5		S-140	148		92		50			
6	Karıştırma Süresi (dk)	Katı ürün YP ₃	K-10	147.5		134		47		
						0.68		34.33	6.38	
-			K-30	148.5		88		50		
						0.34		9.09	0	
7			K-60	149		80		50		
-		Sıvı Ürün YP ₄	S-10	148.5		88		50		
						1.01		27.27	3.00	
8			S-20	147		112		48.5		
						0		3.57	0	
9		S-30	147		116		48.5			
10	Karıştırma Hızı (dev/dk)	Katı ürün YP ₅	K-500	146.5		128		47.5		
						0.34		12.50	2.11	
-			K-1000	147		112		48.5		
						0.34		24.11	3.09	
11			K-2000	147.5		85		50		
12		Sıvı Ürün YP ₆	S-500	147.5		96		50		
						0		3.13	0	
13			S-1000	147.5		93		50		
						0		8.60	0	
-		S-2000	147.5		85		50			
14	Katkı Oranı (%)	Katı ürün YP ₇	%6S	139.5		184		44		
							1.79		20.65	5.68
15			%3K-%6S	142		146		46.5		
							3.87		41.78	7.53
-			%6K-%6S	147.5		85		50		
							2.03		24.71	5.00
16			%10K-6S	150.5		64		52.5		
17		Sıvı Ürün YP ₈	%6K	155.5		47		60.5		
							1.61		27.66	8.26
18			%6K-%3S	153		60		55.5		
							3.59		41.67	9.91
-	%6K-%6S		147.5		85		50			
					1.36		17.65	4.00		
19		%6K-10S	145.5		100		48			

EK-3 Farklı modifiye koşullarında hazırlanan PS modifiyeli bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası ve plent sıcaklığı değerleri

Deney No	Parametre	Katkı Fazı	Parametre Değerleri	Plent Sıcaklığı (°C)	Değişim (%)	Penetrasyon (dmm)	Değişim (%)	Yumuşama Noktası	Değişim (%)
1	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Katı ürün PS ₁	K-140	142.5		192		37.5	
						0		2.60	1.33
2			K-160	142.5		187		38	
3		K-180	142.5		183		38		
4		Sıvı Ürün PS ₂	S-100	142.5		193		38	
						0		2.07	0
5			S-120	142.5		189		38	
						0		1.06	0
-			S-140	142.5		187		38	
-		Karıştırma Süresi (dk)	Katı ürün PS ₃	K-10	142.5		193		38
						0		2.07	0
6	K-30			142.5		197		38	
7	K-60		142.5		195		38		
-	Sıvı Ürün PS ₄		S-10	142.5		193		38	
						0		3.63	0
8			S-30	142.5		186		38	
9	Karıştırma Hızı (dev/dk)		Katı ürün PS ₅	K-500	142		213		37
						0.35		9.39	2.70
-		K-1000		142.5		193		38	
10		K-2000	142.5		187		38		
11		Sıvı Ürün PS ₆	S-500	142.5		182		38	
						0		2.75	0
12			S-1000	142.5		187		38	
						0		3.21	0
-			S-2000	142.5		193		38	
13		Katkı Oranı (%)	Katı ürün PS ₇	%6S	136.5		305		33
						3.30		17.05	6.06
14	%3K-%6S			141		253		35	
						1.06		23.72	8.57
-	%6K-%6S			142.5		193		38	
15	%10K-6S		143		175		39		
16	Sıvı Ürün PS ₈		%6K	159.5		46		53	
						6.27		178.26	20.76
17			%6K-%3S	149.5		128		42	
						4.68		50.78	9.52
-		%6K-%6S	142.5		193		38		
18	%6K-10S	138		225		36			