



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI DOĞAL SAKIZ KATKILI ILIK
KARIŞIM ASFALT PERFORMANSI ÜZERİNE
BİR LABORATUVAR ARAŞTIRMASI**

Ramazan YANİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ağustos-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ramazan YANİ tarafından hazırlanan “FARKLI DOĞAL SAKIZ KATKILI ILIK KARIŞIM ASFALT PERFORMANSI ÜZERİNE BİR LABORATUVAR ARAŞTIRMASI” adlı tez çalışması 22/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Volkan Emre UZ

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İslam GÖKALP

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Abdulrezzak BAKIŞ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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.

Ramazan YANI

Tarih: 22/08/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI DOĞAL SAKIZ KATKILI ILIK KARIŞIM ASFALT PERFORMANSI ÜZERİNE BİR LABORATUVAR ARAŞTIRMASI

Ramazan YANİ

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İslam GÖKALP

2022, 105 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi İslam GÖKALP

Doç. Dr. Volkan Emre UZ

Dr. Öğr. Üyesi Abdulrezzak BAKIŞ

Bitümlü Sıcak karışımın (BSK) ısıtılması, üretilmesi ve sahaya uygulanması sırasında içeriğindeki uçucu toksik bileşenler açığa çıkarak çevreye, insana ve diğer canlılara zarar verir. İhtiyaç duyulan yüksek ısı enerjisi sadece BSK üretim maliyetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda çalışma ortamı nedeniyle çalışma verimini düşürür. Bu durum araştırmacıları daha çevreci, daha sağlıklı çalışma koşulları ve daha az enerji kullanımı sağlamak için ürünler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu nedenle BSK'den daha avantajlı olan ılık karışım asfalt (IKA) teknolojisi geliştirilmiştir. IKA teknolojisinin uygulanması ile çevre ve insan sağlığının korunması, gerekli enerjinin azaltılması, dolayısıyla inşaat maliyetinin azaltılması ve BSK'nin performansının artırılması gibi bazı faydalar sağlanabilir. Ancak kullanılan IKA katkı maddesi ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının özelliklerinde yüksek yumuşama noktası ve düşük soyulma direnci gibi istenmeyen durumlar meydana gelmiştir. Bu tez çalışmasının kapsamı, bahsedilen sorunu ortadan kaldırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanıldığı literatüre katkı sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Tez kapsamında 70/100 penetrasyon oranına sahip bitüme, yaygın olarak kullanılan IKA doğal katkılarından biri olan Sasobit® (S®) ile bitümün ağırlıkça %1, 2 ve 3 oranlarında karıştırılmıştır. Ilık Çam Sakızı Ağdası (İÇSA) ise %1 oranında karıştırılmıştır. Ilık çam sakızı ağda katkılı Sasobit® modifiye bitümün (ÇSMB) fiziksel ve soyulma direnci özelliklerinin yanı sıra reolojik performansı SuperPAVE sınıflandırma sisteminde standart testlerle incelenmiştir. Asfalt Enstitüsü tarafından tanımlanan başlangıç optimum bitüm oranı yöntemi ile Taş Mastik Asfalt binder tabakası için IKA hazırlanmıştır. IKA numuneleri Marshall yöntemiyle üretilmiş ve Marshall Stabilitesi (MS) ve akma testi ile analiz edilmiştir. Ayrıca, IKA numunelerine indirekt çekme mukavemeti (İÇM) testi uygulanmıştır. Son olarak, ÇSMB ile üretilebilecek 1 tonluk IKA ve BSK için ekonomik analiz yapılmıştır. Sonuçlar, ÇSMB numunelerinin fiziksel ve reolojik özelliklerinde belirli bir iyileşme meydana geldiğini ve karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığında belirli bir düşüş olduğunu göstermiştir. Ayrıca, IKA'nın MS değerinde önemli bir artış ve akma ve ITS değerlerinde ise düşüş gözlenmiştir. Sasobit® modifiye bitüme %1 İÇSA katkısının eklenmesi yumuşama noktasındaki aşırı artış ve düşük sıyırma direnci sorununa çözüm olabileceği vurgulanabilir. Ekonomik analiz ile yaklaşık %15 oranında daha düşük maliyetle yol inşaatının IKA ile yapılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çam Sakızı Ağdası, Geleneksel Test Yöntemleri, Ilık Karışım Asfalt, İndirekt Çekme Dayanımı, Marshall Stabilitesi, Reolojik Test Yöntemleri, Sasobit®.

ABSTRACT

MS THESIS

A LABORATORY RESEARCH ON THE PERFORMANCE OF WARM MIX ASPHALT ADDED DIFFERENT NATURAL GUM

Ramazan YANİ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. İslam GÖKALP

2022, 105 Pages

Jury

**Asst. Prof. İslam GÖKALP
Assoc. Prof. Dr. Volkan Emre UZ
Asst. Prof. Abdulrezzak BAKIŞ**

During the heating and production of hot mix asphalt (HMA) and its application to the field, the volatile toxic components in its contents are released and harm the environment, human and other living things. The high heat energy needed not only increases the cost of HMA production, but also reduces the working efficiency due to the working environment at high temperatures. This situation has led researchers to develop products to provide more environmentally friendly, healthier working conditions and less energy use. Therefore, the warm mix asphalt (WMA) technology, which is more advantageous than HMA has been developed. There are certain benefits can be occurred including protection of environment, and human health, decreasing required energy, therefore saving construction cost as well as improving performance of HMA with the application of WMA technology. However, undesired conditions have occurred in the properties of the bituminous binder modified with WMA additives such as high increase in softening point, low stripping resistance. The scope of this thesis study has been created to contribute to the literature, where various additives are used to eliminate the mentioned problem. Within the scope of the thesis, bitumen with a penetration rate of 70/100 was mixed with Sasobit® (S®), one of the widely used WMA natural additives, at the rate of 1, 2 and 3% by weight of bitumen, and 1% with Pine Gum Wax (PGW). The physical and stripping resistance properties as well as the rheological performance of warm pine gum added Sasobit® modified bitumen (PGWSMB) were demonstrated by standard tests in the SuperPAVE classification system. WMA was prepared for the Stone Mastic Asphalt binder layer with the initial optimum bitumen ratio method defined by the Asphalt Institute. The WMA samples were produced by the Marshall method and analyzed with Marshall Stability (MS) and yield test. Moreover, indirect tensile strength (ITS) test was applied to WMA samples. Finally, an economic analysis has been made for 1 ton of WMA and HMA that can be produced with PGWSMB. The results showed that certain improvement has occurred in the physical and rheological properties of the PGWSMB samples, and certain decrease was observed in the mixing and compaction temperature. Moreover, significant increase in MS and decrease in yield and ITS value of WMA were found. It can be highlighted that including 1% WMP additive to Sasobit® modified can be a solution to the problem of excessive increase in softening point and low stripping resistance. Economic analysis revealed that the pavement can be constructed with WMA at a lower cost of approximately 15%.

Keywords: Indirect Tensile Strength, Marshall Stability, Pine Gum Wax, Rheological Test Methods, Sasobit®, Traditional Test Methods, Warm Mix Asphalt.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda gerek tez konumun belirlenmesinde gerek çalışmamın tamamlanmasında her türlü konuda bana yardımcı olan ve değerli katkıları ile çalışmalarına yön veren danışmanım Sn. Dr. Öğr. Üyesi İslam GÖKALP'e teşekkürlerimi ve saygılarımı arz ediyorum.

Bu çalışmanın tamamlanmasında birçok kamu kurumunun desteği alınmıştır. Bunlar (Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı, KGM 5. Bölge Müdürlüğü (Mersin), KGM 9. Bölge Müdürlüğü (Diyarbakır) Ar-Ge Başmühendisliği idaresine ve çalışanlarına, KGM 92. ve 97. Şube Bitüm şeflikleri) deneyleri yapılmasında ve deney numunelerinin temin edilmesinde sağladıkları desteklerden dolayı idaresi ve personellerine teşekkür ederim.

Mersin Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sn. Dr. Öğr. Üyesi Murat Vergi TACİROĞLU'na reolojik analizlerde elde edilen verilerin çözümlenmesinde verdiği katkılardan, Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sn. Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN'a, yapı malzemeleri laboratuvarı araç-gereçlerinin kullanılması noktasında gösterdikleri desteklerinden ve Sn. Arş. Gör. Kübra ÇEVİRİM'e bilgi ve belge temin etme noktasında sağladığı katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Tezin jürilerinde İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sn. Doç. Dr. Volkan Emre UZ'a; Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sn. Dr. Öğr. Üyesi Abdulrezzak BAKIŞ'a katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim süresince her türlü maddi ve manevi destekleri ile göstermiş oldukları sabırdan dolayı kıymetli aileme teşekkür eder, şükranlarımı arz ederim.

Ramazan YANİ
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. IKA Teknolojisi	6
2.2. IKA Tarihsel Gelişimi	7
2.3. IKA Üretim Teknikleri	8
2.3.1. Organik madde katkısı ile IKA üretimi	9
2.3.2. Kimyasal madde katkısı ile IKA üretimi	11
2.3.3. Köpüklendirme teknikleri ile IKA üretimi	11
2.4. IKA Uygulamalarının Avantaj ve Dezavantajları	13
2.4.1. IKA uygulamalarının avantajları	13
2.4.1.1. Çevresel faydalar	14
2.4.1.2. Üretim ve uygulamadaki faydalar.....	15
2.4.1.3. Ekonomik faydalar.....	16
2.4.1.4. Üstyapı inşasında çalışanlar açısından faydalar.....	18
2.4.2. IKA uygulamalarının dezavantajları.....	19
2.5. Dünya’da IKA Uygulamaları.....	20
2.6. IKA Uygulamaları Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1. Materyal.....	33
3.2. Yöntem.....	36
3.2.1. Geleneksel bitümlü bağlayıcı testleri.....	36
3.2.1.1. Penetrasyon testi	36
3.2.1.2. Yumuşama noktası testi	37
3.2.1.3. Penetrasyon indeksi analizi.....	39
3.2.1.4. Elastik geri dönme testi.....	40
3.2.1.5. Brookfield dönel viskozite testi	41
3.2.1.6. Nicholson soyulma direnci testi.....	42
3.2.2. SuperPAVE sınıflandırma sistemi	44
3.2.3. Reolojik bitümlü bağlayıcı testleri.....	46
3.2.3.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) testi	47

3.2.3.2. Eğilme kırışı reometresi (BBR) testi	49
3.2.3.3. Dönel ince film etüvü (RTFO) testi	50
3.2.3.4. Basınçlı yaşlandırma hücresi (PAV).....	52
3.2.4. İKA üretimi ve performans deneyleri	53
3.2.4.1. İKA üretimi	53
3.2.4.2. Marshall stabilitesi ve akma tayini testi.....	56
3.2.4.3. İndirekt çekme mukavemeti testi	56
3.2.5. Fayda/maliyet analizi	58
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	60
4.1. Geleneksel Bitümlü Bağlayıcı Testleri	60
4.1.1. Penetrasyon testi	60
4.1.2. Yumuşama noktası testi	61
4.1.3. Penetrasyon indeksi analizi.....	62
4.1.4. Elastik geri dönme testi.....	63
4.1.5. Brookfield dönel viskozite testi	63
4.1.6. Nicholson soyulma direnci testi.....	65
4.2. Reolojik Bitümlü Bağlayıcı Testleri Sonuçları.....	68
4.2.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) testi	68
4.2.2. Eğilme kırışı reometresi (BBR) testi	73
4.3. İKA Performans Testleri.....	74
4.3.1. Marshall stabilite ve akma testi	74
4.3.2. İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) testi.....	75
4.4. Fayda/Maliyet Analizi	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	81

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. IKA saha uygulaması.....	3
Şekil 2.1. Üretim sıcaklıklara göre karışımların sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2. Soğuk su enjektisi ile köpüklendirme yöntemi.....	7
Şekil 2.3. IKA organik katkı maddeleri.....	10
Şekil 2.4. IKA kimyasal katkı maddeleri.....	11
Şekil 2.5. Su tutma özelliği olan IKA katkı maddeleri.....	12
Şekil 2.6. IKA'nın BSK'ye göre çevreye katkısı.....	14
Şekil 2.7. Güney Almanya'da IKA ile 3 saatte yapılan yol inşaatından bir resim	16
Şekil 2.8. 2018 yılı asfalt karışımları maliyeti.....	17
Şekil 2.9. IKA ve BSK uygulamalarından saha görüntüleri.....	18
Şekil 2.10. Nem hasarı sebebiyle agrega-bitüm kopması ve soyulma performansı	19
Şekil 2.11. Danimarka'da IKA uygulaması.....	21
Şekil 2.12. State Route- Spring Mills, PA yakınlarında 2012'de bir IKA uygulaması..	22
Şekil 2.13. Köln ve Frankfurt IKA deneme kesimleri.....	23
Şekil 2.14. Fransa IKA uygulaması	24
Şekil 2.15. Norveç'te IKA teknolojisi araştırma ekibi	25
Şekil 2.16. Ankara çevreyolu IKA denemesi	25
Şekil 3.1. Tez kapsamında kullanılan malzemeler	35
Şekil 3.2. Penetrasyon testi	37
Şekil 3.3. Yumuşama noktası deneyi.....	39
Şekil 3.4. Elastik geri dönme testi	41
Şekil 3.5. Brookfield dönel viskozite cihazı	42
Şekil 3.6. Soyulma testi ve aşamaları	44
Şekil 3.7. SuperPAVE sınıflandırma sistemi.....	46
Şekil 3.8. Dinamik kesme reometresi	49
Şekil 3.9. Eğilme kirişi reometresi.....	50
Şekil 3.10. Dönel ince film etüvü (RTFO)	51
Şekil 3.11. PAV deney seti	53
Şekil 3.12. Karışımın hazırlanma ve sıkıştırılma aşamaları	55
Şekil 3.13. Marshall stabilite ve akma testi uygulaması.....	56
Şekil 3.14. İndirekt çekme mukavemeti deneyi cihazı	57
Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi sonucu.....	60
Şekil 4.2. Yumuşama noktası testi sonuçları	61
Şekil 4.3. Penetrasyon indeksi sonuçları	62
Şekil 4.4. Elastik geri dönme oranları.....	63
Şekil 4.5. Viskozite sonuçları	64
Şekil 4.6. Soyulma direnci testi sonuçları.....	66
Şekil 4.7. Soyulma direnci testi sonrası numune görüntüleri	67
Şekil 4.8. Bitümlerin RTFO sonrası kütle kaybı oranları	71
Şekil 4.9. BBR testi sonuçları	73
Şekil 4.10. Marshall stabilite ve akma testi sonuçları.....	75
Şekil 4.11. İÇM oranları	76

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. IKA Teknolojisiyle Emisyon Gazlarındaki Azalmalar	15
Çizelge 3.1. Bitümün temel mühendislik özellikleri	33
Çizelge 3.2. Sasobit® katkısının fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. Modifiye bitüm kodlama sistemi	34
Çizelge 3.4. Bazalt agregasının özellikleri	35
Çizelge 3.5. TMA binder tabakası gradasyon limitleri.....	54
Çizelge 4.1. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları.....	65
Çizelge 4.2. Yaşlandırılmamış bitümlerin $G^*/\sin(\delta)$ (Pa) verileri.....	69
Çizelge 4.3. Yaşlandırılmamış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri.....	69
Çizelge 4.4. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin $G^*/\sin(\delta)$ (Pa) verileri	70
Çizelge 4.5. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri	70
Çizelge 4.6. Uzun dönem yaşlandırılmış bitümlerin $G^*.\sin(\delta)$ (kPa) verileri	72
Çizelge 4.7. Uzun dönem yaşlandırılmış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri.....	72
Çizelge 4.8. Plentte harcanan enerji miktarı	77
Çizelge 4.9. Bitüm birim fiyatları	77
Çizelge 4.10. 1 ton IKA ve BSK maliyetleri	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	Santigrat derece
Δ	Faz Açısı
$ G^* $	Kompleks Kesme Modülü
\$	Dolar
%	Yüzde
cm	Santimetre
cP	Centipoise
dk	Dakika
Gpa	Gigapascal
g	Gram
Hz	Hertz
km	Kilometre
lt	Litre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
Mpa	Megapascal
Pa.s	Pascal-saniye
vb	Ve Benzeri
vd	Ve Diğerleri

Kısaltmalar

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APA	Asphalt Pavement Analysis
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWD	Asphalt Workability Device
BBR	Beam Bending Rheometer
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EN	Europe Norm
FHWA	Federal Highway Administration
FT	Fischer-Tropsch
IKA	Ilık Karışım Asfalt
ITS	Indirect Tensile Strength
İÇM	İndirekt Çekme Mukevemeti
ISO	International Standarts Organization
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KGO	Karl – Gumar Olsson
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PAV	Pressure Ageing Vessel
PG	Performans Grade
RAP	Recycled Asphalt Pavement
RE	Rebound of Elastic

RPPW	Recycled Pyrolytic Polyethylene Wax
RTFO	Rolling Thin Film Oven
RV	Rotational Viscosimeter
SBS	Stiren Bütadien Stiren
TMA	Taş Mastik Asfalt
TS	Türkçe Standartları



1. GİRİŞ

Asfalt; yol üstyapı inşasında kullanılan ve bileşen olarak kırma taş/kırma çakıl, filler agrega ve bağlayıcıdan meydana gelen karışım türüdür. Asfaltta bağlayıcı madde kullanımı açısından genellikle bitüm tercih edilir. Ülkemiz 2013 yılında 46,2 milyon ton bitümlü sıcak karışım kullanarak Avrupa’da 1. olmuştur. 2014 yılında ise bu bitümlü sıcak karışım kullanım miktarı 30,9 milyon ton olmuştur (ASMÜD, 2016). 2013 senesinde, 11. Ulaştırma Şurası’nda Türkiye’nin 100. yıl (2023) hedefi adına bölünmüş yol uzunluğunun 37.000 km ‘ye kadar çıkarılması ve eskiden toplam yol uzunluğunun %25’inden meydana gelen asfalt betonu kaplamalı yolların ise şu anda tümünün asfalt betonundan yapılması amaçlanmaktadır. Bu hedefler doğrultusunda günümüzde ve önümüzdeki yıllarda eski yıllardaki kullanım miktarlarından çok daha fazla miktarlarda asfalt kullanımı olacağı anlamına gelir (Temel, 2016)

Hızla gelişen dünya ekonomisi ve artan nüfus ile, günden güne yeni yollara duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bununla birlikte çevresel sorunlar ve bu sorunların çözümleri, ulaşırma alanı için yapılan araştırma ve çalışmalarda ön planda tutulmuştur. Bu doğrultuda 1950’li yılların son kısımlarında araştırmalar ve çalışmalar başlamıştır (Al-Hadidy ve Tan, 2009). Özellikle yüksek karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ile bilinen sıcak karışım asfaltların üretiminde harcanan enerjiyi daha düşük seviyelere çekmek için 1990’ların ortalarından itibaren bazı teknikler üzerinde çalışılmıştır. Bunun yanı sıra, yaşam standartlarındaki artış, sosyal gelişme, mevcut kaynakların yetersizliği ve artan malzeme ve enerji maliyeti karayolu mühendislerini yeni yollar inşa etmeye ve mevcut yolları iyileştirme konusunda alternatifler keşfetmeye yöneltmiştir (Şengöz ve Topal, 2005; Yılmaz vd., 2011).

Agreganın bitüm ile kaplanıp sıkıştırılması ile yapılan kaplama türüne esnek kaplama denir. Bitüm, asfalt karışımının ağırlıkça %5-7’sini, hacimce yaklaşık %15’ini oluşturmaya karşın bitümün performansı yolun hizmet süresi süresince ortaya koyacağı performans açısından önemlidir (Ahmedzade, 2013). Bundan dolayı, esnek kaplamaların performansının geliştirilmesi karışım içerisinde kullanılan bitümün performansı ile direkt ilişkilidir (Gököl vd., 2018). Bitüme kendi ağırlığının belirli bir yüzdesince katkı maddesi ilave edilerek bitümün performansı artırılabilenkte, bu kapsamda birçok ticari, doğal, yapay ve endüstriyel katkı maddesi kullanılabilmektedir

(Gökalp vd., 2019b). Bu işlem esnek kaplamanın inşasında ilk başta maliyeti yükseltse de kaliteli bir uygulama sonrasında yol hizmet süresince yapılacak olan bakım-onarım maliyetinde düşüş sağlayarak ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır.

Bitümlü sıcak karışım (BSK) üretimleri ve serim işlemlerine bakıldığında, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının çok yüksek olduğu (150-200 °C) bilinen bir gerçektir (Gökalp, 2021). Bu yüksek sıcaklık ihtiyaçları üretim esnasında daha fazla yakıt harcanmasına neden olur ve açığa çıkan zehirli gazları hem çevre hem de insan sağlığı açısından büyük ve geri döndürülmez zararlara yol açmaktadır (Kim vd., 2011). Çevre ve insan sağlığını tehdit eden bu durumu minimize edilmesi, yüksek enerji kullanımı nedeniyle önemli miktarda artan BSK üretim maliyetlerinin düşürülmesi için yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonuç vermiş, enerji kullanımı bakımından daha ekonomik ve çevresel çözümler ortaya koyan Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojisi geliştirilmiştir (Kaya ve Topal, 2016).

IKA, BSK'ye nazaran 20 – 55 °C arası daha düşük üretim ve serim sıcaklıklarında işlenebilen bir tür bitümlü karışımdır (Gökalp, 2021). IKA teknolojisi ile BSK'lerin üretim sıcaklıklarında belirgin düşüş sağlamanın yanı sıra karışımda kullanılan bağlayıcının viskozitesini düşürülebilmekte ve böylelikle bitümlü bağlayıcı daha akışkan bir hale gelerek agreganın düşük sıcaklıklarda tamamen kaplanmasını sağlanmaktadır (Ünvermez, 2011). Düşük sıcaklık derecelerinde sıcak karışımın işlenebilir olmasıyla, üstyapının yaşlanmaya ve nem hasarına karşı direncinde artış sağlanabilmekte, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı ile serim sonrası yüzey sıcaklığının birbirine yakın olması sayesinde sıkıştırma için gerekli olan süre aralığı artmaktadır (D'Angelo vd., 2008). Ayrıca, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının düşük olması IKA'nın soğuma süresinde azalma meydana getirmekte, bundan ötürü tünel, havaalanı ve yüksek trafik yoğunluğu olan yolların trafiğe açılış süresini kısaltmaktadır (Su vd., 2009).

Geleneksel BSK üretim ve sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş sağlamak amacıyla geliştirilen IKA teknolojisi, üretim tekniklerine göre (1) köpüklendirme tekniği (2) kimyasal madde katkılı (3) organik madde katkılı olarak gruplandırılmaktadır. IKA teknolojileri yoğun ve açık gradasyonlu karışımlarda, taş mastik ve mastik asfalt kaplama türlerinde, polimer modifiye ya da geri dönüştürülmüş asfalt içeren

karışımlarda kullanım imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte IKA, farklı kaplama kalınlıklarına ve farklı trafik seviyelerine de uygundur (D'Angelo vd., 2008).

IKA teknolojisi dünyada henüz yaygın olarak kullanılan bir teknoloji halini almamıştır. Bu teknoloji ülkemizde de henüz kullanılmaya ve hakkında çeşitli araştırma ve laboratuvar çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. IKA saha uygulamasını gösteren bir görsel Şekil 1.1.'de verilmiştir (İnsapedia, 4 Şubat 2020).



Şekil 1.1. IKA saha uygulaması

IKA teknolojisi özelinde bir modifikasyon işlemidir. Bitüm IKA katkıları ile karıştırılması ve/veya modifiye edilmesi ile üretilen bitümlü bağlayıcıyı sıcak karışım imalatında kullanılmasına dayanır. Modifiye bitüm, mekanik karıştırma ve/veya kimyasal bir reaksiyon sağlanarak katkı maddesinin bitüm ile karıştırılması ile elde edilen bir bitümlü bağlayıcı türüdür. Bitüm modifiyelerinin başlıca görevlerinden biri, bitümün veya BSK'nin farklı özelliklerinde bir kayba neden olmadan gerek düşük gerekse yüksek sıcaklık değerlerinde inşa edilecek kaplamanın zorlayıcı çevresel koşullarda ve trafik yükleri altında dayanımı arttırmaktır (Gökalp, 2019a). Bu sayede kaplamanın hedeflenen servis ömrünü tamamlanması sağlanmaktadır (Ahmedzade vd., 2005; Whiteoak vd., 2003). Ancak, bazı durumlarda modifiye edilen bitümlerde istenmeyen özellikler ortaya çıkabilmekte, belli oranlarda ilave katkıları kullanılarak bunların giderildiği mevcut çalışma çıktılarında görülmektedir (Gökalp vd., 2019a).

İncelenen çalışmalardan İKA üretilmesinde kullanılan bitümlerde meydana gelen bazı arzulanmayan özelliklerin belirdiği görülmüştür. Bunlardan ikisi **(1) yumuşama noktasındaki aşırı yükseliş, (2) düşük soyulma mukavemetidir**. Tez kapsamında, bu iki durumun giderilmesi noktasında araştırmalar yapılmış ve çalışma konusu bu doğrultuda oluşturulmuştur. Yukarıda belirtildiği üzere ilave bir katkı ile diğer mevcut ve geliştirilen özelliklerinde bir kayıp oluşturmada bu iki problemin giderilmesi noktasında geniş bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde, oda koşullarında bitümlü bağlayıcılar gibi bir forma ve özelliklere (yapışkan, yağlı, sıcaklık artışı ile viskozitesi düşen) sahip bir ürün olan Ilık Çam Sakızı Ağdası (İÇSA) ilave katkı olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu tez kapsamında, 70/100 penetrasyona sahip bitüm kullanılmıştır. İKA katkısı olarak da yaygın kullanılan Sasobit® ve İÇSA ilave edilmiştir. Bitüm ağırlığınca tanımlanan oranlarda (%1,2 ve 3) organik İKA katkılarından olan Sasobit® ve %1 oranında İÇSA ile ayrı ayrı ve bunların tanımlanan oranlarda birlikte kullanılmasıyla oluşturulan karışım 70/100 penetrasyon sınıfına sahip saf bitüm ile karıştırılarak bitüm modifiye edilmiştir. Saf ve Sasobit® ve ılık çam sakız ağdası ve bunların tanımlanan oranlarda bir arada kullanılması ile modifiye edilen bitümün temel (fiziksel) ve reolojik özellikleri bir dizi standart test yöntemleri takip edilerek belirlenmiştir. Bitümün temel (fiziksel) özellikleri; penetrasyon, yumuşama, viskozite ve elastik geri dönme deneyleri ile belirlenirken reolojik özellikleri ise SuperPAVE sınıflandırma sisteminde yer alan Dinamik Kesme Reometresi (DSR) yaşlanmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numunelere, uygulanmıştır. Bitümün kısa dönem yaşlandırılmasında dönel ince film etüvü (RTFO), uzun dönem yaşlandırılmasında ise basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) yöntemleri kullanılmıştır. Uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerini üzerinde, Eğilme Kirişi Reometresi (BBR) testi yapılmıştır. İKA katkıları ve İÇSA ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcıların agrega ile uyumunun bir göstergesi olan soyulma analizi, ülkemiz Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) belirtilen Nicholson soyulma testi ile yapılmıştır. Tez kapsamında, tanımlanan her bir modifikasyon parametreleri ile TMA binder kaplaması kıstasları esas alınarak İKA numuneleri üretilmiştir. Agregada olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinde çokça görülen magmatik kökenli kayalardan bazalt kullanılmıştır. Asfalt Enstitüsü tarafından agregaların kaba, ince ve filler yüzde değerleri dikkate alınarak “başlangıç optimum bitüm oranı” yöntem ile belirlenen bitüm oranı kullanılarak İKA’lar üretilmiş, Marshall yöntemi ile sıkıştırma işlemleri

yapılmıştır. Üretilen Marshall numunelerine stabilite, akma deneyleri ve indirekt çekme mukavemeti testleri uygulanmıştır. Son olarak 1 ton IKA üretimi için tez kapsamında kullanılan değişkenler ile geleneksel BSK ve IKA için maliyet analizi yapılmıştır.

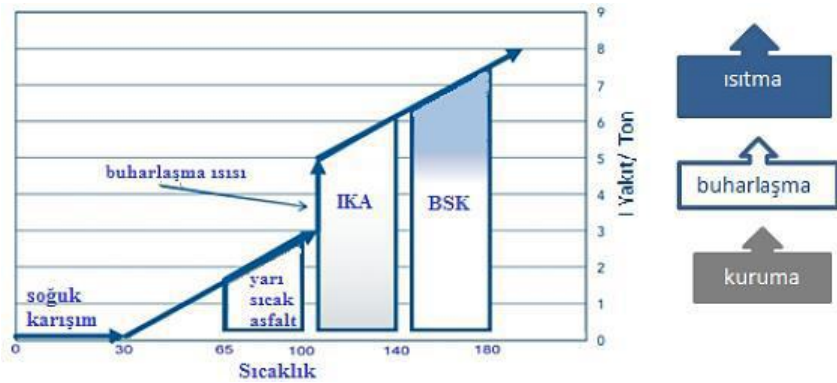


2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak araştırması kapsamında, IKA Teknolojisi ile ilgili yapılan araştırmalar ve çalışmaları içeren geniş bir literatür incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda IKA tanıtılmış, tarihsel gelişimi ele alınmış, üretim teknikleri ortaya konulmuş, uygulamalarındaki faydalar ve dezavantajlar irdelenmiş, dünyadaki IKA deneyimlerinden örnekler verilmiş ve önceki ve güncel bilimsel çalışmalar ışığında performans özellikleri özetlenmiştir.

2.1. IKA Teknolojisi

Geçmiş 1950’li yıllara dayanan ancak özellikle 1990’lı yılların başından itibaren artan çevresel ve ekonomik duyarlılıkla beraber üretim ve serim sıcaklıklarında düşüş sağlamak adına tüm dünyada kullanılan geleneksel BSK Teknolojisi yerine IKA Teknolojisinin kullanımına yönelimlerin ve çalışmaların ön planda olduğunu görülmektedir (Oylumluoğlu, 2012). Dünya’nın bir kısmında henüz kullanılmaya başlanan ancak Avrupa’da daha çok kullanılan IKA teknolojileri ile bağlayıcının viskozitesinde düşüş sağlanarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş sağlanması sayesinde, IKA’nın BSK kullanımına son verip standart bir teknoloji halini alması beklenmektedir. Zira yapılan araştırmalar IKA üretim ve serim sıcaklıklarında 20-50 °C azalma sağlandığını göstermektedir (Abdullah vd., 2014). IKA ve BSK’nin yanı sıra soğuk karışım, yarı ılık karışım asfalt, diğer geliştirilen asfalt karışım teknolojileridir (EAPA, 2014). Şekil 2.1.’de asfalt teknolojilerinin üretim sıcaklıklarına göre sınıflandırması verilmiştir (D'Angelo vd., 2008).

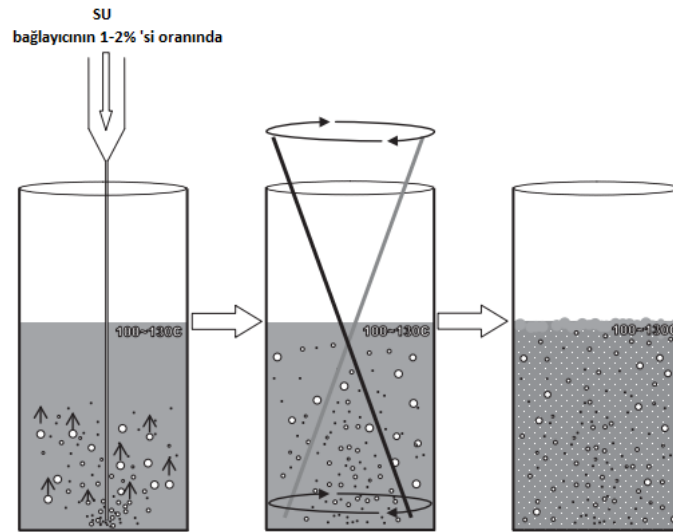


Şekil 2.1. Üretim sıcaklıklarına göre karışımların sınıflandırılması

Yüzey sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda üretilen IKA düşük sıcaklıklarda üretilebilmesi sebebiyle plentlerden kaynaklanan zehirli gazın ve kokusunun yayılımında azalma sağlamakta, üstyapı inşa sezonlarının ve karışımların taşınabileceği mesafelerin uzamasına imkân vermekte ve yolun trafiğe açılma süresini azaltmaktadır. Bunlara ek olarak IKA teknolojisi, kısa dönem yaşlanmasını ve çatlak oluşumunu azalma sağlayabilmekte, aynı zamanda performans açısından BSK'ye eşdeğer performans verebilmektedir (Abdullah vd., 2014).

2.2. IKA Tarihsel Gelişimi

Tarihsel gelişim kapsamında yapılan çalışmalara bakıldığında ilk olarak bitümün viskozitesini düşürülmesi noktasında 1956 ve 1968 yıllarında bazı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bu ilk çalışmalar kapsamında bitümün köpüklendirilmesinde buhar ve soğuk su enjekte yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda, Şekil 2.2.' de soğuk su yöntemi kullanılarak köpüklendirme yöntemini görülmektedir (Muthen, 1998).



Şekil 2.2. Soğuk su enjektörü ile köpüklendirme yöntemi

IKA hazırlarken asfalt emülsiyonlarını kullanan Chevron, 1970 yılında yeni yöntemler (temel açık dereceli ve yoğun dereceli) keşfetmiş, karışım tasarımı ve üretimi açısından yeni kurallar ortaya koymuştur (Köse, 2015; Chevron, 1977).

Bir köpüklendirme yöntemi katkı maddesi olan Aspha- min zeolit 1995 yılında Almanya'da geliştirilmiş ve birçok çalışmada kullanılmıştır. Ancak, Almanya'da Aspha-min zeolitin ilk yol üstyapı inşasındaki kullanımı ise 1999 yılında olmuştur.

Günümüze yaygın olarak kullanılan bir organik IKA katkı maddesi olan Sasobit® 1997’de ilk üstyapı yol inşası için Almanya Hamburg’da kullanılmıştır. Ayrıca 1996 senesinde Norveç’te bir IKA emülsiyonu çalışması yapılmıştır.

Prowell vd., 2011 tarafından hazırlanan bir raporda, IKA teknolojisinin tarihsel gelişimi aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

2002-2004 yılları arasında IKA teknolojileri kapsamında Avrupa ülkelerine bir araştırma gezisi düzenleyen Amerika Ulusal Asfalt Üstyapı Birliğinin (NAPA) amacı IKA ile ilgili araştırmalardan elde edilen verileri bir araya getirmek ve bu veriler ile bir kılavuz oluşturmaktır. Araştırma gezisinin devam ettiği 2002-2004 yıllarda NAPA Amerika’nın Florida ve Kuzey Carolina eyaletlerinde saha uygulamaları devam etmiştir. Araştırma gezileri neticesinde 2005 yılında IKA kullanım ve uygulama kılavuzu oluşturmak amacıyla NAPA ve Federal Karayolu İdaresi (FHWA) tarafından bir grup görevlendirilmiştir. 2005 yılında ABD ve Kanada’da saha denemeleri devam etmiştir. IKA teknolojisinin uygulanmasında avantajlı durum oluşturacak bilgiler toplamak adına 2006’da Avrupa ülkelerine uluslararası bir araştırma gezisi FHWA, Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdaresi (AASHTO) tarafından planlanmıştır. AASHTO formatında bir IKA kılavuzu geliştirmesi ve IKA üzerine ilk uluslararası konferans düzenlenmesi 2007 – 2011 yılları arasında olmuştur. NAPA tarafından yapılan bir anket çalışmasından elde verilere göre ilk olarak köpüklendirme teknolojilerinde olmak üzere ABD’de IKA teknolojilerinin kullanımı 2008 – 2010 senelerinde yüksek miktarda artış meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca bu anket çalışmasına göre Amerika’da IKA teknolojisi kullanımı 2009 – 2010 yılları arasında, 28,4 milyon ton artış olduğu göstermiştir. ABD’de IKA kullanımı 2010 yılında ise toplam asfalt kullanımının yaklaşık %13’nü kapsadığı rapor edilmiştir (Prowell vd., 2011).

2.3. IKA Üretim Teknikleri

Genellikle üretimi 120-150 °C arasında gerçekleşen IKA’nın bu üretim sıcaklıklarını düşürmede, karışımın sıkıştırılabilirliğini kolaylaştırmada ve bağlayıcının viskozitesini azaltmada birçok farklı teknik uygulanmaktadır. IKA teknolojisinde en çok kullanılan 3 üretim tekniği mevcuttur (EAPA, 2014; Oylumluoğlu, 2012). Bunlar;

- (1) Organik madde katkısı,
- (2) Kimyasal madde katkısı,
- (3) Köpüklendirme teknikleridir

2.3.1. Organik madde katkısı ile IKA üretimi

Organik madde katkısı bitüme eklenmesiyle erime sıcaklıklarında tamamen eridiği bilinen amid ya da mum içeren katkı maddeleri olarak bilinmektedir. Bu işlem ile bitümün viskozitesinde ve üretim sıcaklıklarında belirgin azalma meydana gelmektedir (Rubio vd., 2012). Karışımın soğumasıyla kristalleşen Organik madde katkıları karışımın sertliğini de arttırmaktadır (Shang vd., 2011). Sıkıştırma ve karıştırma sıcaklıklarında düşüş sağlayan organik madde katkıları genellikle bitüme %2-4 (bitümün ağırlığınca) eklenir organik madde katkıları üretim işlemi için üç farklı yöntemi bulunmaktadır (Rubio vd., 2012). Bunlar,

- (1) Fischer-Tropsch mumları,
- (2) Yağlı asit amidleri,
- (3) Montan mumlarıdır.

Fischer-Tropsch mumları: CO/H₂ gazlarının hidrokarbon ve diğer alifatik bileşiklerin sentezi için kullanımı ile elde edilen organik mumlardır. Fonksiyonel grupları bulunmayan saf hidrokarbon olan bu organik katkı çeşidi, yüksek kimyasal stabilite ve yaşlanma direncine sahiptir. FT mumları yapılarında lateral kristaller barındırmaktadırlar. Bu kristaller üretim sırasında 105°C'dan itibaren aktive olmaktadır. Soğuma esnasında ısı servis sıcaklığına düşene kadar (yaklaşık 65°C) bu aktivasyon işlemi devam eder. Bahsedilen servis sıcaklığında itibaren ise bu işlem tamamlanarak kristalize yapı sertleşir ve ağırsı bir hal alır (Rubio vd., 2012). Bu farklılıklar sayesinde FT mumları saf mumlara kıyasla yaşlanmaya karşı daha dirençli olup, çok daha uzun süre depolanabilmektedirler (Hurley ve Prowell, 2005).

Yağlı asit amidleri: Yağlı asit amidleri ile organik IKA katkı üretimi yöntemi aminlerin yağlı asitlerle sentezlenmesi prensibine dayalı endüstriyel bir işlemdir. Yağlı asit amidleri 140-145°C sıcaklıkta tamamen eriyerek bitüm içerisinde homojen olarak dağılmaktadırlar. Soğutulduklarında ise 135-140°C sıcaklıkta kristalizasyon işlemlerini

tamamlayıp, bitümlü karışımın stabilitesini ve deformasyonlara karşı direncini arttırlar (D'Angelo vd., 2008).

Montan mumları: Montan mumu (linyit mumu) özel mumsu linyitten elde edilmektedir. Montan mumlarının erime sıcaklıkları 75°C civarı olduğundan genellikle amid mumlar gibi erime sıcaklığı yüksek olan malzemelerle birlikte kullanılmaktadırlar. Montan mumlar ek karıştırma zaman gerektirdiklerinden, ya önce mikserde yüksek erime sıcaklığı olan malzemelerle karıştırılarak bitüme eklenir ya da direkt olarak mastik asfalt karışımına ilave edilir (Vaitkus, 2009 a; 2009b). Piyasada bilinen isimleriyle genel olarak uygulamalarda en çok kullanılan organik IKA katkılardan bazıları aşağıdaki gibidir (Alataş, 2019; Şahin, 2019).

- (1) Sasobit(R) ®,
- (2) Asphaltan B ®,
- (3) TLA-X ®,
- (4) Shell Thiopave®,
- (5) Leadcap -64

Bunların bazılarına ait resimler Şekil 2.3.'te verilmiştir ([Semantic Scholar](#), 1 Ekim 2009).



Sasobit(R)



Leadcap-64



Asphalthan B



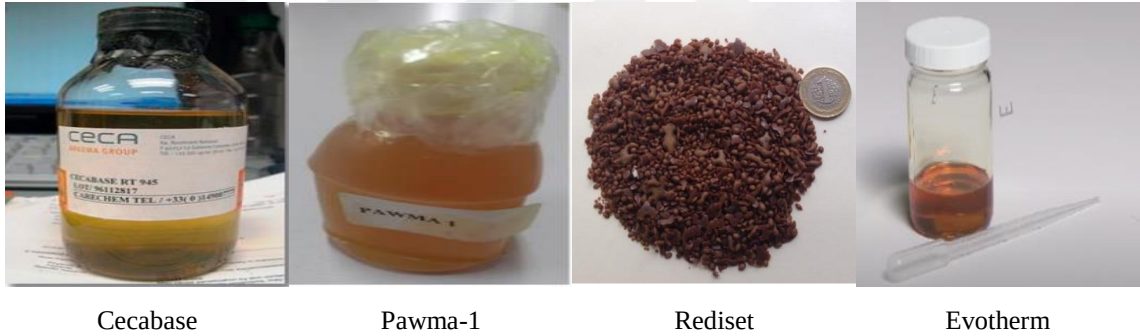
Shell Thiopave

Şekil 2.3. IKA organik katkı maddeleri

2.3.2. Kimyasal madde katkısı ile IKA üretimi

Bu yöntemde agregaların tamamen bitümle kaplanmasını sağlayan, işlenebilirliği ve sıkıştırmayı iyileştirmenin yanında adezyonu arttıran bir üretim tekniğidir. Karıştırma sıcaklığında 15-75 °C’lik azalma sağladığı bilinmektedir (Von Devivere, 2011). Kimyasal katkılar karışımda bitümün ağırlığının %1-2 oranında kullanımı önerilmektedir (Prowell ve Hurley, 2007). Ayrıca kimyasal katkı maddeleri kullanımı sayesinde asfalt karışımında herhangi bir soyulma önleyici madde kullanımına gerek yoktur (Chowdhury ve Button, 2008). Piyasada en çok kullanılan kimyasal IKA katkılardan bazıları aşağıdaki gibidir. Bunların bazılarının görüntüsü Şekil 2.4.’te verilmiştir (Alataş, 2019; Walker, 2009; Youtube, 15 Temmuz 2016).

- (1) Evotherm®
- (2) Rediset WMX®
- (3) Cecabase RT®
- (4) Pawma 1



Şekil 2.4. IKA kimyasal katkı maddeleri

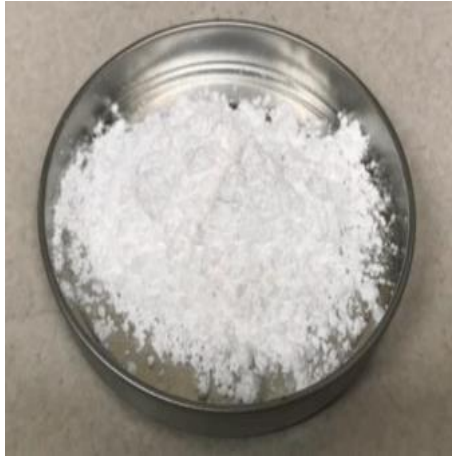
2.3.3. Köpüklendirme teknikleri ile IKA üretimi

Bitümün viskozitesini azaltmak için değişik köpüklendirme teknikleri uygulanmaktadır. Su ile köpüklendirilen sıcak bitümde su buharlaşırken, bitüm hacmi artmakta ve kısa süreli viskozite azalması meydana gelmektedir. Düşük sıcaklıkta ısıtılan agregalar köpük bitüm ile kaplanmaktadır (Asmüd, Ziyaret Tarihi: 18 Temmuz 2022).

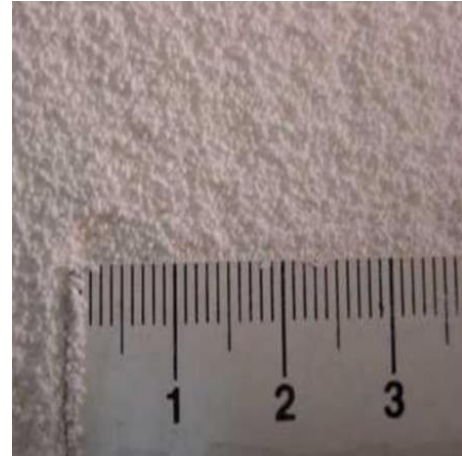
İki farklı köpüklendirme tekniği uygulama yöntemi mevcuttur (Larsen, 2001). Bunlar; (1) Su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesi (zeolit) ilavesi ve (2) Bitüme doğrudan su enjeksiyonudur.

Su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesi (zeolit) ilavesi ile köpüklendirme yöntemi: Karışımında su tutma özelliğine sahip madde kullanılarak (Doğal ve sentetik zeolit) suda buharlaşma sağlanır, bu oluşan buhar sayesinde bitümde köpüklendirme ile hacim artışı ortaya çıkar. Bu hacim artışıyla kısa süreli viskozite azalması meydana gelir. Bu sayede karışımın işlenebilirliği artar. Ayrıca düşük bitüm miktarlarıyla agregaların kaplanması sağlanmaktadır (Butz vd., 2001). Türkiye’de IKA katkısı olarak doğal zeolit kullanımı 9 Eylül Üniversitesinde yapılan bir TÜBİTAK çalışmasında araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında doğal zeolit üretim sıcaklıklarını azalttığı ortaya çıkmıştır (Şengöz vd., 2013b). Piyasada bilinen isimleriyle genel olarak uygulamalarda en çok kullanılan su tutma özelliğine sahip IKA katkılardan bazıları aşağıda verilmiştir. Bunların bazılarının görüntüsü Şekil 2.5.’te gösterilmiştir (Zaremotekhoses, vd. 2022).

- (1) Aspha–Min®
- (2) Advera® WMA
- (3) WAM–Foam®



Advera



Aspha-min

Şekil 2.5. Su tutma özelliği olan IKA katkı maddeleri

Bitüme doğrudan su enjeksiyonu ile köpüklendirme yöntemi: Bu yöntemde, doğrudan su enjeksiyonu ile köpüklendirme yönteminde bir ağızdan sıcak bitüm enjeksiyonu yapılırken diğer bir ağızdan soğuk su püskürtülür. Soğuk suyun bitümde meydana getirdiği ani köpüklenme sayesinde hacim artışı olmaktadır. Son ağızdan köpüklenme olmuş bitümün dışarı verilerek agrega ile kaplanması sağlanmaktadır (Zaumanis, 2010). Bu yöntemde karışıma sonradan su eklendiğinden soyulma direnci gibi problemler ortaya çıkarmaktadır (Austerman vd.,2009; Wielinski vd., 2009; Kvasnak ve West, 2009; Jones vd., 2010). Ayrıca, agregaların tam kurumadan karışıma ilave edilmesi yüzünden bitümlü karışımlarda su bazlı bozulmalar meydana gelmektedir (Hearon, 2008). Tüm köpüklendirme yöntemlerinde viskozite azalması meydana gelmektedir bu da hem düşük bitüm miktarlarıyla agregaların kaplanmasını sağlamakta hem de işlenebilirliği artırmaktadır (Kristjansdottir, 2007; Prowell ve Hurley, 2007; D'Angelo, 2008). Köpüklendirme yöntemi ile üretilen IKA'da tam dayanım suyun tümüyle buharlaşmasından sonra ortaya çıkmaktadır (Bowering, 1970). Piyasada en çok kullanılan bitüme doğrudan su enjeksiyonu yönteminde kullanılan IKA katkılardan bazıları şunlardır:

- (1) Double Barrel®
- (2) Terex® WMA
- (3) Aquablack TM WMA

2.4. IKA Uygulamalarının Avantaj ve Dezavantajları

Bu bölümde IKA uygulamalarının avantaj ve dezavantajları literatür ışığında ortaya konmuştur.

2.4.1. IKA uygulamalarının avantajları

BSK ile kıyaslandığında, IKA teknolojisi ile üretilen asfalt karışımların kullanımı birçok avantaj sağladığı değerlendirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şahin, 2019; Oylumoğlu, 2012)

- (1) Yakıt tüketiminde yaptığı azalma sayesinde yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlaması, (2) Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında azalma sağlaması, (3) Plentte kaynaklanan emisyon gazlarına ve dumana maruz kalma seviyesinde azalma sağlaması, (4) Bağlayıcının yaşlanmasını azaltması, (5) Üstyapıların inşasında inşaat sezonunu ve

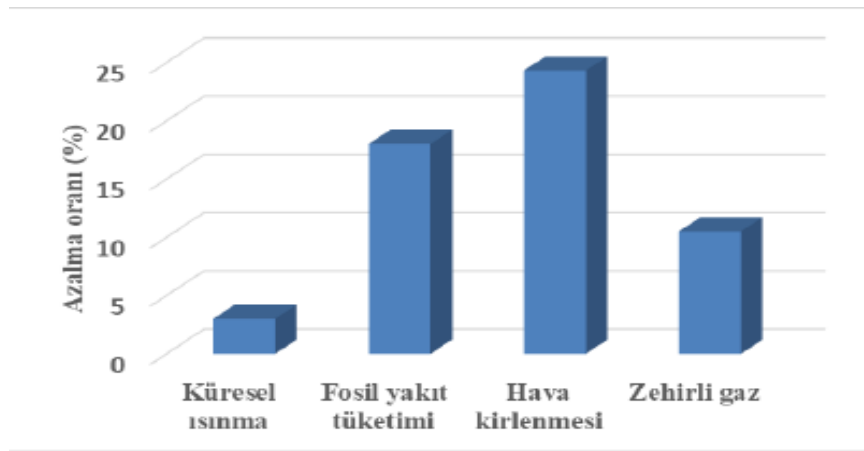
servis ömrünü uzatması, (6) Yüksek öncelikli yollar ve tünellerin hizmete açılma süresini kısaltması, (7) Üstyapının inşasında çalışan ekip için daha iyi çalışma koşulları sağlaması gibidir.

IKA uygulamalarının sağladığı avantajlar bunlarla sınırlı olmayıp; bu avantajlar çevresel faydalar, üretim ve uygulamadaki faydalar, ekonomik faydalar ve üstyapı inşasında çalışanlar açısından faydalar olmak üzere dört ana başlıkta altında değerlendirilebilir (Oylumluoğlu, 2012).

2.4.1.1. Çevresel faydalar

Günümüzde gerek doğal kaynakların hızla azalması gerekse de küresel ısınma nedeniyle araştırmacılar çevreye duyarlı ve faydalı olan yeni teknolojilere yönelmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda ulaşım sektöründe çalışmalarını yürüten araştırmacılar, araştırma odaklarını BSK üretim ve üstyapının imalatı sırasında ortaya çıkan emisyon gazlarında azalma sağlayan IKA teknolojisine yöneltmişlerdir (Jenkins vd., 1999; Barthel ve von Devivere, 2003).

Mevcut çalışmalarda yapılan analizlerde daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları sağlayan IKA emisyon gazlarında %75-90 arasında düşüş sağladığı belirlenmiştir. Düşük sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyulan IKA teknolojisi ile üretim neticesinde önemli miktarlarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Romier vd., 2006; Chowdhury ve Button, 2008; Barthel ve Von Devivere, 2003). IKA'nın çevreye katkısı hakkında Şekil 2.6.'da bir grafik verilmiştir (Hassan vd., 2010).



Şekil 2.6. IKA'nın BSK'ye göre çevreye katkısı

Geleneksel BSK üretimi ve sahada uygulanması sırasında ortaya çıkan emisyon gazları, çevre için oldukça büyük problemler çıkarmaktadır. Karışımın üretimi için gerekli sıcaklıklarının düşük olduğu bilinen IKA için tüketilen yakıt miktarını da azalmakta, düşük sıcaklıkta plentte görülen işlemlerden kaynaklanan emisyon gazlarında da düşüş sağlanmaktadır. Bu yönde yapılan bir çalışmada, Sampath (2010) IKA katkılarının emisyon değerlerini yüksek ölçüde düşürdüğünü belirten bu oranları tespit etmiştir. Bu oranlara dair veriler Çizelge 2.1. 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. IKA Teknolojisiyle Emisyon Gazlarındaki Azalmalar

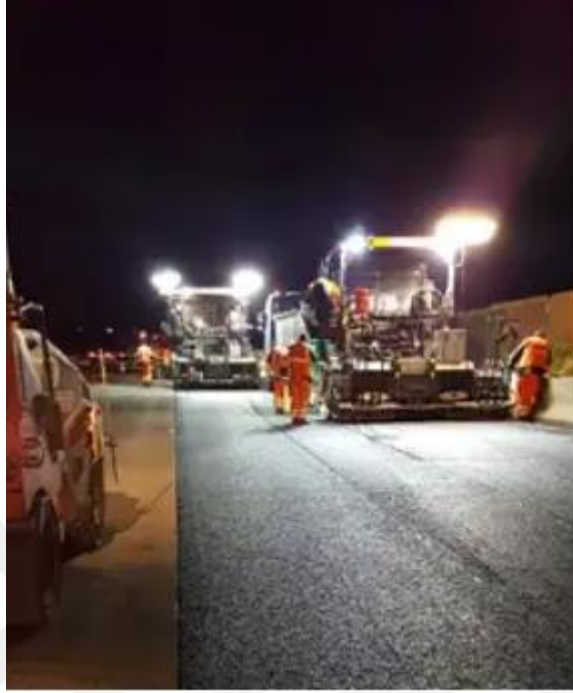
Emisyonlar	Azalma (%)
Azot oksitler	18 – 70
Karbonmonoksit	10-30
Karbondioksit	15 – 40
Kükürt dioksit	18-35
Uçucu organik bileşikler	50
Toz	25-55

2.4.1.2. Üretim ve uygulamadaki faydalar

IKA'nın üretim ve uygulamadaki faydalarına bakıldığında, düşük viskozite değerlerinin asfalt karışımının düşük sıcaklıklarda yapılmasına imkân verdiği görülecektir. Bu viskozite değerinde azalma ile sıcak karışımın işlenebilirliği artmasından dolayı hazırlanan IKA'nın daha kolay sahaya serilmesi ve sıkıştırılabilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda işlenebilir olması karışımın daha uzak mesafelere taşınmasına imkân vermekte, üretim sahası ile uygulama sahası arasında daha ekonomik seçeneklerin değerlendirilmesini imkân vermektedir (Croteau ve Tessier, 2008; Moore, 2007).

Geleneksel BSK'ye kıyasla daha düşük sıcaklıklarda IKA'nın işlem görmesi yol inşasının daha hızlı seyretmesini ve inşa edilen yolun daha hızlı trafiğe açılmasını sağlayacaktır (Oylumluoğlu, 2012; EAPA, 2014; Abdullah vd., 2014). Özellikle kurak ve sıcak bölgelerde örneğin; Güney Almanya'da akşam saatlerinde döşenen bir yolun, döşendikten 3 saat sonra kullanıma açıldığı bilinmektedir. Döşenen bu yolun bir

görüntüsünü Şekil 2.7.'de görebilirsiniz (Rainer Schroeter/Sasol). Oysa, normal koşullarda 24 saat geçmeden bir yol yapısı kullanıma açılmamaktadır (KGM 2013).



Şekil 2.7. Güney Almanya'da IKA ile 3 saatte yapılan yol inşaatından bir resim

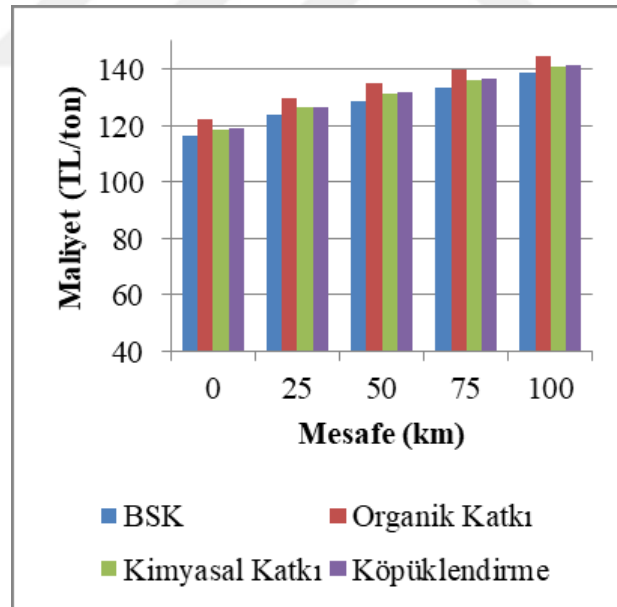
İşlenebilirlik seviyesi kullanılan katkı maddesi miktarına göre değiştiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Şahin, 2019; Oylumoğlu, 2012). IKA katkılarla hazırlanan bitümlü karışımlara Brookfield viskozite deneyi ile Massachusetts Üniversitesi'nde geliştirilen Asfalt İşlenebilirlik Cihazı deneyini uygulayan Austerman vd., (2009) yaptığı çalışmalarda, bitüme %1,5-3,0 oranında Sasobit® ilavesinin viskoziteyi azaltarak karışımın işlenebilirliğinin arttığını ifade etmişlerdir. IKA Teknolojisi viskoziteyi azaltarak işlenebilirliği artırma yeteneği sayesinde sert iklim koşullarında da karışımın rahatça sıkıştırılabilmesine imkân sağlamaktadır (Transports du Québec, 2008/2009).

2.4.1.3. Ekonomik faydalar

IKA'nın ekonomik açıdan faydaları birçok faktöre bağlıdır. Bunlar; üretim sürecinde kullanılan enerji türü, asfalt plentinin bakım maliyeti ve gaz halindeki kirleticilerin türü vb gibi faktörlerdir (Abdullah vd., 2014).

Asfalt üretimi yaparken ekonomik fayda sağlamak adına dikkat edilmesi gereken ilk şey enerji tasarrufu sağlamaktır. Bu bağlamda sağlanan enerji tasarrufu asfalt üreticileri tarafından daha ekonomik ve kazançlı işlerin önünü açacağından arzu edilen bir husustur. Zira üretim aşamasındaki en büyük gider kalemlerinden biri sıcak karışım üretimi sırasında kullanılan enerji miktarıdır. IKA, daha düşük sıcaklıklarda işlem kolaylığı sağladığı için %20-40 oranlarında enerji tasarrufu sağlamaktadır (Abdullah vd., 2014). IKA, geleneksel BSK'ye kıyasla genellikle asfalt karışım sıcaklıklarını 15 °C ila 30 °C arasında düşürebilmektedir. Buda, yakıt maliyetlerini %20 ila %35 oranında azaltabilmektedir. Ancak, IKA uygulamaları için ekipman ve katkı maddeleri için ek maliyetler gerekli olabilmektedir (D'Angelo vd., 2008).

Her ne kadar ilk IKA üretimi sırasında kullanılması zorunlu olan katkı maddesi nedeniyle maliyet olarak ton başına yaklaşık 5\$ artsa da üretim ve sahaya uygulama sırasında IKA'nın sağladığı enerji tasarrufu sayesinde genel maliyeti düşürmektedir (McKenzie, 2006; Oberding, 2011). Şekil 2.8.'de BSK ve IKA karışımlarını maliyet açısından karşılaştıran bir grafik verilmiştir (Karakuzu vd., 2020).



Şekil 2.8. 2018 yılı asfalt karışımları maliyeti

IKA karışımında geri dönüştürülmüş asfalt kullanımına izin vermesi sebebiyle ekonomik açıdan başka bir avantaj sağlar (Zhang, 2010; Hurley ve Prowell, 2005). Mogawer vd., (2009) ile Mallick vd. (2008) geri dönüştürülmüş asfaltın karışımında kullanılma oranı ve bu orana bağlı olarak ek katkı maddesi kullanım oranı üzerinde

çalışmalar yapmışlardır. Mallick vd. (2008) yaptıkları çalışmada Sasobit® katkı maddesi ve geri dönüştürülmüş asfalt kullanarak IKA üretmişlerdir. Sonuç olarak; %1,5 Sasobit® ve %75 geri dönüştürülmüş asfalt kullanılarak geleneksel sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklarda asfalt üretiminin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan Mogawer vd., (2009) tarafından ise yapılan çalışmada Sasobit® katkı maddesi ve %0-50 arasında değişen oranlarda geri dönüştürülmüş asfalt kullanarak IKA üretimi yapılmıştır. Sonuç olarak, üretilen asfaltlarda %30 ve %50 geri dönüştürülmüş asfalt kullanılan numunelerde işlenebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir. Görüldüğü üzere yapılan her iki çalışmada da hem geri dönüştürülmüş asfalt kullanılması hem de işlenebilirliğin iyileştirilmesi sebebiyle IKA uygulamaları ile ekonomik anlamda avantajlı bir üretim ve yapılabilmektedir.

2.4.1.4. Üstyapı inşasında çalışanlar açısından faydalar

İş sağlığı ve güvenliği çalışma alanlarında üzerinde durulan en önemli konulardan biridir. IKA' da bu kapsamda çalışma ortamında sağladığı avantajlar sebebiyle kullanımı teşvik edilen bir teknolojidir. Yol üstyapı inşasında IKA kullanımı ile çalışanların sağlığı, yüksek sıcaklığa ve yüksek miktar miktarda zehirli gazı soluma oranında belirgin bir şekilde azalma sağlamak mümkündür. IKA'nın çalışanlar açısından faydalarını araştırmak adına Norveç'te 2011 yılında bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda IKA'nın BSK'ye oranla daha az duman ve koku salınımı yaptığı ortaya çıkmış belgelendirilmiştir (EAPA, 2014). Şekil 2.9.' da IKA ve BSK'nin sahaya uygulanması sırasında duman çıkışı farkı verilmiştir (Temel, 2016).



IKA uygulaması

BSK uygulaması

Şekil 2.9. IKA ve BSK uygulamalarından saha görüntüleri

2.4.2. IKA uygulamalarının dezavantajları

IKA'nın uygulanması ile ilgili bazı dezavantajlar da mevcuttur. Agregalar tam kurumadan karışıma ilave edilmesiyle var olan nem agrega ile bitüm arasında kopmalar meydana getirmektedir. IKA'larda neme karşı duyarlılık en önemli değerlendirme göstergelerinden bir tanesidir. Özellikle su tutma özelliğine sahip bir katkı maddesinin ya da bitüme doğrudan su enjeksiyonu yönteminin kullanıldığı yöntemlerde neme karşı duyarlılığın öncelikli olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. IKA'larda karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları BSK'lerden daha düşük olduğundan karışımda kullanılan agregaların yeterince kurutulması her zaman mümkün olmayabilmektedir (Kvasnak vd., 2009). Bu durumda, agrega içerisinde kalan nem, bitüm – agrega arasına girerek yapışman noktasın bağı zayıflatmakta veya oluşan bağı koparmakta veya aralarında bağ oluşumunu engellemektedir. Bu durum, düşük soyulma direnci problemi ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Bower vd., 2012). Şekil 2.10.'da Agrega ile bitüm arasındaki kopma ve soyulma önleyici katkı kullanılması ve kullanılmaması sonucunda ortaya çıkan soyulma direnci performansını gösteren resimler örneklendirilmiştir (Pavement interactive, Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022).



Şekil 2.10. Nem hasarı sebebiyle agrega-bitüm kopması ve soyulma performansı

Şekil 2.10.'da görüldüğü üzere, IKA ile üretilmiş kaplamalardan alınan numunelerde neme karşı duyarlılık oluşmuş soyulma meydana gelerek agrega kopmaları meydana gelmiştir. Bu problemin üstesinden gelmek için soyulma önleyici katkıları kullanılsa da farklı katkıların birbirileri ile olan uyumu veya uyumsuzluğu bitümün ve üretilen bitümle IKA'nın fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimler ile istenmeyen durumlar ortaya çıkarabilir. Bu nedenle, farklı bir katkının kullanımı sonrasında bitüm ve IKA'da meydana gelen değişimler çok boyutlu incelenmelidir (Akisetti, 2008).

Yapılan bazı çalışmalarda, IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda tekerlek izine karşı direncin, BSK'lere göre daha düşük olduğunu belirtilmektedir. Bunun nedeni olarak, IKA'ların BSK'lere göre daha düşük sıcaklıklarda uygulanması gösterilmektedir (Brower vd., 2012). Benzer olarak, Xiao vd., (2010) ise IKA katkıların tekerlek izi oluşumuna karşı BSK'lere göre önemli bir farklılık ya da iyileşme göstermediğini vurgulamıştır. Ancak, bu husus farklı çalışmalarda gözlenmemiştir. Örneğin; Hurley ve Prowell (2005) çalışmaların farklı IKA katkıları ile yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, asfalt kaplama analizi deneyi ile tekerlek izi derinliklerini ölçmüşlerdir. Farklı agrega çeşitleri (kalker ve granit) ve bitüm kullanarak yapılan çalışmalarda numuneler, farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, Aspha-Min® ile hazırlanan bitüm örneklerinde tekerlek izi oluşumuna etkisinin az olduğu, Sasobit® ve Evotherm® RT ile hazırlanan bitümlü karışım örneklerinde ise derinliğin azaldığı yani tekerlek izine karşı direnci iyileştiği belirlenmiştir. Bu durumun nedeni kullanılan katkı, bitüm ve agrega türüne ve bitüm ile katkının birbirleri ve agrega ile uyumu ile ilişkilendirilmiştir.

IKA yeni bir teknoloji olması sebebiyle uzun dönem performansı hakkında bilgi yetersizliği olması ve IKA üretiminde kullanılan kimyasalların çevreye etkisinin bilinmemesi IKA'nın diğer dezavantajlarıdır (Köse, 2015). Ayrıca ek katkı maddesi kullanımı ile oluşan ekstra bir maliyette göz ardı edilmemesi gereken bir husustur.

2.5. Dünya'da IKA Uygulamaları

Ülkemiz ve bazı Avrupa ülkeleri ile Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülmüş IKA uygulamaları bu bölümde özetlenmiştir.

IKA üretiminde köpüklendirme tekniği kullanan bir Avrupa ülkesi olan Danimarka'da, IKA'nın üretim ve uygulamada sırasında işlenme sıcaklığını düşüş sağladığını ortaya koymak amacıyla 2012 yılında IKA katkıları ile modifiye edilen bitüm kullanılarak taş mastik asfalt üretilmiştir. Bu çalışmada, üretim ve uygulama sıcaklığında yaklaşık 20 °C' lik düşüş sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan donanımların tümünün BSK için kullanılanlar ile aynı olduğu vurgulanmıştır. Ancak, viskozitenin düşmesinden kaynaklı olarak IKA'nın sertleşme sürecinin geleneksel asfalttan biraz daha fazla zaman aldığı ve sertleşme oranının da BSK'ninkine oranla daha düşük

kaldığı belirtilmiştir (EAPA, 2016). Danimarka’da yapılan uygulamaya dair sahadan bir görsel Şekil 2.11.’ de verilmiştir (Teknologisk, Ziyaret Tarihi: 07 Haziran 2022).



Şekil 2.11. Danimarka’da IKA uygulaması

Danimarka gibi IKA üretiminde köpüklendirme tekniği kullanan bir diğer Avrupa ülkesi ise İsveç’te üretimde çoğunlukla köpüklendirme yöntemi yanı sıra katkılar yerine Karl – Gumar Olsson (KGO) yöntemi kullanılmaktadır. KGO yönteminde iri agreganın bitümle kaplanmasından sonra filler, ince agrega ve kumun sonradan karışıma dâhil edilmesiyle karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır. İsveç’ te 2013 yılında 145 bin ton IKA üretilmiştir (EAPA, 2016).

IKA üretiminde genel olarak köpüklendirme tekniğini kullanan diğer ülke ise Çekya’dır. Prag’da Çek Teknik Üniversitesinde ve Brno Teknik Üniversitesindeki araştırmalar neticesinde Çek Ulaştırma Bakanlığı yardımıyla (2012) IKA konusunda ulusal tabanlı taslak bir şartname yayınlanmıştır. Bu taslak şartname, yalnızca düşük sıcaklıklarda mastik asfalt imalatı için geçerli olduğu vurgulanmaktadır. Fakat IKA tekniği yaygın olarak sıkıştırılmış asfalt tabakalarında kullanılmıştır (EAPA, 2016). Çekya’daki IKA uygulamaları 2013 yılında düzenlenmiş olan HAPA konferansında katılımcılara aktarılmıştır (Fiedler vd., 2013). 2013 yılında Prag’da oldukça önemli bir tünelin yol inşası için tasarımı Çek Teknik üniversitesiyle ortak hazırlanan IKA kullanılmıştır. Köpük tekniğiyle uygulanan IKA üretiminde sıcaklık yaklaşık 130°C’ye kadar düşürüldüğü ifade edilmiştir (EAPA, 2016).

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ‘de enerji verimliliği sağlaması noktasında sağladığı büyük yarar ile IKA kullanımına yönelim, Avrupa’ya göre oldukça hızlı bir

şekilde artmaktadır. ABD 'de diğer Avrupa ülkelerinde olduğu gibi IKA üretiminde çoğunlukla köpüklendirme yöntemi kullanılmaktadır. ABD 'de, IKA uygulamalarının büyük çoğunluğunu köpüklendirme tekniği (%90,2) ile %9,6 kısmını ise kimyasal katkı kullanımı ile ve kalan %0,2'lik kısmını da organik katkı kullanımı ile yapmaktadır ABD'nin birçok eyaletinde (özellikle California ve Florida'da) IKA ile saha uygulamaları yapılmıştır (EAPA, 2014). Şekil 2.12.'de ABD'de State Route- Spring Mills, PA yakınlarında 2012'de bir IKA Uygulaması sırasında çekilen bir fotoğrafa yer verilmiştir (FHWA, 2010).



Şekil 2.12. State Route- Spring Mills, PA yakınlarında 2012'de bir IKA uygulaması

Almanya'da da IKA kullanımı görülmekte ve bu alanda önemli çalışmalar yürütülmektedir. Almanya'da özellikle Köln ve Frankfurt'ta birçok saha uygulaması yapılmıştır. Köln ve Frankfurt arasındaki bir otoyolda yapılan çalışma kapsamında 1998-2001 yılları arasında IKA katkılarından olan Sübit, Asphaltan-B, Aspha-min ve Sasobit® kullanılarak 7 (yedi) farklı deneme kesimi olarak inşa edilmiştir. Çalışma sonucunda BSK ile karşılaştırılan IKA'ların tekerlek izi ve yaşlanma bakımından BSK'ye eşdeğer veya daha iyi performans (Sadece Sübit düşük çıkmıştır) sergilediği belirtilmiştir (Harnischfeger, 2007; BAST, 2007). Köln ve Frankfurt IKA deneme kesimlerine dair çekilen bir fotoğrafa Şekil 2.13.'te yer verilmiştir (International Technology Scanning Program, 2008).



Şekil 2.13. Köln ve Frankfurt IKA deneme kesimleri

Kentsel alanlarda, yoğun trafiği olan yollarda BSK tercih edilen İzlanda'da, 2004 yılında İzlanda' da IKA teknolojisi ile 13,000 km yeni karayolu esnek kaplaması inşa edilmiştir. İzlanda'da halen sonuçlandırılmayan Yol İdaresi Araştırma Fonu tarafından desteklenen laboratuvar çalışması kapsamında asfalt üretim sıcaklığının düşürülmesi adına İzlanda' da dört IKA karışımı ve iki agrega türü üzerinde yürütülmektedir. Araştırma kapsamında kullanılan karışımlar BSK, aspha-min zeolitli karışım, sıyırmayı önleyici Sasobit®, bal mumlu karışım, aspha-min zeolit karışım olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada tüm karışımlar 115 ile 140 °C arasında üretilmiştir. Sonuçlarda Sasobit® ile üretilen karışımın aspha-min zeolitli karışımından yüzde hava boşluğu, denge, nem hassasiyeti ve deformasyon bakımından daha avantajlı olduğu ifade edilmiş, 115 °C' deki Sasobit® ile üretilen karışım ile 140 °C' deki BSK'nin benzer performans sergiledikleri görülmüştür (Arason, 2004; Johannesson vd., 2005).

Diğer ülkelerden farklı olarak IKA üretiminde geri dönüştürülmüş asfalt kullanmakta olan Fransa'dır. Çevresel faydalar sağlayan IKA'nın kullanımını öneren ülkelerden biri de Fransa'da IKA kullanımının çevresel etkilerini ortaya koyan araştırmışlara daha geniş yer verilmiştir. Sıcaklık düşüşü sağlayan tüm teknolojileri destekleyen ve kullanan Fransa'da yapılan çalışmalarda kullanılan tüm yöntemlerin istenilen şartları sağladığı sonucuna varılmıştır. IKA kullanımı günden güne hızla artış gösteren Fransa'da, 2012'de toplam üretimin ve imalatın %7,5'ini IKA'lar oluşturmaktadır. Eure-et-Loir Dairesi Paris'in güneybatısında Asphamin zeolit katkısı ile deneme yapmıştır. 2007 yılında 40 km'lik bir yol boyunca yapılmıştır devam eden deneme çalışmada, IKA katkılarının çevresel faydaları artırdığını, işçinin zehirli

gazlardan daha az etkilendiğini aynı zamanda, IKA'nın uzun mesafelere taşımada ve kaplama sezonunda uzamasına olumlu etki ettiği vurgulanmıştır (Sauterey, 2007). Paris'te şehrin asfaltlama projelerinden çıkan dumanlar ve kokulardan duyulan endişeleri gidermek amacıyla IKA ile yol esnek kaplamalarının inşaatı yapılmıştır. Bu minvalde inşa edilen deneme kesimlerinde yapılan karışımlar mastik asfaltla ile IKA'dır. 3 yıl boyunca süren bir proje kapsamında, Paris'te 2004 yılında aynı anda 6 IKA deneme kesimleri test edilmiştir (Leroy, 2007). Fransa'da yapılan uygulamalarında alınmış saha fotoğraflarında biri Şekil 2.14.'te paylaşılmıştır (Ladepeche, Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022).



Şekil 2.14. Fransa IKA uygulaması

IKA uygulamalarının çevre ve insan sağlığı açısından etkilerini araştıran bir başka ülke ise Norveç'tir. IKA üretim teknikleri kullanarak 11 deneme kesimi inşa ettiği 2011 yılında yapılan projede üstyapı yol inşasında çalışanların sağlığı ve çalışma ortamı ve koşulları incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler ve ölçümler neticesinde asfalt üretim sıcaklığının 30 °C kadar düşüşü ile emisyon gazı salınımının ise yaklaşık %50 oranında indirildiği belirlenen çalışmada, Norveç asfalt endüstrisi tarafından IKA kullanımını teşvik edilmiştir. Norveç'te IKA teknolojisi araştırma ekibinin saha çalışması sırasında çekilen fotoğraflarından biri Şekil 2.15.'te verilmiştir (Berntsen, 2007).



Şekil 2.15. Norveç'te IKA teknolojisi araştırma ekibi

Türkiye'de karayolu teknik şartnamesi, benzer performansı göstermesi şartıyla IKA tekniğinin uygulanmasına izin vermektedir. Henüz saha uygulamaları oldukça sınırlı düzeyde kalsa da üniversitelerin ulaştırma anabilim dallarındaki akademisyenler tarafından IKA katkıları ve köpük bitüm üzerinde araştırma çalışmaları yapılmaktadır. İstanbul'da şehir içi bir yol kesiminde, zeolit kullanılarak bir deneme kesimi inşa edilmiştir Benzer şekilde, Ankara çevreyolunda da bir IKA saha denemesi yapılmıştır (EAPA, 2016). Sonuçlar, IKA ile inşa edilen deneme kesiminin performansını BSK'nin performansına benzer olduğunu göstermiştir. Ankara çevreyolunda yapılan IKA uygulamalarına ait inşaatı sırasında alınan bir görsel Şekil 2.16.'da paylaşılmıştır (TÜBİTAK, 2022)



Şekil 2.16. Ankara çevreyolu IKA denemesi

2.6. IKA Uygulamaları Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Tezin bu bölümünde, ulusal ve uluslararası ölçekte IKA odaklı çalışmalar genişçe araştırılmış, araştırmaların bir kısmı kronolojik bir sıra düzeni takip edilerek kısaca özetlenmiştir.

Oylumluoğlu (2012), IKA üretiminde geri dönüştürülmüş asfaltın kullanımı ile ilgili bir araştırma yapmıştır. IKA katkısı olarak %2 Rediset, %3 Sasobit® ve %0,25 Advera kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalt kullanılarak üretilen IKA'ların mekanik özellikleri belirlemek için Marshall stabilite ve dolaylı çekme deneyleri kullanılan çalışmada deneysel sonuçlara göre IKA teknoloji ile geri dönüştürülmüş asfaltların yeniden efektif olarak değerlendirilebileceği görülmüştür.

Chamoun (2013) tarafından IKA katkılarının polimer ve kauçuk ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcılar ile kullanılabilmesi araştırılmıştır. Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında Sasobit® ve Advera IKA katkı maddeleri; ikinci aşamasında ise Evotherm IKA katkı maddesi kullanılmıştır. Çalışmada Sasobit®, Evotherm ve Advera katkı maddelerinin kullanım amacı karışımın kalıcı deformasyon ve yorulma çatlaklarına karşı direncine olan etkilerini ortaya çıkarmak olmuştur. Çalışmada elde edilen verilerin sonucuna göre, Sasobit® katkı maddesi kullanılan IKA'ların yorulma çatlaklarına karşı Advera katkı maddesi kullanılan karışımlarından daha yüksek tespit edilmiştir. Sasobit® ve Evotherm katkılı ılık karışımların, sıcak karışımlara eşdeğer performans gösterdiği ve Advera katkılı ılık karışımların performansının, sıcak karışımlara göre daha düşük olduğu ortaya koyulmuştur.

Abdullah vd. (2014), üstyapı inşasında IKA teknolojisinin uygulaması sırasında karışımdaki katkı maddelerinin kullanımından kaynaklı karşılaşılabilecek avantajları ve dezavantajları araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, IKA teknolojisinin tüm karışım gradasyonuna uygun olduğu belirtilmiştir ve yeni inşaat ya da mevcut tabakaların bakım ve onarımında IKA tekniklerinin uygulanabilirliği görülmüştür. Böylelikle sürdürülebilir bir üstyapı oluşumu için IKA kullanımının önemli katkılar sunacağı belirtilmiştir.

Dokandari vd. (2014) çalışmasında, Fischer – Tropsch parafin mumu isimli organik IKA katkı maddesi kullanımının, bitümlü karışımların yaşlanma özelliklerine

etkilerini incelemişlerdir. Hazırlanan IKA ve kontrol karışımları, kısa ve uzun dönem yaşlanma sürecine maruz bırakılmıştır. Yaşlandırılmış numunelerin performansları dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile analiz edilen çalışmada organik katkı içeren IKA karışımların yaşlanmaya karşı BSK'den daha üstün dayanım ortaya koyduğu belirtilmiştir.

Kim vd. (2014) 'nin yaptığı çalışmada, lastik kırıntısı ve iki farklı ılık karışım asfalt katkı maddesi (LEADCAP ve Sasobit®) içeren bağlayıcıların farklı sıcaklıklarda reolojik özellikleri araştırılmışlardır. Çalışmada SuperPAVE bağlayıcı testleri yapılmıştır. Yapılan araştırmanın sonucunda lastik kırıntısı kullanımının tekerlek izi ve çatlama özelliklerine olumlu yönde etkilediği ve LEADCAP katkı maddesinin kullanımının termal çatlama direncini artırdığı ortaya konulmuştur. Lastik kırıntısı kullanılarak modifiye edilmiş asfaltın kullanıldığı diğer bir çalışmada Yu vd. (2014) Evotherm-DAT IKA katkısının bu modifiye bitüm özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada standart reolojik testler uygulanmıştır. Evotherm-DAT, CRMA'ya dört oranda eklenmiştir: %0, 8, 10 ve %12. Sonuç olarak, iki malzeme arasında karmaşık bir kimyasal etkileşimin olmadığı gözlenmekle beraber Evotherm-DAT katkısının, lastik kırıntısı ile modifiye asfaltın moleküller arası kuvvetini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Köse (2015), IKA'nın buz çözücü kimyasal olarak kullanılan NaCl'ye karşı dayanımını araştırmıştır. NaCl çözeltisinin konsantrasyonları %0.8, %1.6, %2.1, %6.5 ve %10.4 olarak seçilmiştir. Numunelere Marshall stabilite testi uygulanmış, Marshall stabilitesi ve akma değerleri ölçülmüştür. Ayrıca numunelerin ultra ses hız ölçümleri de yapılmıştır. Elde edilen verilerin sonucuna göre, ılık karışımların buz çözücü kimyasal çözeltiye karşı direncinin, sıcak karışımlara kıyasla daha fazla olduğunu anlaşılmıştır.

Kaya ve Topal (2016) yaptığı çalışmada Marshall ve SuperPAVE karışım tasarımı yöntemlerine göre IKA üretmek için Sasobit®, Rediset ve Advera ve doğal zeolit olmak üzere dört farklı IKA katkı maddesi kullanılmıştır. Marshall and SuperPAVE Mix Design tasarım yöntemlerine göre elde edilen numunelerin VMA (mineral agregalar arası boşluk oranı), VFA (bitüm ile dolu boşluk oranı) ve boşluk oranları tespit edilerek optimum bitüm oranları belirlenmiş ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, her iki tasarım yöntemine göre de bitümlü

sıcak karışımlara kıyasla farklı katkıları ile üretilen IKA'ların optimum bitüm miktarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma neticesinde BSK'lere göre benzer veya yakın mekanik özellikler gösteren IKA'lar daha düşük bitüm oranı ile üretilmesi ile önemli miktarlarda ekonomik kazanç sağlanacağı sonucuna varılabilir.

Singh ve Kataware (2016) yaptığı çalışmalarında farklı reolojik parametreleri değerlendirerek çeşitli IKA katkıları içeren SBS kopolimerle modifiye edilmiş bağlayıcıların tekerlek izi dirençleri araştırmışlardır. Kısa dönem yaşlanma testi yapılarak tekerlek izi direncine etkisi hesaplanmıştır. Çalışma neticesinde, polimer modifiye bağlayıcının tekerlek izi direncinin, Rediset katkı maddesi ile azalırken Sasobit® ve Advera katkı maddeleri ile arttığı belirlenmiştir.

Mansourian vd. (2016) çalışmasında, jüt lifleri ile güçlendirilmesi yapılmış IKA'nın, düşük sıcaklık performansını Kırılma Testi yaparak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, jüt liflerinin kullanımının IKA'nın kırılma direncini artırdığı ve kesme yükünün artmasıyla birlikte modifiye edilmiş IKA'ların kırılma direncinin önce azaldığı, sonra arttığı da ortaya çıkarılmıştır.

Cucalon vd. (2016) çalışmalarında IKA'nın nem hassasiyetine karşı direncini soyulma önleyici katkı maddesi içeren/içermeyen, geri dönüştürülmüş asfalt içeren/içermeyen şeklinde hazırlanan numuneler üzerinde incelemiştir. Bu çalışmada deneysel olarak Hamburg tekerlek izi testi ve dolaylı çekme mukavemeti testi yapılmıştır. Sonuçta, BSK'ler ile karşılaştırıldığında, IKA'ların neme karşı daha hassas olduğu belirlenmiştir. Geri dönüştürülmüş asfalt ilavesinin herhangi bir etki göstermediği belirtilmiştir. Fakat soyulma önleyici katkı maddelerinin kullanımı IKA'yı nem hasarına karşı direnç ve yaşlanma açısından iyileştirmiştir.

Mazumder vd. (2016) yaptıkları çalışmada, Sasobit® ve LEADCAP IKA katkı maddelerinin kullanımının, bitümün reolojik özellikleri üzerine etkilerini ortaya koymuştur. Deneysel olarak RTFOT, PAV, DSR, RV ve BBR testleri yapılmıştır. Sonuç olarak; her iki IKA katkı maddelerinin bitümlü bağlayıcılarda benzer oranda viskozite düşüşü oluşturduğu gözlemlenen çalışmada IKA numunelerinin tekerlek izine dirençlerinde artış belirlenmiştir. Ancak, IKA katkıları ile modifiye edilerek üretilen numunelerin ile saf bitümün termal çatlaklara karşı dirençlerinde belirgin bir farklılık

tespit edilmemiştir. Sasobit®'li karışımların yorulma çatlaklarına karşı daha az dirençli olduğu gözlemlenmiştir. LEADCAP'ın yorulma ve düşük sıcaklıktaki çatlamalara karşı direnç açısından Sasobit®'ten daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, tekerlek izi direnci için Sasobit®, LEADCAP'tan daha iyi performans göstermiştir.

Abdullah vd. (2016) yaptığı çalışmada belirli oranlarda %1-3 IKA katkı maddesi ve %4 nanokil kullanarak modifiye edilmiş bitüm elde etmiştir ve bu karışımların yüksek sıcaklık performanslarını incelemiştir. Bu çalışmada deneysel olarak dolaylı çekme esneklik modülü testi, dolaylı çekme yorulma testi, dinamik sürünme testi, Tekerlek İzi Testi ve Nem Hassasiyeti Direnci Testi yapılmıştır. Sonuç olarak, IKA ile yapılmış karışımların nem hasarına, kalıcı deformasyona ve tekerlek izine karşı dirençlerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca tüm karışımların istenilen kriterleri sağladığı görülmüştür.

Fakhri ve Hosseini (2017) geri dönüştürülmüş asfalt ve cam elyaf içeren IKA'ların tekerlek izi direnci, nem hassasiyeti ve kısa dönem yaşlanma özellikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada malzeme olarak kireçtaşı, %0-50 arasında geri dönüştürülmüş asfalt ve karışımın kütlegece %0,3 oranında cam elyaf kullanılmıştır. Çalışmada deneysel olarak tekerlek izi direnci testi ve nem hassasiyeti direnci testi yapılmıştır. Çalışma sonucunda cam elyaf ile yapılan IKA'ların daha uzun nihai yükleme döngüleri sağladığını; fakat bu numuneleri nem hasarı direncine etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak, geri dönüştürülmüş asfalt ve cam elyaf birlikte kullanımı ile hem tekerlek izine hem de nem hassasiyetine karşı direnç belirgin artış belirlenmiştir.

Alataş vd. (2017) araştırmasında, SBS ve iki farklı ılık karışım katkı maddesine ek olarak sönmüş kirecin ılık karışımlarda filler olarak kullanımını araştırmıştır. Bu çalışmada katkı maddesi olarak Leadcap, Pawma-1 ve SBS kullanılmıştır. Çalışmada deneysel olarak Dönel Viskozimetre Testi ve Nem Hasarı Direnci Testi yapılmıştır. Sonuç olarak, sönmüş kirecin ve SBS modifiyeli bitümlerin birlikte kullanıldığı karışımlar en iyi sonuçları ortaya koymuştur.

Görkem (2018) yaptığı çalışmada, doğal bir zeolit olan klinoptilolit maddesinin IKA katkısı olarak kullanımını incelemiştir. Bu kapsamda geleneksel bitüm deneyleri

yapılmıştır ve bu verilerle penetrasyon indexi hesaplanmıştır ayrıca Marshall tasarımı da yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, klinoptilolit in IKA katkı maddesi olarak kullanımı sayesinde karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında yaklaşık 9 °C'lik azalma oluşmuştur. Ayrıca IKA katkı maddesinin kullanımı ile optimum bitüm içeriği azalmış ve numunelerin akma değerlerinde ve dayanımlarında artma meydana gelmiştir.

Ziari vd. (2019) ortaya koyduğu çalışmada, IKA katkı maddesi (%2 Sasobit® ile modifiye edilmiş bağlayıcıya ek olarak farklı oranlarda (%10-20-30-40) bakır cürufu eklenmesiyle, Marshall yöntemine göre üretilen IKA numunelerinin çatlama performansını ve kalıcı deformasyon özelliklerini incelemişlerdir. Karışımda agrega olarak kireçtaşı, bağlayıcı olarak 60/70 bitüm kullanılmıştır. Deneysel olarak tekerlek izi direnci, TSR testi ve esneklik modülü testi yapılmıştır. Sonuç olarak; karışımda kullanılan bakır cürufu miktarı artış gösterdikçe optimum bitüm içeriğinde artış olduğu görülen çalışmada Marshall stabilitesi, tekerlek izine ve çatlaklara karşı dayanım, esneklik modülü gibi özelliklere en uygun bakır cürufu oranı %20 olarak belirtilmiştir.

Valdes vd. (2020) yaptığı çalışmada, IKA ve geri dönüştürülmüş asfaltın performans özelliklerinin (sertlik modülü, suya duyarlılık, kalıcı deformasyon, çatlama direnci ve yorulma davranışı) değerlendirmesini yapmıştır. Bu kapsamda IKA ve geri dönüştürülmüş asfaltın mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. IKA'lar üretirken katkı doğal zeolit kullanılmıştır. Sonuç olarak, doğal zeolit kullanımı karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında düşüş sağladığı görülmüş IKA ve geri dönüştürülmüş asfaltın bir arada kullanılmasıyla daha iyi bir performans belirlenmiştir.

Cheraghian vd. (2020) çalışmasında IKA teknolojisi üzerine güncel bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada IKA'nın çevresel, ekonomik ve üretim açısından faydalarını incelemiştir. Çalışmada yöntem ve metot olarak literatür taraması kullanılmıştır ve birçok çalışma incelenmiştir. Sonuç olarak, IKA'nın çevresel, üretim açısından ve ekonomik faydaları olduğunu belirtmiş. Ayrıca mekanik özellik bakımından BSK'ye eşdeğer performans gösteren IKA'nın enerji tasarrufunun yanı sıra emisyon gazlarında azalma sağladığını belirtmiştir. Son olarak IKA teknolojisinin geri dönüştürülmüş asfalt ile kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Liu vd. (2020) yaptıkları çalışmada, köpüklendirme yöntemi ile yapılan IKA'ların ve geri dönüştürülmüş asfalt kaplamaların performansları incelemişlerdir. Köpüklü asfalt, yaygın bir kapalı köpük makinesi ve ağırlıkça %1,5 su kullanılarak üretilmiştir. Agregada olarak ise iri bazalt agregaları, kireçtaşı bazlı ince agregalar ve mineral dolgu kullanmıştır. Deneyisel olarak Penetrasyon Testi, Yumuşama Testi, Viskozimetre Testi, Dinamik Kesme Reometresi, Tekerlek İzi Direnci Testi ve Kiriş Eğme Reometresi deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, köpüklendirme yöntemi ile yapılan karışımda geri dönüştürülmüş asfalt oranı %30 'u geçmediği sürece gerekli performansları gösterdiği belirtilmiştir.

Zhao. vd. (2021) yaptığı çalışmada, İmidazolin (IMDL)'nin IKA katkı maddesi olarak kullanımını incelemiştir. IMDL hazırlamak için palmitik asit, tetraetilenpentamin, ksilen ve aseton kullanmıştır. Bu karışıma Penetrasyon Testi, Yumuşama Noktası Testi, Viskozimetre Testi ve Yüksek ve Düşük Sıcaklık Performansı Testi yapılmıştır. Asfalt karışımı için kireçtaşı agregasını kullanmıştır. Sonuç olarak, IMDL karıştırma sıcaklıklarını düşürürken, fiziksel özelliklerde pek bir değişim meydana getirmemiştir.

Karakuzu vd. (2021) IKA'nın maliyeti üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada literatür bilgisine yer verildikten sonra BSK'nin çeşitli yıllardaki maliyeti hesaplanarak farklı IKA üretim yöntemleriyle karşılaştırılmış, ayrıca IKA kullanımının çevreye etkisi değerlendirilmiştir. Bunun yanında, asfalt karışımlarının maliyetini belirleyen en önemli faktör olan bitüm maliyetinin toplam asfalt karışımı maliyetine etkisi incelenerek BSK veya IKA seçimi için en uygun bitüm maliyeti/toplam maliyet oranı elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre, IKA maliyet faydasının yanı sıra çevresel açıdan da faydaları olduğu ortaya konulmuştur. IKA'nın BSK'ye göre yaklaşık olarak %3 daha az maliyetli olduğu saptanmıştır.

Gökarp (2021) yaptığı çalışmada, IKA katkı maddesi ile modifiye edilmiş bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu kapsamda IKA katkısı olarak Sasobit® adlı maddeyi ve 50/70 bitüm kullanmıştır. Bu çalışmada deneyisel olarak Penetrasyon Testi, Yumuşama Noktası Testi, Viskozite testi, Parlama Noktası Testi ve Reolojik Testler (DSR, RTFO ve PAV) deneyleri yapılmıştır. Sonuç

olarak, Sasobit® kullanılarak modifiye edilmiş bitümün parlama noktası hariç önemli değişiklikler meydana geldiğini belirtmiştir.

Sukhija M. vd. (2022) yaptığı çalışmada, IKA karışımlarının üretim sıcaklıklarına etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada asfalt karışımlarının hazırlanmasında silisli agregalar (granit) kullanılmıştır. Bu çalışmada temel asfalt bağlayıcı olarak viskozite dereceli (VG) bir asfalt bağlayıcı olan VG30 kullanılmıştır. Ve bunlara ek olarak bazı IKA katkı maddeleri (Sasobit® redux, Aspha-min, LQ1102CE, Cecabase) kullanılmıştır. Deneysel olarak Dönel Viskozimetre Testi ve Dinamik Kesme Reometresi deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, IKA'nın üretim sıcaklıklarını düşürdüğü ve işlenebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir.

Maciejewski K. vd. (2022) yaptıkları çalışmada, su ile köpüklendirme yöntemi ve sıvı katkı maddesi kullanımı ile üretilen karışımların kısa dönem yaşlanmasını incelemiştir. Bu çalışmada malzeme olarak 35/50 ve 50/70 bitüm, katkı maddesi olarak rediset kullanılmıştır. Deneysel olarak Penetrasyon Testi, Yumuşama Noktası Testi, Dönel Viskozimetre Testi, Dinamik Kayma Reometresi ve RTFOT deneyleri yapılmıştır. 2 yöntemde de viskozite azalması görülmüştür. Ayrıca kısa dönem yaşlanmaya karşı direnç artış göstermiştir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık performansları iyileştirme gösterdiği belirtilmiştir.

Bu bölümde verilen çalışma özetlerinde görüldüğü üzere, IKA katkıları ile hazırlanan bitümlü karışımlarda bağlayıcıların fiziksel, reolojik ve karışımların mekanik özelliklerinin BSK'lerinkine nazaran daha yüksek, daha düşük veya eşdeğer seviyede kaldığı görülmektedir. Bu farklılıkların oluşmasında, aşağıdaki faktörler etkili olabileceği ifade edilmiştir (Brower vd. 2012; Hurley ve Prowell, 2005). (1) IKA'ların BSK'lere göre daha düşük sıcaklıklarda uygulanması, (2) Yüzey sıcaklıklarında karşı daha hassas olmaları, farklı çalışma koşullarının, (3) Uygulama esaslarının, (4) Malzeme ve teçhizatın, (5) Tecrübeli personel ile uygulamanın yapılıp yapılmadığı ve (6) Kullanılan farklı bitümlü bağlayıcının, katkının ve agrega türü ile gradasyonudur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, çalışma kapsamında kullanılan deney ve analizlere ait takip edilen uygulama esasları standartları çerçevesinde özetlenmiştir.

3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan 70/100 penetrasyona sahip orijinal bitümün temel mühendislik özellikleri, KGM 5. Bölge Müdürlüğü ARGE Başmühendisliğine gönderilen bitüm numunesine yapılan testler neticesinde belirlenmiş ve ilgili birimce Çizelge 3.1.'deki gibi rapor edilmiştir.

Çizelge 3.1. Bitümün temel mühendislik özellikleri

Sıra	Test yöntemi	Birim	Test Standart	Sonuç	Minimum Kriterler
1	Penetrasyon	dmm	TS EN 1426	85,7	$\geq 70; \leq 100$
2	Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	52,5	≥ 45
3	Parlama Noktası	°C	TS EN 22592-b	240,0	≥ 230
4	Düktilite (25 °C)	cm	TS EN 13589	103,8	-
5	Viskozite (135 °C)	cP	ASTM D4402	405,6	-
	Viskozite (165 °C)	cP		112,3	-
6	Çözünürlük	%	EN 12592	99,4	99
7	Penetrasyon İndeksi	-	-	0,85	-
8	Özgül Ağırlık	(g/cm ³)	TS 1087	1,032	1-1,1

Bu çalışmada kullanılan Sasobit® katkısı üretici ve dağıtıcı firma olan TEKNOMET Mühendislik Temsilcilik ve Ticaret Ltd. Şti. tarafından çalışmada kullanılmak üzere hibe edilmiştir. Sasobit®'in fiziksel özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir (Wang vd., 2016).

Çizelge 3.2. Sasobit® katkısının fiziksel özellikleri

Sıra	Özelliği	Birim	Sonuç
1	Erime Noktası	°C	85,7
2	Parlama Noktası	°C	52,5
3	Viskozite (135 °C)	cP	12
4	Özgül Ağırlık	(g/cm ³)	0,94

Tez kapsamında, elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3.'te her bir numune ve yaşlanma formu için tanımlanan kodlama sistemi ile kullanılarak verilmiştir.

Çizelge 3.3. Modifiye bitüm kodlama sistemi

Numune İçeriği	Numune Kodu
Orijinal Bitüm	OB
Kısa Dönem Yaşlanmış Orijinal Bitüm	KOB
Uzun Dönem Yaşlanmış Orijinal Bitüm	UOB
Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	SMB-1
Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	SMB-2
Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	SMB-3
Kısa Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	KSMB-1
Kısa Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	KSMB-2
Kısa Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	KSMB-3
Uzun Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	USMB-1
Uzun Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	USMB-2
Uzun Dönem Yaşlanmış Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	USMB-3
Ilık Çam Sakızı Ağdası Modifiye Bitüm	ÇMB
Kısa Dönem Yaşlanmış IÇSA Modifiye Bitüm	KÇMB
Uzun Dönem Yaşlanmış IÇSA Modifiye Bitüm	UÇMB
Çam Sakızı Ağdalı Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	ÇSMB-1
Çam Sakızı Ağdalı Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	ÇSMB-2
Çam Sakızı Ağdalı Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	ÇSMB-3
Kısa Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	KÇSMB-1
Kısa Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	KÇSMB-2
Kısa Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	KÇSMB-3
Uzun Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%1 oran için)	UÇSMB-1
Uzun Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%2 oran için)	UÇSMB-2
Uzun Dönem Yaşlanmış IÇSA Sasobit® Modifiye Bitüm (%3 oran için)	UÇSMB-3

Diğer katkı olan IÇSA ise ticari firmadan satın alınmıştır. Numunelere ait temsili görseller Şekil 3.1.'de verilmiştir (Alibaba, Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2022; Şahin, 2019; Trendyol, Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2022; Primal Survivor, Ziyaret Tarihi: 27 Temmuz 2022).



Şekil 3.1. Tez kapsamında kullanılan malzemeler

Marshall yöntemi ile TMA binder tabakası numuneleri üretilmesinde kullanılan bazaltın fiziksel ve mekanik özellikleri, Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma laboratuvarında ve KGM 9. Bölge Müdürlüğü, AR-GE Başmühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Bazalt agregasını ait özellikler ve TMA binder tabakası için istenen agrega özellikleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bazalt agregasının özellikleri

Deneyler	Birim	Standart	Sonuç	KTŞ-Kriterler
Su Emme (Kaba)	g/cm ³	TS EN 1097-6	2,22	≤2
Su Emme (İnce)	g/cm ³	TS EN 1097-6	8,79	≤2
Özgül Ağırlık (Kaba)	g/cm ³	TS EN 1097-6	2,63	-
Özgül Ağırlık (İnce)	g/cm ³	TS EN 1097-6	3,08	-
Özgül Ağırlık (Filler)	g/cm ³	TS EN 1097-7	2,72	-
LA Aşınma Direnci Testi	%	TS EN 1097-2	18,95	≤25
Hava Tesirleri Dayanımı Testi	%	TS EN 1367-1	8,15	≤14
Micro-Deval Testi	%	TS EN 1097-1	9,94	≤20
Cilalanma Direnci Testi	PSV	TS EN 1097-8	56,79	≥40
Yassılık İndeksi Testi	%	TS EN 933-3	11,92	≤20
Metilen Mavis Testi	MB	TS EN 933-9	1,75	≤3
Soyulma Direnci Testi*	%	TS EN 12697-11	40-45	%60

* TMA binder için değil sathi kaplama için tanımlanan test yöntemidir.

TMA binder tabakasında kullanılan bazaltın KTŞ standardında Çizelge 3.4.'teki gibi tanımlanan kriterleri su emme ve soyulma mukavemeti hariç sağladığı görülmektedir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Geleneksel bitümlü bağlayıcı testleri

Bu başlık altında bu tez çalışmasında karışımında kullanılacak olan 70/100 orijinal bitüm ve IKA katkıları ile modifiye edilmiş bitümün temel bazı mühendislik özelliklerini belirlemek adına yapılan geleneksel test yöntemleri tanımlanmıştır.

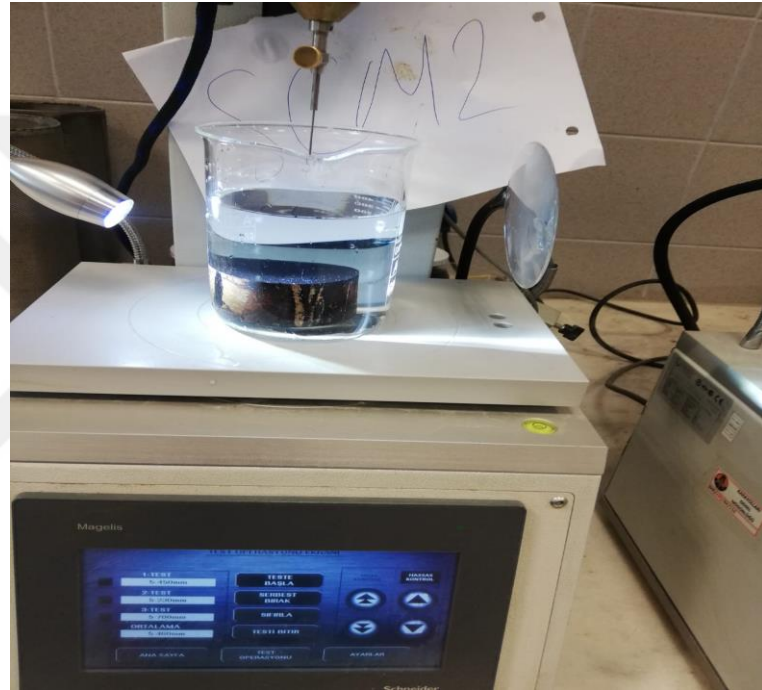
3.2.1.1. Penetrasyon testi

Bitümün oda koşullarında kıvamını belirlemek adına yapılan deneydir. Bu test sistemi; penetrasyon cihazı, deney numunesi kabı, su banyosu, transfer kabı ve termometreden oluşmaktadır. Tez kapsamında hazırlanan deney numunelerine uygulanan test TS EN 1426 numaralı standardına uygun yapılmıştır. Penetrasyon deneyinin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki gibidir (TS EN 1426, 2015; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- (1) Deney numunesi belirlenen yumuşama noktasının 100 °C üzerinde bir sıcaklıkla ısıtılarak akıcı hale gelmesi sağlanır,
- (2) Akıcı hale gelen bitüm numune kabına hava kabarcıkları oluşmamasına dikkat edilerek dökülür,
- (3) Bitüm dolu numune kabı çevresel etkilerden koruma altına alınarak oda sıcaklığında 60-90 dk. kadar soğumaya bırakılır,
- (4) Soğuma sırasında deneyin yapılacak penetrasyon cihazı tüm ekipmanları ile deney hazır hale getirilir,
- (5) Numune kabına yerleştirilen bitümde homojen sıcaklık değerleri sağlamak için sıcaklığı 25 °C olan su banyosu yerleştirilir ve 30 dk. kadar su banyosunda numune bekletilir,
- (6) Numune koşullandırma işlemlerinde sonra homojen ısı ortamda deneye alınır,
- (7) Penetrasyon cihazına yerleştirilen numune üzerine iğne sıfır konumuna getirilip tanımlanan yüklemeler altında serbest bırakılır,

- (8) 5 sn. süre içerisinde iğnenin batma derinliği tayin edilir ve bu işlem her defasında iğne ucu temizlenerek 3 tekrar yapılır.
- (9) İlgili standartta tanımlanan esaslar çerçevesinde uygun deney sonuçlarının ortalaması alınıp mm. 'nin onda biri cinsinden en yakın tam sayıya yuvarlanıp hesaplanır ve penetrasyon değeri belirlenir.

Çalışmada kullanılan modifiye bitümlü bağlayıcıya yapılan penetrasyon testi sırasında çekilen bir resim Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Penetrasyon testi

3.2.1.2. Yumuşama noktası testi

Yumuşama noktası testi, bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktasını belirlemek için yapılmaktadır. Bu test sistemi; merkezlenme kılavuzu, yumuşama noktası cihazı, halka, bilyeler, dökme plakası, tutucu, karıştırıcı, beher ve termometreden oluşmaktadır. TS EN 1427 standart esas alınarak yumuşama noktası testi tez kapsamında hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Yumuşama noktası testinin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki gibidir (TS EN 1427, 2015; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- (1) Teste tabi tutulacak bitüm numuneleri ısıtılarak akışkan hale getirilir,

- (2) Isıtılma sürecinde test sistemi kurulur,
- (3) Numune akışkan hale geldikten sonrası hazırlanan plakalar üzerine yerleştirilmiş standart halkaların içi bitümle doldurulur,
- (4) Bitüm soğuması için 30 dk. kadar ortam sıcaklığında bekletilir,
- (5) Halkalardaki numuneler aynı seviyeye gelecek şekilde yüzeyleri bir kesici yardımıyla fazlalıkları alınarak düzleştirilir,
- (6) İşlemler devam ederken, numune ve test ekipmanlarının sıcaklık koşullandırma işlemleri yapılır,
- (7) Koşullandırma için damıtık su ile hazırlanmış banyonun sıcaklık derecesi 5 °C 'ye ayarlanır ve deneyde kullanılacak plaka üzerindeki numuneler, bilyeler, merkezlenme kılavuzu vb. ekipmanlar su banyosunun içinde tutulur,
- (8) Numuneler deney düzeneğine yerleştirilir ve bilyeler için merkezlenme kılavuzu numunelerin üzerine yerleştirilir, akabinde standart bilyeler bilye yerleştirilir,
- (9) Sıcaklık artışı dakikada 5°C olacak şekilde manyetik karıştırıcı desteğiyle homojen ısı dağılımı yapılarak artırılır,
- (10) sıcaklık artışı ve standart bilye yükü altında bitümlü bağlayıcı akmaya başlaması takip edilir ve numune yerleştirme aparatının tabanındaki plakaya ulaştığı andaki sıcaklık değeri okunur,
- (11) Deney sistemi iki bilye halka ile yapıldığına iki halka için okumalar yapılır ve her iki halka için sonuçlar ilgili standart esasları gereğince yorumlanarak numunenin yumuşama noktası tayin edilir.

Çalışmada kullanılan modifiye bitümlü bağlayıcıya yapılan yumuşama noktası testi sırasında çekilen bir resim Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Yumuşama noktası deneyi

3.2.1.3. Penetrasyon indeksi analizi

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak ısıya karşı hassasiyeti ifade eden bir ampirik yöntem ile bir indeks geliştirilmiştir. Bu indeks penetrasyon indeksi (PI) olarak bilinmektedir. PI ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değerinin (-2,0) ile (+2,0) arasında olması beklenir. Ancak, PI değerinin (-2,0) den küçük olması bitümün ısıya daha çok duyarlı olduğunu (+2,0) den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir (Gökalp vd., 2018; Kuloğlu vd., 2008).

Aşağıda verilen denklem kullanılarak PI hesaplanmaktadır.

$$(20-PI) / (10+PI) = 50.[(\log 800-Pen) / (T_{RB}-25)]$$

Burada,

Pen: 25°C penetrasyon değerini

T_{RB} : yumuşama noktası değerini ifade etmektedir.

3.2.1.4. Elastik geri dönme testi

TS EN 13398 standarda göre yapılan Elastik geri dönme testi 25°C sıcaklıkta düktilimetre cihazı ile bitümlü bağlayıcıların elastik geri dönmesinin hesaplanmasıyla yapılmaktadır. Bu test sistemi; düktilite cihazı, cetvel, numune kalıp teçhizatı, makas kullanılarak yapılmaktadır. Elastik geri dönme testinin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki gibidir (TS EN 13398, 2018; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- (1) Deney numunesi ısıtılarak akıcı hale getirilir,
- (2) Deney düzeneği hazırlanır ve cihaz deney sıcaklığına ayarlanır,
- (3) Deney numunesi kalıplara dökülür,
- (4) Deney sıcaklığında su banyosu hazırlanır ve kalıplara dökülen deney numuneleri 90 ± 10 dk. kadar deney sıcaklığında bekletilir,
- (5) Deney numune testin yapılacağı düktilite cihazına yerleştirilir,
- (6) Numunelere $\pm 0,5$ °C'de ve $50 \pm 2,5$ mm/dk. hız ile 200 ± 1 mm'ye kadar çekme işlemi uygulanır,
- (7) 200 ± 1 mm kadar çekme işleminden 10 sn. sonra bitüm bir makasla orta noktadan ikiye bölünür,
- (8) İkiye bölünen bitüm 30 dk. sonra uçları arasındaki uzaklık ölçülür,
- (9) En son elde edilen verilerle gerekli hesaplamalar yapılır. Her numune için elastik geri dönme %1 yaklaşımla aşağıda verilen formülle hesaplanır:

$$R_E = (d/L) \times 100$$

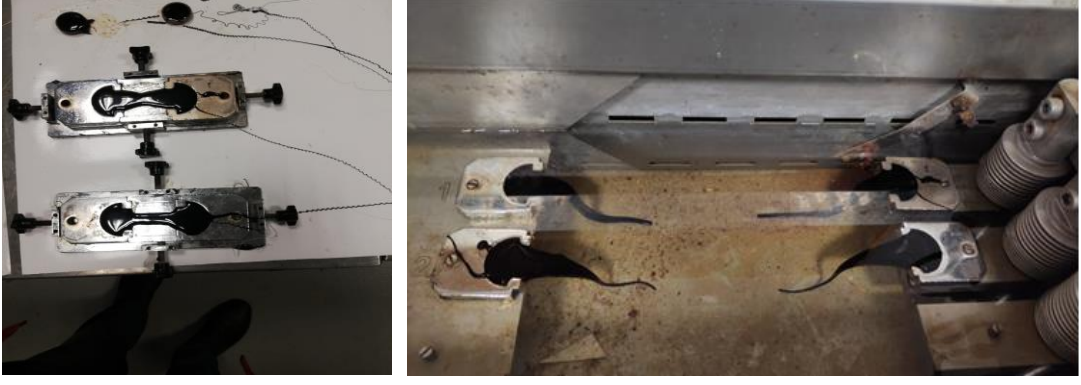
Burada,

R_E = elastik geri dönme miktarı,

d = bölünmüş bitümler arası mesafe (mm),

L = Germe uzunluğu, kopma sırasındaki bitüm uzunluğu (mm) dir.

Çalışmada kullanılan modifiye bitümlü bağlayıcıya yapılan elastik geri dönme testi sırasında çekilen bir resim Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Elastik geri dönme testi

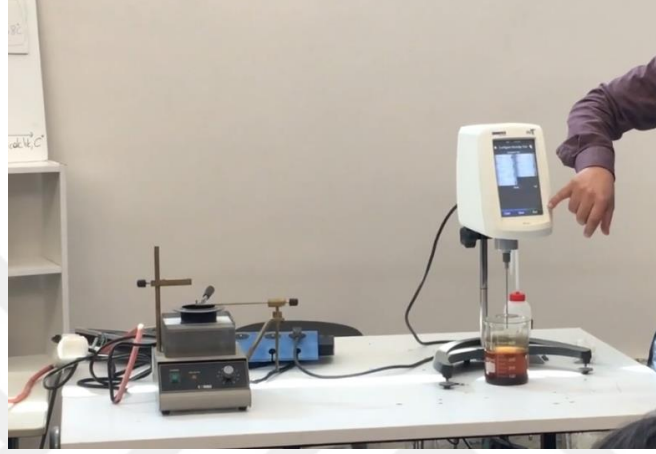
3.2.1.5. Brookfield dönel viskozite testi

Bitümün farklı yüksek sıcaklıklarda viskozitesini belirlemek amacıyla kullanılan test yöntemidir. Bu test yöntemi ile bitümlü karışım hazırlandığında, karışım sıcaklığı ve sahada serim sonrasında sıkıştırma sıcaklığı aralığı tanımlanan viskozite aralığında belirlenebilmektedir. Bu test sisteminde; dönel viskozimetre aleti, geometrik ölçüm aparatı (spindle), sıcaklık kontrollü termal hücre, numune kabı, hassas terazi ve platin dirençli termometre kullanılmaktadır. Tez kapsamında yapılan deneylerde ASTM D 4402 standardı takip edilmiştir. Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir (ASTM D 4402, 2015; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş 2021). Brookfield dönel viskozimetre aparatına ait bir resim Şekil 3.5'te verilmiştir.

- (1) Deney numunesi ısıtılarak akıcı hale getirilir,
- (2) Deney düzeneği hazırlanır ve cihaz deney sıcaklığına ayarlanır,
- (3) Deney numunesi kalıplara dökülür,
- (4) Kalıplar deney sıcaklığına ulaşmış ısıtılabilir hücreye yerleştirilir ve numunelerin ısıtılabilir hücrede homojen bir şekilde ısınmasını sağlamak için 15 dk. kadar beklenir,
- (5) Numune sıcaklığı deney sıcaklığına yaklaşınca deneyde kullanılacak geometrik aparat ısıtılabilir hücre içindeki bitüm dolu numune kabına yerleştirilir,
- (6) Dengeleme aparatı ile geometrik aparatın bitüm dolu numune kalını çerçevesine temas etmediğinde emin oluncaya kadar ayarlama yapılır,
- (7) Geometrik aparat ve bitümlü bağlayıcının deney sıcaklığında ulaşması için 30 dk. kadar daha beklenir,
- (7) Deney sıcaklığında viskozimetre çalıştırılıp dakikada bir ölçüm olmak koşuluyla toplamda 3 dk. boyunca ölçüm alınır,

(8) Cihaz özelliğine bağlı olarak ortalama veya her bir ölçüm için değerler cP biriminde alınır,

(9) Yapılan ölçümlerde tork değer %10 ile %98 arasında olması istenir. Yüksek tork değerleri daha doğru sonuçlar temin etmek için ihtiyaç duyulan bir kıstastır. Bu kıstasın sağlanabilmesi için farklı geometrik aparatlar, deney uygulama hızları veya gerekirse deney sıcaklıkları değiştirilerek ölçümler alınır.



Şekil 3.5. Brookfield dönel viskozite cihazı

3.2.1.6. Nicholson soyulma direnci testi

Sasobit® katkısı ile üretilen IKA'lar da meydana gelen temel problemlerden biri düşük soyulma direnci performansının görülmesidir. Bu problemin giderilmesi noktasında yapılan çalışmalarda ilave katkıya ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Bu probleme çözüm noktasında bitümlü bağlayıcı ile benzer fiziksel ve mekanik özellikler gösteren İÇSA katkısının %1 oranında kullanılması kararlaştırılmış ve tanımlanan oranlarda kullanılan Sasobit® modifiye bitüm ile karıştırılmıştır (TS EN 12697-11,2020; KTŞ 2013).

KTŞ'de soyulma direnci deneyi sathi kaplama imalatında kullanılacak kaba agrega özelliklerinde tanımlanmıştır. Bu tez kapsamında, her bir üretilen modifiye bitüm ile agrega arasındaki soyulma direncini belirlemek için KTŞ'de tanımlanan Nicholson soyulma testi TS EN 12697-11 standart esas alınarak numunelere uygulanmıştır. Bu test sistemi su banyosu, petri kapları, etüv, saf su, beher ve karıştırma çubuğunda oluşmaktadır. Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir.

- 1) 100 ± 10 gram 6,3-9,5 mm boyutlarında agrega elenerek temin edilir ve toz ve kirliliklerinden arındırılmak için yıkanır,
- (2) Yıkanan agregalar 24 saat boyunca veya sabit kütleye ulaşınca kadar 100 ± 5 °C’de fanlı etüvde ısıtılarak kurutulur,
- (3) Bitüm numuneleri deneyin yapılacağı gün ısıtılarak akıcı hale getirilir,
- (4) Deney aparatları ve düzeneği hazırlanır,
- (5) Kurutulmuş sıcak agregalar bir ısıtılmış bir behere boşaltılır,
- (6) Beherde bulunan agregaların üzerine ağırlığının yüzde 5’i kadar bitüm, 5 g, bitüm boşaltılır ve bitüm agrega karışımı hızla bitüm tüm agregaları kaplayana kadar beher içinde karıştırılır,
- (7) Bitüm kaplı agregalar hazırlanan iki eşit parçada petri kaplarına homojen ve birbirileri üzerine tanecikler gelmeden yayılarak yerleştirilir,
- (8) Petri kapları laboratuvarında oda sıcaklığında 1 saat kadar dinlendirilir,
- (9) Petri kaplarında dinlendirilen numuneler üzeri 3 cm suyla kaplanacak şekilde 60 °C ısıya ayarlanan su banyosuna veya buharlaşma kaybı yaşanmaması noktasında gerekli önlemler fansız etüve yerleştirilerek 24 saat boyunca koşullandırılır,
- (10) Agregaların soyulma oranı gün ışığında, ilgili standartta resmedilen değerlendirme esas alınarak numunelerin soyulma değeri $\pm\%5$ hassasiyetle belirlenir.

IKA karışımına yapılan soyulma testi sırasında çekilen resimler Şekil 3.6.’da verilmiştir.



Agrega tartımı



Bitüm ilavesi



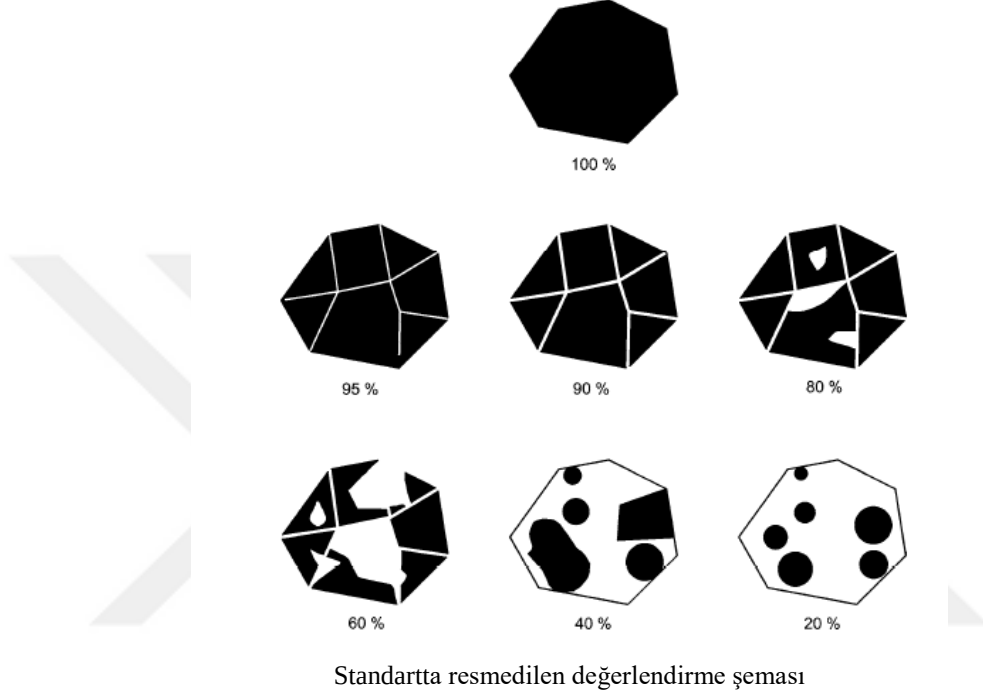
Agrega bitüm karışımı



Karışımın bekletilmesi

60 °C'de koşullandırma

Gün ışığında değerlendirme



Standartta resmedilen değerlendirme şeması

Şekil 3.6. Soyulma testi ve aşamaları

3.2.2. SuperPAVE sınıflandırma sistemi

Bitüm uzun yıllar penetrasyon testi sonuçlarına göre belli aralıklar için sınıflandırılmıştır. Ancak, bitüm bağlayıcının ısı değişimlere ve yükleme koşullarına karşı oldukça hassas olduğu düşünüldüğünde penetrasyon testi ile oda koşullarında ve sabit sabit bir yükleme altında uygulanan test sonuçlarına göre yapılan sınıflandırmasının yetersiz ve oldukça ilkel kaldığı görülmüştür. Geleneksel penetrasyon sınıflandırmasının yetersizlikleri dolayısıyla farklı sıcaklık ve yüklemenin yanı sıra farklı yaşlanma koşullarında performansının ölçülebilmesi ihtiyacı doğrultusunda yeni bir test sistemine bağlı sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. Bu sınıflandırma sistemi Üstün Performanslı Asfalt Kaplama (SuperPAVE) sistemi olarak tanımlanmıştır (Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; FHWA, SuperPAVE Fundamentals Reference Manual).

SuperPAVE sistemi, bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklık, yükleme ve yaşlanma koşullarında altında visko-elastik davranışı hakkında bilgi vermektedir. Bu sistem içerisinde yapılan testlerden elde edilen parametreler arasında geliştirilen bağıntılar sayesinde; bağlayıcının tekerlek izi direnci, yorulma direnci ve düşük sıcaklık çatlağı direnci gibi yapısal ve fonksiyonel performansları hakkında öngörüler yapılabilmekte ve bitümlü bağlayıcının yüksek, orta ve düşük sıcaklıklardaki davranışları ortaya konulabilmektedir.

Bitümlü bağlayıcılar, SuperPAVE sisteminde tanımlanan kriterlere erişme sıcaklığına bağlı yüksek ve düşük sıcaklık dayanımları tabanında sınıflandırılmıştır. Performans Sınıfı (Performance Grade-PG) simgesel gösterimi ile sınıflandırma sistemi oluşturulmuştur. PG (XX-YY) örneğinde, bağlayıcının kullanılacağı bölgede dayanabileceği en yüksek (XX) ve en düşük (-YY) sıcaklık değerlerini göstermektedir. SuperPAVE sınıflandırması, sadece orijinal bitüm için değil tüm modifiye bitümler için kullanılabilmektedir. Şekil 3.7.'de SuperPAVE sınıflandırma sistemini gösteren tablo verilmiştir (Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; FHWA, SuperPAVE Fundamentals Reference Manual).

Performance Grade	PG 46				PG 52				PG 58				PG 64				PG 70				PG 76				PG 82							
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34
Average 7-day Max Pavement Design Temperature, °C	< 46				< 52				< 58				< 64				< 70				< 76				< 82							
Min Pavement Design Temperature, °C	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34
ORIGINAL BINDER																																
Flash Point Temp, T ₄₈ , Min °C	230																															
Viscosity, ASTM D 4402, Max 3 Pa's, Test Temp, °C	135																															
Dynamic Shear, TP 5 Min, 1Kpa G*/sinδ Test Temp @ 10 rad/s, °C	46				52				58				64				70				76				82							
ROLLING THIN FILM OVEN RESIDUE (T 240)																																
Mass loss, Max, percent	1.00																															
Dynamic Shear, TP 5 Min, 2.0 Kpa G*/sinδ Test Temp @ 10 rad/s, °C	46				52				58				64				70				76				82							
PRESSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP 1)																																
PAV Aging Temperature °C	90				90				100				100				100 (110)				100 (110)				100 (110)							
Dynamic Shear, TP 5 Min, 5000 Kpa G*/sinδ Test Temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	
Physical Hardening																																
Creep Stiffness, TP 1 Determine the critical cracking temperature as described in PP 42	Report																															
Direct Tension, TP 3 Determine the critical cracking temperature as described in PP 42	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24

Şekil 3.7. SuperPAVE sınıflandırma sistemi

3.2.3. Reolojik bitümlü bağlayıcı testleri

SuperPAVE sınıflandırma sisteminde bitümlü bağlayıcıların reolojik özellikleri ortaya konmaktadır. Bu sistemde yer alan reolojik test yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- (1) Dinamik kesme reometresi (Dynamic Shear Rheometer-DSR),
- (2) Eğilme kirişi reometresi (Bending Beam Rheometer-BBR),
- (3) Dönel ince film etüvü (Rolling Thin Film Oven-RTFO),
- (4) Basınçlı yaşlandırma hücresi (Pressure Ageing Vessel-PAV).

Burada, DSR yüksek ve orta sıcaklık koşullarında bitümün tekerlek izine ve yorulmaya karşı dayanımının orya konulmasında, BBR ise düşük sıcaklıklardaki çatlak dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. RTFO bitümlü bağlayıcıları kısa dönem yaşlandırma işlemi için kullanılırken, uzun dönem yaşlandırma için ise PAV kullanılmaktadır (Gökalp, 2022; Bartın Üniversitesi, 2014; FHWA, SuperPAVE Fundamentals Reference Manual).

3.2.3.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) testi

Tez kapsamında, TS EN 14770 standardına göre üretilen tüm IKA bitümlü bağlayıcıların yaşlanmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış formlarına DSR testi uygulanmıştır. Bu test düzeneğinde dinamik kesme reometresi, bilgisayar, yazılım program, sıcak hava bağlantı hattı veya sıcak su aktarıcı kompresör, 25 ve 8 mm silikon kalıplar ve geometrik elemanlar ile etüv bulunmaktadır. Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir (Uz ve Gökalp, 2020; TS EN 14770, 2012; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- 1) Bitümlü bağlayıcılar uzun süre ısıtılmaması şartıyla yumuşama noktasından (85 ± 5) °C daha fazla bir sıcaklıkta ısıtılır,
- (2) Deney düzeneği kurulu cihaz, kompresör, DSR, bilgisayar ve program çalıştırılır ve program üzerinden deney başlangıç sıcaklığı ayarlanır,
- (3) Isıtılan bitümlü bağlayıcı, yaşlanma formu bağlı olarak tanımlanan geometrideki (25 mm yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış, 8 mm uzun dönem yaşlanmış) silikon kalıba dökülür ve 5 dk. kadar oda sıcaklığında bekletilir,
- (4) Deney alt plakası ve üst plaka görevi gören geometrik elemanı (spindle) yaşlanma formu bağlı olarak belirlenir (25 mm yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış, 8 mm uzun dönem yaşlanmış) ve DSR cihazına monte edilir,
- (5) Plakalar arası boşluk ayarı yaşlanma formu göre (1,1 mm yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış, 2,1 mm uzun dönem yaşlanmış) ayarlanır,

(6) Alt veya üst plakaya silikon kalıpta bulunan numune üst plakaya yapıştırılır veya alt plaka üzerine yerleştirilir ve plakalar birbirlerine yapıştırılır,

(7) Plakalar birbirine yapıştıktan sonra plakalar arasında taşan numune ısıtılmış DSR aparatı ile temizlenir ve plakalar arası boşluk ayarı standartta tanımlanan şekliyle (1,0 mm yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış, 2,0 mm uzun dönem yaşlanmış) ayarlanıp sıkıştırılır,

(8) Deney yaşlanma formuna bağlı olarak tanımlanan başlangıç sıcaklığında başlatılır,

(9) Başlatılan deney rijitlik değeri her bir yaşlanma formu için tanımlı olan değerleri geçene kadar devam eder.

DSR ile yapılan deney de iki farklı parametre üzerinde sonuçlar belirlenir. Bunlar; Kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ)'dır. Bu iki parametre verisi üzerinden tanımlanan bağıntıları ile bitümlü bağlayıcının tekerlek izine karşı direnç ve yorulma dayanımı özellikleri belirlenebilmektedir. Bu durumda SuperPAVE sınıflandırma sisteminde tanımlanan aşağıdaki ilkelere göre belirlenir

- Yaşlanmamış bitümlü bağlayıcılar için $G^*/\sin \delta$ (Pa) bağıntısı kullanılır ve bu bağıntıdan elde edilen sonucun 1,0 kPa geçmesiyle deney sonlandırılır.
- Kısa dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcılar için $G^*/\sin \delta$ (Pa) bağıntısı kullanılır ve bu bağıntıdan elde edilen sonucun 2,2 kPa geçmesiyle deney sonlandırılır.
- Uzun dönem yaşlanmamış bitümlü bağlayıcılar için $G^*.\sin \delta$ (Pa) bağıntısı kullanılır ve bu bağıntıdan elde edilen sonucun 5000 kPa ulaşmasıyla deney sonlandırılır.

SuperPAVE sınıflandırma sistemin yüksek sıcaklık değerinin tayininde yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış deney numunelerinin yenilme sıcaklığı dikkate alınır. Ancak, ilgili sisteme göre PG sınıfı ise yenilme sıcaklığının altındaki tanımlanmış sıcaklık değeridir. DSR sonuçlarındaki diğer parametrelerde olan faz açısı δ ($^\circ$) bitüm viskoz veya elastik formda olduğunu gösterir. Bitümlü bağlayıcıya ait ilgili deney sıcaklığına karşı gelen faz açısının 90° 'ye yakınsaması viskoz, 0° 'ye yakınsaması ise elastik olduğunu göstermektedir. Şekil 3.8.'de DSR aleti verilmiştir (UTEST Malzeme Test Cihazları, Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022).



Şekil 3.8. Dinamik kesme reometresi

3.2.3.2. Eğilme kirişi reometresi (BBR) testi

Düşük sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların 30 MPa ile 1 GPa aralığında eğilme rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan BBR test sistemi masaüstü bilgisayar, Software programı, LVD dönüştürücü, numune destekleri, sıcaklık ölçüm cihazı, sıvı banyosu, veri toplama kontrol sistemi ve deney numunesi kalıplarından oluşmaktadır. Tez kapsamında TS EN 14771 standardı esas alınarak tez kapsamında uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerine BBR testi uygulanmıştır. Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir (Gökalp, 2022; Uz ve Gökalp, 2020; TS EN 14770, 2012; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- 1) PAV sonrası bitümlü bağlayıcılar 160 ± 5 °C’de ısıtılır,
- 2) BBR tanımlanan deney sıcaklığı ayarlanır,
- 3) Isıtılma sürecinde, deney kalıpları hazırlanır,
- 4) Akıcı hale gelen bitümlü bağlayıcı hazırlanan numune kalıplarına dökülür ve 45-60 dk. oda sıcaklığında bekletilir,
- 5) Deney başlamadan önce numunelerde herhangi bir yumuşama ve formunda bozulma olmaması için dipfrize 10 dk. için yerleştirilir,
- 6) Dipfrizden çıkarılan numuneler kalıplarından hasar verilmeden çıkarılır ve BBR deney sıcaklığına ayarlana sıvı banyosuna bırakılır. Burada, deney numuneleri 60 dk. deney sıcaklığına koşullandırma amaçlı bekletilir,

- 7) Numune, BBR deneyinin yapılacağı platforma yerleştirilir,
- 8) Standartta tanımlanan yükleme ayarları yapıldıktan sonra 240 sn. kadar sürecek deney başlatılır,
- 9) BBR deney sonucu, 60 sn. 'de ki eğilme rijitliği ve sünme davranışının göstergesi olan m-value değeri ile tanımlanır. Eğilme rijitliğinin maksimum 300 MPa, m-value değerinin ise minimum 0,300 olması gerekir. Bu değerlerin belirlendiği sıcaklık, düşük sıcaklıkta çatlak dayanılabilen sıcaklık olarak tanımlanır ve u sıcaklık SuperPAVE sınıflandırma sisteminde PG (XX-YY) yer alan YY'nin karşılığı olur.

Çalışmada kullanılan modifiye bitümlü bağlayıcıya yapılan -18 °C başlangıç deney sıcaklığı uygulanan BBR testi sırasında çekilen resim Şekil 3.9.'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Eğilme kirişi reometresi

3.2.3.3. Dönel ince film etüvü (RTFO) testi

Bitümün kısa dönemli yaşlanmasını temsil eden (üretiminden itibaren sıcaklık, hava ve basınç gibi etkilere maruz kalma neticesinde meydana gelen sertleşme ve uçucu bileşen kaybı) RTFO deneyi TS EN 12607-1 takip edilerek uygulanmıştır (Gökalp, 2022; McGennis vd., 1994). Bu test sistemi içinde etüv, akış ölçer, termometre, cam kap ve hassas terazi bulunmaktadır. RTFO'yu gösteren bir resim Şekil 3.10.'da verilmiştir (ESOGÜ, Ziyaret Tarihi: 20 Temmuz 2022).



Şekil 3.10. Dönel ince film etüvü (RTFO)

Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir (Gökalp, 2022; Uz ve Gökalp, 2020; TS EN 14770, 2012).

- 1) Bitümlü bağlayıcılar yeterli 140-150 °C’de 1 saat kadar ısıtılır,
- 2) RTFO deney cihazı ilgili deney sıcaklığında ayarlanıp (163 °C) çalıştırılır,
- 3) Cam kaplar numaralandırılıp, temizlenir ve öncesinde etüve 100 °C’de 20 dk. kadar kurutulup ısınması sağlanır,
- 4) Cam kaplar 0,001 hassasiyete sahip terazide tartılır ve içlerine akışkan hale gelmiş bitüm numunesinde 35 g numune konulur,
- 5) Bitüm numunelerinin cam kabın etrafını sarması için bitüm dolu cam kaplar düz bir platform üzerinde soğuyuncaya kadar yuvarlanır,
- 6) Numuneler RTFO cihazının içine yerleştirilir ve 75 dk. boyunca tanımlanmış deney sıcaklığında numuneler 4 lt hava akışına tabi tutularak etüv içerisinde $15,0 \pm 0,2$ devir/dk. hızla döndürülür,
- 8) RTFO deneyinde kütle kaybı hesabı yapılmakta, zira üretim taşıma sürecinde bitümlü bağlayıcılarda %1 üstünde bir kütle kaybın olması istenmemektedir. Bu nedenle RTFO deney numunelerinde ikisi için kütle kaybı oranları şu şekilde tayin edilmektedir.

$$\text{Kütle Değişim Yüzdesi} = 100 \times ((M_2 - M_1) / (M_1 - M_0))$$

Burada,

M_0 = kabın ağırlığı, g

M_1 = deney öncesi kap + numune ağırlığı, g

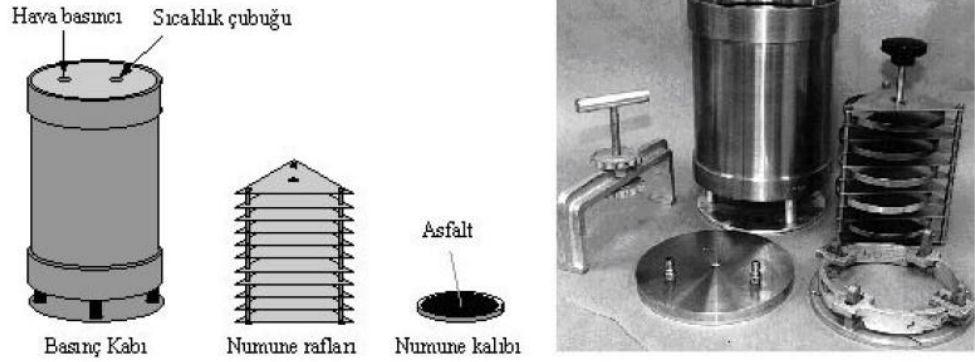
M_2 = deneyden sonrası kap + numune ağırlığı, g

3.2.3.4. Basınçlı yaşlandırma hücresi (PAV)

Bitümlü bağlayıcılar, sıcak karışıma katılma sürecinden yola serilmesine ve sonrasında tanımlanan performans ömrü süresinde zorlayıcı çevre koşullarına ve trafik yüklerine maruz yaşlanırlar. Bu yaşlanma formu uzun dönem yaşlandırma olarak tanımlanır. Bu yaşlanma formu laboratuvar ortamında TS EN 14769 standardı esas alınarak yapılan PAV deneyi farklı sıcaklıklar için simüle edilebilir. PAV cihazı ile 90,100 ve 110 °C sıcaklıklarında koşullandırma yapılabilmektedir. Bu test sistemini; basınç kabini, numune kabı, basınç tüpü, termometre, sıcaklık kaydeden cihaz, metal kaplar, hassas terazi, vakumlu etüv, vakum makinası ve gaz silindiri oluşturmaktadır. PAV deney setine ait görseller Şekil 3.11.'de PAV deneyi için kullanılan alet verilmiştir (Sanal Şantiye, 21 Mart 2022).

Deneyin uygulanmasında takip edilen aşamalar aşağıdaki sıralanabilir (Gökalp, 2022; Uz ve Gökalp, 2020; TS EN 14769, 2012; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021).

- 1) PAV cihazı yaşlandırılmak istenen sıcaklığa göre ayarlanır ve kapalı bir şekilde ısıtılmaya başlanır,
- 2) RTFO ile kısa dönem yaşlandırılmış bir kapta toplanmış bitüm numuneleri, 160 ± 5 °C (daha fazla da olabilir) etüvde ısıtılıp akışkan olmaları sağlanır,
- 3) Isıtılan numuneler, $50,0 \pm 0,5$ gram kadar PAV'a yerleştirilecek numune kaplarına yaydırılarak dökülür,
- 4) Dolu kaplar numune rafına yerleştirilerek PAV hücresine yerleştirilir.
- 5) Tanımlanan ve iç basınca gelince sıcaklığa PAV hücresi ulaşınca otomatik olarak yaşlandırma başlatılır,
- 6) Yaşlandırma süreci 24 saat sürmekte olup süre bitiminde cihaz yine otomatik olarak hücresindeki iç basıncı tahliye edilir,
- 7) Numuneler PAV hücresinde çıkarılır ve numune dolu kaplar vakum makinasın yerleştirilerek içerisinde havanın alınması sağlanır. Bu işlem için atmosfer basıncına eşdeğer olacak biçimde ayarlama yapılır ve vakumlu etüve 30 dk. 175°C'de koşullandırması ile havası çekilir.



Şekil 3.11. PAV deney seti

3.2.4. IKA üretimi ve performans deneyleri

3.2.4.1. IKA üretimi

Agreganın maksimum dane boyutu, gradasyonu, absorpsiyonu, tabaka cinsi gibi etmenlere bakılarak başlangıç optimum bitüm oranı tayini yapılabilmektedir. Bu minvalde bazı ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; (1) Asfalt Enstitüsü, (2) Yüzey Alan, (3) Fransız ve (4) TEM yöntemleridir.

Tez çalışmasında Asfalt Enstitüsü tarafından agrega kaba, ince ve filler gradasyon yüzdeleri üzerinde geliştirilen yöntem ile hesaplanan başlangıç optimum bitüm oranı belirlenmiştir (Tunç, 2007; Şahin, 2019).

$$P = (0,04a + 0,07b + 0,12c) \times F$$

Burada,

a: kaba agrega yüzdesi,

b: ince agrega yüzdesi,

c: filler malzeme yüzdesi ve

F: 1'dir

Taş Mastik Asfalt (TMA) binder tabakası için IKA yapılmıştır. TMA binder tabakası gradasyon limitleri Çizelge 3.5.'te verilmiştir (KTŞ 2013).

Çizelge 3.5. TMA binder tabakası gradasyon limitleri

Elek Boyutu (mm)	Alt ve Üst Limit Değerleri Geçen (%)	Üretimde kullanan Geçen (%)	Tolerans Limitleri (%)
25,0	100	100	
19,0	92-100	96	±4
12,5	73-83	78	±4
9,5	56-66	61	±4
4,75	32-42	37	±3
2,0	25-30	27,5	±3
0,425	14-20	17	±3
0,180	9-15	12	±3
0,075	7-11	9	±2

Çizelge 3.5.'te verilen ve üretimde kullanılan agrega gradasyon oranlarından, kaba agrega yüzdesi %63, ince agrega yüzdesi %28 ve filler malzeme yüzdesi = %9 olarak hesaplanmıştır. Asfalt enstitüsünün önerdiği ampirik bağıntıda, bu değerler ile yapılan hesaplamalar neticesinde başlangıç optimum bitüm oranı %5,56 olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında hazırlanan tüm IKA karışımları standart bir şekilde agrega ağırlığınca %5,56 bitüm kullanılarak hazırlanmıştır. IKA üretiminde kullanılan KTŞ'ye göre TMA binder tabakası için tanımlanan minimum bitüm oranının (%5,2) üzerinde olduğu ayrıca belirtmek yerinde olacaktır.

IKA numunelerinin üretim sırasında uygun bir şekilde karıştırılıp sıkıştırılması oldukça önemli bir husustur. IKA'nın gerek karıştırma gerekse sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde, 135 ve 165 °C'de Brookfield dönel viskozimetre deneyi ile yapılan test sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu bağlamda, %3 Sasobit® için belirlenen viskozite değerlerine istinaden karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında işlemler yapılmıştır. Karıştırma sıcaklık 146,0- 153,0 °C arasında iken sıkıştırma sıcaklıkları ise 124,9- 135,4 °C arasındadır. Üretim sırasında infrared ısıölçer ile sıcaklık kontrolleri üretim süresince aralıklı olarak yapılmıştır.

Marshall tasarım usul ve esasları takip edilerek Marshall briketleri şeklinde IKA numuneleri hazırlanmıştır. IKA numunelerinin üretim aşamalar aşağıdaki sıralanabilir; KGM Bitümlü Bağlayıcılar Lab. El Kitabı, 2021; Kumandaş, 2021). Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında IKA üretimi sırasında çekilen bir resimler Şekil 3.12.'de verilmiştir.

(1) TMA binder karışımı için hazırlanan gradasyonlarda agregalar (filler hariç) üretim öncesinde yıkanır ve agregaların kuruması için 24 saat boyunca $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de fanlı etüvde ısıtılır,

(2) Karışımında kullanacak bitümlü bağlayıcı 2 saat boyunca tanımlanan karıştırma sıcaklığında etüvde ısıtılır,

(3) Etüvde diğer karıştırıcı kovanı, aktarma küreği, Marshall kalıpları vb. gerekli teçhizatlarla 1 saat kadar ısıtılır,

(4) Isıtılma ve kurulama işlemlerinde sonra numuneler tanımlanan miktarlarda karışma kovanının içerisinde birleştirilir,

(5) Numune dolu kova karıştırıcıya monte edilir 2 dakika süresince numune karıştırılır,

(6) Marshall briketleri için hazırlanan kalıplar etüvde çıkarılır ve karışım standartlara uygun olarak kalıp içerisine aktarılır,

(7) Kalıba yerleştirilen TMA binder tabakası için hazırlanan IKA numunelerinin her iki yüzeyine sırasıyla 50'şer darbe sayısında tokmak darbesi vurularak sıkıştırma işlemi yapılır,

(8) sıkıştırılmış 30 dk. kadar numune oda sıcaklığında soğumaya ve sonrasında kalıptan bir hidrolik kriko yardımıyla çıkarılır.



Şekil 3.12. Karışımın hazırlanma ve sıkıştırılma aşamaları

3.2.4.2. Marshall stabilitesi ve akma tayini testi

ASTM D 6927 deney standardına göre yapılan Marshall stabilitesi ve akma tayini testinin üretimi tamamlanan IKA numunelerine uygulama aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir. Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında IKA üretimi sırasında çekilen resimler Şekil 3.13.'te verilmiştir.

- Numunelerin üç farklı yerden yükseklikleri ölçülür,
- Numunelerin havadaki ağırlıkları ve sudaki ağırlıkları belirlenir,
- Numuneler yarım saat kadar 60 °C su banyosunda koşullandırılır,
- Numuneler su banyosundan çıkarılır ve bir havlu ile kurulanır,
- Kurulanan numuneler stabilite cihazına yerleştirilir ve test başlatılır. Ancak, stabilite cihazı otomatik ölçüm almıyorsa dikkatle dayanımdaki değişim izlenir, düşmeye başladığı andaki stabilite değeri ve akma değeri okunarak deney formuna kaydedilmelidir,
- 63,5 mm üzeri yüksekliğe sahip numuneler stabilite değerleri tanımlanan katsayılar ile düzeltmeler yapılarak nihai değeri tayin edilir.



Şekil 3.13. Marshall stabilite ve akma testi uygulaması

3.2.4.3. İndirekt çekme mukavemeti testi

İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) deneyi, bitümlü karışımın donma çözünme gibi olağan doğa çevresel koşullara maruz kaldıklarında nasıl ve ne düzeyde etkilendiklerini, yani suyun zararlı etkilerine karşı dayanımını ortaya koymak amacıyla

yapılır. ASTM D 6931-12 numaralı standart esas alınarak İÇM deneyi yapılır. İÇM ölçümlerini yapıldığı cihaz Şekil 3.14.'te verilen İÇM cihazı ile ölçülmektedir. KGM 9. Bölge Müdürlüğü (Diyarbakır) Ar-Ge Başmühendisliği laboratuvarında İKA numunelerine yapılan İÇM deney cihazına ait resim Şekil 3.14.'te verilmiştir.



Şekil 3.14. İndirekt çekme mukavemeti deneyi cihazı

İÇM testinin İKA numunelerine uygulama ve hesaplama aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Karadağ, 2019).

- Biri şartlandırmak diğer ise şartlandırılmamak üzere yapılacak deneyler için üçer adet numuneden iki adet deney seti hazırlanır,
- Hazırlanan numuneler 72 saat boyunca 40 °C etüvde bekletilir,
- Numune setlerinden biri 25 °C'ye gelinceye kadar soğumaya bırakılır,
- Soğuyan numuneler streç film ile hava almayacak şekilde sarılarak oda koşullarında bekletilir,
- Diğer setteki numunelerin suya doymun hale gelmeleri için 25 °C sıcaklığına sahip su banyosunda 24 saat bekletilir,
- Su banyosundaki numuneler, banyondan çıkarılır ve %55 ile 80 arasında değişen doymunluk oranlarında vakum yardımıyla nem ile koşullandırılır,

- Numuneler -18 °C sıcaklıktaki dipfrizde 16-18 saatliğine bekletildikten sonra dipfrizden çıkarılarak 60 °C sıcaklığa sahip su banyosuna 24 saatliğine tutulur,
- Şartlandırma tamamlandıktan sonra şartlandırılmış ve şartlandırılmamış deney setindeki numuneler 25 °C’de 51 mm/dk. yük altında teste tabi tutulur,
- İÇM değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D}$$

Burada:

S_t = indirekt çekme mukavemeti, MPa

P = maksimum yük, N

t = numunenin kalınlığı, mm

D = numunenin çapı, mm

- Test sonucunda şartlandırılmış deney setinin ortalama çekme dayanımının, şartlandırılmamış deney setinin ortalama çekme dayanımına oranı belirlenir. Bu orana çekme dayanım oranı denir ve TSR olarak sembolize edilir. Aşağıda verilen denklem ile TSR oranı hesaplanır.

$$TSR = (ITS_{Islak} / ITS_{Kuru}) \times 100$$

Burada,

TSR: İndirekt çekme dayanım oranı (%),

ITS_{Islak} : Şartlandırılmış numunenin indirekt çekme dayanımı,

ITS_{Kuru} : Şartlandırılmamış numunenin indirekt çekme dayanımıdır.

3.2.5. Fayda/maliyet analizi

Bitümlü bağlayıcıların modifikasyonu amacıyla kullanılan malzemelerin tercih edilebilmesi için sağladığı faydalar yanında maliyetinin uygun olması ve aynı zamanda kolay elde edilebilmesi gerekmektedir (Gökalp vd., 2019-a; Şahin, 2019). Bu kapsamda İKA katkılarıyla hazırlanan bitümlü karışımlar ve geleneksel BSK üretimi sırasında enerji

tasarrufu ve maliyet analizi yapıp karşılaştırılacaktır. Bu analiz IKA'ların ekonomik açıdan BSK'lere göre avantaj ve dezavantajlarının belirlenebilmesi ve bu konuda bir öngörü oluşturulabilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla 1 ton BSK ve IKA'nın üretimi esas alınarak enerji ve üretim maliyeti hesaplanıp karşılaştırmalar yapılmıştır.

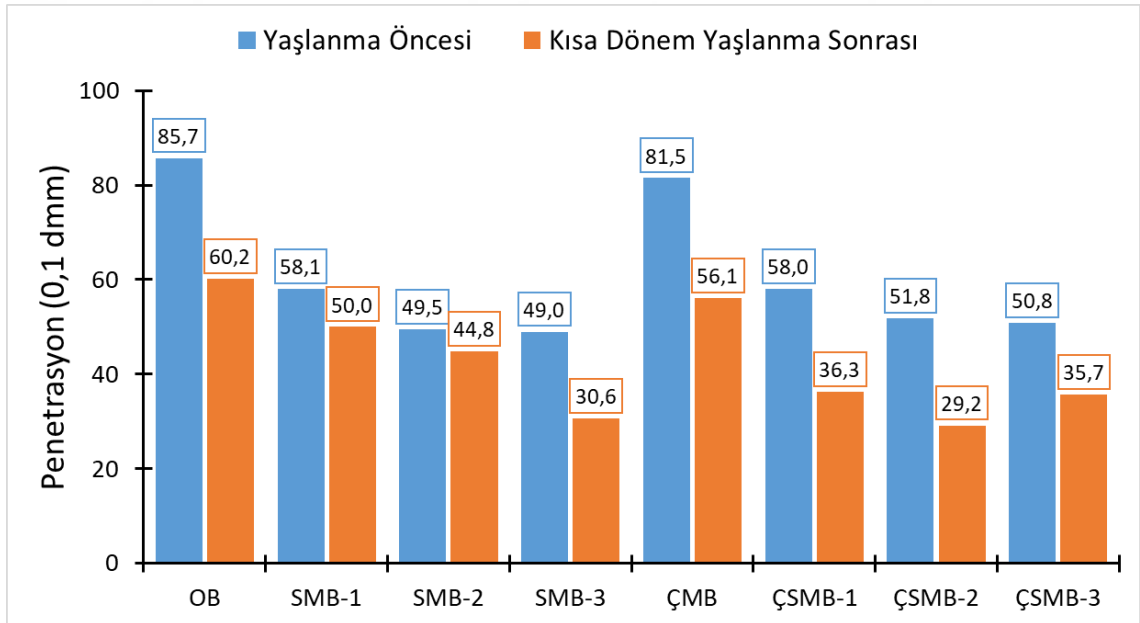


4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Geleneksel Bitümlü Bağlayıcı Testleri

4.1.1. Penetrasyon testi

TS EN 1426 standardında göre uygulanan test bitümlerin kıvamını veya sertliği ortaya koymak amacıyla yapılmaktadır. Penetrasyon yükseldikçe bitümün daha akışkan, düştükçe daha elastik bir kıvamda olur. Tez kapsamında bitümlü yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcılara yapılan penetrasyon testi uygulanmış, test sonuçları Şekil 4.1.'de verilmiştir.

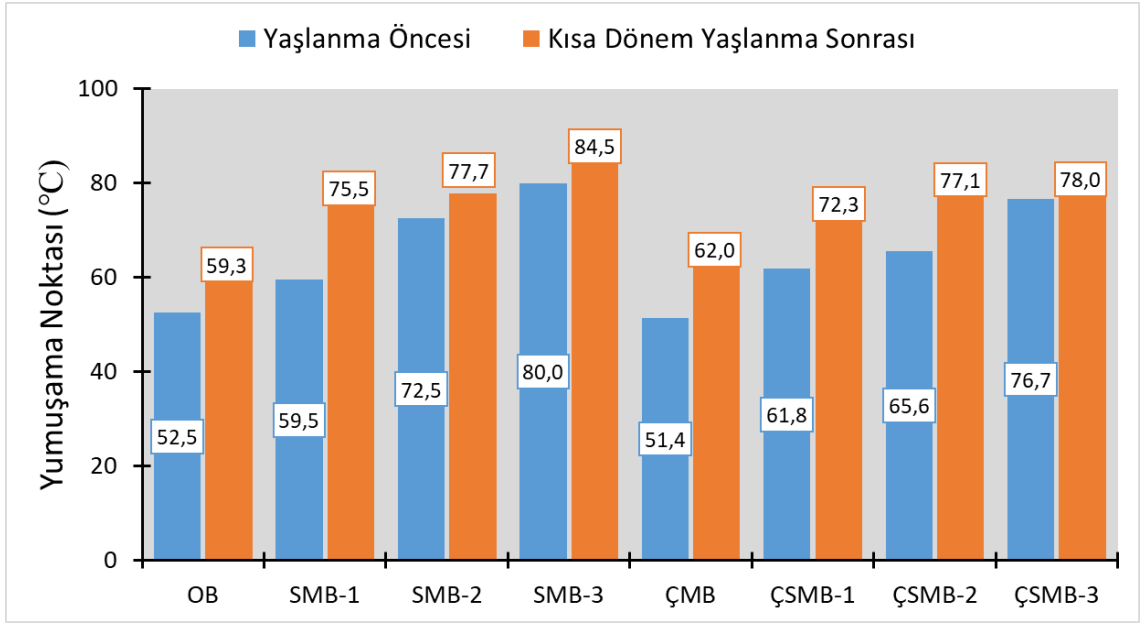


Şekil 4.1. Penetrasyon deneyi sonucu

Şekil 4.1.'deki sonuçlar, farklı oranlarda kullanılan Sasobit® IKA katkısının belirgin bir şekilde bitümün penetrasyon değerini farklı oranlarda etkilediği, ancak ÇMB'nin OB'ye nazaran bir miktar daha kıvamlı olduğu görülmektedir. ÇSMB bitüm numunelerinde, SMB bitüm numunelerine oranla penetrasyon değerlerinde İÇSA'nın sahip olduğu yapışkanlık özelliğinden kaynaklı olarak kıvamlarının bir miktar arttığı, dolayısıyla daha düşük penetrasyon değerleri ölçülmüştür. Kısa dönem yaşlanma sonrası test sonuçlarının yaşlanma öncesi test sonuçları ile uyumlu olduğu ancak yaşlanma işleminden kaynaklı daha sert bir ürünün ortaya çıkması ile daha düşük penetrasyon değerleri ölçülmüştür.

4.1.2. Yumuşama noktası testi

TS EN 1427 standardında göre uygulanan test bitümlerin ısıya karşı duyarlılığını ve akmaya davranışını ortaya koymak ve bitümün ısıtılma sıcaklığını öngörmek amacıyla yapılmaktadır. Yumuşama noktası yükselmesi bitümün daha elastik yani daha kıvamlı, düştükçe daha akışkan bir formda olduğunu gösterir. Tez kapsamında bitümlü yaşlanmamış ve kısa dönem yaşlanmış bitümlü bağlayıcılara yapılan yumuşama noktası testi uygulanmış, test sonuçları Şekil 4.2.'de verilmiştir.



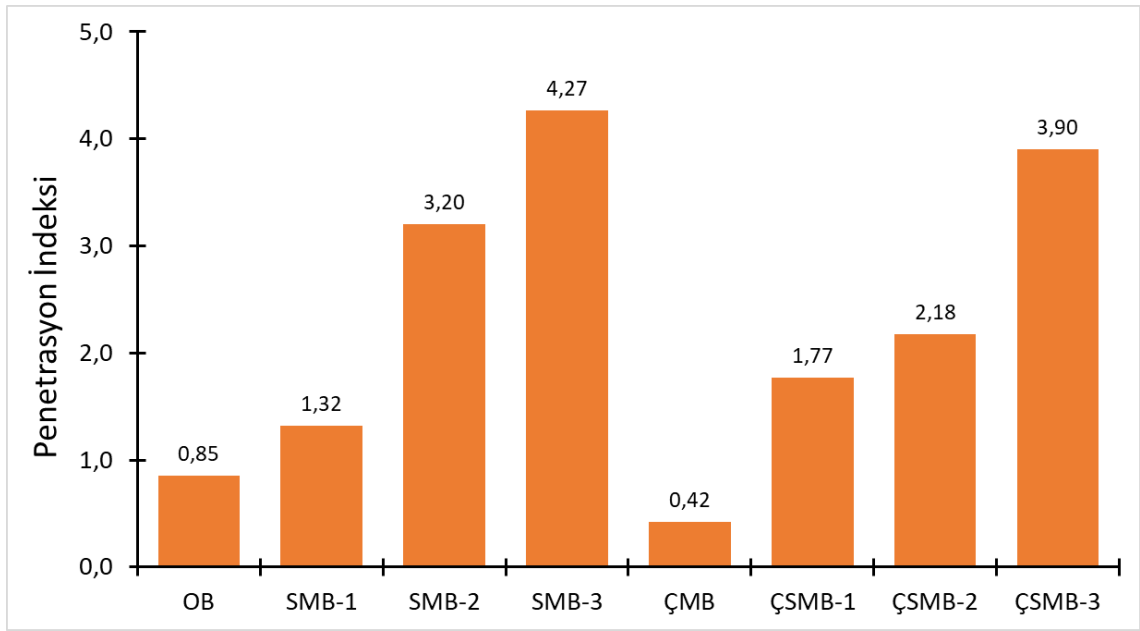
Şekil 4.2. Yumuşama noktası testi sonuçları

Şekil 4.2.'deki sonuçlara göre önceki bilimsel çalışmalarda olduğu gibi Sasobit® katkısı ile yumuşama noktası yüksek miktarlarda artmaktadır. Bu mevcut çalışmalarda çözülmesi beklenen bir problem olarak vurgulanmıştır. Çözümü noktasında bitümün diğer teknik özelliklerinde bir kayıp yaratmadan yumuşama noktasında düşüşü sağlayabilecek bir katkının optimum oranda Sasobit® modifiye bitüme katılması yönünde olmuştur. Bu tez çalışmasının bu problemin çözülmesine yönelik araştırmaları kapsamaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde bitüm ile uyumu bitümün sahip olduğu temel fiziksel ve mekanik özelliklere benzerlik yapısı olan bir katkı olarak İÇSA bitüm ağırlığına %1 kullanılarak Sasobit® modifiye bitüme ilave edilip ek bir modifikasyon yapılmıştır. SMB-3 hariç tüm numunelerde yaşlanma sonrasında yumuşama noktası artmıştır. Nitekim Şekil 4.2.'deki sonuçlar sadece %1 oranında İÇSA katkısının, SMB

modifiye bitümlerin yumuşama noktasında yaşlanmamış formda 15 °C'ye kadar kısa dönem yaşlanmış formlarında ise 7 °C'ye kadar düşüş sağladığını göstermiştir.

4.1.3. Penetrasyon indeksi analizi

Çalışma kapsamında Sasobit® IKA katkısı ve IÇSA ile üretilen modifiye bitümlerin ısıya karşı hassasiyetinin ortaya konulması amacıyla penetrasyon ve yumuşama noktası verileri kullanılarak penetrasyon indeksi analizi yapılmıştır. Hesaplanan PI değerleri Şekil 4.3.'te verilmiştir.

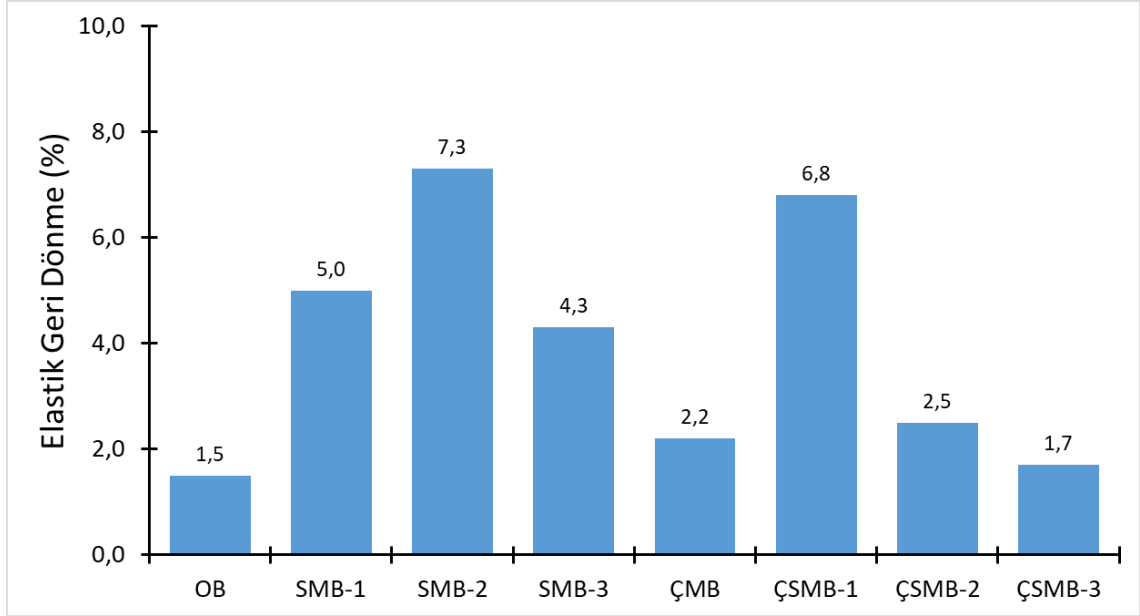


Şekil 4.3. Penetrasyon indeksi sonuçları

Şekil 4.3.'te verilen PI analizi sonuçlarından, farklı oranlarda Sasobit® IKA katkısı ile üretilen modifiye bitümleri işlem görmemiş OB'ye göre ısıya karşı duyarlılığı oldukça az olduğu, ancak IÇSA katkısı bitümü OB'ye göre daha duyarlı yapmaktadır. SMB bitümlü bağlayıcılarına IÇSA katkısının ilave edilmesi ile ısıya karşı duyarlılığın, SMB numunelerine göre bir miktar azaldığı ancak hala OB'ye daha dirençli olduğu görülmektedir. Ayrıca, PI analizi verilerinden, çalışma kapsamında üretilen bitümlü bağlayıcılar arasında ısıl hassasiyeti en düşük olan numunenin SMB-3, en hassas olan numune ise ÇMB kodlu numuneler olduğu sonucuna varılabilir.

4.1.4. Elastik geri dönme testi

Düktilite cihazında gerçekleştirilen ve polimer modifikasyonunun etkisinin net bir şekilde görülmesini sağlayan elastik geri kazanım deneyine ait sonuçlar Şekil 4.4.'te verilmiştir.



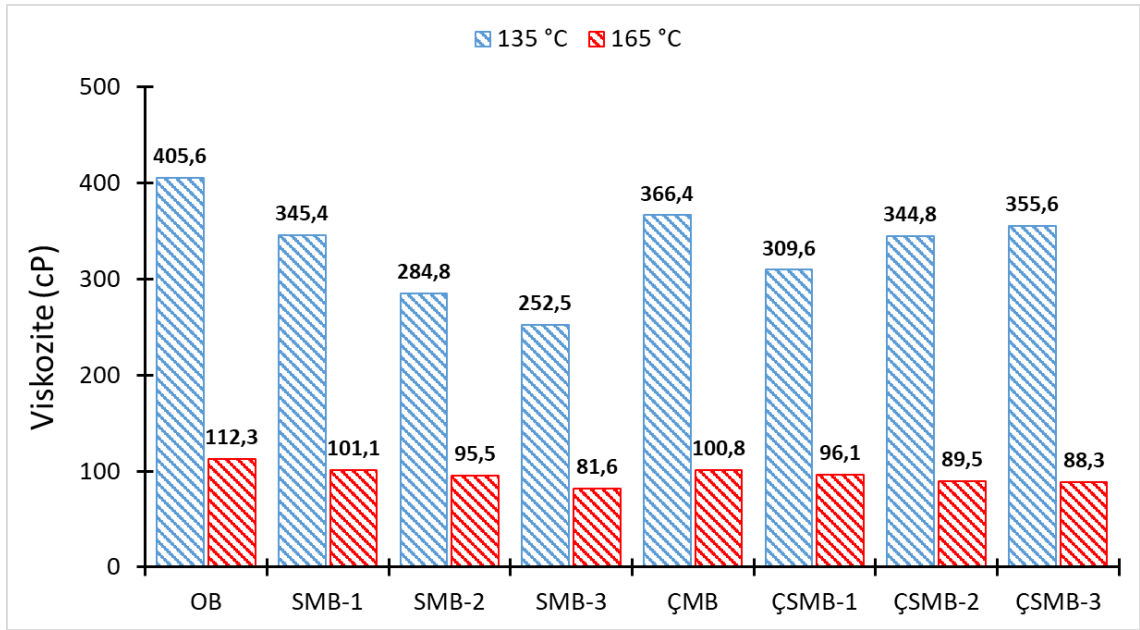
Şekil 4.4. Elastik geri dönme oranları

Şekil 4.4'te verilen elastik geri dönme sonuçlarına göre Sasobit® katkısı ile yapılan modifikasyonun elastik geri kazanım yüzdesinin sadece %1,5 olan OB'nin elastik özelliğini %4,3 ile %7,3 oranına kadar yükselttiği sonucuna varılmaktadır. Ancak, IÇSA katkılı ÇSMB-1 kodlu numune hariç diğer numunelerde artan elastik davranışın düştüğü görülmektedir. Elastik geri dönme deneyleri sonuçlarında elde edilen diğer vurgulanması gereken çıktı, %2 oranında Sasobit® katkılı modifikasyonunun en yüksek elastik geri dönme performansı sergilediğini, IÇSA katkılı modifikasyonda ise %1 oranında Sasobit® bileşiminde en yüksek değeri verdiğidir.

4.1.5. Brookfield dönel viskozite testi

Gerek yüksek sıcaklıklarda bitümlü bağlayıcıların akmaya karşı dirençlerini ortaya koymak gerekse de BSK veya tez kapsamında üretilen IKA'ların karıştırılma ve sıkıştırılma sıcaklıklarını belirlemek amacıyla yaygın olarak yapılan Brookfield dönel viskozite testi bir kamu kurumunda (gizlilik şartı olduğundan isim verilememektedir)

karşılıksız olarak ASTM D 4402 standardına uygun olarak yapılmıştır. 135 ve 165 °C sıcaklıklarında yapılan testlerin sonuçları Şekil 4.5.'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Viskozite sonuçları

Şekil 4.5.'te verilen viskozite sonuçları, Sasobit® modifikasyonu ile OB bitüme kıyasla viskozite değerlerinin düştüğü, ancak İÇSA ilavesiyle beraber viskozite değerlerinde belir bir artışların olduğunu ifade etmektedir. 135 °C'de yapılan testlerde katkı oranlarının değişimiyle meydana gelen değişim daha belirgin iken 165 °C'de yapılan analizlerde ise bitümün ısıya karşı duyarlı olması özelliğinden kaynaklı olarak sonuçların birbirine yakınsadığı görülmektedir.

Yukarıda ifade edildiği üzere, Brookfield dönel viskozite testi sonuçlarından ASTM D 4402 standardında belirtilen viskozite değer aralıklarına karşılık gelen sıcaklıkların belirlenmesi ile üretilmesi planlanan BSK veya İKA'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları belirlenebilmektedir. İlgili standartta belirtilen viskozite limit değerleri karıştırma sıcaklık aralığı için 170 ± 20 cP, sıkıştırma sıcaklık aralığı için ise 280 ± 30 cP olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan bu limit değerlere karşılık gelen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralığı her bir bitüm modifikasyonu için Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

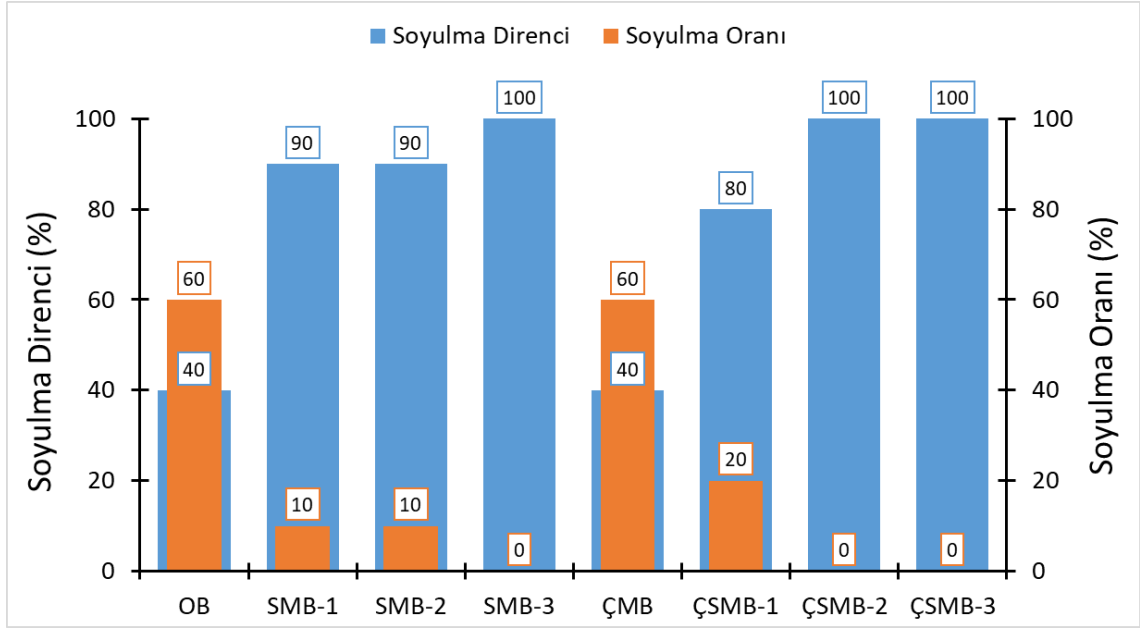
Çizelge 4.1. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları

Numune	Karıştırma Sıcaklığı (°C)		Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	
	Alt Limit	Üst Limit	Alt Limit	Üst Limit
OB	157,1	161,1	144,8	150,9
SMB-1	154,1	159,0	139,3	146,7
SMB-2	150,0	156,4	131,0	140,5
SMB-3	146,0	153,0	124,9	135,4
ÇMB	154,9	159,4	141,4	148,1
ÇSMB-1	151,8	157,4	134,9	143,4
ÇSMB-2	153,2	157,9	139,1	146,1
ÇSMB-3	153,6	158,1	140,1	146,9

Çizelge 4.1.'de verilen sonuçlara göre, Sasobit® ve İÇSA katkılarının orijinal bitüme göre karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını önemli miktarda azalttığı görülmektedir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında en fazla düşüş %3 oranında Sasobit® ile modifiye edilen SMB-3 kodlu numunede (karıştırma sıcaklığında yaklaşık 10-15 °C; sıkıştırma sıcaklığında ise yaklaşık 15-20°C) görülmektedir. İÇSA katkısı ile modifiye edilen bitümlerde ise OB'ye göre belirgin bir değişim görülmemiştir. Bununla beraber, İÇSA ilave edildiği SMB bitümlerin karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını OB'ninkine yaklaştırmıştır. Bunun sebebi olarak, İÇSA'nın bir reçine olarak yüksek sıcaklıklarda eriyebilirken, oda sıcaklığında hızlı kıvam alması ve yapışkanlık özeliği ile ilişkilendirilebilir.

4.1.6. Nicholson soyulma direnci testi

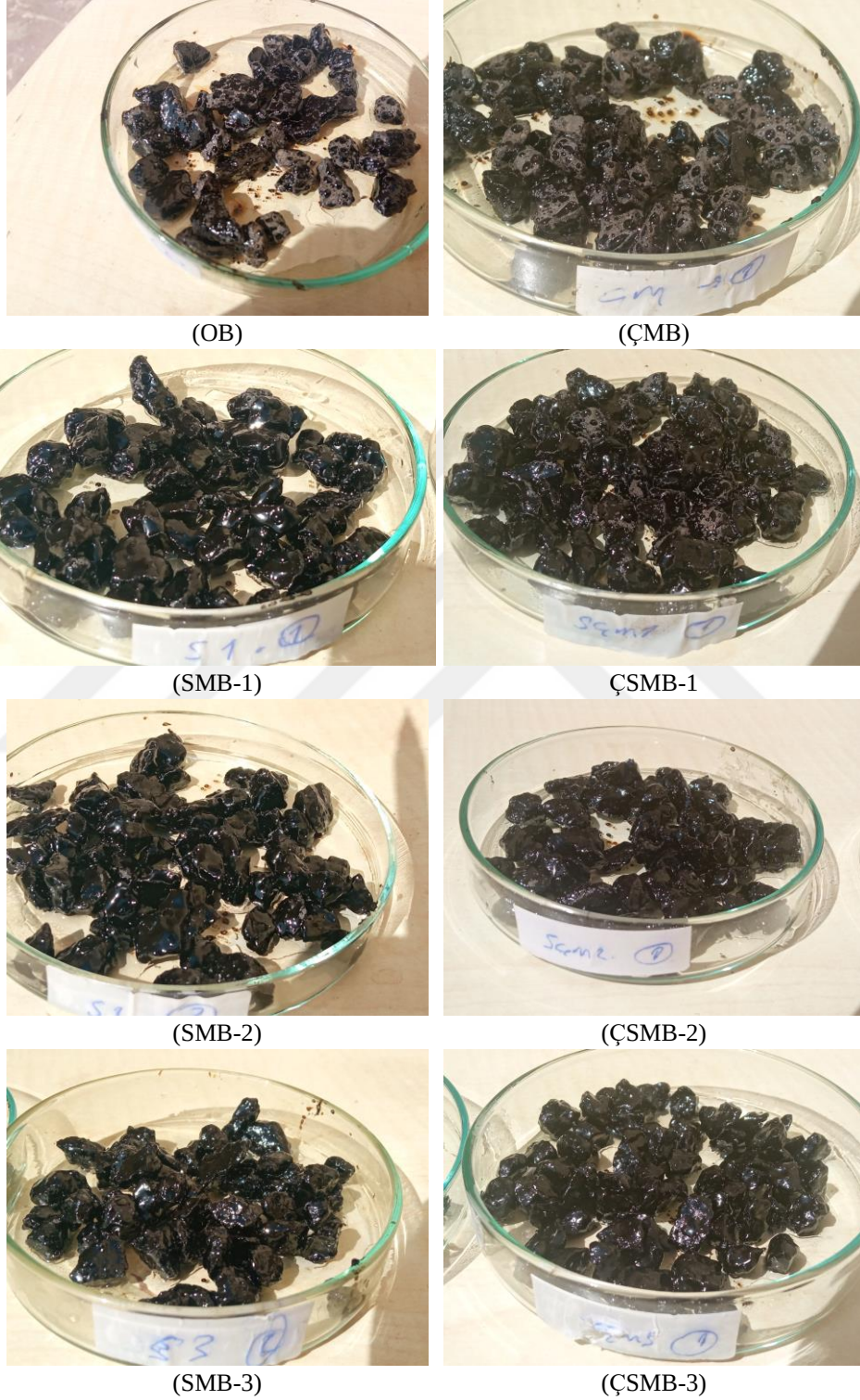
Bu çalışmada soyulma direnci, KTŞ'de sathi kaplamalarda kullanılacak kaba agrega özelliklerinde tanımlanan Nicholson soyulma yöntemiyle ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı oranlarda 2 tür katkı maddesi (İÇSA ve Sasobit®) ile hazırlan numuneler ile İKA üretiminde kullanılan bazalt agregası arasındaki soyulma direnci ortaya konulmuştur. Deneyler yaşlandırılmış modifiye bitümler üzerinde uygulanmış, deney sonuçları Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Soyulma direnci testi sonuçları

Şekil 4.6. incelendiğinde, OB numunesinin ile bazalt agregasının soyulma direncinin %40 olarak değerlendirilmiştir. Yani, OB'nin bazalt agregası yüzeyinden %60 oranında soyulduğu anlamını taşımaktadır. OB numunesinin sonucu dikkatlice incelendiğinde agrega yüzeyinden soyulmaların agregaların kenar ve köşeleri gibi kritik bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Sonuçlar doğrultusunda OB, KGM Teknik Şartnamesindeki (KGM, 2013) %60'lık soyulma direncini sınır değerini sağlamamaktadır. Ancak, 70/100 bitüme %1, 2 ve 3 oranında Sasobit® katkı maddesi eklendiğinde soyulma direncinde belirgin bir artış meydana gelmektedir. SMB-1 ve SMB-2'de %90 seviyelerine soyulma direnci değerlendirilirken SMB-3'te direncin %100 olduğu yani soyulmanın meydana gelmediği değerlendirilmiştir. Yanı sıra, orijinal bitüme katkı maddesi olarak sadece %1 oranında İÇSA ilave edildiğinde ise soyulma direncinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, İÇSA'nın yağsı bir yapıda olması ile ilişkilendirilmiştir. Son olarak orijinal bitüme %1 çam sakızı ile %1,2 ve 3 oranında Sasobit® ilave edildiğinde ise agrega ile bitüm arasındaki adezyon maksimum seviyeye çıktığı değerlendirilmiştir. Bu durumda, Sasobit®'in tek başına ya da ek bir katkı maddesi ile modifikasyonda kullanımının saf bitüm üzerinde soyulma direnci bakımından olumlu bir etkisi olduğunu kanıtlamaktadır. Diğer bir katkı maddesi olan İÇSA ise tek başına kullanıldığında saf bitüm üzerinde soyulma direnci bakımından bir etkisi olmadığı gözlemlenmektedir. Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Ulaştırma Laboratuvarında yapılan soyulma deneylerine dair görseller Şekil 4.7.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Soyulma direnci testi sonrası numune görüntüleri

Geleneksel bitümlü bağlayıcı testleri veriler ışığında, IKA katkılarından Sasobit® ve IÇSA birlikte kullanılması ile bitümün temel mühendislik özelliklerinde iyileşmelere meydana gelmektedir. Sasobit® katkısı ile aşırı yükselen yumuşama noktasında IÇSA katkısının ilavesi ile düşüş sağlanarak, literatürde sıklıkla vurgulanan probleme çözüm için bir seçenek olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır. Yine literatürde sıklıkla ifade edilen IKA karışımlarında soyulmaya karşı düşük direnç değerleri giderilmesi noktasında Sasobit® ve IÇSA birlikte kullanımının alternatif modifikasyon yöntemlerinden biri olarak değerlendirilebileceği Nicholson testi sonuçlarından ortaya konulmuştur. Ayrıca, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında 20°C'leri bulan düşüş ile önemli miktarda enerji tasarrufu ve sahada uygulanabilirlik ve işlenebilirlik açısından efektif iş gücü kullanımı sağlaması ile ekonomik ve çevre dostu bir IKA bitümlü bağlayıcı modifikasyonu fayda sağlayacağı açıktır.

4.2. Reolojik Bitümlü Bağlayıcı Testleri Sonuçları

4.2.1. Dinamik kesme reometresi (DSR) testi

SuperPAVE sınıflandırma sistemine göre yaşlandırılmamış ve kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcılara 6°C artışla 46°C ile 88°C sıcaklık değerleri arasında DSR deneyine tabi tutulmaktadır. Ancak, bitüme dair ön bilgi olması durumunda ilgili sistemde tanımlanan herhangi bir sıcaklıkta başlanabilmektedir. Tez çalışması kapsamında, 70-100 penetrasyon sınıfına sahip bitüm içi yapılan ön çalışmalardan DSR deneylerinin 58°C'den başlatılması kararlaştırılmıştır. SuperPAVE sınıflandırma sistemine göre yaşlandırılmamış ve kısa dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerine uygulanan deney sonuçları üzerinden kalıcı deformasyon bir başka deyişle tekerlek izine karşı direnç özellikleri belirlenebilmektedir. Değerlendirme DSR testi ile elde edilen iki parametre (G^* ve faza açısı (δ)) arasında tanımlanan ve $G^*/\sin(\delta)$ bağıntısı ile hesaplanan kompleks modül (G') değeri üzerinden yapılır. SuperPAVE sisteminde her bir yaşlanma formuna özel olarak kompleks modül (G') için sınır değerler tanımlanmıştır. Bunlar yaşlandırılmamış bitümlü bağlayıcılar için 1000 Pa, kısa dönem yaşlandırılmış olanlar içinse 2200 Pa'dır. Bu değerler ulaşılan sıcaklık değerleri yenilme sıcaklığı olarak tanımlanırken, sisteme göre tanımlı bir alt sıcaklık ise yüksek sıcaklık sınıfını verir. Uzun dönem yaşlandırılmış ise G^* ve faza açısı (δ) arasında tanımlanan ve $G^*.\sin(\delta)$ bağıntısı ile kompleks modül (G') değeri belirlenir ve bu modül için sınır değer 5000 kPa'dır.

Çalışmada 70/100 orijinal bitüm %1, %2 ve %3 Sasobit® ve %1 İÇSA ile modifiye edilmesi ile üretilen bitümlü bağlayıcı numunelerine SuperPAVE tasarım ve sınıflandırma yöntemine göre yaşlanmamış, kısa dönem yaşlandırılmış ve uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcılara formlarına uygulanmıştır. Burada sırasıyla anılan yaşlanma formlarına sahip bitümlü bağlayıcılara uygulanan DSR testi sonuçları verilmiştir.

Yaşlandırılmamış bitümlü bağlayıcıların DSR test sonuçları Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yaşlandırılmamış bitümlerin $G^*/\sin(\delta)$ (Pa) verileri

Sıcaklık (°C)	OB	SMB-1	SMB-2	SMB-3	ÇMB	ÇSMB-1	ÇSMB-2	ÇSMB-3
58	3426,0	5265,0	7922,0	8863,0	1608,0	4921,0	6306,0	19620,0
64	1507,0	2439,0	3653,0	4058,0	760,5	2236,0	2977,0	9611,0
70	731,1	1193,0	1817,0	2043,0	-	1076,0	1480,0	4735,0
76	-	599,5	931,0	1110,0	-	540,3	766,4	2444,0
82	-	-	-	612,7	-	-	-	1245,0
88	-	-	-	-	-	-	-	601,5
PG (°C)	64	70	70	76	58	70	70	82

Çizelge 4.3. Yaşlandırılmamış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri

Sıcaklık (°C)	OB	SMB-1	SMB-2	SMB-3	ÇMB	ÇSMB-1	ÇSMB-2	ÇSMB-3
58	78,9	76,6	72,9	70,6	77,6	76,4	71,4	68,3
64	81,8	79,2	75,3	73,1	80,8	79,1	73,5	71,1
70	84,1	81,2	77,1	74,9	-	81,3	75,2	73,7
76	-	82,9	78,6	76,0	-	83,1	78,8	75,5
82	-	-	-	79,6	-	-	-	77,3
88	-	-	-	-	-	-	-	82,5

Çizelge 4.2.'de görüleceği üzere, ÇMB kodlu bitüm en düşük kompleks modülü değerlerine sahiptir. OB bitümlü bağlayıcı ise ÇMB' den daha yüksek kompleks modülü değerine sahip olduğu görülmektedir. İÇSA katkısının kullanıldığı ÇMB'nin OB'ye nazaran az bir miktarda da olsa daha fazla elastik davranışa sahip olduğunu göstermektedir. Sasobit® katkılı bitümler ise OB ve ÇMB'ye oranla oldukça yüksek kompleks modülü değerlere sahiptir. Bu Sasobit® katkısının literatürde de yer aldığı üzere daha kıvamlı hale getirdiği göstermektedir. Ancak, Sasobit® ve İÇSA katkılarını

tanımlanan oranlarda birlikte bitümün modifiyesinde kullanılmasıyla daha yüksek sıcaklık koşullarına daha dirençli numuneleri ortaya çıkarmıştır. Bu durum özellikle ÇSMB-3 kodlu numunede belirgindir. Zira ÇSMB-3 numunesinin yenilme sıcaklığı 88, PG sınıfı ise 82 olarak tayin edilmiştir. Çizelge 4.3.'te yaşlandırılmamış bitümlü bağlayıcılar için verilen faz açıları (δ°) verilerinde ise kompleks modül üzerinden yorumlanan dayanımı desteklemektedir.

Kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların DSR test sonuçları Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin $G^*/\sin(\delta)$ (Pa) verileri

Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	KOB	KSMB-1	KSMB-2	KSMB-3	KÇM	KÇSMB-1	KÇSMB-2	KÇSMB-3
58	4566,0	8582,0	13130,0	19800,0	6643,0	14680,0	19800,0	27510,0
64	2501,0	6120,0	6415,0	9872,0	2132,0	6392,0	9057,0	13710,0
70	1890,0	3373,0	3558,0	4902,0	-	4887,0	6469,0	9872,0
76	-	2115,0	1280,0	3158,0	-	2086,0	2147,0	4902,0
82	-	-	-	1915,0	-	-	-	2189,0
88	-	-	-	-	-	-	-	-
PG ($^\circ\text{C}$)	64	70	70	76	58	70	70	82

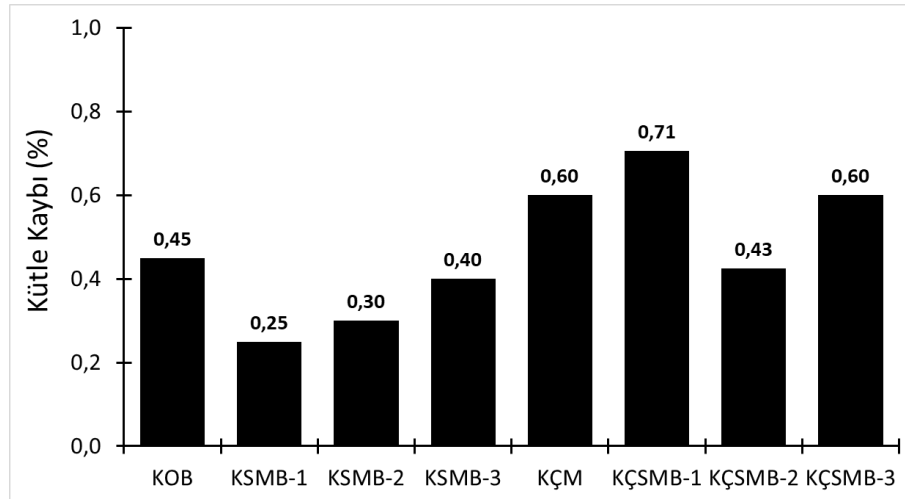
Çizelge 4.5. Kısa dönem yaşlandırılmış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri

Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	KOB	KSMB-1	KSMB-2	KSMB-3	KÇM	KÇSMB-1	KÇSMB-2	KÇSMB-3
58	73,0	71,5	69,3	66,0	70,7	66,0	63,7	62,9
64	74,2	69,1	66,8	63,4	74,6	71,8	65,9	63,8
70	78,1	72,9	69,5	67,3	-	74,6	72,7	70,2
76	-	78,7	71,0	69,5	-	76,0	73,0	71,9
82	-	-	-	76,1	-	78,6	76,8	76,1
88	-	-	-	-	-	-	-	78,6

SuperPAVE sınıflandırma sistemine göre yaşlandırılmamış ve kısa dönem yaşlandırılmış bitümlü bağlayıcıların yenilme sıcaklıklarının benzer olması gerekmektedir. Çizelge 4.2. ile Çizelge 4.4.'teki veriler karşılaştırıldığında değerlerin yenilme sıcaklık değerlerinin birbirleri ile aynı olduğu görülecektir. Çizelge 4.5.'te verilen faz açıları değerleri kompleks modül değerlerinin yansıttığı visko-elastik davranışı ile uyumludur. Ancak, yaşlanmadan kaynaklı olarak kompleks modül

değerlerinde yaşlanmamış olanlara nazaran daha yüksek faz açılarında ise daha düşük değerler ortaya çıkmıştır. Gerek yaşlandırılmamış gerekse kısa dönem yaşlandırılmış numunelere yapılan DSR test sonuçlarından daha önce ifade dildiği üzer kalıcı deformasyona ya da tekerlek izine karşı direnç performansı belirlenmektedir. Yenilme sıcaklık değeri diğerlerine göre daha yüksek olan numunelerin daha dirençli olduğunu gösteren DSR sonuçlarından, en iyi performansı gösteren ve yenilme sıcaklığı 88°C olan ÇSMB-3 iken en düşük performans ise yenilme sıcaklığı 64°C olan IÇSA katkılı bitümü belirten ÇM kodlu bitüm olmuştur. 70 °C yenilme sıcaklığına sahip OB bitümün ağırlığında %1 ile 3 arasında Sasobit® katkısı ile üretilen SMB kodlu modifiye bitümlerin yenilme sıcaklığını yükselttiği yani tekerlek izine karşı direnci artırdığı görülmüştür. Ancak, ÇSMB modifikasyonları SMB modifikasyonlarına nazaran daha iyi performansa sahiptir.

SuperPAVE sınıflandırma sisteminde bitümün kısa dönem yaşlandırılması sonrasında kütle kaybı analizi yapılması zorunlu bir husustur. SuperPAVE sınıflandırma sisteminde bitümün RTFO deneyi sonrası maksimum kütle kaybının %1 olması istenmektedir (ASTM D6373, 2021). Bu çalışma kapsamında modifiye edilen ve kısa dönem yaşlanmaya maruz bırakılan numunelerin kütle kaybı oranları ortaya Şekil 4.8.'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. Bitümlerin RTFO sonrası kütle kaybı oranları

Şekil 4.8.'de verilen grafikten görüleceği üzere sınır değeri %1 kütle kaybı hiçbir modifikasyonda görülmemiştir. En yüksek kütle kaybı KÇSMB-1 kodlu numunede en düşük ise KSMB-1 kodlu numune hesaplanmıştır.

Uzun dönem yaşlandırılmış bitüm numunelerin uygulanan DSR testi sonuçları Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Uzun dönem yaşlandırılmış bitümlerin $G^* \cdot \sin(\delta)$ (kPa) verileri

Sıcaklık (°C)	UOB	USMB-1	USMB-2	USMB-3	UÇM	UÇSMB-1	UÇSMB-2	UÇSMB-3
25	511,1	2038,0	1274,6	1656,3	616,9	1356,0	3344,0	2972,0
22	628,4	2776,0	2902,2	4187,0	916,9	3524,0	4645,0	4096,0
19	1070,7	3146,4	3969,0	5364,0	1425,7	4790,0	4767,0	6205,0
16	1860,0	3558,4	5500,0	-	2959,5	7089,0	7362,0	-
13	2590,0	4146,0	-	-	4385,2	-	-	-
10	3970,5	5876,0	-	-	5939,5	-	-	-
7	5070,5	-	-	-	-	-	-	-

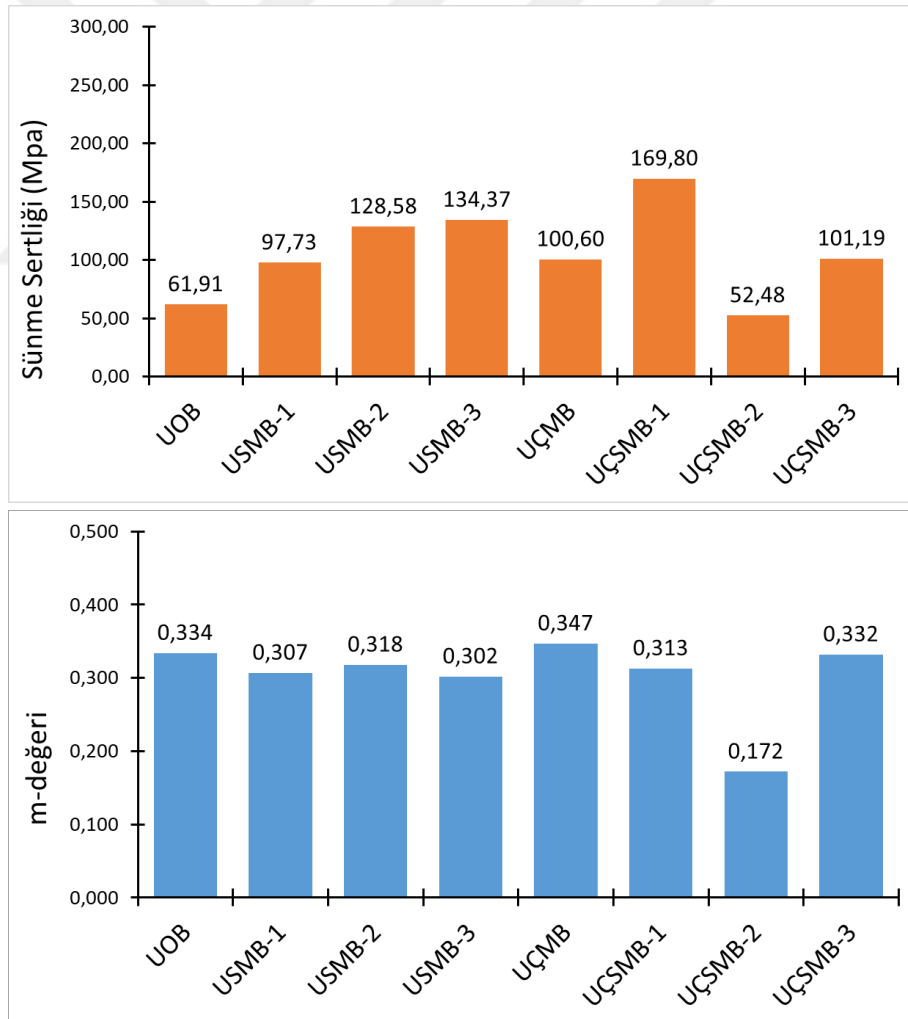
Çizelge 4.7. Uzun dönem yaşlandırılmış bitümlerin faz açısı (δ°) verileri

Sıcaklık (°C)	UOB	USMB-1	USMB-2	USMB-3	UÇM	UÇSMB-1	UÇSMB-2	UÇSMB-3
25	53,80	38,74	41,28	40,57	56,75	47,75	43,94	41,59
22	50,42	37,16	39,68	39,61	50,42	40,43	38,65	40,97
19	47,82	36,33	34,63	34,66	46,99	35,85	37,04	36,08
16	46,99	35,85	32,41	-	41,28	33,97	37,16	-
13	46,64	35,23	-	-	40,35	-	-	-
10	45,75	33,58	-	-	38,68	-	-	-
7	43,17	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de verilen uzun dönem yaşlandırılmış numuneleri DSR sonuçları, SuperPAVE sınıflandırma sisteminde bitümlü bağlayıcının yorulmaya karşı direncini hakkında bilgi verir. Burada, yaşlandırılmamış ve kısa dönem yaşlandırılmış numunelerde yapılan değerlendirme yönteminin tersine, yenilme sıcaklığı düşük olan numunelerin yorulmaya karşı dayanımlarının yüksek olduğudur. Buna göre, UOB kodlu modifikasyon işlemi görmemiş bitüm numunesi en iyi yorulma direncine sahipken, en kötü yorulma direnci ise USMB-3 kodlu bitüm numunesidir.

4.2.2. Eğilme kirişi reometresi (BBR) testi

Hazırlanan numunelere PAV deneyi ile uzun süreli yaşlandırma uygulandıktan sonra numunelerin düşük sıcaklıklardaki çatlakların oluşumuna karşı direncini belirlemek amacıyla BBR deneyi uygulanmıştır. BBR deneyinde, deneye tabi tutulan bitümün kullanılacağı kaplamanın çatlama göstermeden hizmet vereceği en düşük sıcaklık belirlenmeye çalışılmaktadır. PAV ile uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kullanıldığı BBR testinde deney başlangıç sıcaklığı -18°C tutulmuştur. Deneysel sonuçların; SuperPAVE sınıflandırma sistemine tanımlanan sünme sertliği (St) için maksimum 300 MPa ve zamana bağlı olarak St değerinin değişiminin sertlik-zaman eğrisinde 60. sn.'deki teğetin eğimini ifade eden m-değerinin de minimum 0,300 şartını sağladıklarından farklı bir sıcaklıkta BBR ölçümleri yapılmamıştır. Şekil 4.9.'da BBR deneyine ait -18°C sıcaklıkta yapılan BBR deneylerinin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.9. BBR testi sonuçları

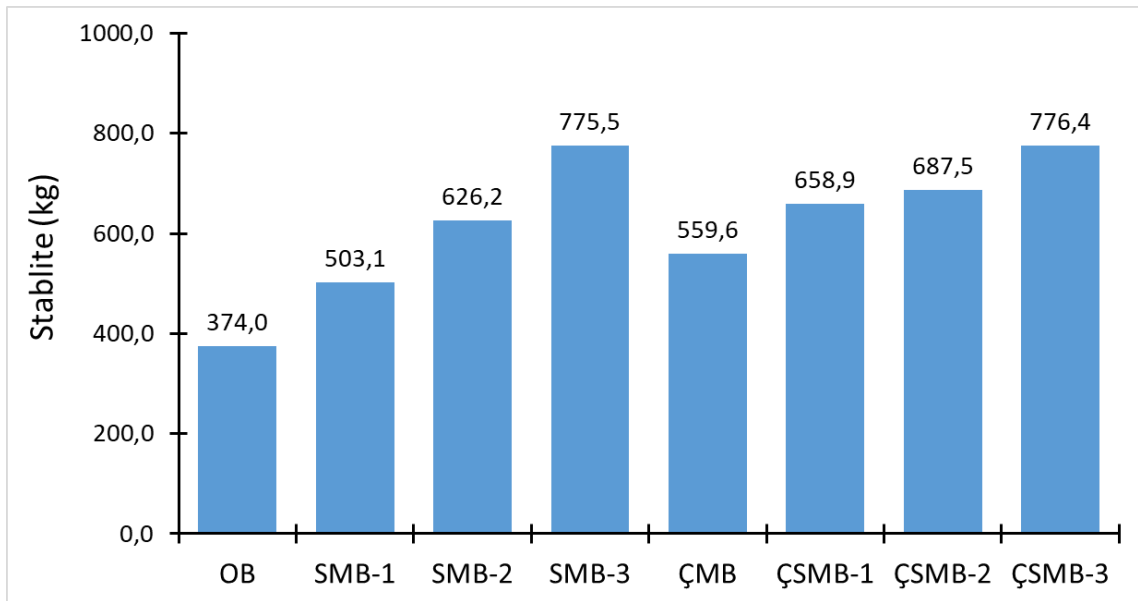
Şekil 4.9.'da verilen modifiye bitüm numunelerinin BBR verileri incelendiğinde -18°C sıcaklıkta UÇSMB-2 hariç tüm numunelerin kriterleri tanımlanan SuperPAVE sınıflandırma sistemi şartını sağladığı görülecektir. Şartları sağlayan tüm bitüm numuneleri içerisinde en yüksek sünme sertliğine sahip olan UÇSMB-1 kodlu bitümlü bağlayıcı, en düşük değere sahip olan ise modifikasyon işlemine tabi tutulmamış UOB numunesidir. Numunelere ait m-değerleri birbirine oldukça yakın ancak en yüksek m-değeri UÇMB kodlu bitüm numunesindedir.

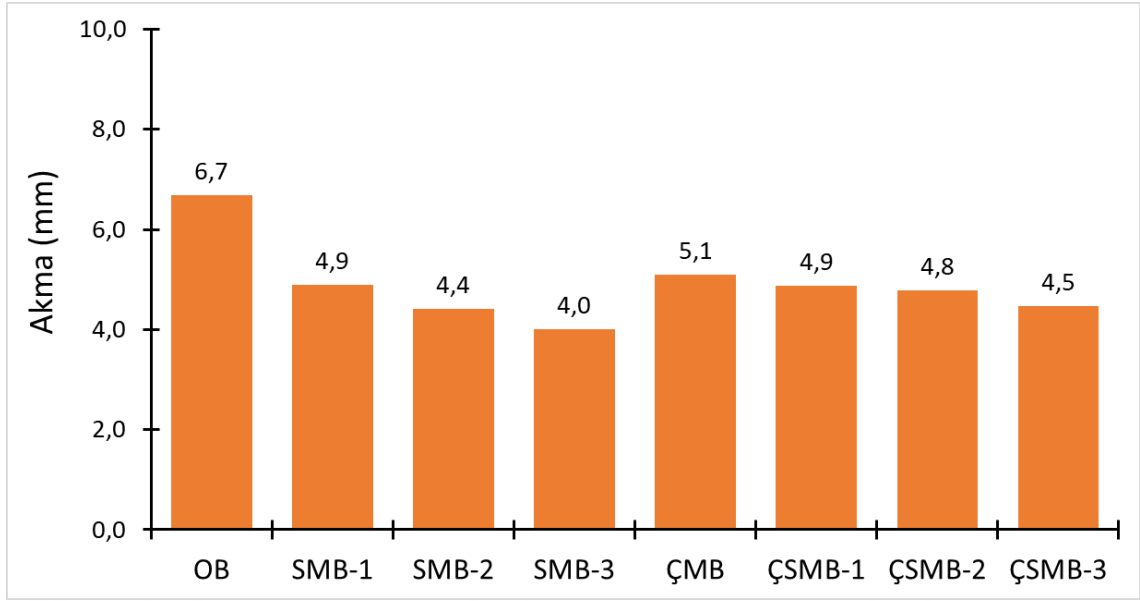
4.3. IKA Performans Testleri

Hazırlanan Marshall briketlerine stabilite ve akma deneyleri ve indirekt çekme mukavemeti deney sonuçları bu bölümde verilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

4.3.1. Marshall stabilite ve akma testi

Bu tez çalışmasında asfalt enstitüsü tarafından geliştirilen bir bağıntı kullanılarak hesaplanan %5,56 oranında bitüm ile IKA numunelerinin Marshall tasarım ilkeleri izlenmiş, IKA karışım için kullanılan agrega gradasyonu için KTŞ'de tanımlana TMA binder gradasyon seçilmiştir. Marshall stabilite ve akma testi sonuçları Şekil 4.10.'da verilmiştir.



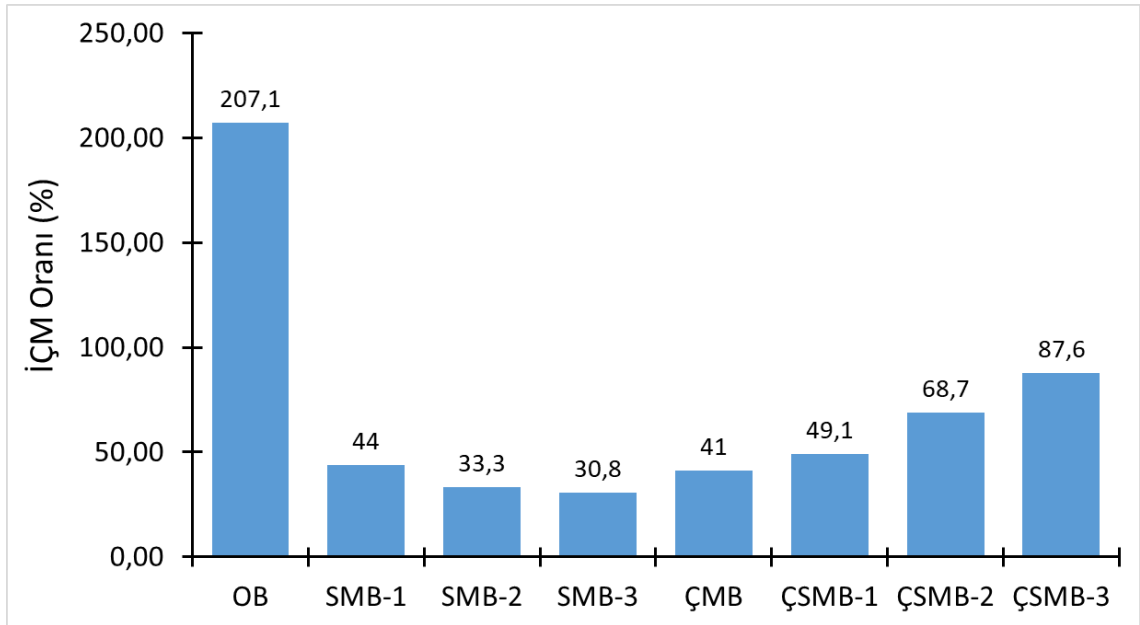


Şekil 4.10. Marshall stabilite ve akma testi sonuçları

Şekil 4.10.'da verilen Marshall stabilite ve akma testleri sonuçları, bitüme eklenen Sasobit® katkısının oranı arttıkça stabilite değerinde arttığını ve akma miktarının da stabilite değerinin artması ile düştüğünü ortaya koymaktadır. OB bitüme göre %1 oranında IÇSA katkılı ÇMB kodlu modifiye bitümün stabilite değerinde belirgin bir şekilde yükselme ve akma miktarında ise (SMB modifikasyonları kadar olmasa da) önemli miktarda düşme olmuştur. ÇSMB modifikasyonlarında ise ÇMB'nin sahip olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerinde kaynaklı olarak stabilite değerlerinde azalış ve akma değerlerinde bir miktar artış gözlemlense de OB'ye göre her iki parametrede de üstün performans sergilemektedir. KGM Teknik Şartnamesi kriterlerini Marshall stabilite (min. 750 kg) ve akma (2-4 mm) değerlerini çoğu numune sağlamamıştır. Zira bu tez kapsamında Marshall tasarımı yapılmamıştır dolayısıyla bir optimum bitüm oranı üzerinde çalışılmamıştır. Bu nedenle, ölçülen değerler düşük kalmıştır.

4.3.2. İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) testi

Laboratuvar ortamında BSK'lerin su veya nem etkilerine karşı dayanımının belirlenmesinde kullanılan İÇM testi, tanımlı oranlarda Sasobit® ve IÇSA katkıları ile modifiye edilen bitümler ile hazırlanan İKA numunelerine koşullu ve koşulsuz durumlar için uygulanmıştır. İndirekt çekme mukavemeti (İÇM) testi sonucunda ortaya çıkan İÇM oranları Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4.11. İÇM oranları

Şekil 4.11.'de verilen İÇM oranları verilerinden Sasobit® katkısının ile İKA su hasarına karşı dayanımın azaldığı ancak %1 oranında İÇSA katkısı ile karışımın neme karşı dayanımının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlar Nicholson soyulma testi analizlerinde elde edilen sonuçlar benzer olmakla beraber, İÇSA katkısının Sasobit® modifiye bitümlü bağlayıcıya ilavesi ile üretilecek İKA'nın soyulma problemine çözüm olacağı mekanik değerlendirme noktasında da İÇM analizi ile teyit edilmiştir. Ölçülen değerlerin düşük seviye kalmış olması, bu tez kapsamında bitüm oranı ile çalışılmamış olmasından kaynaklanmaktadır.

4.4. Fayda/Maliyet Analizi

Modifiye bitümlerden üretimi yapılacak İKA'ya yapısal ve fonksiyonel performansın iyileştirmenin yanında ekonomik ve çevreci bir çözüm olması beklenir. Üretilen dayanımı yüksek karışımların maliyetinin düşük olması gerek modifikasyonda kullanılacak malzemenin gerekse de karışım tipinin tercih edilmelerini sağlar. Tez kapsamında yaygın olarak kullanılan Sasobit® katkısının ve İÇSA'nın ticari amaçlarla üretilen katkıları olduğu, ancak kullanılmaları ile üretim ve uygulama sıcaklıklarında sağlanacak düşüşler ile ekonomik anlamda nasıl bir çözüm sunacağı bu bölümde fayda/maliyet analizi ile ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.8.' de asfalt üretimi sırasında IKA kullanılması koşuluyla elde edilecek olan enerji tasarrufu hesaplamaları için gerekli bilgiler mevcuttur (Şahin, 2019).

Çizelge 4.8. Plentte harcanan enerji miktarı

Miktar ve Sıcaklık	Harcanan Enerji (kW)	Enerji Tasarrufu (25°C için) (%)	Enerji Tasarrufu (kW)
1 ton asfalt	2,5-3,5	13,5	0,33-0,45
1 ton asfalt için agrega 160°C (952-958 kg)	74	13,5	9,62
1 ton asfalt için bitüm 160°C (42-48 kg)	74	13,5	9,62

Çizelge 4.8.'de görüldüğü üzere üretim sırasında ton başına %13,5 enerji tasarrufu söz konusudur. Bu yaklaşık olarak 19,5 kW gibi bir enerjiye denk gelmektedir. 2022 yılı verilerine göre sanayi kuruluşlarında elektrik bedeli 2,62 TL/kW olarak hesaplanmıştır (encazip.com). Buda asfalt üretiminde IKA'nın BSK'ye göre 51 TL gibi bir tasarruf sağladığı anlamı taşımaktadır. Enerji tasarrufundan ortaya çıkan maliyet avantajını ek katkıdan doğacak olan maliyet ile karşılaştırmak gerekmektedir. Çünkü kullanılacak katkılarında maliyetleri hesaba katılmalı, bu hesaplar doğrultusunda daha gerçekçi sonuçlar elde edilecektir. Bitüm fiyatlarına yönelik ülkemizde bulunan rafinerilerinde 2022 yılı için güncel satış fiyatları ilgili kurumların web sayfasında Çizelge 4.9.'daki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.9. Bitüm birim fiyatları

Ürün Tanımı	Rafineri	Rafineri Satış Fiyatı (TL/TON)	KDV (TL/TON)	KDV Dâhil Satış Fiyatı (TL/TON)	KDV Hariç Kara Dolum Servis Ücreti (TL/TON)
70/100 Bitüm	İzmit	9.015,00	90,15	9.105,15	5,19
	Kırıkkale				
	Batman				

Çizelge 4.9.'da tüm rafinerilerde 1 ton 70/100 bitüm için KDV dahil 9.105,15 TL'ye satışa sunulmuştur (Tüpraş, Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022).

IKA karışımlarından Sasobit®'in kg fiyatı ortalama yaklaşık 15 TL'dir (alibaba, Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022). IÇSA'nın fiyatı ise yaklaşık 80 TL/kg'dır. Bu tez çalışmasında IKA numuneleri üretiminde kullanılan bazaltın satış fiyatı ise ortalama 40 TL/ton civarındır.

Hatırlatılması gerekirse, asfalt enstitüsü tarafından tanımlanan yöntemle çalışma kapsamında TMA binder agrega gradasyonu için başlangıç optimum bitüm oranı %5,56 olarak belirlenmiştir. Modifiye bitümler sırasıyla %1-2-3 oranında Sasobit®, %1 çam sakızı ve %1-2-3 Sasobit®'e ek olarak %1 çam sakızı ilavesiyle yapılmıştır. Her bir modifikasyon parametresi için IKA karışımında kullanılan tüm bileşenlerin miktarı ve miktarına karşılık gelen 1 ton üretim IKA üretim maliyet verileri Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. 1 ton IKA ve BSK maliyetleri

Bitüm İsmi	70/100 bitüm miktarı	Sasobit® miktarı	Çam sakızı miktarı	Agrega miktarı	1 ton Maliyeti (TL)	Plentte Üretim Enerji Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)
OB	55,6 kg	0	0	1.000 kg	517,48	393,00	910,48
SMB-1	55,6 kg	0,556 kg	0	1.000 kg	525,10	340,60	865,70
SMB-2	55,6 kg	1,112 kg	0	1.000 kg	532,72	340,60	872,60
SMB-3	55,6 kg	1,668 kg	0	1.000 kg	540,33	340,60	880,93
ÇMB	55,6 kg	0	0,556 kg	1.000 kg	559,32	340,60	899,92
ÇSMB-1	55,6 kg	0,556 kg	0,556 kg	1.000 kg	566,92	340,60	907,52
ÇSMB-2	55,6 kg	1,112 kg	0,556 kg	1.000 kg	574,51	340,60	915,11
ÇSMB-3	55,6 kg	1,668 kg	0,556 kg	1.000 kg	582,28	340,60	922,88

Çizelge 4.10.'daki verilere incelendiğinde genellikle IKA üretimlerinin normal BSK üretimine göre daha düşük maliyetli olduğu görülecektir. Ayrıca, IKA'ların kolay işlenebilmesi, çalışma alanına daha kolay uygulanması, yol açılış sürelerini kısaltması vb. gibi maliyete olumlu yönde etki eden birçok avantajlarının olduğu dikkate alındığında geleneksel BSK'ye nazaran IKA'nın esnek üstyapı inşasında kullanılması sosyo-ekonomik ve çevresel boyutta önemli yararlar sunacağı açıktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 70/100 bitüme bitüm ağırlığınca %1, %2 ve %3 oranında Sasobit® ve %1 oranında IÇSA eklenip modifiye edilmiştir. Üretilen modifiye bitümlerin fiziksel ve reolojik özellikleri temel bitüm testleri ve SuperPAVE sınıflandırma sisteminde tanımlanan testler ile belirlenmiştir. Asfalt enstitüsü tarafından başlangıç optimum bitüm oranı yöntemi ile belirlenen %5,56 bitüm oranı ile her bir modifiye bitüm kullanılarak TMA binder tabakası için Marshall tasarım/üretim esasları çerçevesinde IKA numuneleri hazırlanmıştır. Üretilen IKA numunelerine Marshall stabilite ve akma testinin yanı sıra indirekt çekme mukavemeti testi uygulanmıştır. Elde edilen tüm testler ve analizler neticesinde tez çalışması kapsamında aşağıda sıralanan sonuçlar ortaya çıkmıştır.

1. Sasobit® katkısı ile modifiye edilen bitümün penetrasyon değerinde belirgin düşüş, IÇSA katkısı ile modifiye edilen bitümde ise artış görülmüştür. Ancak tanımlanan oranlarda Sasobit® ve IÇSA katkısının birlikte kullanılması ile penetrasyon değerlerinde bir denge oluşmuştur.
2. Sasobit® katkısı ile modifiye edilen bitümün yumuşama noktasında değerinde belirgin aşırı yükselme, IÇSA katkısı ile modifiye edilen bitümde ise düşüş meydana gelmiştir. Ancak, tanımlanan oranlarda Sasobit® ve IÇSA katkısının birlikte kullanılması ile yumuşama noktası değerlerinde bir denge oluşmuştur.
3. Bitüm ısıl değişime karşı hassasiyeti Sasobit® katkısı ile düşmüştür, ancak IÇSA ve Sasobit® katkılı bitümde daha az düşüş görülmüştür. Sasobit® ve IÇSA katkılarının bir arada kullanılmaları ile yalnız kullanılmalarında görülen ısıl hassasiyetteki değişim her ikisindeki etkiyi yansıtır şeklindedir.
4. Sasobit® ve IÇSA katkılı bitümlü bağlayıcılarda elastik geri dönme oldukça düşük değerlerde kalmıştır.
5. Modifikasyonlar neticesinde bitümlü bağlayıcıların viskozitesinde belirgin düşüş yaşanmış, bu durum numuneleri karıştırılma ve sıkıştırılma sıcaklıklarını 15-20 °C arasında düşürmüştür.
6. Nicholson soyulma direnci deney sonuçlarına göre Sasobit® ve IÇSA katkılılarının bitümün soyulma direncini artırdığı görülmüştür.

7. RTFO deneyleri sonucunda, tüm modifiye bitümlerde izin verilen %1'lik kütle kaybının altında kayıplar yaşanmıştır.
8. Sasobit® ve IÇSA katkıları ile modifiye edilen bitümlerin tekerlek izine karşı dirençlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak, yorulma direncin de ise düşüş gerçekleşmiştir.
9. -18 °C yapılan BBR test sonuçlarında UÇSMB-2 hariç tüm modifikasyonlarda deney şartı sağlanmıştır. Test sonuçları, Sasobit® ve IÇSA katkıları ile modifiye edilen bitümlerin termal çatlak dayanımlarında iyileşme görülmüştür.
10. Marshall stabilite ve akma tayini testi sonuçları Sasobit® ve IÇSA katkıları ile modifiye edilen bitümlerin performanslarında iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur.
11. İÇM testi sonuçlarına göre Sasobit® ve IÇSA katkıları ile modifiye edilen bitümlerin suya hasarlarına karşı dirençlerinde artan oranlarda iyileşmeler meydana gelmiştir.
12. Fayda/maliyet analizlerinde Sasobit® ve IÇSA katkıları ile kodifiyesi neticesinde ton başına %13,5 enerji tasarrufu hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamı geliştirmeye açık konuları kapsamaktadır. İleri çalışmalarda, çalışmadan kullanılan katkıların oranlarının geniş bir aralıkta tanımlanarak daha kapsamlı araştırmalar yapılabilir, farklı karışım sıcaklıklarında bitümlü bağlayıcılar ile sıcak karışım hazırlanıp performans ölçümleri yapılabilir, üretilen numuneler için kimyasal analizler ile bitümlerde meydana gelen değişim ortaya konabilir, temel ve ileri görüntülüne teknikleri ve işleme analizleri ile hazırlanacak bitümlü karışımların sol-gel formları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Bakar, S. K. A., Kamaruddin, N. H. M., Nayan, N., & Yusoff, N. I. M., 2014, Warm Mix Asphalt Technology: A Review. *Jurnal Teknologi*, 71(3).
- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Hainin, M. R., Oluwasola, E. A., Yusoff, N. I. M., & Hassan, N. A., 2016, High Temperature Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures with Nanoclay and Chemical Warm Mix Asphalt Modified Binders. *Journal of Cleaner Production*, 122, 326-334.
- Ahmedzade, P., 2013, The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 38, 285-291.
- Ahmedzade P, Kuloğlu N, Ahmedzade M, Karakaş A. S., Yılmaz M., Kuloğlu M., “Saf ve SBS Modifiyeli Bitümlerin Klasik ve Superpave Yöntemleriyle Reolojik Yapılarının İncelenmesi” DPT, Proje No: 2005K120440.
- Airey, G. D., 2002, Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16:8, 473-487.
- Akiseti, K., 2008, Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures, Yüksek Lisans Tezi, Clemson Üniversitesi.
- Akisetty, C. K., Lee, S. J., & Amirkhanian, S. N., 2009, High Temperature Properties of Rubberized Binders Containing Warm Asphalt Additives, *Construction and Building Materials*, 23(1), 565-573.
- Alataş T., A. İstek, 2019, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 8 (3), 985-998.
- Al-Hadidy, A. I. and Tan, Y. Q., 2009, Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements, *Construction and Building Materials*, 23:8, 2941-2950.
- Alibaba, 2022, https://www.alibaba.com/product_detail/SASOLWAX_1600302050275.html?m=a2700.galleryofferlist_normal_offer.d_title.5bda7924pj2RU9, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Alibaba, 2022, <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Bitumen-60-70-80-100-Bitumen-50040513790.html>, [Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2022].
- Arason, A.O., 2004, Biktheyta til klaedinga – Afangaskyrsla 1. Report no. 03-20. Icelandic Building Research Institute. Reykjavik.
- ASMÜD Türkiye’de rakamlarla asfalt., 2022, <http://www.asmud.org.tr>, [Ziyaret Tarihi: 18 Temmuz 2022].
- ASTM D4402, 2015, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Balta, İ., 2004, Bitümlü sıcak karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Bartın Üniversitesi, 2014, Yol Üstyapısı Ders Notu.
- Berntsen, G., 2007, “NPRA’s experience with wAm- foam Pavements.” Norwegian Public Roads Administration, Norway, Presentation to WMA scan team.
- Bhusal, S., 2008, A laboratory study of warm mix asphalt for moisture damage potential and performances issues, Yüksek Lisans Tezi, Oklahoma Devlet Üniversitesi.
- Borleo, M. B. C., Kanitpong, K., & Charoentham, N., 2008, Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Produced with Sasobit Additive. In Proc. of the 6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology (pp. 22-24).
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., ve DeVol, J., 2012, Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington State. Washington: WSDOT Yayınları.
- Bueche, N., 2009, Warm asphalt bituminous mixtures with regards to energy, Emissions and Performance Young Researchers Seminar (YRS), Torino: LAVOC Yayınları.
- Button, J.W., Estakhri, C. ve Wimsatt, A., 2007, A synthesis of warm-mix asphalt. Teksas: FHA Yayınları.
- Butz, T., Rahimian, I. ve Hildebrand, G., 2001, Modification of road bitumen with the Fischer-Tropsch paraffin Sasobit, Journal of Applied Asphalt Binder Technology, 1 (2), 70-86.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A, and Little, D. N., 2008, “Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture, Part 1: Mechanisms.” International Journal of Pavement Engineering, 9(2), 81-98.
- Chamoun, Z., 2013, Evaluation of Warm Mix Asphalt Additives for Use in Modified Asphalt Mixtures, University of Nevada, Reno, Civil and Environmental Engineering, M. Sc. Thesis, 172s, Reno, USA.
- Cheraghian G., Falchetto A.C., You Z., Chen S., Kim Y. S., Westerhoff J., Moon K.H., Wistuba M.P., 2020, Warm mix asphalt technology: An up to date review.
- Chevron, J., 1977, Bitumuls mix manual. San Ramon: Chevron USA A.Ş Yayınları.
- Chowdhury, A. ve Button, J. W., 2008, A review of warm mix asphalt. Texas A&M University System College Station: Texas Transportation Institute, Texas 77843-3135.

- Copeland, A. R., Youtcheff, J., and Shenoy, A., 2007, "Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Binders." Transportation Research Board, 86th Annual Meeting, Washington DC, 18-28.
- Csanyi, L.H., 1956, Foamed asphalt in bituminous paving mixes, Highway Research Board Bulletin, 10 (160), 108-122.
- Cucalon, L. G., Yin, F., Martin, A. E., Arambula, E., Estakhri, C., & Park, E. S., 2016, Evaluation of Moisture Susceptibility Minimization Strategies for Warm-Mix Asphalt: Case Study. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 05015002.
- D'Angelo, J. A., Harm, E. E., Bartoszek, J. C., Baumgardner, G. L., Corrigan, M. R., Cowser, J. E., Newcomb, D. E., 2008, Warm-Mix Asphalt: European Practice.
- Damm, K. W., Abraham, J., Butz, T., Hildebrand, G. ve Riebeschl, G., 2002, Asphalt flow improvers as 'intelligent fillers' for hot asphalts - a new chapter in asphalt technology. Journal of Applied Asphalt Binder Technology, 36-69.
- Davidson, J.K., 2005, Evotherm Trial. McAsphalt Engineering Services, Ontario.
- Dokandari, P. A., Oner, J., Topal, A., & Sengoz, B., 2014, Organik Ilık Karışım Asfalt Katkı Maddesinin Bitümlü Karışımların Yaşlanma Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(9), 332-337.
- Eribol, S., Orhan, F. ve Önal, M.A., 2002, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şube Müdürlüğü, 94s.
- ESOGÜ-İnşaat Müh. Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı Youtube Kanalı, 2022, https://www.youtube.com/channel/UCx0Q1hhWnX4MSTtYkSjLZ_Q, [Ziyaret Tarihi: 20 Temmuz 2022].
- Estakhri, C., Button, J. ve Alvarez, A. E., 2010, Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas, Texas Department of Transportation 77843-3135.
- European Asphalt Pavement Association, 2014, "The use of Warm Mix Asphalt", EAPA, Rue du Commerce 77, 1040, Brussels, Belgium.
- EAPA (Avrupa Asfalt Üstyapı Birliği), Ilık Karışım Asfalt, Şubat 2016, çev. Zeliha TEMREN, Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği.
- Fakhri, M., & Hosseini, S. A., 2017, Laboratory Evaluation of Rutting and Moisture Damage Resistance of Glass Fiber Modified Warm Mix Asphalt Incorporating High RAP Proportion. Construction and Building Materials, 134, 626-640.
- Federal Highway Administration, 2010, United States Department of Transportation, <https://highways.dot.gov/public-roads/julyaugust-2010/hot-warm>.
- Federal Highway Administration, Superpave Fundamentals ReferenceManual.

- Fiedler J., Kašpar J., Valentin J., 2013, WMA specifications and experience with this mix type in the Czech Republic, HAPA Conference, Hungary.
- Gonzales, O., Munoz, M. E., Santamaria, A., Garcia-Morales, M., Navarro, F. J. ve Partal, P., 2004, Rheology and stability of bitumen/EVA blends. *European Polymer Journal*, 40 (10), 2365-2372.
- Gökalp İ., 2021, Investigation the Physical and Rheological Properties of Bitumen Modified with Warm Mix Asphalt Additive, Batman University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Enginnering.
- Gökalp, İ., 2022, Green and sustainable production of waste styrofoam-modified bitumen: a laboratory-based investigation on physical, rheological properties, and storage stability. *Polymer Bulletin*, 1-20.
- Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H. Uz, V. E., 2019, Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 954-964.
- Gökalp İ., Özinal Avşar Y., Uz V. E., December 2018, “Atık Bitkisel Yemeklik Yağların Saf Bitüm Özelliklerine Etkisinin Araştırılması“, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6(4), 570– 578, 2018 e-ISSN: 1308- 6693.
- Gökalp, İ. ve Uz, V. E., 2019, Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in Bitumen: Zero Tolerance Aging Approach, *Construction and Building Materials*, 227, 116695.
- Görkem, İ. Ç., 2014, Orta Sıcaklıktaki Asfalt Karışımlarının Performanslarının Değerlendirilmesi, *9 Eylül University Journal of Engineering Sciences*.
- Görkem, İ. Ç., 2018, Klinoptilolit ile Hazırlanan Bitümlü Karışımların Marshall Karışım Tasarımının Değerlendirilmesi, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(3).
- Gültekin M., Nayır N., Ziya U., Çalışkan K.K., Öztürk A., Tutan S.N., Komut M., 2021, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Haichert, R., Foth, M., Guenther, D. ve Berthelot, C.F., 2011, Case study evaluation of the sustainability of recycled aggregate road structure, Washington, D.C.: TRB Yayınları.
- Hassan, M., 2010, “Evaluation of the Environmental and Economic Impacts of Warm-Mix Asphalt Using Life-Cycle Assessment”, *International Journal of Construction Education and Research*. 6(3), 238-250.
- Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., and Peterson, J. C., 2005, “Impact of Lime Modification of Asphalt and Freeze-Thaw Cycling on the Asphalt Aggregate Interaction and Moisture Resistance to Moisture Damage.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 17(6), 711-717.

- Hunter, R. N., Self, A. and Read, J., 2015, The Shell Bitumen Handbook. London: ICE Publishing.
- Hurley, G. C. ve Prowell, B. D., 2005, Evaluation of sasobit® for use in warm mix asphalt, Auburn, US: National Center for Asphalt Technology.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001, Asfalt ve Uygulamaları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 37-46, 91-97.
- International Technology Scanning Program, 2008, Warm Mix Asphalt European Practice.
- Isacsson, U. and Lu, X. 1995, Testing and Appraisal of Polymer-Modified Road Bitumens- State-of-the-Art. Materials and Structures, 28:177, 139-159.
- İnsapedia, Ilık Karışım Asfalt Nedir?, 4 Şubat 2020, <https://insapedia.com/ilik-karisim-asfalt-nedir/>.
- İstek, A., 2017, Farklı Ilık Asfalt Katkılarının Bitümlü Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 153s, Elâzığ.
- Jenkins, K.J., de Groot, J.L.A., van de Ven, M.F.C. ve Molenaar, A.A.A., 1999, Half-warm foamed bitumen treatment, a new process, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Victoria Falls, Güney Afrika.
- Johannesson, A., 2005, Superpave. Report no. 05-04, Icelandic Building Research Institute, Reykjavik.
- Kanitpong, K., Nam, K., Martono, W. ve Bahia, H., 2008, Evaluation of a warmmix asphalt additive, Construction Materials, 161 (CM1), 1-8.
- Karadağ, Ö, 2019, Cocamıde Diethanolamıde ile Modifiye Edilmiş Bitüm Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Temel Mühendislik Özelliklerinin Superpave Hacimsel Karışım Tasarımı Yardımıyla İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Karakuzu K., Özen H., 2021, Türkiye Şartlarında Ilık Karışım Asfalt Uygulamasının Ekonomik ve Çevresel Değerlendirmesi.
- Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Kaşak S., Yeni Bitüm Standardı.
- Kaya, D., & Topal, A., 2016, Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların Ilık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(2).

- Kaya, D., 2014, Ilık Karışım Asfaltların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kim, H., Jeong, K. D., Lee, M. S., & Lee, S. J., 2014, Performance Properties of CRM Binders with Wax Warm Additives, *Construction and Building Materials*, 66, 356-360.
- Kim, H., Lee, S. J., & Amirkhanian, S. N., 2011, Rheology of Warm Mix Asphalt Binders with Aged Binders, *Construction and Building Materials*, 25(1), 183-189.
- Koenders, B.G., Stoker, D.A., Bowen, C., de Groot, P., Larsen, O., Hardy, D., 2000, Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barselona,İspanya.
- Köse, H., 2015, Bitümlü Ilık Karışımların Kimyasal Buz Çözücülere Karşı Direncinin İncelenmesi. Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 51s, Yozgat.
- Kuennen, T., 2004, Warm mixes are a hot topic, Illinois: James Informational Media Yayınları.
- Kuloğlu N., Yılmaz M., Kök B.V., 2008, Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi.
- Kumandaş A., 2021, Bitkisel Atık Yağ İlavesiyle Reaktif Polimer ve Polifosforik Asit Modifiyeli Bitümün, Düşük Sıcaklık Performansının ve İşlenebilirliğinin Geliştirilmesi, 19 Mayıs Üniversitesi.
- Ladepeche, 2022, Portet-sur-Garonne. Travaux expérimentaux d'enrobé au Bois Vert, <https://www.ladepeche.fr/article/2016/08/10/2398712-travauxexperimentaux-d-enrobe-au-bois-vert.html>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Larsen, O.R., 2001, Warm asphalt mix with foam: WAM-Foam. Norveç: Thèmes Techniques Yayınları.
- Larsen, O.R., Moen, O., Robertus, C. ve Koenders, B.G., 2004, WAM-Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA, *Proceedings, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Viyana, Avusturya.
- Leroy, C., 2007, “warm mix-Asphalt in Paris.” D gr, France, Presentation to WMA scan team.
- Line.17qq., 2021, Photo Example Asphalt Rutting, <https://line.17qq.com/articles/huqewhrrx.html>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Liu S., Zhou S., Peng A., 2020, Laboratory evaluation of foamed warm mix binders and mixtures containing reclaimed asphalt pavements.

- Maccarrone, S., Holleran, G. ve Ky, A., 1994, Cold asphalt systems as an alternative to Hot mix. Proceedings, 9th International AAPA Conference, Queensland, Australia.
- Maciejewski K., Chomicz-Kowalska A., Remisova E., 2022, Effects of water-foaming and liquid warm mix additive on the properties and chemical composition of asphalt binders in terms of short term ageing process.
- Mallick, R., Kandhal, P. ve Bradbury, R., 2008, Using warm mix asphalt technology to incorporate high percentage reclaimed asphalt pavement (RAP) material in asphalt mixtures, Transportation Research Record, 2051, 71-79.
- Mansourian, A., Razmi, A., & Razavi, M., 2016, Evaluation of Fracture Resistance of Warm Mix Asphalt Containing Jute Fibers, Construction and Building Materials, 117, 37-46.
- Mazumder, M., Kim, H., & Lee, S. J., 2016, Performance Properties of Polymer Modified Asphalt Binders Containing Wax Additives, International Journal of Pavement Research and Technology, 9(2), 128-139.
- McGennis, R. B., Shuler, S. and Bahia, H. U., 1994, Background of Superpave asphalt binder test methods, (FHWA-SA-94-069), Asphalt Institute. Federal Highway Administration Office of Technology Applications.
- McKenzie, P., 2006, Taking a closer look at warm mix. Journal of Better Roads, 76 (6), 64-69.
- Ministère des transports du Québec , 2008/2009, Rapport Annuel De Gestion.
- Mogawer, W. S., Austerman, A. J., Engstrom, B., ve Bonaquist, R., 2009, Incorporating high percentages of recycled asphalt pavement (RAP) and warm 161 mix asphalt (WMA) technology into thin hot mix asphalt overlays to be utilized as a pavement preservation strategy, Washington, D.C.: TRB Yayınları.
- Moore W., 2007, Warm-mix asphalt (WMA) potentially can provide important benefits for paving contractors, reduce fuel costs and diminish green-house gases, <http://www.constructionequipment.com/warm-mix-asphaltwma-potentially-can-provide-important-benefits-for-paving-contractors-reducefuel-costs>
- Muthen, K. M., 1998, Foamed Asphalt Mixes-Mix Design Procedure. Transportation Research Record, 898, 290-296.
- Navruz H.Ö., Mert A., Çömez Ş., Komut M., 2021, KGM, Toprak ve Stabilizasyon Laboratuvar El Kitabı.
- Oberding, Brian, 2011, Green Purchasing Case Studies Maintenance Crews “Warm Up” to Warm-Mix Asphalt, Construction Inspection & Pavement Management, Portland Bureau of Transportation.

- Orhan, F., 2012, Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Oruc, S. and Yilmaz, B., 2016, Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*, 123, 207-213.
- Oylumluoğlu, J., 2012, The Utilization of Recycled Asphalt Concrete with Warm Mix Asphalt. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, İzmir.
- Önal, A.M. ve Kahramangil, M., 1993, Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı. Ankara: KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Basım Evi.
- Önce Vatan Gazetesi, 11 Haziran 2015, "ılık karışım asfaltın" ilk denemesi, Ankara Çevre Otoyolunda, <https://www.oncevatan.com.tr/ekonomi/ilik-karisim-asfaltin-ilk-denemesi-ankara-cevre-otoyolunda-h73405.html>.
- Pavement interactive, moisture susceptibility, 2022, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/moisture-susceptibility/>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Primal Survivor, 6 Almost-Forgetting Uses for Pine Tree Sap, 2022, <https://www.primalsurvivor.net/uses-pine-tree-sap/>, [Ziyaret Tarihi: 27 Temmuz 2022].
- Prowell, B. D. ve Hurley, G. C., 2007, Warm-mix asphalt: best practices. National Asphalt Pavement Association.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C., & Frank, B., 2011, Warm-Mix Asphalt: Best Practices. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.
- Putman, B. J., and Amirkhanian, S. N., 2006, "Laboratory Evaluation of Anti-Strip Additives in Hot Mix Asphalt." Clemson University, Report No. FHWA-SC-0607.
- Romier, A., Audeon, M., Jac, D., Martineau, Y. ve Olard, F., 2007, Low-Energy Asphalt with the performance of hot mix asphalt. *Journal of Transportation Research Board*, 1962, 101-112.
- Rubio, M. C., Martinez, G., Baena, L. ve Moreno, F., 2012, Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Sanal Şantiye, BBR Deneyi, 3 Eylül 2021, <https://www.sanalsantiye.com/bbr-deneyi-kiris-egme-reometresi/>.
- Sanal Şantiye, PAV Deneyi Nedir?, 21 Mart 2022, <https://www.sanalsantiye.com/pav-deneyi-nedir/>.

- Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., & DelRio-Prat, M., 2011, Evaluation of Compactability and Mechanical Properties of Bituminous Mixes with Warm Additives, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2304-2311.
- Sauterey, D., 2007, "les Departements." D gr, France, Presentation to WMA scan team.
- Semantic Scholar, Review of Shell Thiopave sulphur-extended asphalt modifier, 1 Ekim 2009, <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-Shell-Thiopave-sulphur-extended-asphalt-Nicholls/f270f752f66621283537bd8dc4495da090bfbc6b>.
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., & 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.
- Shell Bitumen, 2011, Shell WAM foam process for reducing energy consumption and emissions. Shell Bitumen.
- Silva, H. M., Oliveira, J. R., Peralta, J., & Zoorob, S. E., 2010, Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents, *Construction and Building Materials*, 24(9), 1621-1631.
- Singh, D., & Kataware, A. V., 2016, Comparison of Different Rheological Parameters for Rutting Susceptibility of SBS+WMA Modified Binders, *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 28.
- Su, K., Maekawa, R., & Hachiya, Y., 2009, Laboratory Evaluation of WMA Mixture for Use in Airport Pavement Rehabilitation, *Construction and Building Materials*, 23(7), 2709-2714.
- Sukhija M., Wagh V. P., Saboo N., 2022, Development of workability based approach for assessment of production temperatures of warm mix asphalt mixtures.
- Suo, Z. and Wong, W. G., 2009, Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents. *Construction and Building Materials*, 23:12, 3492-3498.
- Şahin S.N.A., 2019, Asfalt Üretim Sıcaklığının Düşürülmesinde Kullanılan Kimyasal Katkıların Etkilerinin Araştırılması.
- Şengöz, B. and Topal, A., 2005, Use of asphalt roofing shingle waste in HMA, *Construction and Building Materials*, 19:5, 337-346.
- Şengöz, B., Topal A. ve Gorkem C., 2013, Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite, *Road Materials and Pavement Design*, 14, 4.
- Tayfur, S., Ozen, H. and Aksoy, A., 2007, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials*, 21:2, 328-337.

TDK, (2021). Bitüm., 2022, <https://sozluk.gov.tr/>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].

Teknologisk, Ny, bæredygtig asfaltteknologi anvendes på motorvej ved Herning, <httpswww.teknologisk.dk/ydelserny-baeredygtig-asfaltteknologi-anvendes-paa-motorvej-ved-herning38595>, [Ziyaret Tarihi: 7 Haziran 2022].

Temel, S., 2016, Doğal Zeolit ve Sentetik Zeolitin Ilık Karışım Asfalt Katkısı Olarak Kullanımı. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Topal, A., Yilmaz, M., Kok, B. V., Kuloglu, N. and Sengoz, B., 2011, Evaluation of Rheological and Image Properties of Styrene-Butadiene-Styrene and Ethylene-Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Journal of Applied Polymer Science, 122:5, 3122- 3132.

Trendyol, Çam Sakızı Süper Ağda, <https://www.trendyol.com/cam-sakizi/super-agda-240g-x2-adet-p-35660523>, [Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2022].

TS EN 12607-1, 2015, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Isı ve hava etkisi altında sertleşme direncinin tayini- Bölüm 1: RTFOT yöntemi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12697-11, 2020, Bitümlü karışımlar- Test yöntemleri- Bölüm 11: Agregası ve bitüm arasındaki benzeşmenin belirlenmesi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 13302, 2018, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- Dönen mil cihazı ile bitümlü bağlayıcının dinamik viskozitesinin belirlenmesi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 13398, 2018, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar- Modifiye bitümün elastik geri kazanımının belirlenmesi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1426, 2015, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-İğne batma derinliği tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1427, 2015, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14769, 2012, Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar- Basınçlı yaşlandırma kabı (pav) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14770, 2012, Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 14771, 2012, Bitumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara. Tunç, A., 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.

- TUBİTAK, Türkiye’de İlk Asfalt Dönemi, 2022, <https://kte.mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyede-ilik-asfalt-donemi>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Tunç, A., 2001. Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul, 840s.
- Tunç, A., 2004, Esnek kaplama malzemeleri elkitabı, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 352s.
- Tüpraş, Bitüm Fiyatları Güncel, <https://www.tupras.com.tr/bitum-fiyatları-güncel>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı.
- Uluçaylı, M. ve Yavuz, A., 2002, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
- UTEST Malzeme Test Cihazları, Dinamik Kesme Reometresi (DSR), <https://www.utest.com.tr/tr/20513/Dinamik-Kesme-Reometresi-DSR>, [Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2022].
- Uz, V.E., ve Gökalp, İ. (2020). Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases. Waste Management, 110, 1-9.
- Ünvermez, A., 2011, Bitümlü Ilık Karışımların Mekanik Etüdü. Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Yozgat.
- Vaitkus, A., Cygas, A., Laurinavicius, A. ve 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.
- Valdés G., Calabi-Floody A., Sanchez-Alonso E., Diaz C., Fonseca C., 2020, Highway trial sections: Performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt.
- Von Devivere, M., Barthel, W. ve Marchand, J.P., 2004, Warm asphalt mixes by adding Aspha-Min, a synthetic zeolite, 22nd PIARC World Road Congress, Durban, Güney Afrika.
- Wang, T. Q., Yang, R. F., Li, A. G., Chen, L., & Zhou, B., 2016, Effects of Sasobit and its adding process on the performance of rubber asphalt, Chemical Engineering Transactions, 51, 181-186.
- Walker, D., 2009, Gaining experience with Warm Mix Asphalt, The Magazine of the Asphalt Institute.
- Whiteoak, D. ve Read, J., 2003, The Shell Bitumen Handbook, London, Thomaselford Ltd., 464 p.

- Yılmaz, M., Kok, B. V. and Kuloglu, N., 2011, Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25:11, 4279-4286.
- Youtube, Evotherm® Magic Drop, 15 Temmuz 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=HGZiNEiZMVA>.
- Yu, X., Leng, Z., & Wei, T., 2014, Investigation of the Rheological Modification Mechanism of Warm-Mix Additives on Crumb-Rubber-Modified Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 312-319.
- Yüknü K., Öztürk T., Komut M., 2021, Bitümlü Bağlayıcılar Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E., 2004, Evaluation Of Performance Graded Asphalt Binder Equipment And Testing Protocol, West Virginia University, Morgantown, 109 s., 26-27.
- Zaremotekhosses F., Sadek H., Hassan M., Berryman C., 2022, Impact of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement content on the performance of alternative asphalt mixtures.
- Zaumanis, M., 2010, Warm mix asphalt investigation. Doktora Tezi, Riga Teknik Üniversitesi, Lyngby, Danimarka.
- Zettler, R., 2006, Warm Mix Stands Up to Its Trials, pp. 16-18, *Journal of Better Roads*, Volume: 76 Issue Number: 2.
- Zhang J., 2010, Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance, ABD: UNL Basım Evi.
- Zhao P., Ren R., Zhou H., Ouyang J., Li Z., Sun D., 2021, Preparation and properties of imidazoline surfactant as additive for warm mix asphalt.
- Ziari, H., Moniri, A., Imaninasab, R., & Nakhaei, M., 2019, Effect of Copper Slag on Performance of Warm Mix Asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(7), 775-781.