

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SICAK VE ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
YÖNÜNDEN İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat ADANUR

KASIM 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SICAK VE ILIK KARIŞIM ASFALTların SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
YÖNÜNDEN İRDELENMESİ

Serhat ADANUR

ORCID :

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 10 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 19 / 11 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atakan AKSOY

ORCID :

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Serhat ADANUR Tarafından Hazırlanan**

**SICAK VE ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
YÖNÜNDEN İRDELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 23 / 10 / 2025 gün ve 2125 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ufuk KIRBAŞ

Üye : Prof. Dr. Atakan AKSOY

Üye : Prof. Dr. Erol İSKENDER

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Sıcak ve Ilık Karışım Asfaltların Sürdürülebilirlik Yönünden İrdelenmesi” isimli bu Tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan Sayın Prof. Dr. Erol İSKENDER’e teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Ayşe ADANUR ve Babam Turan ADANUR’a, ve tez çalışmam boyunca desteğini asla esirgemeyen sevgili eşim Ayşenur ADANUR’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Serhat ADANUR

Kasım 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sıcak ve Ilık Karışım Asfaltların Sürdürülebilirlik Yönünden İrdelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 19/11/2025

Serhat ADANUR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Problem Tanımı.....	2
2. ASFALT TEKNOLOJİLERİNE GENEL BAKIŞ	4
2.1. Asfalt Karışımlarının Temel Bileşenleri	4
2.2. Sıcak Karışım Asfalt (SKA) Üretim Süreci	5
2.3. Ilık Karışım Asfalt (IKA) Üretim Süreci	6
2.4. Türkiye’de SKA ve IKA Uygulamaları	7
3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE ASFALT ÜRETİMİNDEKİ ROLÜ	9
3.1. Sürdürülebilirlik Tanımı.....	9
3.2. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik Yaklaşımları.....	10
3.3. Asfalt Üretiminde Enerji, Emisyon ve Kaynak Kullanımı.....	11
3.4. Sürdürülebilir Ulaşım Altyapılarında Yeni Eğilimler	11
4. SICAK VE ILIK ASFALT KARIŞIMLARIN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	13
4.1. Ekonomik Yönden Karşılaştırma	14
4.1.1. Üretim Maliyetleri.....	14
4.1.2. Katkı Maliyetleri	14
4.1.3. Enerji Tüketimi	14
4.1.4. Uzun Vadeli Bakım ve Onarım Maliyetleri	16
4.1.5. İnşaat Verimliliği	17
4.1.6. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi	18
4.1.7. Bölgesel Vaka Çalışmaları.....	18

4.1.8.	Ekonomik Bulguların Özeti	19
4.2.	Teknik Yönden Karşılaştırma	19
4.2.1.	Taşıma ve Sıkıştırma.....	19
4.2.2.	Tekerlek İzi Direnci	19
4.2.3.	Yorulma ve Çatlama Direnci	20
4.2.4.	Nem Duyarlılığı	21
4.2.5.	Yaşlanma ve Dayanıklılık	21
4.2.6.	Geri Dönüştürülmüş ve Alternatif Malzemelerin Rolü.....	22
5.	ILIK KARIŞIM ASFALTIN AVANTAJLARI	23
5.1.	Teknik Avantajlar.....	24
5.1.1.	Geliştirilmiş İşlenebilirlik ve Sıkıştırma	24
5.1.2.	Azaltılmış Bağlayıcı Yaşlanması	25
5.1.3.	Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) ve Katkı Maddeleriyle Uyumluluk	25
5.1.4.	Gelişmiş Direnç.....	26
5.2.	Ekonomik Avantajlar	26
5.2.1.	Yakıt Tasarrufu	27
5.2.2.	Yatırım Getirisi	27
5.2.3.	Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi	28
5.2.4.	Ekonomik Özet	28
5.3.	Çevresel Avantajlar	29
5.3.1.	Sera Gazı Emisyonlarında Azalma	30
5.3.2.	İyileştirilmiş Hava Kalitesi ve Çalışan Sağlığı	31
5.3.3.	Kaynak Koruma ve Geri Dönüşüm.....	31
5.3.4.	Çevresel Özet	32
5.4.	Operasyonel Avantajlar	32
5.4.1.	Uzatılmış Asfaltlama Sezonu.....	32
5.4.2.	Operasyonel Özet.....	33
5.5.	Vaka Örnekleri	33
5.5.1.	Türkiye	34
5.5.2.	Avrupa.....	34
5.5.3.	Birleşik Devletler	35
5.5.4.	Asya	35
5.6.	Özet	35
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	38

6.1. Türkiye İçin Stratejik ve Kurumsal Öneriler.....	38
6.2. Teknik ve Altyapısal Öneriler	39
6.3. Ekonomik ve Finansal Öneriler.....	39
6.4. Akademik ve Eğitimsel Öneriler	39
6.5. Geleceğe Yönelik Araştırma Önerileri.....	40
7. KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİş	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SICAK VE ILIK KARIŞIM ASFALTların SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN İRDELENMESİ

Serhat ADANUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 44 Sayfa

Karayolu yolcu ve yük taşımacılığının artmasıyla asfalt kaplamalara duyulan ihtiyaç yükselmiş olup buna bağlı olarak asfalt üretiminde enerji verimliliği ve çevresel etkiler önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bitümlü Sıcak Karışım Asfalt (SKA), geleneksel bir yöntem olarak uzun yıllardır kullanılmasına rağmen, yüksek üretim sıcaklıkları nedeniyle enerji tüketimini artırmakta ve önemli miktarda sera gazı emisyonu oluşturmaktadır.

Bu sorunlara alternatif olarak geliştirilen Ilık Karışım Asfalt (IKA), karıştırma ve serim sıcaklıklarını 20–40 °C azaltarak enerji tüketimini düşürmekte ve emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır. Daha düşük sıcaklıklar, bağlayıcı yaşlanmasını yavaşlatmakta, çalışma koşullarını iyileştirmekte ve karışımın performansını olumlu yönde etkilemektedir.

Bu tezde SKA ve IKA karışımları; enerji tüketimi, emisyon, maliyet, teknik performans ve iş güvenliği açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bulgular, IKA'nın sürdürülebilir yol altyapısı hedefleriyle uyumlu ve çevresel açıdan daha avantajlı bir seçenek olduğunu işaret etmektedir. Türkiye'de uygun teknik altyapısal düzenlemelerle IKA'nın yaygınlaşması hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de ekonomik verimliliğin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sıcak karışım asfalt, Ilık karışım asfalt, Ekonomik verimlilik, Enerji verimliliği, Sera gazı emisyonu, Sürdürülebilirlik

Master Thesis

SUMMARY

AN EXAMINATION OF HOT AND WARM MIX ASPHALTS IN TERMS OF SUSTAINABILITY

Serhat ADANUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2025, 44 Pages

With the increase in road transportation, the need for asphalt pavements has risen, and consequently, energy efficiency and environmental impacts in asphalt production have become important research topics. Although Bituminous Hot Mix Asphalt (HMA) has been used for many years as a traditional method, its high production temperatures increase energy consumption and generate significant greenhouse gas emissions.

Warm Mix Asphalt (WMA), developed as an alternative to these problems, reduces energy consumption and significantly lowers emissions by decreasing mixing and paving temperatures by 20–40°C. Lower temperatures slow binder aging, improve working conditions, and positively affect mixture performance.

In this thesis, HMA and WMA mixtures are comparatively examined in terms of energy consumption, emissions, cost, technical performance, and occupational safety. The findings demonstrate that WMA is compatible with sustainable road infrastructure goals and is a more environmentally advantageous option. The widespread adoption of WMA in Turkey, with appropriate technical regulations, will contribute to both reducing environmental impacts and increasing economic efficiency.

Key Words: Hot mix asphalt, Warm mix asphalt, Economic efficiency, Energy efficiency, Greenhouse gas emissions, Sustainability

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 2018 yılı asfalt karışımları maliyeti (Karakuzu & Özen, 2020).....	29
Şekil 2. IKA'nın SKA'ya göre çevreye katkısı (Karakuzu & Özen, 2020)	30
Şekil 3. Yükleme işlemleri sırasında SKA (a) ve IKA (b) için kaçak emisyonlar	30
Şekil 4. Serim işlemleri sırasında SKA (a) ve IKA (b) için kaçak emisyonlar	31



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. SKA ve İKA için tipik karışım sıcaklıkları	13
Tablo 2. İKA Teknolojileri için tipik katkı maddesi maliyetleri ve yakıt tasarrufları	15
Tablo 3. Uzatılmış asfaltlama sezonu ve taşıma mesafesi karşılaştırması	17
Tablo 4. RAP ve katkı maddeleri içeren SKA ve İKA'yı karşılaştıran giriş yorulma testi sonuçları.....	20
Tablo 5. Alternatif ve geri dönüştürölmüş malzemelerin teknik sonuçlarla İKA'ya dahil edilmesi	22
Tablo 6. Tesis kapasitesi ve katkı türüne göre İKA yenilemeleri için ROI eğrileri	28

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ESAL	: Eşdeğer Tek Aks Yüğü
FAV	: Norveç Asfalt Birliğı
FHWA	: Federal Karayolları İdaresi
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IKA	: Ilık Karışım Asfalt
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LCA	: Yaşam döngüsü değeriendirme
NAPA	: Ulusal Asfalt Kaplama Derneğı
NCAT	: National Center of Asphalt Technology
PET	: Polietilen Tereftalat
RAP	: Geri dönüştürölmüş asfalt
ROI	: Yatırım geri dönüş süresi
Rp	: Çatlak ilerleme oranı
SKA	: Sıcak Karışım Asfalt
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TSR	: Çekme dayanımı oranı
VOC	: Uçucu Organik Bileşik

1. GENEL BİLGİLER

Ulaşım yapıları, bütün dünya çapında doğal kaynakların ve enerjinin en büyük tüketicilerinden biridir ve asfalt kaplamalar küresel yol ağının %90'ından fazlasını kaplamaktadır (Rubio vd., 2012). Sürdürülebilir altyapıya olan artan talep, iklim değişikliğini azaltma hedefleriyle birleşince, enerji kullanımını ve çevresel etkileri azaltırken performansı koruyan veya iyileştiren teknolojilere yönelik arayış yoğunlaşmıştır. SKA, dayanıklılığı ve yük taşıma kapasitesi sayesinde 20. yüzyılın başlarında standart karayolu kaplama malzemesi haline gelmiştir. Bu işlem, agregaların ısıtılarak nemin giderilmesini ve bağlayıcı viskozitesinin azaltılmasını içerir ve böylece tam kaplama ve uygun sıkıştırma sağlanır (McGennis vd., 1995). Avantajlarına rağmen, SKA üretimi büyük miktarda enerji (ton başına yaklaşık 250-300 MJ) tüketir ve ton başına yaklaşık 27-30 kg karbon dioksit (CO₂) üretir. Ayrıca, yüksek üretim sıcaklıkları, dumanlar ve yüksek sıcaklıkta elleçleme yoluyla iş güvenliği riskleri yaratır (EAPA, 2019).

Sıcak Karışım Asfalt (SKA), genellikle 150-190°C arasındaki karıştırma sıcaklıklarında üretilen, onlarca yıldır baskın kaplama malzemesidir. Bu yüksek sıcaklıklar, agregaların yeterli şekilde kurummasını sağlamak ve yeterli kaplama ve sıkıştırma için asfalt bağlayıcının viskozitesini düşürmek için gereklidir (McGennis vd., 1995). SKA dayanıklı bir performans sunarken, üretim sırasında önemli miktarda yakıt tüketir ve büyük miktarda sera gazı, uçucu organik bileşikler ve işçi sağlığına zararlı dumanlar yayar (Abdullah vd., 2014). Buna karşılık, Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojileri 1990'ların sonlarında Avrupa'da ortaya çıkmıştır ve 2000'lerde küresel olarak yayılmaya başlamıştır (Oylumluoğlu, 2012). IKA, üretim sıcaklıklarını 20-55°C düşürerek, yakıt tüketimini, emisyonları ve bağlayıcı yaşlanmasını azaltırken, sıkıştırma ve işlenebilirliği iyileştirir (Georgiou&Loizos, 2021) (Zhang, 2010). Günümüzde IKA, sürdürülebilir yol mühendisliğinin küresel hedefleriyle uyumlu, SKA'ya umut verici bir alternatif olarak kabul edilmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Karayolu üstyapılarında en yaygın kullanılan kaplama türlerinden biri olan bitümlü sıcak karışımlar, modern ulaşım altyapısının sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol

oynamaktadır. Ancak Sıcak Karışım Asfalt (SKA) üretiminde gerekli olan yüksek sıcaklıklar (yaklaşık 150 – 180 °C), hem yüksek enerji tüketimi hem de sera gazı emisyonu açısından önemli bir çevresel yük oluşturmaktadır (Rubio vd., 2012). Artan enerji maliyetleri ve çevre bilincinin gelişmesi, asfalt endüstrisinde daha düşük sıcaklıklarda üretim yapabilen teknolojilere yönelimi hızlandırmıştır.

Bu doğrultuda geliştirilen Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojileri, karışım ve serim sıcaklıklarını 20–40 °C düşürerek hem üretim aşamasında enerji tasarrufu sağlamak hem de CO₂ ve uçucu organik bileşik (VOC) salımını azaltmaktadır (Belc vd., 2021). Ayrıca, daha düşük sıcaklıklarda üretim sayesinde karışımın viskozitesi azalmakta, bu da işlenebilirlik ve sıkıştırma performansını iyileştirmektedir (d'Angelo vd., 2008). Buna ek olarak, iş sağlığı açısından da daha elverişli bir çalışma ortamı sağlanmaktadır; zira sıcaklığa bağlı buhar ve duman emisyonları önemli ölçüde azalmaktadır (Milad vd., 2022).

Bu tez çalışmasının temel amacı, SKA ve IKA karışımlarının sürdürülebilirlik yönünden karşılaştırmalı analizini yapmak ve IKA teknolojilerinin çevresel, ekonomik ve teknik avantajlarını bilimsel verilerle ortaya koymaktır. Bu doğrultuda çalışma, asfalt üretiminde enerji tüketimi, emisyon miktarları, uzun vadeli maliyetler ve performans kriterleri gibi unsurları birlikte değerlendirmektedir. Ayrıca, elde edilen bulgular Türkiye'nin iklim koşulları, üretim kapasiteleri ve uygulama alışkanlıkları dikkate alınarak yorumlanacak; IKA teknolojilerinin yaygınlaştırılmasına yönelik öneriler geliştirilecektir.

Bu çalışma, sürdürülebilir karayolu altyapısı hedefleri doğrultusunda, karar vericilere ve uygulayıcılara bilimsel temelli bir değerlendirme çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır.

1.2. Problem Tanımı

Karayolu üstyapılarında kullanılan Sıcak Karışım Asfalt (SKA), uzun yıllar boyunca standart bir üretim yöntemi olarak kabul edilmiş olsa da, günümüz koşullarında enerji tüketimi, sera gazı salımı ve çevresel etkiler açısından önemli sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Rubio vd., 2012). SKA üretiminde gerekli olan yüksek sıcaklıklar hem yüksek yakıt maliyetine hem de artmış karbon ayak izine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi yapan ülkelerde çevresel sürdürülebilirliği ciddi biçimde olumsuz etkilemektedir (d'Angelo vd., 2008).

Son yıllarda küresel ısınma, enerji verimliliği politikaları ve uluslararası çevre anlaşmaları doğrultusunda, asfalt üretiminde kullanılan teknolojilerin çevresel etkilerini

azaltma yönünde bir eğilim gözlemlenmektedir (Belc vd., 2021). Bu bağlamda geliştirilen IKA teknolojilerinin, SKA teknolojilerine kıyasla daha düşük üretim ve serim sıcaklıkları sayesinde enerji tasarrufu ve emisyon azalımı sağladığı belirtilmektedir. Ancak, IKA teknolojilerinin yaygınlaşmasının önünde bazı teknik ve sektörel engeller bulunmaktadır.

IKA teknolojilerinin performans ve dayanıklılık açısından SKA ile tam anlamıyla rekabet edebilmesi, bağlayıcı tipine, katkı maddesi seçimine, üretim ekipmanına ve iklim koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Prowell vd., 2011). Bununla birlikte, IKA'nın ülke bazında ekonomik uygulanabilirliği, yakıt fiyatları, katkı maliyetleri, yatırım gereksinimleri ve üretim kapasitesi gibi faktörlere de doğrudan bağlıdır (Karakuzu & Özen, 2020). Türkiye özelinde ise, mevcut asfalt tesislerinin büyük bir kısmı SKA üretimine göre tasarlanmış olup, IKA teknolojisine geçiş için altyapı uyarlaması ve teknik bilgi eksikliği önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Karakuzu & Özen, 2020).

Dolayısıyla, bu çalışmanın problem tanımı; SKA ve IKA teknolojilerinin sürdürülebilirlik açısından sistematik biçimde karşılaştırılması, çevresel ve ekonomik avantajlarının ülke koşullarına göre değerlendirilmesi ve IKA'nın yaygınlaşmasının önündeki teknik, ekonomik ve organizasyonel engellerin ortaya konmasıdır.

2. ASFALT TEKNOLOJİLERİNE GENEL BAKIŞ

2.1. Asfalt Karışımlarının Temel Bileşenleri

Asfalt karışımları iki temel bileşenden oluşur: bitüm (bağlayıcı) ve agregat. Bitüm, agregaları birbirine bağlayarak karışımın kohezyonunu sağlayan, yüksek viskoziteli bir malzemedir. Agregat ise karışımın hacmini ve mekanik dayanımını belirleyen mineral tanelerden oluşur (Roberts vd., 1996).

Bitüm, petrol rafinasyonunun bir yan ürünü olup sıcaklıkla viskozitesi değişen termoplastik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle asfalt karışımlarının üretim sıcaklığı bitümün akışkanlık özellikleriyle doğrudan ilişkilidir (Read & Whiteoak, 2003). Bitüm, oksidasyon ve yaşlanma gibi etkilere karşı hassastır; bu yüzden karışımın uzun ömürlü olması için antioksidan veya yumuşatıcı katkıların kullanılması önemlidir. Özellikle IKA teknolojilerinde, düşük üretim sıcaklıklarında karışımın yeterli işlenebilirliğini sağlamak için organik, kimyasal veya su bazlı katkıların kullanılması tavsiye edilir (d'Angelo vd., 2008).

Agregatlar, karışımın yaklaşık %90–95'ini oluşturur ve tanelerin şekli, pürüzlülüğü, boyut dağılımı karışımın stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynar (Read & Whiteoak, 2003). Bu nedenle agregat kalitesi, asfalt kaplamaların dayanıklılığı, deformasyon direnci ve yüzey özellikleri açısından büyük önem taşır (Read & Whiteoak, 2003).

Karışımlarda üçüncü önemli bileşen hava boşluklarıdır. Bu boşlukların oranı, karışımın dayanıklılığını ve geçirgenliğini doğrudan etkiler. Düşük hava boşluğu deformasyona, yüksek hava boşluğu ise suya karşı zayıf dirence neden olabilir (Read & Whiteoak, 2003). SKA üretiminde yüksek sıcaklıklar sayesinde hedeflenen boşluk oranları kolaylıkla sağlanırken, IKA karışımlarında sıcaklık düşüklüğü sıkıştırma zorlaştırabilir. Bu nedenle IKA karışımlarında uygun katkı oranı ve sıkıştırma koşulları dikkatle belirlenmelidir (Kandhal, 2010).

Sonuç olarak asfalt karışımlarının performansı, bitümlü bağlayıcının kimyasal özellikleri, agreganın mineralojik-fiziksel nitelikleri ve üretim sürecinin dengeli biçimde optimize edilmesine bağlıdır. Bu optimizasyon, IKA teknolojilerinde enerji verimliliği ve düşük emisyon hedefleriyle doğrudan ilişkilidir.

2.2. Sıcak Karışım Asfalt (SKA) Üretim Süreci

Sıcak Karışım Asfalt (SKA), agregaların ve bitümün yüksek sıcaklıklarda karıştırılmasıyla üretilen geleneksel asfalt karışımı türüdür. Üretim süreci, agregaların kurutulması, ısıtılması, bitümlü bağlayıcının eklenmesi, homojen karıştırma, taşıma ve serim aşamalarından oluşur (Roberts vd., 1996).

Üretim sürecinde ilk aşama, agregaların tamburlu kurutucu içinde yaklaşık 150–170 °C sıcaklıkta ısıtılmasıdır. Bu işlem, hem agregadaki nemin tamamen uzaklaştırılmasını hem de bitümle karışım sırasında optimum ıslanma kaplaması sağlanmasını amaçlar. Agregalar kurutulduktan sonra, sıcak bitüm genellikle 150–160 °C civarında sisteme eklenir ve karıştırma tamburunda homojen bir şekilde karışması sağlanır (Kandhal, 2010).

SKA üretimi sırasında sıcaklığın bu kadar yüksek tutulması, bitümün viskozitesini azaltarak karışımın işlenebilirliğini artırsa da, enerji tüketimini ciddi şekilde yükseltmektedir. Özellikle doğal gaz, mazot veya kömür gibi fosil yakıtların kullanıldığı tesislerde, bu durum üretim maliyetlerinin yanı sıra karbon dioksit (CO₂) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarının artmasına neden olur (d'Angelo vd., 2008).

Karışım üretildikten sonra, asfalt genellikle sıcak silobas veya damperli kamyonlarla şantiye sahasına taşınır. Karışım sıcaklığının taşınma süresince düşmemesi için izolasyonlu taşıma araçları kullanılır. Serim işlemi ise finişer yardımıyla yapılır ve sıkıştırma işlemleri, karışım sıcaklığı 135 °C'nin altına düşmeden tamamlanır (Read & Whiteoak, 2003). Aksi takdirde, yetersiz sıkıştırma sonucu karışımда yüksek hava boşluğu kalabilir ve bu da karayolu kaplamasının suya ve don etkisine karşı direncini zayıflatır. Aksi takdirde, yetersiz sıkıştırma sonucu karışımда hedef değerlerin üzerinde hava boşlukları oluşabilir. Bu durum kaplamanın suya ve don etkisine karşı direncini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Böyle bir durumda karışım, performans açısından “en kötü boşluk” seviyesine ulaşabilir ve kaplamanın hizmet ömrü ciddi şekilde azalabilir.

SKA üretim süreci, yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle iş güvenliği açısından da bazı riskler taşır. Sıcak bitüm ve karışım buharları, özellikle kapalı üretim tesislerinde işçiler için uçucu organik bileşik (VOC) maruziyetine yol açabilir (Rubio vd., 2012). Ayrıca, yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlarda enerji verimliliği düşmekte ve tesisin bakım sıklığı artmaktadır. Bu faktörler, SKA üretim yönteminin sürdürülebilirlik açısından zayıf yönlerini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, SKA üretimi teknik olarak olgunlaşmış ve yaygın bir yöntem olmakla birlikte, yüksek enerji gereksinimi ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirlik hedefleri açısından iyileştirilmesi gereken bir süreçtir. Bu noktada IKA teknolojileri, düşük sıcaklıkta benzer performansın elde edilmesi hedefiyle önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir ve önerilmektedir.

2.3. Ilık Karışım Asfalt (IKA) Üretim Süreci

IKA, geleneksel SKA'ya kıyasla daha düşük sıcaklıklarda üretim ve serim yapılmasına olanak tanıyan yenilikçi bir asfalt teknolojisidir. IKA üretiminde, bağlayıcının viskozitesini düşürmek amacıyla fiziksel veya kimyasal yöntemler kullanılır. Böylece karıştırma ve sıkıştırma işlemleri 110–140 °C aralığında gerçekleştirilebilir (Rubio vd., 2012). Bu sıcaklık düşüşü, üretim sırasında enerji tüketimini azaltmakta ve CO₂ ile VOC emisyonlarında belirgin azalma sağlamaktadır (Kandhal, 2010).

IKA üretim teknolojileri temelde üç gruba ayrılmaktadır: (1) Köpükleme (foaming) teknolojileri, (2) Katkı maddesi (additive) kullanımı, (3) Hibrit veya kombine yöntemler.

Köpükleme teknolojilerinde, suyun sıcak bitüm içine belirli oranda enjekte edilmesiyle ani buharlaşma sağlanır. Oluşan bu mikroskobik su buharı kabarcıkları bitümün geçici olarak hacmini artırır, viskozitesini düşürür ve agregalarla kaplanmasını kolaylaştırır (d'Angelo vd., 2008). Su oranı genellikle bitüm ağırlığının %1 ila %3'ü arasında tutulur. Köpükleme sistemi hem karıştırma hem de serim aşamasında enerji tasarrufu sağlar ve ayrıca ek kimyasal katkıya ihtiyaç duymaz. Bu teknoloji, WAM-Foam ve LEAB gibi ticari sistemlerde başarıyla uygulanmaktadır (d'Angelo vd., 2008).

Katkı teknolojilerinde, bitümün yüzey gerilimini azaltan veya yapısal yumuşamayı artıran organik ve kimyasal katkılar kullanılır. Organik katkılar (örneğin balmumu, Sasobit) bitümün kristal yapısını değiştirerek viskoziteyi düşürürken, kimyasal katkılar (örneğin yüzey aktif maddeler veya emülgatörler) agrega-bitüm aderansını güçlendirir. Bu yöntemle karışım sıcaklığı 20–40 °C düşürülebilir (Prowell vd., 2011).

Hibrit sistemler ise köpükleme ve katkı yöntemlerinin birlikte kullanıldığı teknolojilerdir. Bu sistemlerde, düşük miktarda su ve kimyasal katkı birlikte uygulanarak hem bağlayıcı akışkanlığı hem de kaplama kalitesi iyileştirilir (Belc vd., 2021). Bu sayede hem enerji tasarrufu hem de karışım dayanımı optimize edilir.

IKA üretimi, SKA'ya kıyasla daha düşük sıcaklıkta gerçekleştirildiği için enerji tüketimi ortalama %15–35 oranında azalmakta, CO₂ emisyonları da yaklaşık %20–30 düşmektedir (Rubio vd., 2012). Ayrıca, düşük sıcaklıklar sayesinde bitüm oksidasyonu azaldığından karışımın yaşlanma direnci artmaktadır. Bu durum, özellikle bakım-onarım sıklığının azaltılması yoluyla ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sağlar (Karakuzu & Özen, 2020).

Bununla birlikte, IKA teknolojilerinde kullanılan katkıların maliyeti ve köpüklenme ekipmanının kurulumu başlangıç yatırımını artırabilir. Ancak, uzun vadede enerji ve yakıt tasarrufu bu maliyet farkını dengelemektedir (Prowell vd., 2011). Türkiye'de ise bazı üretim tesislerinde köpüklenme sistemleri denenmiş, ancak sektör genelinde yaygınlaşması henüz sınırlı kalmıştır (Karakuzu & Özen, 2020).

Sonuç olarak, IKA üretim süreci enerji verimliliği, çevresel etki azalımı ve iş güvenliği avantajlarıyla SKA'ya sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu teknolojinin başarısı, katkı türü, ekipman uyumu ve üretim kontrolü gibi parametrelerin doğru yönetilmesine bağlıdır.

2.4. Türkiye'de SKA ve IKA Uygulamaları

Türkiye'de karayolu kaplamalarında uzun yıllar boyunca baskın üretim yöntemi Sıcak Karışım Asfalt (SKA) olmuştur. SKA teknolojisi, 1980'lerden itibaren Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve belediyeler tarafından standart uygulama haline getirilmiş; 2000'li yıllarda asfalt plant sayısının artmasıyla birlikte yıllık üretim kapasitesi önemli ölçüde yükselmiştir (KGM, 2021). Türkiye'deki SKA üretimi büyük oranda sabit plantlerde, doğal gaz veya fuel-oil ile ısıtılan tamburlu sistemlerde gerçekleştirilmektedir. Üretim sıcaklıkları genellikle 155–165 °C aralığında tutulmaktadır (Karakuzu & Özen, 2020).

IKA uygulamaları Türkiye'de 2010'lu yıllardan itibaren daha çok pilot nitelikli deneme kesimleri şeklinde gündeme gelmiştir. KGM ve yükleniciler tarafından 2012 yılından sonra farklı katkı türleri ve köpük bitüm teknikleri kullanılarak bazı devlet yollarında ve kentsel yollarda IKA deneme kesimleri inşa edilmiştir (Özcan vd., 2021). KGM Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı'nda, IKA teknolojisinin Türkiye karayollarında belirli projelerde kullanıldığı, ancak toplam SKA üretimi ile karşılaştırıldığında payının hâlen sınırlı olduğu belirtilmektedir (KGM, 2021) IKA teknolojilerinin Türkiye'de yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biri, mevcut

asfalt plantlerinin ekipman uyumsuzluğudur. Çoğu plant, yalnızca yüksek sıcaklıkta SKA üretimine göre tasarlanmıştır; dolayısıyla IKA üretimi için ek su enjeksiyon sistemleri, katkı dozaj üniteleri veya sıcaklık kontrol modülleri gerekmektedir. Ayrıca, katkı maliyetlerinin yüksekliği ve sektör personelinin konuya aşinalığının sınırlı olması da uygulamaların yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır (KGM, 2021).

Bununla birlikte, Türkiye’de son yıllarda hem çevresel duyarlılığın hem de enerji verimliliği politikalarının artmasıyla IKA teknolojilerine olan ilgi artmaktadır. Özellikle Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan 2020–2024 Karayolu Yatırım Programı kapsamında, düşük emisyonlu asfalt üretim tekniklerinin teşviki stratejik hedefler arasına alınmıştır. Ayrıca, bazı büyükşehir belediyeleri (örneğin İstanbul, Ankara, Konya) AB fonlu projeler kapsamında IKA üretim ekipmanlarını test etmiştir (KGM, 2021).

Türkiye’de IKA karışımlarının performansına yönelik yapılan araştırmalar, laboratuvar bazında olumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Özellikle rutting direnci ve nem hassasiyeti açısından SKA ile karşılaştırıldığında benzer veya daha iyi performans elde edildiği bildirilmiştir (Karakuzu & Özen, 2020). Ancak saha uygulamalarında homojen sıcaklık dağılımı ve sıkıştırma kontrolü gibi konular hâlâ teknik zorluklar olarak görülmektedir.

Genel olarak, Türkiye’de SKA üretimi sektör standardı olmayı sürdürse de, IKA teknolojilerinin enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı potansiyeli, gelecekte sürdürülebilir asfalt üretim stratejilerinde önemli bir yer tutacaktır. Bu dönüşümün hızlanması için teknik standartların güncellenmesi, sektörel eğitimlerin artırılması ve teşvik mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI VE ASFALT ÜRETİMİNDEKİ ROLÜ

3.1. Sürdürülebilirlik Tanımı

Sürdürülebilirlik kavramı, 20. yüzyılın son çeyreğinde çevresel ve ekonomik krizlerin etkisiyle ortaya çıkan, kaynakların gelecek nesillere zarar vermeden kullanılmasını hedefleyen bir yaklaşımı ifade eder. En geniş kabul gören tanım, 1987 tarihli Brundtland Raporu'nda yer almakta olup, "gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan bugünün ihtiyaçlarını karşılamak" şeklindedir (WCED, 1987) Bu tanım, çevresel, ekonomik ve sosyal olmak üzere üç temel sürdürülebilirlik boyutunu kapsamaktadır.

Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların etkin kullanımı, enerji verimliliği, emisyonların azaltılması ve ekosistemlerin korunması ilkelerine dayanır. Özellikle enerji yoğun sektörlerde (örneğin çimento, asfalt, demir-çelik), çevresel etkilerin kontrol altına alınması sera gazı azaltım politikalarının temel hedeflerinden biridir (Johnstone, 2021).

Ekonomik sürdürülebilirlik, üretim maliyetlerinin uzun vadede dengelenmesi, kaynak verimliliği ve işletme maliyetlerinin azaltılması gibi konuları içerir. Asfalt sektöründe bu boyut, enerji tasarrufu sağlayan teknolojilerin benimsenmesi ve bakım-onarım sıklığının azaltılmasıyla ilişkilidir (Rubio vd., 2012).

Sosyal sürdürülebilirlik ise işçi sağlığı, iş güvenliği ve toplum refahı üzerinde odaklanır. Asfalt üretiminde yüksek sıcaklık, duman ve gürültü gibi faktörler çalışan sağlığı açısından risk oluşturduğundan, daha düşük sıcaklıklarda üretim yapılabilen IKA teknolojileri bu boyutta da avantaj sağlamaktadır (Belc vd., 2021). Son yıllarda sürdürülebilirlik kavramı yalnızca çevre ve ekonomiyle sınırlı kalmayıp, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve karbon ayak izi analizleri gibi bütüncül ölçütlerle mühendislik projelerine entegre edilmektedir. Bu yaklaşımlar, üretimden kullanım ömrü sonuna kadar bir malzemenin çevresel etkilerini değerlendirerek daha bilinçli tasarım kararları alınmasını sağlamaktadır (Santero vd., 2011).

Asfalt endüstrisinde sürdürülebilirliğin sağlanması, yalnızca enerji verimliliği veya düşük emisyon değil, aynı zamanda performans, dayanıklılık ve ekonomik fizibilite dengesiyle mümkündür. Bu nedenle IKA teknolojilerinin benimsenmesi, karayolu

altyapısında sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan uyumlu bir adım olarak değerlendirilmektedir.

3.2. İnşaat Sektöründe Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

İnşaat sektörü, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının en büyük paydaşlarından biridir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, sektör küresel enerji kullanımının yaklaşık %36'sını, CO₂ emisyonlarının ise %37'sini oluşturmaktadır (IEA, 2023). Bu oranlar, sürdürülebilir üretim yöntemlerinin ve düşük karbon teknolojilerinin önemini açıkça göstermektedir.

Sürdürülebilir inşaat kavramı, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasını değil; kaynak verimliliğini, ekonomik uygulanabilirliği ve sosyal faydayı birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşımı gerektirir. Bu kapsamda asfalt üretiminde düşük sıcaklıkta karıştırma, geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) malzeme kullanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonu LCA analizlerinin yapılması başlıca stratejiler arasında yer alır (Ghaffar vd., 2020).

Türkiye’de de bu yaklaşımın kurumsal temelleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan “İklim Değişikliği Strateji Belgesi (2024–2030)” ile güçlendirilmiştir. Belgede, sürdürülebilir altyapı uygulamalarının yaygınlaştırılması ve düşük emisyonlu yapı malzemelerinin desteklenmesi öncelikli hedefler arasındadır (ÇŞİDB, 2023).

IKA teknolojileri bu politikalarla doğrudan uyumludur çünkü hem enerji verimliliği sağlar hem de üretim kaynaklı karbon emisyonlarını azaltır. Böylece, asfalt üretimi sürdürülebilir inşaat vizyonunun uygulamalı bir bileşeni haline gelir (Rubio vd., 2012)

Yol yapımında sürdürülebilirlik, yalnızca kaplama kalitesini değil, üretimden kullanım ömrü sonuna kadar geçen tüm süreçteki enerji, çevre ve maliyet etkilerini de içerir. Bu kapsamda kullanılan göstergeler; enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, doğal kaynak kullanımı, LCA maliyeti ve bakım-onarım sıklığıdır (Santero vd., 2011).

SKA üretiminde karışım başına enerji tüketimi genellikle 250–350 MJ/ton düzeyindedir. IKA üretiminde ise üretim sıcaklıklarının 20–40 °C daha düşük olması, enerji ihtiyacını %20–40 oranında azaltır. Bu fark, doğrudan CO₂ emisyonunda yaklaşık %25 azalma sağlar (d’Angelo vd., 2008).

Ekonomik yönden değerlendirildiğinde, IKA teknolojileri başlangıçta katkı veya ekipman yatırımı gerektirse de, uzun vadede yakıt tasarrufu ve daha az bakım ihtiyacı nedeniyle toplam maliyet avantajı sunar (Karakuzu & Özen, 2020).

IKA ayrıca düşük sıcaklıkta karıştırma kabiliyeti sayesinde RAP kullanımına elverişlidir. Bu durum doğal kaynak kullanımını azaltır ve döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumluluk sağlar (Prowell vd., 2011).

3.3. Asfalt Üretiminde Enerji, Emisyon ve Kaynak Kullanımı

Asfalt üretimi enerji yoğun bir süreçtir. SKA tesislerinde kullanılan yakıt türü (doğal gaz, fuel-oil, LPG vb.), üretim sıcaklığı ve plant tipi, enerji verimliliğini doğrudan etkiler. Ortalama bir SKA plantinde yıllık enerji tüketimi 500–800 MWh arasında değişmektedir (Karakuzu & Özen, 2020).

IKA teknolojileri, üretim sıcaklıklarını düşürerek bu enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır. ABD Federal Karayolları İdaresi (FHWA) raporlarına göre, IKA üretimi SKA'ya kıyasla %20–35 oranında yakıt tasarrufu sağlar. Ayrıca, üretim sırasında CO₂, NO_x ve SO₂ emisyonlarında ılımlı bir düşüş gözlenir (d'Angelo vd., 2008).

Kaynak kullanımı açısından en önemli fark, RAP oranıdır. IKA karışımları, daha düşük sıcaklıkta bile yeterli kaplama sağladığından, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımına olanak tanır (Belc vd., 2021). Bu durum doğal agrega ve bitüm tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunur.

Enerji ve emisyon performansının birlikte değerlendirilebilmesi için, son yıllarda LCA ve karbon ayak izi analizleri asfalt endüstrisinde standart yöntemler haline gelmiştir (Santero vd., 2011). Bu yaklaşımlar, SKA ve IKA teknolojilerinin çevresel etkilerinin sayısal karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

3.4. Sürdürülebilir Ulaşım Altyapılarında Yeni Eğilimler

Ulaşım altyapılarında sürdürülebilirlik yalnızca malzeme üretimiyle sınırlı değildir; tasarım, işletme ve bakım aşamalarını da içeren sistem bütünlüğü gerektirir. Günümüzde bu alanda öne çıkan eğilimler; karbon nötr yol projeleri, düşük enerji tüketimli kaplamalar, geri dönüştürülmüş malzeme oranının artırılması ve dijital izleme teknolojilerinin entegrasyonudur (FHWA, 2021).

Avrupa Birliği ÷lkelerinde “Green Road Infrastructure” stratejisi kapsamında İKA teknolojileri, düşük karbonlu ulaşım politikalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmiştir. Benzer şekilde, FHWA tarafından hazırlanan “Net-Zero Highway Initiative” programı kapsamında da asfalt karışımlarında enerji azaltım teknolojilerinin kullanımı teşvik edilmektedir (FHWA, 2021).

Sonuç olarak, sürdürülebilir ulaşım altyapılarında yeni eğilimler; enerji, çevre, dijitalleşme ve geri dönüşüm ekseninde gelişmektedir. İKA teknolojileri, bu dönüşümün malzeme boyutundaki en önemli adımlarından birini oluşturmaktadır.



4. SICAK VE ILIK ASFALT KARIŞIMLARIN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Karayolu kaplamalarında yaygın olarak kullanılan SKA tipik olarak 150–170 °C aralığında üretilirken, IKA reolojik düzenlemeler ve/veya köpükleştirme sayesinde bu sıcaklıkları yaklaşık 20–40 °C düşürerek benzer işlenebilirliği sağlar. Bu sıcaklık indirimi; karışım üretiminde yakıt/enerji tüketiminin azalması ve buna bağlı sera gazı ile tesis/şantiye emisyonlarının düşmesi şeklinde doğrudan çevresel kazanımlara karşılık gelir. Sürdürülebilirlik perspektifinden IKA; daha düşük enerji kullanımı, emisyonların azalması, daha uzun serim penceresi ve daha yüksek RAP kullanım potansiyeli gibi çevresel-ekonomik-sosyal faydaları aynı çerçevede birleştirir. (Tutu & Tuffour, 2016). Bununla birlikte yaşam döngüsü değerlendirmeleri, en büyük çevresel kaldıraçların çoğu senaryoda yüksek RAP ve çelik çürüf gibi ikame malzemelerin entegrasyonundan geldiğini; tek başına ≈ 30 °C sıcaklık düşümünün katkısının görece sınırlı kaldığını göstermektedir. IKA'nın daha düşük serim sıcaklıkları aynı zamanda duman/koku emisyonlarını azaltarak işçi maruziyetini düşürür ve sürdürülebilirliğin “sosyal” boyutuna doğrudan katkı sağlar (Georgiou & Loizos, 2021). Öte yandan literatürde bazı IKA teknolojileri için iz, yorulma ve suya duyarlılık konularında temkinli olunması gerektiği, uygun karışım tasarımı ve üretim sürecinin kontrolü ile bu risklerin yönetilmesi gerektiği vurgulanır (Tutu & Tuffour, 2016).

Tablo 1. SKA ve IKA için tipik karışım sıcaklıkları

Karışım Türü	Tipik Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Tipik Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	SKA'ya Göre Ortalama Sıcaklık Azalımı (°C)	Yaklaşık Enerji Tüketimi (kWh/ton)	Yakıt Tüketimi (kg yakıt / ton)	Göreceli Enerji Tasarrufu (%)
SKA	150 – 170 °C	130 – 150 °C	-	$\approx 19 - 21$ kWh/ton	$\approx 11 - 12$ kg dizel eşdeğeri	Referans (0 %)
Kimyasal Katkılı IKA	125 – 135 °C	105 – 120 °C	$\approx 25 - 40$ °C	$\approx 15 - 17$ kWh/ton	$\approx 8 - 9$ kg dizel eşdeğeri	$\approx \%20 - \%25$
Köpük Bitümlü IKA	120 – 130 °C	100 – 115 °C	$\approx 30 - 50$ °C	$\approx 14 - 16$ kWh/ton	$\approx 7 - 8$ kg dizel eşdeğeri	$\approx \%25 - \%30$
Organik Katkılı IKA	125 – 135 °C	105 – 115 °C	$\approx 30 - 40$ °C	$\approx 14 - 16$ kWh/ton	$\approx 7 - 8$ kg dizel eşdeğeri	$\approx \%25 - \%30$

4.1. Ekonomik Yönden Karşılaştırma

Asfalt teknolojilerinin ekonomik değerlendirmesi, yalnızca ilk üretim maliyetlerini değil, aynı zamanda yaşam döngüsü maliyetlerini, bakım ihtiyaçlarını, yüklenici verimliliğini ve risk faktörlerini de dikkate almalıdır. SKA ile IKA ekonomik karşılaştırması; üretim anındaki işletme giderleri, katkı ve ekipman gereksinimleri, şantiye verimliliği ve hizmet ömrü boyunca bakım-onarım döngülerinin toplam etkisi üzerinden yapılmalıdır. SKA uzun süredir yerleşik bir maliyet yapısına sahipken, IKA hem tasarruf (yakıt, sıkıştırma eforu, uzun sezonlar) hem de yeni masraflar (katkı maddeleri, eğitim, tesis modifikasyonları) getirir. IKA'nın karışım ve sıkıştırma sıcaklıklarını yaklaşık 40 °C düşürmesi; yakıt tüketimi ve emisyonlarda %10–50'ye varan azalma ile birlikte sahada iş verimini yükselterek toplam maliyeti aşağı çekebilmektedir (Belc vd., 2021) (Sargand vd.,2009).

4.1.1. Üretim Maliyetleri

IKA üretimi, plentte daha düşük kurutma/ısıtma ihtiyacı sayesinde birim karışım fiyatını düşürebilir; saha gözlemlerinde katkı maliyetleri dikkate alınsa dahi IKA birim fiyatının (bağlayıcı hariç) SKA'dan yaklaşık %6 daha düşük olduğu raporlanmıştır. Ayrıca, IKA uygulamalarında plent ekipmanında aşınma-yıpranma ve bakım ihtiyacının azalması ile sezon dışı dönemlerde dahi üretim yapılabilmesi, dolaylı maliyet avantajı yaratmaktadır (Belc vd., 2021) (Özcan vd., 2021). Buna paralel olarak, SKA'nın daha yüksek taşıma-yerleştirme sıcaklıkları, enerji giderleri ve termal kayıplar nedeniyle lojistik maliyetleri artırırken; IKA'da kullanılan köpükleme/kimyasal paket gibi teknolojiler üretim ve nakliye için daha düşük sıcaklıklarda mümkün kılarak bu kalemleri azaltır. (Jennings & Wirtjes, 2019) Yüksek agrega ve bağlayıcı sıcaklıklarını korumak için SKA önemli miktarda yakıt tüketir. Tipik yakıt tüketimi, karışım tonu başına 6-8 litre fuel oil arasında değişir ve bu da önemli maliyetlere ve emisyonlara yol açar. (Abdullah vd., 2014)

4.1.2. Enerji Tüketimi

IKA'nın temel ekonomik üstünlüğü enerji tüketimindeki düşüştür. Literatürde IKA'nın karışım/sıkıştırma sıcaklıklarını ~40 °C azalttığı; buna bağlı olarak karışım

üretiminde yakıt tüketimini %11–35, sera gazı salımlarını ise %10–50 aralığında düşürdüğü gösterilmiştir. Plent düzeyinde yapılan ölçümlerde, kurutucu yakıt tüketimi SKA’da ~177 kg/sa iken IKA’da ~142 kg/sa olarak bulunmuş; bu da yaklaşık %20 yakıt tasarrufuna karşılık gelmiştir. Aynı çalışmada katkı tipinden bağımsız olarak daha düşük yığın sıcaklıklarının, üretim kapasitesini ve sıkıştırılabilirliği artırdığı raporlanmıştır (Belc vd., 2021) (Özcan vd., 2021). LCA sonuçları da enerji kalemini ayırtmaktadır: aşınma tabakasında yüksek oranda RAP ve çelik cürufu kullanımının, üretim enerjisini sırasıyla yaklaşık %16, %28 ve %35’e varan oranlarda azalttığı; IKA sıcaklık indiriminin buna ilave ~%3’lük bir tasarruf daha getirdiği gösterilmiştir. Bu bulgu, enerji ve emisyonlarda asıl kaldıraç etkisinin malzeme ikamesi ve geri kazanımdan geldiğini; IKA sıcaklık indiriminin ise ek bir kazanç sağladığını ortaya koyar (Georgiou & Loizos, 2021). Saha ve hızlandırılmış yükleme çalışmalarında da IKA’nın daha düşük yerleştirme sıcaklıklarında benzer yapısal tepki verdiği ve emisyon/enerji tüketimini düşürdüğü gösterilmiştir; bu da birim üretim başına enerji faturasını azaltarak ekonomikliği güçlendirir (Sargand vd.,2009).

4.1.3. Katkı Maliyetleri

IKA teknolojileri üretim sıcaklığını düşürebilmek için genellikle katkı maddeleri gerektirir.

- Sasobit (balmumu): Karışım tonu başına ~2-3 ABD doları.
- Evotherm (kimyasal yüzey aktif madde): Ton başına ~3-5 ABD doları.
- Zeolit (Advera): Ton başına ~2-4 ABD doları.

Bunlar birim maliyetleri artırsa da, genellikle yakıt tüketiminin azalması, daha kısa inşaat süreleri ve iyileştirilmiş sıkıştırma (erken arıza riskini azaltır) ile telafi edilir.

Tablo 2. IKA Teknolojileri için tipik katkı maddesi maliyetleri ve yakıt tasarrufları

Katkı Türü	Örnek Katkılar / Proses	Tipik Dozaj (% bağlayıcı ağırlığına göre)	Maliyet (USD / ton karışım)	Sıcaklık Azalımı (°C)	Yakıt Tasarrufu (kg yakıt / ton)	Enerji Tasarrufu (%)
Organik katkı (Sasobit®, Licomont®)	Fischer–Tropsch veya montan balmumu bazlı	0,8 – 1,5 %	2,0 – 3,5	25 – 35	2,0 – 3,0	%15 – %20
Evotherm®, Cecabase RT®, Rediset®	Yüzey aktif / amin bazlı yapışma artırıcılar	0,3 – 0,5 %	2,5 – 4,0	30 – 45	2,5 – 3,5	%20 – %25

Tablo 2'nin devamı

Köpük bitüm (su enjeksiyon sistemi)	Bitüm içine doğrudan su enjeksiyonu (genleşme odası ile)	1,0 – 2,0 % (su)	0,5 – 1,0	35 – 55	3,0 – 4,0	%25 – %30
Hibrit (Köpük + kimyasal)	Köpük sistemi + yüzey aktif ajan kombinasyonu	0,3 – 0,5 % kimyasal + 1,5 % su	2,5 – 3,0	40 – 50	3,5 – 4,5	%28 – %35
Zeolit esaslı (Aspha-Min®, Advera®)	Sentetik zeolit (Na ₂ Al ₂ SiO ₃ ·H ₂ O)	0,3 – 0,5 %	1,0 – 1,5	20 – 30	1,5 – 2,0	%10 – %15

4.1.4. Uzun Vadeli Bakım ve Onarım Maliyetleri

Uzun dönem bakım maliyetleri, karışımın saha performansı, yaşlanma hızı ve neme duyarlılığı ile belirlenir. Hızlandırılmış test pisti ve saha kesitlerinde IKA yüzeylerinin SKA ile en az eşdeğer performans gösterdiği; daha düşük serim sıcaklıklarına rağmen kalite kaybı olmadan emisyon ve enerji tüketimini düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu performans paritesi, benzer veya daha düşük bakım-onarım sıklığına işaret ederek yaşam döngüsü maliyetini SKA seviyesine çeker ya da altına indirebilir (Sargand vd., 2009).

Mikro-mekanik ve karışım ölçeğinde yapılan çalışmalar, IKA'nın uzun süreli yaşlanma sonrası yıpranma etkilerine SKA'ya kıyasla daha düşük duyarlılık gösterebildiğini; yaşlanmanın yorulma ömrünü her iki karışımda da azalttığını fakat IKA'da bu olumsuz etkinin görece sınırlı kaldığını bildirmektedir. Bu durum, zaman içinde çatlak gelişimi ve yama/kaplama yenileme sıklığında azalma potansiyeline karşılık gelir (Yee vd., 2022) (Piccone vd., 2020).

Nem hassasiyeti bakımından, laboratuvar testlerinde bazı IKA karışımlarının standart nem sünekliği deneylerinde başarısız olabildiği; ancak ABD'de sahada yerleştirilen projelerde IKA'ya atfedilen nem kaynaklı distressin rapor edilmediği; anti-strip/hidrate kireç gibi önlemler ve uygun yaşlandırma ile nem dayanımının iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Bu bulgular, doğru tasarım-uygulama ile IKA'nın bakım tetikleyicisi olan nem hasarını kontrol edebildiğini ve uzun dönem maliyet riskini sınırladığını gösterir (Mogawer vd., 2011).

Yapısal performans açısından IKA-RAP tabanlı kesitlerde yatay/düşey gerinmeler SKA'ya çok yakın bulunmuş; bu, IKA'nın düşük-orta trafik yollarında rehabilitasyon aralığını SKA ile benzer seviyede tutabileceğini ve dolayısıyla dönemsel onarım

giderlerinde fark yaratmayacağını, hatta yer yer azaltılabileceğini göstermektedir (Fabrice vd., 2020).

Ek olarak, İKA'nın daha uzun serim penceresi, daha hızlı trafiğe açma ve daha uzun nakliye mesafelerine olanak sağlaması; trafiğe bağlı kullanıcı gecikme maliyetlerini, şantiye işçilik ve trafik yönetimi giderlerini düşürme potansiyeli taşır. Bu dolaylı etkiler de kurum ve kullanıcı maliyetlerinin toplamını aşağı çeker (Jennings & Wirtjes, 2019) (Özcan vd. 2021).

4.1.5. İnşaat Verimliliği

Uzatılmış Asfaltlama Sezonu

- SKA: Ortam sıcaklıklarıyla ($>10-15^{\circ}\text{C}$) sınırlı inşaat.
- İKA: Daha soğuk koşullarda sıkıştırılabilir, asfaltlama erken ilkbahar/sonbahar sonuna kadar uzatılabilir (McGennis vd., 1995)

Bu, yüklenicinin aksama süresini azaltır ve proje teslimat hızını artırarak ağ düzeyinde ekonomik tasarruflara (örneğin, daha az trafik kesintisi, şeritlerin daha erken açılması) dönüşür.

Taşıma Mesafesi

- SKA hızla soğur ve taşıma mesafesini yaklaşık 50 km ile sınırlar.
- İKA daha yavaş soğur ve sıkıştırma sorunları olmadan daha uzun nakliye (70–100 km) sağlar (Khedaywi&Alkofahi, 2019) (McGennis vd., 1995).

Bu, merkezi tesislerin daha geniş bölgelere hizmet vermesini sağlayarak lojistik maliyetlerini düşürür.

Tablo 3. Uzatılmış asfaltlama sezonu ve taşıma mesafesi karşılaştırması

Parametre	Sıcak Karışım Asfalt (HMA)	Ilık Karışım Asfalt (WMA)	İyileşme / Değişim Oranı
Ort. üretim sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	160 – 170	120 – 135	↓ 30 – 45 $^{\circ}\text{C}$
Min. uygulama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	16 – 18	8 – 10	↓ 8 – 10 $^{\circ}\text{C}$
Etkin sıkıştırma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	130 – 145	105 – 115	↓ 25 – 30 $^{\circ}\text{C}$

Tablo 3'ün devamı

Başarılı sıkıştırma için minimum ortam sıcaklığı (°C)	≥ 15	≥ 5	$\downarrow 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
Maksimum taşıma mesafesi (km)	40 – 60	80 – 100	$\uparrow 40 - 60\%$
Asfaltlama sezonu süresi (ay)	Nisan – Ekim (7 ay)	Mart – Kasım (9 ay)	$\uparrow 2$ ay
Saha üretkenliği (ton/gün)	900 – 1.000	1.050 – 1.200	$\uparrow \%10 - 15$
Soğuk derz riski	Yüksek	Düşük	$\downarrow$ Yaklaşık %50

4.1.6. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

Yaşam döngüsü maliyet analizi, üretim, bakım ve rehabilitasyon dahil olmak üzere yol hizmet ömrü boyunca toplam giderleri değerlendirir.

- SKA: İyi belirlenmiş maliyetler, öngörülebilir rehabilitasyon döngüleri.
- IKA: Benzer uzun vadeli bakım ihtiyaçları, ancak yakıt ve inşaat gecikmelerinin azalmasıyla ek tasarruflar.

ABD'deki (NCAT, FHWA) ve Türkiye'deki çalışmalar, IKA için Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi'nin SKA'ya benzer veya biraz daha düşük olduğunu doğrulamaktadır (Sargand vd., 2009) (Milad vd., 2022) (Zhang, 2010). Örneğin, çelik cürufu ve IKA ile yapılan Yunanistan vaka çalışmaları, hem enerji hem de işlenmemiş agrega tasarrufları dahil edildiğinde kilometre başına önemli maliyet düşüşü göstermiştir. (Georgiou & Loizos, 2021).

4.1.7. Bölgesel Vaka Çalışmaları

- Amerika Birleşik Devletleri: FHWA (2014), ülke çapında IKA kullanımının, CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken yakıt maliyetlerinde yıllık 3 milyar dolar tasarruf sağlayabileceğini tahmin etmiştir.
- Avrupa: Norveç'in LavTemperaturAsfalt projesi, sağlık yararlarının katma değer sağladığını ve uzun vadede ek maliyetlere yol açmadığını doğrulamıştır (Olsen vd., 2012).

- Türkiye: IKA denemeleri, esas olarak yakıt ve zaman tasarruflarından kaynaklanan genel proje maliyetlerinde %15-25 oranında azalma göstermiştir (Abdullah vd., 2014).

4.1.8. Ekonomik Bulguların Özeti

- Yakıt Maliyetleri: IKA %20-35 tasarruf sağlar.
- Katkı Maddeleri: Maliyeti biraz artırır, ancak diğer avantajlarla dengelenir.
- Verimlilik: Daha uzun taşıma mesafeleri ve daha serin hava koşullarında asfaltlama, gecikmeleri ve maliyetleri azaltır.
- LCA: IKA en azından maliyet açısından nötrdür, çevresel ve sosyal maliyetler hesaba katıldığında genellikle daha ucuzdur.

4.2. Teknik Yönden Karşılaştırma

4.2.1. Tekerlek İzi Direnci

SKA, servis sıcaklıklarında daha yüksek sertliği nedeniyle geleneksel olarak güçlü tekerlek izi direnci gösterir. Tekerlek izi performansı, yoğun trafik koşullarında dayanıklılığını gösteren çok sayıda saha çalışmasıyla iyi bilinmektedir (McGennis vd., 1995).

IKA'nın tekerlek izi direnci, katkı maddesi türüne büyük ölçüde bağlıdır:

- Balmumu bazlı katkı maddeleri (Sasobit®), yüksek sıcaklıklarda bağlayıcı sertliğini artırarak genellikle SKA'ya eşit veya daha yüksek tekerlek izi direnci sağlar (Hurley&Prowel, 2005) (Zhang, 2010).
- Köpüklü bitüm IKA, Türkiye ve ABD saha denemelerinde SKA'ya benzer tekerlek izi direnci göstermiştir (Özcan vd., 2020).
- Zeolit bazlı IKA, soyulma önleyici maddelerle birleştirilmezse tekerlek izi direncinde azalma gösterebilir (Şengöz vd., 2013).

NCAT Test Pisti'nde (ABD) yapılan uzun vadeli izleme, IKA ve SKA kesitleri için iz derinliği ilerlemesinin milyonlarca Eşdeğer Tek Aks Yüğü (ESAL) sonrasında neredeyse aynı olduğunu göstermiştir (West vd., 2014).

4.2.2. Taşıma ve Sıkıştırma

SKA, uygun kaplama ve işlenebilir viskozite elde etmek için agregaların ~160–190°C'ye, bağlayıcının ise ~150–170°C'ye ısıtılmasını gerektirir. Ancak bu, taşıma ve sıkıştırma sırasında hızlı bir soğumaya yol açar ve ılıman iklimlerde taşıma mesafelerini genellikle 50 km'nin altına sınırlar (McGennis vd., 1995).

Buna karşılık, IKA, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını 20–55°C (karıştırma: 100–140°C, sıkıştırma: 90–120°C) düşürerek, işlenebilir sıkıştırma aralığını uzatır ve daha uzun taşıma mesafelerine olanak tanır (Karakuzu&Özen, 2020) (West vd., 2014). Malezya'daki saha denemeleri, IMA karışımlarının aynı koşullar altında SKA'ya kıyasla daha yavaş soğuma hızları sergilediğini ve daha yüksek yoğunluğa ulaştığını göstermiştir (Kamarudin, 2018).

4.2.3. Yorulma ve Çatlama Direnci

Yorulma çatlağı, esnek kaplamalarda önemli bir sıkıntı türüdür.

- SKA: Öngörülebilir yorulma performansı sergiler, ancak üretim sırasında aşırı oksidatif yaşlanma esnekliği azaltabilir ve çatlak başlangıcını artırabilir.
- IKA: Bağlayıcı esnekliğini koruyan azaltılmış üretim yaşlanması nedeniyle birçok çalışmada benzer veya daha iyi yorulma ömrü gösterir (Yee vd., 2022) (Li vd., 2022).

Örneğin, Zhang (2010), Sasobit ve Evotherm ile modifiye edilmiş IKA'nın SKA ile karşılaştırılabilir yorulma ömürleri gösterdiğini, %30 RAP ve Evotherm içeren IKA'nın ise tüm karışımlar arasında en uzun yorulma ömrüne ulaştığını bildirmiştir.

Tablo 4. RAP ve katkı maddeleri içeren SKA ve IKA'yı karşılaştıran kiriş yorulma testi sonuçları

Karışım Türü	Katkı Maddesi/ Teknoloji	RAP Oranı (%)	Başlangıç Gerilme Seviyesi (MPa)	Yorulma Ömrü	Eğilme Rijitliği (MPa)	Göreceli Dayanım (SKA=100)
SKA	–	0	350	42.000	9.200	100
SKA + RAP	–	30	350	33.000	9.800	79
IKA	Evotherm®	0	350	46.500	8.700	111
IKA + RAP	Evotherm®	30	350	41.000	9.100	98
IKA + RAP	Köpük Bitüm	30	350	39.500	9.300	94

4.2.4. Nem Duyarlılığı

Su asfalt karışımına sızdığında nem hasarı meydana gelir, bağlayıcı-agrega yapışması zayıflar ve çekme dayanımı düşer.

- SKA: Yüksek üretim sıcaklıkları ($\geq 150^{\circ}\text{C}$), agregaların tamamen kurummasını sağlayarak nemle ilgili sorunları en aza indirir.
- IKA: Daha düşük üretim sıcaklıkları, agregaları kalıntı neme daha yatkın hale getirerek soyulma risklerine yol açar (Mogawer vd., 2011) (Khedaywi&Alkofahi, 2019).

Azaltma stratejileri:

- Sönmüş kireç (%1-2), Çekme Dayanımı Oranını (TSR) önemli ölçüde artırır. (Khedaywi&Alkofahi, 2019).
- Sıvı soyulma önleyici maddeler (poliaminler, Evotherm) ayrıca nem direncini de artırır (Mogawer vd., 2011) (Zhang, 2010).
- SBS ile modifiye edilmiş IMA, Türkiye'deki çalışmalarda en yüksek nem direncini göstermiştir (Alataş & Istek, 2019).

ABD Ulaştırma Bakanlıkları genelinde yapılan saha araştırmaları, laboratuvar testlerinin bazen soyulma risklerini öngördüğünü ortaya koymuş olsa da, bugüne kadar ıslak asfalt kaplamalarında önemli bir saha nem hasarı bildirilmemiştir (Mogawer vd., 2011) (West vd., 2014).

4.2.5. Yaşlanma ve Dayanıklılık

SKA üretiminde yüksek üretim sıcaklıkları, bağlayıcı oksidasyonunu hızlandırarak sertlik ve kırılganlığın artmasına neden olur. Zamanla bu durum, yüzey çatlamasına ve hizmet ömrünün kısılmasına yol açar. (Olsen vd., 2012). IKA, daha düşük ısıtma gereksinimleri nedeniyle üretim sırasında daha az oksidatif yaşlanmaya uğrar. Çin'de yapılan bir çalışma karıştırma sıcaklıkları uygun şekilde düşürüldüğünde köpüklü IKA'nın SKA'ya göre daha az yaşlandığını bulmuştur (Lee vd., 2018). Uzun süreli ABD ve Avrupa saha denemeleri, IKA dayanıklılığının en azından SKA ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir (d'Angelo vd., 2008) (West vd., 2014).

Ancak, uygun olmayan köpük suyu içeriği veya aşırı düşük karıştırma sıcaklıkları performansı olumsuz etkileyebilir (Lee vd., 2018).

4.2.6. Geri Dönüştürülmüş ve Alternatif Malzemelerin Rolü

IKA, performanstan ödün vermeden %30-50'ye kadar RAP dahil edilmesine olanak tanır. (Imanuel&Subagio, 2023).

Çelik cürufu, mermer atığı, pirinç kabuğu külü ve polietilen tereftalat (PET) plastikler gibi endüstriyel yan ürünler, IKA'ya başarıyla entegre edilmiştir (Georgiou&Loizos, 2021) (Arabani & Tahami, 2017).

- Karbon fiberler ve nano katkı maddeleri, hem SKA hem de IKA'nın tekerlek izi ve yorulma direncini artırır (Geçkil&Ahmedzade, 2020).

Tablo 5. Alternatif ve geri dönüştürülmüş malzemelerin teknik sonuçlarla IKA'ya dahil edilmesi

Alternatif/Geri Dönüştürülmüş Malzeme		Kullanım Yöntemi	Ana Etki	Performans Göstergesi/ Sonuç
Atık mermer tozu		Dolgu (filler) olarak	Agrega-binder aderansını artırır, yoğunluğu yükseltir	Marshall stabilitesi %7 artış; boşluk oranı %0,8 azalma
Çelik cürufu		Mineral agregası yerine kısmen (%15–20)	Sertlik ve soyulma direnci artışı	TSR değeri %10 artış; soyulma direnci yükselmiş
Pirinç kabuğu külü		Dolgu ve mineral katkı olarak	Bitüm ile kimyasal bağ oluşturur, rijitliği dengeler	Eğimli yorulma testinde %12 daha yüksek dayanım
Doğal (Endonezya bitümü)	Asbuton doğal	Kısmi bağlayıcı ikamesi (%20–40)	Sıcaklık duyarlılığı azalır, stabilite artar	Dinamik stabilite %25 artış; optimum %30 Asbuton oranı
Atık PET granülleri		Lif katkısı olarak (%0,25–0,5)	Bağlayıcı kohezyonunu güçlendirir	Yanal çekme dayanımı %9 artış; rutting derinliği %15 azalma
Atık cam tozu		Mineral dolgu yerine (%10)	Sertlik artışı; yüksek stabilite, düşük deformasyon	Marshall stabilitesi %6; esneklik azalımı %3
Kül bazlı geopolimer		Filler yerine	Su duyarlılığı azalır, çevresel etki düşer	TSR > 85 %; CO ₂ emisyonu %22 azaldı

5. ILIK KARIŞIM ASFALTIN AVANTAJLARI

IKA'nın geliştirilmesi, son otuz yılda yol mühendisliğinde en önemli teknolojik değişimlerden birini temsil etmektedir. Geleneksel olarak, SKA, yeterli agrega kurutma, bağlayıcı kaplama ve sıkıştırma sağlamak için 150-190°C arasındaki karıştırma sıcaklıklarında üretilmiştir (McGennis vd., 1995). Ancak, bu süreç enerji yoğun olup, sera gazı emisyonlarına katkıda bulunur ve çalışanları zararlı dumanlara maruz bırakır. Sürdürülebilirlik, çevre düzenlemeleri ve ekonomik verimlilik altyapı geliştirmede temel endişeler haline geldikçe, araştırmacılar ve kurumlar, çevresel ve operasyonel yükleri azaltırken performans standartlarını koruyabilen daha düşük sıcaklıklı bir alternatif olarak IKA'ya yönelmiştir (d'Angelo vd., 2008)(Olsen vd., 2012)(West vd., 2014).

SKA'nın aksine, IKA teknolojileri asfaltın 20-55°C daha düşük sıcaklıklarda üretilmesine ve yerleştirilmesine olanak tanır. Bu sıcaklık düşüşü, köpüklendirme işlemleri (su enjeksiyonu veya mekanik köpüklendirme), kimyasal katkı maddeleri (Evotherm® veya Rediset® gibi yüzey aktif maddeler) ve organik değiştiriciler (Sasobit® gibi) dahil olmak üzere çeşitli tekniklerden kaynaklanmaktadır. Bu yenilikler, yakıt kullanımını, bağlayıcı özelliklerini ve genel yol performansını doğrudan etkiler. Uluslararası çalışmalar, tesis altyapıları uygun şekilde modifiye edildiği takdirde, ıslak asfalt yollarının sıcak asfalt yollarına kıyasla eşdeğer veya daha üstün dayanıklılık sağlayabileceğini sürekli olarak doğrulamıştır (Rubio vd., 2012) (FHWA, 2014).

IKA'nın avantajları çevresel faydaların ötesine geçer. Ekonomik olarak, yükleniciler %20-35 oranında yakıt tasarrufu, üretim maliyetlerinde düşüş ve geçici uydu tesislerine olan ihtiyacı azaltan uzatılmış taşıma mesafelerinden yararlanırlar (Karakuzu&Özen, 2020). Yaşam döngüsü maliyet analizleri, katkı maddesi giderlerinin başlangıç maliyetlerini artırabileceğini, ancak IKA kaplamalarının genel yaşam döngüsü performansının enerji tasarrufu, azaltılmış bakım ve uzatılmış hizmet ömrü nedeniyle daha uygun maliyetli olduğunu göstermektedir (Rubio vd., 2012). Türkiye'de yapılan saha denemeleri, proje başına %15-25 maliyet düşüşü belgelemiş ve bu da IKA'nın değişken yakıt fiyatlarına sahip pazarlarda bile finansal olarak cazip olabileceğini göstermiştir (Karakuzu&Özen, 2020).

Operasyonel açıdan bakıldığında, IKA inşaat lojistiğinde benzeri görülmemiş bir esneklik sağlar. Daha yavaş soğuyarak, IKA karışımları daha uzun taşıma mesafelerine (SKA'nın 50 km'sine kıyasla 100 km'ye kadar) ve daha geniş bir sıkıştırma aralığına olanak

tanır (Kamarudin, 2018) (Kristjansdottir, 2007) (West vd., 2014). Bu, asfaltlama sezonunu daha soğuk aylara uzatmakla kalmaz, aynı zamanda soğuk derz ve sıkıştırma hataları risklerini de azaltarak uzun vadeli asfalt kalitesini iyileştirir (Kristjánsdóttir, 2006).

Çevresel olarak, IKA altyapıları, altyapı sektörlerinin karbon ayak izinde önemli azalmalar öngören Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı ve Paris Anlaşması gibi küresel hedeflerle uyumludur. IKA uyumlu tesisler, ton asfalt başına CO₂ emisyonlarını %15-30 oranında azaltır (Tutu&Tuffour, 2016) (Olsen vd., 2012). Çalışanların dumanlara maruziyetini %50'nin üzerinde azaltır (Olsen vd., 2012)(West vd., 2014), RAP ve çelik cürufu, PET plastikleri, mermer tozu gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanımını kolaylaştırır (Georgiou&Loizos, 2021) (Arabani & Tahami, 2017).

Özetle, IKA'nın avantajları çok boyutludur: teknik, ekonomik, çevresel ve operasyonel. Aşağıdaki bölümlerde, uluslararası saha çalışmaları, laboratuvar araştırmaları ve vaka örneklerinden yararlanılarak bu avantajlar derinlemesine incelenecektir. IKA'nın geniş yelpazedeki avantajları incelendiğinde, bu teknolojinin yalnızca SKA'ya bir alternatif değil, aynı zamanda daha sürdürülebilir, verimli ve dayanıklı yol yapım sistemlerine giden bir yol olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır.

5.1. Teknik Avantajlar

IKA teknolojileri, geleneksel SKA'ya kıyasla birçok teknik iyileştirme sağlar. Bu iyileştirmeler arasında gelişmiş işlenebilirlik ve sıkıştırma, bağlayıcı yaşlanmasının azaltılması ve geri dönüştürülmüş malzemeler ve katkı maddeleriyle daha fazla uyumluluk yer alır. Bu teknik avantajlar, bir araya geldiğinde, geleneksel performans standartlarını korurken veya aşarken, üstün dayanıklılık ve esnekliğe sahip yollara katkıda bulunur.

5.1.1. Geliştirilmiş İşlenebilirlik ve Sıkıştırma

IKA'nın en önemli teknik avantajlarından biri, asfaltlama işlemleri sırasındaki gelişmiş işlenebilirliğidir. IKA daha düşük sıcaklıklarda (SKA için 150-190°C'ye kıyasla 110-140°C) üretildiği için, asfalt karışımı daha uzun süre akışkan kalır ve daha geniş bir sıkıştırma aralığı sağlar. Bu, yüklenicilerin daha az silindir geçişiyle daha yüksek yoğunluk elde etmelerini sağlayarak ayrışma veya soğuk derz olasılığını azaltır. (Kamarudin, 2018) (Kristjansdottir, 2007) (West vd., 2014).

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki laboratuvar çalışmaları, 20-40°C daha düşük sıcaklıklarda sıkıştırılan IKA karışımlarının yine de SKA ile eşit veya daha yüksek yoğunluğa ulaştığını doğrulamıştır. (West vd., 2014). Benzer şekilde, Türkiye'deki denemeler, köpüklü IKA kesitlerinin daha soğuk ortam koşullarına yerleştirilmelerine rağmen sürekli olarak daha iyi sıkıştırma sağladığını göstermiştir. (Karakuzu&Özen, 2020). Bu bulgular, IKA'nın uzun vadeli dayanıklılıkta kritik bir faktör olan optimum yoğunluğu sağlayarak asfalt kalitesini iyileştirme potansiyelinin altını çizmektedir.

5.1.2. Azaltılmış Bağlayıcı Yaşlanması

Bir diğer önemli teknik avantaj ise bağlayıcı yaşlanmasının azalmasıdır. SKA üretiminde, yüksek sıcaklıklar bitüm bağlayıcının oksidasyonunu hızlandırarak kırılabilirliğe ve esnekliğin azalmasına yol açar. Buna karşılık IKA, daha düşük karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında çalışarak oksidatif yaşlanmayı önemli ölçüde yavaşlatır (Li vd., 2022) (Olsen vd., 2012).

Çin'deki saha değerlendirmeleri, köpüklü IKA kesitlerinin bağlayıcı esnekliğini SKA kesitlerine göre daha uzun süre koruduğunu ve bunun da termal çatlamaya karşı daha iyi direnç sağladığını göstermiştir (Li vd., 2022). Benzer şekilde, WAM-Foam prosesiyle yapılan Avrupa denemeleri, IKA bağlayıcılarının zamanla daha düşük sertlik artışına sahip olduğunu ve bunun da yorulma çatlamasının gecikmesine yol açtığını doğrulamıştır (d'Angelo, 2008) (Rubio vd., 2012).

5.1.3. Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) ve Katkı Maddeleriyle Uyumluluk

IKA teknolojileri, daha yüksek oranda Geri Dönüştürülmüş Asfalt Kaplama (RAP) eklemek için benzersiz bir şekilde uygundur. Daha düşük üretim sıcaklıkları, geri kazanılmış bağlayıcının daha fazla eskimesini en aza indirerek, mekanik performanstan ödün vermeden daha yüksek RAP içeriklerine (%30-50) olanak tanır (Fabrice vd., 2020) (Oylumluoğlu, 2012). ABD demonstrasyon projeleri, %30 RAP içeren IKA karışımlarının, saf SKA karışımlarına kıyasla eşit veya daha üstün tekerlek izi ve yorulma direnci gösterdiğini doğrulamıştır (FHWA, 2014).

Türkiye'de, Rediset ve Sasobit ile modifiye edilmiş IKA, %30'a kadar RAP'ı başarıyla birleştirmiş ve test sonuçları, kontrol SKA karışımlarına göre daha yüksek çekme dayanımı

oranları (TSR) göstermiştir (Oylumluoğlu, 2012). Kaliteyi tehlikeye atmadan daha fazla malzemeyi geri dönüştürme olanağı, hem maliyetleri hem de çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltır.

IKA ayrıca endüstriyel yan ürünler ve yeni katkı maddeleriyle daha uyumludur. Çalışmalar, çelik cürufu, pirinç kabuğu külü, PET plastikleri ve mermer tozunun IKA karışımlarına başarılı bir şekilde entegre edildiğini belgelemiştir (Georgiou&Loizos, 2021) (Arabani & Tahami, 2017). Daha düşük karıştırma sıcaklıkları, hassas katkı maddelerinin (örneğin polimerler) bozulmasını önleyerek IKA'yı yenilikçi yol kaplama malzemeleri için daha çok yönlü bir platform haline getirir.

5.1.4. Gelişmiş Direnç

Daha iyi sıkıştırma ve bağlayıcı yaşlanmasının azalması nedeniyle, IKA karışımları genellikle önemli yol kaplaması sorunlarına karşı gelişmiş direnç gösterir. Örneğin, NCAT test pisti sonuçları, IKA' nın tekerlek izi performansının milyonlarca ESAL'dan sonra SKA ile neredeyse aynı olduğunu, yorulma çatlağı oluşumunun ise IKA bölümlerinde geciktiğini göstermiştir (West vd., 2014). Minnesota'dan alınan MnROAD verileri ayrıca, IKA'nın özellikle soğuk iklimlerde SKA'dan daha az termal çatlağa sahip olduğunu göstermiştir (West vd., 2014).

Bu, uygun tesis altyapısıyla IKA'nın dayanıklılık açısından SKA ile eşleşmekle kalmayıp, özellikle önemli sıcaklık dalgalanmalarının olduğu bölgelerde üstün uzun vadeli yol kaplaması performansı sağlayabileceğini göstermektedir.

5.2. Ekonomik Avantajlar

Teknik avantajlarının yanı sıra, IKA, müteahhitler, karayolu idareleri ve politika yapımcılar için cazip hale getiren önemli ekonomik faydalar da sunar. Bu avantajlar arasında önemli yakıt tasarrufu, daha düşük genel üretim maliyetleri, daha iyi yatırım getirisi ve SKA'ya kıyasla daha avantajlı LCA sonuçları yer alır.

5.2.1. Yakıt Tasarrufu

IKA'nın en acil ve yaygın olarak belgelenen ekonomik avantajı, yakıt tüketimini azaltma kabiliyetidir. Üretim sıcaklıklarını 20-55°C düşürerek, brülörler agregaları kurutmak ve bağlayıcıyı ısıtmak için önemli ölçüde daha az enerji gerektirir. FHWA (2014), IKA tesislerinin SKA'ya kıyasla %20-35 yakıt tasarrufu sağladığını bildirmiştir.

Türkiye'de yapılan saha denemeleri, brülör yakıt tüketiminde yaklaşık %25'lik bir azalma olduğunu ve ilk yıl içinde katkı maliyetlerini karşılamaya yetecek tasarruf sağlandığını göstermiştir (Karakuzu & Özen, 2020)

Avrupa'da yapılan çalışmalar da benzer sonuçlar belgelemiştir; Sasobit® modifiye karışımları SKA'ya kıyasla %20-30 daha az yakıt tüketmiştir (Rubio vd., 2012).

Tesis düzeyinde bu tasarruflar hızla ölçeklenir. Örneğin, yıllık 200.000 ton üretim yapan bir tesis, 300.000-400.000 litre yakıt tasarrufu sağlayabilir ve bu da litre başına 0,50 ABD doları maliyetle 150.000-200.000 ABD doları tasarruf anlamına gelir.

5.2.2. Yatırım Getirisi

IKA uyumlu altyapıların yenileme maliyetleri, tesis türüne ve ölçeğine bağlı olarak genellikle 100.000 ila 250.000 ABD Doları arasında değişmektedir. (Karakuzu & Özen, 2020). Yüksek kapasiteli tambur tesislerinde (>250.000 ton/yıl), yakıt tasarrufu tek başına 2-3 yıl içinde yatırım getirisi sağlayabilir. Orta ölçekli parti tesislerinde (100.000-200.000 ton/yıl) yatırım getirisi genellikle 3-5 yıl içinde gerçekleşirken, küçük tesislerin kârlılığa ulaşmak için sübvansiyonlara ihtiyacı olabilir (West vd., 2014).

ABD'de, FHWA tarafından sağlanan erken sübvansiyonlar, küçük yükleniciler için yatırım getirisi sürelerini kısaltarak benimsemenin hızlanmasına yardımcı olmuştur.

Enerji fiyatlarının önemli ölçüde dalgalandığı Türkiye'de, bazı projelerde yatırım getirisi daha da hızlı elde edilmiştir (Karakuzu & Özen, 2020). Tablo 6'da katkı türü ve tesis kapasitesine göre, tesislerin IKA'ya uygun hale getirilmesi için gereken yatırım maliyetleri ve IKA katkı maliyetlerinin, yakıt tasarruflarına kıyasla yatırımın geri dönüş süresi (ROI) gösterilmiştir.

Tablo 6. Tesis kapasitesi ve katkı türüne göre IKA yenilemeleri için ROI eğrileri

Tesis Tipi / Kapasite	Üretim Kapasitesi (ton/yıl)	Kullanılan Teknoloji / Katkı	Yatırım Maliyeti (USD)	Yakıt Tasarrufu (kg dizel / ton)	Katkı Maliyeti (USD/ton)	Net Yıllık Tasarruf (USD)	Yatırımın Geri Dönüş Süresi (ROI, yıl)
Küçük plent (mobil)	60.00	Köpük bitüm (ek donanım)	22.000	3,0	0,5	28.000	0,8 yıl (≈10 ay)
Orta ölçekli plent	120.00	Kimyasal katkı (Evotherm®)	35.000	2,5	2,5	50.000	0,7 yıl (≈8 ay)
Orta ölçekli plent (Türkiye)	120.00	Köpük + Kimyasal hibrit	40.000	3,5	1,5	58.000	0,9 yıl (≈11 ay)
Büyük plent	240.00	Organik katkı (Sasobit®)	60.000	2,8	2,0	94.000	0,64 yıl (≈7,5 ay)
Büyük plent (Türkiye)	240.00	Köpük bitüm	50.000	3,2	1,0	108.000	0,46 yıl (≈5,5 ay)
Büyük plent (kimyasal WMA)	240.00	Evotherm®+ Rediset®	65.000	2,8	2,5	92.000	0,70 yıl (≈8 ay)

5.2.3. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

IKA'yı ekonomik olarak değerlendirirken, yalnızca üretim maliyetlerini değil, aynı zamanda yolların tüm yaşam döngüsünü de dikkate almak önemlidir. Avrupa'daki örnek çalışmalar, özellikle RAP ve endüstriyel yan ürünler dahil edildiğinde, IKA için kilometre başına toplam yol maliyetinin %5-10 daha düşük olduğunu göstermiştir (Georgiou&Loizos, 2021) (Oylumluoğlu, 2012). MnROAD ve NCAT çalışmaları, IKA bölümlerinin SKA ile karşılaştırılabilir veya daha iyi uzun vadeli performansa sahip olduğunu doğrulayarak, LCA profilini daha da güçlendirmiştir (West vd., 2014).

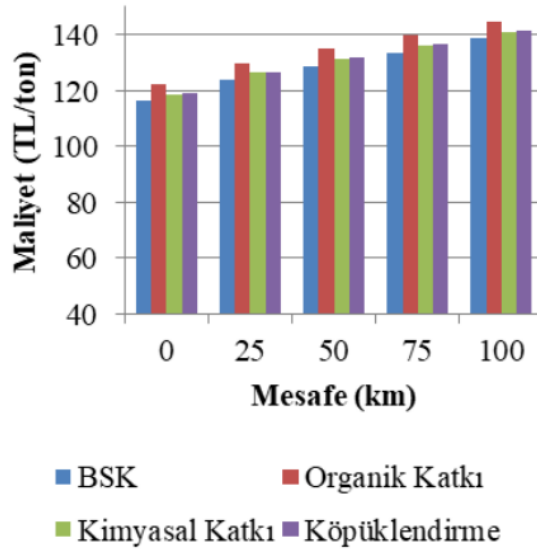
5.2.4. Ekonomik Özet

Genel olarak, IKA altyapılarının ekonomik avantajları şunlardır:

- %20-35 oranında yakıt tasarrufu, önemli yıllık maliyet düşüşlerine dönüşür.
- Verimlilik kazanımlarıyla dengelenmiş ek giderlerle daha düşük genel üretim maliyetleri.

- Yüksek kapasiteli tesislerde veya yüksek enerji maliyetli pazarlarda daha hızlı, 2-5 yıllık ROI süreleri.
- Özellikle RAP ve endüstriyel yan ürünler dahil edildiğinde daha güçlü LCA performansı.

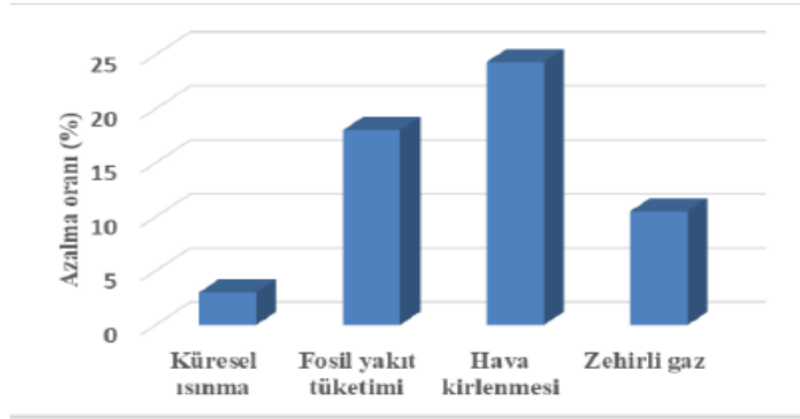
Bu nedenle, bütünsel bir ekonomik çerçevede değerlendirildiğinde, IKA bir maliyet yükü olarak değil, finansal olarak rekabetçi ve genellikle SKA'ya göre daha üstün bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1. 2018 yılı asfalt karışımları maliyeti

5.3. Çevresel Avantajlar

Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojileri, yalnızca teknik ve ekonomik faydalarıyla değil, aynı zamanda önemli çevresel avantajlarıyla da yaygın olarak kabul görmektedir. IKA, üretim ve yerleştirme sıcaklıklarını düşürerek enerji tüketimini, sera gazı emisyonlarını ve zararlı dumanları azaltır. Ayrıca, geri dönüşümü kolaylaştırır, doğal kaynakları korur ve asfalt tesislerinin toplum tarafından daha fazla benimsenmesini sağlar. Bu çevresel faydalar, IKA'yı sürdürülebilir yol yapımının kritik bir destekleyicisi haline getirir.



Şekil 2. IKA'nın SKA'ya göre çevreye katkısı

5.3.1. Sera Gazı Emisyonlarında Azalma

IKA'nın en acil çevresel faydası, yakıt tüketimini azaltarak CO₂ emisyonlarını düşürme kabiliyetidir. FHWA (2014), tesis türüne ve yakıt kaynağına bağlı olarak ton asfalt başına CO₂'de %15-30 oranında azalma tahmin etmiştir. Avrupa çalışmaları da benzer sonuçlar bildirmiş ve yakıt tasarruflarının doğrudan sera gazı azaltımına dönüştüğünü doğrulamıştır (Rubio vd., 2012).

Türkiye'deki saha projeleri, küresel bulgularla uyumlu olarak %20-25 oranında azalmalar belgelemiştir.



Şekil 3. Yükleme işlemleri sırasında SKA (a) ve IKA (b) için kaçak emisyonlar

5.3.2. İyileştirilmiş Hava Kalitesi ve Çalışan Sağlığı

Norveç'teki LavTemperaturAsfalt projesi, işçilerin duman maruziyetinde %58-67 oranında azalma olduğunu belgelemiştir (Olsen vd., 2012).

ABD'deki FHWA pilot projeleri de benzer azalmalar bildirmiş ve iş sağlığı iyileştirmelerine vurgu yapmıştır (FHWA, 2014).

Türkiye'de saha gözlemleri, duman emisyonlarının gözle görülür şekilde azaldığını ve bunun da çalışma koşullarını ve toplum kabulünü iyileştirdiğini doğrulamıştır (Karakuzu&Özen, 2020).

İş güvenliği açısından, duman maruziyetindeki bu azalma, IKA'nın benimsenmesi için en güçlü argümanlardan biridir, çünkü işçi sağlığını doğrudan iyileştirir ve uzun vadeli solunum ve dermatolojik sorun risklerini azaltır.



Şekil 4. Serim işlemleri sırasında SKA (a) ve IKA (b) için kaçak emisyonlar

5.3.3. Kaynak Koruma ve Geri Dönüşüm

IKA'nın bir diğer önemli çevresel avantajı, RAP ve endüstriyel yan ürünlerle uyumluluğudur. Daha düşük karıştırma sıcaklıkları, RAP bağlayıcılarının ek eskimesini en aza indirerek, performanstan ödün vermeden daha yüksek RAP içeriklerine (%30-50) olanak tanır. (Fabrice vd., 2020) (Oylumluoğlu, 2012).

ABD'de, %30 RAP içeren IKA projeleri, saf SKA karışımlarına eşit veya daha iyi tekerlek izi ve yorulma performansı göstermiştir (FHWA, 2014).

Türkiye'de, Rediset ve Sasobit ile modifiye edilmiş IKA, TSR oranlarını korurken RAP'ı başarıyla entegre etmiştir (Oylumluoğlu, 2012).

Ayrıca, IKA, çelik cürufu, PET plastikleri, pirinç kabuğu külü ve mermer atıkları gibi atık malzemelerin entegrasyonunu destekleyerek, ham agrega ve bağlayıcılara olan talebi azaltır. (Georgiou&Loizos, 2021) (Arabani & Tahami, 2017). Bu, IKA'yı dairesel ekonomi prensipleriyle uyumlu hale getirerek, onu SKA'dan daha sürdürülebilir kılar.

5.3.4. Çevresel Özet

Özetle, IKA'nın çevresel avantajları şunlardır:

- CO₂ emisyonlarında %15-30 azalma, NO_x ve SO₂'da ek azalmalar.
- İşçilerin duman maruziyetinde %50-60 azalma, iş güvenliğinin artırılması.
- RAP ve atık malzemelerle daha fazla uyumluluk, döngüsel ekonomiyi destekleme.
- Daha düşük gürültü ve duman emisyonları, toplum algısının iyileştirilmesi.
- Küresel iklim ve sürdürülebilirlik hedefleriyle doğrudan uyum.

Bu avantajlar toplu olarak IKA'yı daha yeşil, daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir altyapı sistemlerine önemli bir katkıda bulunan bir kuruluş konumuna getirmektedir.

5.4. Operasyonel Avantajlar

IKA, yol yapım projelerinin lojistiğini, esnekliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen bir dizi operasyonel avantaj sağlar. Teknik ve çevresel faydalarının çoğu iyi belgelenmiş olsa da, operasyonel faydaları, saha operasyonlarında verimlilik ve tutarlılık arayan müteahhitler ve karayolu acenteleri için özellikle önemlidir.

5.4.1. Uzatılmış Asfaltlama Sezonu

IKA'nın en önemli operasyonel avantajlarından biri, asfaltlama sezonunu uzatma kabiliyetidir. IKA karışımları daha düşük sıcaklıklarda işlenebilir kaldığı için, SKA uygun sıkıştırma için çok hızlı soğuduğu daha soğuk aylarda asfaltlama işlemleri devam edebilir.

Minnesota'daki MnROAD denemeleri, IKA asfaltlarının 10°C gibi düşük hava sıcaklıklarında başarıyla sıkıştırılabileceğini, SKA'nın ise en az 16-18°C gerektirdiğini doğruladı (West vd., 2014).

Türkiye'de IKA, daha soğuk sonbahar aylarında etkili bir şekilde yerleştirilmiş ve aynı koşullar altında SKA'ya kıyasla daha yüksek sıkıştırma yoğunlukları göstermiştir. (Karakuzu & Özen, 2020)

FHWA çalışmaları, sıcak karışımlarının taşıma mesafelerinin genellikle ortalama 50-60 km olduğunu, ancak ılık karışımların işlenebilirlik kaybı olmadan 70-100 km mesafelere ulaştığını bildirmiştir (FHWA, 2014).

Dağlık bölgelerdeki Türk projeleri, ılık karışımların 80 km'yi aşan taşıma mesafelerinde bile sıkıştırma kalitesini koruduğunu göstermiştir (Karakuzu & Özen, 2020).

Bu avantaj, geçici uydu tesislerine olan ihtiyacı azaltarak sermaye maliyetlerini düşürür ve büyük ölçekli otoyol projeleri için lojistiği basitleştirir.

5.4.2. Operasyonel Özet

Operasyonel olarak IKA, yüklenicilere ve acentelere şunları sunar:

- Özellikle soğuk iklimlerde daha uzun asfaltlama sezonları.
- Daha uzun taşıma mesafeleri, lojistik maliyetlerinin düşürülmesi.
- Daha az silindir geçişi ve daha düşük işçilik gereksinimi.
- Kentsel projeler ve çok modlu tesis operasyonları için daha fazla esneklik.

IKA, yol inşaatının günlük zorluklarının çoğunu ele alarak, yalnızca sürdürülebilir bir teknoloji değil, aynı zamanda pratik ve verimli bir operasyonel çözüm olarak rolünü de güçlendirmektedir.

5.5. Vaka Örnekleri

IKA avantajları yalnızca teorik değil, aynı zamanda dünya çapında büyük ölçekli saha denemeleri ve ulusal programlarla da kanıtlanmıştır. Bölgesel deneyimler, farklı iklim, ekonomi ve politika koşullarının IKA'nın faydalarının nasıl şekillendiğini göstermektedir. Bu bölüm, teknik, ekonomik, çevresel ve operasyonel sonuçları vurgulayarak Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri, Türkiye ve Asya'dan temsili vaka çalışmalarını ele almaktadır.

5.5.1. Türkiye

Türkiye'de IKA'nın benimsenmesi ekonomik baskılar ve lojistik zorluklar tarafından yönlendirilmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) bünyesinde yürütülen pilot projelerde, farklı iklimlerde köpüklü ve katkı bazlı IKA test edilmiştir.

320.000 tonun üzerinde IKA üretilmiş olup, saha değerlendirmeleri yakıt tasarrufu ve uzatılmış taşıma mesafeleri sayesinde proje maliyetlerinde %15-25 oranında azalma olduğunu göstermiştir (Karakuzu & Özen, 2020).

Performans testleri, tekerlek izi direncini ve sıcak haddelenmiş kireçle eşdeğer yorulma ömrünü doğrulamıştır. Nem duyarlılığıyla ilgili ilk endişeler, hidratlı kireç ve polimer modifiyeli bağlayıcılar kullanılarak giderilmiştir (Alataş & Istek, 2019) (Oylumluoğlu, 2012).

IKA ayrıca, mekanik özelliklerden ödün vermeden %30 RAP kullanımını kolaylaştırarak ham malzeme talebini azaltmıştır (Oylumluoğlu, 2012).

Bu bulgular, IKA'nın hem sürdürülebilirlik hem de performans avantajları sağlarken yerel ekonomik ve coğrafi koşullara nasıl uyarlanabileceğini vurgulamaktadır.

5.5.2. Avrupa

Avrupa, 1990'ların sonlarında Almanya ve Norveç'te WAM-Foam prosesinin kullanılmaya başlanmasıyla IKA teknolojilerinin doğum yeri olmuştur. İlk projeler, sıkı AB çevre düzenlemeleri kapsamında yakıt tasarrufu ve emisyon azaltımlarını göstermeye odaklanmıştır.

- Almanya'da WAM-Foam denemeleri, yakıt tüketiminde %25-30 oranında azalma olduğunu doğrularken, tekerlek izi ve yorulma performansı, uzun yıllar süren izleme çalışmaları boyunca SKA ile uyumlu olmuştur. (d'Angelo vd., 2008).
- Norveç'in LavTemperaturAsfalt (LTA) projesi, 11 yol bölümünde altı IKA teknolojisini test ederek, çalışanların duman maruziyetinde %58-67 oranında azalma ve yol performansında herhangi bir ödün verilmediğini belgelemiştir. (Olsen vd., 2012).

Bu projeler, IKA'nın yüksek teknik performansını korurken sıkı AB hava kalitesi ve iklim hedeflerini karşılayabileceğini göstererek, yaygın olarak benimsenmesinin önünü açmıştır.

5.5.3. Birleşik Devletler

ABD'de, Alabama'daki Ulusal Asfalt Teknolojisi Merkezi (NCAT) Test Pisti ve Minnesota'daki MnROAD tesisi tarafından büyük ölçekli doğrulama sağlandı.

NCAT yan yana test bölümleri, milyonlarca ESAL'den sonra IKA ve SKA'daki tekerlek izi derinliklerinin 10 mm'nin altında kaldığını ve yorulma çatlamasında önemli bir fark olmadığını gösterdi (West vd., 2014).

MnROAD denemeleri, soğuk iklim performansını vurgulayarak, IKA karışımlarının bağlayıcı yaşlanmasının azalması nedeniyle SKA'ya göre termal çatlamaya daha iyi direnç gösterdiğini doğruladı (West vd., 2014).

Ekonomik olarak, FHWA gösteri projeleri, çoğu yenilenen tesis için 2-4 yıl içinde yatırım getirisi sağlayan %30-40 yakıt tasarrufu sağladığını belgeledi (FHWA, 2014).

5.5.4. Asya

Asya ülkeleri, hem kaynak kısıtlamalarını hem de çevresel hedefleri ele almak için IKA'yı benimsemiştir.

Çin'de, köpüklü IKA kaplamaları daha yavaş oksidatif yaşlanma ve gelişmiş bağlayıcı esnekliği göstermiştir, ancak hassas nem kontrolü gerekmiştir (Li vd., 2022).

Malezya'da, Cecabase® ile modifiye edilmiş IKA, sıkıştırma ve yoğunluğu iyileştirmiştir ancak tropikal iklimlerde tekerlek izlerine karşı direnç sağlamak için optimizasyona ihtiyaç duymuştur (Kamarudin, 2018).

Endonezya'da IKA, Asbuton (doğal kaya asfaltı) ile başarıyla birleştirilmiştir. Tesisler, ithal bitüme bağımlılığı azaltmak için Asbuton dolgu maddelerini entegre etmek üzere özel besleyicilerle donatılmıştır (Subagio vd., 2003).

Bu örnekler, IKA altyapılarının yerel malzemelere ve iklim koşullarına nasıl uyum sağlayabileceğini ve geliştirmekte olan ekonomiler için özelleştirilmiş sürdürülebilirlik yolları nasıl sağlayabileceğini göstermektedir.

5.6. Özet

Köpük teknolojileri, kimyasal yüzey aktif maddeler ve organik katkı maddelerinin bir kombinasyonu sayesinde, IKA, geleneksel yöntemlere kıyasla 20–55°C daha düşük

sıcaklıklarda asfalt üretimi ve serilmesini mümkün kılar (d'Angelo vd., 2008) (West vd., 2014). Üretim uygulamasındaki bu temel değişiklik, asfalt kaplamaların tüm yaşam döngüsü boyunca uzanan çok sayıda avantaj sağlar.

Teknik açıdan bakıldığında, IKA işlenebilirliği ve sıkıştırmayı iyileştirir, bağlayıcı oksidasyonunu azaltır ve RAP ve endüstriyel yan ürünlerle uyumluluğu artırır. Saha ve laboratuvar çalışmaları, IKA kaplamalarının SKA ile karşılaştırıldığında eşit veya daha üstün tekerlek izi direnci, yorulma ömrü ve termal çatlama performansı sağladığını sürekli olarak doğrulamaktadır (Li vd., 2022) (Karakuzu&Özen, 2020) (West vd., 2014).

Ekonomik olarak, IKA uyumlu tesisler %20-35 yakıt tasarrufu sağlar ve bu da orta ölçekli tesisler için yılda yüz binlerce litre tasarruf anlamına gelir. Katkı maliyetleri ilk harcamaları artırabilse de, LCA analizleri, IKA kaplamalarının en azından maliyet açısından nötr ve özellikle dalgalı enerji fiyatlarının olduğu pazarlarda SKA'dan genellikle daha uygun maliyetli olduğunu göstermektedir (Karakuzu&Özen, 2020)(Oylumluoğlu, 2012)(West vd., 2014). Tesis iyileştirmelerinin yatırım getirisi genellikle 2-5 yıl içinde gerçekleşir ve bu da IKA'yı hem yükleniciler hem de acenteler için cazip bir seçenek haline getirir (FHWA, 2014; Rubio vd., 2012).

IKA, çevresel olarak CO₂ emisyonlarını %15-30 oranında azaltır. İşçi sağlığına da önemli ölçüde fayda sağlar ve asfaltlama işlemleri sırasında duman maruziyetinde %60'a varan belgelenmiş azalmalar sağlar (Olsen vd., 2012)(West vd., 2014). RAP ve cüruf, PET ve mermer tozu gibi atık malzemelerin daha fazla kullanılmasını sağlayarak, IKA döngüsel ekonomi uygulamalarını teşvik eder ve bakir kaynaklara olan bağımlılığı azaltır. (Georgiou&Loizos, 2021)(Arabani & Tahami, 2017).

Operasyonel açıdan bakıldığında, IKA asfaltlama sezonlarını uzatır, taşıma mesafelerini 70-100 km'ye çıkarır ve sıkıştırma eforunu azaltır. Bu avantajlar proje esnekliğini artırır, gecikmeleri en aza indirir ve büyük ölçekli yol yapım projelerinin lojistiğini iyileştirir (Kamarudin, 2018) (Karakuzu&Özen, 2020) (West vd., 2014).

Sonuç olarak, IKA, SKA'ya kıyasla yalnızca kademeli bir iyileştirme değil, asfalt kaplamanın teknik performansını, ekonomik verimliliğini, çevresel sorumluluğunu ve operasyonel esnekliğini ilerleten bütünsel bir yeniliktir. Kanıtlar, uygun tesis altyapılarıyla IKA'nın, işçi güvenliğini artırırken ve çevresel etkileri azaltırken dayanıklı, uygun maliyetli ve sürdürülebilir kaplamalar sunabileceğini doğrulamaktadır.

Hükümetler ve kurumlar net sıfır hedefleri ve daha geniş kapsamlı dairesel ekonomi entegrasyonunu hedeflerken, IKA yol inşaatının geleceğinde merkezi bir rol oynamaya

hazırdır. Önümüzdeki zorluk, avantajlarını kanıtlamak değil (bunlar zaten iyi belgelenmiştir), yatırım, eğitim ve politika uyumu yoluyla yaygın bir şekilde benimsenmesini sağlamaktır. Bu anlamda, IKA yalnızca günümüzün bir teknolojisini değil, aynı zamanda önümüzdeki on yıllar boyunca sürdürülebilir ulaşım altyapısının temel taşlarından birini temsil etmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Sıcak Karışım Asfalt (SKA) ve Ilık Karışım Asfalt (IKA) teknolojilerini sürdürülebilirlik perspektifinden kapsamlı biçimde karşılaştırmıştır. Yapılan literatür taraması, laboratuvar bulguları ve uluslararası saha uygulamaları dikkate alındığında, IKA teknolojisinin enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, işçi sağlığı ve uzun vadeli bakım maliyetleri açısından SKA'ya göre önemli avantajlar sunduğu belirlenmiştir.

IKA teknolojileri, üretim ve serim sıcaklıklarını ortalama 30–50 °C düşürerek yakıt tüketiminde %20–35, CO₂ emisyonlarında %25–30 azalma sağlamaktadır. Bu durum, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından somut kazanımlar sunmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıkta üretim sayesinde bağlayıcı yaşlanması azalmış, karışımın servis ömrü uzamış ve iş güvenliği koşulları iyileşmiştir.

Teknik açıdan değerlendirildiğinde, IKA karışımlarının rutting direnci, yorulma ömrü ve nem duyarlılığı bakımından SKA ile benzer veya daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, optimum katkı türü ve oranı doğru belirlenmediğinde performans düşüşü yaşanabileceği görülmüştür. Bu nedenle, IKA tasarımının bölgesel iklim koşulları, bağlayıcı tipi ve plent altyapısına uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.

Ekonomik yönden bakıldığında, başlangıçta katkı maliyetleri ve ekipman yatırımları IKA için daha yüksek görünse de, enerji tasarrufu ve uzun dönem bakım-onarım azalımı ile toplam yaşam döngüsü maliyetinin SKA'ya kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca üretim süresinin kısalması, serim sezonunun uzaması ve taşıma mesafelerindeki esneklik, yüklenici verimliliğini artıran faktörlerdir.

Sonuç olarak, IKA teknolojileri sürdürülebilir yol mühendisliği hedefleriyle yüksek uyum göstermektedir. SKA, olgunlaşmış ve güvenilir bir yöntem olmaya devam etse de, geleceğin düşük karbonlu ulaşım altyapısında IKA'nın öncü rol oynayacağı öngörülmektedir.

6.1. Türkiye İçin Stratejik ve Kurumsal Öneriler

- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı koordinasyonunda, IKA teknolojilerine ilişkin ulusal bir teknik şartname

ve standart hazırlanmalıdır. Bu şartname, üretim sıcaklıkları, katkı oranları, kalite kontrol yöntemleri ve çevresel ölçütleri içermelidir.

- Türkiye'nin Net Sıfır Emisyon 2053 hedefi doğrultusunda, karbon azaltım planlarında IKA uygulamaları açık biçimde yer almalıdır.
- IKA kullanımını teşvik edecek şekilde yeşil kamu alımları kriterleri revize edilmeli, kamu ihalelerinde düşük emisyonlu karışımlara teşvik veya puan avantajı verilmelidir.

6.2. Teknik ve Altyapısal Öneriler

- Mevcut SKA plantleri için modüler köpükleme sistemleri, katkı dozaj üniteleri ve sıcaklık kontrol otomasyonları entegre edilmelidir. Bu dönüşüm, yeni tesis yatırımlarına gerek kalmadan IKA üretimini mümkün kılacaktır.
- Yerel katkı maddesi üretimi desteklenmeli, ithal ürünlere bağımlılık azaltılmalıdır. TÜBİTAK ve üniversite-sanayi iş birliği ile yerli kimyasal ve zeolit katkıların Ar-Ge'si yapılmalıdır.
- Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri (örneğin İç Anadolu, Akdeniz, Doğu Anadolu) için optimum katkı tipi ve oranlarını belirleyen saha denemeleri gerçekleştirilmelidir. Böylece bölgesel performans haritaları oluşturulabilir.

6.3. Ekonomik ve Finansal Öneriler

- İlk yatırım maliyetlerini azaltmak için teknoloji dönüşüm hibeleri veya vergi indirimleri uygulanabilir.
- IKA uygulamalarının uzun vadeli faydalarını göstermek amacıyla Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCA) KGM'nin yatırım karar süreçlerine dahil edilmelidir.
- Özel sektör yüklenicilerine, IKA kullanımında karbon kredisi veya yakıt sübvansiyonu gibi teşvikler sunulmalıdır.

6.4. Akademik ve Eğitimsel Öneriler

- Üniversitelerde asfalt teknolojileri derslerine "Düşük Sıcaklıklı Karışımlar ve Sürdürülebilirlik" modülü eklenmelidir.

- Uygulayıcı mühendis ve laboratuvar teknisyenleri için IKA saha eğitimleri düzenlenmelidir.
- Yerli üniversitelerde IKA performans laboratuvarları kurularak hem kamu hem özel sektör testleri için ulusal referans merkezi oluşturulabilir.

6.5. Geleceğe Yönelik Araştırma Önerileri

- Türkiye’deki IKA uygulamaları için uzun dönemli saha izleme programı (5–10 yıl) başlatılmalıdır.
- Geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) + IKA sinerjisi, biyobazlı katkı maddeleri ve çelik cürufu, PET gibi alternatif malzemelerin entegrasyonu üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Abu Bakar, S. K., Kamaruddin, N. H. M., Nayan, N., Hainin, M. R., Abdul Hassan, N., Hassan, S. A., & Md. Yusoff, N. I. (2014). Warm mix asphalt technology: A review. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 71(3), 39–52.
- Alataş, T., & İstek, A. (2019). Farklı ılık karışım asfaltların nem hasarına karşı dayanımlarının incelenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 985–998.
- Arabani, M., & Tahami, S. A. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 149, 350–358.
- Belc, A.L., Coleri, E., Belc, F., & Costescu, C. (2021). Influence of Different Warm Mix Additives on Characteristics of Warm Mix Asphalt. *Materials*, 14(13), 3534
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2023). İklim değişikliği azaltım stratejisi ve eylem planı (2024–2030). İklim Değişikliği Başkanlığı.
- d'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., & Yeaton, B. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice (FHWA-PL-08-007). Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- EAPA (European Asphalt Pavement Association). (2019). Asphalt in Figures 2019. Brussels: EAPA Publications.
- Fabrice, P. K. R., Abejide, S. O., Adedeji, J. A., & Mostafa, M. M. H. (2020). Evaluating the performance of warm mix asphalt incorporating recycled asphalt pavement treated bases. *Transportation Research Procedia*, 45, 716–723.
- FHWA (Federal Highway Administration). (2021). Net-Zero Highway Initiative Report 2021. Washington D.C.: U.S. Department of Transportation.
- Geçkil, T., & Ahmedzade, P. (2020). Effects of carbon fibre on performance properties of asphalt mixtures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(2), 49–65.
- Ghaffar, S. H., Burman, M. & Braimah, N. (2020). Pathways to Circular Construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118710.
- Georgiou, P., & Loizos, A. (2021). Environmental assessment of warm mix asphalt incorporating steel slag and high reclaimed asphalt for wearing courses: a case study. *Road Materials and Pavement Design*, 22, 662-671.
- Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2005). Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt (NCAT Report 05-06). *National Center for Asphalt Technology*, Auburn University.

- Immanuel, I., & Subagio, B. S. (2023). Performance improvement of hot mix asphalt and warm mix asphalt using RAP and Evotherm additive. *The Open Civil Engineering Journal*, 17, e187414952304120.
- International Energy Agency (IEA). (2023). Tracking clean energy progress 2023.
- Jennings, B., & Wirtjes, R. (2019). Hot-mix asphalt vs. warm-mix asphalt. Southern Illinois University Edwardsville, Illinois Asphalt Pavement Association Scholarship Report.
- Johnstone, I. (2023). Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). *Yearbook of International Environmental Law*, 32(1), 284-289.
- Kamarudin, S. N. N., Hainin, M. R., Satar, M. K. I. M., & Warid, M. N. M. (2018). Comparison of performance between hot and warm mix asphalt as related to compaction design. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 1049, 012036.
- Kandhal, P. S. (2010). Warm mix asphalt technologies: An overview. *Journal of the Indian Road Congress*, 71(2), 561.
- Karakuzu, K., & Özen, H. (2020). Türkiye Şartlarında Ilık Karışım Asfalt Uygulamasının Ekonomik ve Çevresel Değerlendirmesi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 429-443.
- Khedaywi, T., & Al Kofahi, N. (2019). Evaluation of asphalt stripping resistance for different types of aggregates and additives. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 13(3), 459–471.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü). (2021). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Kristjánsdóttir, Ó. (2007). Warm mix asphalt technology adoption. Proceedings of the NVF 33rd Annual Meeting, Trondheim, Norway.
- Li, B., Li, N., Yu, X., Xie, J., Zhan, H., Ding, J., & Ma, H. (2022). Evaluation of the field-aged performance of foamed warm mix asphalt: Comparisons with hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 18, 01750
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W., & Solaimanian, M. (1995). Background of SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis (FHWA-SA-95-003). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022). A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: Towards a sustainable asphalt pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14863.
- Mogawer, W. S., Austerman, A. J., & Bahia, H. U. (2011). Evaluating the effect of warm-mix asphalt technologies on moisture characteristics of asphalt binders and mixtures.

- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2209, 52-60
- Olsen, M. J., Young, K., Wartman, J., & Oeser, M. (2012). Evaluation of warm-mix additives using accelerated loading evaluation (ALE) (Report No. UT-12.06). Utah Department of Transportation Research Division.
- Oylumluoğlu, J. (2012). The utilization of recycled asphalt concrete with warm mix asphalt. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- Özcan, A., Temren, Z., Komut, M., & Yıldırım, S. A. (2020). Investigation of field performance of warm mix asphalt produced with foamed bitumen. In Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Version 1.1). E&E Congress.
- Piccone, G., Loprencipe, G., Almeida, A., & Fiore, N. (2020). Evaluation of the performance of a warm mix asphalt (WMA) considering aged and unaged specimens. *Coatings*, 10(12), 1241.
- Prowell, B. D., Hurley, G. C., & Frank, B. (2011). Warm-mix asphalt: Best practices. National Asphalt Pavement Association (NAPA), Quality Improvement Series 125.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5. Baskı). Thomas Telford Publishing.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-Cycle Assessment of Pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources Conversation and Recycling*, 55, 810-818.
- Sargand, S. M., Edwards, W., Xiao, F., & Kim, S. (2009). Laboratory evaluation of warm-mix asphalt additives. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(2), 87–94.
- Şengöz, B., Topal, A., & Görkem, C. (2013). Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite. *Road Materials and Pavement Design*, 14(4), 933–945.
- Tutu, K. A., & Tuffour, Y. A. (2016). Warm-mix asphalt and pavement sustainability: A review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(2), 84–93.
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. (1995). Additives in Asphalt Binder and Mixtures (FHWA-SA-95-031). U.S. Government Printing Office.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*, Oxford University Press.

- Yee, T.S., Ru, T.S., Hamzah, M.O., Omranian, S.R. & Hainin M.R.M. (2022). Evaluation of the Combined Effects of Long-Term Aging And Moisture Damage on the Performance of Asphalt Mixture Incorporating Warm Mix Additive. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(2), 77-95.
- Zhang, J. (2010). Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance. Yüksek lisans tezi, University of Nebraska–Lincoln, Department of Civil Engineering, Nebraska



ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Cudibey İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2015-2016 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2020 yılında yurt içi özel bir firmada inşaat mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup, halen bu görevine devam etmektedir . İyi derece İngilizce bilmektedir.