



**KARBON TOZU KATKILI BİTÜM İLE ÜRETİLEN
İLETKEN ASFALT BETONUNUN İLTKENLİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakkı Arda DÜZGÜN

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2023

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.17 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON TOZU KATKILI BİTÜM İLE ÜRETİLEN İLETKEN
ASFALT BETONUNUN İLTKENLİK VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hakkı Arda DÜZGÜN

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Hakkı Arda DÜZGÜN tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 19/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Cahit GÜRER

Başkan : Prof. Dr. Ali SARIİŞİK
Harran Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Üye : Doç. Dr. Cahit GÜRER
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19 / 01 / 2023

Hakkı Arda DÜZGÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON TOZU KATKILI BİTÜM İLE ÜRETİLEN İLETKEN ASFALT BETONUNUN İLETKENLİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hakkı Arda DÜZGÜN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

Elektriksel iletken asfalt betonu, (İAB) asfalt kaplamalar karayolu ve havaalanı kaplamalarda buzlanma önlemek için kullanılır. Bu çalışmada elektriksel olarak iletken asfalt betonu elde etmek için iletken bileşen olarak karbon lifi eklenmiştir. Ayrıca benzer çalışmalardan farklı olarak, kaba agrega olarak bazalt, ince agrega olarak kireç taşı hibrit olarak kullanılmıştır. Seri 1 numunelerde katkısız bitüm kullanılmıştır. Elektriksel iletkenlik özelliğini artırmak için kullanılan bitüm %14 karbon tozu (KT) ile modifiye edilerek ikinci tip numunelerde kullanılmıştır (Seri 2). İAB numunelerin elektriksel iletkenlik özelliklerini incelemek için öz direnç ölçümü, ısıtılma dağılım ölçümü, buz eritme performansı ve donma-elektriksel iletkenlikle çözündürme çevrim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra İAB numunelerin mekanik özelliklerin incelenmesi için Marshall stabilite-akma, dolaylı çekme ve Cantabro deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda üretilen İAB numunelerin buzlanma önlemede kullanılabileceği bununla birlikte İAB elektriksel özelliklerin mineral agreganın cinsine büyük ölçüde bağlı olduğu anlaşılmıştır.

2023, xiii + 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: İletken asfalt betonu, Buzlanma ile mücadele, Karbon tozu modifiye bitüm, Elektriksel iletkenlik.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CONDUCTIVITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONDUCTIVE ASPHALT CONCRETE PRODUCED WITH CARBON BLACK MODIFIED BITUMEN

Hakkı Arda DÜZGÜN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Electrical conductive asphalt concrete, (CAC) asphalt pavements are used to anti-icing in highway and airfield pavements. In this study, carbon fiber was added as a conductive component to obtain electrically conductive asphalt concrete. Furthermore, unlike similar studies, lime stone and basalt aggregates were used as fine and coarse aggregates fractions as respectively. Base bitumen was used in Series 1 samples. In order to increase the electrical conductivity, the bitumen used in the study was modified with 14% carbon powder (CP) and used in Series 2 samples. In order to examine the electrical conductivity properties of CAC samples, volume resistivity measurement, thermal dissipation measurement, defrosting performance, and freeze-thaw cycle tests were carried out. Then, Marshall stability-flow, indirect tensile, and Cantabro tests were carried out to examine the mechanical properties of CAC samples. As a result of the study, it was understood that the CAC samples produced could be used in anti-icing, however, the electrical properties of the CAC were largely dependent on the type of mineral aggregate.

2023, xiii + 85 pages

Keywords: Conductive asphalt concrete, Anti-Icing, Carbon black modified bitumen, Electrical conductivity.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın en başından sonuna kadar üzerimdeki bütün emek ve katkılarından dolayı, ayrıca bana aktardığı bilgilerinden dolayı çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Cahit GÜNER'e, deney çalışmalarımın başlangıcından itibaren her türlü destek ve tavsiyeleri için Arş. Grv. Burak Enis KORKMAZ ve Öğr. Gör. Ayfer ELMACI hocalarıma teşekkürü borç bilirim. Aynı zamanda Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU ve Doç. Dr. Uğur FİDAN'a laboratuvar çalışmalarındaki desteği için teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını 22.FEN.BİL.17 proje ile AKÜ-BAPK tarafından destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesine teşekkür ederim.

Tezimin en kritik dönemlerinde yardımını esirgemeyen meslektaşım İnşaat Mühendisi Kürşat GÜRKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez boyunca deneysel çalışmalarında her türlü desteklerini esirgemeyen yakın arkadaşlarım Yusuf ŞAHİN ve Muhammed Berat PARLAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, her şekilde yanımda olarak bana motivasyon veren aileme teşekkür ederim.

Hakkı Arda DÜZGÜN

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Yollardaki Kar/Buz Oluşum Şartları.....	4
2.2 Buzlanma ile Mücadele Yöntemleri.....	5
2.3 Elektriksel İletken Asfalt Betonu (İAB)	6
2.4 Elektriksel İletkenlik ve Perkolasyon Teorisi (Sızma Eşiği)	9
2.4.1 Elektriksel İletkenlik.....	9
2.4.2 Perkolasyon Teorisi (Sızma Eşiği)	11
2.5 İletken Asfalt Betonunda Kullanılan İletken Bileşenler	13
2.6 Elektriksel İletken Asfalt Karışımların Performansı	15
2.6.1 Elektriksel İletkenlik Performansı	15
2.6.2 Mekanik Performans.....	17
2.7 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Konusu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar .	17
3. MATERYAL ve METOT	32
3.1 Materyal	32
3.1.1 Agregası.....	32
3.1.2 Bitüm	33
3.1.3 Karbon Tozu (KT)	34
3.1.4 Karbon Lifi (KL)	34
3.2 Yöntem.....	35
3.2.1 Agregası Deneyleri.....	38
3.2.1.1 Agregası Özgöl Ağırlık Deneyi	38

3.2.1.2. Los Angeles Aşınma Deneyi.....	38
3.2.1.3. X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi	38
3.2.1.4 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi	39
3.2.2 Modifiye Bitümün Hazırlanması	40
3.2.2.1 Karbon Tozu Katkılı Modifiye Bitümün Üretilmesi.....	40
3.2.3 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerine Uygulanan Deneyler	40
3.2.3.1 Bitüm Özgül Ağırlık Deneyi.....	41
3.2.3.2 Penetrasyon Deneyi.....	41
3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi.....	41
3.2.3.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi.....	42
3.2.4 İAB Numunelerinin Üretilmesi	42
3.2.4.2 Üretilen İAB Numunelerinin Optimum Bitüm Oranının Bulunması.....	45
3.2.5 Optimum Bitüm Oranında Hazırlanan İAB Numunelerine Uygulanan Deneyler	46
3.2.5.1 Isıl Dağılım Durumunun Belirlenmesi.....	47
3.2.5.2 Buz Eritme Performansının Belirlenmesi	47
3.2.5.3 İAB Numunelerin Elektriksel Isıtma-Soğutmaya Tabi Tutulması.....	49
3.2.5.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi	50
3.2.5.5 Cantabro Deneyi.....	52
4. BULGULAR	53
4.1 Agrega Deneyleri Sonuçları.....	53
4.1.1 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi Sonuçları.....	53
4.1.2 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi Sonuçları	54
4.2 Bitüm Deneyleri Sonuçları.....	55
4.3 Farklı Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları	55
4.3.1 İAB Numunelerinin Özdirenç- Isınma Potansiyeli Deneyi Sonuçları	56
4.3.2 İAB Numunelerin Marshall Stabilitate – Akma Deneyi Sonuçları.....	58
4.4 Optimum Bitüm Yüzdelğinde Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları....	63
4.4.1 Isıl Dağılım Sonuçları	63
4.4.2 Buz Eritme Performansı Sonuçları	65
4.4.3 Elektriksel Isıtma-Soğutma Sonrası Özdirenç ve Mekanik Özelliklerdeki Değişim Sonuçları.....	68

4.5 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi Sonuçları	70
4.6 Cantabro Deneyi Sonuçları	71
4.7 Maliyet Analizi.....	72
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	74
6. KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	85



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad Derece
F°	Fahrenhayt Derece
\$	ABD Doları
m ²	Metrekare
W	Watt
KW	Kilowatt
h	Saat
m	Metre
Ω	Ohm
Ω.m	Özdirenç
V	Gerilim
A	Akım
cm	Santimetre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
3B	Üç Boyutlu Uzay
g	Gram
cm ³	Santimetreküp
s	Saniye
dk	Dakika
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
π	Pi
D	Çap
CaO	Kalsiyum Oksit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
%	Yüzde

Kısaltmalar

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği (American Association of State Highway and Transportation Officials)
AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASC	Asfalt Güneş Kollektörü (Asphalt Solar Collector)
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
BOF	Temel Oksijen Fırını (Basic Oxygen Furnace)
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım (Hot Mix Asphalt)
CAC	İletken Asfalt Betonu (Conductive Asphalt Concrete)
CT	Tomografi (Computed Tomography)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
ECA	Elektriksel İletken Asfalt (Electrical Contuctive Asphalt)
FAA	Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
HMA	Sıcak Karışım Asfalt (Hot Mix Asphalt)

Kısaltmalar (Devam)

IDT	Dolaylı Çekme (The İndirect Tensile)
ITS	Akıllı Ulaşım Sistemleri (Intelligent Transportation Systems)
ITS	Dolaylı Çekme Mukavemeti (Indirect Tensile Strength)
İAB	İletken Asfalt Betonu
KL	Karbon Lifi
KT	Karbon Tozu
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi (Highway Technical Specification)
PC	Sızma Eşiği (Percolation Threshold)
PI	Penetrasyon indeksi (Penetration Index)
PVN	Penetrasyon-Viskozite Numarası (Penetration-Viscosity Number)
RV	Dönel Viskozite (Rotational Viscosity)
SBS	Stiren Bütadien Stiren
SCB	Yarım Daire Biçimli Eğilme (semicircular bending)
SQX	Yarı Kontitatif Analiz)
Va	Hava Boşluğu (Air Void)
vb.	Ve benzeri
VFA	Asfalt ile Dolu Boşluklar (Voids Filled with Asphalt)
VMA	Mineral Agrega içerisindeki Boşluklar (Voids in the Mineral Aggregate)
XRD	X-Işını Difraktometre
XRF	X-Işını Floresans Spektroskopisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Buzlanma ile mücadele yöntemleri.	6
Şekil 2.2 Snowfree® Sistemi Enkesiti ve Uygulama Sonucu Karın Eritilmesi (Derwin vd. 2003).	8
Şekil 2.3 Perkolasyon Teorisi (Baranikumar 2013)	11
Şekil 2.4 İletken ortamın iletken mekanizma şeması (Wu vd. 2005)	12
Şekil 2.5 İzolasyon malzemesinin elektriksel faz geçişi (Marsden vd.2018, Bauhofer ve Kovacs 2009, Sandler vd. 2003, White vd. 2010).	13
Şekil 2.6 Bir kompozit sistemde CF içeriğinin elektrik iletkenliği üzerindeki etkisi (Maiti vd. 2019, Ravindren vd. 2019).	22
Şekil 2.7 İletken asfalt beton numune tipleri, a) Dönel (gyratory) numune, b) Plaka numunesi (Arabzadeh vd. 2019).	22
Şekil 2.8 İletken asfalt betonunun ısı üretimi karakterizasyonu için kullanılan yöntemler, a) Aktif termografi, b) kar eritme kapasitesi (Arabzadeh vd. 2019).	23
Şekil 2.9 Elektriksel olarak iletken lifler içeren bir kompozitte elektron iletim mekanizmaları, a) Temas direnci, b) Elektron tünellemesi (Paschen vd. 1995, Bao vd. 2012, Wang ve Chung 1999, Gai ve Martin 1989).	23
Şekil 2.10 İletken asfalt betonunda akım yoğunluğu dağılımının CT görüntüsü (Wang vd. 2021).	25
Şekil 2.11 Grafen içeren bitüm FM, a) %0.5, b) %1.0, c) %1.5, d) %2.0 (Wang vd. 2021).	25
Şekil 2.12 İletken ortamın iletken mekanizma şeması (Wu vd. 2005).	25
Şekil 2.13 Grafit morfolojisi, a) 50 kez büyütülmüş genel morfoloji, b) 5000 kez büyütülmüş yerel morfoloji (Li vd. 2022).	26
Şekil 2.14 Karbon fiber form, a) 1000 kez büyütülmüş genel morfoloji, b) 5000 kez büyütülmüş yerel morfoloji (Li vd. 2022).	27
Şekil 2.15 Elektrik özdirenç testi için numune (Li vd. 2022).	27
Şekil 2.16 Megohmmetre ile elektriksel özdirenç ölçümü (Zadri vd. 2022).	28
Şekil 2.17 Fenix Deneyi (Zadri vd. 2022).	28
Şekil 2.18 Fénix deneyi, a) Fénix cihazı, b) Fénix doğrudan çekme deneyi (Messaoud vd. 2022).	30
Şekil 2.19 Elektrikli ısıtma deney düzeneği (Gürer vd. 2022).	31
Şekil 2.20 Buz eritme deneyi için kurulan şartlandırma kabini için (Gürer vd. 2022).	31
Şekil 3.1 Seri 1 ve Seri 2’de kullanılan malzeme ve oranları.	37
Şekil 3.2 Tez yöntem akış şeması.	37

Şekil 3.3 Dataloggerın KickStartFL-BASE for all base apps of KickStart 2.0 Floating yazılım arayüzü, a) Numune yüzeyine değen sensörlerin tanıtılması, b) Sensör sıcaklık verilerinin kaydedildiği arayüz.	45
Şekil 4.1 Bazalt agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.	54
Şekil 4.2 Kireçtaşı agregasının XRD sonuçları.....	54
Şekil 4.3 Farklı bitüm oranlarına sahip Seri 1 İAB numunelerinin öz direnç sonuçları.	56
Şekil 4.4 Farklı bitüm oranlarına sahip Seri 1 İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.	57
Şekil 4.5 Farklı bitüm oranları sahip Seri 2 İAB numunelerinin öz direnç sonuçları.	57
Şekil 4.6 Farklı bitüm oranları sahip Seri 2 İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.	58
Şekil 4.7 Pratik Özgöl Ağırlık ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	59
Şekil 4.8 Stabilite ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	60
Şekil 4.9 Asfaltla dolu boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	60
Şekil 4.10 Boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	61
Şekil 4.11 Akma ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	61
Şekil 4.12 Mineral Agregat Boşluk yüzdesi ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	62
Şekil 4.13 Marshall katsayısı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	63
Şekil 4.14 Seri 1 İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen yüzey sıcaklıkları.	67
Şekil 4.15 Seri 2 İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen yüzey sıcaklıkları.	67
Şekil 4.16 Seri 1 İAB numunesinin donma-elektriksel iletkenlikle çözülme çevriminin öz direnç etkisi.....	69
Şekil 4.17 Seri 2 İAB numunesinin donma-elektriksel iletkenlikle çözülme çevriminin öz direnç etkisi.....	69
Şekil 4.18 Elektriksel ısıtma ve soğutmanın stabiliteye etkisi.	70
Şekil 4.19 Optimum bitüm yüzdesinde iki farklı seride üretilen İAB numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti değerleri.....	71
Şekil 4.20 Optimum bitüm yüzdesinde iki farklı seride üretilen İAB numunelerinin Cantabro kütle kaybı.	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Modern yöntemlerin maliyet açısından karşılaştırılması (Pan vd. 2015).	5
Çizelge 3.1 BSK tip 2 aşınma tabakası gradasyonu.....	32
Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri.	33
Çizelge 3.3 B50/70 penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri.	34
Çizelge 3.4 Karbon Tozunun özellikleri	34
Çizelge 3.5 Karbon lifinin fiziksel özellikleri (İnt. Kyn. 3).	35
Çizelge 3.6 KT katkılı modifiye bitüm reçetesi.	40
Çizelge 4.1 Kullanılan bazalt ve kireçtaşı agregasının kimyasal analiz sonuçları	53
Çizelge 4.2 Bitüm Deney Sonuçları	55
Çizelge 4.3 Maliyet analizi.....	73

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Buzlanma; a) Köprülerde, b) Karayollarında (İnt. Kyn. 2).....	5
Resim 2.2 Asfalt Beton Döşeme Hazırlama İşlemi, a) Isıl Sensörlü ve Elektrotlu Kalıp, b) Karışımın Paketlenmesi, c) Sıkıştırma (Wu vd. 2013).	16
Resim 3.1 Bazalt ve kireçtaşı agregası, a) 0-4 mm. b) 4-11 mm. C) 11-22 mm.	32
Resim 3.2 Agregaların şartnameye göre hazırlanma aşamaları, a) Elek ile eleme işlemi, b) Agregaların yıkanma işlemi, c) Etüvde kurutma işleminden sonra agregaların uygun kaplara konulması.....	33
Resim 3.3 Karbon Tozu.	34
Resim 3.4 Karbon lifi, a) Rulo halinde karbon lifi, b) Karbon lifi kesme işlemi, c) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon lifi, d) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon liflerinin saç teli haline getirilmesi.	35
Resim 3.5 Bitüm özgül ağırlık deney aşamaları, a) Boş piknometrenin tartılması, b) Piknometre+suyun tartılması, c) Piknometre+bitümün tartılması, d) Piknometre +bitüm+suyun 25 °C'deki su banyosunda 30 dakika bekletilmesi, e) Piknometre +bitüm+suyun tartılması.	41
Resim 3.6 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları, a) Numunenin kaba dökülüp oda koşullarında bekletilmesi, b) Numunenin su banyosuna konulması, c-d) Numunenin cihazına yerleştirilmesi ve iğne ayarlamasının yapılması.	41
Resim 3.7 Bitüm yumuşama noktası deneyi aşamaları, a) Deneyde kullanılacak alet ve aparatlar, b) Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) Yüzüklerin cihaza yerleştirilip deneyin başlatılması.	42
Resim 3.8 Bitüm viskozite deneyi aşamaları, a) Bitümün tüpe dökülmesi, b) Cihaz ekran ayarların yapılması, c) Numunenin cihazına yerleştirilip deneyin başlatılması.	42
Resim 3.9 İAB numunelerinin üretim aşamaları, a) Agreg a beç karışımlarının hazırlanıp tepsilere konulması, b) Üretim aşamasında kullanılacak aparatların, bitüm, agrega ve lifin etüve konulması, c) Spatula yardımı ile agrega ve karbon lifinin kuru yöntem ile karıştırılması, d) Bitümün mikser kabına dökülmesi, e) Uygun sıcaklıktaki mikser ile İAB karışımının karıştırılması, f) Lazer termometre ile sıcaklık ölçümü yapılması, g) Mikser içerisindeki karışımın kalıba dökülerek metal aparat ile şişleme işlemi, h) Marshall tokmağı ile numunenin her iki yönde sıkıştırılması, i) Numune yüzeyine tebeşir ile numune etiketinin yazılması, j) Numune streç film ile sarılıp uygun bir yerde oda sıcaklığında bırakılması, k) Numunelerin krika ile kalıptan çıkarılması, l) Üretilen İAB numuneleri.	43
Resim 3.10 20 V sabit gerilim altında 2 prob yöntemi kullanılarak elektriksel ısıtma deneyi.	44
Resim 3.11 Marshall Stabilite ve Akma deneyi aşamaları, a) İAB numunelerinin kumpas ile farklı noktalardan yüksekliklerinin ölçümü, b) Numunenin havadaki ağırlığının tartılması, c) Numunenin Arşimet terazisi ile sudaki	

ağırlığının tartılması, d) Numunenin yüzey kuru suya doygun hale getirilmesi işlemi, e) Numunelerin 60 °C’de su banyosuna konulması, f) Numunenin Marshall cihazının yerleştirilerek deneyin başlatılması.	46
Resim 3.12 Numune yüzeyindeki ısı dağılımının termal kamera yardımıyla kayıt altına alınması, a) Elektrotların üst ve alt yüzeylerine yerleştirilmesi durumu, b-c) Elektrotların karşılıklı yan yüzeylerine yerleştirilmesi durumu.	47
Resim 3.13 Numune üzerinde buz tabakasının oluşturulması, a) Buz oluşturmak için kullanılan aparatlar, b) Numune yüzeyinde suyun donması için derin dondurucuya koyulması, c) Numune yüzeyinde oluşan buz tabakası ve elektrotların numuneye yerleştirilmesi.	48
Resim 3.14 İklimlendirme kabini içerisinde kurulan buz eritme düzeneği.	48
Resim 3.15 Buz eritme deneyinin kabin dışarısındaki düzeneği.	49
Resim 3.16 Numunenin elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi için hazırlanan düzenek. .	50
Resim 3.17 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi, a) Numunelerin 25 °C’deki su banyosuna konulması, b) Marshall Stabilité Cihazı, c) Numunen cihaza yerleştirilmesi, d) Deney sonunda numunenin görünümü.....	51
Resim 3.18 Cantabro deneyi, a) Los Angeles cihazı, b) Numunenin Cantabro deneyi öncesi ağırlığı (M1), c) Numunenin Cantabro deneyi sonrası ağırlığı (M2)...	52
Resim 4.1 Seri 1 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların üst-alt yüzeye bağlanması durumu).	64
Resim 4.2 Seri 2 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların üst-alt yüzeye bağlanması durumu.	64
Resim 4.3 Seri 1 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların karşılıklı yan yüzeylere bağlanması durumu).	65
Resim 4.4 Seri 2 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların karşılıklı yan yüzeylere bağlanması durumu.	65
Resim 4.5 Seri 1 İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri.	66
Resim 4.6 Seri 2 İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri.	66

1. GİRİŞ

Karayolu ve hava alanı kaplamaları, ulaşım altyapısının önemli bir unsurunu temsil eder ve toplumsal ilerlemeyi kolaylaştırırken ulusal ekonomilerde önemli roller oynamaktadır (Lizasoain-Arteaga vd. 2019). Asfalt betonu, devlet karayolu idareleri, belediyeler, il özel idareleri gibi kamu kuruluşları tarafından yol kaplaması yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Asfalt kaplamalar modern dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır (modern dünyada ve ülkemizde de yolların büyük bir kısmını oluşturmaktadır). Asfaltın mühendislik yapı ve bakım malzemesi olarak kullanılmasının temel özelliklerinden ve avantajlarından biri çok yönlülüğüdür. Bununla birlikte, asfalt betonu kaplama, çeşitli trafik yükü kombinasyonlarına ve bozulmalara yol açan değişen çevresel koşullara maruz kalmaktadır (Darabi vd. 2012, Karimi vd. 2017).

Kar, sulu kar veya donan yağmur dönemlerinde, yollarda kar birikmesi ve buzlanma, trafik güvenliği sorunlarına neden olabilir ve özellikle köprüler ve rampalar gibi bazı kritik bölümlerde trafiği kesintiye uğratabilir. İstatistikler, ciddi hava koşullarının yıllık trafik kazalarının %10-15'inin ana nedeni olduğunu ve bunun da çok büyük ekonomik kayıplara ve can kayıplarına yol açtığını göstermiştir (Li vd. 2013, Yehia vd. 2000). Bu nedenle, kar/buzun zamanında kaldırılması ve asfalt kaplamanın trafiğe güvenli bir şekilde korunması soğuk mevsimlerde en çok endişe duyulan konulardır. Ulaşım altyapısında kar ve buzun varlığı, kara ve hava yolcuları için her zaman sürekli bir endişe kaynağı olmuştur. Havaalanları ve karayollarının kaplama alanlarındaki kar ve buzdan kaynaklı kaygan koşullar, ulaşım gecikmelere ve kazalara neden olmaktadır. Şimdiye kadar, geleneksel kar ve buz temizleme teknikleri, soğuk çevre koşullarının neden olduğu üstyapı bakım problemlerini azaltmada bir dereceye kadar başarı sağlamıştır. Düşük ortam sıcaklığında, kaplama yüzeyinde biriken kar ve buz nedeniyle (araç tekerlekleri ile kaplama arasındaki sürtünme direncinin düşmesi sonucunda) sürüş güvenliği büyük ölçüde azalmakta (Liu vd. 2016), trafik kazaları, trafik gecikmeleri ve ekonomik kayıplar gibi bir dizi soruna yol açmaktadır. (Bardal ve Jørgensen 2017, Gao vd. 2019, Balagh vd. 2014).

Asfalt yol ve pist yüzeylerinden biriken buzu ve karı temizlemek için geleneksel olarak çeşitli stratejiler kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan kar ve buz temizleme yöntemlerinden ikisi, kimyasal eritme ve mekanik kar küreme yöntemi olup her ikisi de kaplamalar üzerinde birçok zararlı etkiye sahiptir. (Yu vd. 2014). Örneğin buz çözücü tuzlar, karışımların dolaylı çekme mukavemetini ve modülünü azaltarak asfalt kaplamaların fiziksel olarak bozulmasına neden olur (Hassan vd. 2002). Kimyasal eritme maddeleri ayrıca yeraltı suyu akıntılarının tuzluluğunu artırarak (Novotny vd. 2008) ve bitkilere zarar vererek (Czerniawska-Kusza vd. 2004) çevreyi de olumsuz etkiler. Tüm bunlara ilaveten kimyasal buz çözücüler, araçlara (Fay ve Shi 2011) ve betonarme veya öngermeli betonarme yapılar, çelik köprüler de korozyona neden olarak ulaşım altyapısına (Shi vd. 2009) zarar verebilen aşındırıcı bir etkiye sahiptir. Mekanik kar temizlemenin, kaplama yüzeylerinin kazınmasına ve aşınmasına neden olduğu (Nixon vd. 1996, Ma vd. 2018) ve kaplamanın kayma direncini etkilediği kanıtlanmıştır (Bandara 2020). Havalimanlarında, pistlere uygulanan kimyasallar, uçağın fren performansını etkiler ve öncelikli alanları temizlemek için uzun kaldırma süresi gerektirirken, mekanik kar temizleme, pistlerdeki gömülü aydınlatma armatürlerine zarar verir (FAA 2011). Bu zorluklar, çevrenin yanı sıra ulaşım güvenliği ve güvenilirliği üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için üstyapı teknolojisinde yenilikler gerektirir.

Genel olarak, etkili bir kar/buz giderme yöntemi, kar/buz olayı meydana gelmeden önce çalışmaya başlayan aktif bir kar/buz önleme sistemi kullanmaktır. Güvenlik konusuna kar/buz temizleme işlemi uygulanmadan hemen önce değil, aynı zamanda temizleme işlemi tamamlandığında da dikkat edilmelidir. Buz çözücü kimyasalların ve mekanik cihazların geleneksel uygulamaları, pasif kar/buz önleme yöntemleridir. Olumsuz etkileri nedeniyle bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Buz çözücü etken beton korozyonuna ve çevre kirliliğine neden olurken (Lo'fgren 2001, Sanzo ve Hecnar 2006), mekanik yöntemler ise yüzey hasarına ve yüksek bakım maliyetine neden olmaktadır. (Nixon, 1993). Mevcut birçok çalışma, geleneksel yöntemlerle üretilen yukarıdaki sorunlardan kaçınmak için yenilikçi buz çözme yöntemini keşfetmeye çaba göstermiştir. Neyse ki, kaplama ısıtılmalı sistemler (örneğin iletken asfalt betonu (CAC; Minsk, 1968) ve hidronik kaplama sistemi (Lee vd. 1984) gibi aktif kar eritme sistemleri) ve donma önleyici asfalt

karışımları (örneğin kırıntı kauçuk modifiyeli (Zhou ve Tan 2009) ve modifiye edilmiş tuz (Liu vd. 2014) son yıllarda geliştirilen yeni tip uygulamalardır.

Son yıllarda, elektrikle ısıtılan kaplama sistemleri için Elektriksel İletken Asfalt (ECA) karışımlarının kullanılması olan kar/buz birikimini azaltmak için yenilikçi, proaktif bir çözüm artan ilgi görmüştür (Arabzadeh vd. 2019, Hasan vd. 2021). Bu tip kaplamalar yapısından bir elektrik akımı geçirmektir; böylece kaplamada ısı oluşturarak buzun/karın kaplamalı yüzeylerde birikmesini önler. Elektriksel olarak iletken karışım, karışıma yeterli miktarda iletken katkı maddesi eklenerek hazırlanır; bu katkı maddeleri karışıma bir kez dağıldığında, yük akışına izin veren iletken bir yol oluşturarak elektriğin iletimini sağlarlar (Wu vd. 2013). Bu tip yöntemlerin nihai amacı, elektrik direnci yoluyla malzemede yeterli ısı üretmek ve bunun yeterli bir kısmını kaplama yüzeyine vererek kar/buz birikimini önlemektir.

Bu tez çalışmasında, geleneksel ve %14 karbon tozu katkılı bitümle, ince agregada ve mineral filler olarak kireçtaşı, kaba agrega olarak bazalt kullanılarak iletken asfalt betonu (İAB) numuneler üretilerek iletkenlik ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen İAB numunelerin günümüz karayolları kritik kesimlerinde uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı seri olarak İAB numuneleri üretilerek, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) tip 2 aşınma tabakasına uygun Marshall dizaynı gerçekleştirilmiştir. Numunelerde agrega içeriği kaba-bazalt, ince-kireçtaşı olacak şekilde hibrit olarak kullanılmıştır. İki farklı dizaynda da iletken bileşen olarak %0,3 oranında karbon lifi (KL) bulunmaktadır. Seri 1 B50/70 Saf Bitüm ve %0,3 Karbon Lifi, Seri 2’de ise %14 karbon tozu (KT) ile modifiye edilmiş B50/70 bağlayıcı ve 0,3 Karbon Lifi kullanılmıştır. Optimum bitüm yüzdesinde hazırlanan iki farklı seri numuneleri üzerinde ısı dağılım durumu, buz eritme performansı ve donma ve elektriksel iletkenlikle çözülme çevrimi deneyleri yapılmıştır. Çevrim öncesinde ve sonrasında yapılan deneylerle İAB numunelerinin uzun dönem mekanik ve iletkenlik performansları test edilmiştir. İAB numunelerinin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için Marshall Stabilitate-Akma, Dolaylı çekme ve sökölme eğilimini anlayabilmek için de Cantabro deneyleri yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Yollardaki Kar/Buz Oluşum Şartları

Bir karayolu üzerinde buz elde etmek için yüzeyde donma sıcaklıkları 0 °C'nin altına düşmesi (32F'nin altında) ve nem (su) gerekir; bu, çeşitli şekillerde meydana gelebilecek bir kombinasyondur:

- Don
- Soğuk bir karayolu yüzeyinden geçen sis
- Yeraltı suyu sızıntısının veya eriyen karın donması
- Sıcak bir yol yüzeyinde başlangıçta eriyen karın donması.
- Dondurucu yağmur.

Bu buzlanma mekanizmalarından birden fazlası aynı anda meydana gelebilir (İnt.Kyn.1). Basit bir ifadeyle, çiğlenme noktası sıcaklığı yüzey sıcaklığından daha yüksek olduğunda yol ve köprü yüzeylerinde don oluşacaktır (Resim 2.1). Bu durumda yüzey, sadece Dünya yüzeyindeki hava sıcaklığı değil, karayolu veya köprü kaplamalarıdır. Hafif rüzgârlı açık geceler, yol ve köprü donlarının gelişmesi için uygun koşulların oluşmasını sağlar, ancak don oluşumuna neden olabilecek başka koşullar da vardır.

Uzun bir süre donma altı sıcaklıkların görüldüğü bir alan hızlı bir şekilde ısınır (sıcak/nemli havanın gelmesi nedeniyle), kaplama sıcaklığı sıcak havaya daha yavaş tepki vererek kaplamayı daha soğuk tutacağından yol üzerinde don oluşabilir. Daha uzun süre yol yüzeylerinin bu durumda tepki vermesi daha yavaştır, çünkü yolun muhtemelen hala donma noktasının altında olan alt yüzeyi, yolu alttan soğutarak ısınan havayı önlemeye yardımcı olacaktır. Bu durumda, sıcaklıkları ısınan hava sıcaklığına daha hızlı bir şekilde düşebileceğinden, köprü güvertelerinin ayaz olma olasılığı daha düşüktür. Donma noktasının altındaki sıcaklıkların uzun süreli olması gerektiğinden, bu özel don olayı tipik olarak kış mevsiminin orta kısmından erken ilkbahara kadar meydana gelir (İnt.Kyn.2).



Resim 2.1 Buzlanma; a) Köprülerde, b) Karayollarında (İnt. Kyn. 2).

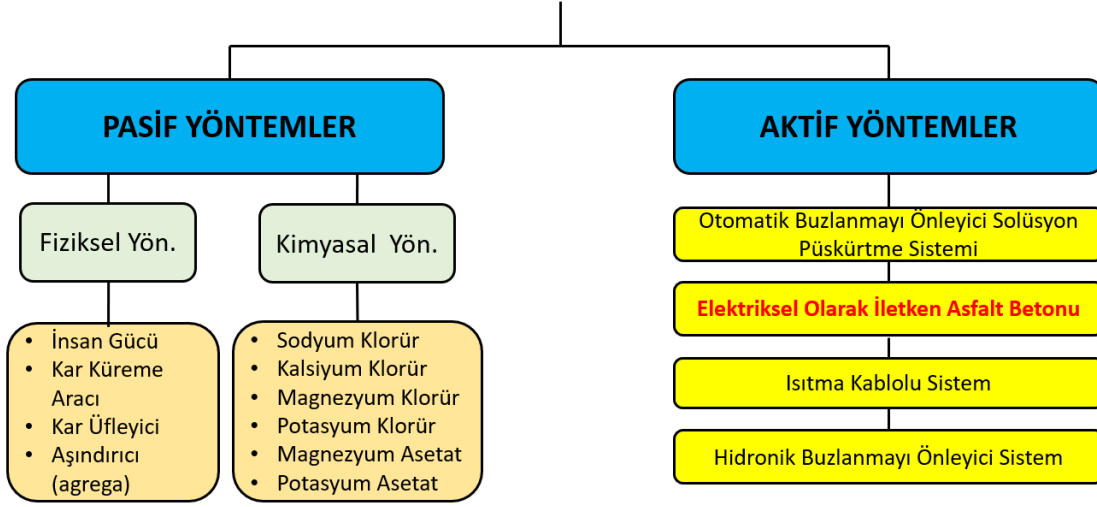
2.2 Buzlanma ile Mücadele Yöntemleri

Buzla mücadelede kullanılan yöntemler aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki başlık altında incelenebilir (Şekil 2.1). Pasif yöntemler kimyasal ve fiziksel yöntemlerden oluşmaktadır. Kar ve buzla mücadelede en sık kullanılan yöntemler olan pasif yöntemlerde ise küreme, tuzlama, kum ve kimyasallar uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler, kar veya buzdan sonra uygulandıklarında kaplama ile buz arasındaki bağı çözebilmek için daha fazla madde gerektirir. Yollarda trafik sıkışıklığına neden olduğu ve işletme hızını düşürdüğü için insan sağlığı ve çevreyi olumsuz yönde etkilenmektedir (Ağar ve Kutluhan 2005). Aktif yöntemlerde; buzlanma oluşmadan kurulan sistem nedeniyle buz oluşumunun bulunmadığının tespiti esasına dayanan sistemlerdir. Bu nedenle aktif yöntemler pasif yöntemlere göre daha avantajlıdır. Çizelge 2.1’de buzlanma ile mücadelede kullanılan modern yöntemlerin kurulum ve işletme maliyetleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Modern yöntemlerin maliyet açısından karşılaştırılması (Pan vd. 2015).

<i>Aktif Buz Eritme Sistemi</i>	<i>Kurulum Masrafı</i>	<i>İşletme Masrafı</i>	<i>Kurulum Gücü</i>
<i>Otomatik Sprey Sistemi (2004)</i>	600.000 \$	12,00\$/m ²	-
<i>Elektrik Rezistans (kablo) Sistemi (1961)</i>	54,00\$/m ²	4,80\$/m ²	323-430W/m ²
<i>Sıcak Su Hidronik Sistem (1993)</i>	161,00\$/m ²	250,0\$/kez	473W/m ²
<i>Sıcak Gaz Isıtma Sistemi (1996)</i>	378,00\$/m ²	2,10\$/m ²	-
<i>İletken Çimento Esaslı Beton (2003)</i>	635,00\$/m ²	0,80\$/m ² /kez	350W/m ²
<i>İletken Asfalt Betonu (1992)</i>	270,00\$/m ²	0,02\$/m ²	484W/m ²

BUZLANMA İLE MÜCADELE YÖNTEMLERİ



Şekil 2.1 Buzlanma ile mücadele yöntemleri.

2.3 Elektriksel İletken Asfalt Beton (İAB)

Minsk (1971), elektrikli iletken asfalt betonu yapmak için grafit parçalarını da işin içine katmıştır. Bu sistemin bir avantajı, iletken kaplama malzemesinin, yeniden kaplama inşasına gereksinim duymadan mevcut kaplama üzerine ince bir tabaka halinde kolaylıkla uygulanabilmesidir (Minsk 1971).

Geleneksel beton ve asfalt yalıtkan malzemelerdir. Elektrik iletkenlik katsayısı yüksek bileşenler beton ve asfalta eklenerek kaplamaların elektriksel iletkenliği artırılabilir. İletken betonun çimento bazlı kompozitleri laboratuvar ve arazide kar ve buz eritmek için yüksek iletkenlik ve dayanım özelliklerini kaybetmeden uygulanabilmektedir (Xie ve Beaudoin 1995).

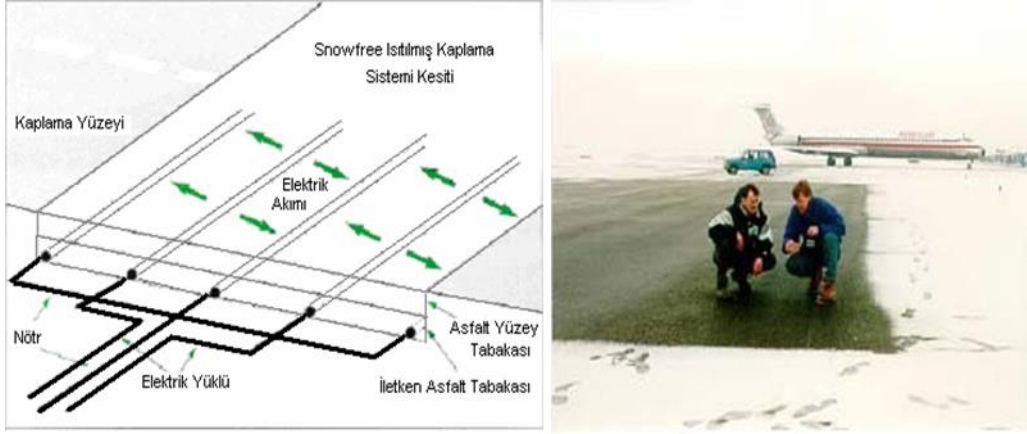
Yehia ve Tuan (1998), fiber çelik ve tıraşlanmış çelik parçacıkları kullanılarak köprüler için özel bir iletken beton geliştirmiştir. Fiber çelik ve tıraşlanmış çelik katkılı elliden fazla karışım hazırlanmıştır. Toplam hacmin %15-20'sini ihtiva edecek şekilde iletken malzeme (çelik fiber ve tıraşlanmış çelik) kullanılarak hazırlanan iletken beton tarafından sabit ve üniform bir ısı üretimi yapılmıştır (Tuan ve Yehia 1998). Her bir kar eritme

işlemi için ortalama birim enerji maliyeti, elektrik tüketim maliyetinin 0,08 \$/kWh olduğu varsayılarak 0,8 \$/m² olarak bulunmuştur (Yehia vd. 2000).

Abuksam (2001), iletken ağ ve ısıtma elemanlarını içeren bir kar eritme örtüsü tasarlamıştır. Bu örtü, taşıt ağırlıklarıyla desteklenen, nem, yağmur, kar, tuz ve ultraviyole ışınları gibi çevresel etkilere karşı dirençli, sağlam, esnek ve yalıtkan termoplastik ve sert lastikten oluşmaktadır. Sistem, örtünün içine gömülmüş haldeki sıcaklık sensörleri ile kontrol edilir. Yüzeyde yeterli miktarda erimiş su algılandığında bir detektör, sistemi kapatır. Bu ürün, iletken metal kabloların ağ sisteminin ısı ürettiğini ve elektrik akımının düzgün bir şekilde dağıttığını göstermiştir (Abukasm 2001).

2001 yılında iletken betonlarda karbon ürünleri, tıraşlanmış çeliklerin yerini almaya başlamıştır. Laboratuvar verilerine dayanılarak karbon katkılı iletken betonlar ilk defa buz çözme amacıyla Roca Spur Köprüsü'nde kullanılmıştır. Köprüye, kış boyunca yaşanan kar ve buz oluşumlarını izleyebilecek ve kontrol edebilecek şekilde sıcaklık ve akım ölçerlerin de yerleştirildiği bir iletken kaplama döşenmiştir. 203~431 W/m² arasında değişen bir güç yoğunluğu ile her kar yağışında bu sistem kullanılmıştır (Tuan 2008).

1994 yılının kasım ayında O'Hare Uluslararası Havaalanında Snowfree® Sistemi uygulanmıştır (Derwin vd. 2003). Sistemde ayrıca 120 volt'luk bir elektrik kaynağı ve kaplamaya monte edilmiş yüzeydeki nem ile sıcaklık hakkında bilgi veren otomatik sensörler de kullanılmıştır. Sistem, 1998 yılının mayıs ayında taksi yolunun bir kısmının yeniden yapılması sırasında kaldırılmış fakat sistemin uygulandığı kaplama kısmı aradan geçen 3,5 yıl içerisinde durabilite, güvenlik, performans ve ekonomiklik bakımından test edilmiştir. 21,3x29,6 m (70x97 feet) boyutunda ısıtılmış bir alanı kapsayan tasarımda, 7 adet kablo 4,9 m (16 feet) aralıklarla taksi yolu boyunca yerleştirilmiş ve uygulanan 120 Volt'luk elektrik ile Snowfree® uygulanan kısımda karın eridiği görülmüştür (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Snowfree® Sistemi Enkesiti ve Uygulama Sonucu Karın Eritilmesi (Derwin vd. 2003).

O'Hare'de uygulanan iletken kaplama kısmı, sıcaklığın -12°C 'a ($-53,60^{\circ}\text{F}$ 'a) ulaştığı 4 kış mevsimi ve bazı günler sıcaklığın $37,8^{\circ}\text{C}$ 'yi (100°F 'ı) aştığı 3 yaz mevsimi süresince denenmiş ve bu süre içerisinde çeşitli çevresel ve iklimsel gerilmelere maruz kalmıştır. Uçak trafik seyirlerine dayanılarak yolun 200.000'den fazla uçak hareketine maruz kaldığı belirlenmiştir. Isıtılmış kısım üzerinde asfalt kaplamanın diğer kısımlarında görüldenden farklı önemli çatlaklar gözlenmemiştir. 1995 yılının mayıs ve aralık aylarında, uçak trafiğinden kaynaklanan tekerlek izi veya ötelenmeden dolayı kaplama profilinde oluşan deformasyonları belirlemek amacıyla profilometre testleri uygulanmıştır. Profil grafikleri, ısı dalgalarının uygulandığı periyot süresince yüzeyde herhangi bir hareket olmadığını göstermiştir. 1998 yılında sistem kaldırılincaya kadar, kaplamanın görsel denetimine devam edilmiş ve önceki verilerle birleştirilerek iletken asfaltın normal karışımlarla benzer durabiliteye sahip olduğu belirlenmiştir (Derwin vd. 2003). Ayrıca sistem çalıştığı sürece yapılan ölçümler sonucunda yüzeyde insan sağlığını ve çevreyi önemli oranda etkileyecek elektrik kaçağının bulunmadığı belirlenmiştir.

Sistemin uygulanması ile çevresel zararın azaltılması ve güvenliğin artırılmasının yanı sıra maliyetin azaltılması bakımından da fayda sağlanmaktadır. Sistem tasarımında grafit içeren bir asfalt üstyapı, bakır kablolar, trafolar ve anahtar takımları normal asfalt kaplamaya göre ilk yapım maliyetini $0,09\text{ m}^2$ (1ft^2) başına yaklaşık 25 \$ arttırmıştır. Fakat her bir uçuş iptali için yaklaşık 4.000 \$, her bir sapma için 15.000 \$ ve her bir erteleme için dakikada 50 \$ zarar edildiği göz önüne alındığında sistemin kısa bir sürede ilk yatırım maliyetini amorti edeceği söylenebilmektedir. 45 watt'lık maksimum güç uygulanması

durumunda kaplamadaki 0,09 m² (1ft²)lik alanı ısıtmak için saatte 2.400 \$ harcanmaktadır. 1999 yılında O'Hare Havaalanında sadece kar temizleme işlemi için 15 milyon \$'ın üzerinde bir para harcanmıştır. Bu veriler sistemin ekonomik açıdan uygun olduğunu göstermektedir (Derwin vd. 2003).

2.4 Elektriksel İletkenlik ve Perkolasyon Teorisi (Sızma Eşiği)

2.4.1 Elektriksel İletkenlik

Asfalt karışımlarının elektriksel özellikleri genellikle elektriksel iletkenlik ve bunun tersi, elektriksel özdirenci açısından karakterize edilir. Bir asfalt karışımının elektriksel iletkenliği, malzemenin elektrik akımını iletme yeteneğini temsil eder. Buna karşılık, elektrik direnci (iletkenliğin tersi), şekli veya boyutu ne olursa olsun, malzemenin elektrik akımının geçişine karşı direncini ölçer. Denklem 2.1, bir malzemenin özdirenci ve iletkenliği arasındaki ilişkiyi gösterir (Hasan 2021).

$$\text{iletkenlik} \left(\frac{1}{\Omega \cdot m} \right) = \frac{1}{\text{Özdirenç} (\Omega \cdot m)} \quad (2.1)$$

$$\text{Özdirenç} (\Omega \cdot m) = \frac{\text{Direnç} (\Omega) \times \text{Kesit Alanı} (m^2)}{\text{Numune Yüksekliği} (m)} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2, bir malzemenin özdirenci ile direnci arasındaki ilişkiyi temsil eder. Özdirencin, bir birim kesit alanı başına ve her bir uzunluk birimi için kaç tane iletken parçacığın bulunduğunu, kaç elektron taşıdıklarını ve ne kadar hızlı olduğunu açıklayan, malzemenin içsel (1) bir özelliği olduğu denklemden çıkarılabilir. Elektrik alanında hareket ederler. Elektrik direnci, malzemenin geometrisinden bağımsızdır.

(1) İçsel özellik, mevcut maddenin miktarından bağımsız bir maddenin özelliğidir. Bu tür özellikler, esas olarak yoğunluk ve özgül ağırlık gibi kimyasal bileşime ve yapıya bağlı olarak maddenin türü ve biçiminin doğal nitelikleridir (Hasan 2021).

Direnç, elektrik devrelerinde voltaj farkı ile akım arasındaki ilişkiyi yöneten bir özelliktir. Alman fizikçi Georg Simon Ohm, 1827'de bu ilişkiyi keşfetti ve Ohm'un yasasını ortaya koydu ve şöyle dedi: "Bir materyalden geçen sabit akımın miktarı, sabit bir sıcaklık için materyal üzerindeki voltajla doğru orantılıdır." Denklem (2.3), Ohm kanunu formülünü temsil eder:

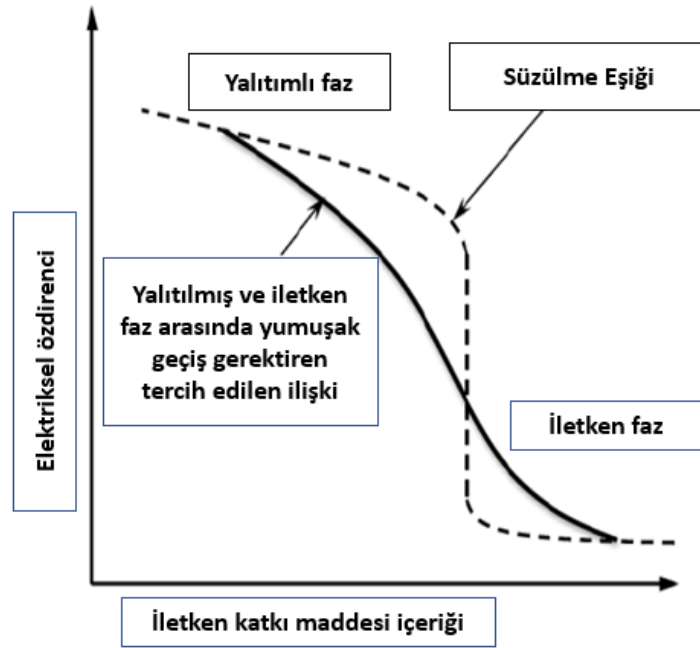
$$Direnç (\Omega) = \frac{Voltaj (volt)}{Akım (Amp)} \quad (2.3)$$

İletken asfalt karışımlarının elektrik öz direnci ile ilgili olarak, voltaj farkı ve akım miktarı elde edildikten sonra istenen (tasarım) direnci belirlemek için literatürde Ohm yasası kullanılmıştır. Böylece öz direnç, malzemenin uzunluğu ve kesit alanı kullanılarak hesaplanabilir. Minsk (1968), (2.2) ve (2.3) denklemlerini kullanarak gerekli öz direnci elde edebilir; 1,52 m (5 ft) aralıklı elektrotlar arasında 30 Voltluk bir potansiyel düşüş için birim yüzey alanı başına 20 Watt/metrekare güç tüketimi ve 1,27 cm (1/2-inç) iletken katman kalınlığı tasarım gereksinimlerine dayalıdır.

Dirençli ısıtma (ayrıca Joule Isıtma ve Ohmik Isıtma), bir elektrik akımının bir iletken den geçmesinin ısı ürettiği süreçtir. Konsept ilk olarak 1840 yılında, üretilen ısı nın yük taşıyıcılar (elektronlar) ve iletken (bizim durumumuzda 24 iletken asfalt karışımı) arasındaki çarpışmalardan kaynaklandığını öne süren James Prescott Joule tarafından tanıtılmıştır. Elektriksel olarak iletken kaplama sistemi, voltaj farkının yükü elektrotlar arasında hareket etmeye ittiği, elektron akışını kendi yönünde hızlandıran ve onlara kinetik enerji veren bir elektrik alanı yaratan tek bir döngülü elektrik devresi olarak tanımlanabilir. Yüklü parçacıklar iletkenle çarpıştıkça saçılırlar, yani hareket yönleri rastgeledir ve elektrik alan enerjisinin termal enerjiye dönüştürüldüğü termal hareket oluşturan elektrik alanı ile hizalı değildir. Bu termal enerji, kaplama boyunca iletken yol boyunca dağılır, bir ısıtma elemanı olarak işlev görür ve yüzeyi dondurur (Hasan 2021).

2.4.2 Perkolasyon Teorisi (Sızma Eşiği)

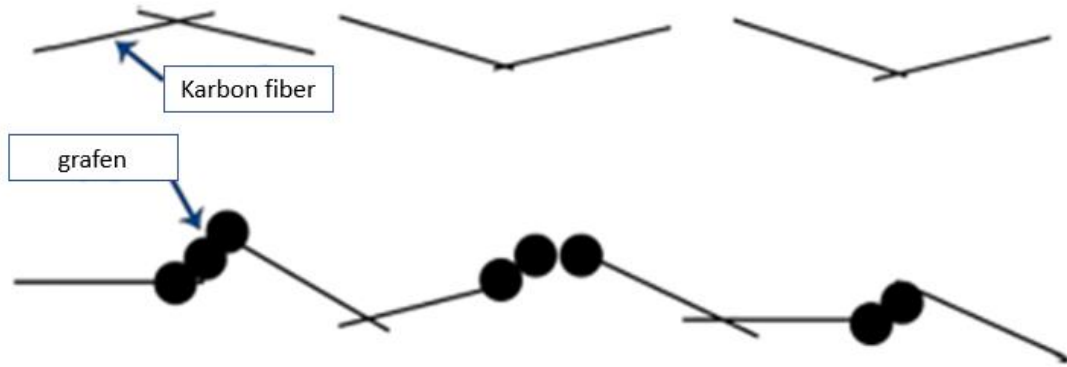
Eşitlik (2.1)'den anlaşılacağı gibi, bir asfalt karışımının iletken olması için elektriksel özdirencinin elektronların kolayca geçmesine izin verecek kadar düşük olması gerekir. Wu vd. (2005), bu üç boyutlu bir iletken ağ oluşturabilen yeterli miktarda iletken katkı maddesi dahil edilerek elde edilir. Asfalt karışımının iletken olmayan fazdan iletken faza geçtiği iletken katkı maddesi içeriğine sızma eşiği denir ve elektrik direncinde ani bir düşüş ile karakterize edilir. Şekil 2.3, elektriksel özdirenç geçiş eğrisi üzerindeki sızma eşiğinde elektrik özdirencindeki ani sıçramayı göstermektedir. Wu vd. (2005), ayrıca doygunluk seviyesinde, iletken katkı içeriğindeki artışın, karışımın elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde iyileştirmediğine dikkat çekmiştir. Bu özel içerik, optimal içerik olarak adlandırılır. Bu nedenle, asfalt karışımlarının mekanik özelliklerine etkisini en aza indirmek için katkı maddelerinin ideal içeriği bu noktayı geçmemelidir.



Şekil 2.3 Perkolasyon Teorisi (Baranikumar 2013)

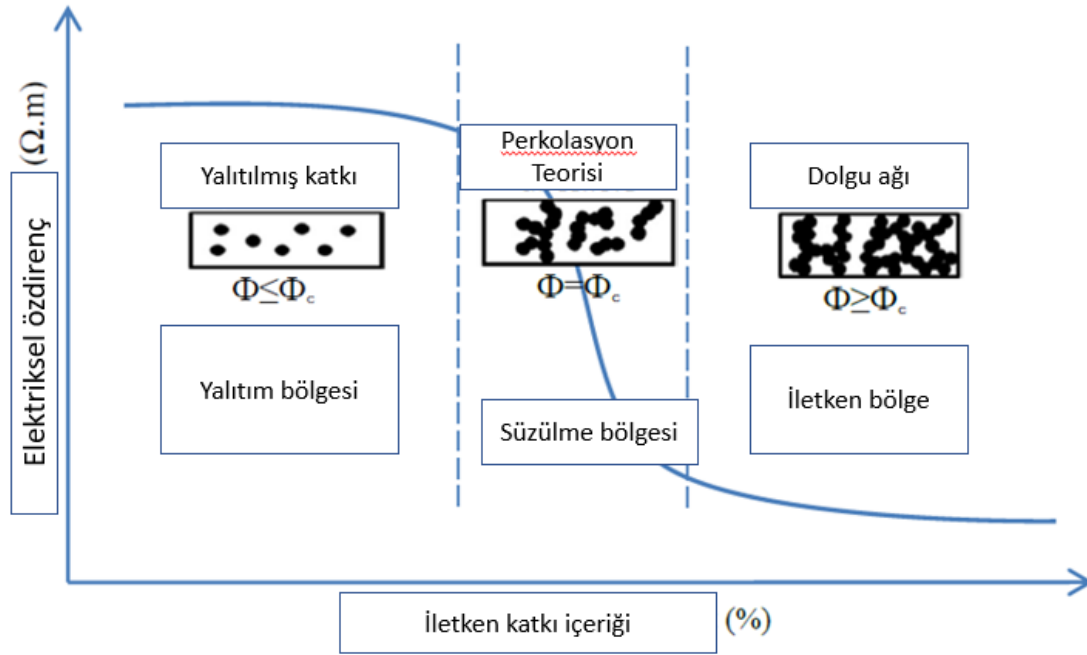
Karbon fiberlerden farklı olan grafen içeren iletken asfalt mastiğine dahili karıştırma yöntemi uygulanmıştır. Elektrik iletkenliğini iyileştirmek için asfalt betona grafen eklenmiştir. Mükemmel iletkenliğe sahip az miktarda grafen eklenerek daha eksiksiz bir iletken yol oluşturulabilir. Bitümdeki grafenin dağılımı, içerikteki artıştan etkilenecektir.

Bu nedenle, asfalt karışımının öz direncini ölçmek için % 0,2 karbon fiber ve % 0,5-1,0-1,5-2,0 grafen içeriği sınırı seçilmiştir. Grafen ilavesiyle öz direncin azaldığı görülebilir. Kompozitlerin iletken davranışları iletken malzemelerin eklenmesiyle doğrusal olmayan bir şekilde artar. Dolgu içeriği eşiklerin ötesinde olduğunda, iletken bir yol oluşur. Önceki çalışmalar, elektron akışının, iletken parçacıkların daha yüksek en boy oranıyla desteklenebileceğini, süzülme eşiğini azaltarak ve iletkenliği artırdığını göstermiştir (Wu vd. 2005). Yüksek en-boy oranına sahip karbon fiber, üç boyutlu iletken ağ oluşumunu destekler. Aynı zamanda lifler arasındaki boşluk grafen parçacıkları ile doldurulacaktır. İletken yolların oluşumu, az miktarda grafen ilavesiyle desteklenebilir. İki tür iletken yol: biri doğrudan temastır; diğeri ise elektron geçişinin neden olduğu tünelleme etkisidir. Grafenin köprüleme etkisi nedeniyle, elektron geçişinin potansiyel bariyeri azalır ve iletken yol mükemmelleştirilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 İletken ortamın iletken mekanizma şeması (Wu vd. 2005)

Bir malzemedeki direncin yalıtım durumundan iletken duruma faz geçişi, bir yalıtım matrisi arasına iletken inklüzyonlar sokulduğunda meydana gelir. Aslında, iletken kompozitler, yalıtım matrisine iletken bir dolgu maddesi eklenerek elde edilebilir. Bu dosyalayıcının rasgele dağılımı için, sızma eşiği (p_c) olarak bilinen belirli bir yükte (iletken yükler) iletken bir ağ oluşacaktır. Dolgu yükü p_c 'ye ulaştığında, kompozitin iletkenliği aniden yükselir ve yüklemeye karşı iletkenlik grafiği karakteristik S şeklini alır ve üç karakteristik rejimi gösterir: yalıtkan, süzülen ve iletken (Şekil 2.5). (Marsden vd. 2018, Bauhofer ve Kovacs 2009, Sandler vd. 2003, White vd. 2010)



Şekil 2.5 İzolasyon malzemesinin elektriksel faz geçişi (Marsden vd.2018, Bauhofer ve Kovacs 2009, Sandler vd. 2003, White vd. 2010).

2.5 İletken Asfalt Betonunda Kullanılan İletken Bileşenler

Karbon, grafit, çelik ve alüminyum, önceki çalışmalarda iletken katkı maddeleri olarak kullanılan başlıca malzemelerdir. Bunlar aşağıdaki gibi farklı şekil ve boyutlarda (formlar) gelir:

Toz formu: genellikle karışımdaki ince agregaların yerini alan küçük parçacıklar. Toz halindeki iletken dolgu maddelerinin bazı örnekleri grafit, karbon tozu ve çelik talaşlarıdır. Literatür üzerine yapılan çalışmaların çoğu (Wu vd. 2005, Huang vd. 2009, Liu ve Wu 2011, Wu vd. 2013, Yang vd. 2013, Bai vd. 2015, Vo ve Park 2017), ortalama parçacık boyutu ortalama 150 μm olan grafit kullanmıştır. Wu vd. (2005), 42 nm parçacık boyutuna sahip asetilen Karbon Tozu kullanmıştır.

Lifli form: Araştırmacılar yaygın olarak lifli katkı maddeleri kullanmışlardır. Lifli iletken katkı maddelerinden bazıları karbon elyafı, çelik elyafı, çelik yünü ve karbon Nano elyafıdır. Bu katkı maddeleri yüksek bir uzunluk-kalınlık oranına (en-boy oranı) sahiptir. Örneğin, Wu vd. (2005) ve Vo ve Park (2017) 10 μm çapında ve ortalama uzunluğu 5

mm olan karbon fiberler kullandıklarını bildirirken, Gürer ve Gürgöze (2022) ve Notani vd. (2019), uzunluğun İAB karışımlarının özelliklerini nasıl etkilediğini incelemek için farklı ortalama uzunluklarda lifler kullandı.

Katı tanecikler: Çaplarına göre iri ve ince agrega yerine nadiren kullanılır. Bunların örnekleri çelik cürufu ve karbon parçacıklarıdır. Chen vd. (2012) ve Ahmedzade ve Şengöz (2009), karışımdaki tüm agregalar olarak çelik cürufu kullanarak, doğal agregalara kıyasla elektriksel iletkenlik artışı gösteren ECA karışımları hazırladılar.

Birçok araştırmacı, asfalt karışımlarının elektriksel iletkenliğinde iletken katkı formunun etkisini araştırmıştır. Huang vd. (2009) ve Wu vd. (2013) lifli iletken katkı maddelerinin kullanımının toz katkı maddelerinden daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip asfalt karışımları ile sonuçlandığını bildirmiştir. Wu vd. (2005), karbon tozu, grafit ve karbon fiber kullanıldığında sırasıyla %15, %16 ve %6 optimum içerik bildirmiştir. Katkıların formu da İAB karışımlarının mekanik performansında çok önemli bir rol oynar. Huang vd. (2009), mikron ölçekli çelik fiber, karbon fiber ve grafit kullanarak İAB karışımları üretti. Huang hem çelik hem de karbon fiberlerin karışımların laboratuvar performansını iyileştirdiğini, buna karşın yüksek içerik gereksinimi nedeniyle grafitin karışımların performansını önemli ölçüde değiştirdiğini ve özellikle çatlama direncini bozduğunu bildirmiştir.

Garcia vd. (2009), iletken dolgu maddeleri, lifler ve her ikisinin bir kombinasyonu ile modifiye edilmiş asfalt harcının iletkenliğini araştırmıştır. Kullanılan iletken dolgu maddesi grafit, lif tipi katkı maddesi çelik yünü kullanmıştır. Garcia vd. (2009), süzülme eşiğinin dolgu maddelerinden çok daha az lif eklenmesiyle gerçekleştiği sonucuna varmıştır. Çalışma, süzülme eşiğinin, kum-bitüm oranının yanı sıra lif içeriği hacminin bir fonksiyonu olduğunu ortaya koydu. Garcia vd. (2009) ayrıca, üzerinde "karışım ve elektrik direncinin katlanarak arttığını" yapmanın zor olduğu bir optimum lif içeriği bildirmiştir. İletken dolgu maddeleri veya kombinasyon durumunda, maksimum iletkenliğe ulaşıldığında, daha fazla dolgu maddesi eklendiğinde bile sabit kaldığı bildirildi.

Chen vd. (2012), iletken dolgu maddeleri olarak grafit ve karbon fiber ile karıştırırken karışımdaki tüm agregalar olarak çelik cürufu kullanarak İAB karışımları hazırlamıştır. Chen vd. (2012), çelik cürufu İAB karışımlarının elektriksel özelliklerini, bir kontrol İAB karışımına kıyasla (bazalt agregaları kullanarak) değerlendirdi ve karışımlardaki grafit içeriğini hacimce %10 ila %24 arasında değiştirerek değerlendirmiştir. Girilen maksimum grafit içeriğinde (bağlayıcı hacminin %24'ü), çelik cüruf karışımları 7.38 Ω -m'lik bir elektrik direnci göstermiştir. Bazalt asfalt karışımları için 6210 Ω -m ile karşılaştırıldığında Chen vd. (2012) çelik cürufunun karışımda agrega olarak kullanılmasının, sadece grafit tarafından oluşturulanlara kıyasla iletken çelik cüruf agregaları ve grafit tozu aracılığıyla karmaşık iletken yollar oluşturarak elektriksel özellikleri geliştirdiğini belirtmiştir.

2.6 Elektriksel İletken Asfalt Karışımların Performansı

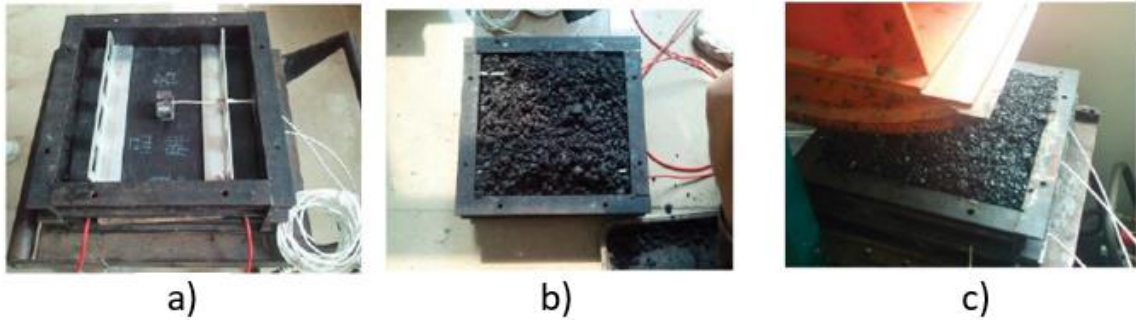
2.6.1 Elektriksel İletkenlik Performansı

Elektriksel direnç genellikle iki prob ve dört prob yöntemlerinden birisi kullanılarak ölçülür. İki yöntem arasındaki fark, elektrik akımını asfalt karışımın numunesinden geçmek için kullanılan elektrot sayısının birinde dört diğerinde iki tane oluşudur. İki prob yöntemi, numunenin üst ve alt yüzeylerini kaplayan iki elektrot içerirken, dört prob yönteminde, diğer iki elektrot asfalt karışımın numunesine gömülü haldedir. Elektrotları sıkıştırılmış laboratuvar numunlerine gömme zorluğu nedeniyle, çoğu araştırmacı silindirik numunleri test etmek için iki prob yöntemi kullanılmıştır (Huang vd. 2009, Vo ve Park 2017; Notani vd. 2019). Dört prob yöntemi genellikle sahada asfalt sıkıştırılırken kullanılır (Wu vd. 2013).

Asfalt karışımlarının elektrik direncini ölçmek için bir multimetre kullanılmalıdır. Birçok çalışmada elektrot ve geçen akım arasındaki voltaj farkını ölçerek direnci ölçen Keithley multimetresi kullanılmıştır (Huang vd. 2009, Wu vd. 2013). Karışımdan geçen akım, doğru akım (DC) (Wu vd. 2013) veya alternatif akım (AC) olabilir. Numunenin geometrisi bilinerek ve yukarıda belirtilen Denklem (2.1) kullanılarak elektrik özdirenci hesaplanabilir.

Araştırmacılar, sıkıştırılmış numunelerin elektrik direncini ölçerken elektrotlar ve numune arasında tam teması sağlamak için farklı teknikler kullanmışlardır. Örneğin, Huang vd. (2009), numunenin temas alanlarını oldukça iletken gümüş boya ile boyamıştır. Daha sonra bu alanların iletkenliğini sağlamak için gümüş boyanın üstüne iletken bir bakır bant yapıştırılmıştır. Bildirilen diğer bir yöntem, yüzeyler arasındaki boşlukları doldurmak ve direncin doğru bir şekilde okunması için grafit tozunun kullanılmasıdır (Wu vd. 2005).

Wu vd. (2013) bir köprü döşeme yapısını simüle etmek amacıyla, küçük ölçekli bir iletken asfalt levhası oluşturmak için iki asfalt katmanını bir beton katmanının üzerine sıkıştırmıştır. Beton tabakasının üzerine bir yalıtım malzemesi yerleştirilmiş, daha sonra iletken tabaka, sıkıştırmadan önce iletken karışımın içine bir çift alüminyum elektrot ve termal sensörler de levha içine gömülmüştür. Son olarak geleneksel bir asfalt karışımı iletken tabakanın üzerine yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Resim 2.2, elektrotların levhaya gömüldüğü asfalt beton levhasının hazırlık sürecini göstermektedir. Wu vd. (2013) iletken karışımın elektrik direncini test etmek için dört prob yöntemini kullanmıştır. Akımı karışımdan geçirmek için iki dış elektrot yerleştirilirken, voltaj farkını ölçmek için gömülü elektrotlar kullanılmıştır. Elektrik iletkenliği bakır tellerle birlikte gümüş boyalarla sağlanmıştır.



Resim 2.2 Asfalt Beton Döşeme Hazırlama İşlemi, a) Isıl Sensörlü ve Elektrotlu Kalıp, b) Karışımın Paketlenmesi, c) Sıkıştırma (Wu vd. 2013).

2.6.2 Mekanik Performans

Bir asfalt karışımına önemli miktarlarda iletken malzemenin dahil edilmesi, kaçınılmaz olarak asfalt karışımlarının mekanik performansını olumlu veya olumsuz olarak etkileyebilir. İletken asfalt betonu ile ilgili çalışmalar ağırlıklı olarak İAB karışımlarının elektriksel ve termal özelliklerinin yanı sıra katkı içeriğine odaklanmıştır (Shao-peng vd. 2002, Wu vd. 2005, Bai vd. 2015, Vo ve Park 2017, Alnotani vd. 2019). Sınırlı sayıda çalışmada, iletken katkı maddelerinin bu karışımların mekanik performansı üzerindeki etkisini araştırılmıştır.

Araştırmacılar, İAB'nin mekanik özelliklerini incelemek için genellikle iki yaklaşım kullanmışlardır. Bunlar, İAB karışımlarında kullanılan modifiye asfalt harcının özelliklerini araştırmak ve bu karışımların laboratuvar performansını değerlendirmektir. Asfalt bağlayıcı ve harcın özellikleri, iletken asfalt karışımlarının mekanik performansına belirgin bir şekilde katkıda bulunur; bu nedenle araştırmacılar, çoğunlukla yumuşama noktası testi, nüfuz edilebilirlik testleri, viskozite testi ve Dinamik Kayma Reometresi testi kullanarak asfalt harcının reolojik özelliklerini incelemeye odaklanmıştır (Huang vd. 2009, Rodgers vd. 2009). Asfalt karışımlarının performansı tipik olarak Marshall Stabilitesi, Donma Çözülme, Asfalt Kaplama Analizörü, Akış Sayısı, Dinamik Modül, Sürünme Sertliği, Dolaylı Çekme Dayanımı ve Dört Noktalı Eğilme Testleri gibi bazı laboratuvar testleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Huang vd. 2009).

2.7 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Konusu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Elektriksel Olarak İletken Asfalt (ECA) karışımı, yeterli miktarda elektriksel olarak iletken bileşenlerle birleştirilmiş bir asfalt karışımıdır (Wu vd. 2005). Bu bileşenler bir asfalt karışımına dağıldıktan sonra, iletken bir ağ oluşturarak elektriğin iletimini sağlarlar ve bu da elektrik akımının geçmesine izin verir (Park ve Vo 2017). Minsk ilk olarak 1968'de buz çözme uygulamaları için kaplamayı ısıtmak için bir teknik olarak ECA karışımları kavramını tanıtmıştır. Minsk (1968), asfalt karışımlarının potansiyel olarak elektriği iletebileceğini doğrulamak için laboratuvar ve saha testleri gerçekleştirmiştir. Minsk, mineral agregaların bir kısmını grafit ve alüminyum yongalar gibi daha iletken bir

malzeme ile değiştirerek laboratuvar numuneleri hazırlamıştır. Keşif testleri, iletken bir dolgu maddesi olarak alüminyumun reddedilmesine yol açarken, iletken numuneler hazırlamak için grafit kullanılmıştır. Minsk, kış aylarında karsız bir yüzey tutabilecek bir dış mekân test bölümü oluşturmak için grafit modifiye karışımı kullanmış; ancak test bölümü, yüklenicinin iletken karışıma aşına olmaması nedeniyle tasarım gereksinimlerini karşılayamamıştır.

Pan vd. (2015), iletken asfalt betonu, asfalt kaplama elektrikli ısıtıcı tarafından kaplamadaki karın erimesine/buzunun çözölmesine yardımcı olmak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Kış aylarında güvenli sürüş sağlamak için gelişmekte olan bir teknolojidir. Joule ısıtma yasasına göre, iletken asfalt betonundan (bir iletken) geçen bir elektrik akımı, asfalt kaplama yüzeyinde kar birikmesini ve buzlanmayı önlemek için yeterli ısı üretebilir. Bu çalışma, iletken asfalt betonunun malzeme tasarımı, yapım tekniği, performans değerlendirmesi ve mühendislik uygulamaları hakkında bir inceleme sunmuştur. Literatür, iletken asfalt betonunun iletkenliğinin ve mekanik özelliklerinin, malzeme bileşimlerine ve karıştırma programlarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Bu arada, iletken katkı maddelerinin özelliklerine göre iletkenlik iyileştirme mekanizması belirlenir. Ayrıca servis koşullarının özdirenç üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Asfalt kaplama elektrikli ısıtıcı tekniği, karayolu endüstrisinde çok az uygulaması olmasına rağmen, çevre koruma ve trafik güvenliği açısından bazı kayda değer avantajlar göstermiştir. Bu nedenle, asfalt kaplama elektrikli ısıtıcı hakkında daha fazla araştırma yapılmasının vazgeçilmez olduğunu ve mevcut araştırmaların yanı sıra uygun malzeme seçimi, özdirenç kararlılığı, arzu edilen yüksek işletme verimliliği ve uygun inşaat tekniği gibi bazı kapsanan konulara odaklanmasını tavsiye edilmiştir.

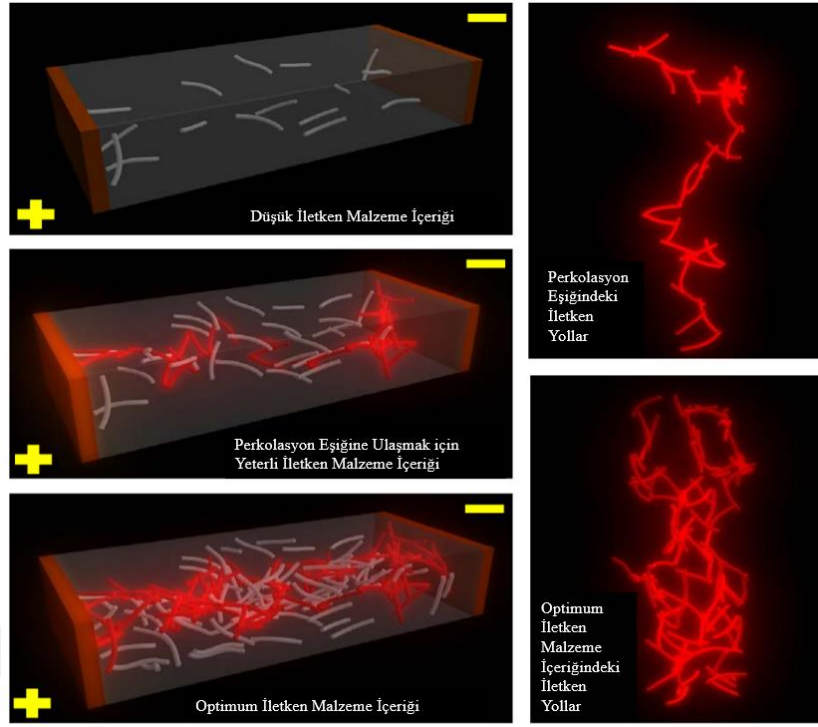
Pan vd. (2017), çalışmalarında asfalt güneş kollektörünün (ASC) güneş enerjisi toplama ve kar eritme verimlerini iyileştirmek için yüksek ısı iletkenliğe sahip iletken asfalt betonu önerilmiştir. Bu çalışma, iletken asfalt betonunun hazırlanması için temel malzemeleri seçmenin yanı sıra çevresel faktörlerden etkilenen termal özelliklerin gelişimini belirleme konusunda bir fikir vermeyi amaçlamaktadır. ASC'nin davranışını (özellikle enerji verimliliğini) analiz etmek için bir dizi deneysel test ve teorik çalışma yapılmıştır. Termal özelliklerin bir ASC'nin enerji verimliliğini etkileyebilecek en kritik

faktörlerden biri olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, iletken asfalt betonunun tasarımı ve hazırlanması için üstyapıda yaygın olarak kullanılan temel malzemelerin seçilmesine ve ayrıca ASC'nin performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için çevresel faktörlerden etkilenen termal özelliklerin gelişiminin belirlenmesine ilişkin bazı bilgiler sağlamaktır. İAB'nin termal özellikleri, Termal Sabitler Analizörü tarafından incelenmiştir. Asfalt betonunun termal özellikleri üzerindeki malzeme özellikleri ve bileşimlerinin etkisi, ayrıca sıcaklık, nem, donma-çözülme döngüleri gibi çevresel koşulların etkileri araştırmak için üç tip asfalt bağlayıcı, yedi tip agrega ve iki tip dolgu maddesi kullanılmıştır. Ayrıca asfalt betonunun termal özellikleri üzerinde yaşlanma analizleri yapılmıştır. Asfalt betonu üzerinde sıcaklık ve nemin çift etkisini simüle etmek için donma-çözülme testi kullanılmıştır. Yaşlanma süreci, kısa vadeli yaşlanma testi, uzun vadeli yaşlanma testi ve ultraviyole yaşlanma testini içermektedir. AH-70, AH-90 ve stiren bütadien-stiren (SBS) ile modifiye edilmiş asfalt dahil olmak üzere üç tip asfalt bağlayıcı elde edilmiştir. Bu araştırmaya beş tip mineral agrega ile yıkım atığı ve temel oksijen fırını (BOF) cürufu dahil edilmiştir. Bu araştırmada maksimum nominal boyutu 12,5 mm olan asfalt karışımını tasarlamak için üst Superpave yöntemi kullanılmıştır. Farklı karışımların hacim kompozisyonunu tutarlı bir şekilde korumak için hacim kontrol yöntemi kullanılmıştır. Sonuçların doğruluğunu sağlamak için, her bir agrega türü elek boyutlarına (0.075–19 mm) göre dokuz kategoriye ayrılmıştır. Her karışımda sadece asfalt bağlayıcı türü veya agrega türünün farklı olduğu düşünülerek, asfalt karışımlarını tanımlamak için karşılık gelen agrega veya asfalt bağlayıcı adları kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında sonra Termal karakteristik analizi, Standart Yaşlandırma Prosedürü, Dondurma-Çözülme Prosedürü deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda malzeme bileşimi açısından asfalt betonunun termal özellikleri, mineral agreganın termal özelliklerine büyük ölçüde bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bitüm türlerinin etkisi, oranı düşük olduğu için önemli değildir. Asfalt güneş kollektörü için asfalt betonu hazırlamak için yüksek ısı iletkenliğe sahip iletken dolgu ve mineral agrega tavsiye edilmiştir. Sıcaklık, su, donma-çözülme ve yaşlanma gibi çevresel koşullar asfalt betonunun termal özelliklerini etkileyebilir. Tüm faktörler arasında, asfalt betonunun hacim genişlemesi ve yapışma bozulması nedeniyle donma-çözülme etkisi en önemlisi etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

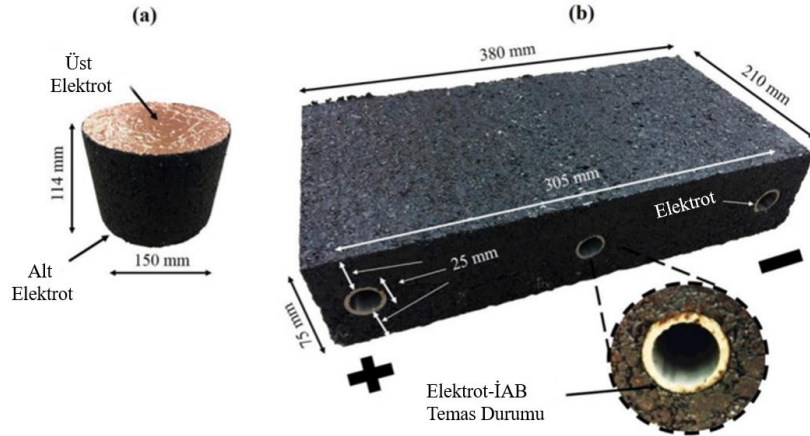
Jahanbakhsh vd. (2018), çalışmalarında asfalt betonunun ısıtılmış ısınması ve iyileşmesine odaklanmıştır. Asfalt betonunun elektromanyetik duyarlılığını artırmak ve bu malzemenin ısınma ve iyileşmesini hızlandırmak için asfalt bağlayıcıya iletken bir bileşen olarak karbon tozu (KT) eklenmiştir. Numuneler silisli ve kalkerli agregata türleri kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra, KT modifiye asfalt betonunun mekanik özelliklerini incelemek için yarım daire biçimli eğilme (SCB), dolaylı çekme (IDT) ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Ek olarak, tekrarlanan kırılma-iyileşme (breaking-healing cycles) döngüleri altında KT ile modifiye edilmiş asfalt betonunun performansını değerlendirmek için bir iyileşme indeksi (H.I) tanıtılmıştır. Deneysel sonuçlar, KT'nin asfalt betonunun mekanik mukavemetini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. İlk kırılma-iyileşme döngüsünde KT, asfalt betonunu, düşük ve orta sıcaklıklarda H.I sırasıyla %70 ve %60'a kadar olacak şekilde uygun şekilde ısıtılabilir ve iyileştirebilir. Ayrıca, kırılma-iyileşme döngüleri arttıkça H.I azalmıştır. Daha sonra, hasar seviyesinin ve etkili iyileşme uzunluğunun indüklenen iyileşme indeksi üzerindeki etkilerini netleştirmek için ampirik-mekanik bir model önerilmiştir. Asfalt betonunun iyileşme indeksinin mekanik test modlarına, çatlak uzunluğuna, hasar seviyesine ve sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Arabzadeh vd. (2019), çalışmalarında kış kaplama bakım operasyonlarını otomatikleştirmeye yönelik uygulama ile iletken bir asfalt betonu üretmeyi amaçlamıştır. Bu amaca ulaşmak için Sıcak karışım asfalt (HMA), kaplama buzlanma önleme ve buz çözme uygulamaları ile elektriksel olarak iletken asfalt betonu elde etmek için karışım içerisine karbon lifi (KL) ilave edilmiştir. Bu amaca ulaşmak için, modifiye edilmiş bir kuru karıştırma yöntemini takiben, gyratory asfalt betonu numuneleri hazırlamak için değişken dozaj oranlarında KL'ler agregalara dahil edilmiştir. Bu nedenle, süzülme eşiği ve optimum KL içerikleri belirlenebilir. Daha sonra, ısıtma verimliliğinin önce aktif kızılötesi termografi kullanılarak değerlendirilebilmesi ve ardından kalın bir kar tabakasının bir yüzeyde eritilmesi için süre, enerji tüketim rejiminin raporlanarak belgelenebilmesi için belirlenen optimum KL hacim içeriğinde iletken asfalt beton plakaları üretilmiştir. Karbon lifini ve agregaları karıştırmak için bir planeter (Hobart) karıştırıcı kullanılmıştır. KL karışımdan uymasını önlemek ve homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için, önce toplam karışım ağırlığı içeriği %4 olacak şekilde agrega-

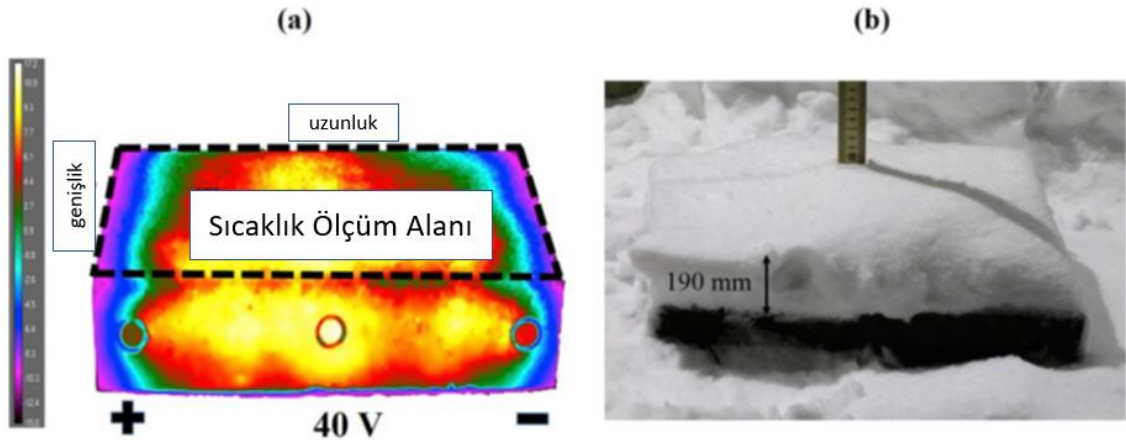
KL karışımına su ilave edilmiş ve ardından karıştırmaya başlanmıştır. Her parti 285 rpm'de 3 dakika karıştırılmıştır. Agregat-CF karışımları daha sonra suyun buharlaşmasını sağlamak için 110 °C'ye ayarlanmış bir fırında 24 saat ısıtma işlemine bırakılmıştır. KL dispersiyon kalitesini arttırmak için su ilavesi ve bu KL dispersiyon yöntemi için prosedürün detaylandırılması bu çalışmanın yeni özellikleri arasındadır. Hacim öz direnç ölçümlerini kolaylaştırmak ve bu ölçümleri yapmak için numunelere elektrotların manuel olarak itilmesiyle ilgili hataları ortadan kaldırmak için gevşek asfalt karışımlarının hem üstüne hem de altına bakır folyolar yerleştirilmiştir. Her biri üç kez çoğaltılan numuneler, %0 ila %2,5 (karışım toplam hacmine göre) arasında değişen değişken KL dozaj oranlarında üretilmiştir. Asfalt karışımının yapışkan davranışını ve ayrıca döner kompaktör tarafından uygulanan basıncı kullanarak elektrotların bağlanması, bu çalışmanın bir başka yeni özelliğidir. Çalışmada, kış kaplama bakım işlemlerinin otomatikleştirilmesine yönelik uygulama ile iletken asfalt betonu imalatının fizibilitesi araştırılmıştır. Bu amaçla, bir asfalt karışımında arzu edilen elektriksel iletkenlik seviyesinin elde edilebileceği optimum karbon fiber (KL) içeriği belirlenmiştir. Agregaların varlığının elektriksel olarak iletken asfalt mastiğin elektriksel davranışını değiştirme üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Hacimsel özelliklerin değiştirilmesinde KL'lerin etkisi incelenmiştir. İAB plakaların ısı üretme kabiliyeti 3 farklı yöntem kullanılarak karakterize edilmiştir. Son olarak, önerilen teknolojinin ekonomik fizibilitesini anlamak için bir maliyet tahmini yapılmıştır. % 1 KL içeren, 40 V ile çalışan ve 21 °C'de koşullandırılan iletken asfalt betonundan yapılmış bir levhanın sıcaklığı 25 dakikalık bir zaman aralığında 23 °C artırabileceği bulunmuştur. Ayrıca, soğuk bir kışta, böyle bir asfalt beton levha, 40 V ile çalıştırıldığında 2 saatlik bir zaman penceresi içinde 190 mm kalınlığındaki bir kar tabakasını eritebileceği sonucuna varılmıştır. 40 V'luk bir voltajda AC güç uygulayarak, iletken asfalt betonu 2,35 kW/m²'lik bir güç yoğunluğu üretti ve 190 mm kalınlığındaki bir kar tabakasını 2 saat içinde eritilmiştir.



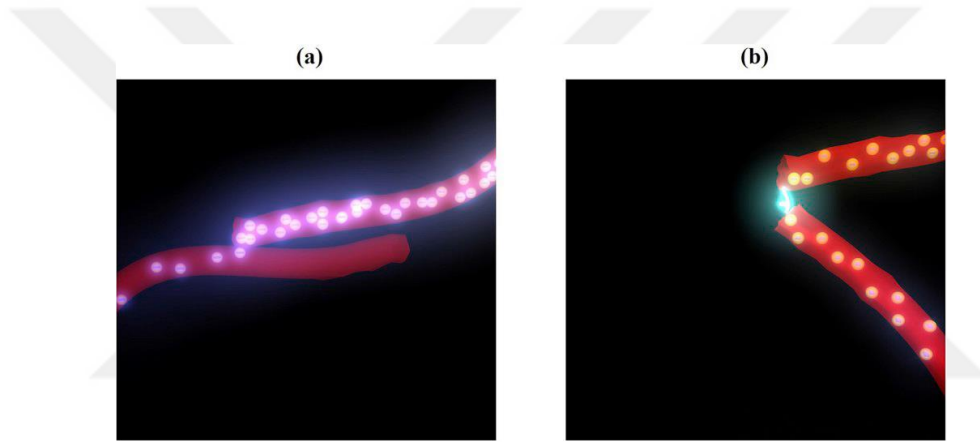
Şekil 2.6 Bir kompozit sistemde CF içeriğinin elektrik iletkenliği üzerindeki etkisi (Maiti vd. 2019, Ravindren vd. 2019).



Şekil 2.7 İletken asfalt beton numune tipleri, a) Dönel (gyratory) numune, b) Plaka numunesi (Arabzadeh vd. 2019).



Şekil 2.8 İletken asfalt betonunun ısı üretimi karakterizasyonu için kullanılan yöntemler, a) Aktif termografi, b) kar eritme kapasitesi (Arabzadeh vd. 2019).

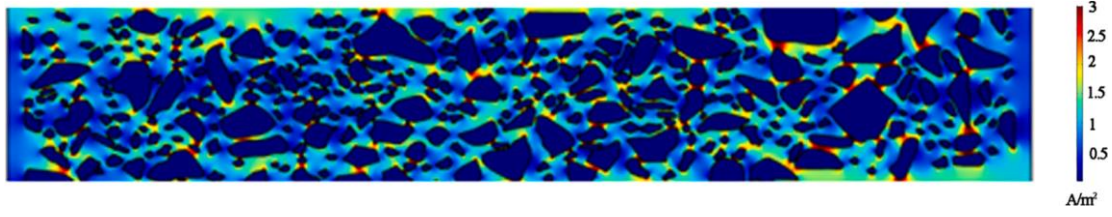


Şekil 2.9 Elektriksel olarak iletken lifler içeren bir kompozitte elektron iletim mekanizmaları, a) Temas direnci, b) Elektron tünellemesi (Paschen vd. 1995, Bao vd. 2012, Wang ve Chung 1999, Gai ve Martin 1989).

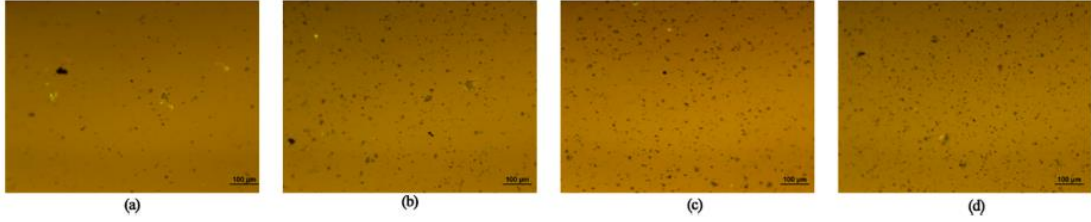
Jiao vd. (2020), çalışmalarında çelik cüruf asfalt betonunun termal özellikleri incelenmiştir. Asfalt betonunda çelikhane cürufunun kullanılmasıyla, asfalt betonunun ısı iletkenliğinin iyileştirilebileceği düşünülmüştür. Asfalt betonunun ısı iletkenliği, asfalt kaplamanın yüzey sıcaklık dağılımını büyük ölçüde etkileyeceği, bu da asfalt kaplamanın mekanik özelliklerini ve yüzey kaplamasının yakınındaki ortamın sıcaklığını etkilediği düşünülmüştür. Bu çalışmada, farklı çelikhane cürufu hacim içeriğine sahip asfalt betonunun termal özellikleri bir laboratuvarda incelenmiştir. Termal iletkenlik, paralel bir sıcak tel ve geçici düzlem kaynak yöntemi kullanılarak test edilmiş ve tekdüzelik ve yüzey sıcaklığı, kızılötesi termal görüntüleme yoluyla incelenmiştir. Ardından, bölgesel istatistiklere, görüntü ikileştirmesine ve varyasyon değerlendirme katsayısına dayalı olarak bir 3B kızılötesi görüntü analiz edilmiştir. Termal olarak iletken

asfalt betonunun pratik kar eritme verimliliği, bir elektrik-termal sistem kullanılarak değerlendirilmiş. Deneysel sonuçlar, çelikhane cürufu ikamesindeki bir artışla azalmadan önce, asfalt betonunun ısı iletkenliği, ısı dağılımı homojenliği ve yüzey sıcaklığının arttığını göstermiştir. Ne olursa olsun, çelikhane cüruf asfalt betonunun termal özelliklerinin geleneksel asfalt betonundan daha iyi olduğu gösterilmiştir. Asfalt betonunda en etkili çelik cürufu hacminin hacimce %60 olduğu belirlenmiştir. Termal iletkenlik asfalt betonunun kar eritme verimliliği, bir elektrik-termal sistem kullanılarak iyileştirilebilir. Deneysel çalışmalar sonucunda, doğal kaynak sıkıntısının azaltılmasının sağlanacağına ve kaplamaların sıcaklık dağılımının iyileştirileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

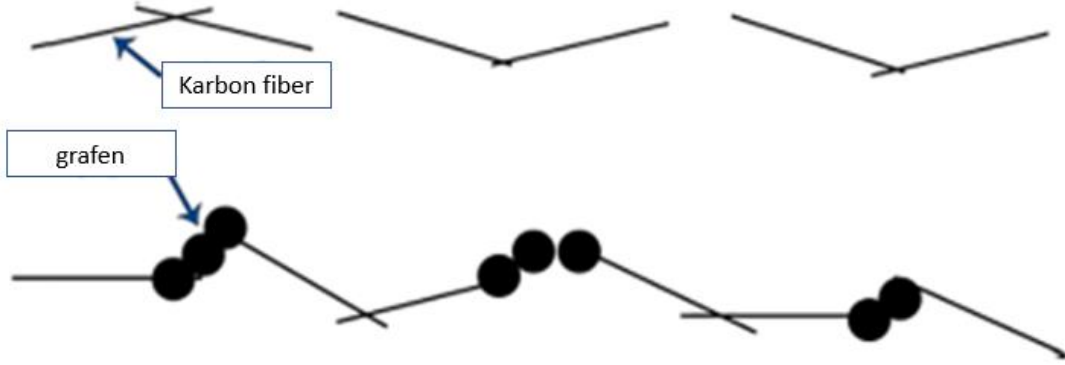
Wang vd. (2021), grafen ile düşük dirençli, elektriksel olarak iletken bir asfalt betonu üretmeyi ve yol bakım problemini hafifletmek için kaplamalarda buzlanma önlemeyi veya İAB'nin kendi kendini iyileştirmesini amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda, asfalt karışımlarına grafen ve karbon lifi eklenmiştir. Çalışmada kullanılan geleneksel asfalt bağlayıcı AH-90'dır. Bitüm, iki fazlı elektriksel olarak iletken asfalt karışımları üretmek için grafen ve karbon lifi ile modifiye edilmiştir. Grafen, genel iletim yolunda tamamlayıcı bir rol oynamıştır. Grafenin asfalttaki dağılımı floresan mikroskobu ile gözlemlenebilir. Aynı zamanda iletken asfalt mastiğinin hazırlanması ve iletken asfalt betonunun karıştırılma yöntemi de incelenmiştir. Grafenin bitümün kayma deformasyon direnci ve sürünme performansı üzerindeki etkisini test etmek için DSR deneyi kullanılmıştır. Uygun derecelendirmeyi elde etmek ve İAB'nin mevcut yoğunluk dağılımını analiz etmek için CT görüntüleri sonlu elemanlar programı ile incelenmiştir. Asfalt karışımın öz direnci ve ısı iletkenlik katsayısı ölçülerek optimum iletken içeriği belirlenmiştir. Gerilmenin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisini değerlendirmek için basınca duyarlı özellikler de araştırılmıştır. Sonuçlara dayanarak, Asfalt karışımlarda optimum iletken içeriği sırasıyla %0,2 karbon lifi ve %1,5 grafen olarak bulunmuştur. Test sonuçlarına göre, grafen ilavesi ile asfalt karışımların öz direnci azalmıştır. İletken yoldaki boşluk, iletken yolları genişletmek için grafen parçacıkları tarafından doldurulmuştur. Grafen ilavesinin asfalt karışımın öz direncini azalttığı ve termal iletkenliğini iyileştirdiği belirlenmiştir.



Şekil 2.10 İletken asfalt betonunda akım yoğunluğu dağılımının CT görüntüsü (Wang vd. 2021).



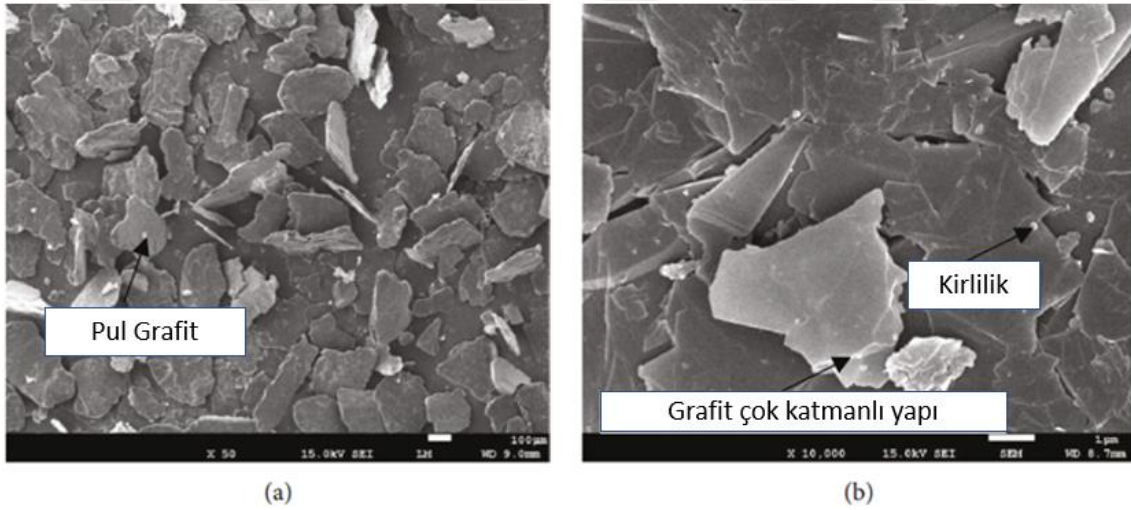
Şekil 2.11 Grafen içeren bitüm FM, a) %0.5, b) %1.0, c) %1.5, d) %2.0 (Wang vd. 2021).



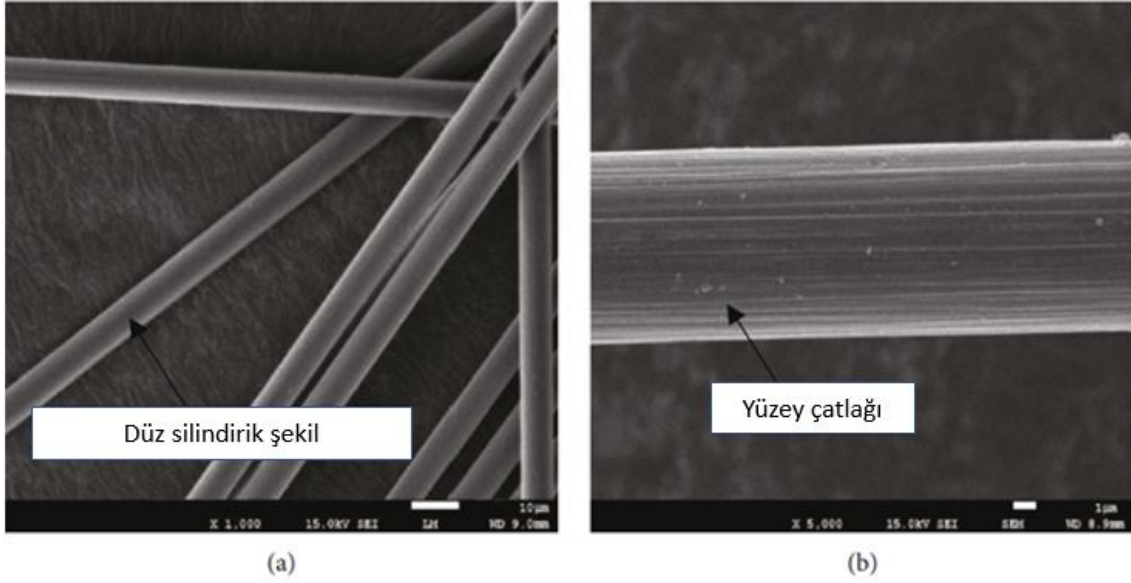
Şekil 2.12 İletken ortamın iletken mekanizma şeması (Wu vd. 2005).

Li vd. (2022), çalışmalarında çelik köprü döşemesi üzerine dökülen asfalt betonunun buz ve karın aktif bir şekilde erimesini gerçekleştirmek için, dökülen iletken asfalt betonu CGA-10'u hazırlamak için iletken malzeme olarak grafit ve karbon lifi kullanmışlardır. Çelik köprü tabliye döşemesinin aktif buz-kar eritme amacına ulaşmak ve buz-kar eritme verimliliğini artırmak için, bu çalışmada elektriksel özdirenç testi ve kaplama performans testi için farklı iletken malzeme içeriğine sahip dokuz adet İAB üretilmiştir. Numunelerde Bitüm olarak 33,1 penetrasyon (25°C'de 0,1 mm, 100 g ve 5 s), 83,6°C yumuşama noktası ve 31 cm süneklik (10°C'de 5 cm/dk) özelliklere sahip SBS modifiye bitüm kullanılmıştır. Agrega içeriği olarak iri ve ince agrega bazalt, filler ise kireçtaşından oluşmaktadır. İletken malzemeler yüksek karbon içerikli pullu grafit ve yaklaşık 9 mm'lik kısa kesilmiş karbon liflerden oluşmaktadır. İletken faz malzemesi içeriğinin dökülen iletken asfalt

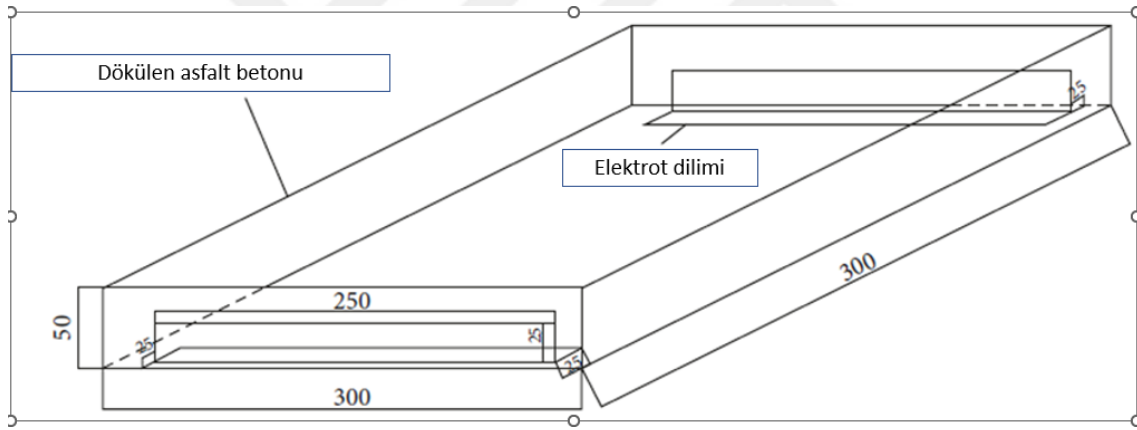
betonunun elektriksel özdirenç değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İletken malzemelerin etkisi ve içeriği, dökülen iletken asfalt betonunun  st yapı performansı üzerinde analiz edilmiştir. Hazırlanan İAB'nin ısıtma etkisi incelenmiştir. Dökülen iletken asfalt betonunun buz eritme verimliliği ise i  mekân buz çözme testi ile değerlendirilmiştir. Son olarak, mikroyapı  zellikleri SEM ile analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar; %0,4 karbon lifi + %30 grafit kullanımı ile, hazırlanan İAB numunelerinde iyi bir iletken ağ oluşturabileceğini göstermiştir. Karbon lifi, hazırlanan İAB'nin  st yapı performansı üzerindeki grafitin olumsuz etkisini telafi edebileceği sonucuna varılmıştır. %0,4 karbon lifi + %30 grafit ile üretilen İAB'nin ısıtma verimi %78,85'e, buz eritme verimi %50.03'e ulaşmıştır.



şekil 2.13 Grafit morfolojisi, a) 50 kez büyütülmüş genel morfoloji, b) 5000 kez büyütülmüş yerel morfoloji (Li vd. 2022).



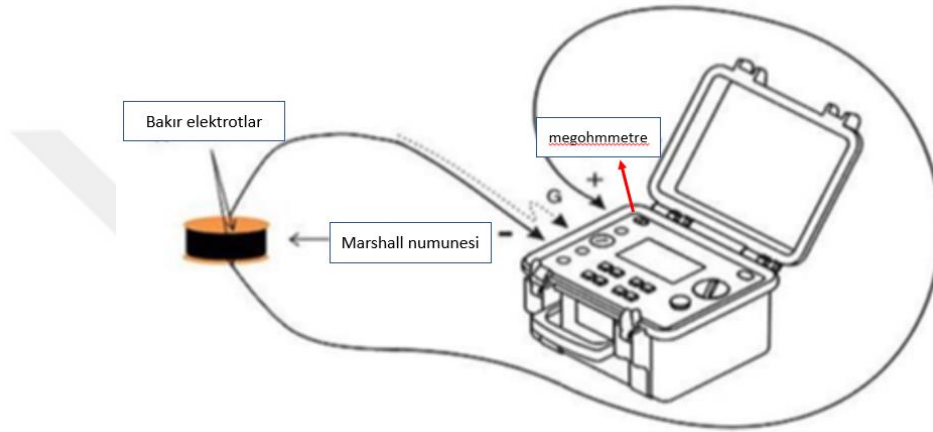
Şekil 2.14 Karbon fiber form, a) 1000 kez büyütülmüş genel morfoloji, b) 5000 kez büyütülmüş yerel morfoloji (Li vd. 2022).



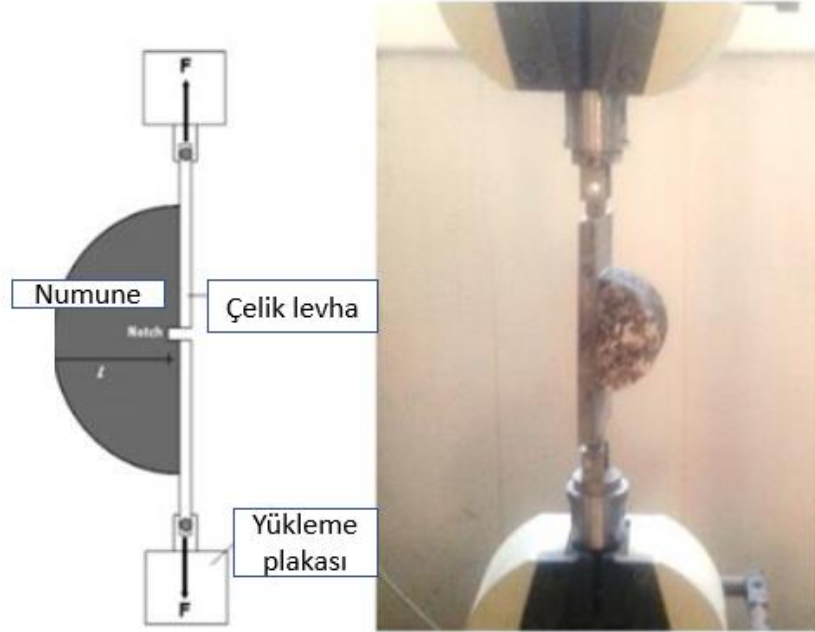
Şekil 2.15 Elektrik özdirenç testi için numune (Li vd. 2022).

Zadri vd. (2022), Asfalt karışımlarına, artan trafik ve daha sert iklim koşullarına karşı direnç özelliklerini geliştirmek amacıyla çok sayıda katkı maddesi katılmaktadır. Bu, daha uzun bir kullanım süresi için iyi konforu garanti edecektir. Bu çalışmada, geleneksel olmayan bir katkı maddesi olarak grafit tozu kullanılmış ve daha sonra, iletken asfalt ($10^6 \Omega \text{ m}$ civarında bir özdirenç ile) çalışmaları elektriksel özdirenç üzerindeki etkisini ve bunun yanı sıra mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 0/14 asfalt betonu numuneleri, Marshall'ın elektrik özdirenç ölçümleri yöntemi ve Fenix doğrudan çekme deneyi izlenerek hazırlanmıştır. Granüler iskelet 0/3, 3/8 ve 8/15 ezilmiş granüler fraksiyonlar içerir. Kullanılan hidrokarbon bağlayıcı, TBA sıcaklığı 52°C ve penetrabilite

41 ve yoğunluğu 1.3 g/cm^3 olan 40/50 saf bitümdür. Katkı maddesi olarak, 1.4Ω elektrik direncine sahip 1.80 g/cm^3 yoğunluğa sahip grafit kullanılmıştır. Mekanik, özellikler harcanan enerji hakkında önemli fikir veren yeni Fenix doğrudan çekme deneyi kullanılarak değerlendirilmiştir. $1,7 \times 10^6 \Omega \text{ m'ye}$ ulaşarak öz direnç azalmasında önemli bir gelişme ve ayrıca yayılan enerjinin değişimine bağlı olarak çatlamaya karşı daha fazla direnç fark edilmiştir. Sonuç olarak, asfalt betonunda uygun miktarda grafit tozunun hem mekanik hem de elektriksel özellikleri iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.



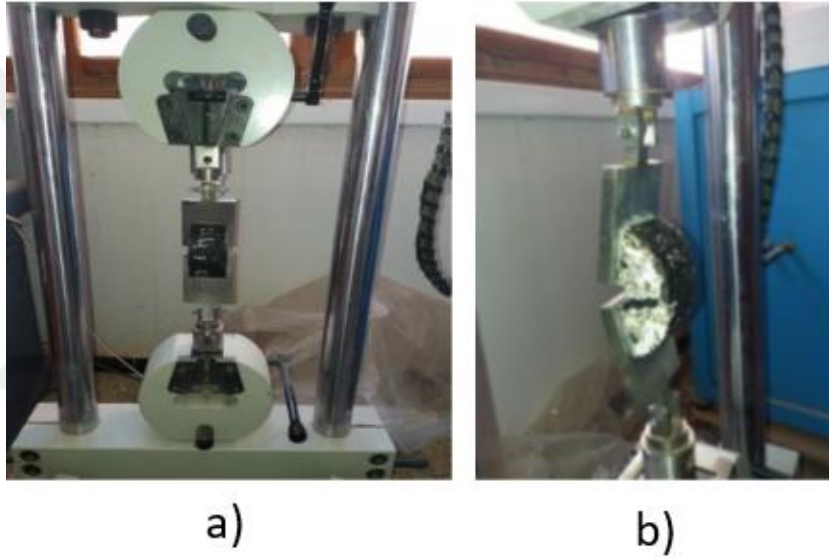
Şekil 2.16 Megohmmetre ile elektriksel öz direnç ölçümü (Zadri vd. 2022).



Şekil 2.17 Fenix Deneyi (Zadri vd. 2022).

Messaoud vd. (2022), İAB, kar ve buzdan kurtulmak için yolları ısıtmak ve otomatik algılama, otomatik kütleme ve enerji geri kazanımı sağlamak gibi farklı ve çok işlevli uygulamaları karşılayabilir. Bu çalışma, çelik lifler ve grafit tozu gibi katkı maddeleri ile asfalt betonunun performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu araştırmada, çelik elyaf ve grafit tozunun asfalt betonunun mekanik davranışı ve elektriksel iletkenliği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda mekanik ve elektriksel özellikler arasında bir korelasyon oluşturulmuştur. İAB performansı, Fénix doğrudan çekme deneyi ve elektriksel özdirenç ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Deneyler 6 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında silindirik kalıplar kullanılarak yapılmıştır. Bağlayıcı, agrega, çelik lifler veya grafit tozu 150 °C'de 2 saat ısıtılmıştır. Aynı anda karıştırıcının ısıtılmış kabına konulmuş ve çelik lifler/grafit tozu ve agrega homojen bir şekilde dağılına ve bağlayıcı tarafından tamamen kaplanana kadar karıştırılmıştır. Karışım, sıkıştırma kalıplarında her iki tarafa 50 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Numuneler kalıplardan alınmış ve deneyler yapılmadan 24 saat önce laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir. Numunelerin çap ve yükseklikleri şartlandırma sıcaklığında ölçülmüştür. Fénix doğrudan çekme testinin deney kalıpları, asfalt hacminde 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve %30 grafit tozu ve karışım ağırlığında %0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1 ve 1,2 çelik lif içermektedir. Dört kez Fénix testi ve üç kez elektriksel özdirenç deneyi yapıldığı göz önüne alındığında, çelik lifli asfalt betonu için 40 ve grafit tozlu asfalt betonu için 30 numune olmak üzere toplamda 70 adet numune üretilmiştir. Çelik liflerinin ve grafit tozu hacim miktarlarının asfalt betonunun mekanik davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için (24 °C'de gerçekleştirilen) doğrudan çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler Finex aparatı kullanılarak yapılmıştır. Marshall deney kalıpları 6 mm farkla ikiye bölünerek Fenix plakalarına sabitlenmiştir. Sabit hızla (1 mm/dk) bir hareket uygulamak şartıyla çekme kuvveti ve dikey hareket bir veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Asfalt betonunun elektriksel iletkenliği, çelik lifler veya grafit eklenerek iyileştirilebilir. Çelik lifli iletken asfalt betonunun elektriksel özdirencinin ölçümünde sızma eşiğine ulaşılmıştır. Grafit tozu durumunda, asfalt betonu sızma eşiğine ulaşmadığından iletken özellik göstermemiştir. Grafit tozu $2.15 \times 10^5 \Omega.m$ yerine $5.06 \times 10^2 \Omega.m$ çelik liflerle istenilen iletkenliğe ulaşmak çok daha verimli olduğu bulunmuştur. %1 çelik lifi içerikli asfalt betonu iletken yapılmış ve asfalt betonu çekme mukavemetini, harcanan enerjiyi ve süneklik modülünü geliştirmek için verimli bir araç olarak

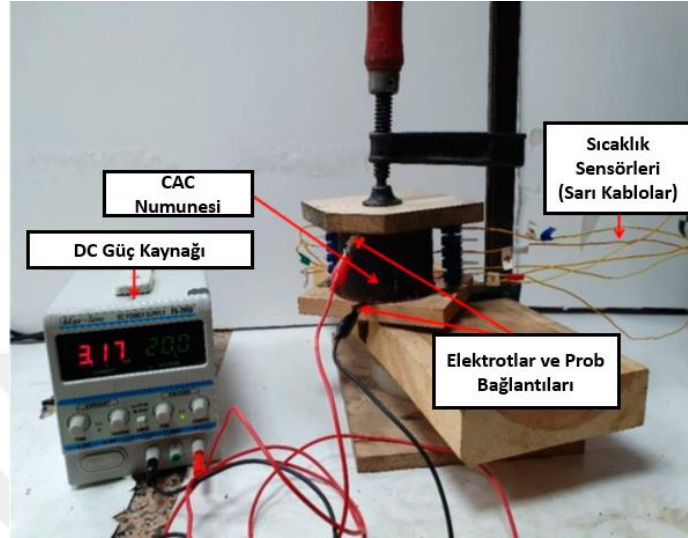
kullanılmıştır. Artan grafit yüzdesi ile doğrudan çekme mukavemeti ve dağılan enerji artmış, ancak süneklik modülü azalmıştır. Çelik lifler ve grafit tozu gibi katkı maddeleri, yüksek düzeyde harcanan enerji ile gösterilen asfalt betonunun çatlama direncini arttırmıştır. Asfalt betondaki çelik lifler, mekanik ve elektriksel performans açısından iyi bir davranış sergilemiştir. Grafit tozlu asfalt betonu, mekanik özelliklerin artırılması için bir avantaj olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak bu katkı maddesi %35 oranında İAB yapmaya uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Yazarlar, gelecekteki araştırmalarda çelik lifleri ve grafiti birleştiren ve asfalt betonunun elektriksel ve mekanik özelliklerini iyileştirebilecek bir iletken üzerinde çalışmayı düşünmektedirler.



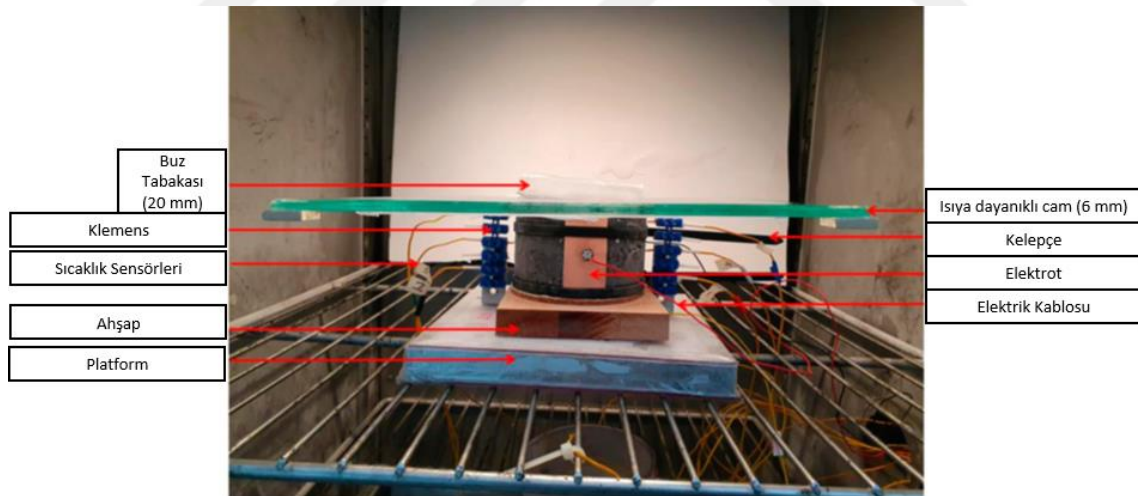
Şekil 2.18 Fénix deneyi, a) Fénix cihazı, b) Fénix doğrudan çekme deneyi (Messaoud vd. 2022).

Gürer vd. (2022), çalışmalarında asfalt betonunun iletkenliğini ve mekanik özelliklerini artırarak akıllı bir buzlanma önleme sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. İki farklı iletken asfalt serisi üretilmiştir. Seri 1, %3 stiren bütadien stiren (SBS) blok kopolimeri ile modifiye edilmiş bir bağlayıcı kullanılmış ve Seri 2, hem %3 SBS hem de %14 karbon tozu (CB) ile modifiye edilmiş bir bağlayıcı kullanılmıştır. Her iki seride de kuru karışıma ağırlıkça %0,3 karbon lifi (CF) ilave edilmiştir. Termal dağılma durumu, buz eritme performansı, donma ve elektriksel iletkenlik ısıtma döngüsü testleri yapılmıştır. CAC numunelerinin uzun vadeli mekanik ve iletkenlik performansları döngü öncesi ve sonrası deneylerle değerlendirilmiştir. İletkenliği ve mekanik özellikleri dikkate alınarak geliştirilen CAC, akıllı buzlanma önleme sistemi ile entegre edilmiştir. Geleneksel asfalt

betonu ve CAC'yi değerlendirmek için karřılařtırılmalđ bir maliyet analizi de yapılmıştır. Bağlayıcı fazın karışımının iletkenliğine katkıda bulunduğu bulunmuştur. Bu tür sistemler Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS) ile entegre edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 2.19 Elektrikli ısıtma deney düzeneği (Gürer vd. 2022).



Şekil 2.20 Buz eritme deneyi için kurulan şartlandırma kabininin içi (Gürer vd. 2022).

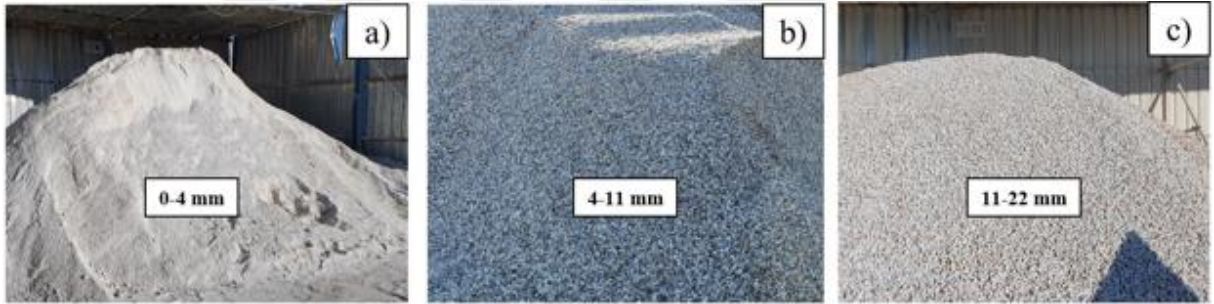
Yapılan literatür taramasında görüldüğü üzere bu konu ile ilgili çalışmaların yoğun bir şekilde hala devam ettiği görülmektedir. Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak bitüme iletken bileşenler eklenmesi ve hibrit agrega (bazalt ve kireçtaşı) kullanımı ile İAB numunelerindeki mekanik ve iletkenlik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

3.1.1 Agregas

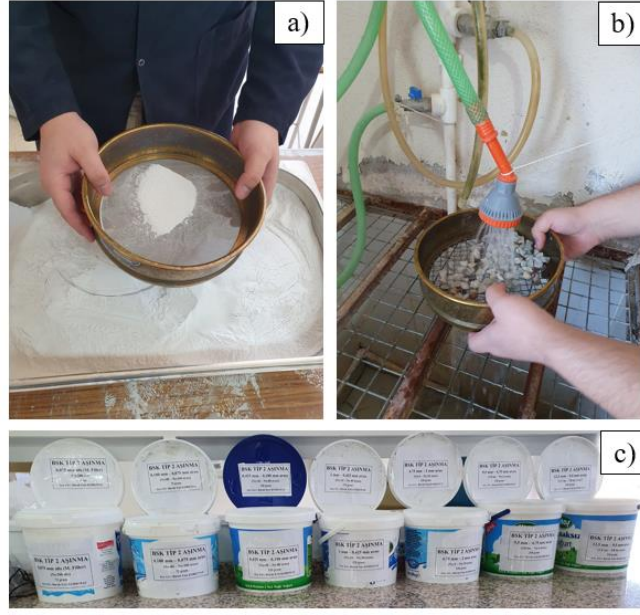
Çalışmada iri agregas olarak bazalt, ince agregas olarak kireç taşı kullanılmıştır. Agregas boyutları 0-4 mm, 4-11 mm ve 11-22 mm olup, Kireçtaşı kökenli agregalar KOLSAN firmasından, bazalt agregaları Afyonkarahisar Belediyesinden temin edilmiştir. (Resim 3.1). Temin edilen agregalar Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) yer alan BSK Tip 2 aşınma tabakası gradasyon sınırları arasında (Çizelge 3.1) kalacak şekilde elenip yıkandıktan sonra etüv içerisinde kurutulmuştur (Resim 3.2). Bazalt ve kireçtaşı agregasının fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.1 Bazalt ve kireçtaşı agregası, a) 0-4 mm. b) 4-11 mm. C) 11-22 mm.

Çizelge 3.1 BSK tip 2 aşınma tabakası gradasyonu.

Agrega Tipi	Elek çapı (in, No)	Elek boyutu (mm)	Geçen (%)	Şartname Sınırları	
				Min.	Max.
Bazalt	1/2"	12,5	100	100	100
	3/8 "	9,5	90	80	100
	No.4	4,75	63,5	55	72
Kireçtaşı	No.10	2,00	44,5	36	53
	No.40	0,425	22	16	28
	No.80	0,180	12	8	16
	No.200	0,075	6	4	8



Resim 3.2 Agregaların şartnameye göre hazırlanma aşamaları, a) Elek ile eleme işlemi, b) Agregaların yıkanma işlemi, c) Etüvde kurutma işleminden sonra agregaların uygun kaplara konulması.

Çizelge 3.2 Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Agrega	Özgöl Ağırlık ve Su Emme Değerleri					Los Angeles Aşınma (%)
	Zahiri Özgöl Ağırlık	Hacim Özgöl Ağırlık	Yüzey Kuru Suya Doygun Özgöl Ağırlık	Efektif Özgöl Ağırlık	Su emme (%)	
Kireçtaşı	2,72	2,69	2,70	2,71	0,39	23,55
Bazalt	2,81	2,65	2,70	2,73	2,12	12,69

3.1.2 Bitüm

Bağlayıcı olarak Aliğa rafinerisinde üretilmiş B50/70 penetrasyon sınıfı bitüm, Afyonkarahisar Belediyesi asfalt şantiyesinden temin edilmiştir. Bitüm özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 B50/70 penetraston sınıfı bitümün özellikleri.

Özellikler	Birim	50/70	Standart
Penetrasyon (25 °C, 100g, 5 s)	0.1 mm	52,13	ASTM D5-06e1
Yumuşama Noktası (Yüzük ve Bilya)	°C	46,65	ASTM D36/D36M-09
Viskozite 135 °C	cP	495,00	ASTM D4402-06
Viskozite 165 °C	cP	131,00	

3.1.3 Karbon Tozu (KT)

Bitüme katılacak karbon tozu ise ÖZERBAND Afyon konveyör band fabrikasından temin edilmiştir (Resim 3.3). Karbon özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.



Resim 3.3 Karbon Tozu.

Çizelge 3.4 Karbon Tozunun özellikleri

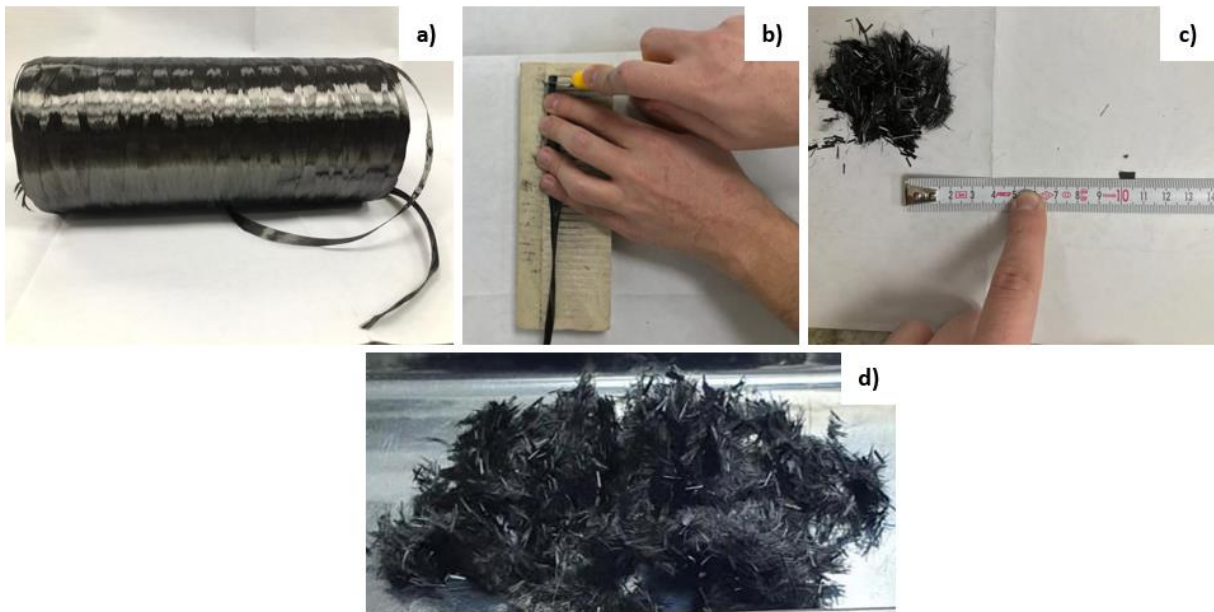
Özellik	Değer
Karbon Tozu Zahirî Özgül Ağırlık	2,930
BET Yüzey Alanı (m ² /gr)	87,1492

3.1.4 Karbon Lifi (KL)

BSK numuneleri için iletken bileşen olarak karışıma katılacak karbon lifi Yalova'da DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler San. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Karbon lifinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’te gösterilmiştir. Rulo halinde temin edilen karbon lifinin uzunluğu 5 mm olacak şekilde kesme işlemi yapılmış ve karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılması için saç teli haline gelecek şekilde ayıklanmıştır (Resim 3.4).

Çizelge 3.5 Karbon lifinin fiziksel özellikleri (İnt. Kyn. 3).

Özellikler	Değerler
Karbon (%)	≥ 94
Erime sıcaklığı (°C)	$\geq 1,000$
Hacimsel direnç ($\mu\Omega \cdot m$)	17.2
Çap (μm)	7.2
Nem içeriği (%)	0
Yoğunluk (g/cm^3)	1.8
Young modülü (GPa)	228
Çekme mukavemeti (GPa)	3.8

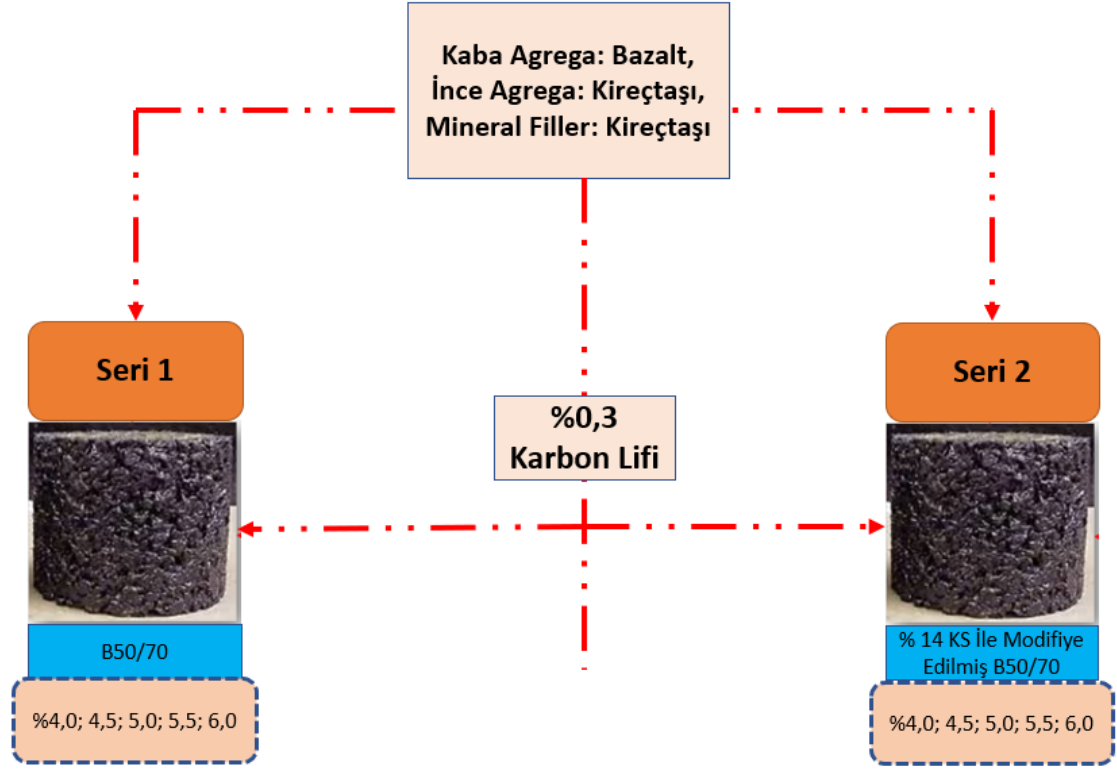


Resim 3.4 Karbon lifi, a) Rulo halinde karbon lifi, b) Karbon lifi kesme işlemi, c) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon lifi, d) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon liflerinin saç teli haline getirilmesi.

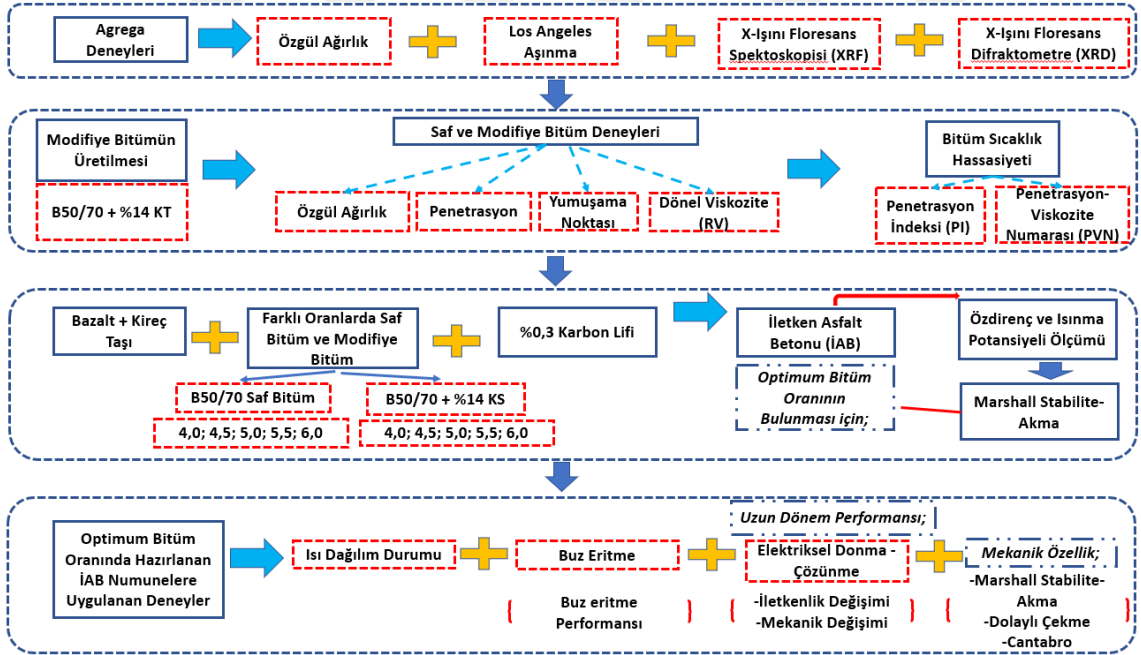
3.2 Yöntem

Agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için Özgül ağırlık, Los Angeles Aşınma, X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) ve X-Işını Difraktometre (XRD) deneyleri yapılmıştır. B50/70 penetrasyon sınıfı bitüm Gürer vd. (2020), yaptıkları ön çalışma sonuçlarına göre ağırlıkça (%14) karbon Tozu (KT) katılarak modifiye edilmiştir. Hazırlanan %14 Karbon Tozu modifiye bitüm ile B50/70 Saf bitüm numunelerine özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri

uygulanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen değerler ile Penetrasyon indeksi (PI) ve Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN) hesaplanmıştır. Asfalt karışımı aşamasında karışıma kuru yöntem ile katılmak üzere 5 mm uzunluğunda, ağırlıkça %0.3 oranlarında karbon lifi (KL) hazırlanmıştır. B50/70 bitüm + %0,3 KL (Seri 1) ve B50/70 KT’li modifiye bitüm + %0,3 KL (Seri 2) olmak üzere Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) bitümlü sıcak karışım (BSK) tip 2 aşınma tabakasına göre iki farklı karışım dizaynı hazırlanmıştır (Şekil 3.1). Farklı bitüm oranlarında hazırlanan İAB numuneleri oda sıcaklığı koşullarında 10 dakikalık elektriksel ısıtmaya maruz bırakılarak ısınma potansiyeli ve öz direnç değişimi değerlendirilmiştir. Marshall yöntemi ile hazırlanan İAB numunelerinin optimum bitüm oranını belirlemek için Marshall Stabilitate-Akma deneyi uygulanmıştır. Belirlenen optimum bitüm oranına sahip İAB Marshall numuneleri bundan sonraki yapılacak olan deneylerde kullanılmak üzere iki farklı seri için toplamda 30 adet üretilmiştir. Üretilen İAB Marshall numuneleri oda sıcaklığında 10 dakikalık elektriksel ısıtmaya maruz bırakılarak termal kamera ile ısı dağılım durumu gözlenmiştir. Hazırlanan özel bir deney düzeneği ile, İAB Marshall numuneleri üzerinde 20 mm buz kütlesi oluşturularak elektriksel iletkenlikle buz eritme süreci sabit kamera yardımıyla kayıt altına alınmış ve numunenin farklı noktalardaki yüzey sıcaklık değişimleri sıcaklık sensörü yardımıyla tespit edilmiştir. İAB numunelerini uzun dönem performans açısından değerlendirmek için aynı düzeneğe donma-elektriksel iletkenlikle çözündürme çevrimine maruz bırakılarak hem iletkenlik hem de mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. İletkenlik özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin öz direnç ve ısınma potansiyelleri ölçülmüştür. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ise numunelere dolaylı çekme (rijitlik) ve Marshall stabilite deneyleri uygulanmıştır. Son olarak İAB numunelerinin sökülme eğilimini anlayabilmek için Cantabro deneyi yapılmıştır. Tez çalışmasının yöntem akış şeması Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Seri 1 ve Seri 2’de kullanılan malzeme ve oranları.



Şekil 3.2 Tez yöntem akış şeması.

3.2.1 Agrega Deneyleri

3.2.1.1 Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi

a) Kaba Agrega

ASTM C 127-12 (2001), metodu kullanılarak kaba agrega özgül ağırlığı belirlenecek ve İAB Marshall dizaynlarında hesaplamalar için kullanılacaktır.

b) İnce Agrega

ASTM C 128 (2001), metodu kullanılarak ince agrega özgül ağırlıkları belirlenecek ve İAB Marshall dizaynlarında hesaplamalar için kullanılacaktır.

c) Mineral Filler

ASTM C128-01 (2001), metodu kullanılarak mineral filler malzemesinin zahiri özgül ağırlığını belirlenecek ve İAB Marshall dizaynlarında hesaplamalar için kullanılacaktır.

3.2.1.2. Los Angeles Aşınma Deneyi

İAB Marshall dizaynlarında kullanılacak agregaların aşınma değerleri standart Los Angeles aşınma deneyi ile belirlenecektir (ASTM C131-01 2001). Bu deney metodu alt temel, temel vb. üstyapı tabakalarında kullanılan iri agreganın parçalanmaya karşı dirençlerinin belirlenmesini kapsar.

3.2.1.3. X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi

XRF ile çalışmada kullanılan bazalt ve kireçtaşı agregasının yarı kantitatif (SQX) analiz ile içeriğinin belirlenmesi ve kantitatif analiz ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bir XRF spektrometresinde; kalitatif, yarı-kantitatif ve kantitatif olarak analizler gerçekleştirilebilir. Kalitatif analiz, bir numunenin içerisindeki bileşenleri belirlemek için yapılır. Kantitatif analiz ise, numunedeki bileşenleri konsantrasyonlarını tanımlamak için gerçekleştirilir. Yarı-kantitatif analiz (SQX), temel parametreler yöntemini kullanarak

herhangi bir standart numune takımı olmaksızın teorik olarak şiddetlerin hesaplanmasını sağlayan bir programdır. Standart numune takımı mevcut olmadığından dolayı, hassasiyeti ve doğruluğu verimli olmayan bir analiz yöntemidir. Kantitatif analiz; analit (numunede analiz edilecek olan bileşim) konsantrasyonu, genel olarak tam bir şekilde ölçülerek, kesin ve özenli bir şekilde düzelterek veren yöntemdir. Kantitatif metotlar matris etkisini göz önüne alarak geliştirilmiştir. Bir numunede analiz edilen element dışında kalan kısma (diğer elementlere) matris denir. Numune matrisindeki elementler tayin edilecek elementin karakteristik X-ışını şiddetine artırıcı ve azaltıcı yönde etki (Enhancement and Absorption Effect) yaparlar. Bu durum matris etkisi olarak adlandırılır. Matris etkisi; çalışma eğrisinde sapmalara, bundan dolayı da analiz sonuçlarında yanılırlara sebep olur. Matris etkisinden ileri gelen yanılırları minimize etmek için kullanılan kantitatif yöntemler şu şekilde sınıflandırılır: Standart ekleme-çıkarma yöntemi, ince film yöntemi, matris seyreltme yöntemi, karşılaştırma standart yöntemi, iç standardizasyon yöntemi, saçılan X-ışınlarıyla birlikte standardizasyon yöntemi, deneysel düzeltme ve matematiksel düzeltme yöntemleridir (Küçük vd. 2017).

3.2.1.4 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi

X-Işını kırınım (XRD) analizi, her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım cihazıyla kayaların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir (İnt. Kyn. 4). Çalışmada kullanılan bazalt ve kireçtaşı agrega numunelerinin XRD analizleri AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Modifiye Bitümün Hazırlanması

İAB dizaynlarında Seri 2 dizaynındaki numunelerde kullanılmak üzere B50/70 bitümü %14 KT ile modifiye edilerek modifiye bitüm üretilmiştir.

3.2.2.1 Karbon Tozu Katkılı Modifiye Bitümün Üretilmesi

Literatürde belirtilen katkı oranları, karıştırma hızı, sıcaklığı ve süresi dikkate alınarak karıştırma prosesi oluşturulmuştur (Çizelge 3.6). B50/70 penetrasyon sınıfı bitüme ağırlıkça %14 katkı oranında karbon tozu (KT) katılarak modifiye bitüm hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler üzerinde penetrasyon, yumuşama ve viskozite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen değerlerden penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite numarası (PVN) hesaplanmıştır.

Çizelge 3.6 KT katkılı modifiye bitüm reçetesi.

Modifiye Bitüm Çeşitleri / Değişkenler	KT Modifiye Bitüm
Bitüm Sınıfı =	50/70
Katkı =	Karbon Tozu (KT)
Katkı oranları (%) =	14
Bitüm miktarı (gr)	400
Bitüm Etüv Sıcaklığı (°C) =	180
Karıştırma Sıcaklığı (°C) =	180
Karıştırma Hızı (devir/dakika) =	1800
Karıştırma Süresi (dakika) =	120 dakika

Not:

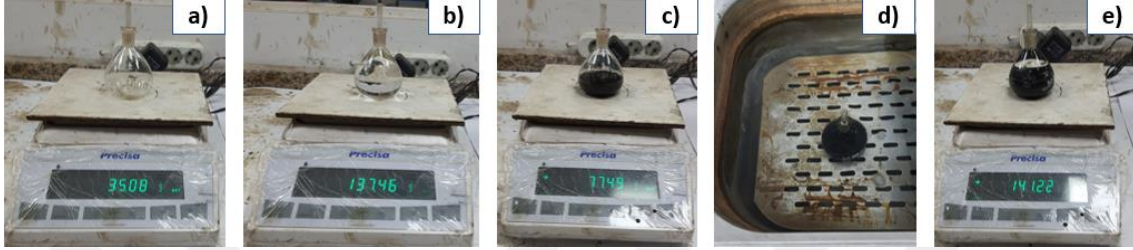
- 1) 15 dakika ara ile 8 aşamalı olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir.
- 2) Karışım işleminden sonra 100±5 °C etüvde 20 dakika dinlendirilmiştir.

3.2.3 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerine Uygulanan Deneyler

İAB dizaynlarında kullanılacak olan saf bitüm ve %14 Karbon Tozu ile modifiye edilmiş bitüme penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite (RV) deneyi yapılmıştır.

3.2.3.1 Bitüm Özgöl Ağırlık Deneyi

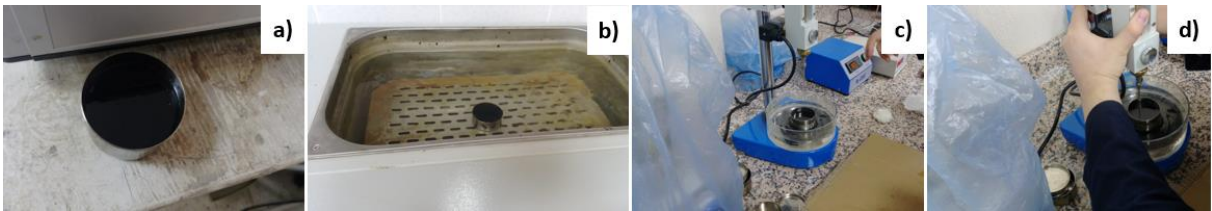
Bitümün özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmaktadır (ASTM T D70-03 2003). İAB dizayn hesaplamalarında kullanılacaktır. Deney aşamaları Resim 3.5’da gösterilmiştir.



Resim 3.5 Bitüm özgül ağırlık deneyi aşamaları, a) Boş piknometrenin tartılması, b) Piknometre+suyun tartılması, c) Piknometre+bitümün tartılması, d) Piknometre+bitüm+suyun 25 °C'deki su banyosunda 30 dakika bekletilmesi, e) Piknometre+bitüm+suyun tartılması.

3.2.3.2 Penetrasyon Deneyi

Standart uçlu iğnenin, belirli bir yük altında belirli bir süre ile 25 °C sıcaklıkta düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarı belirlenerek, bitümün kıvamlılığının tespit edilmesi amacı ile yapılır (ASTM D5-06e1 2006). Deney aşamaları Resim 3.6 ‘de verilmiştir.



Resim 3.6 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları, a) Numunenin kaba dökülüp oda koşullarında bekletilmesi, b) Numunenin su banyosuna konulması, c-d) Numunenin cihazına yerleştirilmesi ve iğne ayarlamasının yapılması.

3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi

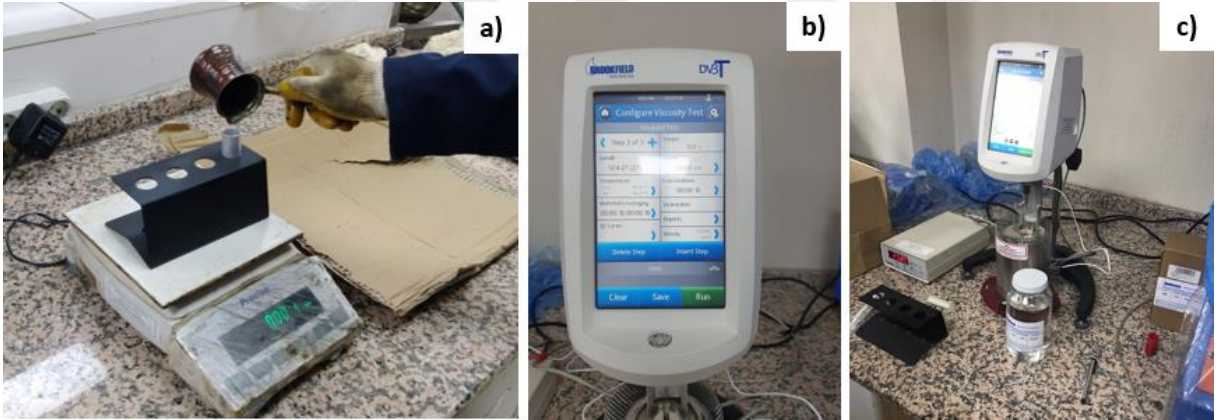
Bitümün viskoz halden akışkan hale geçtiği sıcaklık noktasını belirlemek amacı ile yapılmaktadır (ASTM D 36-06 2006). Deney aşamaları Resim 3.7’de verilmiştir.



Resim 3.7 Bitüm yumuşama noktası deneyi aşamaları, a) Deneyde kullanılacak alet ve aparatlar, b) Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) Yüzüklerin cihaza yerleştirilip deneyin başlatılması.

3.2.3.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Deneyinin amacı, uygulama esnasında asfalt karışımının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını belirlemektir (ASTM D4402-06 2006). Viskozite deney aşamaları Resim 3.8’de verilmiştir.

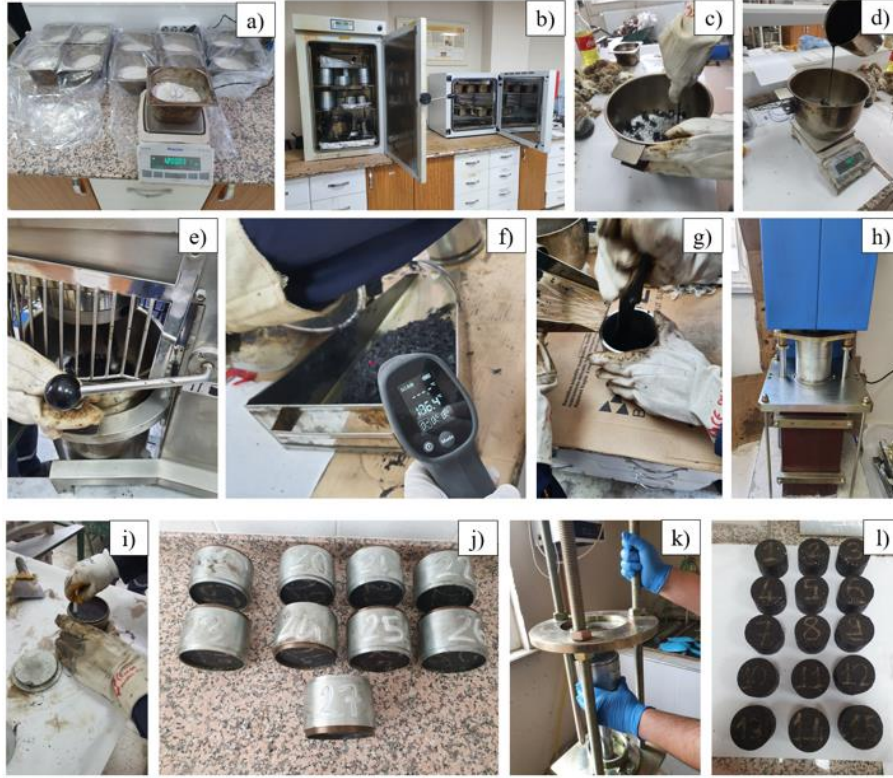


Resim 3.8 Bitüm viskozite deneyi aşamaları, a) Bitümün tüpe dökülmesi, b) Cihaz ekran ayarların yapılması, c) Numunenin cihazına yerleştirilip deneyin başlatılması.

3.2.4 İAB Numunelerinin Üretilmesi

Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) kısım 407 ve sayfa 407/2’de yer alan bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakasındaki agrega gradasyonlarına uygun olarak karışım serileri hazırlanmıştır. Her bir seri için farklı bitüm oranlarında Marshall numunesi üretilmiştir. Deneyler ASTM D 1559–89 (1992) göre gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki deneylere

optimum bitüm oranında hazırlanan numuneler üzerinde devam edilmiştir. İAB numune üretim aşamalarının adımları kısaca Resim 3.9’de verilmiştir.

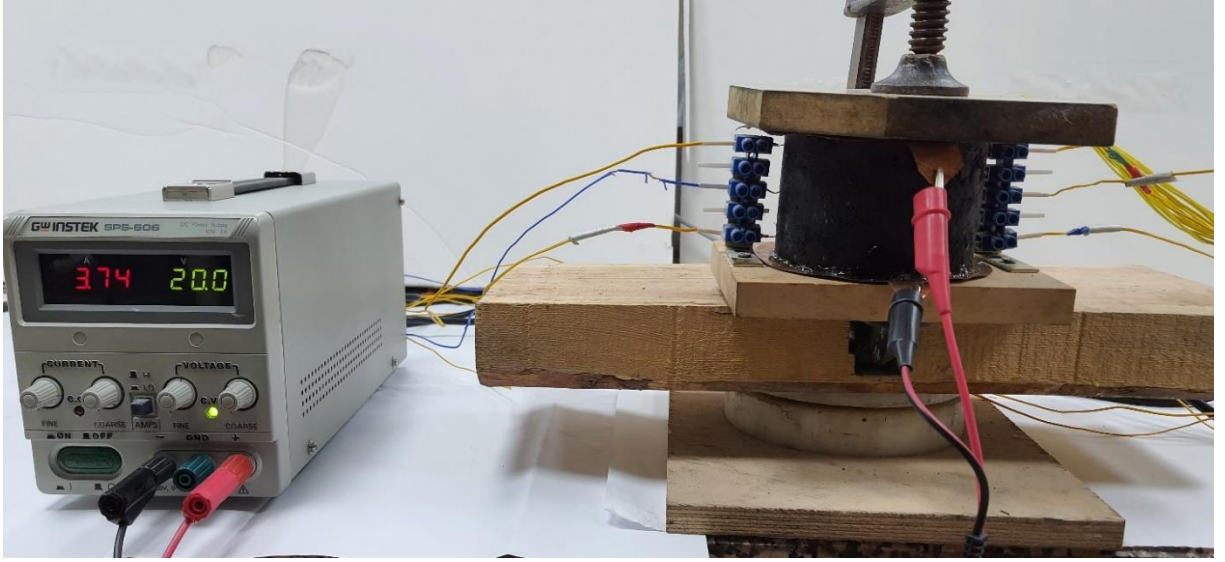


Resim 3.9 İAB numunelerinin üretim aşamaları, a) Agregaların beç karışımlarının hazırlanıp tepsilere konulması, b) Üretim aşamasında kullanılacak aparatların, bitüm, agrega ve lifin etüve konulması, c) Spatula yardımı ile agrega ve karbon lifin kuru yöntem ile karıştırılması, d) Bitümün mikser kabına dökülmesi, e) Uygun sıcaklıktaki mikser ile İAB karışımının karıştırılması, f) Lazer termometre ile sıcaklık ölçümü yapılması, g) Mikser içerisindeki karışımın kalıba dökülerek metal aparat ile şişleme işlemi, h) Marshall tokmağı ile numunenin her iki yönde sıkıştırılması, i) Numune yüzeyine tebeşir ile numune etiketinin yazılması, j) Numune streç film ile sarılıp uygun bir yerde oda sıcaklığında bırakılması, k) Numunelerin kriko ile kalıptan çıkarılması, l) Üretilen İAB numuneleri.

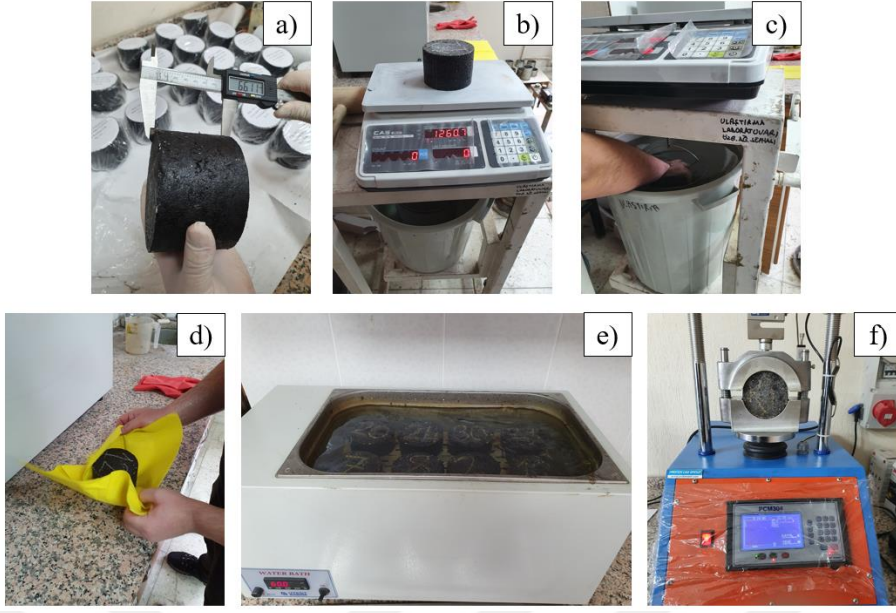
3.2.4.1 Üretilen İAB Numunelerinin Özdirencinin ve Isınma Potansiyelinin Ölçülmesi

Farklı bitüm oranlarında üretilmiş olan İAB numunelerinin özdirenc ve ısıtma potansiyelini ölçmek amacıyla düzenek kurulmuştur. Düzenekte numune yüzey sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla yüzeye temas ettirilen sıcaklık sensörlerinin, Keithley 2700 marka datalogger ile bağlantısı yapılmıştır. Datalogger KUSB-488B Keithley USB

bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanarak dataloggerın KickStartFL-BASE for all base apps of KickStart 2.0 Floating yazılım yardımıyla okunan sıcaklık verileri eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlamış ve böylelikle veriler dijital ortamda kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.3). Numuneler oda sıcaklığında DC güç kaynağı ile 20 voltluk sabit gerilim altında 2 prob yöntemi ile 10 dakikalık elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Elektrot ile numune yüzeyinin temasının düzgün bir şekilde sağlanması amacıyla iletken jel sürülmüştür. Deney başlangıç ve bitiş akım değerleri güç kaynağından okunarak numunelerin başlangıç ve bitiş öz direnç değerleri belirlenmiştir (Resim 3.10).



Resim 3.10 20 V sabit gerilim altında 2 prob yöntemi kullanılarak elektriksel ısıtma deneyi.



Resim 3.11 Marshall Stabilite ve Akma deneyi aşamaları, a) İAB numunelerinin kumpas ile farklı noktalardan yüksekliklerinin ölçümü, b) Numunenin havadaki ağırlığının tartılması, c) Numunenin Arşimet terazisi ile sudaki ağırlığının tartılması, d) Numunenin yüzey kuru suya doymun hale getirilmesi işlemi, e) Numunelerin 60 °C’de su banyosuna konulması, f) Numunenin Marshall cihazının yerleştirilerek deneyin başlatılması.

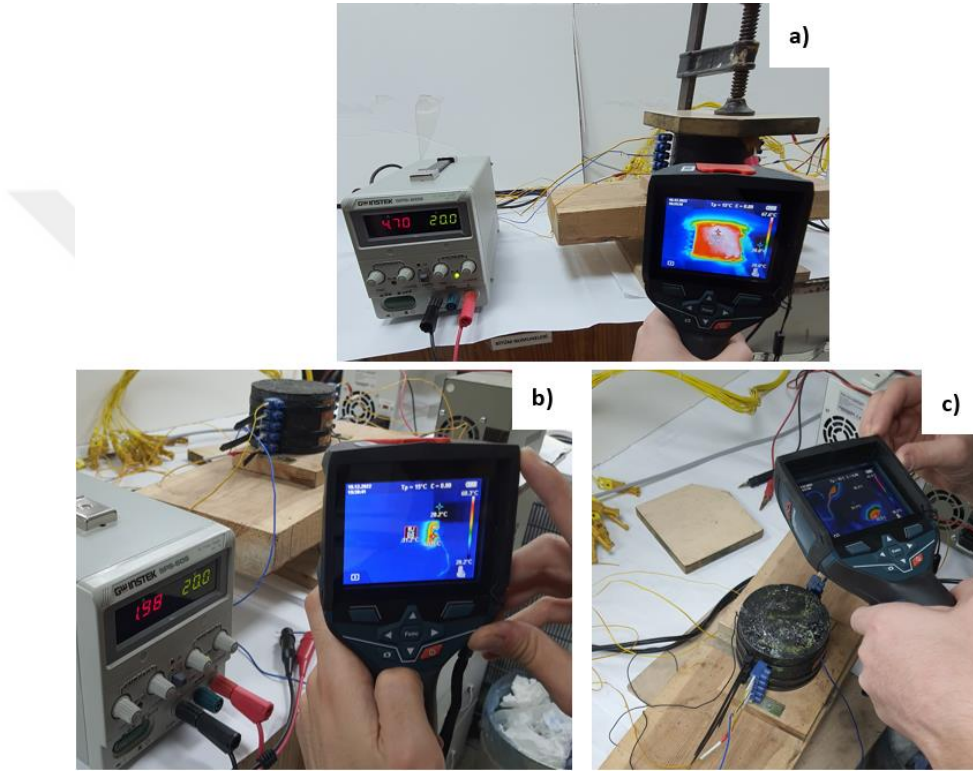
3.2.5 Optimum Bitüm Oranında Hazırlanan İAB Numunelerine Uygulanan Deneyler

Optimum bitüm yüzdesinde üretilen İAB numunelerine uygulanan deneyler;

1. Isıl dağılım durumunu belirlemek için 10 dakikalık elektriksel ısıtma deneyi,
2. Buz eritme performansını belirlemek için buz eritme deneyi,
3. Uzun dönem performansının değerlendirmek için donma-elektriksel iletkenlikle çözdürme sonrası iletkenlik ve mekanik özelliklerindeki değişim için Marshall Stabilite-Akma deneyi.
4. Mekanik özelliklerinin belirlenmesi için dolaylı çekme deneyi
5. Sökülme eğiliminin belirlenmesi için Cantabro deneyi

3.2.5.1 Isıl Dağılım Durumunun Belirlenmesi

İAB numunelerinin ısı dağılım durumunun gözlemlenebilmesi için 10 dakikalık elektriksel ısıtma yapılarak yüzeydeki ısı dağılım durumu termal kamera yardımı ile her 2 dakikada bir kayıt altına alınmıştır. Elektrotların iki farklı yerleştirme yerleştirilme duruma göre deney gerçekleştirilmiştir (Resim 3.12).

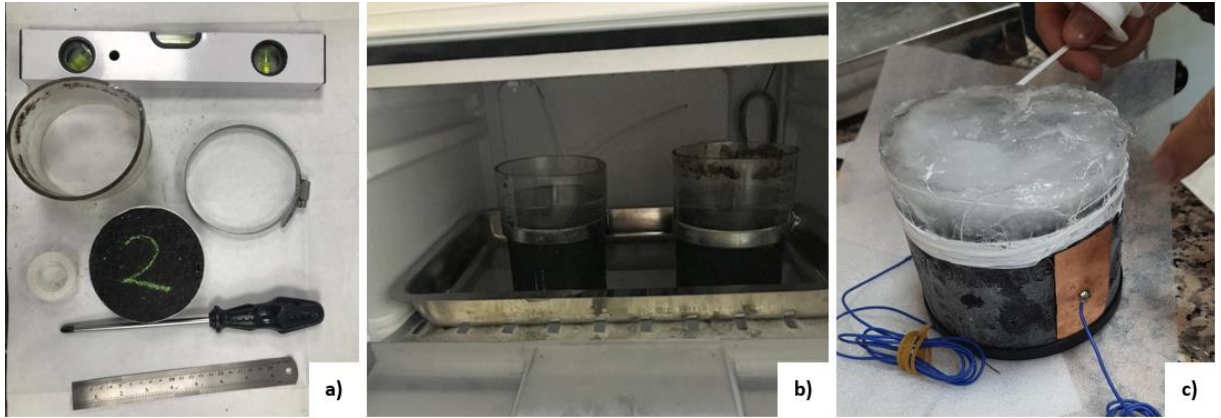


Resim 3.12 Numune yüzeyindeki ısı dağılımının termal kamera yardımıyla kayıtlarının alınması, a) Elektrotların üst ve alt yüzeylerine yerleştirilmesi durumu, b-c) Elektrotların karşılıklı yan yüzeylerine yerleştirilmesi durumu.

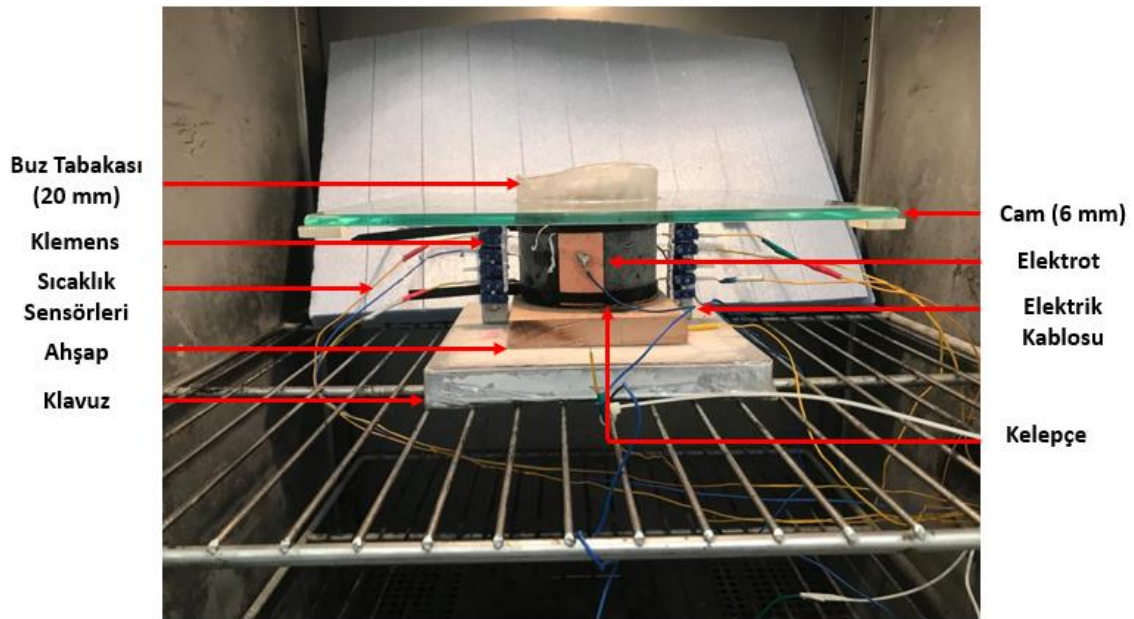
3.2.5.2 Buz Eritme Performansının Belirlenmesi

Her iki dizayn için optimum bitüm oranında hazırlanmış olan İAB Marshall numuneleri üzerinde, özel olarak hazırlanmış düzenek yardımıyla 20 mm kalınlığında buz kütlesi oluşturulmuştur (Resim 3.13). Deneyler saha uygulamalarına benzetimi yapıldığından dolayı elektrotlar numune yan yüzeylerine paralel olacak şekilde 3 x 6 cm boyutlarında kelepçe ile sıkılarak yerleştirilmiştir. Eriyen buzun elektrotlara temasının önlemek amacıyla numunenin üzerine şapka şeklinde yerleştirilmek üzere 6 mm kalınlığında, aşırı

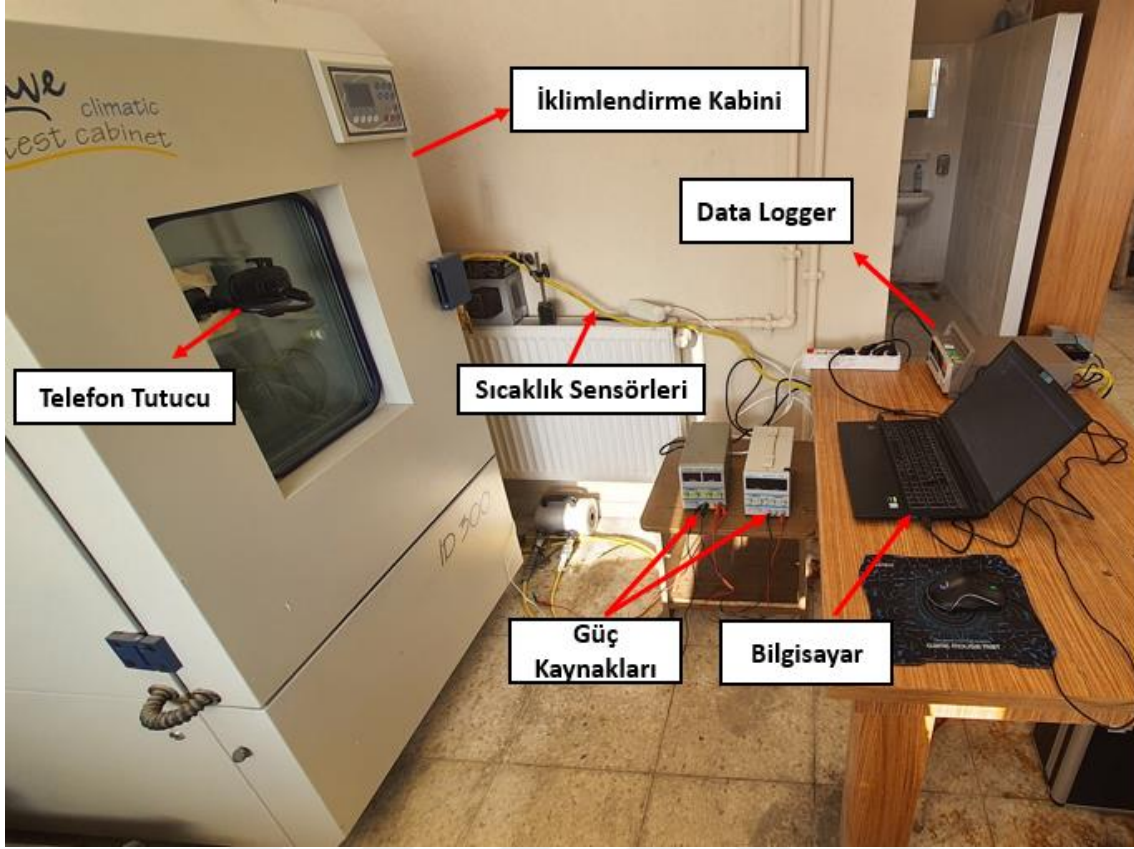
düşük sıcaklıklara dayanıklı özel cam kestirilmiştir. Numune altına ahşap malzeme konularak ısının yukarı yüzeye yönlenmesi amaçlanmıştır. İklimlendirme kabini içerisinde -20 °C ortam sıcaklık koşullarında 20 volt DC güç kaynağı ile numune üzerindeki buz eritme işlemi 5,5 saat boyunca video kameraya kaydedilmiştir. Deneyler sırasında numune yüzey sıcaklık değişimleri sıcaklık sensörleri ile bilgisayar ortamına kayıt altına alınmıştır. Kabin içi ve dışı düzenekler Resim 3.14 ve Resim 3.15’de gösterilmiştir.



Resim 3.13 Numune üzerinde buz tabakasının oluşturulması, a) Buz oluşturmak için kullanılan aparatlar, b) Numune yüzeyinde suyun donması için derin dondurucuya koyulması, c) Numune yüzeyinde oluşan buz tabakası ve elektrotların numuneye yerleştirilmesi.



Resim 3.14 İklimlendirme kabini içerisinde kurulan buz eritme düzeneği.



Resim 3.15 Buz eritme deneyinin kabın dışarısındaki düzeneği.

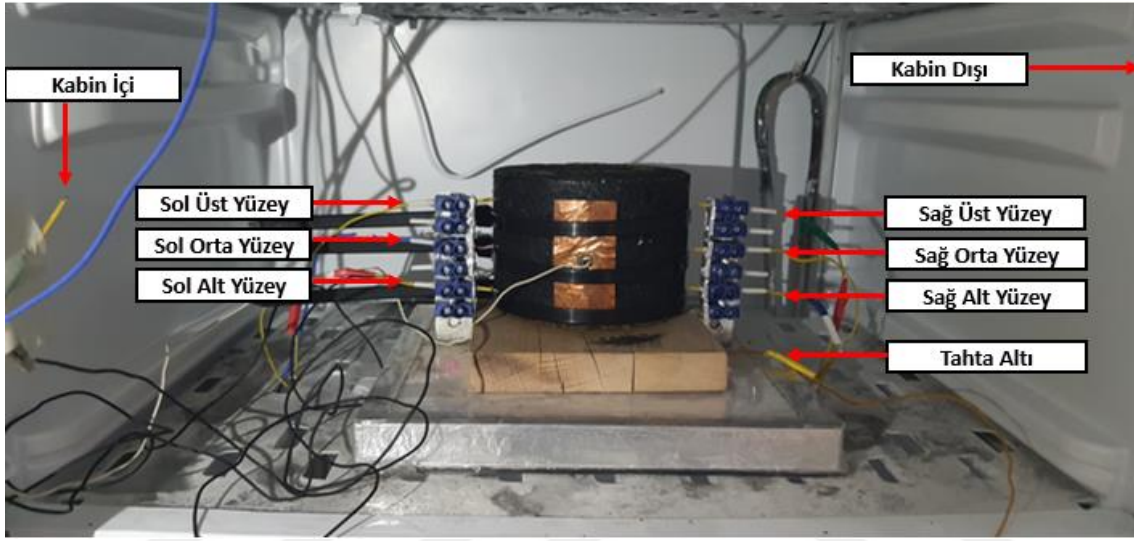
3.2.5.3 İAB Numunelerin Elektriksel Isıtma-Soğutmaya Tabi Tutulması

Her bir dizayn için optimum bitüm yüzdesinde hazırlanmış olan numuneler, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam koşulu sağlayan iklimlendirme kabini içerisinde hazırlanacak düzenekte elektriksel olarak 3 farklı (0-2-4) elektriksel ısıtma-soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Bir elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi şu aşamalardan oluşmaktadır;

1. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam koşullarında ve numune yüzey sıcaklığı $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye geldiğinde 20 Volt değerine ayarlanmış DC güç kaynağı ile elektriksel olarak numune ısıtma işlemine başlanır,
2. Numune yüzey sıcaklığı $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye geldiğinde güç kaynağı kapatılarak $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye soğuması için beklenir.

Çevrime tabi tutulan İAB numuneleri üzerinde her çevrim öncesinde ve sonrasında oda sıcaklığı koşullarında 2 prob yöntemi ile elektrot ile numune yüzeyine arasındaki temasın

tam sağlanması için iletken jel kullanılarak öz direnç ölçümleri yapılmış ve iletkenlik özelliklerindeki değişim tespit edilmiştir. Aynı zamanda 0-2-4 çevrime maruz bırakılan numunelere Marshall Stabilite ve Akma deneyi yapılarak mekanik özelliklerindeki değişimin belirlenmiştir. Çevrim boyunca sıcaklık değerlerinin ölçülmesinde, numune yüzeyine temas ettirilen, kabin içerisine ve dışarısına koyulan sıcaklık sensörlerinden yararlanılmıştır. Hazırlanan düzenek Resim 3.16’da gösterilmiştir.



Resim 3.16 Numunenin elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi için hazırlanan düzenek.

3.2.5.4 Dolaylı Çekme Mukavemeti (ITS) Deneyi

Bu yöntem bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin saptanmasını içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların ısı ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder (İlıcılı vd. 2001).

Bu deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır (İlıcılı vd. 2001).

Optimum bitüm yüzdesinde hazırlanan İAB numunelerinin çekme dayanımlarını belirlemek için AASHTO T-283’te belirtilen indirekt çekme deney metodu uygulanmıştır. Bu deney dolaylı çekme gerilmesi deney aletleri ve Marshall stabilite

cihazı kullanılarak yapılır. Numuneler 25 °C'deki su banyosunda 2 saat bekletilmiştir. Numune sıcaklığı, deney sıcaklığına ulaştıktan sonra silindir şeklindeki briket numunesi düzleme paralel şekilde cihaza yerleştirilir ve 50,8 mm/dk hız ile sabit yük uygulanarak kırılır. Deney sonucunda elde edilen maksimum yük kullanılarak dolaylı çekme mukavemeti aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S_t = \frac{2P}{\pi t D} \quad (3.1)$$

Burada:

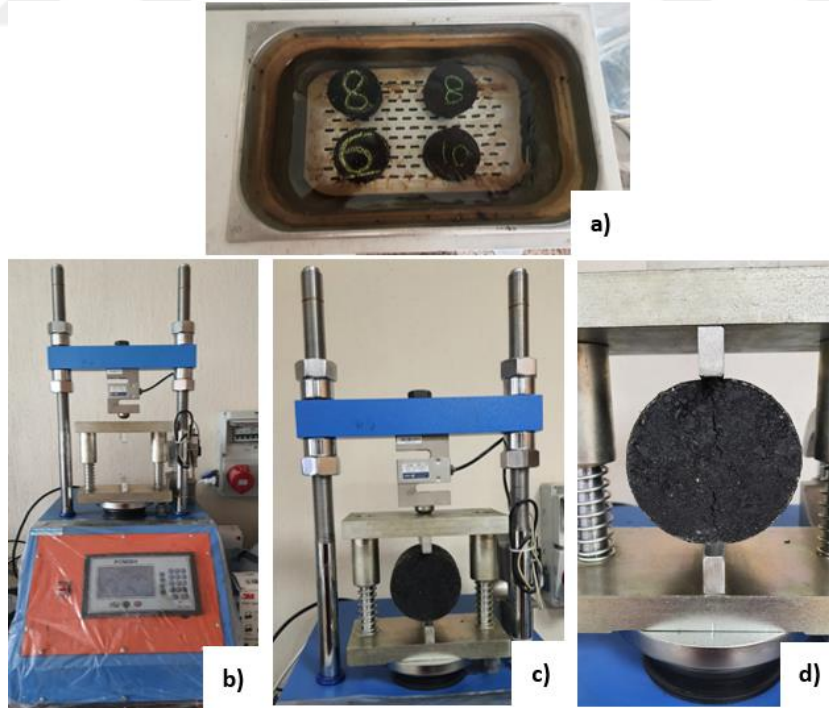
S_t : Dolaylı Çekme Mukavemeti (kg/cm²),

P : Maksimum Yük (kg),

t : Numune kalınlığı (cm),

D : Numune çapı (cm),

Resim 3.17, Dolaylı Çekme Mukavemeti deney aşamalarını göstermektedir.

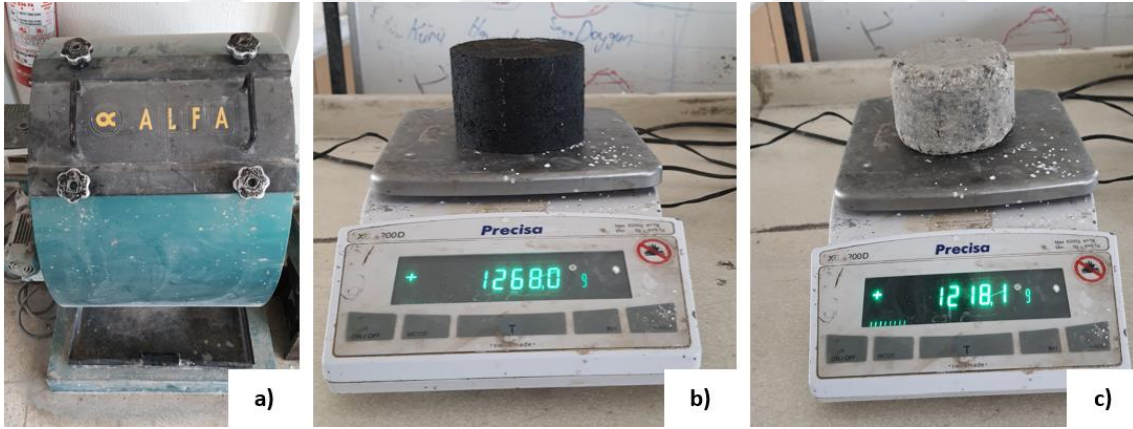


Resim 3.17 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi, a) Numunelerin 25 °C'deki su banyosuna konulması, b) Marshall Stabilite Cihazı, c) Numunenin cihaza yerleştirilmesi, d) Deney sonunda numunenin görünümü.

3.2.5.5 Cantabro Deneyi

Bu deney, İki farklı dizayn için optimum bitüm yüzdesinde hazırlanmış olan İAB numunelerinin parçalanma direncini belirlemek için ASTM C348-18' e göre yapılmıştır. Deneye başlanmadan önce İAB numuneleri 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numune Los Angeles makine tamburuna yerleştirilmeden önce, aşınmadan önceki ağırlığı (M_1) elde etmek için tartılmıştır. Daha sonra numune, çelik bilye olmadan Los Angeles makine tamburuna yerleştirilmiştir. Los Angeles makinesi daha sonra 30-33 rpm arasındaki hızlarda 300 devir döndürülmüştür. Aşınmaya maruz kalan numune çıkartılmış ve aşındırma sonrasındaki ağırlığı tartılmıştır (M_2). Deney sonunda Karayolları Teknik şartnamesine göre belirlenen kütle kaybı miktarı %20' den fazla olmamalıdır. Resim 3.21, Cantabro deney aşamalarını göstermektedir.

$$K. K. (\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad (3.2)$$



Resim 3.18 Cantabro deneyi, a) Los Angeles cihazı, b) Numunenin Cantabro deneyi öncesi ağırlığı (M_1), c) Numunenin Cantabro deneyi sonrası ağırlığı (M_2).

4. BULGULAR

4.1 Agregada Deneyleri Sonuçları

4.1.1 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi Sonuçları

İAB numunelerinde kullanılan bazalt ve kireçtaşı'nın kimyasal analizi AKÜ Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yaptırılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarından iri agregada ve mineral fillerde kullanılan kireçtaşı'nın en büyük kimyasal bileşeni CaO (%55,035), iri agregada kullanılan bazaltın SiO₂ (%50,573) olarak belirlenmiştir.

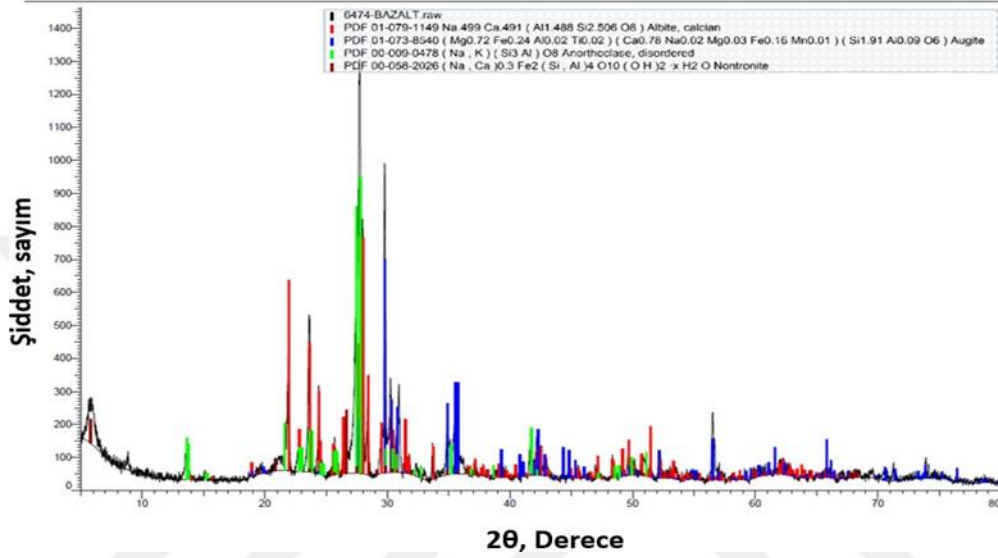
Çizelge 4.1 Kullanılan bazalt ve kireçtaşı agregasının kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	Bazalt (%)	Kireçtaşı (%)
*LoI	3.416	42.593
Na ₂ O	2.336	0.042
MgO	4.115	1.590
Al ₂ O ₃	16.119	0.175
SiO ₂	50.573	0.407
P ₂ O ₅	0.371	0.005
SO ₃	0,076	0.028
Cl	-	-
K ₂ O	2.269	0.025
CaO	9.757	55.035
TiO ₂	0.941	-
V ₂ O ₅	-	-
Cr ₂ O ₃	0.021	-
MnO	0.188	-
Fe ₂ O ₃	9.018	0.074
CuO	-	-
ZnO	0.013	-
SrO	0.153	0.026
ZrO ₂	0.023	-
Nb ₂ O ₅	-	-
BaO	0.160	-
WO ₃	-	-
Rb ₂ O	0.013	-
As ₂ O ₃	0.008	-

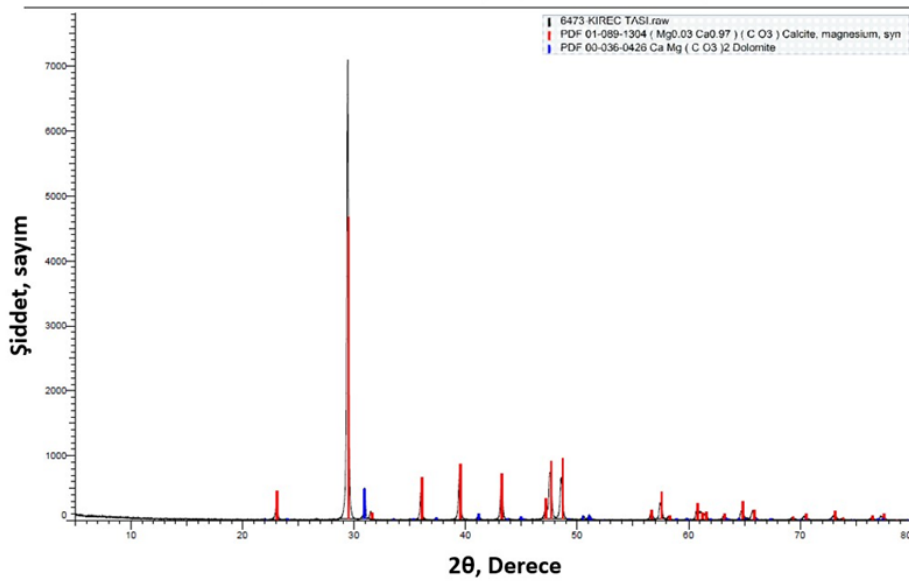
*Kızdırma kaybı

4.1.2 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi Sonuçları

İAB numunelerinde kullanılan bazalt ve kireçtaşının XRD deneyi AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yaptırılmıştır. Deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Bazalt agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.



Şekil 4.2 Kireçtaşı agregasının XRD sonuçları.

4.2 Bitüm Deneyleri Sonuçları

B50/70 penetrasyon sınıfındaki saf bitüme ve B50/70 + %14 KT ile modifiye edilmiş bitüme özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyi yapılmış olup, bitüm sıcaklık hassasiyeti parametrelerinden olan Penetrasyon İndeksi (PI) ve Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Bitüm Deney Sonuçları

Özellikler	B50/70	B50/70+%14 KT
Özgül Ağırlık	1,043	1,097
Penetrasyon Derecesi (25 °C)	52,13	32,7
Yumuşama Noktası (°C)	46,65	58,1
Brookfield Viskozite 135 °C'de (cP)	495,00	1072
Brookfield Viskozite 165 °C'de (cP)	131,00	266
Karıştırma Sıcaklığı (Min. / Max.)	154,0 / 159,6	173,4 / 179,4
Sıkıştırma Sıcaklığı (Min. / Max.)	143,1 / 147,8	161,6 / 166,7
Penetrasyon İndeksi (PI)	-1,976	-0,320
Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN)	-0,615	-0,062

B50/70 + %14 KT ile modifiye edilmiş modifiye bitüm B50/70 saf bitüme göre daha yüksek Penetrasyon İndeksi (PI) ve Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN) elde edilmiştir. Daha yüksek Penetrasyon İndeksi (PI) ve Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN) değerleri daha düşük sıcaklık hassasiyeti göstermektedir.

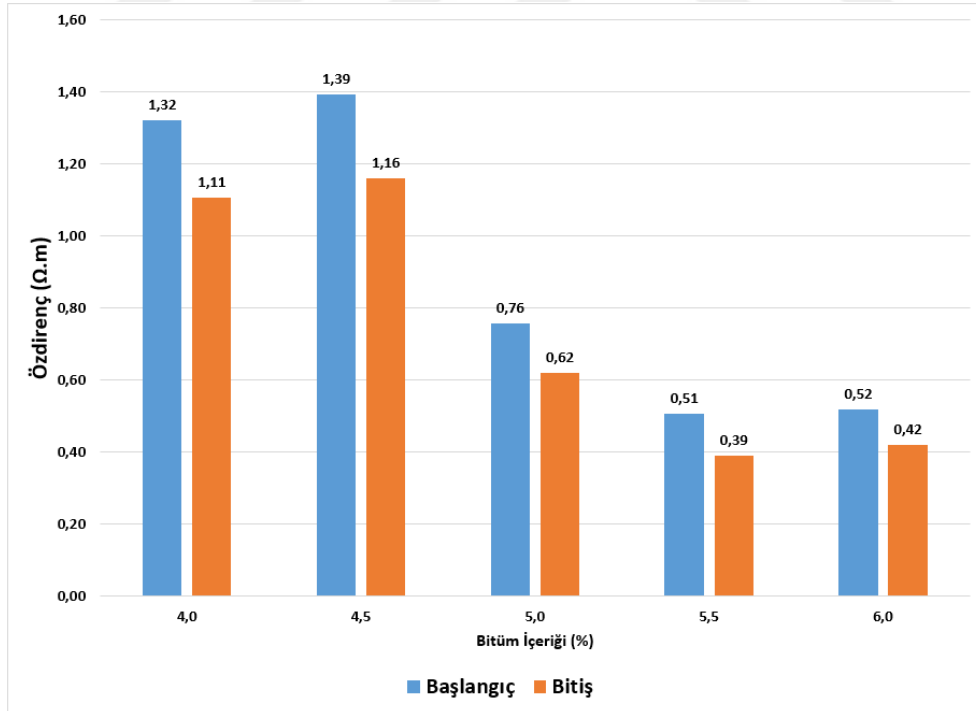
4.3 Farklı Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları

Farklı bitüm yüzdelerine sahip B50/70 saf bitüm ve %14 KS katkılı modifiye bitüm ile üretilen iki farklı İAB Marshall serisine, Öz direnç-Isınma Potansiyeli ve Marshall Stabilitate - Akma deneyi uygulanmıştır. DC güç kaynağı 20 volt değerine ayarlanarak 10 dakika boyunca numuneler 2 prob yöntemine göre elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Deney başında ve sonunda güç kaynağındaki akımlar okunarak öz direnç değişimleri hesaplanılmıştır. Ayrıca numune yüzeylerine farklı noktalardan temas ettirilen sıcaklık sensörler ile numunelerin ısınma potansiyeli kayıt altına alınmıştır.

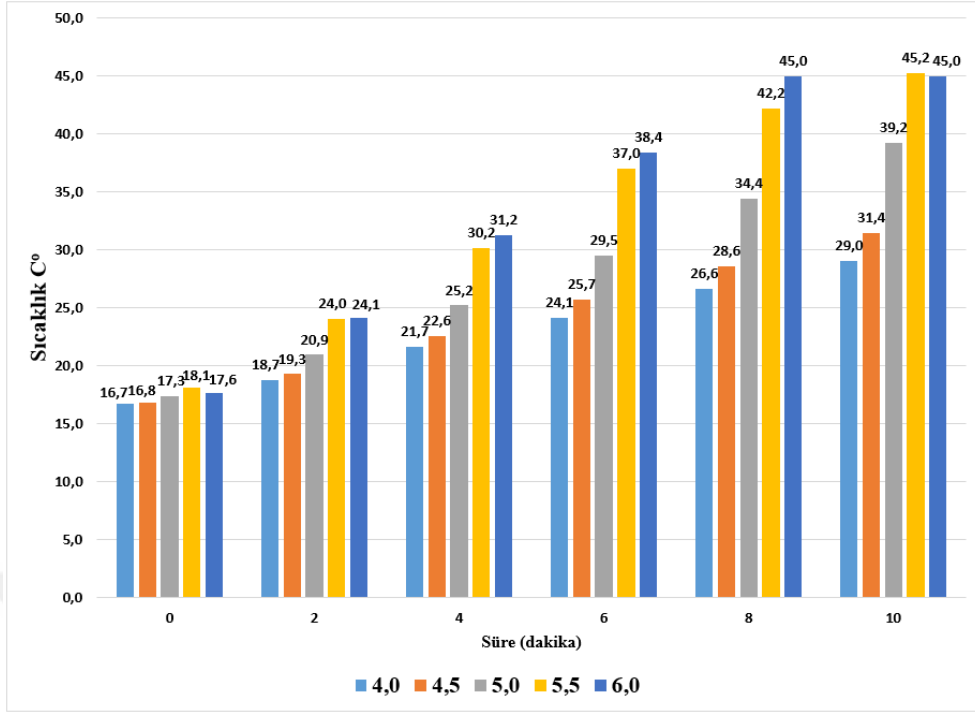
4.3.1 İAB Numunelerinin Özdirenç- Isınma Potansiyeli Deneyi Sonuçları

Farklı bitüm yüzdesine sahip (% 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0) Seri 1 ve Seri 2 İAB numunelerinin özdirenç ve ısınma potansiyeli deney sonuçları Şekil 4.3-4.6’da verilmiştir. Seri 1 ve Seri 2 dizaynlarında %5,5 bitüm içeriğine kadar özdirenç de azalma meydana gelmiştir. Yani iletkenliğin artmasının nedeni bitüm miktarının artması ile karışım içerisindeki liflerin daha homojen bir şekilde dağılması sonucu iletken bir yol oluşturmaktadır. Seri 2’deki özdirenç değerleri Seri 1’deki özdirenç değerlerine göre daha az olması yani daha iletken olması Seri 2 dizaynında kullanılan karbon tozunun karbon lifi ile birlikte iletken yolların tamamlayarak daha iyi bir iletken yol ağı oluşturmaktadır.

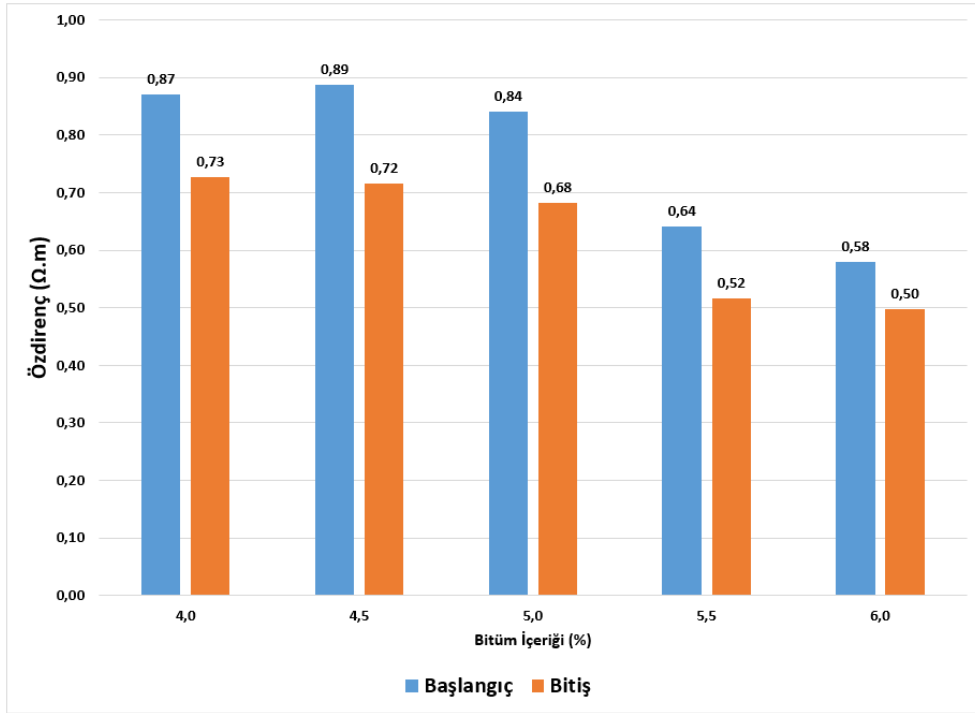
Şekil 4.3 ve Şekil 4.5’deki elde edilen özdirenç değerleri güncel literatürde (Pan vd. 2015) yer alan en düşük özdirenç değerinden (yaklaşık 10 $\Omega.m$) daha düşük bir değer elde edilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.6’daki ısınma hızları sırasıyla 1,23 – 2,76 $^{\circ}C/dk$ ve 1,64 – 2,62 $^{\circ}C/dk$ ’dır.



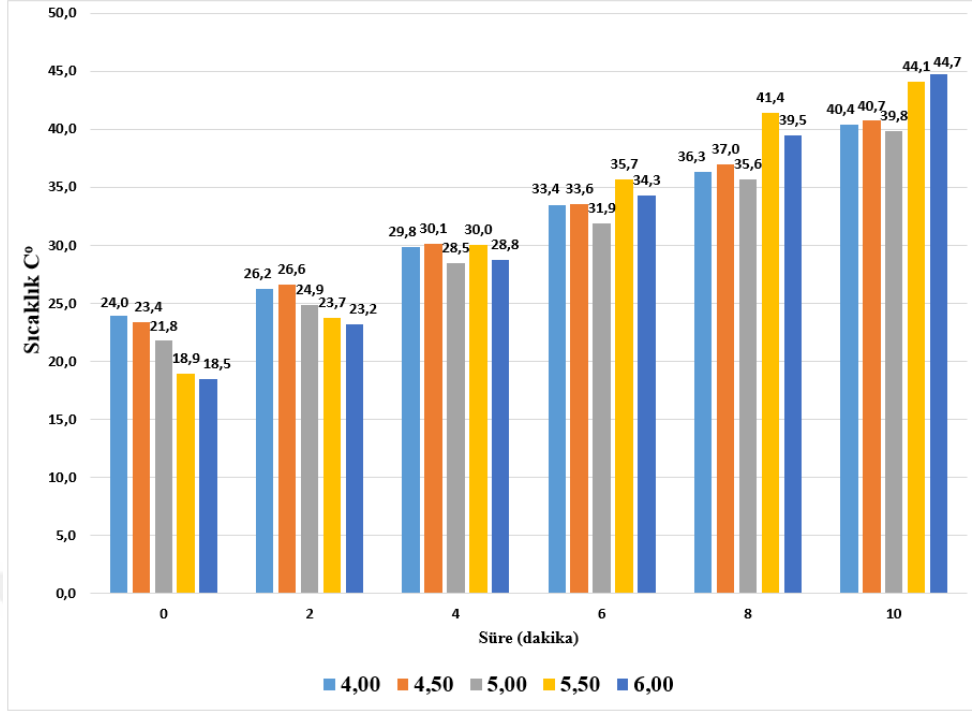
Şekil 4.3 Farklı bitüm oranlarına sahip Seri 1 İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.



Şekil 4.4 Farklı bitüm oranlarına sahip Seri 1 İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.



Şekil 4.5 Farklı bitüm oranları sahip Seri 2 İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.



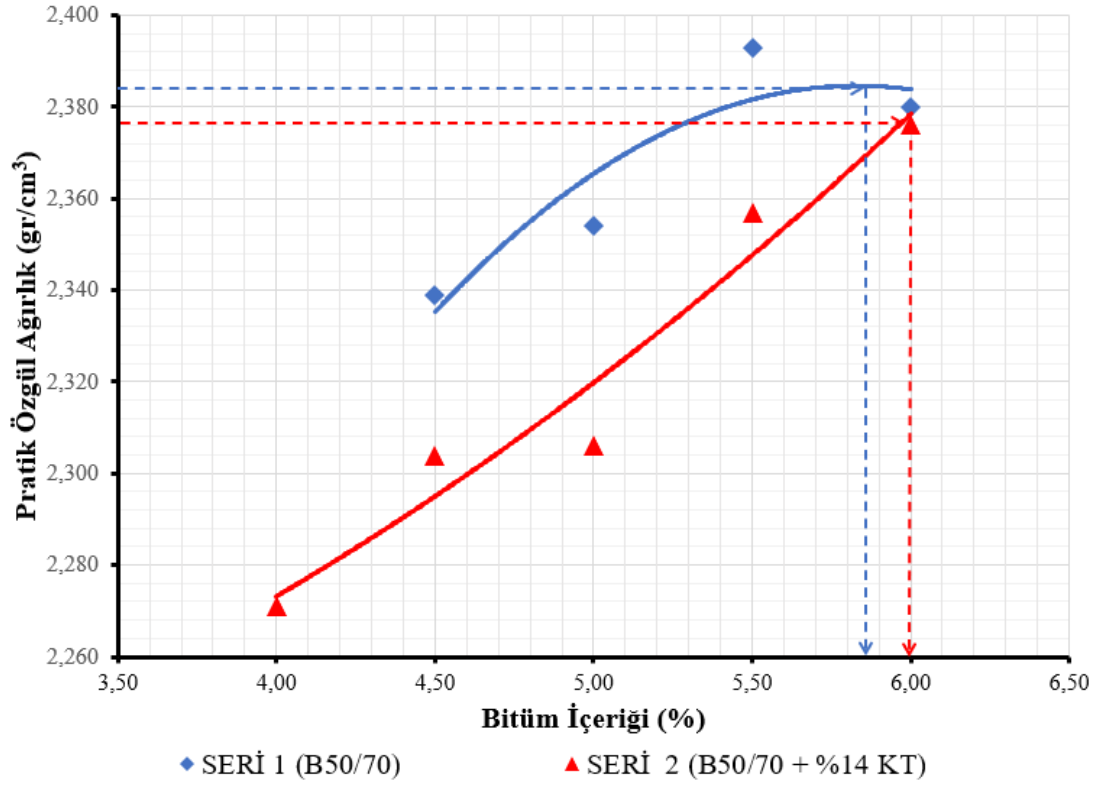
Şekil 4.6 Farklı bitüm oranları sahip Seri 2 İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.

4.3.2 İAB Numunelerin Marshall Stabilite – Akma Deneyi Sonuçları

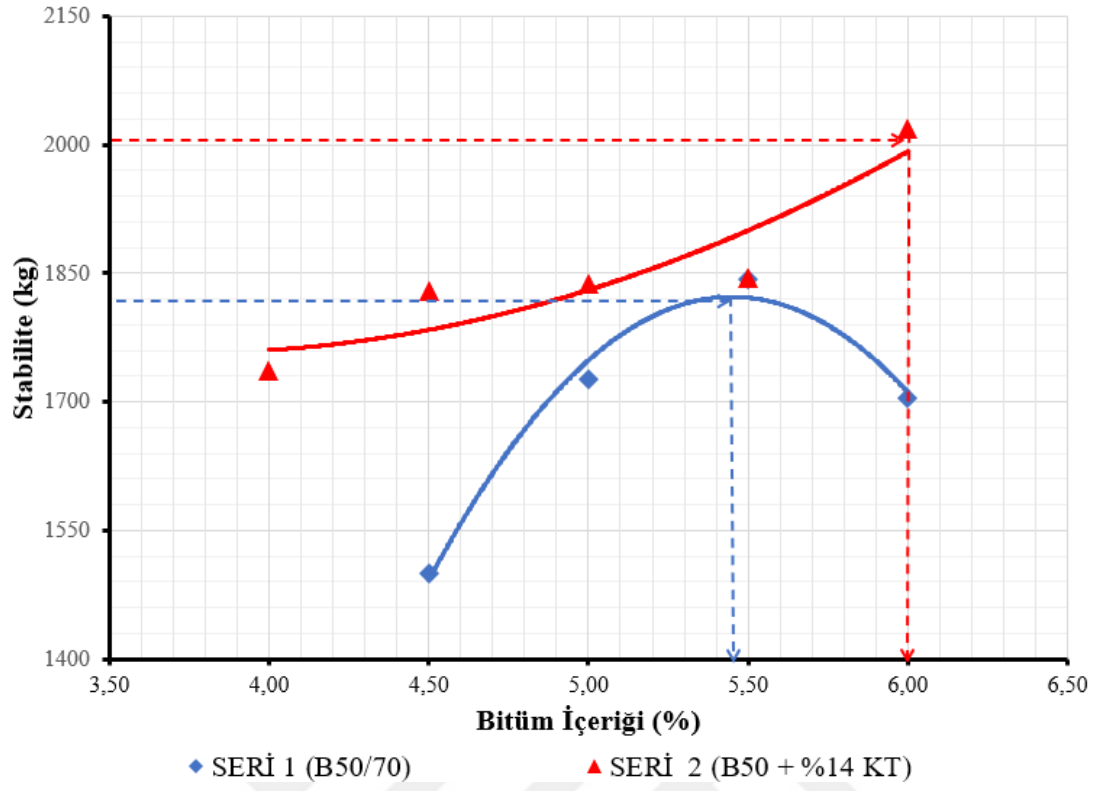
Farklı bitüm oranlarına sahip Seri 1 ve Seri 2 İAB numunelerinin optimum bitüm oranının bulunması için Marshall-Stabilite deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 7-12’de gösterilmiştir.

Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçlarından 2 farklı serinin optimum bitüm oranları Seri 1 dizaynında 5,59, Seri 2 dizaynında 5,95 bulunmuştur. Optimum bitüm yüzdeki civarında her 2 seride öz direnç değerinin en düşük değer ulaşıldığı görülmüştür. Bunun sebebi bitüm yüzdesinin artması ile karbon liflerinin daha homojen bir şekilde karışmasından kaynaklanmaktadır. Seri 2’de karbon tozunun kullanılması bitüm film tabaka kalınlığını artırdığından Seri 1’e göre daha fazla optimum bitüm oranı elde edilmiştir. Şekil 4.8’de Seri 2’deki stabilite değeri Seri 1’e göre daha yüksek çıkmıştır. Bununla beraber her 2 seri stabilite değerleri şartname sınır değerleri üzerindedir. Şekil 4.11’deki akma grafiğine göre, Seri 1 şartname üst sınır koşuluna (4 mm) Seri 2’ye göre daha yakinken, her iki seride şartname sınır koşullarını (2-4 mm) sağlamadığı görülmektedir. Bu durumun karbon lifinin kullanılması ve bitümün karbon tozu ile

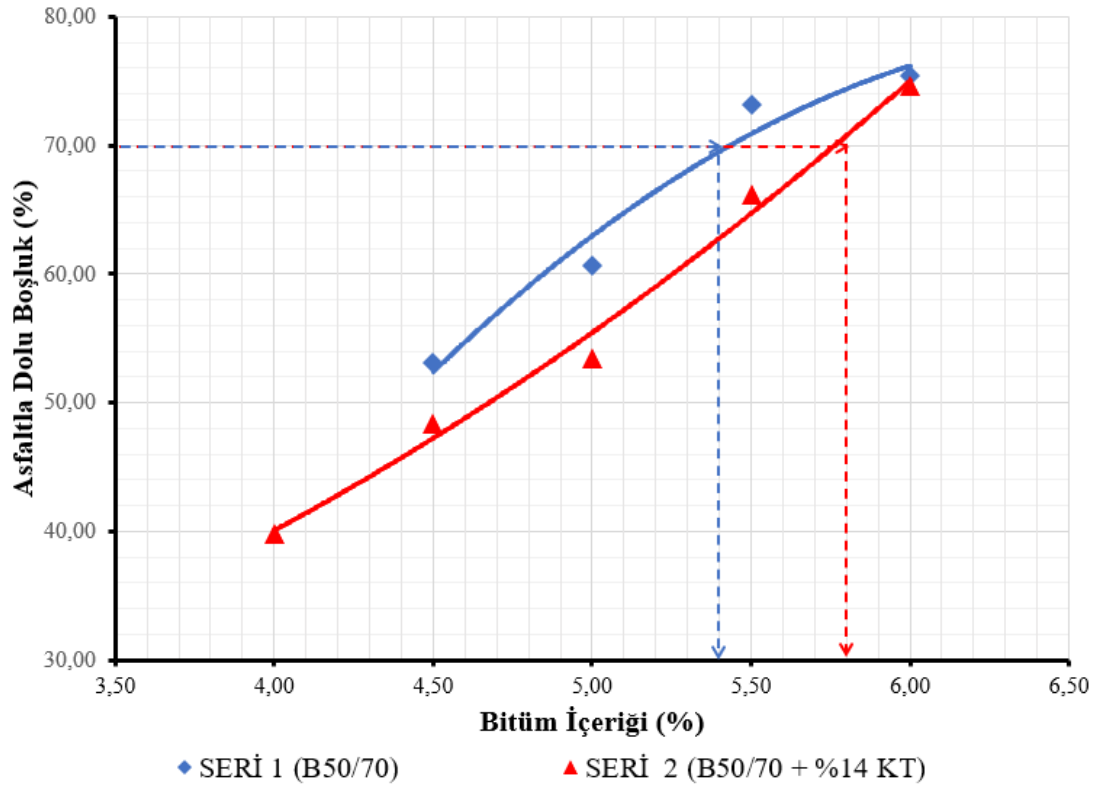
modifiye edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.12'deki VMA (Mineral Agrega Boşluk değerlerinin her 2 seri içinde şartname minimum koşulu olan %14 değerini sağlamıştır.



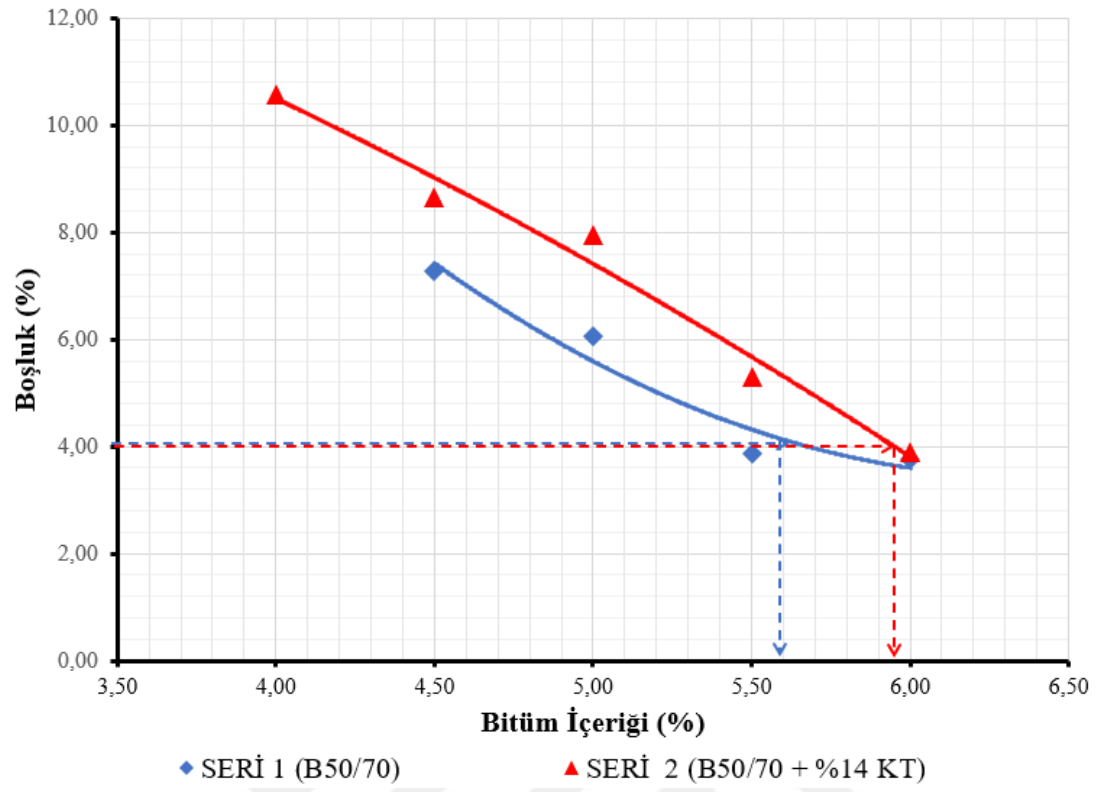
Şekil 4.7 Pratik Özgül Ağırlık ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



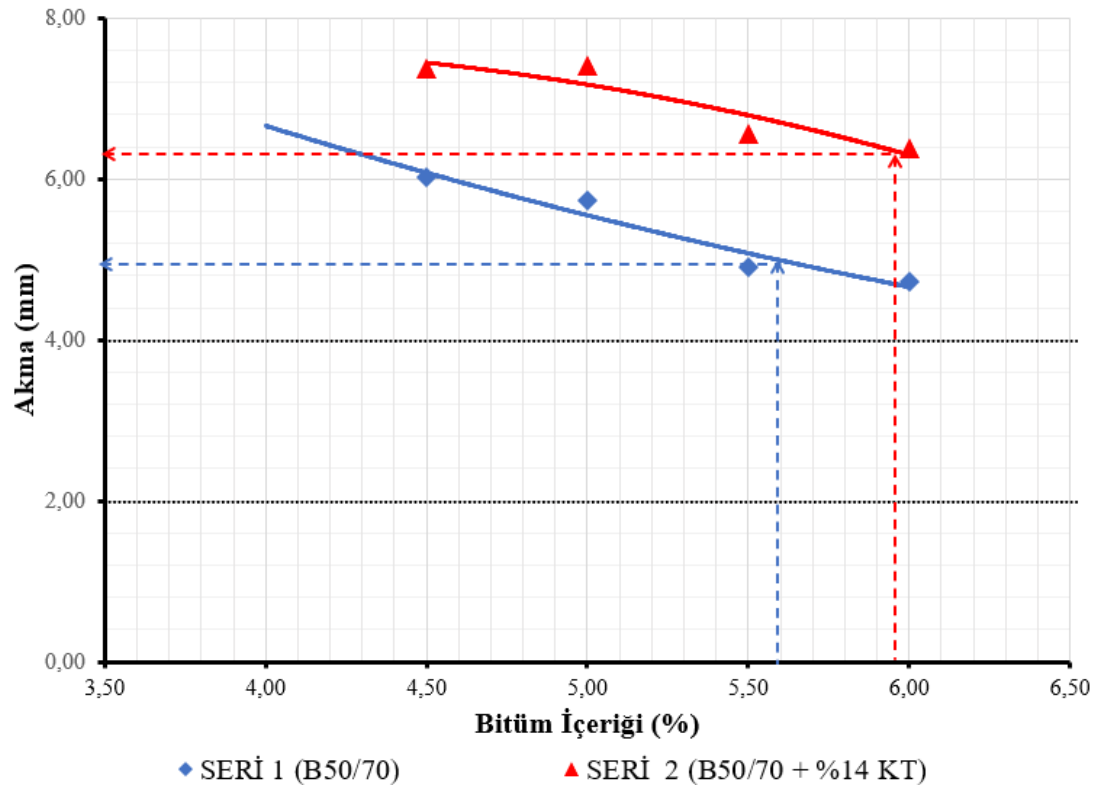
Şekil 4.8 Stabilité ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



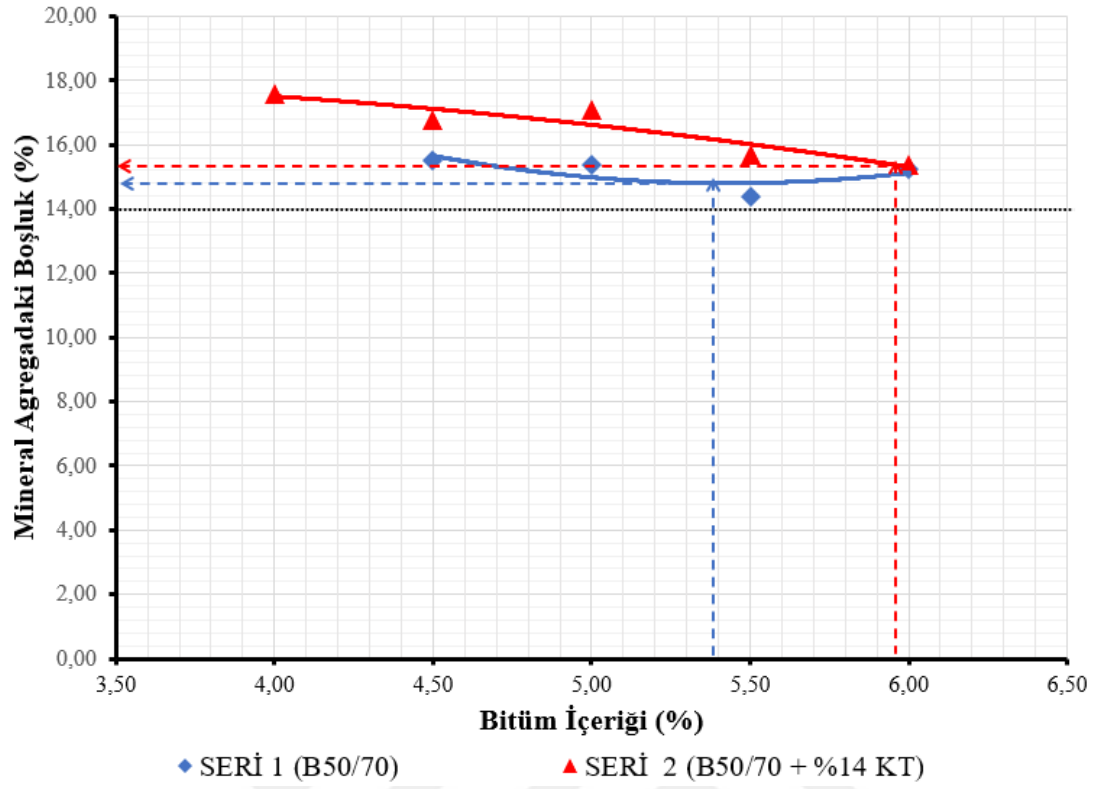
Şekil 4.9 Asfaltla dolu boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



Şekil 4.10 Boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

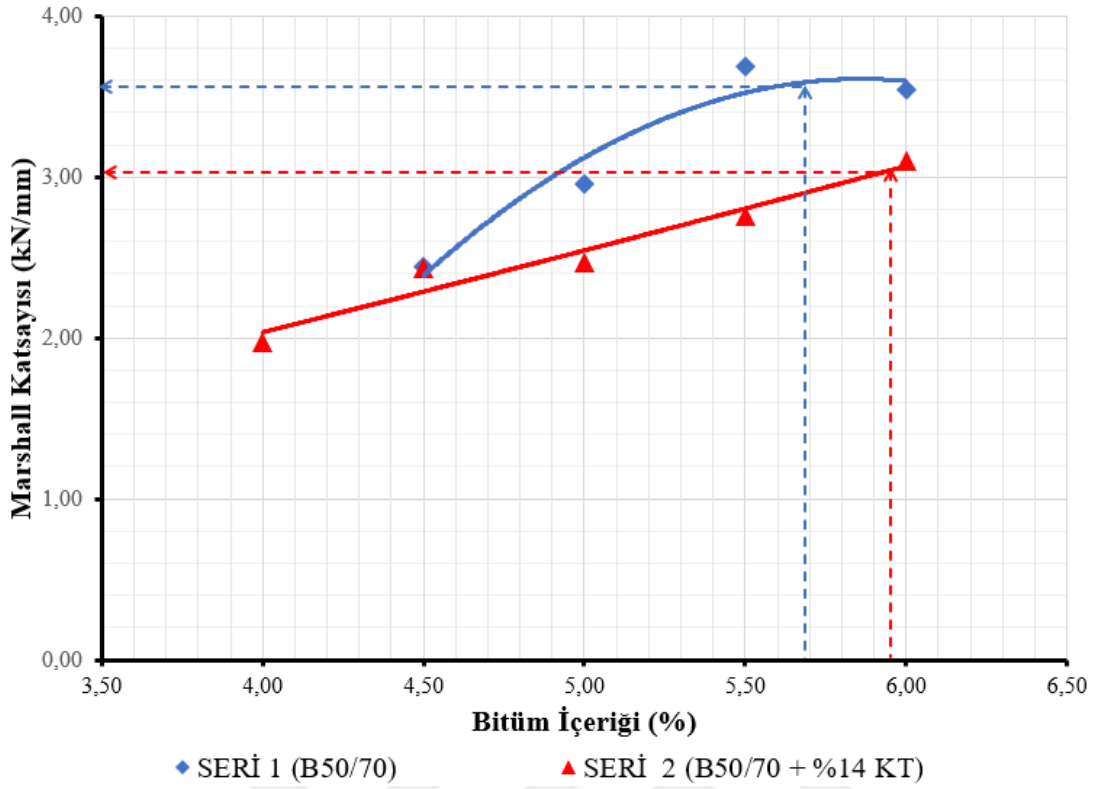


Şekil 4.11 Akma ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



Şekil 4.12 Mineral Agrega Boşluk yüzdesi ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

Seri 1 ve Seri 2'nin Marshall katsayısı değerleri Şekil 4. Verilmiştir. Seri 2 Marshall katsayısı değeri Seri 1'e göre daha az olduğu ve buna bağlı olarak Seri 2'deki kalıcı deformasyona karşı dayanımların Seri 1'e göre azaldığı belirlenmiştir. Seri 2'de bitümün karbon tozu ile modifiye edilmesi bitümün fiziksel özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.



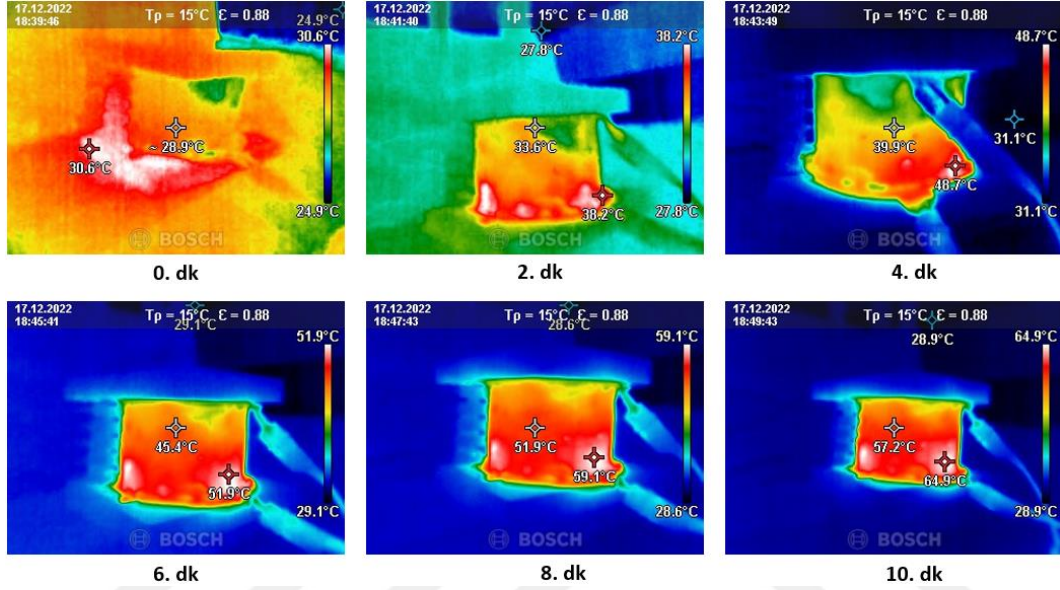
Şekil 4.13 Marshall katsayısı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

4.4 Optimum Bitüm Yüzdelelerinde Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları

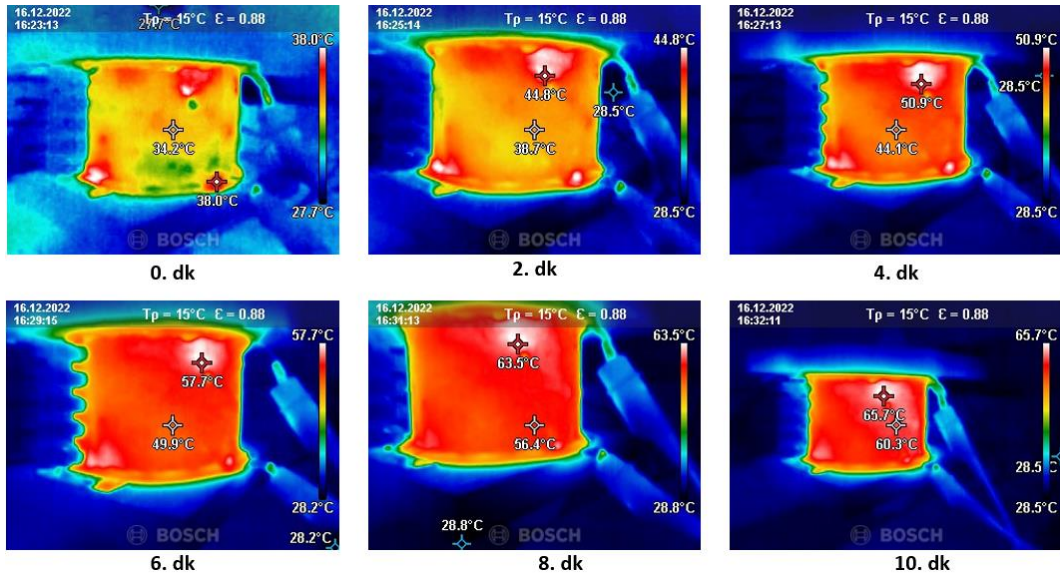
4.4.1 Isıl Dağılım Sonuçları

Optimum bitüm yüzdesinde üretilen B50/70 + %0,3 Karbon Lifi İAB (Seri 1) ve %14 KT ile modifiye edilmiş B50/70 modifiye bitüm + %0,3 Karbon Lifi (Seri 2) numuneleri 2 farklı elektrot bağlantısı (üst-alt yüzey ve karşılıklı yan yüzeyler) ile 10 dk boyunca sabit gerilim altında 20 V güç kaynağı ile ısıtmaya maruz bırakılarak, yüzey sıcaklıkları termal kamera ile kayıt altına alınmıştır. Termal kamera görüntü sonuçları Resim 4.1-4.4'de verilmiştir. Seri 1'de sıcaklığın tüm yüzeye eşit oranda dağılması 10 dk sürerken, Seri 2'de bu süre 6 dk olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan Seri 2'nin sıcaklık dağılımının Seri 1'e göre daha homojen olduğu görülmektedir. Bu da karbon tozu katkısının sıcaklık dağılımında olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Seri 1 ve 2'de 10 dk boyunca ulaşılan maksimum sıcaklıklar sırasıyla 57,2 °C ve 60,3 °C olduğu görülmüştür. Böylelikle Seri 2'nin ısınma potansiyelinin Seri 1'e oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elektrot konumları karşılıklı yan yüzeylerde olduğu durumlar incelendiğinde

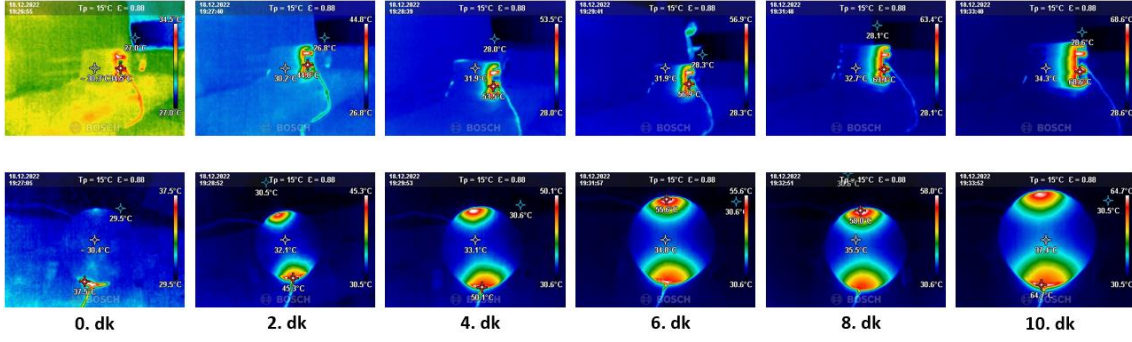
Seri 2'nin ısı artışının Seri 1'e göre benzer şekilde daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca numune üst yüzeylerinden alınan görüntüler incelendiğinde Seri 2'deki ısı yayılım hızının Seri 1'e göre daha hızlı ve daha fazla yayıldığı görülmüştür. Elektrotların bağlantı durumlarının elektriksel ısıtmada önemli bir etkiye sahip olduğu, elektrotların üst ve alt yüzeyler yerleştirilmesi ile çok daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.



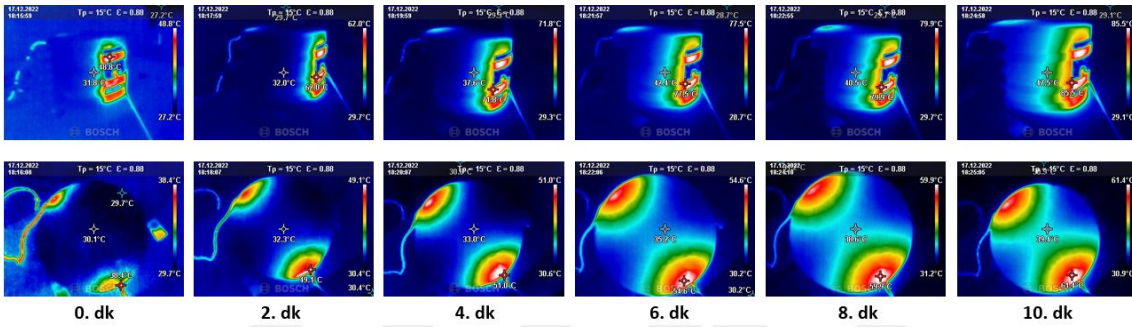
Resim 4.1 Seri 1 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların üst-alt yüzeye bağlanması durumu).



Resim 4.2 Seri 2 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların üst-alt yüzeye bağlanması durumu).



Resim 4.3 Seri 1 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların karşılıklı yan yüzeylere bağlanması durumu).

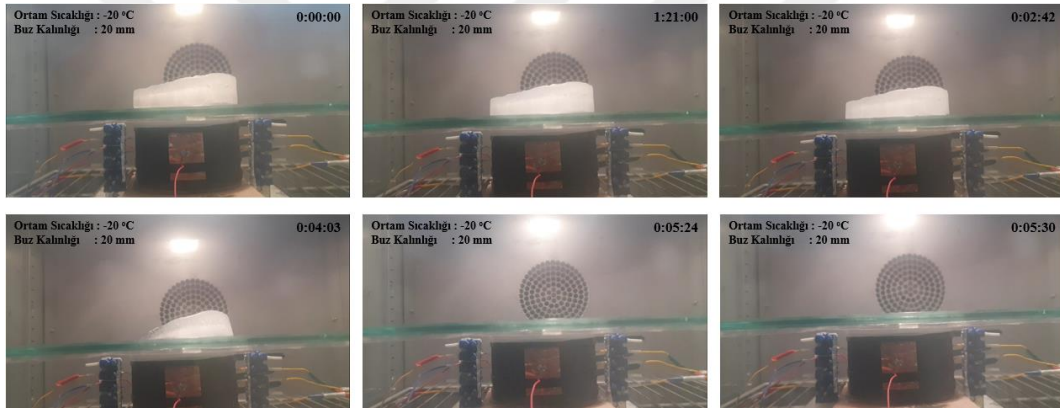


Resim 4.4 Seri 2 İAB numunesinin termal kamera görüntüleri (Elektrotların karşılıklı yan yüzeylere bağlanması durumu).

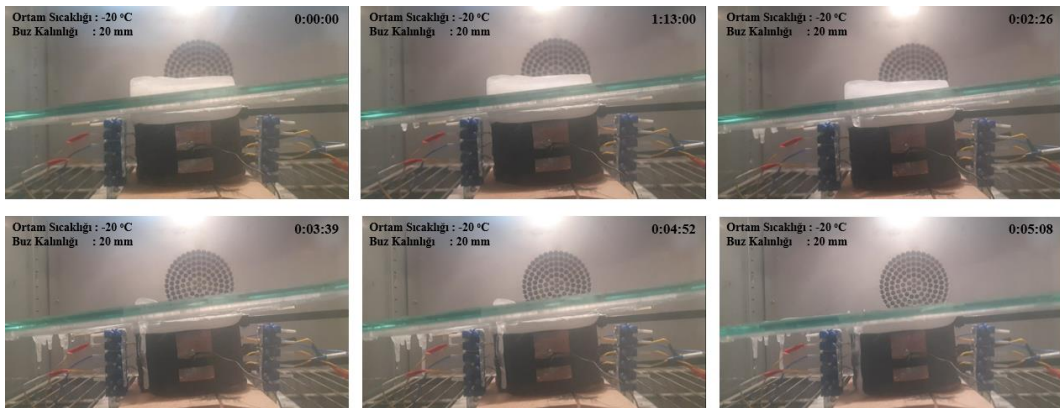
4.4.2 Buz Eritme Performansı Sonuçları

Optimum bitüm yüzdesinde üretilen B50/70 + %0,3 Karbon Lifi İAB (Seri 1) ve %14 KT ile modifiye edilmiş B50/70 modifiye bitüm + %0,3 Karbon Lifi (Seri 2) numunelerinin yüzeyinde oluşturulan 20 mm kalınlığında buz tabakası iklimlendirme kabini kullanılarak -20 °C ortam koşullarında eritilmesi için 330 dakika boyunca sabit gerilim altında (20 volt) elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Buz erime boyunca kabine düzenek kurularak kamera ile kayıt altına alınmıştır. Kayıt sonuçları Resim 4.5 ve Resim 4.6'da gösterilmiştir. Aynı zamanda sensörler yardımı ile bilgisayar ortamına alınan yüzey sıcaklık değerleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de grafik ile gösterilmiştir. Kamera ile kayıt alınan videolardan buzun ilk erimeye başladığı süre ve tamamen suya dönüştüğü süreler gözlemlenerek sensör verileri ile karşılaştırılmıştır. Seri 1 ve Seri 2'deki buz erimeye başlama süreleri sırasıyla 55. ve 48. dakika olarak gözlemlenmiştir. Her iki seride -20 °C ortam koşullarında numune yüzey sıcaklığı 20 °C artış gösterdiği yani 0 °C'ye geçmeye

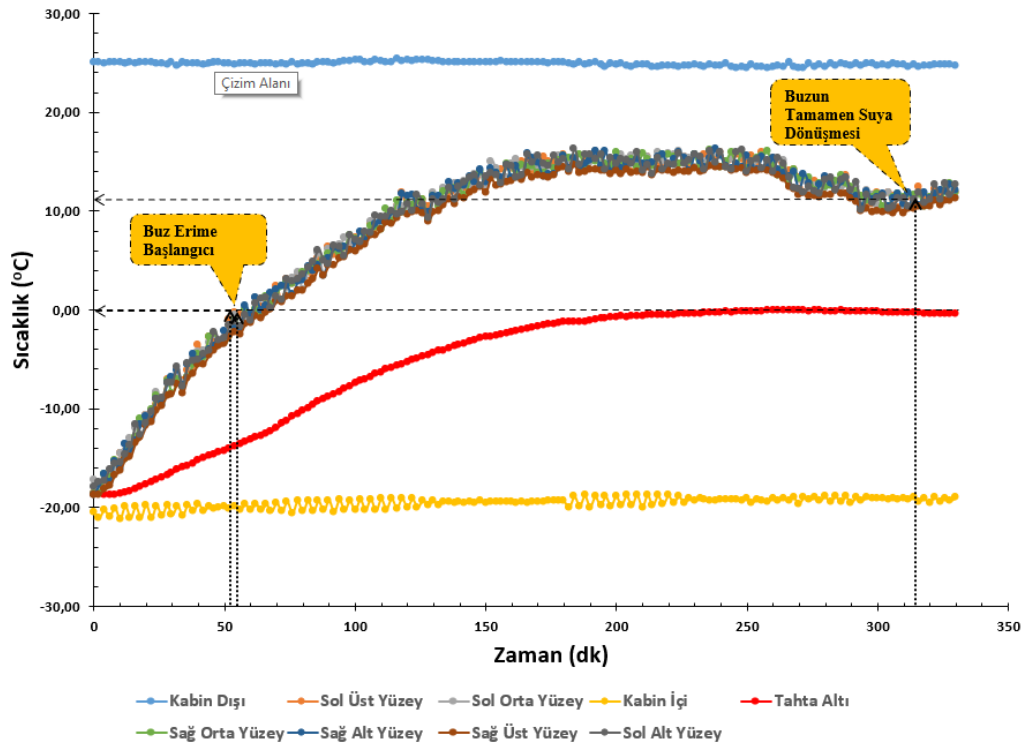
başlaması ile buz erime süresinin başladığı görülmüştür. Yüzey sıcaklığının 0 °C'ye ulaşma süreleri ise sırasıyla 52. ve 32. dakikadır. Seri 1 ve Seri 2'deki 20 mm kalınlığındaki buz tabakasının tamamen suya dönüşme süreleri sırasıyla 324 ve 292 dk olarak tespit edilmiştir. Buz eritme sürelerinde 32 dakikalık fark olup Seri 2'nin Seri 1'e göre %9,88 oranında buz eritme verimliliği artmıştır. Seri 1 ve Seri 2'nin ısınma hızları yaklaşık olarak 0,1 °C/dk ve 0,13 °C/dk'dır. Ortam sıcaklığının düşmesi numunenin ısınma hızını etkilediği gözlemlenmiştir. Seri 2'de kullanılan karbon tozunun numunenin ısı dağılımını artırdığı ve buz eritme performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Seri 1 ve Seri 2'deki buzun tamamen suya dönüştüğü andaki yüzey sıcaklıkları yaklaşık olarak 12 ve 20 °C olduğu görülmüştür. Optimum bitüm yüzdesinde üretilen her iki serideki İAB numunelerinin buz eritme sürelerinin yaklaşık 5 saat olduğu görülmüştür.



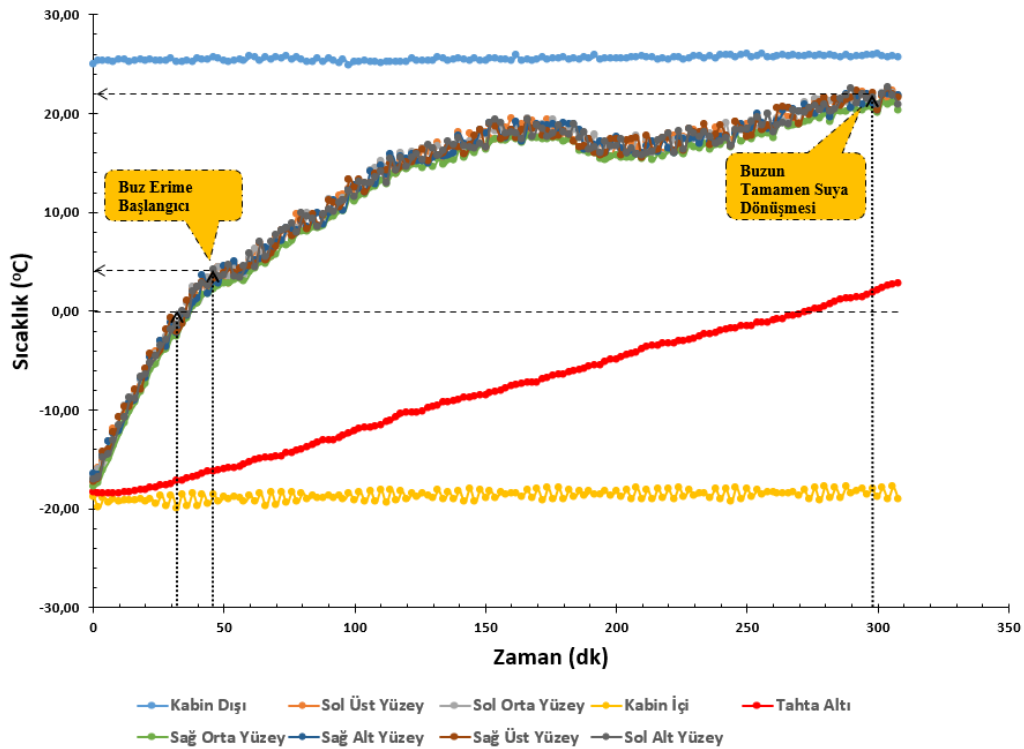
Resim 4.5 Seri 1 İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri.



Resim 4.6 Seri 2 İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri.



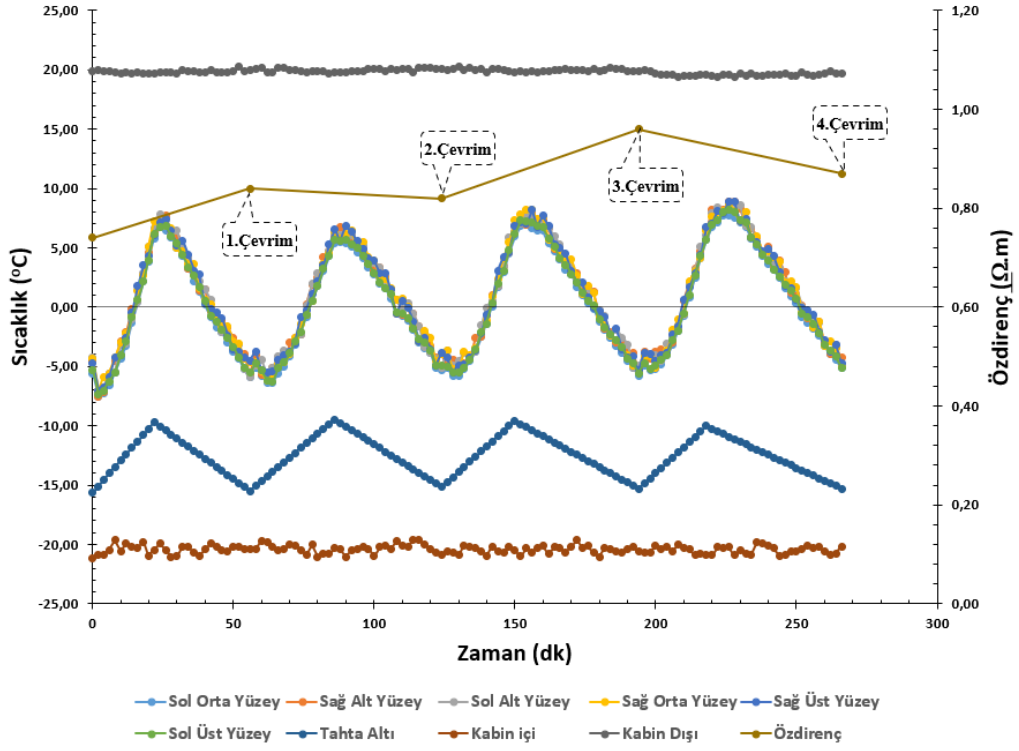
Şekil 4.14 Seri 1 İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen yüzey sıcaklıkları.



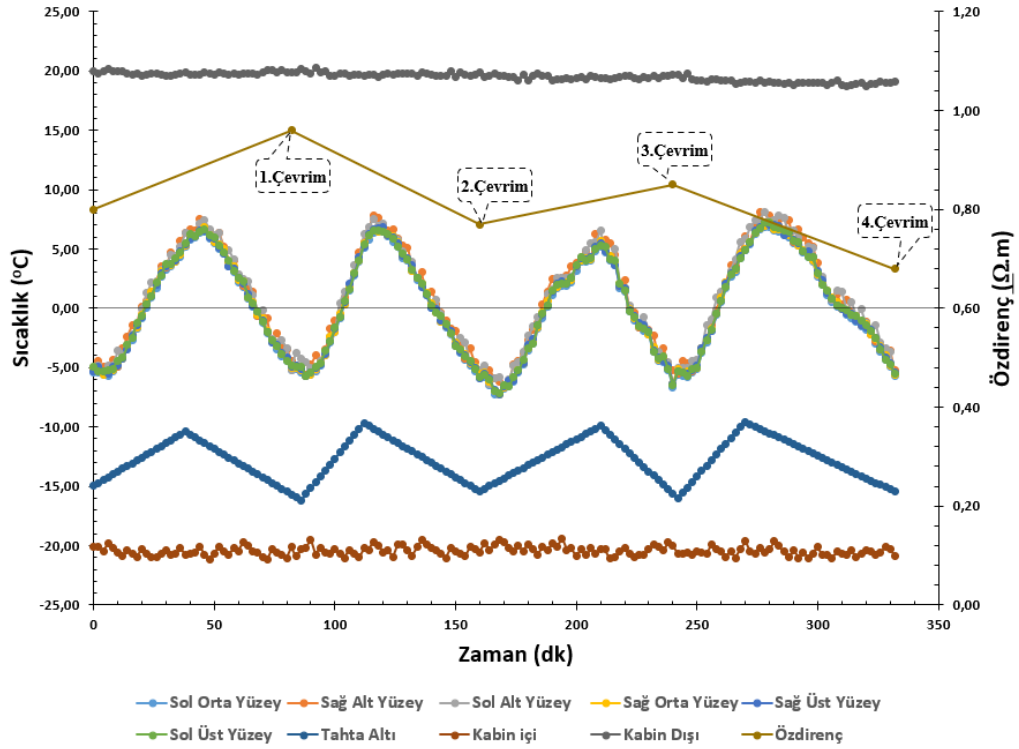
Şekil 4.15 Seri 2 İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen yüzey sıcaklıkları.

4.4.3 Elektriksel Isıtma-Soğutma Sonrası Özdirenç ve Mekanik Özelliklerdeki Değişim Sonuçları

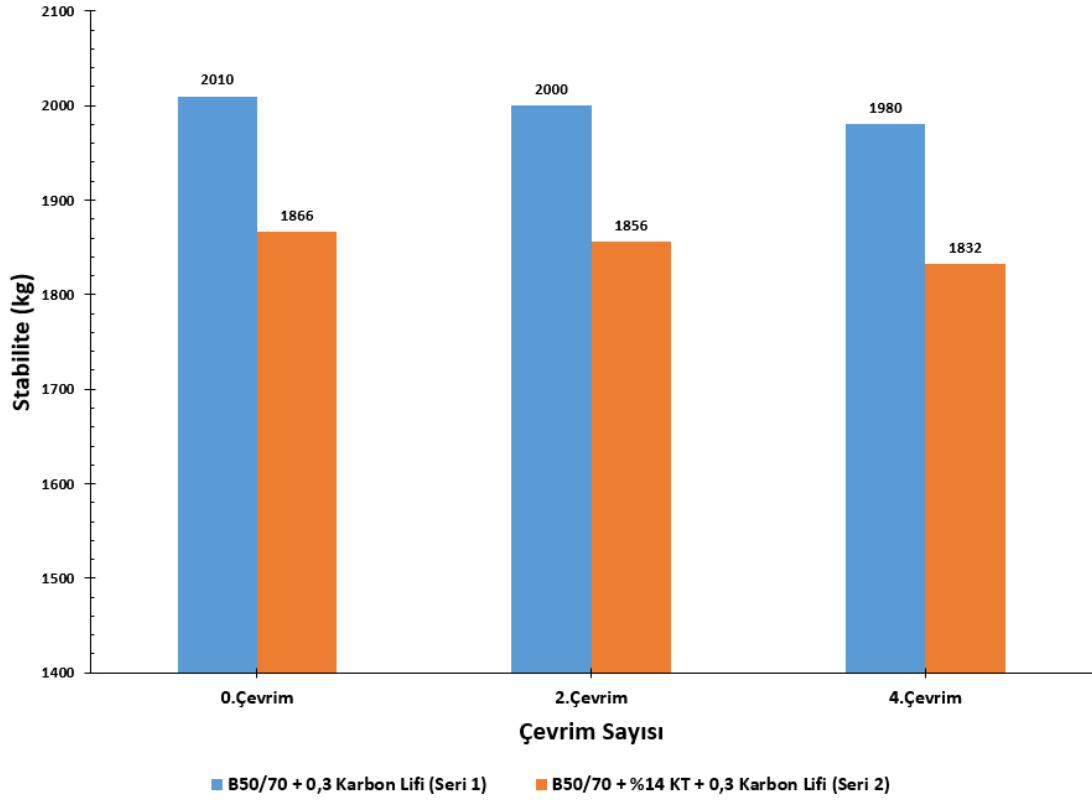
Optimum bitüm yüzdesinde B50/70 + %0,3 Karbon Lifi İAB (Seri 1) ve %14 KT ile modifiye edilmiş B50/70 modifiye bitüm + %0,3 Karbon Lifi (Seri 2) numunelerinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın özdirenç ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. 0-2-4 çevrim sonrası numuneleri özdirenç değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir. Her iki serisinde özdirenç değerleri her çevrim sonucunda değişkenlik göstermiştir. Seri 1’deki sonuçlar incelendiğinde numuneye uygulanan çevrimler sonunda özdirenç değerinde az miktarda artışa sebep olurken Seri 2’deki sonuçlar incelendiğinde numuneye uygulanan çevrimler sonucunda özdirenç değerinde az miktarda azalma meydana gelmiştir. Numuneye uygulanan çevrimin iletkenken yolları etkilediği görülmüştür. Her bir çevrimde numuneye uygulanan elektriksel ısıtma ve soğutma işlemi sonucunda numune içerisinde tekrardan yeni iletken yolların bulunduğu düşünülmektedir. 0-2-4 çevrim sonrası numunelere Marshall Stabilite-Akma deneyi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucu Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Deney sonucunda 4.çevrim sonunda her iki serinin stabilite değerinde yaklaşık %1,5 azalma meydana gelmiş olup, bu azalmanın kayda değer bir azalma olmadığı görülmüştür. Deney sonucundaki her iki serinin stabilite değerleri şartname sınır koşullarını sağlamıştır.



Şekil 4.16 Seri 1 İAB numunesinin donma-elektriksel iletkenlikle çözülme çevriminin özdirence etkisi.



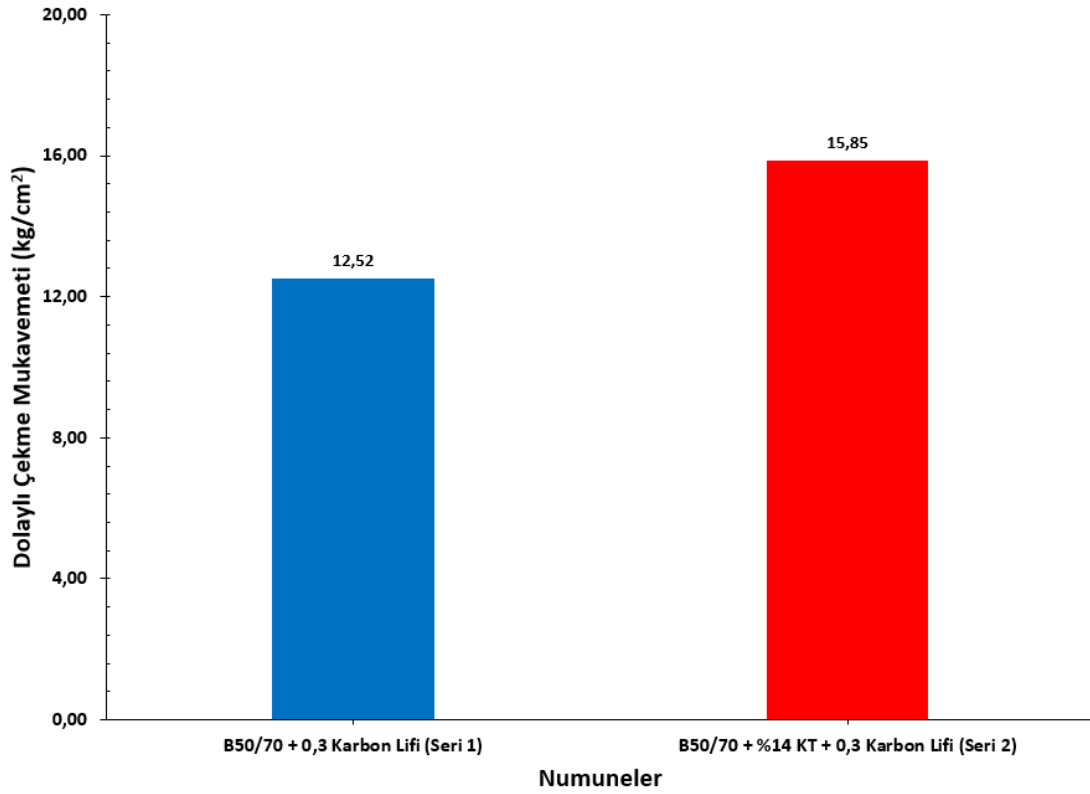
Şekil 4.17 Seri 2 İAB numunesinin donma-elektriksel iletkenlikle çözülme çevriminin özdirence etkisi.



Şekil 4.18 Elektriksel ısıtma ve soğutmanın stabiliteye etkisi.

4.5 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi Sonuçları

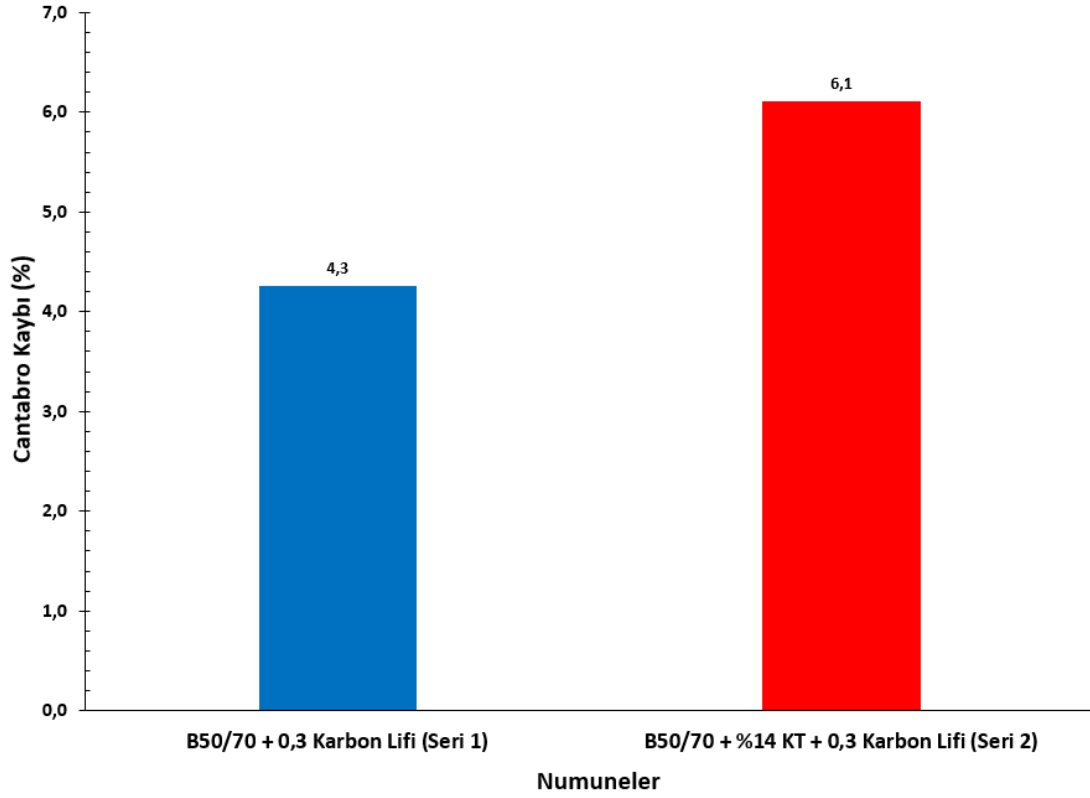
Optimum bitüm yüzdesinde üretilen B50/70 + %0,3 Karbon Lifi İAB (Seri 1) ve %14 KT ile modifiye edilmiş B50/70 modifiye bitüm + %0,3 Karbon Lifi (Seri 2) numunelerinin maruz kaldığı gerilme durumunu ve çekme gerilmelerine karşı dayanımının belirlenmesi için dolaylı çekme deneyi yapılmıştır. Ayrıca bu deney, bitüm filminin çekme dayanımının ön plana çıktığı geçirimli asfalt kaplama karışımların tasarımı açısından önemlidir. İAB numunelerin dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları Şekil 4.19’da verilmiştir. Deney sonucunda Seri 2 İAB numunesinin Seri 1’e göre dolaylı çekme mukavemetinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Seri 2’nin optimum bitüm yüzdesinin Seri 1’e göre daha yüksek olması sonucu bitüm film kalınlığı artması ile mineral agrega ile bitüm arasında adezyonun daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülebilir.



Şekil 4.19 Optimum bitüm yüzdesinde iki farklı seride üretilen İAB numunelerinin dolaylı çekme mukavemeti değerleri.

4.6 Cantabro Deneyi Sonuçları

Optimum bitüm yüzdesinde üretilen B50/70 + %0,3 Karbon Lifi İAB (Seri 1) ve %14 KT ile modifiye edilmiş B50/70 modifiye bitüm + %0,3 Karbon Lifi (Seri 2) numunelerinin sökülme eğiliminin belirlenmesi için Cantabro deneyi yapılmıştır. İAB numunelerin Cantabro kütle kayıpları Şekil 4.20’de verilmiştir. Deney sonucunda Seri 2 numunesi Seri 1’e göre kütle kaybının daha fazla olduğu buda sökülme eğiliminin daha fazla olduğunu göstermiştir. Çalışmada iri agregada kullanılan bazaltın gözenekli yapısı bitüm film kalınlığının artması yani bitüm içeriğinin artmasına sağlamıştır. Bunun sonucunda bitüm içeriğinin artması asfalt numunelerinin sökülme eğiliminin azalmasını sağlamıştır. Bitümün modifiye edilmesi sonucunda mineral agregaya ile bitüm arasındaki adezyonun azaldığı bunun sonucunda Seri 2 numunesinin Seri 1’e göre sökülme eğiliminin artmasına neden olmuştur. Her iki dizaynda üretilen İAB numuneleri Karayolları Teknik Şartnamesine göre %20 kütle kaybı sınır değeri altında kalmıştır.



Şekil 4.20 Optimum bitüm yüzdesinde iki farklı seride üretilen İAB numunelerinin Cantabro kütle kaybı.

4.7 Maliyet Analizi

Bu çalışmada iki farklı dizaynda üretilen Seri 1 ve Seri 2 İAB maliyet analizi yapılmıştır. Yapılan maliyet analizinde kullanılan malzemelerin birim fiyat analizleri yapılmış olup, İAB maliyeti ile geleneksel asfalt betonunun maliyeti karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.3). Birim fiyat analizin de kullanılan fiyatlar piyasa araştırması yapılarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.3'e göre iletken asfalt beton malzemesinin maliyeti, geleneksel asfalt betonunun yaklaşık yirmi katıdır. Bu önemli fark çoğunlukla, geleneksel asfaltta yaygın olarak kullanılan diğer malzemelerle (örn. agrega ve bağlayıcı) karşılaştırıldığında nispeten çok daha pahalı olan iletken asfalt betonunda karbon lifi (KL) kullanımıyla ilgilidir.

Çizelge 4.3 Maliyet analizi.

Bileşenler	Geleneksel Asfalt Betonu Miktarı (kg/ton)	İletken Asfalt Betonu Miktarı (kg/ton)		Birim Fiyatı (₺/ton)	Gelenek sel Asfalt Betonu Fiyatı (₺/ton)	İletken Asfalt Betonunun Fiyatı (₺/ton)	
		Seri 1	Seri 2			Seri 1	Seri 2
İri Agrega (Bazalt)	365	365	365	125,00	45,63	45,63	45,63
İnce Agrega (Kireç Taşı)	575	575	575	100,00	57,50	57,50	57,50
Mineral Filler	60	60	60	100,00	6,00	6,0	6,00
(Kireçtaşı)							
Bitüm	50	55,9	59,5	7804,27	390,21	436,26	464,35
Karbon Tozu	0	0	8,33	26 460,00	0	0	220,41
Karbon Lifi	0	3	3	3 217 536,00	0	9652,61	9652,61
Toplam ton başına maliyet					499,34₺ (26,42\$)	10198,00₺ (539,58\$)	10446,50₺ (552,75\$)

Maliyet analizi sonucunda görüldüğü üzere İAB numunelerinin birim fiyatlarının geleneksel asfalta göre çok yüksek olduğu görülmüştür. İletken asfalt betonu kış aylarında buzlanmanın meydana geldiği köprü, tünel giriş/çıkışları, kavşaklar, hava alanı pisti, alt geçitler, yatay/düşey kurplar gibi kritik yol kesimlerinde kullanılması ile buzlanmadan kaynaklanan maddi ve manevi kayıpların önüne geçilebileceği düşünülmekte olup uzun vade de fayda/maliyet oranının yüksek olacağını düşünülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışma ile KTS (2013) şartnamesine göre ince agregası kireç taşı, kaba agregası bazalt ve mineral filler agregası kireç taşı olan hibrit agrega kullanımıyla, iki farklı bitüm kullanılarak (B50/70 (Seri 1 ve %14 KS ile modifiye edilmiş B 50/70 (Seri 2)) ve iletken katkı olarak ağırlıkça % 0.3 5 mm uzunluğunda karbon lifi kullanılarak İAB numuneleri hazırlanmış ve numuneler üzerinde Marshall dizaynı, elektriksel iletkenlikle ilgili deneyler, donma-çözülme çevrimleri ve çevrim sonrası hem elektriksel iletkenlik hem de mekanik özelliklerdeki değişimi görmek için Gürer vd. (2022) yapmış olduğu çalışma esas alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Yapılan Marshall dizaynı neticesinde Seri 1 ve Seri 2 optimum bitüm yüzdeleri ağırlıkça %5,59 ve %5,95 olarak elde edilmiştir. Bu değerler ekonomik kullanım sınırları içerisinde.
- Hacimsel öz direnç deneyi sonuçları esas alındığında genel olarak hem seri 1 hem de seri 2 numunelerinin oldukça iletken olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, bazaltın gözenekli oluşundan dolayı yapılan İAB dizaynlarında optimum bitüm yüzdeleri Gürer vd. (2022) yapmış olduğu çalışmaya göre daha yüksek değer olarak elde edilmiştir. Bitüm yalıtkan bir malzeme olduğu için yüksek öz dirence sahiptir bu da, agregaların etrafında daha kalın bir bitüm film tabakasının oluşmasına neden olmuştur ve Gürer vd. (2022) yaptığı çalışmaya göre daha yüksek öz direnç değerleriyle sonuçlanmıştır.
- Gürer vd. (2022) çalışmasına göre öz direnç değerlerindeki farklılığın bir nedeni olarak da kaba agrega fraksiyonlarında kullanılan bazalt türü agreganın etkili olduğu düşünülmektedir. Yine bu değerlendirmeye Gürer vd. (2019) yapmış olduğu İAB numunelerdeki ısı iletkenlik ölçümlerinde bazalt içeren numunelerin daha düşük elektriksel ve ısı iletkenlik eğilimi gösterdikleri belirtilmiş olup benzer sonuçların yapılan bu deneysel çalışmada da görüldüğü düşünülmektedir. Yine Pan vd. (2017) tarafından da asfalt betonunun termal özelliklerinin, mineral agreganın termal özelliklerine büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir.

- Marshall numunelerinde yapılan ölçümler sonucunda bitüm yüzdesi arttıkça iletken bileşenlerin numune içinde daha homojen dağıldığı bu nedenle öz direnç değerlerinde önemli derecede azalmaların görüldüğü belirlenmiştir.
- Benzer nedenle bitüm yüzdesi arttıkça Seri 1 ve Seri 2 numunelerinin maksimum sıcaklık değerleri de artış göstermiştir.
- Perkolasyon teorisine göre iletken bileşen sayısı arttığında iletkenlik değerinin daha da geliştiği görülmüştür. Bu durum sabit elektrik gerilimi altında karbon tozu katkılı bitüm ile üretilen numunelerde (Seri 2) daha düşük öz direnç değeri ve daha yüksek sıcaklık değişimleri görülmüştür. Yapılan deney sonuçlarından, İAB üretiminde birden fazla iletken katkı kullanılmasının tek tip katkı kullanılmasına göre elektriksel iletkenlik açısından avantaja sahip olduğu kanıtlanmıştır.
- Termal kamera yardımı ile ısı dağılımı sonuçlarına bakıldığında karbon tozunun İAB'nin ısı dağılımını iyileştirdiği görülmüştür.
- Benzer şekilde aynı buz kalınlığı tabakasına sahip İAB numunelerinin buz eritme süreleri ve kabin içindeki numune sıcaklık değerlerine bakıldığında; karbon tozu katkılı bitüm ile üretilen İAB (Seri 2) daha kısa sürede buz eritmiş olup elektriksel güçle ısıtılan numune sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Birden fazla iletken katkının kullanılması ile karbon lifi miktarı azaltılabilir. Bunun sonucunda hem daha ekonomik hem de daha iletken asfalt betonu elde edilebilir.
- İletken asfalt betonunun ilk üretim maliyeti geleneksel asfalt betonuna göre daha yüksek olduğu fakat uzun vadede düşünüldüğünde bunu amorti edeceği düşünülmektedir. Ayrıca fayda/maliyet açısından bakıldığında kritik kesimlerde meydana gelecek maddi ve manevi kayıp oranları azaltacağı düşünülmektedir.
- Elektrot bağlantı şekilleri İAB numunelerinin iletkenlik ve ısı dağılımını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Bunun sonucunda sahada yapılacak olan geniş ölçekli numuneler için farklı elektrot bağlantıları geliştirilebilir.

- Ortam koşullarının İAB numunesinin elektriksel iletkenlik özelliklerini büyük oranda etkilediği görülmüş olup yapılan deneyler bu elverişsiz durumlarda gerçekleştirilmiştir.
- Bu tip kaplama sistemleri karayollarında buzlanmanın meydana geldiği köprü, viyadük, tünel vb. gibi kritik yol kesimlerinde ve havaalanı pistlerinde uygulanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda ülkemiz savunma açısından önem arz eden soğuk kış iklimine sahip sınır bölgelerindeki askeri havaalanlarında da uygulanması ile savunma araçlarının emniyetli ve güvenli bir şekilde kalkış-iniş yapması sağlanmış olacaktır.
- Yapılan bu çalışmadaki İAB asfalt karışımın trafik ve sürüş güvenliği açısından riskli karayolu kaplamalarında anti-icing olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Abukasm Z. G, 2001, U.S. Patent No. 6,278,085, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ağar E, Kutluhan, S, 2005, Karayollarında Kış Bakımı-Kar ve Buz Kontrolü, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği İstanbul Bülten, (S 76), 10–16.
- Ahmedzade P, Sengoz, B, 2009, Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete, *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 300–305.
- Arabzadeh A, Notani M A, Zadeh A K, Nahvi A, Sassani A, Ceylan H, 2019, Electrically Conductive Asphalt Concrete: An Alternative For Automating The Winter Maintenance Operations of Transportation Infrastructure, *Composites Part B: Engineering*, 173, 106985.
- Bai B C, Park D W, Vo H V, Dessouky S, Im, J S, 2015, Thermal Properties of Asphalt Mixtures Modified with Conductive Fillers, *Journal of Nanomaterials*, 16(1), 255–255.
- Balagh A K G, Naderkhani F, Makis V, 2014, Highway Accident Modeling and Forecasting in Winter, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 384–396.
- Bandara N, Jensen E, Trzaskos M P, Klein-Paste A, 2020, June, Changes in Pavement Friction Levels During Winter Maintenance Operations, *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, January 10–14, Washington D.C., U.S.
- Bao W S, Meguid S A, Zhu Z H, Weng G J, 2012, Tunneling Resistance and Its Effect on The Electrical Conductivity of Carbon Nanotube Nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 111(9), 093726.
- Baranikumar A, 2013, Imparting Electrical Conductivity into Asphalt Composites Using Graphite, Texas A & M University, Master Thesis, Texas, 67p, United States.
- Bardal K G, Jørgensen F, 2017, Valuing The Risk and Social Costs of Road Traffic Accidents–Seasonal Variation and The Significance of Delay Costs, *Transport Policy*, 57, 10–19.

- Bauhofer W, Kovacs J Z, 2009, A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. *Composites, Science and Technology*, 69(10), 1486–1498.
- Cai Z, Martin C R, 1989, Electronically Conductive Polymer Fibers with Mesoscopic Diameters Show Enhanced Electronic Conductivities, *Journal of The American Chemical Society*, 111(11), 4138–4139.
- Chen F, Chen M Z, Wu S P, Zhang J Z, 2012, Research on Pavement Performance ff Steel Slag Conductive Asphalt Concrete For Deicing and Snow Melting, In *Key Engineering Materials* (Vol. 509, Pp. 168–174), Trans Tech Publications Ltd.
- Czerniawska-Kusza I, Kusza G, Dużyński M, 2004, Effect of Deicing Salts on Urban Soils and Health Status of Roadside Trees in The Opole Region, *Environmental Toxicology: An International Journal*, 19(4), 296–301.
- Darabi M K, Al-Rub R K A, Little D N, 2012, A Continuum Damage Mechanics Framework For Modeling Micro-Damage Healing, *International Journal of Solids and Structures*, 49(3–4), 492–513.
- Darabi M K, Al-Rub R K A, Masad E A, Little D N, 2012, A Thermodynamic Framework For Constitutive Modeling of Time-And Rate-Dependent Materials Part II: Numerical Aspects and Application to Asphalt Concrete, *International Journal of Plasticity*, 35, 67–99.
- Derwin D, Booth P, Zaleski P, Marsey W, Flood W, 2003, Snowfree®, Heated Pavement System to Eliminate Icy Runways (No. 2003–01–2145), SAE Technical Paper.
- Fay L, Shi X, 2011, Laboratory Investigation of Performance and Impacts of Snow and Ice Control Chemicals For Winter Road Service, *Journal of Cold Regions Engineering*, 25(3), 89–114.
- Federal Aviation Administration, 2011, *Airplane Flying Handbook* (FAA–H–8083–3A), Skyhorse Publishing Inc.
- Gao J, Guo H, Wang X, Wang P, Wei Y, Wang Z, Yang B, 2019, Microwave Deicing For Asphalt Mixture Containing Steel Wool Fibers, *Journal of Cleaner Production*, 206, 1110–1122.

- García Á, Schlangen E, Van De Ven M, Liu Q, 2009, Electrical Conductivity of Asphalt Mortar Containing Conductive Fibers and Fillers, *Construction and Building Materials*, 23(10), 3175–3181.
- Gürer C, Fidan U, Korkmaz B E, 2022, Investigation of Using Conductive Asphalt Concrete with Carbon Fiber Additives in Intelligent Anti-Icing System, *International Journal of Pavement Engineering*, 1–26.
- Gürer, C, Gürgöze H, 2022, Investigation The Carbon Fiber Based Conductive Asphalt Mixtures For Anti-Icing, *Journal Of Engineering Research*.
- Hasan R, 2021, An Evaluation Of Electrically Conductive Asphalt Mixtures For Electrically Heated Flexible Pavement Systems, Rowan University, Master Thesis, New Jersey, 154p, United States.
- Hasan R, Ali A, Decarlo C, Elshaer M, Mehta Y, 2021, Laboratory Evaluation of Electrically Conductive Asphalt Mixtures For Snow and Ice Removal Applications, *Transportation Research Record*, 0361198121995826.
- Hassan Y, Abd El Halim A O, Razaqpur A G, Bekheet W, Farha M H, 2002, Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt, *Journal of Transportation Engineering*, 128(4), 385–391.
- Huang B, Chen X, Shu X, 2009, Effects of Electrically Conductive Additives on Laboratory-Measured Properties of Asphalt Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 612–617.
- Huang B, Chen X, Shu X, 2009, Effects of Electrically Conductive Additives on Laboratory-Measured Properties of Asphalt Mixtures, *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 21, 612–617.
- Ilıcalı M, Tayfur S, Özen H, Sönmez İ, Eren K, 2001, Asfalt ve Uygulamaları, *İSFALT Bilimsel Yayınları*, 1, 280.
- Jahanbakhsh H, Karimi M M, Jahangiri B, Nejad F M, 2018, Induction Heating and Healing of Carbon Black Modified Asphalt Concrete Under Microwave Radiation, *Construction and Building Materials*, 174, 656–666.

- Jiao W, Sha A, Liu Z, Li W, Jiang W, Qin W, Hu Y, 2020, Study on Thermal Properties of Steel Slag Asphalt Concrete For Snow-Melting Pavement, *Journal of Cleaner Production*, 277, 123574.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Karimi M M, Tabatabaee N, Jahangiri B, Darabi M K, 2017, Constitutive Modeling of Hardening-Relaxation Response of Asphalt Concrete in Cyclic Compressive Loading, *Construction and Building Materials*, 137, 169–184.
- Küçük İ, Kaykılarlı C, Borand G, 2017, X–Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deney Föyü, Bursa Teknik Üniversitesi, Malzeme Proses Laboratuvarı, 1.
- Lee R C, Sackos J T, Nydahl J E, 1984, Bridge Heating Using Ground-Source Heat Pipes, *Transportation Research Record*, 962, 51–56.
- Li H, Zhang, Q, Xiao H, 2013, Self-Deicing Road System with a CNFP High-Efficiency Thermal Source and MWCNT/Cement-Based High-Thermal Conductive Composites, *Cold Regions Science and Technology*, 86, 22–35.
- Li Z, Guo T, Chen Y, Lu Y, Niu X, Yang X, Jin L, 2022, Study on Road Performance and Electrothermal Performance of Poured Conductive Asphalt Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- Liu X, Wu S, 2011, Study on The Graphite and Carbon Fiber Modified Asphalt Concrete, *Construction and Building Materials*, 25(4), 1807–1811.
- Liu Z, Sha A., He R, Xing M, 2016, Antifreeze Asphalt Mixtures Design and Antifreeze Performances Prediction Based on The Phase Equilibrium of Natural Solution, *Cold Regions Science and Technology*, 129, 104–113.
- Liu Z, Xing M, Chen S, He R, Cong P, 2014, Influence of The Chloride-Based Anti-Freeze Filler on The Properties of Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, 51: 133–140.
- Lizasoain-Arteaga E, Indacoechea-Vega I, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D, 2019, Environmental Impact Assessment of Induction-heated Asphalt Mixtures, *Journal of Cleaner Production*, 208, 1546–1556.

- Lo´Fgren S, 2001, The Chemical Effects of Deicing Salt on Soil and Stream Water of Five Catchments in Southeast Sweden, *Water, Air and Soil Pollution*, 130(1–4): 863–868.
- Ma T, Ding X, Wang H, Zhang W, 2018, Experimental Study of High-performance Deicing Asphalt Mixture For Mechanical Performance and Anti-Icing Effectiveness, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018180.
- Maiti, S, Bera R, Karan S K, Paria S, De A, Khatua B B, 2019, PVC Bead Assisted Selective Dispersion of MWCNT For Designing Efficient Electromagnetic Interference Shielding PVC/MWCNT Nanocomposite with Very Low Percolation Threshold. *Composites Part B: Engineering*, 167, 377–386.
- Marsden A J, Papageorgiou, D G, Vallés, C, Liscio A, Palermo V, Bissett M A, Kinloch I A, 2018, Electrical Percolation in Graphene-Polymer Composites, *2D Materials*, 5(3), 032003.
- Messaoud M, Glaoui B, Abdelkhalek O, 2022, The Effect of Adding Steel Fibers and Graphite on Mechanical and Electrical Behaviors of Asphalt Concrete, *Civil Engineering Journal*, 8(2), 348–361.
- Minsk L D, 1968, Electrically Conductive Asphalt For Control of Snow and Ice Accumulation, *Highway Research Record*, 227: 57–63.
- Minsk L D, 1971, U.S. Patent No. 3,573,427, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Nixon W A, 1993, Improved Cutting Edges for Ice Removal, Strategic Highway Research Program Report, SHRP-H-346, August, Washington, DC: Strategic Highway Research Program.
- Nixon W A, Gawronski T J, Whelan A E, 1996, Development of a Model For The Ice Scraping Process (No. IIHR Technical Report No. 383), Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Novotny E V, Murphy D, Stefan H G, 2008, Increase of Urban Lake Salinity by Road Deicing Salt, *Science of The Total Environment*, 406(1-2), 131–144.

- Pan P, Wu S, Hu X, Liu G, Li B, 2017, Effect of Material Composition and Environmental Condition on Thermal Characteristics of Conductive Asphalt Concrete, *Materials*, 10(3), 218.
- Pan P, Wu S, Xiao F, Pang L, Xiao Y, 2015, Conductive Asphalt Concrete: A Review on Structure Design, Performance, and Practical Applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(7), 755–769.
- Paschen S, Bussac M N, Zuppiroli L, Minder E, Hilti B, 1995, Tunnel Junctions in a Polymer Composite. *Journal Of Applied Physics*, 78(5), 3230–3237.
- Ravindren R, Mondal S, Nath K, Das N C, 2019, Prediction Of Electrical Conductivity, Double Percolation Limit and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Copper Nanowire Filled Flexible Polymer Blend Nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 164, 559–569.
- Rodgers W J, Gunay B, Woodside A, 2010, December, Rheological and Electrical Properties of Modified Bitumen, In *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 163, No. 4, Pp. 175–182), Thomas Telford Ltd.
- Sandler J, Kirk J E, Kinloch I A, Shaffer M S P, Windle A H, 2003, Ultra-Low Electrical Percolation Threshold In Carbon-Nanotube-Epoxy Composites, *Polymer*, 44(19), 5893–5899.
- Sanzo D, Hecnar S J, 2006, Effect of Road De-Icing Salt (NaCl) on Larval Wood Frogs (*Rana Sylvatica*), *Environmental Pollution*, 140(2): 247–256.
- Shao-Peng W, Lian-Tong M, Zhong-He S, Dong-Xing X, Yong-Jie X, Wen-Feng Y, 2002, An Improvement in Electrical Properties of Asphalt Concrete, *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 17(4), 69.
- Shi X, Fay L, Yang Z, Nguyen T A, Liu Y, 2009, Corrosion of Deicers to Metals in Transportation Infrastructure: Introduction and Recent Developments, *Corrosion Reviews*, 27, 23–52.
- Tuan C Y, 2008, Roca Spur Bridge: The Implementation of An Innovative Deicing Technology, *Journal of Cold Regions Engineering*, 22(1), 1.

- Vo H V, Park D W, 2017, Application of Conductive Materials to Asphalt Pavement, Advances in Materials Science and Engineering, 2017.
- Vo H V, Park D W, 2017, Application of Conductive Materials to Asphalt Pavement, Advances in Materials Science and Engineering, 2017.
- Wang S, Chung D D L, 1999, Apparent Negative Electrical Resistance in Carbon Fiber Composites. Composites Part B: Engineering, 30(6), 579–590.
- Wang, Y Y, Tan Y Q, Liu K, Xu H N, 2022, Preparation and Electrical Properties of Conductive Asphalt Concretes Containing Graphene and Carbon Fibers, Construction and Building Materials, 318, 125875.
- White S I, Mutiso R M, Vora P M, Jahnke D, Hsu S, Kikkawa, J M, Winey K I, 2010, Electrical Percolation Behavior in Silver Nanowire–Polystyrene Composites: Simulation and Experiment, Advanced Functional Materials, 20(16), 2709–2716.
- Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z, 2005, Investigation of The Conductivity of Asphalt Concrete Containing Conductive Filler, Carbon, 43(7), 1358–1363.
- Wu S, Pan P, Chen M, Zhang Y, 2013, Analysis of Characteristics of Electrically Conductive Asphalt Concrete Prepared By Multiplex Conductive Materials, Journal Of Materials in Civil Engineering, 25(7), 871–879.
- Wu S, Pan P, Chen M, Zhang Y, 2013, Analysis of Characteristics of Electrically Conductive Asphalt Concrete Prepared By Multiplex Conductive Materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 25(7), 871–879.
- Xie P, Beaudoin J J, 1995, Electrically Conductive Concrete and Its Application in Deicing, Special Publication, 154, 399–418.
- Yang Q, Li X, Wang P, 2013, Resistivity Measurement of Conductive Asphalt Concrete Based on Two-Electrode Method, Journal of Central South University, 20(9), 2599–2604.
- Yehia S A, Tuan C Y, 1998, Bridge Deck Deicing, Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations, 1.

- Yehia S, Tuan C Y, Ferdon D, Chen B, 2000, Conductive Concrete Overlay For Bridge Deck Deicing: Mixture Proportioning, Optimization and Properties, Materials Journal, 97(2), 172–181.
- Yu W, Yi X, Guo M, Chen L, 2014, State of The Art and Practice of Pavement Anti-Icing and De-Icing Techniques, Sci, Cold Arid Reg, 6(1), 14–21.
- Zadri Z, Glaoui B, Abdelkhalek O, 2022, Enhancement of Electrical and Mechanical Properties of Modified Asphalt Concrete with Graphite Powder, Civil Engineering Journal, 8(1), 124–133.
- Zhou C X, Tan Y Q, 2009, Study on Anti-Icing Performance of Pavement Containing a Granular Crumb Rubber Asphalt Mixture, Road Materials and Pavement Design, 10(1): 281–294.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.atmos.washington.edu/~cliff/Roadway2.htm>, 24.10.2022
- 2- <https://www.dtn.com/4-things-you-need-to-know-about-road-and-bridge-frost/>, 24.10.2022
- 3- <https://www.dowaksa.com/tr/index.html>, 06.11.2022
- 4- <https://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-difraktometresi>, 04.01.2023