



**KARBON LİFİ KATKILI İLETKEN ASFALT BETONLARININ AKILLI
BUZLANMA ÖNLEYİCİ SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Enis KORKMAZ

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Doç. Dr. Uğur FİDAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2021

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.45 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON LİFİ KATKILI İLETKEN ASFALT BETONLARININ
AKILLI BUZLANMA ÖNLEYİCİ SİSTEMLERDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Burak Enis KORKMAZ

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman

Doç. Dr. Uğur FİDAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2021

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.

07 / 01 / 2021



Burak Enis KORKMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON LİFİ KATKILI İLETKEN ASFALT BETONLARININ AKILLI BUZLANMA ÖNLEYİCİ SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Burak Enis KORKMAZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

İkinci Danışman: Doç. Dr. Uğur FİDAN

Yollarda meydana gelen buzlanma önemli sorunlara neden olmaktadır. Bu tip sorunların önüne geçmek için yaygın olarak geleneksel buzlanma önleme yöntemleri kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte buzlanma ile mücadelede de farklı modern yöntemler ortaya çıkmaya başlamıştır. İletken Asfalt Betonu (İAB) bu modern yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, İAB'nin iletkenlik ve mekanik özellikleri artırılarak akıllı buzlanma önleyici bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemin, Akıllı Ulaşım Sistemlerine (AUS) entegre edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı seri İAB numunesi üretilerek, Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ) tip 2 aşınma tabakasına uygun marshall dizaynı gerçekleştirilmiştir. Numunelerin her ikisinde iletken bileşen olarak %0,3 oranında karbon lifi (KL) bulunmaktadır. Seri 1 ve Seri 2'de sırasıyla Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) blok kopolimeri ve SBS +%14 karbon siyahı (KS) ile modifiye edilmiş bağlayıcılar kullanılmıştır. Optimum bitüm oranında hazırlanan iki seri numuneleri üzerinde ısıl dağılım durumu, buz eritme performansı ve elektriksel ısıtma-soğutma çevrim deneyleri yapılmıştır. Çevrim öncesi ve sonrası yapılan deneylerle İAB numunelerinin uzun dönem performansı test edilmiştir. Son olarak akıllı buzlanma önleme sistemi geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, iletken bileşen sayısının artmasıyla iletkenlik özelliklerinin geliştiği ve bu tip sistemlerin AUS ile entegre edilerek kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

2021, xvi + 122 sayfa

Anahtar Kelimeler: İletken Asfalt Betonu, Buzlanmanın Önlenmesi, Akıllı Ulaşım Sistemleri, Akıllı Buzlanma Önleme Sistemi.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF USING CONDUCTIVE ASPHALT CONCRETE WITH CARBON FIBER ADDITIVES IN INTELLIGENT ANTI-ICING SYSTEMS

Burak Enis KORKMAZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Uğur FİDAN

The icing that occurs on the roads causes serious problems. Traditional anti-icing methods are widely used to prevent such problems. With technological developments, different modern methods have started to emerge in ice removal. Conductive Asphalt Concrete (CAC) is one of these modern methods. In this study, an intelligent anti-icing system has been developed by increasing the conductivity and mechanical properties of the CAC. It is aimed to integrate this developed system into Intelligent Transportation Systems (ITS). For this purpose, two different series of CAC specimens were produced, and a marshall design in accordance with the Highway Technical Specification (HTS) type 2 wearing course was realized. Both specimens contain 0,3% carbon fiber (CF) as the conductive component. Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) block copolymer and SBS + 14% carbon black (KS) modified binders are used in Series 1 and Series 2, respectively. Thermal diffusivity state, ice melting performance, and electrical heating-cooling cycle tests were performed on specimens of two series prepared at optimum bitumen ratio. The long-term performance of CAC specimens has been tested with the experiments performed before and after the cycle. Finally, an intelligent anti-icing system has been developed. As a result of the study, it was concluded that the conductivity properties improved with the increase in the number of conductive components and that such systems can be used by integrating with ITS.

2021, xvi + 122 pages

Keywords: Conductive Asphalt Concrete, Anti-icing, Intelligent Transportation Systems, Intelligent Anti-icing System.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Do. Dr. Cahit GÜRER'e ve ikinci tez danışmanım Do. Dr. Uğur FİDAN'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez alışmasını 19.FEN.BİL.45 proje ile AK-BAPK tarafından destekleyen Afyon Kocatepe niversitesine teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Burak Enis KORKMAZ

Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Yollardaki Buzlanma Oluşum Şartları.....	5
2.2 Yollardaki Kar ve Buz Kontrol Yöntemleri	6
2.2.1 Geleneksel Yöntemler	7
2.2.1.1 Fiziksel	7
2.2.1.2 Kimyasal.....	8
2.2.2 Modern Yöntemler	13
2.2.2.1 Elektriksel İletken Asfalt Betonlu Sistemi	13
2.2.2.2 Elektrik Kablolarıyla Isıtma Sistemi	15
2.2.2.3 Hidronik Isıtma Sistemi.....	16
2.2.2.4 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemi	17
2.2.2.5 Süperhidrofobik (Süper Su İtici) Kaplama Sistemi.....	17
2.3 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Buzlanma Önleme Konsepti	19
2.4 Elektriksel İletkenlik Arkasındaki Kavramlar	22
2.4.1 Direnç, Özdirenç ve İletkenlik	22
2.4.1.1 İletken Asfalt Betonunun Elektriksel Direnç Ölçümü	25
2.4.2 İletken Asfalt Betonunun Elektriksel Direnç ile Isıtılması	27
2.4.3 Perkolasyon Teorisi.....	28
2.5 İletken Asfalt Betonunda Kullanılan İletken Bileşenler	31
2.5.1 Karbon Lifi.....	31
2.5.2 Çelik Lifi ve Çelik Yünü.....	33

2.5.3 Manyetit	33
2.5.4 Karbonil Demir Tozu	34
2.5.5 Grafit	34
2.5.6 Karbon Siyahı	35
2.5.7 Alüminyum Talaşı.....	36
2.5.8 Çelik Cürufu.....	36
2.6 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Konusu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar	37
3. MATERYAL ve METOT	50
3.1 Materyal.....	50
3.1.1 Agrega.....	50
3.1.2 Bitüm.....	51
3.1.3 SBS.....	52
3.1.4 Karbon Siyahı	53
3.1.5 Karbon Lifi.....	53
3.2 Yöntem.....	54
3.2.1 Agrega Deneyleri	56
3.2.1.1 Agrega Özgül Ağırlık Deneyi	56
3.2.1.2 Los Angeles Aşınma Deneyi.....	61
3.2.1.3 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi.....	61
3.2.1.4 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi	62
3.2.2 Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması	63
3.2.2.1 SBS Modifiye Bitüm Numunelerinin Üretilmesi.....	63
3.2.2.2 SBS+KS Modifiye Bitüm Numunelerinin Üretilmesi.....	64
3.2.3 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerinde Uygulanan Deneyler.....	64
3.2.3.1 Bitüm Özgül Ağırlık Deneyi	64
3.2.3.2 Penetrasyon Deneyi.....	66
3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi.....	67
3.2.3.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi	68
3.2.4 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti	69
3.2.4.1 Penetrasyon İndeksi (PI)	69
3.2.4.2 Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN)	70
3.2.5 İAB Numunelerinin Üretilmesi.....	70

3.2.5.1 Üretilen İAB Numunelerinin Özdirencinin ve Isınma Potansiyelinin Ölçülmesi	73
3.2.5.2 Üretilen İAB Numunelerinin Optimum Bitüm Oranının Bulunması... 74	
3.2.6 Optimum Bitüm Oranında Hazırlanan İAB Numunelerine Uygulanan Deneyler.....	78
3.2.6.1 Isıl Dağılım Durumunun Belirlenmesi	78
3.2.6.2 Buz Eritme Performansının Belirlenmesi.....	79
3.2.6.3 Elektriksel Isıtma-Soğutmaya Tabi Tutulması.....	81
3.2.7 Akıllı Buzlanma Önleyici Sistemin Geliştirilmesi.....	82
4. BULGULAR	84
4.1 Agrega Deneyleri Sonuçları.....	84
4.1.1 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi Sonuçları.....	84
4.1.2 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi Sonuçları.....	84
4.2 Modifiye Bitüm Deneyleri Sonuçları	85
4.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları	85
4.2.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları	85
4.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	86
4.2.4 Viskozite Deneyi Sonuçları	87
4.3 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Sonuçları.....	89
4.4 Farklı Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları.....	90
4.4.1 Özdirenç ve Isınma Potansiyeli Deneyi Sonuçları.....	91
4.4.2 Marshall Stabilite – Akma Deneyi Sonuçları	94
4.5 Optimum Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları....	98
4.5.1 Isıl Dağılım Sonuçları	98
4.5.2 Buz Eritme Performansı Sonuçları	100
4.5.3 Elektriksel Isıtma-Soğutma Sonrası Özdirenç ve Mekanik Özelliklerdeki Değişim Sonuçları	103
4.6 Akıllı Buzlanma Önleyici Sistem Deney Sonuçları	105
4.7 Maliyet Analizi	106
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	107
6. KAYNAKLAR.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A ve I	Akım
D	Çap
R	Direnç
ρ	Elektriksel Özdirenç
S	Elektrot Kesit Alanı
V	Gerilim
t	Kalınlık veya Zaman
CaCl ₂	Kalsiyum Klorür
CMA	Kalsiyum Magnezyum Asetat
MgCl ₂	Magnezyum Klorür
m	metre
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
Ω	Ohm
π	Pi
KAc	Potasyum Asetat
°C	Santigrad Derece
S	Siemens
NaCl	Sodyum Klorür
P	Yük
MPa	Megapascal
%	Yüzde

Kısaltmalar

ABPs	Tarımsal Yan Ürünler (Agricultural By-Products)
AKOM	Afet Koordinasyon Merkezi
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
AL	Asbest (mineral) Lifi (Asbestos (mineral) Fiber)
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
AUS	Akıllı Ulaşım Sistemleri (Intelligent Transportation Systems)
BEUS	Buzlanma Erken Uyarı Sistemi
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım (Hot Mix Asphalt)
CB	Karbon Siyahı (Carbon Black)
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri (Geographic Information Systems)
CL	Cam Lifi (Glass Fiber)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DMS	Değişken Mesaj Sistemi (Variable-Message Sign)
EM	Elektromanyetik (Electromagnetics)
FAA	Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
GP	Grafit Tozu (Graphite Powder)
GPRS	Genel Paket Radyo Servisi (General Packet Radio Service)
IKS	Isıtmalı Kaplama Sistemi (Heated Pavement System)
İAB	İletken Asfalt Betonu (Conductive Asphalt Concrete)

Kısaltmalar (Devam)

İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KL	Karbon Lifi (Carbon Fiber)
KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi (Highway Technical Specification)
LBL	Tabaka Tabaka (Layer by layer)
MS	Marshall Stabilite (Marshall Stability)
NL	Naylon Lifi (Nylon Fiber)
PAN	Poliakrilonitril
PÇB	Portland Çimento Betonu (Portland Cement Concrete)
PI	Penetrasyon İndeksi (Penetration Index)
PL	Polyester Lifi (Polyester Fiber)
PM	Partikül Madde (Particulate Matter)
PPL	Polipropilen Lifi (Polypropylene Fiber)
PTFE	Politeirafloretilen (Polytetrafluoroethylene)
PVN	Penetrasyon-Viskozite Numarası (Penetration-Viscosity Number)
RWIS	Yol Meteoroloji Bilgi Sistemi (Road Weather Information Systems)
SBS	Stiren Bütadien Stiren
SBSMB	Stiren Bütadien Stiren Modifiye Bitüm (Styrene Butadiene Styrene Modified Bitumen)
SL	Selüloz Lifi (Cellulose Fiber)
SPI	Seri Çevre Arayüzü (Serial Peripheral Interface)
SS	Çelik Cürufu (Steel Slag)
SW	Çelik Yünü (Steel Wool)
TMA	Taş Mastik Asfalt (Stone Mastic Asphalt)
TSR	Çekme Mukavemet Oranı (Tensile Strength Ratio)
UART	Genelgeçer Eşzamansız Alıcı-Verici (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
UTM	Evrensel Deneme Aygıtı (Universal Testing Machine)
Va	Hava Boşluğu (Air Void)
vb.	Ve benzeri
VFA	Asfalt ile Dolu Boşluklar (Voids Filled with Asphalt)
VMA	Mineral Agregata içerisindeki Boşluklar (Voids in the Mineral Aggregate)
YKSD	Yüzey Kuru Suya Doygun
XRD	X-Işını Difraktometre (X-ray Powder Diffraction)
XRF	X-Işını Floresans Spektroskopisi (X-ray Fluorescence)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kar eritebilen bir İAB kaplama sistemi örneği (Arabzadeh 2018).	14
Şekil 2.2 Elektriksel iletken asfalt betonun muhtemel uygulamaları ve faydaları (Park vd. 2014).	14
Şekil 2.3 Elektrik kablolarıyla ısıtma sisteminin çalışma prensibi (Lai vd. 2015).	15
Şekil 2.4 Hidronik ısıtma sisteminin ana bileşimi (Gao vd. 2010).	16
Şekil 2.5 Otomatik solüsyon püskürtme sistemi (Monsere vd. 2006).	17
Şekil 2.6 Su damlacıkları - asfalt betonu etkileşimi: (a) üç damlacık için su temas açısı ölçümü örneği ve (b) kaplanmış (solda) ve kaplanmamış (sağda) asfalt betonunda su damlasının davranışı (Arabzadeh vd. 2016).	18
Şekil 2.7 Tabaka – tabaka (LBL – layer by layer) yöntemi: (a) epoksi ve PTFE'yi püskürtmek için kurulan püskürtme tabancası ve (b) PTFE nanoparçacık miktarı düşük (sol) ve yüksek (sağ) olduğu durum (Arabzadeh vd. 2016). ...	19
Şekil 2.8 Buzlanma Erken Uyarı Sistemi (BEUS) ile Akıllı Ulaşım Sistemleri Konsepti (İnt.Kyn.3, İnt.Kyn.4).	21
Şekil 2.9 Liflerin ortak temas alanından elektron geçiş mekanizması (Arabzadeh 2018).	23
Şekil 2.10 Özdirenç ve direnç arasındaki ilişki.	24
Şekil 2.11 İAB'nin elektriksel direnç ile ısıtma işleminin gösterimi (Chen ve Balieu 2020).	28
Şekil 2.12 İletken malzemelerin hacim içeriğinin kompozit sistemlerdeki iletkenlik kalitesi üzerine etkisi (Arabzadeh 2018).	29
Şekil 2.13 Karbon siyahı içeriğine karşı termal iletkenlik veya elektrik özdirenci (Cong vd. 2014).	30
Şekil 2.14 SBS modifiye bitüm karışımında karbon siyahının dağılımının iki farklı durumu (Cong vd. 2014).	30
Şekil 2.15 İletken modelin şematik gösterimi (a) ve (b) tek grafit parçacığı tarafından oluşturulan kesikli iletken yol (grafit içeriği <perkolasyon eşiği); (c) Grafit ve karbon lifinden oluşan sürekli iletken yol (köprüleme etkisi) (Liu vd. 2008).	31
Şekil 2.16 O'Hare Uluslararası Havalimanı'ndaki bir pist yoluna kurulan Snowfree® sisteminin şeması (Derwin vd. 2003).	39
Şekil 2.17 Hazırlanan küçük ölçekli kaplamanın boyutları ve ölçüm noktaları şeması. 41	
Şekil 2.18 X-ışını bilgisayarlı tomografi ile elde edilen materyal dağılım görüntüleri: (a) agrega ve çelik çürufu; (b) asfalt harcı; (c) çelik lifi (Wu vd. 2013).	41
Şekil 2.19 Hibrit ısıtmalı bir kaplama sisteminin şeması (Arabzadeh 2018).	42
Şekil 2.20 İletken asfalt betonu numune tipleri, a) Dönel (gyratory) numune, b) Plaka numunesi (Arabzadeh vd. 2019).	44

Şekil 2.21 Kompozit tabakanın kesit şeması (Wang vd. 2020a).....	46
Şekil 2.22 İletken bağlayıcı tabakasının ısıtma etkisinin deneyi (Wang vd. 2020b).	47
Şekil 2.23 Isı iletim deneyinin süreci (Wang vd. 2020c).	48
Şekil 3.1 Seri 1 ve Seri 2’de kullanılan malzeme ve oranları.	55
Şekil 3.2 Tez yöntem akış şeması.	56
Şekil 3.3 Dataloggerin ExceLINUX yazılım arayüzü, a) Sensör kanallarının tanıtım ekranı, b) Sensör verilerinin alındığı ekran.....	74
Şekil 3.4 Akıllı buzlanma önleyici sistemin mimarisi.	82
Şekil 3.5 Akıllı buzlanma önleyici sistemin iş akış diyagramı.	83
Şekil 4.1 Kireçtaşı agregasının XRD sonuçları.....	84
Şekil 4.2 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin özgül ağırlık deneyi sonuçları.	85
Şekil 4.3 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin penetrasyon deneyi sonuçları.	86
Şekil 4.4 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin yumuşama noktası deneyi sonuçları.....	86
Şekil 4.5 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin viskozite deneyi sonuçları. ...	87
Şekil 4.6 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklığı grafiği. ...	88
Şekil 4.7 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklığı grafiği. ...	88
Şekil 4.8 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin Penetrasyon İndeksi (PI) grafiği.....	89
Şekil 4.9 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin Penetrasyon-Viskozite Numarası (PVN) grafiği.....	90
Şekil 4.10 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.	92
Şekil 4.11 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.	92
Şekil 4.12 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.	93
Şekil 4.13 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.....	93
Şekil 4.14 Pratik Özgül Ağırlık ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	95
Şekil 4.15 Stabilitate ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	95
Şekil 4.16 Asfaltla dolu boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	96
Şekil 4.17 Boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	96
Şekil 4.18 Akma ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	97
Şekil 4.19 VMA ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.	97

Şekil 4.20 Marshall katsayısı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	98
Şekil 4.21 %3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen sıcaklıklar.....	102
Şekil 4.22 %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen sıcaklıklar.	102
Şekil 4.23 %3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın öz dirence etkisi.....	104
Şekil 4.24 %3 SBS + %14 KS modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın öz dirence etkisi.....	104
Şekil 4.25 Elektriksel ısıtma ve soğutmanın stabiliteye etkisi.	105
Şekil 4.26 Akıllı buzlanma önleyici sistem ön deneme çalışma sonuçları.	105



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yollardaki kar ve buzlanma ile mücadele yöntemleri.....	6
Çizelge 2.2 Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin en düşük pratik erime sıcaklık değerleri.	10
Çizelge 2.3 Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin korozyon ve çevresel etkileri.	11
Çizelge 2.4 Bazı malzemelerin 20 °C'deki öz direnç değerleri.	24
Çizelge 3.1 Bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakası gradasyonu.	50
Çizelge 3.2 Agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri.	51
Çizelge 3.3 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri.....	52
Çizelge 3.4 SBS polimerinin özellikleri.....	52
Çizelge 3.5 Karbon siyahının özellikleri.....	53
Çizelge 3.6 Karbon lifinin özellikleri.....	53
Çizelge 3.7 Kaba agreganın özgül ağırlık gradasyonu.....	57
Çizelge 3.8 İnce agreganın özgül ağırlık gradasyonu.	59
Çizelge 4.1 Kireçtaşı agregasının XRF sonuçları.	84
Çizelge 4.2 %3 SBS ve %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitümlerin özellikleri.....	90
Çizelge 4.3 Maliyet analizi.....	106

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Kurulumunun ilk canlı gösterimi – 05/03/1995 (Derwin vd. 2003).	39
Resim 3.1 Kireçtaşı agregası, a) 0-4 mm. b) 4-11 mm. C) 11-22 mm.....	50
Resim 3.2 Agregaların hazırlanma aşamaları, a) Eleme, b) Yıkama, c) Kurutma sonrası agregaların temiz kaplarda muhafaza edilmesi.	51
Resim 3.3 SBS polimeri.....	52
Resim 3.4 Karbon siyahı.....	53
Resim 3.5 Karbon lifi, a) Karbon lifi kesimi. b) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon lifi.	54
Resim 3.6 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) cihazı (İnt.Kyn.6).....	62
Resim 3.7 X-Işını Difraktometre (XRD) cihazı (İnt.Kyn.7).....	63
Resim 3.8 Bitüm özgül ağırlık deneyi aşamaları, a) Boş piknometrenin ağırlığı. b) Piknometre+su ağırlığı. c) Piknometre içerisine bitümün yerleştirilmesi d) Piknometre+bitüm ağırlığı. e) Piknometre+bitüm+suyun 25 °C'de ayarlanmış su banyosunda 30 dk bekletilmesi. f) Piknometre+bitüm+su ağırlığı.....	65
Resim 3.9 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları, a) Numunenin oda sıcaklığında bekletilmesi, b) Numunenin su banyosunda bekletilmesi, c-d) Numunenin penetrasyon cihazına yerleştirilmesi ve penetrasyon iğnesinin ayarlanması.66	66
Resim 3.10 Bitüm yumuşama noktası deneyi aşamaları, a) Deneyde kullanılan aparatlar, b) Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) Yüzüklerin cihaza yerleştirilip deneyin başlatılması, d) Bitümün düzenek taban yüzeyine temas etmesi.....	67
Resim 3.11 Bitüm viskozite deneyi aşamaları, a) Bitümün tüpe dökülmesi, b) Numunenin viskozite cihazına yerleştirilmesi, c) Deneyin başlatılması. ...	69
Resim 3.12 İAB numunelerinin üretim aşamaları, a) Agregası karışımlarının hazırlanması, b) Deneyde kullanılacak aparatların ve malzemelerin etüve konulması, c) Spatula ile agregası ve karbon lifinin karıştırılması, d) Bitümün mikser kabına dökülmesi, e) Isıtıcı mikser ile İAB karışımının karıştırılması, f) Sıcaklık ölçümü, g) Kürek içerisindeki malzemenin kalıba dökülerek spatula ile şişlenmesi, h) Marshall tokmağı ile numunenin sıkıştırılması, i) Numune yüzeyine tebeşir ile numune kodunun yazılması, j) Numunenin uygun bir yüzeyde oda sıcaklığında bekletilmesi, k) Numunelerin kriko ile kalıptan çıkarılması, l) Üretilen İAB numuneleri.	72
Resim 3.13 Elektrik ile ısıtma deneyi düzeneği.....	73
Resim 3.14 Marshall Stabilite ve Akma deneyi aşamaları, a) İAB numunelerinin yüksekliklerinin ölçümü, b) Havadaki ağırlık tartımı, c) Sudaki ağırlık tartımı, d) Numunenin yüzey kuru suya doymuş hale getirilmesi, e) Numunelerin su banyosunda koşullandırılması, f) Numunenin Marshall cihazının yağlanmış çenesine yerleştirilerek deneyin yapılması.	75

Resim 3.15	Numune yüzeyindeki ısı dağılımının termal kamera ile gözlenmesi, a) Elektrotların üst ve alt yüzeylerine yerleştirilme durumu, b-c) Elektrotların karşılıklı yan yüzeylerine yerleştirilme durumu.	78
Resim 3.16	Numune üzerinde buz tabakasının oluşturulması, a) Hazırlanan düzenek içerisindeki suyun donması için derin dondurucuya koyulması, b) Deneye hazır hale gelmiş üzerinde buz tabakası oluşmuş numune.	79
Resim 3.17	Kabin içi buz eritme düzeneği.	80
Resim 3.18	Kabin dışı buz eritme düzeneği.	80
Resim 3.19	Numune elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi için hazırlanan düzenek.	81
Resim 4.1	%3 SBS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 1) termal kamera görüntüleri (Üst-Alt yüzey elektrot bağlantılı).	99
Resim 4.2	%3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 2) termal kamera görüntüleri (Üst-Alt yüzey elektrot bağlantılı).	99
Resim 4.3	%3 SBS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 1) termal kamera görüntüleri (Karşılıklı yan yüzey elektrot bağlantılı).	100
Resim 4.4	%3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 2) termal kamera görüntüleri (Karşılıklı yan yüzey elektrot bağlantılı).	100
Resim 4.5	%3 SBS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri (QR kodu ile buz eritme videosunu izleyebilirsiniz.). ...	101
Resim 4.6	%3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri (QR kodu ile buz eritme videosunu izleyebilirsiniz.).	101

1. GİRİŞ

İnsan toplumunun hızla gelişmesiyle beraber, trafik güvenliği ulaşım sistemleri için önemli bir konu haline gelmiştir. Karayollarının trafik güvenliği sadece sürücülerden, araçlardan, bağlı tesislerden ve yönetimden değil, aynı zamanda büyük ölçüde iklim koşullarından da etkilenmektedir. Kış dönemlerinde yoğun kar yağışı ve buzlanma insanların hayatlarını oldukça zorlaştırmaktadır. İnsanoğlunun kontrolünde olmayan olumsuz hava koşullarına karşı zamanında alınmayan önlemler sonucunda maddi ve manevi kayıpların yaşanması da kaçınılmaz olmaktadır. Karayolları ve havalimanı kaplama yüzeylerindeki buz ve kar kaplama-tekerlek arasındaki sürtünme direncinde azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma trafik kazalarına ve uçuş iptallerine sebep olurken, bunun sonucunda ulaşım gecikmeler ve kesintiler meydana gelmektedir. Kar ve buzun giderilmesi için yılda milyonlarca lira harcanmaktadır. Bu yüzden kar ve buzun soğuk iklimler altındaki kaplamalar üzerindeki olumsuz etkileri ile başa çıkmak için, kar ve buz ile mücadele teknolojisi konusu birçok ülkede giderek daha önemli konu olmaya başlamıştır (Jiao vd. 2020a).

Kar ve buz ile mücadele kavramı, en ağır kış şartlarında bile kişilerin yaşam standartlarını hiç değiştirmeden veya asgari oranda değiştirecek biçimde devam etmelerini sağlayarak bunu yönetme işi olarak tanımlanabilir. Yol kaplamalarında oluşmuş kar veya buzun kaldırılmasına yönelik mücadelede mekanik sökme, kumlama, buz çözüme (de-icing) ve buzlanmayı önleme (anti-icing) gibi stratejiler geliştirilmiştir. Mekanik sökme stratejisi, bir aracın önüne bağlı bir bıçak kullanarak karı küreme veya daha derin karlar için kar püskürtme makineleri ile beraber karın daha uzak mesafeye taşınması sağlanmaktadır. Bu stratejinin öncelikli amacı yoldan kar, karla karışık yağmur veya buz fiziksel olarak kaldırmaktır. Kumlama stratejisi ile kaplama yüzeylerinde kar ve buz ile azalan sürtünme direncinin artması sağlanmaktadır. De-icing stratejisi, kar ve buzun “yukarıdan aşağıya” erimesi işlemidir. Bu yöntem, kar ve buz zaten yol yüzeylerine yapışmaya başladığında kullanılmaktadır. Kaya tuzu (NaCl), yol kaplamalarında oluşan buz çözmek için yaygın olarak kullanılan kimyasal maddelerdendir. Kaya tuzlarının ön ıslatılma işlemi, tuzun yola yapışmasına yardımcı olmak için uygulanmaktadır. Anti-icing strateji ise, buzlanmanın başlamadan önlenmesidir. İşlem, yol yüzeyine bir tuzlu su çözeltisinin

püskürtülmesini ve tuzlu suyun kurumasına izin vererek yolda eşit olarak dağılmış tuz kristallerinin ince bir tabaka bırakmasını içermektedir. Bu kurutulmuş kristaller, yağış yol yüzeyine çarptığında aktive olmakta ve böylece buzun kaplamaya yapışması önlenmektedir. Kar ve buz kontrol stratejilerinin ekonomik, güvenli, hızlı ve çevreci olması amacıyla çalışmalar yürütülmeye devam etmektedir (Ketcham vd. 1996, Hansen 2016).

Günümüzde geleneksel kar ve buz mücadelesinden biri olarak uygulanan fiziksel yöntemler, kaplama yüzeyinde her zaman ince bir kar ve buz tabakası bıraktığından ve özel yol geometrileri nedeniyle kar küreme ekipmanlarının manevrasını sınırlandığından dolayı kar ve buz giderilmesinde yetersiz kalmakta bu da yöntemin hem zaman almasına hem de verimsiz olmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu yöntem yol kaplama yüzeylerine zarar vererek maddi kayıplar ile de sonuçlanabilmektedir.

Yollarda kar ve buz mücadelesindeki bir diğer geleneksel yöntemlerden olan buz çözücü kimyasalların kaplamaya püskürtülmesi yaygın olarak kullanılmasına rağmen, kaplama sıcaklığının belli derecenin altına düşmesi ile beraber sodyum klorür (NaCl) gibi buz çözücü kimyasalların etkinliği de düşmektedir. Aynı zamanda bu tür kimyasal maddelerin kullanımı ekolojik çevreye, kaplamaya ve araçlara zarar vermektedir. Son yıllarda çevreci kimyasallar kullanılmasıyla beraber, bu kimyasallar diğer kimyasallara göre pahalı maddeler olduğu bilinmektedir.

Geleneksel yöntemlerin dezavantajları;

- İş gücüne olan bağlılık,
- Araçların yüksek bakım-onarım ve yakıt giderleri,
- Yolların kapanması ile gecikmelerin yaşanması,
- Kimyasal yöntemlerin kullanım sıcaklık aralığının sınırlı olması,
- Kullanılan maddeler sonucu drenaj tesislerinde tıkanmalar,
- Çevreye, kaplamaya ve araçlara zarar vermesi,
- Hızlı müdahalenin olmaması gibi örnekler verilebilir olup, bu yöntemler maddi ve manevi olumsuzluklardan dolayı günümüzde tercih sebebi olmaktan uzaklaşmaktadır.

Günümüzde ise geleneksel yöntemlerin neden olduğu olumsuzlukları bertaraf edecek modern yöntemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle kar ve buzlanma açısından kritik yerler olan; köprüler, tüneller, yatay ve düşey kurplar, yürüyüş yolları, otoparklar, acil servis girişleri, garaj yolları, alt geçitler, yükleme rıhtımları, havaalanı pistleri ve otobüs durakları gibi ulaşım yollarında buzlanmanın önlenmesinde modern yöntemlerin kullanımı amaçlanmaktadır. Ayrıca yollarda buzlanma açısından kritik yerlerin belirlenmesinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinden (CBS) faydalanılarak, bölgelerin kar ve buzlanma açısından düşük, orta ve yüksek yoğunluk derecelerine göre sınıflandırılmasıyla etkili mücadele plan çalışmaları yürütülebilir. Bu modern yöntemlere elektriksel iletken asfalt betonu (İAB) sistemi, elektrik kabloları ile ısıtma sistemi, hidronik ısıtma sistemi, otomatik solüsyon püskürtme sistemi ve süperhidrofobik (süper su itici) kaplama teknikleri örnek olarak verilebilir.

Modern yöntemlerin geleneksel yöntemlere göre avantajları;

- Oldukça etkili ve çevre dostu olması,
- Akıllı sistemlerle uzaktan kontrol edilebilirliği (süper su itici (süperhidrofobik) kaplama ve donmayan asfalt karışımlar bu konuda hariç tutulabilir. Fakat diğer modern yöntemler ile beraber hibrit bir sistem oluşturulabilir.),
- İletken atık maddeleri değerlendirilmesi ile çevrenin korunması ve sürdürülebilirliğin sağlanması,
- Uzun dönem maliyetlerinin geleneksel yöntemlere göre düşüklüğü,
- Acil eylem planının başarı bir şekilde uygulanması gibi örnekleri verilebilir.

Bu çalışmanın konusu olan İAB sistemi yönteminde geleneksel asfalt betonuna içerisine çeşitli oranlarda iletken bileşenler eklenerek iletken hale getirilebilmektedir. İAB'den geçen bir elektrik akımı Joule ısıtma yasasına dayanarak kar birikmesini ve asfalt kaplama yüzeyindeki buzlanmayı önleyecek kadar ısı üretebilmektedir (Pan vd. 2015). Aynı zamanda sıcaklık, nem ve rüzgar vb. sensörler vasıtasıyla yol yüzeyinde buzlanmaya veya kar birikmesine sebep olacak faktörler ölçülüp yapay zeka teknolojilerinden faydalanılarak uzaktan kontrol sistemleri ile takibi yapıp akıllı bir sistem oluşturulabilir. Böylelikle yollarda kar ve buzlanma ile mücadelede hızlı ve efektif çözüm sağlanmış olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında, İAB'nin iletkenlik ve mekanik özellikleri arttırılarak akıllı buzlanma önleyici bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemin, Akıllı Ulaşım Sistemlerine (AUS) entegre edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı seri İAB numunesi üretilerek, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) tip 2 aşınma tabakasına uygun marshall dizaynı gerçekleştirilmiştir. Numunelerin her ikisinde iletken bileşen olarak %0,3 oranında karbon lifi (KL) bulunmaktadır. Seri 1 ve Seri 2'de sırasıyla Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) blok kopolimeri ve SBS +%14 karbon siyahı (KS) ile modifiye edilmiş bağlayıcılar kullanılmıştır. Optimum bitüm oranında hazırlanan iki seri numuneleri üzerinde ısıl dağılım durumu, buz eritme performansı ve elektriksel ısıtma-soğutma çevrim deneyleri yapılmıştır. Çevrim öncesi ve sonrası yapılan deneylerle İAB numunelerinin uzun dönem performansı test edilmiştir. Son olarak akıllı buzlanma önleme sistemi geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölüm kapsamlı bir literatür taraması sunmakta olup, altı başlıktan oluşmuştur. Başlıklarda ele alınan konular ise şunlardır:

- Birinci başlıkta yollardaki buzlanma oluşum şartları anlatılmıştır.
- İkinci başlıkta yollardaki kar ve buzlanma mücadelesinde kullanılan geleneksel ve modern yöntemler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.
- Üçüncü başlıkta Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Buzlanma Önleme Konseptinden bahsedilmiştir.
- Dördüncü başlıkta araştırma konusu ile ilişkili olan elektriksel iletkenlik konusu hakkında temel bilgiler verilmiş ve perkolasyon teorisinin mantığı açıklanmıştır.
- Beşinci başlıkta iletken asfalt betonlarında kullanılan iletken bileşenlerden bahsedilmiştir.
- Son başlıkta araştırma konusu olan yollardaki kar ve buzlanma mücadelesinde modern yöntemlerden olan iletken asfalt betonu ile ilgili yapılmış önceki çalışmalara yer verilmiş olup, yapılan çalışmanın diğerlerinden farkı ortaya konulmuştur.

2.1 Yollardaki Buzlanma Oluşum Şartları

Bir karayolunda buz oluşması için kaplama yüzey sıcaklığının yaklaşık 0 °C'nin (donma noktası) altına düşmesi ve yüzeyde nem (su) olması gerekmektedir. Bu durum çeşitli şekillerde meydana gelebilmektedir:

- Don,
- Soğuk bir yol yüzeyinden geçen sis,
- Yeraltı suyu sızıntısının veya erimiş karın donması,
- Yağışla birlikte ayaz.

Don genellikle yavaş oluşmaktadır. Bu nedenle don, sisle ilgili ve diğer buzlanma türlerinden daha az tehdit oluşturabilir. Ancak dona bağlı karayolu buzlanmasının birçok

kazaya neden olduğu unutulmamalıdır. Sis, büyük miktarda su içermektedir. Eğer bir sis yığını donma noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar soğumuş bir yolun üzerinden geçerse, buzlanma hızlı ve şiddetli olmakta ve dakikalar içinde kalın bir buz tabakası birikebilmektedir. Yol yüzeyindeki nem, soğuk ve kuru havalarda genellikle çok hızlı donmaktadır. Bu nedenle, yol bakım personelinin nemli yol kesimlerine aşına olması ve hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düştüğü soğuk gecelerde bu kesimleri sık sık kontrol etmesi önemlidir. Geceleri karayolu yüzeyi genellikle altındaki zeminden daha soğuktur. Yol yüzeyinin altından iletilen ısı, gece sıcaklık düşüşlerini azaltarak, buzlanma olasılığını düşürmektedir. Köprülerin altı açık olduğundan alttan ısı almazlar. Bu nedenle, köprüler, özellikle zeminin nispeten sıcak olduğu kış mevsiminin başlarında, normal yol yüzeylerine kıyasla geceleri karayolu buzlanmasına daha fazla eğilimlidir. En büyük buzlanma tehdidinin olduğu saatler sabah 5 ile 8 arasında olduğu görülmüştür. Resmî hava gözlem yerlerindeki sıcaklıklar genellikle yaklaşık yerden 1,5 m yükseklikten ölçülmektedir. Soğuk ve bulutsuz gecelerde hava sıcaklıkları genellikle yol yüzeyindeki sıcaklıklardan daha yüksektir. Bu nedenle, hava sıcaklıkları yaklaşık 3 °C'nin altına düştüğünde, kaplama yüzeyinde buzlanma koşulları oluşuyor olabilir (İnt.Kyn.1).

2.2 Yollardaki Kar ve Buz Kontrol Yöntemleri

Kar ve buzlanma mücadelesi konusunda önemli sayıda çalışma olmasına rağmen, tek bir çözüm mevcut değildir. Birçok çözüm yöntemi belirtilmiş olup, bu yöntemler Çizelge 2.1'de verilmiştir (Gürer ve Düşmez 2015, Gürer ve Akbulut 2017, Gürer vd. 2019a, Gürer ve Düşmez 2019, Gürer ve Elmacı 2019, Gürer vd. 2019b).

Çizelge 2.1 Yollardaki kar ve buzlanma ile mücadele yöntemleri.

KAR VE BUZ İLE MÜCADELE YÖNTEMLERİ		
Geleneksel Yöntemler		Modern Yöntemler
Fiziksel Yöntemler	Kimyasal Yöntemler	
Kar Küreme Aracı		Elektriksel İletken Asfalt Betonu Sistemi
Kar Püskürtme Aracı	Buzlanma Önleyici	Elektrik Kablolarıyla Isıtma Sistemi
Aşındırıcı Madde Kullanımı	Kimyasallar Kullanmak	Hidronik Isıtma Sistemi
		Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemi
		Süperhidrofobik (Süper Su İtici) Kaplama Teknikleri

2.2.1 Geleneksel Yöntemler

Geleneksel yöntemlerin ortak özelliği yol kaplaması üzerinde küreme yapmaya ve kimyasal veya aşındırıcı madde kullanmaya başlamadan önce kaplama yüzeyinde kar birikmesini beklemektir. Daha sonra kaplamadan buzu çözme işlemi yapılmaktadır. Genellikle kar-kaplama arayüzündeki bağı yok etmek için çok miktarda kimyasal madde gereklidir. Bu yöntemler, gecikmelerin sonucu olarak daha yüksek maliyet ve daha az güvenlik sağlamaktadır (Ketcham vd. 1996).

2.2.1.1 Fiziksel

Kar ve buz mücadelesinde fiziksel yöntemlerin olan kar küreme ve kar püskürtme araçları ile kaplamadan karın ve buzun uzaklaştırılması sağlanırken, aşındırıcı madde kullanımı ile de yol-tekerlek arası sürtünme direncinin artırılması sağlanmaktadır.

Kar küreme (plowing) ve kar püskürtme (blower) araçları

Kar küreme ve kar püskürtme araçları, yol kaplamalarındaki kar ve buzu mekanik olarak kaldırma çalışmalarında kullanılan en yaygın fiziksel yöntemlerdendir. Fakat bu yöntemdeki araç ve ekipmanları kullanan operatörleri istihdam etmek, aynı zamanda araçların bakım ve onarım masrafı maliyetlidir.

Aşındırıcılar

Kaplama yüzeyindeki sürtünme katsayısında hızlı bir artışın gerektiği özellikle kimyasal etkinin düşük olduğu sıcaklıklarda kar veya buzun kaplamaya güçlü bir şekilde bağlandığında ve kolay çıkarılamadığı durumlarda aşındırıcı madde kullanımının gerekli olabileceği düşünülebilir. Bu tür maddelerin kullanımının tek işlevi sürtünme katsayısını arttırmaktır. Trafik hızlı bir şekilde aşındırıcı maddeleri dağıtacağı için bu artış kısa süreli olacaktır. Bu durumdan kaçınmak için ıslak aşındırıcı kullanılabilir. Aşındırıcı ve kimyasal karışımlar buz önleme açısından tek başına aynı miktarda kimyasal kullanımından daha etkili olmayacaktır. Hatta karışımdaki aşındırıcıların varlığı

kimyasalların verimliliği açısından zarar verecektir. Kum (aşındırıcı madde) hava kalitesini etkilemekte ve partikül madde (PM10) seviyelerinde artışa sebep olmaktadır. PM10, 10 mikrondan daha küçük parçacıklar olup, kumun trafik etkisi ile ezildiği için bu parçacıklar oluşabilir. Havada asılı kalabilecek ve hava kalitesi üzerinde zararlı etkileri olabilecek kadar küçüktürler. Kum kullanımı, su yollarında su ekosistemlerini olumsuz yönde etkileyen tortu ve bulanıklık oluşmasına da neden olacaktır. Yolların ve drenaj tesislerinin tıkanması sonucu işlevini yitirmesi, bunların temizliği için yapılan harcamalar, havadaki ve sudaki toz problemleri nedeniyle aşındırıcı uygulamalar buzlanma önleyici bir programın rutin bir işlemi olarak düşünülmemelidir (Ketcham vd. 1996, Nixon 2001).

2.2.1.2 Kimyasal

Her kış kaplama yüzeylerini buzdan veya kardan korumak için büyük miktarda katı ve sıvı kimyasal maddeler ikinci yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Kimyasallar arasında sodyum klorür (NaCl), kalsiyum klorür (CaCl₂), magnezyum klorür (MgCl₂), potasyum asetat (KAc) ve kalsiyum magnezyum asetat (CMA) gibi maddeler bulunmaktadır. Bu kimyasalların ortak özelliği kar-tuz karışımının donma noktasını düşürerek buz ve karı eritmektir. Bu kimyasalların hangisinin kullanılacağı kar ve buz miktarı ve ortam sıcaklığına göre değişmektedir (Ahmedzade vd. 2007). Kimyasalların kullanımında göz önünde bulundurulması gereken korozyon ve çevresel etkisi ise dikkat çekmektedir.

Sodyum Klorür (NaCl)

Sodyum klorür ayrıca kaya tuzu olarak bilinmektedir. Bu kimyasal madde düşük maliyetli oluşu ve yüksek verimliliği nedeniyle birçok devlet tarafından en yaygın kullanılan buz çözücüler arasındadır. Fakat kuru kaya tuzu kullanımı yol yüzeyinden sıçradığından verimliliği düşmektedir. Bunun için yollarda katı kaya tuzu uygularken ilk yapışmayı artıran ve tuzun kaplamadan sıçramasını önleyen bir ön ıslatma sıvısı sıklıkla kullanılarak verimlilik artırılabilir. Ayrıca sıcak su-kum karışımlarının sıcaklığın düşük olduğu dönemlerde tuzlamaya alternatif olduğu belirtilmiştir (Vaa ve Sivertesen

2008). Tuz maddesi içerisinde bulunan klorür, otomobillerdeki, betonarme köprülerdeki çelik aksamda korozyona neden olmaktadır (Zhang vd. 2009). Günümüzde daha etkili ve çevreye daha az zararlı fakat maliyetli başka kimyasal maddeler de (asetat bazlılar) kullanılmaktadır. NaCl, genellikle sıcaklık -12 °C'nin üzerinde olduğunda buz kontrolü için en iyi performansı göstermektedir. Daha düşük sıcaklıklarda buz kontrolü için kalsiyum klorür (CaCl₂) veya magnezyum klorür (MgCl₂) NaCl'yi desteklemek üzere kullanılabilir (Akin vd. 2013).

Asetat bazlı maddeler

Klorürlerin yanı sıra kalsiyum magnezyum asetat (CMA) ve potasyum asetat (KAc) gibi asetatlar buzlanma önleyici olarak kullanılmaktadır. Ancak çok daha pahalı maddelerdir. Bununla birlikte, CMA ve KAc daha verimlidir ve karbon çeliğine daha az aşındırıcı etki yapar. Bu maddeler klorürler kadar çevreye zarar vermezler (Nixon ve Williams 2001).

Bazı organik biyokütle ürünler

Tarımsal yan ürünler (ABPs) veya organik yan ürün arttırıcılar gibi katkı maddeleri de kar ve buz kontrolünde performanslarını arttırmak için bu birincil kimyasallar ile karıştırılır. Bilinen katkı maddeleri mısır şurubu, mısır maserasyon (ıslatma) ve başka mısır türevleri; şekerli veya şekerli pancar suyu; odun özü/ linyosülfonat; pekmez (genellikle şeker kamışından); bira/damıtıcı yan ürünleri; ve gliserin. Çeşitli tarımsal bazlı kimyasallar, tek başlarına veya diğer kış bakım kimyasalları için katkı maddesi olarak kullanılabilir (Nixon ve Williams 2001). Tarımsal bazlı katkı maddelerinin maliyeti yüksek olmakla birlikte buz eritme verimliliğini artırabilmektedir (Kahl 2002). Ayrıca, tarımsal bazlı katkı maddeleri yenilenebilir kaynakları kullandıkları için düşük çevresel etkiye sahiptirler.

Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin en düşük pratik erime sıcaklık değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir (Anonim 2012). Tüm maddelerin kendine özgü çevresel ve korozyon etkileri olup bu etkilerin detayları Çizelge 2.3'de belirtilmiştir (Levelton Consultants 2007).

Çizelge 2.2 Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin en düşük pratik erime sıcaklık değerleri.

Kimyasallar	Minimum Pratik Erime Sıcaklığı	Açıklama
*Sodyum Klorür (NaCl)	-9,4 °C	Katı kaya tuzu olarak bilinir; ayrıca tuzlu su haline getirilebilir. Buz çözücü maddelerin temelini oluşturmaktadır. Çok aşındırıcıdır. Ucuzdur.
*Magnezyum Klorür (MgCl ₂)	-23,3 °C	Tane, topak veya sıvı formda kullanılır. Çoğunlukla yola yapışmayı artırmak ve erime noktalarını azaltmak için NaCl kristallerini ıslatmak için kullanılır. Aşındırıcıdır. Daha yüksek maliyetlidir.
*Kalsiyum Klorür (CaCl ₂)	-28,9 °C	Tane, topak veya sıvı formda kullanılır. Güçlü bir buz çözücü ama son derece aşındırıcı. Bazen hatalı olarak rögar giderlerini açmak için kullanılır. Daha yüksek maliyetlidir.
Kalsiyum Magnezyum Asetat (CMA)	-6,7 °C	Toz, kristal, topak veya sıvı formda kullanılır. Sıvı CMA, çoğunlukla köprü otomatik buz çözme sistemlerinde kullanılır. Aşındırıcı olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir. Bazen bir korozyon önleyici olarak sodyum klorüre eklenir. Daha yüksek maliyetlidir.
Potasyum Asetat (KAc)	-26,1 °C	Sıvı formda kullanılır. Köprü otomatik buz çözme sistemlerinde kullanılır. Buzlanmayı önleyici, buz çözücü ve ön ıslatma için kullanılır. Aşındırıcı olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir. Daha yüksek maliyetlidir.
Kış Kumu / Aşındırıcılar	Asla erimez- sadece yol tutuşu sağlar.	Kış kumu, tuzlu su veya başka bir karışımla işlenmiş kumdur. Genellikle kimyasalların etkili olmadığı durumlarda düşük sıcaklık koşullarında aşındırıcı olarak kullanılır. Kum geçici yol tutuşu sağlar ve sadece buzun üzerinde olduğunda işe yarar.
Diğer Karışımlar	Değişir	Patentli satın alınan karışımlar.

* Sıvı klorürler korozyon önleyici ile kullanılabilir.

Çizelge 2.3 Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin korozyon ve çevresel etkileri.

Madde	Korozyon Etki			Çevresel Etki				
	Metallere Atmosferik Korozyon	Beton Korozyonu	Betonarme Korozyonu	Su Kalitesine / Su Yaşamına	Hava Kalitesine	Zemirlere	Bitki Örtüsüne	Hayvanlara
Sodyum Klorür (NaCl)	<u>Yüksek:</u> Korozyonu başlatacak ve hızlandıracak.	<u>Düşük / orta:</u> Direnç artacak; Çimento pastasında düşük reaksiyon riski.	<u>Yüksek:</u> İnşaat demiri korozyonunu başlatacak.	<u>Orta:</u> Aşırı klorür yüklemesi, metal kirletici maddeler; ferrosiyanür katkıları.	<u>Düşük:</u> Aşındırıcı kullanımını azaltır.	<u>Orta / Yüksek:</u> Sodyum birikimi zemin yapısını bozar ve geçirgenliği ve zemin stabilitesini azaltır; metal mobilizasyon potansiyeli.	<u>Yüksek:</u> Sprey yapraklara zarar verir; ozmotik basınç köklere zarar verir; klorür zehirlenmesi.	<u>Düşük:</u> Tuz zehirlenmesiyle bağlantılı sodyum; büyüklüğü belli değil.
Kalsiyum Klorür (CaCl₂)	<u>Yüksek:</u> Korozyonu başlatacak ve hızlandıracak; higroskopik özelliklere bağlı korozyon için daha yüksek potansiyel	<u>Düşük / orta:</u> Direnç artacak; Çimento pastasında düşük reaksiyon riski.	<u>Yüksek:</u> İnşaat demiri korozyonunu başlatacak.	<u>Orta:</u> Aşırı klorür yüklemesi; ağır metal kirlenmesi.	<u>Düşük:</u> Aşındırıcı kullanımını azaltır.	<u>Düşük / Orta:</u> Zemin yapısını iyileştirir; geçirgenliği artırır; metal mobilizasyon potansiyeli.	<u>Yüksek:</u> Sprey yapraklara zarar verir; ozmotik basınç köklere zarar verir; klorür zehirlenmesi.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.
Magnezyum Klorür (MgCl₂)	<u>Yüksek:</u> Korozyonu başlatacak ve hızlandıracak; higroskopik özelliklere bağlı korozyon için daha yüksek potansiyel	<u>Orta / yüksek:</u> Direnç artacak; Magnezyum reaksiyonlarından çimento pastasının bozulma riski.	<u>Yüksek:</u> İnşaat demiri korozyonunu başlatacak, kanıtlar MgCl ₂ 'nin klorür ürünlerinin korozyonu için en yüksek potansiyele sahip olduğunu gösteriyor.	<u>Orta:</u> Aşırı klorür yüklemesi; ağır metal kirlenmesi.	<u>Düşük:</u> Aşındırıcı kullanımını azaltır.	<u>Düşük / Orta:</u> Zemin yapısını iyileştirir; geçirgenliği artırır; metal mobilizasyon potansiyeli.	<u>Yüksek:</u> Sprey yapraklara zarar verir; ozmotik basınç köklere zarar verir; klorür zehirlenmesi.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.

Çizelge 2.3 (Devam) Kar ve buz kontrolü için kullanılan maddelerin korozyon ve çevresel etkileri.

Madde	Korozyon Etki			Çevresel Etki				
	Metallere Atmosferik Korozyon	Beton Korozyonu	Betonarme Korozyonu	Su Kalitesine / Su Yaşamına	Hava Kalitesine	Zeminlere	Bitki Örtüsüne	Hayvanlara
Kalsiyum Magnezyum Asetat (CMA)	<u>Düşük / orta:</u> Yüksek iletkenlik nedeniyle korozyonu başlatma ve hızlandırma potansiyeli.	<u>Orta / yüksek:</u> Direnç artacak; Magnezyum reaksiyonlarından çimento pastasının bozulma riski.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Yüksek:</u> Oksijen talebine neden olan organik içerik.	<u>Düşük:</u> Aşındırıcı kullanımını azaltır.	<u>Düşük / Orta:</u> Zemin yapısını iyileştirir; geçirgenliği artırır; metal mobilizasyon potansiyeli.	<u>Düşük:</u> Çok az veya hiç olumsuz etki yok; yüksek seviyelerde ozmotik basınç.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.
Potasyum Asetat (KAc)	<u>Düşük:</u> Korozyonun azaltılması yüksek iletkenlik iddiaları nedeniyle korozyonu başlatma ve hızlandırma potansiyeli daha fazla değerlendirmesi gerektirir.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok; korozyonun azaltma iddiaları daha fazla değerlendirme gerektirir.	<u>Yüksek:</u> Oksijen talebine neden olan organik madde; fosfor ve azot ile besin zenginleştirme, ağır metaller.	<u>Düşük:</u> Aşındırıcı kullanımını azaltır.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok; sınırlı bilgi mevcut.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok; sınırlı toksiklik bilgisi mevcut.
Organik Biyokütle Ürünleri	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Hiç etkisi yok;	<u>Yüksek:</u> Bulanıklık; artan tortu	<u>Yüksek:</u> İnce parçacıklar hava kalitesini düşürür.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.	<u>Düşük:</u> Muhtemelen çok az veya hiç etkisi yok.

2.2.2 Modern Yöntemler

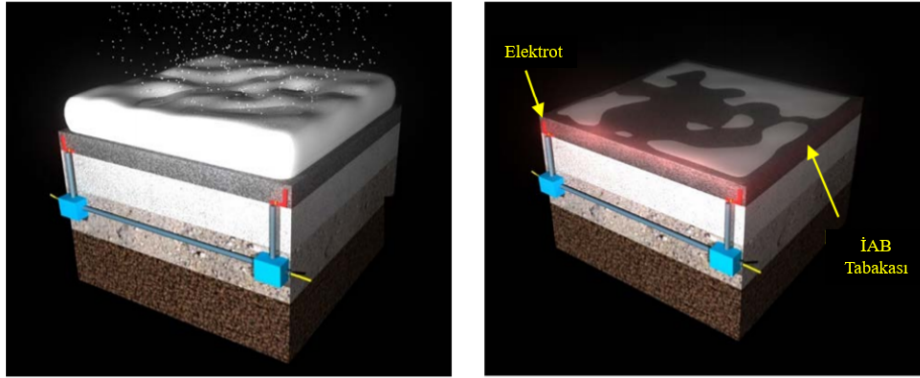
Modern yöntemlerin ortak amacı, sensör ve yol hava durumu bilgi sistemleri ile entegre çalışarak (Süperhidrofobik kaplama sistemleri hariç) yol yüzeylerinde kar birikimi veya buzlanma meydana gelmeden önüne geçmektir. Böylece hızlı, ekonomik ve çevre dostu müdahaleler gerçekleştirilebilmektedir.

2.2.2.1 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Sistemi

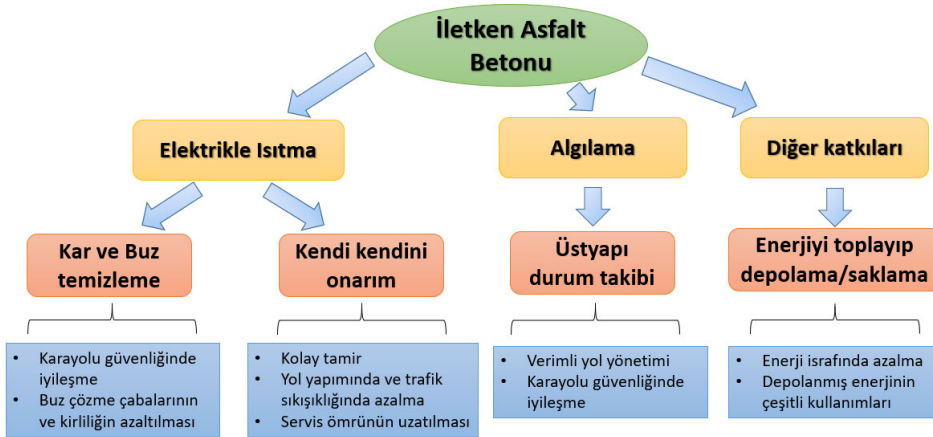
Geleneksel bitümlü sıcak karışım asfalt (BSK) kaplamalar, elektrik akımına karşı yüksek hacimsel öz dirence sahip olduğundan iletken özellik göstermezler (Wu vd. 2013, Pan vd. 2015). BSK içerisine çeşitli oranlarda iletken katkıları eklenerek hacimsel öz direncin azaltılması ve iletken yollar/ağlar oluşturulması ile karışımın iletken hale getirilmesi sağlanmaktadır. Mevcut literatüre göre İAB'ye eklenen iletken katkıları şu şekilde sınıflandırılabilir: (a) tozlar (grafit veya karbon siyahı); (b) lifler (karbon lifi, çelik lifi veya karbon nano lifi) (c) talaşlar (çelik talaşı); ve (d) kısmen kaba agregalar yerine kullanılan katı parçacıklar (çelik çürüf ve markonite) (Pan vd. 2015).

İletken asfalt malzeme tasarımına ilişkin ilk araştırma, kış koşullarında elektriksel direnç ile ısıtma yöntemiyle kaplama yüzeyindeki karı aktif olarak eritmek amacıyla kullanma girişimi 1960'lı yıllarda Minsk (1968) tarafından gerçekleştirilmiştir. İAB sıcaklığı, indüksiyonla ısıtma veya iletimle ısıtma yoluyla artırılabilir (Liu vd. 2010, Liu vd. 2011, García 2012, Liu vd. 2012). İletimle ısıtma, asfalt betonu ile kaplanan alanların yüzeyindeki buz ve karı eritmek için kullanılırken, indüksiyonla ısıtma ise asfalt betonunun kendi kendine iyileşme sürecini hızlandırmak için kullanılabilir. İndüksiyonla ısıtmanın aksine, iletim yönteminde elektrotlar İAB ile doğrudan temas halindedir. Sonuç olarak, ısı iletimi için elektrotlar İAB'ye gömülebilir. Asfalt betonundaki iletkenlik artırmanın altında yatan tüm kavramların hem iletimle hem de indüksiyonla ısıtma için aynı olduğunu belirtmek gerekmektedir. İAB, elektriksel direnç ısıtma yoluyla buz ve karı verimli bir şekilde eritebilen bir ısıtıcı görevi görmektedir (Wang vd. 2006, Wu vd. 2013). İnce bir iletken asfalt beton tabakası elektriksel direnci nedeniyle buz veya kar eritmek için yeterli ısı üretilmektedir. Bunun yanı sıra elektrik

kablolar ile ısıtmanın dezavantajlarından olan ısıtma sıcaklığının homojen dağılması sorunu bu sistemin kullanılmasında görülmeyecek olup, yolun bütünlüğü korunacaktır. (Wang vd. 2020b, Wang vd. 2020c). Kaplamaları ısıtmak için kullanılan enerji tüketimini daha da azaltmak için piezoelektrik, güneş ve rüzgar enerjisi gibi birçok yenilenebilir ısı kaynağı kullanılabilir. Şekil 2.1’de kar eritebilen bir İAB kaplama sistemi örneği görünmektedir. Buz veya kar eritme ve kendi kendini iyileştirmenin yanı sıra İAB sistemlerinin başka faydaları da mevcuttur (Şekil 2.2). Yol kaplamalarında veya havaalanı pistinde İAB sistemlerinin kullanılmasıyla kendi kendini izleme özelliği sayesinde, üstyapının durumu takip edilebilecektir. Bu sayede kaplamadaki meydana gelebilecek bozulmalara erken müdahale ile kaplamanın servis ömrü ve performansı büyük ölçüde uzatılabilir. Böylece kendi kendini izleyen asfalt bazlı kompozitlerin uygulanması ile beraber, insanlığa ekonomik açıdan önemli fayda sağlayacaktır (Liu vd. 2008).



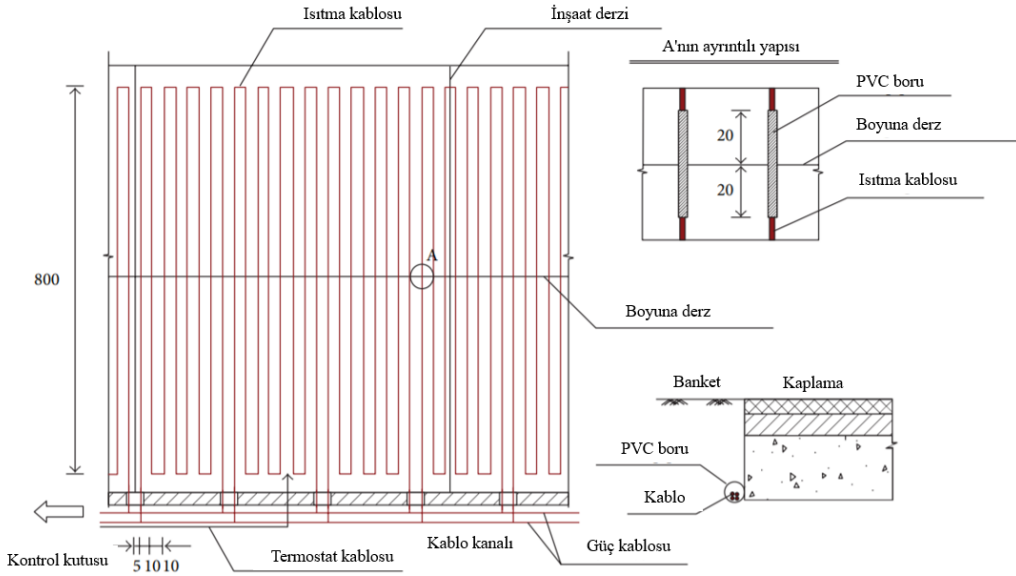
Şekil 2.1 Kar eritebilen bir İAB kaplama sistemi örneği (Arabzadeh 2018).



Şekil 2.2 Elektriksel iletken asfalt betonunun muhtemel uygulamaları ve faydaları (Park vd. 2014).

2.2.2.2 Elektrik Kablolarıyla Isıtma Sistemi

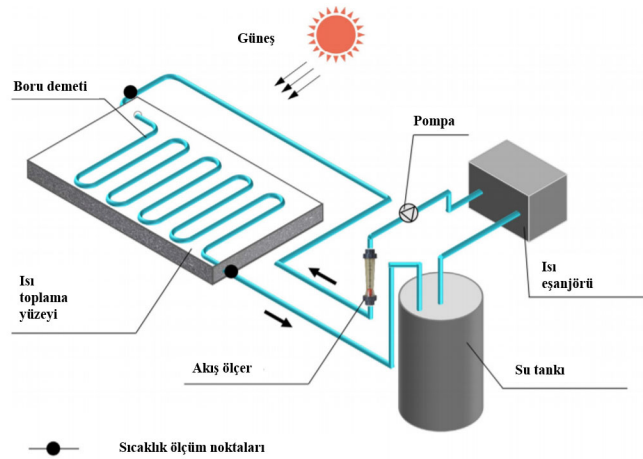
Bu yöntemde gömülü ısıtma kablosunu veya iletken ızgarayı geleneksel asfalt kaplama yapısına yerleştirerek, buzun ve karın erimesini gerçekleştirmek için harici güç kaynağı aracılığıyla ısı üretilebilmektedir (Şekil 2.3). Isıtma, sensör ve kameralar tarafından zeminde kar veya buz tespit edilerek sistemin çalışması ile kar veya buzun giderilmesi sağlanmaktadır. Bu sistemler 1860'ların başında, köprü tabliyelerinde buz ve karı eritmek için kullanılmıştır (Zhang vd. 2015). Bu yöntemin olumsuz taraflarından biri, ısıtma kablolarının trafikten kaynaklanan hasar nedeniyle işlevsiz kalması ihtimalidir. İkinci olumsuzluk ise sistemin kolay bir şekilde bakım-onarımının yapılamamasıdır. Diğer bir olumsuzluk ise oldukça fazla enerji tüketimi ile yüksek işletme maliyetine neden olmasıdır. Bu olumsuzluklardan dolayı yöntemin güvenilirliği düşmekte ve yolun uzun süreli servis performansını etkilenmektedir. Son yıllarda, iletken ısıtma kabloları üzerine yapılan araştırmalar esas olarak kablo döşeme aralığı, kablo gömme derinliği ve giriş voltajı üzerine odaklanılmıştır. İletken ısıtma kablosunun ısıtma verimliliği gömülü derinlik ve kablo döşeme aralığından büyük ölçüde etkilenmekte ve sıcaklık bütünlüğü zayıf olmaktadır. (Wang vd. 2020c).



Şekil 2.3 Elektrik kablolarıyla ısıtma sisteminin çalışma prensibi (Lai vd. 2015).

2.2.2.3 Hidronik Isıtma Sistemi

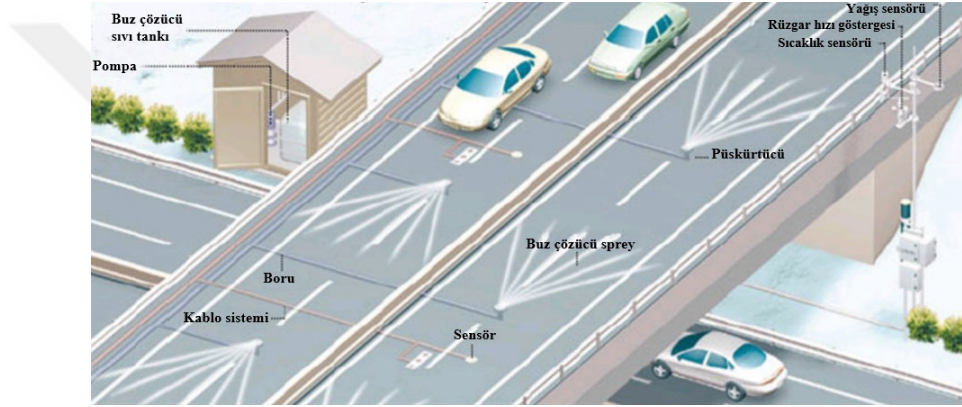
Bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamaların altına, içerisinden sıcak su geçen hidronik borular yerleştirilmesi sonucu buz veya karın giderilmesini sağlayan yöntemlerinden biridir. Diğer modern yöntemlerde olduğu gibi bu sistemde de sensör teknolojileri kullanarak buzlanma veya kar birikmesine hızlı şekilde müdahale edilebilmektedir. Bu yöntem dünya çapındaki yollarda, yaya kaldırımlarında, köprülerde ve diğer asfaltla kaplı yüzeylerde buz ve karı eritmek için kullanılmaktadır. Kaplamayı ısıtmak için ya ısı borusu teknolojileri ya da doğrudan jeotermal sıcak su kullanılabilir. Jeotermal enerji kaynaklarının mevcut olduğu bölgelerde fosil yakıt tüketiminin (dolayısıyla daha az CO₂ emisyonu) ve elektrik kullanımının azaltılmasına fayda sağlamaktadır. ABD’de jeotermal ısıtma teknolojisi, geleneksel kar ve buz kontrol yöntemlerine bir alternatif olarak köprülerde ve havaalanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Akin vd. 2013). Şekil 2.4’te hidronik ısıtma sisteminin genel şeması gösterilmektedir. Metalik veya metalik olmayan borular kaplama yüzeyinin altına yerleştirilir. Jeotermal ısı pompası yardımıyla yeraltından çıkarılan jeotermal su bir ısı eşanjörü tarafından bir propilen glikol karışımına verilmekte ve kaplama altına yerleştirilen boru demetinden devir daim yapmak suretiyle yüzeydeki buzlanmanın önlenmesi sağlanmaktadır. Sistemin verimliliğini artırmak için, boru malzemeleri, boru çapı, akış hızı, boru alanı, boru derinliği ve kaplamanın termal özelliği gibi etki faktörlerini incelemek için birçok araştırma yapılmıştır. Fakat bu sistemde borular yola gömüldüğü için bakım ve onarım maliyetleri yüksektir. Borular kırılırsa, borunun içindeki su veya başka bir sıvı dışarı sızarak yolun servis ömrünü kısılmasına neden olabilir (Zhu vd. 2019).



Şekil 2.4 Hidronik ısıtma sisteminin ana bileşimi (Gao vd. 2010).

2.2.2.4 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemi

Bu tip sistemlerde yol kenarına veya yüzeyinde belirli aralıklar ile yerleştirilen valflardan yola kimyasal solüsyonlar otomatik bir şekilde püskürtülerek yollardaki buzlanma riski 7/24 kontrol altına alınmaktadır. Sistem, yol meteoroloji bilgi sistemleri (RWIS) ve sensörler yardımı ile kaplama üzerinde buzlanmanın önceden algılanmasıyla devreye girmektedir (Şekil 2.5). Böylelikle sistem yollardaki buzlanmadan kaynaklı kazaların oluşmasını ve kimyasal madde kullanımını azaltılmasını sağlayarak maddi-manevi kayıpların önüne geçmektedir.



Şekil 2.5 Otomatik solüsyon püskürtme sistemi (Monsere vd. 2006).

2.2.2.5 Süperhidrofobik (Süper Su İtici) Kaplama Sistemi

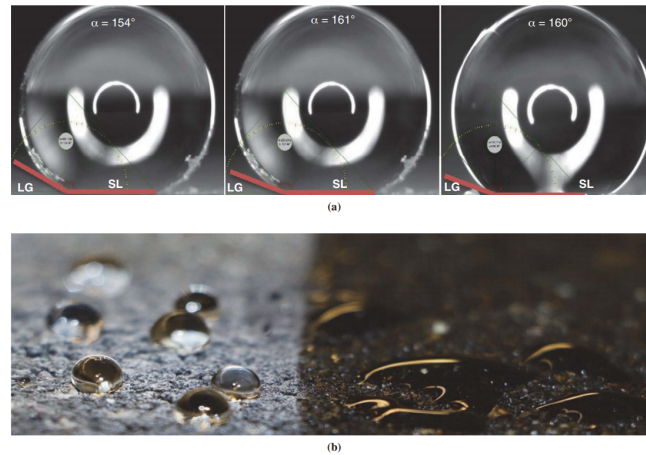
Süperhidrofobik konusunun araştırılması bir yüzyıldan fazla zamana dayanmaktadır. İlk olarak 1907'de Ollivier tarafından bir katı yüzeyin süperhidrofobik kaplanmasıyla yaklaşık 180°'luk bir temas açısı (θ_{CA}) elde edilmiştir (Ollivier 1907). Ancak doğadaki "lotus etkisinin" Barthlott ve Neinhuis (1997) tarafından kökeninin ve evrensel ilkesinin açıklamasının yapıldığı 1997 yılına kadar bu konuya olan ilgi sınırlıydı. Lotus etkisi kavramı, lotus çiçeği (veya Nelumba) yaprağının yüzeyindeki epikutikular mum kristaloidlerin kendi kendine temizleme özelliğinden gelmektedir (Chu ve Seeger 2014).

Bir yüzey üzerinde biriken damlacıkların temas açısı 90°'den küçük olduğunda hidrofilik (ıslanır), 90° ile 150° arasında hidrofobik (ıslanmaz) ve 150° ile 180° arasında olduğunda ise süperhidrofobik (süper ıslanmaz) yüzey olarak isimlendirilmektedir (Feng ve Jiang

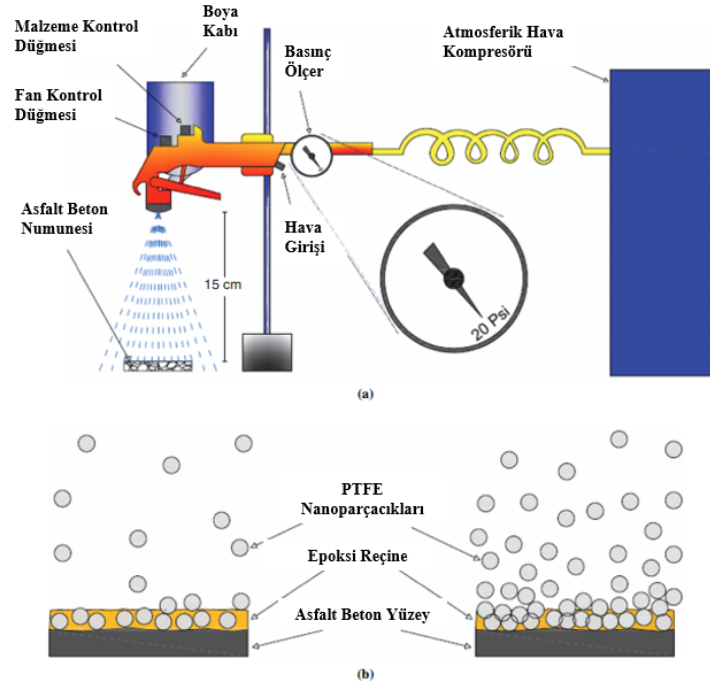
2006, Chu ve Seeger 2014, Kibar 2016). Süperhidrofobik yüzey durumunda su damlacıkları yüzeyi ıslatma eğiliminde olmayıp yüzeyden kolayca sıyrılabilmektedir (Şekil 2.6).

Havaalanı beton kaplamalarında buz ve kar oluşumunu engellemek için uygun süperhidrofobik malzemeleri belirlemede temel bir araştırma yapan Young (2016)'a göre, süperhidrofobik asfalt ve beton kaplama üretiminde tabaka-tabaka (LBL) püskürtümlü bırakıntı tekniği kullanılabilir. İlk önce kaplama üzerine iki parçalı epoksi reçinesi üç saniye püskürtülür. İki parçalı epoksi kullanımının amacı polytetrafluoroethylene (PTFE) maddesini asfalt beton yüzeyine yapıştırmaktır. Daha sonra aseton içerisinde dağılmış PTFE, epoksi reçinesi üzerine püskürtülerek süperhidrofobik kaplama oluşturulur (Şekil 2.7). Burada PTFE nanoparçacıklarının miktarı ve püskürtülme süreleri ekonomiklik ve verimlilik açısından önem arz etmektedir.

Kaplamaların buz ve kar birikimi ile ilgili problemleri azaltmak için daha ekonomik ve zaman açısından verimli bir yöntem süperhidrofobik kaplamaların kullanılmasıdır. Bu tür kaplamalar buz oluşum hızını düşürmekte ve bu malzemelerin düşük yapışma etkisinden dolayı kar ve buzu temizlemek amacıyla düşük mekanik enerji harcanmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu tür kaplamaların suyun drenajı açısından da fayda sağlamaktadır. Fakat nanomalzemelerin asfalt betonu üzerine uygulanması ile ilgili olarak az araştırma bulunmaktadır (Arabzadeh vd. 2016).



Şekil 2.6 Su damlacıkları - asfalt betonu etkileşimi: (a) üç damlacık için su temas açısı ölçümü örneği ve (b) kaplanmış (solda) ve kaplanmamış (sağda) asfalt betonunda su damlasının davranışı (Arabzadeh vd. 2016).



Şekil 2.7 Tabaka – tabaka (LBL – layer by layer) yöntemi: (a) epoksi ve PTFE'yi püskürtmek için kurulan püskürtme tabancası ve (b) PTFE nanoparçacık miktarı düşük (sol) ve yüksek (sağ) olduğu durum (Arabzadeh vd. 2016).

2.3 Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Buzlanma Önleme Konsepti

Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) genel bir ifade ile, insanın üzerindeki düşünme veya karar verme yükünü hafifletmeye ve insan faktörünün olumsuzlarını azaltmaya yönelik ulaşım çözümleri olarak tanımlanabilir. Çeşitli AUS uygulamaları mevcut olup, kabul görmüş bir sınıflandırma olmamakla beraber kullanım alanlarına göre uygulamalar genel olarak aşağıda belirtilen şekilde sınıflandırılabilir:

- 1.Yolcu Bilgi Sistemleri
- 2.Trafik Yönetim Sistemleri
- 3.Toplu Taşıma Sistemleri
- 4.Elektronik Ödeme Sistemleri
- 5.Yük ve Filo Yönetim Sistemleri
- 6.Sürücü Destek ve Güvenlik Sistemleri
- 7.Kaza ve Acil Durum Sistemleri

AUS uygulamalarından olan Kaza ve Acil Durum Sistemleri, trafik kazaları başta olmak üzere yollarda gerçekleşen her türlü acil müdahale gerektiren olayın tespiti, ilgililerin bilgilendirilmesi, olaya müdahale ve olayın bıraktığı tahribatın yönetimi ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir (İnt.Kyn.2). Bu tez kapsamında geliştirilen akıllı buzlanma önleme sisteminin AUS'ta kullanımı ile yollarda meydana gelen buzlanma ve kar birikmesine hızlı müdahale edilerek, buzlanmadan ve kar birikmesinden kaynaklı trafik kazalarının ve trafik sıkışıklığının önüne geçilmesi ile maddi ve manevi kayıpların azaltılması sağlanacaktır. Bu yüzden yollardaki buzlanma ve kar birikmesi mücadelesinde kullanılacak olan iletken asfalt betonu sistemi AUS ile entegre edilerek daha hızlı ve efektif çözüm sağlanması düşünülmektedir. Böylelikle sadece insan olumsuzlukları değil hem insan hem de iklim koşullarının olumsuzluklarını azaltmaya yönelik bir ulaşım çözümü sağlanmış olacaktır.

AUS uygulamalarında Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems-GNSS), Kablosuz Ağlar (WiMax, WiBro vs.), Mobil İletişim Araçlar (5G), Kızıl Ötesi İletişim (Infrared), Yakın Mesafe İletişim Teknolojileri ve Algılama Teknolojileri gibi birçok anahtar teknolojiler kullanılmaktadır. Algılama teknolojileri kategorisine giren hava ve kaplama yüzeyi durumu ile ilgili verilerin sağlanması amacıyla Yol Meteorolojisi Bilgi Sistemleri (RWIS) teknolojisi kullanılmaktadır (Zhu vd. 2019). Bu teknolojinin karayolu kış bakımı uygulamalarında kullanımı ile sağlanan faydalardan bazıları;

- Maliyeti azaltması,
- Verimliliği artırması,
- İlgili personelin fazla mesai yapma sürelerini azaltması,
- Daha az yanlış yönlendirilmiş personel,
- Daha az boşa harcama malzeme ve ekipman, geliştirilmiş karayolu hizmet seviyesi gibi faydalar sağlamaktadır (Akin vd. 2013).

Birçok ülke yollarında (Amerika, İsviçre ve Finlandiya vb.) yol kış bakımı çalışmalarında kullanılan Buzlanma Erken Uyarı Sistemi (BEUS) istasyonları ülkemizde de İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), Yol Bakım ve Altyapı Koordinasyon Daire Başkanlığı

tarafından önemli ana ulaşım yolları, metrobüs yolları, viyadük ve tünel gibi buzlanmanın daha fazla meydana geldiği kritik kesimlerde kullanılmaktadır. İşlemler Afet Koordinasyon Merkezi (AKOM) koordinasyonluğ u ile yürütülmektedir (İnt.Kyn.3). Şekil 2.8’de BEUS ile Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) konsepti gösterilmektedir. Bu istasyonlar, yollardaki hava sıcaklığı, rüzgâr yönü ve hızı, yağışın tipi (yağmur, kar, dolu vb.), görüş mesafesi (sis, pus) gibi hava durumu bilgilerin dışında asfalt yüzey durumu (kuru, ıslak, nemli, buzlanma, çiy, kırağı) gibi parametreleri sensörler yardımı ile algılayıp ölçmektedir. Buzlanma zamanı ve kalınlık durumu özel hazırlanmış algoritmaya sahip hava tahmin ve karar destek yazılımıyla üç saat öncesinden tahmin edilmesi sağlanarak yolun hangi kısımlarının ne zaman tuzlanması gerektiği bilgisi SMS ve e-mail aracılığıyla gönderilmekte ve ilgili birimlerin erken müdahale etmesi sağlanmaktadır. Ayrıca iletişimde genel paket radyo servisi (GPRS) teknolojisi kullanılmaktadır. Değişken mesaj sistemi (DMS), SMS ve İBB Trafik yoğunluk haritası ile sürücülere bilgilendirilme sağlanmaktadır. Enerji tasarrufu amacıyla sistemde yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar ve güneş) kullanıldığı bölgeler mevcuttur. Sistem ile beraber tuz ve solüsyon kullanım miktarı azaltılması sağlanmaktadır (Kadıoğlu vd. 2011, Sönmez vd. 2018). Akıllı ulaşım sistemlerinde mevcut olan yol ve hava bilgi sistemlerinin kar ve buz kontrol çalışmaları ile entegrasyonunun sağlanarak ülkemizde yaygınlaştırılmasının hem maddi hem manevi kazançları olacaktır. Görüleceği üzere günümüzde kullanılan geleneksel yöntemlerde bile artık modern yöntemlerdeki teknolojilerden yararlanılmakta olup, bu tip yöntemlerin öneminin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 2.8 Buzlanma Erken Uyarı Sistemi (BEUS) ile Akıllı Ulaşım Sistemleri Konsepti (İnt.Kyn.3, İnt.Kyn.4).

Akıllı ulaşım sistemlerinin alt bölümü olan filo yönetim sistemlerinde kar küreme araçlarına takip sistemleri takılarak tek bir merkezden takibi ile araçların hızlı ve etkili bir şekilde yönlendirilmesi sağlanabilir.

2.4 Elektriksel İletkenlik Arkasındaki Kavramlar

2.4.1 Direnç, Özdirenç ve İletkenlik

Gerilim volt olarak, akım amper olarak direnç ise ohm olarak ölçülmektedir. Elektrik potansiyel birimi olan volt, 1800 yılında kimyasal bir pil icat eden Rus asıllı İtalyan fizikçi olan Alessandro Volta'nın isminden gelmektedir. Bu üç kavramı açıklamak için su deposu sistemi örnek olarak gösterilebilir. Borudan birim zamanda geçen su miktarını akıma, suyun borulardan akmasını sağlayan basınçta gerilime benzetilebilir. Suyun boru içerisinden geçmesini zorlaştıran unsura ise direnç denilebilir.

Elektrikteki en temel üç birim olan voltaj (V), akım (I) ve direnç (R) arasındaki ilişki denklem (2.1)'de tanımlanmıştır. Bu denklem 1826 yılında Alman fizikçi George Simon Ohm tarafından bulunan ohm yasasıdır. Asfalt bazlı malzemelerin elektriksel direnci Ohm yasası kullanılarak elde edilebilir (García vd. 2009).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Burada;

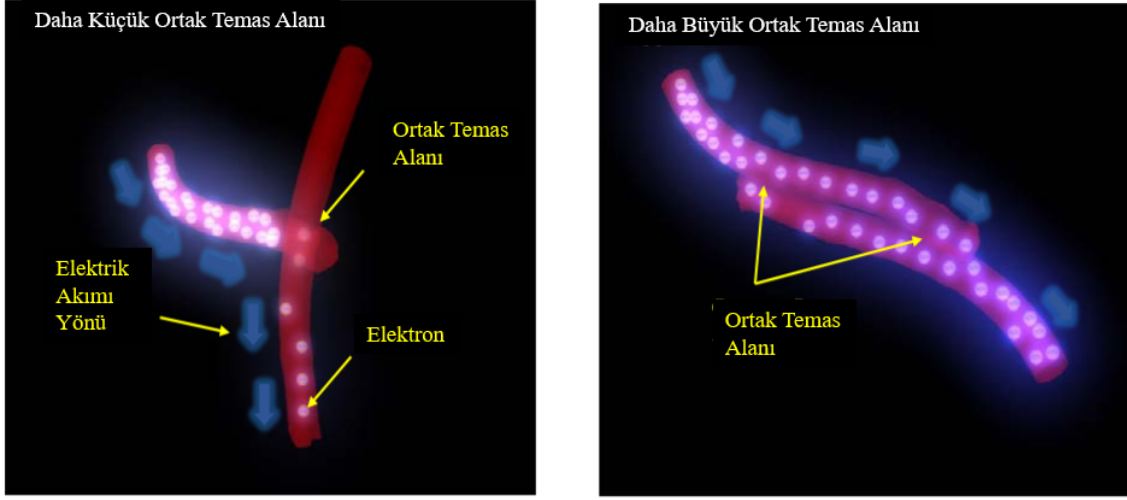
$R = \Omega$ (ohm) cinsinden elektriksel direnci,

$V = \text{Volt}$ cinsinden potansiyel farkı,

$I = \text{Amper}$ cinsinden akımı ifade etmektedir.

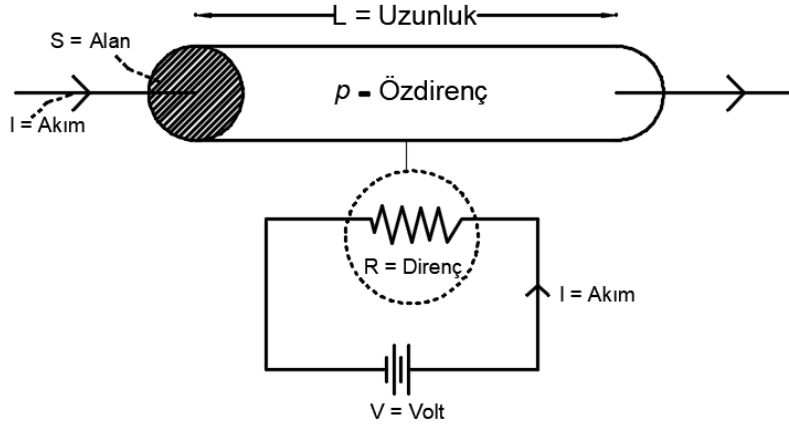
Bir cismin direnci, boyutlarına ve malzemelerin bileşimine bağlıdır. Boyutlarla ilgili olarak, uzunluk arttıkça R değeri artmakta ve kesit alanı artması ile de R değeri azalmaktadır.

Kompozit malzemeler bağlamında iki tür direnç vardır: kompozit ve temas direnci (Kwok ve Hahn 2007). Kompozit direnç, malzeme özelliklerine ve en boy oranlarına bağlı olarak liflerin direnci olarak tanımlanmaktadır. Temas direnci ise temas halindeki bitişik lifler arasında elektronların geçişiyle ilgilidir (Şekil 2.9). Bu temas direnci sadece temas halindeki lifler arasındaki ortak yüzey alanına bağlıdır (Arabzadeh 2018).



Şekil 2.9 Liflerin ortak temas alanından elektron geçiş mekanizması (Arabzadeh 2018).

Bir cismin geometrisinin etkisini ortadan kaldırmak için alternatif olarak malzemelerin içsel özelliklerini temsil eden öz direnç (ρ) düşünülebilir. Öz direnç bir malzemenin elektrik akımı akışına izin verme kabiliyetini ölçen bir malzeme özelliğidir. Bir malzemenin öz direnci ne kadar düşük olursa, malzemenin elektrik iletme kapasitesi de o kadar yüksek olur. Bir malzemenin öz direnci, kesitine (yani elektrot-malzeme temas alanı) ve elektrik potansiyeli olan bir alanı uygulamak için kullanılan elektrotlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Şekil 2.10'da öz direnç ile direnç arasındaki ilişkiyi gösterilmektedir. Öz direnç denklem (2.2) ile elde edilmekte olup, bu değer denklemden de görüleceği üzere iletken malzemenin direncine (R), uzunluğuna (L) ve kesit alanına (S) bağlıdır.



Şekil 2.10 Özdirenç ve direnç arasındaki ilişki.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (2.2)$$

Burada;

$\rho = \Omega \cdot m$ cinsinden özdirenç,

$R =$ malzemenin Ω cinsinden ölçülen elektriksel direnci

$S = m^2$ cinsinden elektrot – malzeme temas alanı,

$L = m$ cinsinden elektrotlar arasındaki mesafe.

Malzemedan malzemeye özdirenç değerleri değişmektedir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4 Bazı malzemelerin 20 °C'deki özdirenç değerleri.

Malzeme	Özdirenç ($\Omega \cdot m$)
Gümüş	$1,59 \times 10^{-8}$
Bakır	$1,72 \times 10^{-8}$
Altın	$2,2 \times 10^{-8}$
Alüminyum	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$
Platin	11×10^{-8}
Demir	10×10^{-8}
Kurşun	22×10^{-8}
Nikrom	150×10^{-8}
Karbon	$3,5 \times 10^{-5}$
İletken Asfalt Betonu	< 10
Geleneksel Asfalt Karışımı (yalıtkan)	$10^8 - 10^{12}$
Cam (yalıtkan)	1×10^9
Kauçuk (yalıtkan)	10^{13}

Çizelge 2.4'te görüleceği üzere geleneksel asfalt betonu yalıtkan bir malzeme olup, içerisine çeşitli iletken katkıları eklenerek iletken hale getirebilmektedir (Pan vd. 2017).

İletkenlik, bir malzemenin elektriği iletme kabiliyetini tanımlamaktadır. Elektrik akımı, iletkenliği yüksek bir malzemedan kolayca akabilir. İletkenlik, metre başına siemens cinsinden ölçülür ve genellikle Yunanca σ harfi kullanılarak gösterilir. Denklem (2.3) kullanılarak hesaplanır. Metal malzemeler yüksek iletkenliğe sahipken, kauçuk gibi malzemeler ise çok düşük iletkenliğe sahiptir. Sıcaklık gibi faktörlerin iletkenlik üzerinde büyük etkisi vardır. Özdirenç, iletkenlik ile ters orantılıdır. Böylece yüksek iletkenliğe sahip bir malzeme düşük özdirençli ve düşük iletkenliği sahip malzeme de yüksek özdirençlidir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.3)$$

Burada;

Σ = Siemens (S) cinsinden iletkenlik,

ρ = $\Omega.m$ cinsinden özdirençtir.

2.4.1.1 İletken Asfalt Betonunun Elektriksel Direnç Ölçümü

Elektriksel olarak iletken malzemelerle asfalt bazlı malzemelerin hacim dirençliliğini elde etmek için Ohm yasasından faydalanılabilir (García vd. 2009). Direnç ölçümü için farklı yöntemler arasında, iki prob yöntemi İAB'nin iletkenliğini ölçmek için daha yaygındır (Wu vd. 2005, Wang vd. 2016). Literatürde, asfalt betonunun direnci 15°C (Wang vd. 2016), 20°C (García vd. 2009) ve 25°C (Wu vd. 2005) dahil olmak üzere farklı sıcaklıklarda ölçülmüştür. Asfalt yüksek derecede sıcaklığa bağımlı bir malzeme olup, direnç açısından davranışı daha geniş bir sıcaklık aralığında incelenmelidir (Wu vd. 2003). Ayrıca, İAB, buz ve kar eritme bağlamında, düşük sıcaklıklarda yüksek elektrik iletkenliğini koruyabilmelidir (Arabzadeh 2018).

Wu vd. (2005), iki prob yöntemi kullanarak 25 °C'lik oda sıcaklığında hacim direncini ölçtüler. 120 mm çapında ve 25 mm kalınlığında paslanmaz çelik disk şeklinde elektrotlar

kullandılar. Asfalt beton örnekleri ve elektrotlar arasında mükemmel temas sağlamak için elektrot-numune boşluklarını doldurmak için dağınık tipte bir grafit kullandılar. Elektrot ile asfalt betonu arasındaki temas direnci değerinin 1 Ω 'dan daha az olarak ölçülmüş olup, numunelerden elde edilen direnç (100 Ω 'dan daha fazla) değerine göre ihmal edilebilir olduğunu bildirmişlerdir.

García vd. (2009), oda sıcaklığında, yani 20 °C'de öz direnç ölçümleri gerçekleştirdi. Nikel elektrotlar kullandılar ve bunları deney numunelerinin kısa uçlarına bağladılar. Mükemmel teması garanti etmek için her numune ve elektrotlar arasındaki boşlukları kuru grafit tozu ile doldurmuşlardır. Grafit ve elektrot arasında, numunelerden elde edilen direnç (20 Ω 'dan daha fazla) değerinden çok daha düşük temas direnci (0,1 Ω 'dan daha düşük) elde edildiği bildirmişlerdir. 36×10^6 altındaki direnç değerlerini ölçmek için bir multimetre ve 36×10^6 'den yüksek direnç değerlerini ölçmek için ise bir direnç deney cihazı kullanmışlardır.

Huang vd. (2009), standart iki tel yöntemi izleyerek, yüksek iletkenlikli asfalt betonunun elektrik direncini ölçmek için bir Keithley 2000 dijital multimetre kullandılar. Keithley 2000 dijital multimetre bu tür yüksek direnç değerlerini ölçemediği için iletken malzeme hacminin düşük olduğu geleneksel asfalt betonu veya asfalt beton numunelerinin direncini ölçmek için harici voltaj güç yöntemini kullandılar. Harici voltaj güç yöntemi ile elektrik direnci denklem (2.4) kullanılarak hesaplanabilir.

$$R_0 = \frac{V_2}{V_1 - V_2} R_{st} \quad (2.4)$$

Burada;

R_0 = Hesaplanan direnç değeridir,

V_1 ve V_2 = Keithley 2000 tarafından tam olarak ölçülebilen voltaj değerleridir,

R_{st} = Standart bir direnç elemanının direnci,

Huang vd. (2009), her bir numunenin elektrik temas alanlarını son derece iletken bir gümüş boya ile kapladılar. Daha sonra boyalı alanlara bakır bantlar yapıştırdılar. Böylece

numune ile her bir elektrot arasında mükemmel bir temas garanti edildi. Yaptıkları çalışmada herhangi bir temas direnci değeri bildirmedi.

Cong vd. (2014), elektriksel olarak iletken malzemelerle (örneğin farklı karbon siyahı türleri) modifiye edilmiş bitümden yapılmış 90×10×10 mm numunelerin elektrik öz direncini ölçmek için iki prob yöntemini kullandılar. Bakır telleri her bir numunenin uçlarına (10×10 mm kesit) yapıştırmak için gümüş boya kullandılar ve direnci 20 °C'lik bir oda sıcaklığında ölçtüler.

Wang vd. (2016), 15 °C oda sıcaklığında asfalt beton numunelerinin direncini ölçmek için iki prob yöntemini kullandılar. Her bir silindir numunesinin uçlarına iki bakır plaka / elektrot yapıştırmak için oldukça iletken gümüş boya kullandılar. 40×10^6 altındaki direnç değerlerini ölçmek için bir UNI-T modern dijital multimetre ve 40×10^6 'den yüksek direnç değerlerini ölçmek için bir direnç ölçer kullandılar. İki elektrot arasındaki temas direncinin (1Ω 'den daha düşük) numunelerden elde edilen direnç değerlerinden (genellikle $0.1 \times 10^6 \Omega$ 'den daha yüksek) çok daha düşük olduğunu belirttiler.

2.4.2 İletken Asfalt Betonunun Elektriksel Direnç ile Isıtılması

Şekil.2.11'de gösterildiği gibi, iletken bir asfalt kaplama plakası bir V voltajı ile bir doğru akım (DC) gücüne bağlandığında, elektrik akımı plaka içinde oluşturulan iletken yollardan geçecek ve böylece Joule etkisine göre ısı üretilecektir (Denklem (2.5)). Üretilen ısı dağılacak ve kaplamanın sıcaklığını artıracaktır.

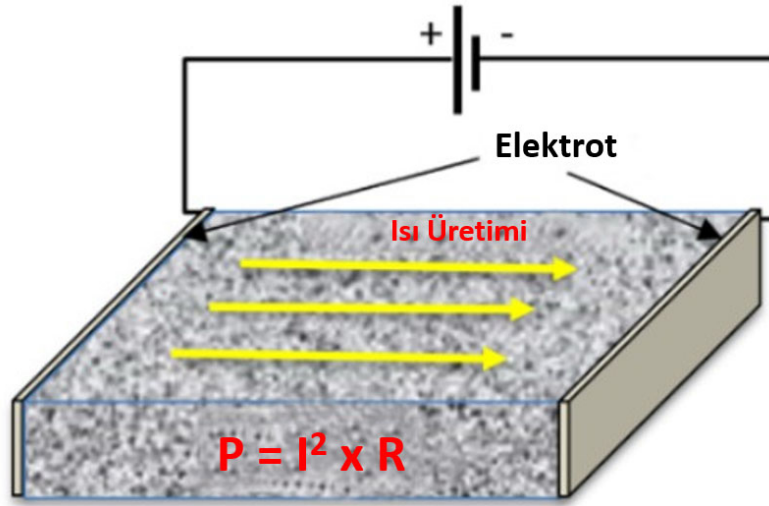
$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R \quad (2.5)$$

Burada;

P = Elektrik enerjisinden ısı enerjisine dönüştürülen ısı üretim gücü (birim zamandaki enerji),

I = İletken asfalt plakadan geçen elektrik akımıdır (A),

R = Plakanın direncidir (Ω).



Şekil 2.11 İAB'nin elektriksel direnç ile ısıtma işleminin gösterimi (Chen ve Balieu 2020).

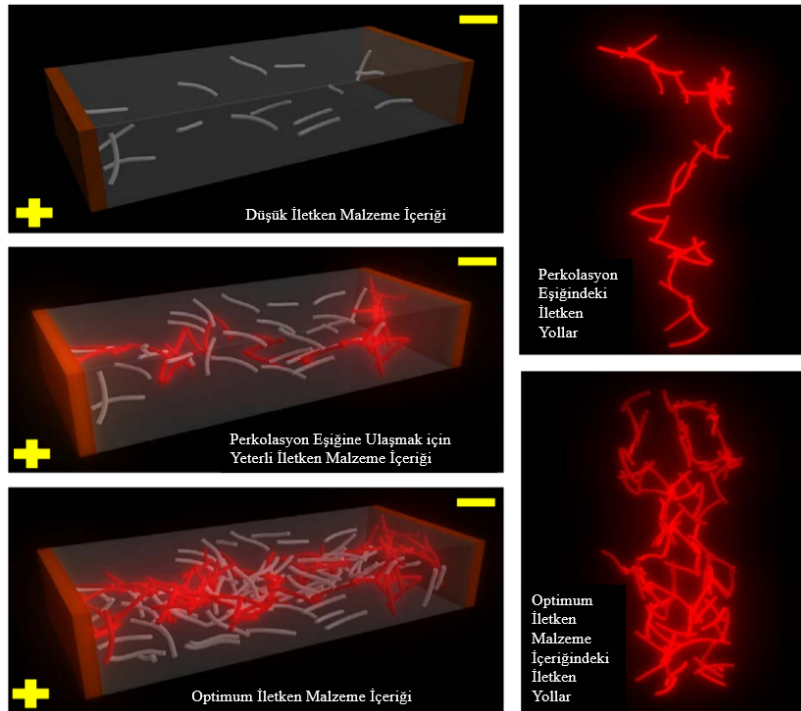
İletken bir asfalt kaplamanın dirençli ısıtmasının ana uygulaması, kaplama yüzeyinde kar eritmek ve buz çözmek içindir. Geleneksel kış bakımı yöntemlerine kıyasla, yüksek verimlilik, aktif kontrol ve aşırı kış koşullarıyla baş edebilme gibi potansiyel avantajları vardır.

2.4.3 Perkolasyon Teorisi

Perkolasyon eşiği olarak da adlandırılan perkolasyon teorisi esas itibariyle, düzenli veya rastgele olarak konumlandırılmış bölgelerin kümesinin bir alanda nasıl birbirine bağlandığını tanımlamak için kullanılmaktadır (Pike ve Seager 1974). Bu teoride, sistemin incelenen malzemenin açıklığından süzülmesine neden olan birbirine bağlı bölgelerin ağı oluşmaktadır (Weber ve Kamal 1997). Perkolasyon teorisi, bir popülasyonda hastalığın yayılması, gözenekli bir ortamda sıvı akışı, nükleer maddedeki kuramsal zerrelere vb. gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. İletkenlik bağlamında perkolasyon teorileri, iletken katkı(lar) ve bir yalıtım matrisinden oluşan malzemelerdeki yalıtkan-iletken geçişlerini açıklamak için uygulanmaktadır (Sandler vd. 2003). Bu malzemelerdeki ani geçiş (yalıtkandan iletkene) bir perkolasyon eşiğinin kanıtıdır (Weber ve Kamal 1997).

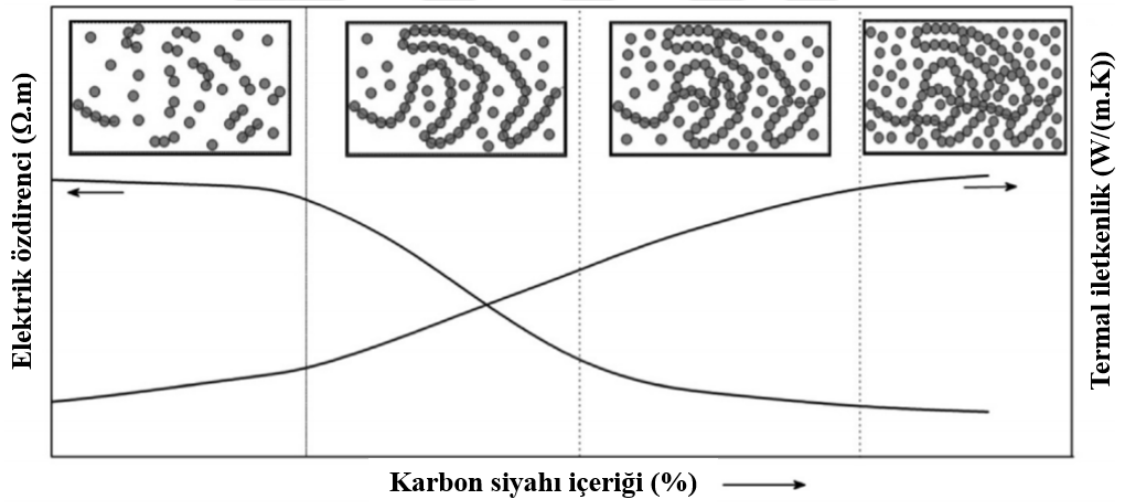
Bir yalıtkan matrise az miktarda iletken malzeme eklendiğinde, iletken malzemeler tamamen yalıtılmakta ve elektron geçişi engellenmektedir. Fakat yalıtım matris içerisine

ilave edilen iletken malzeme yüzdesindeki artış, iletken malzemelerin birbirleriyle temas etmesine izin vermektedir (Arabzadeh 2018). İletken malzeme miktarı arttıkça, temas miktarı da artmakta ve dolayısıyla kompozitin iletkenliği de artış göstermektedir (Şekil 2.12). İletken malzemelerin eklenmesi, iletkenlikte kademeli bir artışa, yani dirençte kademeli bir azalmaya neden olmaktadır. İletken malzeme içeriği bir eşik değerine ulaştığında, kompozit içersindeki elektronların numuneden geçmesini sağlayan sürekli iletken yol oluşturulacaktır. Bu perkolasyon eşiğinin ötesinde, iletken malzemelerin eklenmesi, iletken bir ağın her üç boyutta da kademeli olarak gelişmesine ve yayılmasına neden olmaktadır. Başka bir deyişle, bu aşamada daha fazla iletken malzemelerin eklenmesi, elektrik direncinde keskin bir azalmaya neden olmaktadır. İletken malzemelerin eklenmesi, iletken malzemelerin her yöne doğru birbirleriyle temas ettiği ve birçok iletken ağ ve elektron geçişinin oluşturulduğu optimum değere kadar devam edebilmektedir (Liu vd. 2012). Sonuç olarak, bu aşamadan sonra, daha iletken malzemeler ilave etmenin direnci azaltmada çok az etkisi olacak ve elbette ekonomik olmayacaktır (Arabzadeh 2018).

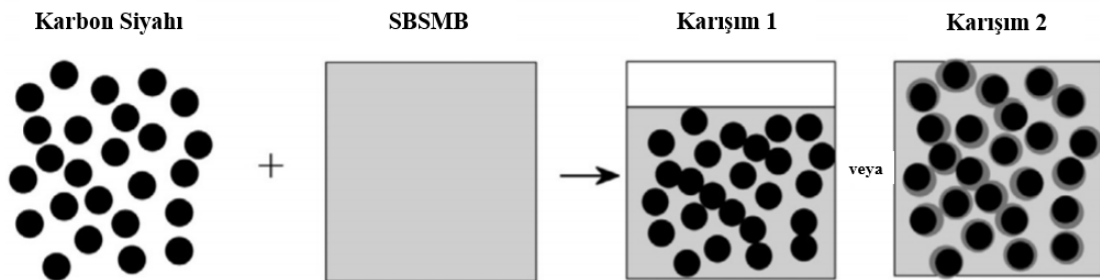


Şekil 2.12 İletken malzemelerin hacim içeriğinin kompozit sistemlerdeki iletkenlik kalitesi üzerine etkisi (Arabzadeh 2018).

SBS'li modifiye bitümdeki (SBSMB) karbon içeriğine karşı termal iletkenlik veya elektrik özdirenci Şekil 2.13'de görülmektedir. KS içeriği varyasyonları altındaki iletkenlikteki değişiklikler dört aşamaya ayrılabilir (Pike ve Seager 1974). Yalıtılmış faz, deney numunesinde geçerli bir iletken yol yoktur. Geçiş fazı, KS temas etmeye başlar ve geçerli iletken yollar oluşur. İletken faz, maksimum iletkenlik ile yalıtılmış faz biter ve KS neredeyse optimum içeriğine ulaşmıştır. Son olarak, KS'nin artan içeriği ile iletken yolların uzunluğu açıkça azalmaz. SBS modifiye bitüm içerisindeki karbon siyahının dağılımının iki farklı durumu Şekil 2.14'te verilmiştir. İlk durumda bitümün hafif fraksiyonunu emen KS, karışımın hacminin azalmasına ve KS içeriğinin artmasına neden olmaktadır. İkinci durumda hafif fraksiyonu emdikten sonra KS'nin hacmi artmakta ve düşük KS içeriğinde iletken yol oluşmaktadır. Böylece, etkin konsantrasyon veya artan KS hacmi ile iletken yol uzunluğunu en aza indirilebilmektedir (Cong vd. 2014).

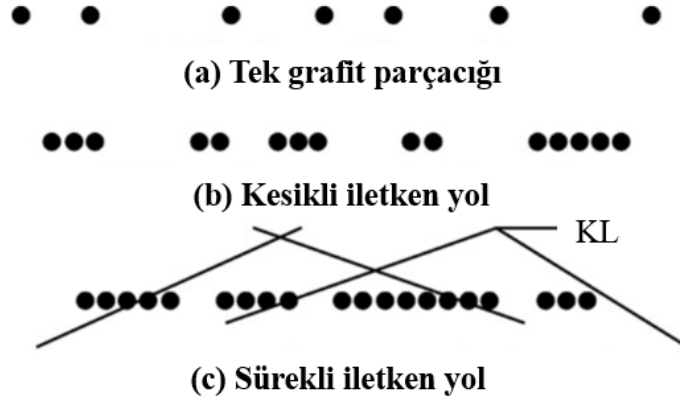


Şekil 2.13 Karbon siyahı içeriğine karşı termal iletkenlik veya elektrik özdirenci (Cong vd. 2014).



Şekil 2.14 SBS modifiye bitüm karışımında karbon siyahının dağılımının iki farklı durumu (Cong vd. 2014).

Asfalt karışımına tek başına ve az miktarda grafit ilavesi iletken yol oluşturmada yetersiz kalabilirken, karbon lifi ile beraber kullanımı yeni iletken yollar oluşmasına yardımcı olacaktır. Şekil 2.15'te görüleceği üzere temas etmeyen grafitler arasında karbon lifleri köprü vazifesi görerek iletken yolun oluşmasını sağlamaktadır (Liu vd. 2008).



Şekil 2.15 İletken modelin şematik gösterimi (a) ve (b) tek grafit parçacığı tarafından oluşturulan kesikli iletken yol (grafit içeriği <perkolasyon eşiği); (c) Grafit ve karbon lifinden oluşan sürekli iletken yol (köprüleme etkisi) (Liu vd. 2008).

2.5 İletken Asfalt Betonunda Kullanılan İletken Bileşenler

2.5.1 Karbon Lifi

Günümüzde asfalt betonunun (AC) mekanik özelliklerini güçlendirmek amacıyla farklı malzemeler kullanılmakta olup bunlardan en önemlileri lifler ve polimerlerdir. Bu modifikatörlerden polimerler bitüm modifikasyonunda daha popülerken liflerin iyileştirici etkileri daha dikkat çektiği belirtilmektedir. Asfalt betonunu iyileştirmek için kullanılan bazı lifler şunlardır;

- Polipropilen Lifi (PPL)
- Polyester Lifi (PL)
- Asbest (mineral) Lifi (AL)
- Selüloz Lifi (SL)
- Karbon Lifi (KL)
- Cam Lifi (GL) ve Naylon Lifi (NL)

Liflerin malzeme davranışını iyileştirmek için kullanma kavramı eski olup modern gelişim 1960'lı yılların başlarında başlamaktadır. Asfalt malzemelerin güçlendirilmesi ile ilgili bilinen ilk çalışma ise Zube (1956) yaptığı çalışmadır. Çalışmasında asfalt kaplama tabakasının altına yerleştirilen tel hasır kullanımını değerlendirmiş olup her tür tel takviyesinin boyuna çatlak oluşumunu engellediği veya geciktirdiğini aynı zamanda kaplama kalınlığının azaltılmasına izin vereceğini belirtmiştir. Bu alanda araştırmalar ise günümüzde devam etmektedir (Mahrez vd. 2003). Böylelikle bu tür liflerin kullanımının asfalt betonunun mekanik özelliklerinin geliştirilmesine ve atık liflerin geri dönüşümüne ek olarak KL gibi iletken katkıların elektriksel olarak iletken asfalt betonunun üretilmesine imkân vermektedir. Aynı zamanda KL yaklaşık 1000 °C erime noktasına sahip olması sayesinde yüksek sıcaklıklara dayanıklılığının yanı sıra asfalt bağlayıcı ile uyumluluğu nedeniyle iyileştirme için uygun bir aday olmaktadır (Abtahi vd. 2010, Chung 2012). Karışıma lif eklenmesi ile karışımın viskoelastisitesinin değişmesini, dinamik modülünü, nem hassasiyetini, sürünme uyumunu, tekerlek izi ve donma-çözünme direncini geliştirilmesini ve asfalt kaplamanın yansıtıcı çatlaklarını azaltılmasını sağlamaktadır. KL'nin asfalt betonunun yorulma ömrünü yaklaşık 10-25 kat artırabileceği bildirilmiştir (Lee vd. 2005). Lif miktarı ve uzunluğu ise asfalt iyileştirmesinde önem arz etmektedir. Nitekim liflerin uzun olması halinde liflerin asfalt içerisinde topaklanmasına, çok kısa olması halinde ise iyileştirici etki yapmayacak olup sadece karışımda pahalı bir katkı maddesi olarak görev yapmasına neden olacaktır. Bu ekonomik olmayan durumu engellemek için az miktarda KL ekleyerek yüksek iletkenliği sahip asfalt betonu elde etme çalışmaları yapılmıştır (Liu ve Wu 2011, Arabzadeh vd. 2019). Karbon lifinin asfalt betonlarında en iyi iletkenlik arttırıcı malzeme olduğuna inanılmaktadır. Çünkü yüksek en boy oranına sahip karbon lifleri, diğer iletken katkı tiplerine kıyasla en uzun iletken yollar oluşturmaktadır. Bir lif-lif temas mekanizması iletken ağ oluşumunu kolaylaştırmakta ve böylece asfalt betonundan elektron iletim hızını artırmaktadır. Öz direnci yaklaşık $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ olan karbon lifi, asfalt karışımlarının elektrik iletkenliğini önemli ölçüde artırabilmesine rağmen, büyük bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj KL'nin küçük veya büyük kümeler halinde topaklaşma eğiliminin yüksek olmasıdır. % 8'den daha fazla KL'ye sahip iyi dağıtılmış bir KL modifiye asfalt betonunun hazırlanması, özellikle geleneksel karıştırma teknikleri ile kolay değildir (Wu vd. 2005). Liflerin asfalta (bitüme) eklenmesi (ıslak yöntem) ve agregaya eklenmesi (kuru yöntem)

olmak üzere iki yöntem mevcuttur. Deneysel olarak kuru yöntemin gerçekleştirilmesi kolay olmaktadır ve karışımdaki en iyi lif dağılımını sağlayarak liflerin topaklanması riskini de en aza indirmektedir (Abtahi vd. 2010). Karbon lifinin İAB elektrik direncini azaltmada grafitten çok daha etkili olduğu bulunmuştur (Wu vd. 2013).

2.5.2 Çelik Lifi ve Çelik Yünü

Asfalt karışımına iletken bir katkı maddesi olarak çelik lifleri eklenmektedir. Çelik lifi kullanan iletken asfalt betonunun öz direncini, en düşük seviyede yalnızca $1 \times 10^4 \Omega \cdot m$ 'ye kadar ulaşabilir ve nadiren lif uzunluğu veya çapından etkilenmektedir. Bu nedenle, çelik lifin iletkenlik iyileştirme potansiyeli asfalt betonunun öz direncini $100 \Omega \cdot m$ düzeyinde sınırlandırabilen karbonlu malzemelerinkinden daha düşük olmaktadır. Buna karşın asfalt betonunun yorulma ömrü, çelik lifler (ÇL) eklenerek 10-25 kat uzatılabilmektedir (Lee vd. 2005). Aynı zamanda çelik lifler, asfalt betonunun nem hasarını, yansıma çatlamasını, ısı iletkenliğini ve elektrik iletkenliğini iyileştirebilmektedir (Serin vd. 2012, García vd. 2013). $7 \times 10^{-3} \Omega \cdot cm$ öz dirence sahip ÇL, portland çimento betonuna (PÇB) uygulanmasına kıyasla asfalt betonunda yaygın olarak kullanılmamıştır (Liu vd. 2010). Hem ÇL hem de çelik yünü (ÇY), asfalt mastiğinde ve betonunda elektrik iletkenliği arttırmak ve indüksiyon yoluyla ısı üretmek amacıyla kullanılmıştır (García vd. 2011, Liu vd. 2011, Liu vd. 2012, Mokhtari ve Nejad 2013). Liu vd. (2012), ÇY'nin gözenekli asfalt betonuna katılmasının iletkenliğini arttırdığını gözlemlemiş olup, perkolasyon eşiğine ve optimum iletken malzeme içeriğine sırasıyla %2,54 ve %3,81 hacim içeriklerinde ulaşılabileceği belirtilmektedir.

2.5.3 Manyetit

Manyetit (Fe_3O_4), demirli (FeO) ve ferrik (Fe_2O_3) demir türlerini içeren bir kaya mineralidir. Han vd. (2014), çalışmalarında bildirildiği gibi Fe_3O_4 'ün öz direnci (ρ) yaklaşık $4,0 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 'dir. Bu da manyetit malzemesini iletken asfalt betonunda agrega ikamesi olarak umut verici bir aday yapmaktadır (Chen ve Balieu 2020). Elektriksel iletkenliğin yanı sıra manyetit, sıradan mineral malzemedeki farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Örneğin, $5,18 g \cdot cm^{-3}$ 'e varan bir birim hacim ağırlığına sahiptir ve bu, sıradan

mineral kayalardan (kalker, bazalt, granit) çok daha yüksektir (Blaney 2007). Ayrıca manyetit, doğadaki en güçlü manyetik malzeme olarak bilinen ferromanyetiktir (Harrison vd. 2002).

2.5.4 Karbonil Demir Tozu

Normalde toz halindeki karbonil demir, Tong vd. (2011)'de $2,0 \times 10^3 \Omega.m$ civarında bildirilen bir öz dirence sahiptir. Direnç ideal olarak düşük olmasa da karbonil demir tozu geniş bir frekans aralığında elektromanyetik (EM) dalga absorpsiyonunda iyi bir performansa sahiptir (kısmen yüksek manyetik kaybına bağılı olarak) (Tong vd. 2011). Asfalt kaplamadaki uygulama, yamalama veya mikrodalga ısıtma ile onarım işlemleri sırasında asfaltın yeniden biçimlendirilmesinin verimliliğini artırmak amacıyla 1980'lerdeki patentlere (Osborne ve Hutcheson 1989) kadar uzanabilir. İçerisine %2,0 karbonil demir tozu ilave edilerek, asfalt beton numunesinde mikrodalga ısıtma ile sıcaklık artış hızının ilavesiz olandan 6 kat daha fazla olduğu bulunmuştur (Chen ve Balieu 2020).

2.5.5 Grafit

Grafit, temel iki boyutlu altıgen kristal yapıya sahiptir, ancak grafitin şekli ve boyutu, elde edildiği kaynağa ve/veya üretim sürecine göre değişebilir (Park vd. 2014). Grafit pul tipi, amorf, yapay, ultra yüksek yüzey vb. olarak sınıflandırılır. Pul grafit, 0,03 $\Omega.cm$ ile 0,05 $\Omega.cm$ arasında değişen öz direnç değerlerine sahiptir. Amorf grafit 0,13 $\Omega.cm$ öz dirence sahiptir. Yapay grafit 0,047 $\Omega.cm$ öz dirence sahiptir. Yapay nanoplatelet grafit, 0,184 $\Omega.cm$ ile 0,289 $\Omega.cm$ arasında değişen öz direnç değerlerine sahiptir (İnt.Kyn.5). Pul tipi grafitin bu tipler arasında en iyi aday olduğuna inanılmaktadır (Park vd. 2014). Grafit yağı emer ve böylece optimum asfalt içeriğini artırır. Kendinden yağlama özelliği nedeniyle, belirli bir sınırın ötesinde kullanıldığında grafit, asfalt betonunun mekanik mukavemetini önemli ölçüde etkileyebilir. Grafit, asfalt betonunun dolaylı çekme (IDT) mukavemetini, Marshall stabilitesini, esneklik modülünü ve tekerlek izini (dinamik stabilite) azaltmaktadır (Huang vd. 2009, Liu ve Wu 2011).

Asfalt esaslı kompozitlerin termal ve mekanik performansları grafit tozu ile geliştirilebilir (Liu vd. 2008). Hem mükemmel iletken özelliklere hem de mekanik özelliğe sahip asfalt betonu hazırlamak için grafit içeriği belirli düşük içerikte kontrol edilmelidir (Liu ve Wu 2011).

2.5.6 Karbon Siyahı

Karbon siyahı (KS), gaz halinde oluşan katı karbon parçacıklarının biriktirilmesiyle üretilen amorf bir karbon katıdır. Tüm yaygın endüstriyel karbonlar arasında en iyi parçacık boyutuna sahip bir malzeme olan KS, indirgeyici koşullar altında hidrokarbon bazlı bir yakıtın termal çatlama veya yanması ile üretilir. En çok oluşturulan KS partikülleri nanometre boyutlarına sahiptir (İnt.Kyn.5). Tipik özdirenç değeri 0,341 Ω .cm olan KS, iletkenliği artırıcı bir madde olarak kullanılabilir (Guo ve Leu 2012). KS'nin, bitüm gibi polimer bazlı matrislerin yaşlanma karşıtı ve iletkenliğini (hem termal hem de elektriksel) nispeten düşük dozajlarda iyileştirmeye yardımcı olduğuna inanılmaktadır (Le Guern vd. 2010, Cong vd. 2014). KS, asfalt karışımlarının kompleks modülünü ve esnekliğini artırmaktadır (Wen ve Chung 2004). KS, asfaltı oksidatif bozunmaya karşı stabilize etmek için kullanılabilir. Daha yüksek yüzey alanına sahip KS'nin ayrıca bir anti-oksidasyon maddesi olarak daha etkili bir şekilde hizmet edebileceğine inanılmaktadır. KS konsantrasyonunun artırılması, asfalt bağlayıcısının sertliğinin artmasına neden olmaktadır (Apeagyei 2011).

Cong vd. (2014), üç tür KS'nin (N330, N650 ve N990) Stiren Bütadien Stiren kopolimeri (SBS) modifiyeli asfalt bağlayıcısının özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için çalışmalar yapmışlardır. Asfalt bağlayıcılarının kısa süreli ve uzun süreli yaşlanmasını, dinamik kayma reolojisini, elektrik özdirencini, termal iletkenliğini ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, seçilen KS'nin tümünün SBS modifiye bitüm bağlayıcısının yüksek sıcaklık özelliklerini, yaşlanma geciktiriciliğini, termal iletkenliğini artırabileceğini göstermiştir.

2.5.7 Alüminyum Talaşı

$2,65 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirence sahip alüminyum, en iyi elektriksel iletken malzemelerden biridir, ancak alüminyum sadece asfalt betonuna talaş şeklinde dahil edildiğinde betonun elektrik iletkenliğini etkili bir şekilde geliştirmez. Alüminyumun havaya maruz kaldığında kolayca oksitlendiğine ve bu nedenle iletkenliğinin azaldığına inanılmaktadır. Asfalt betonunda iyi elektriksel iletkenlik elde etmek için, küçük ölçek çelik lifleri ve grafit gibi diğer iletken malzemelerin alüminyum talaşlar ile birlikte kullanılmasıyla mümkündür (Park vd. 2014).

2.5.8 Çelik Cürufu

Çelik cürufu, paslanmaz çelik üretim sürecinin bir yan ürünüdür (Ahmedzade ve Sengoz 2009). Üç ton paslanmaz çelik üretimi bir ton paslanmaz çelik cürufu vermektedir (Proctor vd. 2000). Avrupa'da yıllık bazda on iki milyon ton çelik cürufu üretilmektedir (Mozt ve Geiseler 2001). Kaba agrega olarak kullanılan çelik cürufu, asfalt betonunun mekanik özelliklerini geliştirmektedir (Ahmedzade ve Sengoz 2009). Kireçtaşı kaba agregasının % 75'ini çelik cürufuyla değiştirmek, dolaylı çekme mukavemeti, esneklik modülü, yorulma ömrü, tekerlek izi direnci ve sürünme modülü dahil olmak üzere asfalt betonunun mekanik özelliklerini geliştirmektedir (Asi 2007). Taş mastik asfaltta (TMA) çelik cüruf kullanılırsa, TMA'yı uygun agregaya ulaşabilme yönünden daha ekonomik hale getirebilmektedir (Xue vd. 2006, Wu vd. 2007). Asfalt betonunda agregaların bir parçası olarak çelik cürufu kullanımı, sadece agrega kıtlığı sorununu çözmekle kalmamakta, aynı zamanda katı atıkların geri dönüşümünü gerçekleştirmekte ve çevre kirliliği miktarını azaltmaktadır (Jiao vd. 2020b). %30'dan fazla çelik cürufu içeren asfalt beton karışımlarının kayma direncini artırdığı ve çelik cürufunun ısıyı asfalt betonda geleneksel olarak kullanılan diğer agrega tiplerinden daha fazla tutabildiği bildirilmektedir. Çelik cüruf agregasını asfalt betonundaki tek iletken malzeme olarak kullanmak, elektrik öz direncini yaklaşık bir büyüklükte artırabilmektedir. Bununla birlikte, sıradan kaya agregaları ile hazırlanan sade asfalt karışımı ile karşılaştırıldığında, kaba agregalar olarak çelik cüruf kullanan asfalt betonu sadece biraz daha düşük öz direnç göstermektedir (Asi 2007, Ahmedzade ve Sengoz 2009). Bunun sebebi, iletken olmayan

bitümlü harcın izolasyonu nedeniyle çelik cürüflü asfalt karışımında sürekli iletken yollar oluşturmak zor olmaktadır (Chen ve Balieu 2020).

2.6 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Konusu ile İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

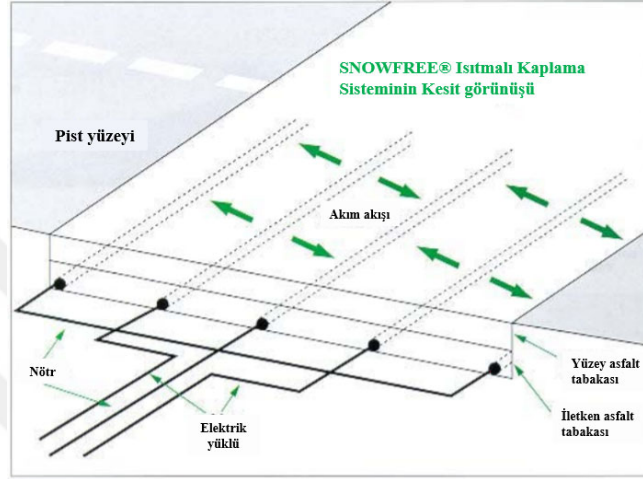
Literatürde, İAB ile ilgili deneysel çalışmalarda, hem yüksek iletkenlik (kaplama buz çözme uygulamaları için) elde etmek hem de yeterli mekanik özellikleri sağlamak için kapsamlı deneysel araştırma gerektiren bir konu olduğu bildirilmiştir (García vd. 2009, Huang vd. 2009). Elektriksel iletken asfalt betonunun iletkenlik ve mekanik özelliklerinin, malzeme bileşimlerine ve karıştırma prosesine büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir (Pan vd. 2015). Mevcut iletken katkı malzemelerinin çeşitliliği göz önüne alındığında, iletken katkıların maliyetleri açısından dikkate alınması ve bunları literatürdeki deney sonuçlarına dayanarak ekonomik ve verimli ısıtmalı kaplamalar elde etme potansiyelleri açısından değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Böyle bir değerlendirme ile en yüksek dereceli iletken malzemeler İAB'nin geliştirilmesi için seçilebilir (Arabzadeh 2018). Ayrıca, asfalt karışımlarında daha yüksek iletkenlik elde etmek için büyük miktarlarda tek bir iletken malzemenin kullanılmasının sadece maliyeti artırmakla kalmayıp, aynı zamanda mekanik performansı da düşürebileceği belirtilmiştir. Bu tür sorunların üstesinden gelmek için, asfalt betonunda iletken tozların ve liflerin birlikte kullanılması potansiyel olarak uygun elektriksel ve mekanik özelliklere sahip uygun maliyetli ve iyi performans gösteren bir İAB elde edilmesi ile sağlanabilir (Wu vd. 2013).

Shao-peng vd. (2002), yeni tip çok fonksiyonlu beton olan iletken asfalt betonu hazırlamak için AH-70 bitüm, bazalt agregası, kireç taşı tozu ve grafit parçacıkları (kristalize ve mikro kristalli olmak üzere iki tip) kullanılmıştır. Asfalt betonuna ağırlıkça %0'dan %20'e değişen oranlarda grafit parçaları katılmıştır. Öz direnci yaklaşık $10 \cdot 10^3$ $\Omega \cdot m$ olan iletken asfalt betonu elde edilmiştir. Asfalt betonundaki bitümün direnci agregadan daha yüksektir. Kristalize grafit olan numunenin ise artan sıcaklık ile direncinin belirli seviyeye kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmüştür. Direnç artış sebebinin, asfalt betonundaki hacim artışı sonucu iletken ağın ayrılması olarak ifade edilmiştir. Hacim artışı belli bir seviyeye ulaştığında dirençte ani bir değişikliğin

görülebileceği ve bu değişikliğin bitümün yumuşama noktası sıcaklığı yakınında daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. Sıcaklık artışı sonucu grafit parçacıkları yeni iletken ağlar oluşturarak öz dirençte azalma eğilimi gösterdiği ifade edilmiştir. Artan sıcaklıkla mikro kristalli grafit olan numunenin öz direnci artmıştır. Mikro kristalli grafit, kristalize grafitten daha fazla grafit içeriğine sahiptir. Yüksek grafit içeriği ise karışımın termal stabilitesi artırmış olup, iletken parçacıkların taşınmasını zorlaştırmıştır. Direnç sıcaklığın artmasıyla artış eğilimi göstermiştir.

Derwin vd. (2003), İAB sistemleri için ticari bir isim olan Snowfree®'nin performans verimliliğini araştırmıştır. Snowfree®, Superior Graphite Co. tarafından hazırlandı ve FAA (Federal Havacılık İdaresi) Teknik Merkezi ve Taşkın Test Laboratuvarları işbirliği ile geliştirildi. Snowfree® sistemi buz ve karı eritmek için grafit, asfalt ve elektrik kombinasyonunu kullanmaktadır. Derwin vd. (2003), tarafından Kasım 1994'te Chicago O'Hare havaalanında yoğun olarak kullanılan bir kalkış pisti yolundaki bir kesimde kurdular (Şekil 2.16). Sistem, gömülü sıcaklık ve nem sensörleri yardımıyla otomatik olarak çalıştırılan 120 voltluk bir elektrik kaynağı ile çalıştırıldı. Snowfree® sisteminin dayanıklılığı, güvenliği ve performansı üç buçuk yıl boyunca yapılan bir pilot çalışmada ölçülmüştür. 18 saatlik bir zaman aralığında kabloların, iletken asfalt tabakasının (İAB) ve yüzey asfalt beton tabakasının yerleştirildiğini bildirilmiştir. Isıtmalı kaplama sistemi kesimi (İKS) 70 ft×90 ft (23,34x27,43 m) boyutlarında bir alanı kaplamıştır ve toplam sistem güç gereksinimi yaklaşık 300 kW'dır. Her iki kablo çifti (elektrotlar) arasındaki boşluğun 16 ft (4,88 m) olduğunu ve sistemin her biri 830 A akım taşıma kapasitesine sahip olacak şekilde 120 V'de çalışacak şekilde tasarlandığını bildirmiştir. O'Hare Uluslararası Havalimanı'ndaki test kesimi çalışmaya hazır olduktan sonra Underwriters Laboratuvarları tarafından kaçak akım testi gerçekleştirildi ve güvenlikle ilgili herhangi bir problem tespit edilmemiştir. İKS, Mart başında 2 inçlik (5,08 cm) bir kar tabakasını başarıyla eritmeyi başarmıştır (Resim 2.1). O'Hare Uluslararası havaalanındaki test kesimi, sıcaklığı 2,5 saatte 9 dereceye kadar artırabildi. Snowfree® İKS'nin sıcaklığı, Derwin vd. (2003) çalışmalarını gerçekleştirdiği süre boyunca saatte 3-5 °C oranında artmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, O'Hare Uluslararası Havalimanı'nda inşa edilen İKS test kesimi asfalt betondan yapılmıştır. İAB tabakası, hava alanlarının kaplanmış alanları için FAA P401 şartnamelerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Derwin vd.

(2003), göre doğru oranlarda grafit ve agrega kullanılması, İAB Snowfree® IKS'nin normal asfalt betonuna eşit dayanıma sahip olmasını sağlayacaktır. Derwin vd. (2003), tarafından hazırlanan rapordaki çalışmaya göre, test kesimi dört yıl trafikle ve çevresel etkilere maruz kalmış olup, bu süre boyunca ısıtılmış ve normal asfalt betonu arasında çatlakların varlığı açısından hiçbir fark olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 2.16 O'Hare Uluslararası Havalimanı'ndaki bir pist yoluna kurulan Snowfree® sisteminin şeması (Derwin vd. 2003).



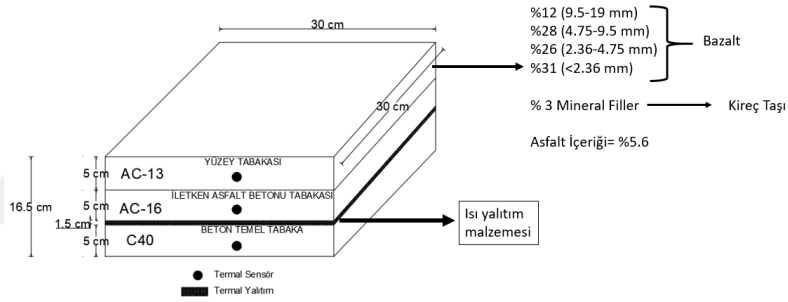
Resim 2.1 Kurulumunun ilk canlı gösterimi – 05/03/1995 (Derwin vd. 2003).

Liu ve Wu (2011), grafit ve karbon lifi modifiyeli asfalt betonunun mekanik ve elektriksel özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada penetrasyon değeri 65 ve yumuşama noktası 45,4 °C olan AH-70 bitümü, parçacık boyutu 150 µm'dan küçük ve karbon içeriği %98,8 olan grafit, lif çapı 10 µm ve ortalama lif uzunluğu 5 mm olan karbon lifi, maksimal boyutu 19 mm olan bazalt agregası ve mineral filler olarak kireçtaşı tozu kullanılmıştır.

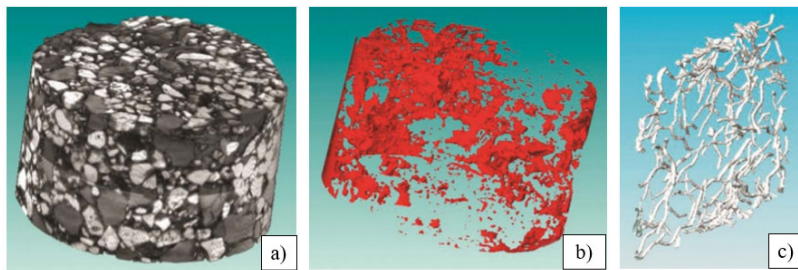
Superpave Tasarım yöntemi kullanılarak, 150 ± 5 mm çapında 130 ± 5 yüksekliğinde numuneler üretilmiştir. Mekanik özellikleri dolaylı çekme deneyi ile ölçülürken, eş zamanlı olarak Keithley 2700 multimetre cihazı ile elektriksel direnç ölçümleri yapılmıştır. Asfalt karışımına grafit ve karbon lifi gibi iletken bileşenlerin eklenmesinin asfalt karışımının mekanik performans ve elektriksel özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir.

Wu vd. (2013), asfalt betonuna çoklu elektriksel iletken bileşenler ekleyerek, elektriksel olarak iletken asfalt betonunun (İAB) özelliklerini incelemişlerdir. Katkı türü, içeriği ve çoklu katkı karışımının asfalt betonunun özdirençlerine etkilerini araştırmışlardır. İletken katkı malzemeleri olarak grafit (parçacık boyutu $150 \mu\text{m}$ 'dan az), karbon lifi (ortalama lif uzunlu 5 mm), çelik lifi (çapı 80 ve $100 \mu\text{m}$ arasında) ve bazalt yerine kullanılan çelik cürufu (tanecik boyutu $9,5 \text{ mm}$ 'den küçük) kullanılmıştır. Kullanılan bitüm Stiren – Bütadien-Stiren (SBS) ile modifiye edilmiş bitümdür. Agrega olarak ise tanecik boyutu 19 mm 'den küçük bazalt kullanılmış olup, mineral filler yerine tanecik boyutu $0,075 \text{ mm}$ 'den küçük olan kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için Marshall stabilite (MS), tekerlek izi ve dolaylı çekme yorulma deneyi yapılmıştır. İAB'nin doğru akımla (DC) kar eritmek için etkili bir yöntem sağladığını kanıtlamak için hem laboratuvar hem de arazi deneyleri yapılmıştır. Köprü tabliyesinin gerçek yapısını benzetmek için numune, çimento beton tabakası üzerine sıkıştırılmış iki asfalt karışım tabakasından oluşmaktadır (Şekil 2.17). Sıcaklık alan dağılımını değerlendirmek için kızılötesi görüntüleme teknolojisi ve elektriksel direnci ölçmek için ise Keithley 2700 multimetre cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık ölçmek amacıyla yüksek hassasiyetli termal direnç (Pt100) numunelerin içerisine gömülmüştür. Çoklu iletken katkı maddelerinin iletkenliği artırma mekanizmaları hakkında bilgi edinmek için X-ışını bilgisayarlı tomografi deneyi yapılmıştır (Şekil 2.18). İAB numunesi 24 saat boyunca $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik sabit bir sıcaklığa tabi tutulmuştur. Daha sonra İAB numunesine 200 volt uyguladılar ve 30 dakika boyunca termal görüntüleme yaptılar. Sıcaklığı belirli bir noktada ve gözlemlerine dayanarak, sıcaklığın $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $16,6 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğini bildirdiler. Deneysel sonuçlardan, İAB üretiminde birden fazla katkı türünün kullanımının tek tip katkı türü kullanımına göre elektriksel iletkenlik açısından avantaja sahip olduğu kanıtlanmıştır. Hem sıcaklık hem de voltajın İAB direnci üzerinde dikkate

değer bir etkisi vardır. Sıcaklık arttıkça elektriksel direnç artış hızı yavaşlarken, voltaj arttıkça hızlanmaktadır. Her elektriksel ısıtma ve hava soğutma işlemi, numunede biriken gerilime neden olabilmektedir. Gerilme, elastik sınırı aştığında, elektriksel olarak iletken ağ daha da yok edilerek elektriksel dirençte artışa neden olmaktadır. İAB direnci üzerinde sıcaklık, gerilim (voltaj) ve sıcaklık çevrimi etkilerini iletken yolların kopması ve yeniden inşası ile açıklanmıştır. İAB'nin tüm mekanik özelliklerinin, tasarım gereksinimleri karşıladığı belirtilmiştir. Saha testinde, karın 240 dakika boyunca $350 \text{ W} = \text{m}^2$ giriş gücüyle tamamen eridiği gözlenmiştir. İAB'de oluşan iletken zincirin büyük ölçüde iletken katkı maddelerinin asfalt betonu içerisindeki dağılımına bağlı olduğu gösterilmiştir. İletken asfalt betonu tabaka ile beton temel tabakası arasında ısı yalıtım malzemesinin yerleştirilmesi ile iletken tabakanın daha fazla ısınması ve harcanan enerjinin daha verimli kullanılması sağlanmıştır.



Şekil 2.17 Hazırlanan küçük ölçekli kaplamanın boyutları ve ölçüm noktaları şeması.

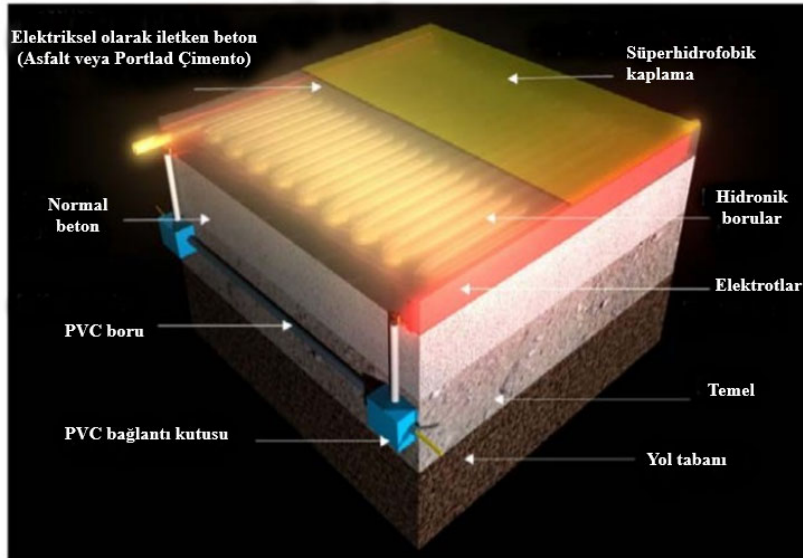


Şekil 2.18 X-ışını bilgisayarlı tomografi ile elde edilen materyal dağılım görüntüleri: (a) agrega ve çelik cürufu; (b) asfalt harcı; (c) çelik lifi (Wu vd. 2013).

Pan vd. (2017), çalışmalarında İAB kaplamalarında donma-çözünme ve yaşlanmanın kaplamanın mekanik ve termal özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bitüm olarak Stiren Bütadien Stiren (SBS) ile modifiye edilmiş bitüm, agrega olarak bazalt, mineral filler olarak kireçtaşı ve termal iletken filler maddesi olarak grafit kullanılmıştır. Önceki

çalışmalarında grafitin İAB'nin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş olup, hacimce %40 grafit ikame edilmek suretiyle mekanik ve termal iletkenlik özelliklerin gereksinimleri karşıladığını göstermişlerdir (Wu vd. 2013, Pan vd. 2014). Asfalt betonun termal özellikleri termal sabit analizörü (Thermal Constants Analyzer) ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, donma-çözünme etkisinin İAB numunelerinde hacim genişlemesine ve mukavemet bozulmalarına yol açacağını göstermiştir. Donma-çözünme deneyi sırasında, termal iletkenlik ve İAB'nin özgül ısı düşme eğiliminde olurken, termal yayılım buna paralel olarak artmıştır. Her ne kadar yaşlanma süreci İAB'nin nem direncini, düşük sıcaklık ve yorulma özelliklerini bozsa da orijinal ve yaşlı numuneler arasında termal iletkenlik, termal yayılım ve özgül ısı açısından önemli bir fark olmamıştır. Grafitin eklenmesi İAB'nin yaşlanma önleyici özelliklerini geliştirmiştir.

İAB'yi, gömülü hidronik boruları ve süperhidrofobik kaplamayı birleştiren hibrit bir ısıtma sistemi (Şekil 2.19) oluşturarak kaplamalarda buz oluşumuna ve kar birikmesine karşı çok daha iyi mücadele edilebilecektir (Akbulut vd. 2018, Arabzadeh 2018).

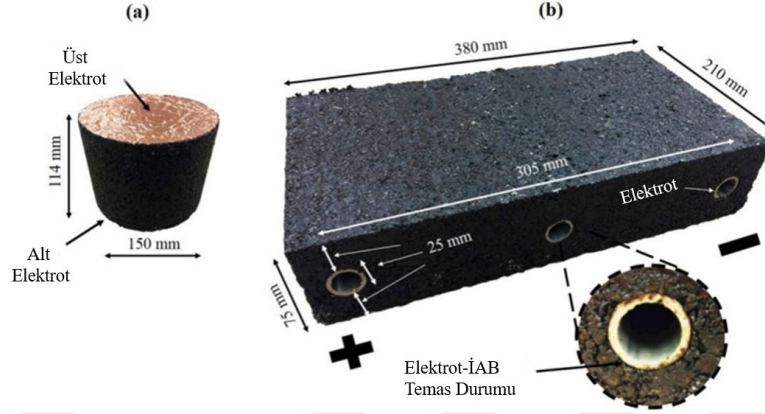


Şekil 2.19 Hibrit ısıtmalı bir kaplama sisteminin şeması (Arabzadeh 2018).

Arabzadeh vd. (2019), çalışmalarında kışın yol kaplama bakım işlemlerini (buzlanmayı önleme ve buz çözme) bir uygulamayla otomatikleştirmek için sıcak karışım asfalt (HMA) kaplama içerisine karbon lifi (KL) ilave edilerek elektriksel olarak iletken asfalt betonu üretmişlerdir. Asfalt betonu içerisine karbon lifi ilavesi sırasında homojen

dağılımı sağlamak ve az miktarda KL ile yüksek iletken asfalt betonu elde etmek amaçlanmıştır. İletken asfalt betonunun perkolasyon eşiğinin ötesindeki dozaj oranlarında elektriksel davranışını açıklamak için perkolasyon teorisi kullanılmış. Numunelere elektrotların bağlanması için yeni ve pratik bir yaklaşım getirilmiş. Şiddetli kış koşullarında iletken asfalt betonunun ısıtma performansı değerlendirilmiş. Daha sonra elektrik iletken asfalt betonunun sıcaklık artışı, güç tüketimi ve kar eritme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Çalışmada PG 58-28 bağlayıcısı, kireçtaşı agregası ve hacimsel öz direnci $17,2 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ ve karbon içeriği %94 üzerinde olan karbon lifi kullanılmıştır. KL'leri ve agregaları karıştırmak için planet (Hobart) bir karıştırıcı kullanılmış. KL'lerin uçmasını önlemek ve dağılım homojenliğini sağlamak için, önce agrega- KL karışımına toplam ağırlıkça %4 su ilave edilmiş ve ardından 3 dakika 285 rpm hızında karıştırma işlemine başlanılmıştır. Kuru karıştırma yönteminin su ilavesiyle modifiye edilmesi, karışımdaki KL dağılımının kalitesinin artırılması üzerinde önemli bir etki sergilediği belirtilmiştir. Agregas- KL karışımları daha sonra suyun buharlaşmasını sağlamak için 110 °C'ye ayarlanmış bir fırında 24 saat boyunca ısıl işleme tabi tutulmuş. KL dağılım kalitesini artırmak için su ilavesi ve bu tür bir KL dağılım yöntemi için prosedürün detaylandırılması, bu çalışmanın yeni özellikleri arasındadır. Numuneler %0 ila %2,5 (karışımın toplam hacmine göre) arasında değişen KL dozaj oranlarında üretilmiştir. Hacim direnci ölçümlerini kolaylaştırmak ve bu tür ölçümleri yaparken elektrotların numunelere manuel olarak itilmesi ile ilgili hataları ortadan kaldırmak için gevşek asfalt karışımlarının hem üst hem de alt kısımlarına bakır elektrotlar yerleştirilmiştir (Şekil 2.20a). Bu yaklaşımı takiben, asfalt bağlayıcının girintileri ve yapışkan davranışı, elektrotların 150 mm çaplı dönel numunelere yapışmasına yardımcı olmuştur. Plakalar, kapsamlı bir aktif termografi gerçekleştirmek ve ardından kar eritme kapasitesini değerlendirmek için %1'lik optimum KL hacim içeriğinde (saha uygulamasında mümkün olan içerik) üretilmiştir (Şekil 2.20b). Elektrot gömülmesini mümkün kılmak için levhalar, 25 mm alt tabaka kalınlığı ve 50 mm üst tabaka kalınlığı ile iki tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Her bir levhanın %4'lük hava boşluğu içeriği elde etmek için tasarlandığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda iletken asfalt betonundan yapılmış % 1 KL içeren ve -21 °C'de koşullandırılan bir plakanın 40 V ile çalıştırıldığında sıcaklığı 25 dakikalık bir zaman aralığında 23 °C'e kadar artırılabilirdiği görülmüştür. Ayrıca, soğuk bir kış mevsiminde asfalt beton plaka, 40 V ile çalıştırıldığında 2 saatlik bir zaman aralığında

2,35 kW/m² güç yoğunluğu üreterek 190 mm kalınlığındaki kar tabakasını erittiği belirtilmiştir.



Şekil 2.20 İletken asfalt betonu numune tipleri, a) Dönel (gyratory) numune, b) Plaka numunesi (Arabzadeh vd. 2019).

Notani vd. (2019), çalışmalarında farklı karbon lifi (KL) kaynaklarının ve uzunluklarının (3, 6 ve 12 mm) elektriksel olarak iletken asfalt betonunun (İAB) hacimsel özellikleri, hacimsel dirençleri ve ısı üretme verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Artan KL uzunluğunun İAB içerisindeki hava boşluklarını (V_a) ve mineral agregadaki boşlukları (VMA) azaltırken, asfaltla dolu boşlukları (VFA) arttırmıştır. KL kaynağı, İAB'nin elektrik iletkenliğini ve ısı üretme kabiliyetini etkilemiştir. KL uzunluğunun azaltılması, hacimsel dirençte azalmaya ve ısı üretme verimliliğinde artışa neden olmuştur. İAB silindirik numuneleri üzerinde gerçekleştirilen hacimsel direnç ve ısı üretim özelliklerinden elde edilen analiz sonuçları İAB kaplama üretiminde kullanılmıştır. İAB kaplamasının, laboratuvar ortamında simüle edilen sert kış koşullarında kalın bir buz tabakasını eritebileceği görülmüştür.

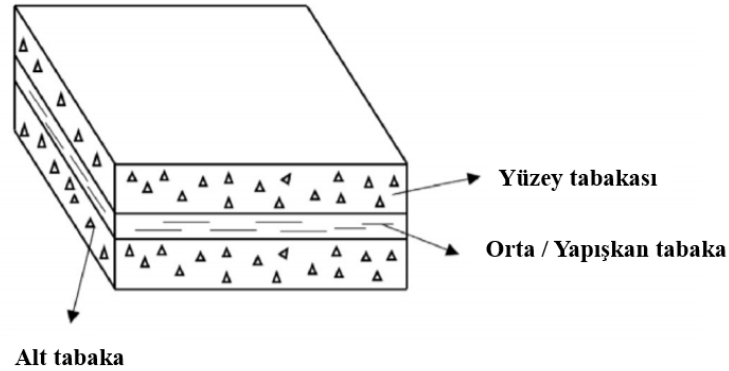
Chen ve Balieu (2020), çalışmalarında teorik analizler ve pratikteki ilgili uygulamalar dahil olmak üzere asfalt malzemelerinin içsel ve geliştirilmiş elektriksel özelliklerine bütünsel bir genel bakış sunulmuştur. Çalışma ışığında elektrik özelliklerinin derinlemesine incelenmesiyle asfalt malzemesinin daha iyi anlaşılması, bir bütün olarak araştırma alanının artan önemi ve multidisipliner iş birliklerinin gelecekteki başarılar için anahtar önemi belirtilmiştir.

Jiao vd. (2020a), çalışmalarında çelik cürufu katkılı asfalt karışımların termal iletkenliğine odaklanmışlardır. Kar eritmek için termal iletkenliğini arttırmak üzere bir termal agrega olarak çelik cürufu eklenmesinin uygulanabilirliğinin doğrulanması amaçlanmıştır. Farklı çelik cüruf içerikli asfalt karışımlarının termal iletkenliği ve mühendislik performansları ölçülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde, diyabaz ve sıcak havalı çelik cürufunun daha yüksek termal iletkenliğe sahip olduğunu ve 9,5-13,2, 1,18-2,36 ve 0,3-0,6 mm boyutlarındaki parçacıkların en etkili boyutlar olduğu belirtilmiştir. Asfalt karışımlarının termal iletkenlikleri, artan çelik cüruf değişimiyle azalmadan önce ilk olarak artış göstermiş olup, termal iletkenlik %6'lık bir çelik cüruf hacmi değişimi için maksimum seviyeye ulaşmıştır. Tüm çelik cüruf asfalt karışımları gerekli mühendislik performansını karşılamakta ve çelik cüruf asfalt karışımları sıradan asfalt karışımlara kıyasla, elektrik-termal kaplama sisteminde kar eritme işleminde olumlu bir rol oynamıştır.

Jiao vd. (2020b), çalışmalarında farklı çelik cüruf hacim içeriklerine sahip asfalt betonunun ısıl özellikleri bir laboratuvarında incelemişlerdir. Termal iletkenlik, paralel bir sıcak tel ve geçici düzlem kaynak yöntemi kullanılarak test etmişlerdir. Homojenlik ve yüzey sıcaklığı, kızılötesi termal görüntüleme yoluyla incelenmiştir. Daha sonra, bölgesel istatistikler, görüntü veri çiftleme ve varyasyon değerlendirme katsayısına dayalı olarak bir 3D kızılötesi görüntü analiz edilmiştir. Termal olarak iletken asfalt betonunun pratik kar eritme verimliliği, bir elektrik-termal sistem kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, asfalt betonunun ısıl iletkenliğinin, ısıtma dağılım homojenliğinin ve yüzey sıcaklığının, çelik cüruf değişimindeki artışla azalmadan önce arttığını göstermiştir. Çelik cürufu asfalt betonunun termal özelliklerinin geleneksel asfalt betonunkinden daha iyi olduğu görülmüştür. Asfalt betonunda en etkili çelik cüruf hacmi hacimce %60 olarak belirlenmiştir. Termal iletkenlik asfalt betonunun kar eritme verimliliği, bir elektrik-termal sistem kullanılarak iyileştirebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, doğal kaynak kıtlığının azaltılmasına ve kaplamaların sıcaklık dağılımının iyileştirilmesine yardımcı olacağı belirtilmiştir.

Wang vd. (2020a), çalışmalarında buz çözme ve kar eritme için mevcut enerji dönüşüm kaplamalarında (dış enerjinin, kaplamaların ısısına dönüştürülmesi) yetersiz kar eritme

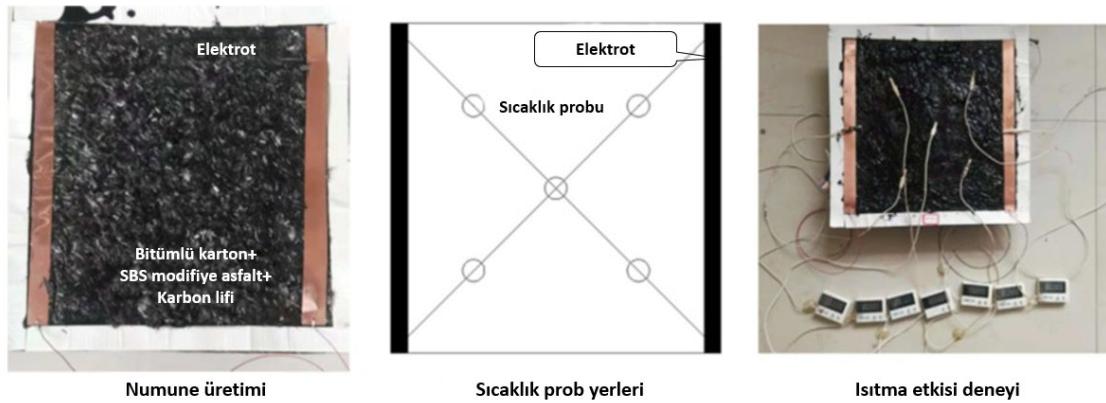
homojenliği, zor yapım ve büyük ısı depolama problemlerini çözmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada su bazlı epoksi reçinesi, su bazlı poliüretan, bitüm emülsiyonu ve poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon lifi kullanmışlardır. Farklı yapışkan malzemelerin iletken tabakaları, su bazlı epoksi reçinesi (MEAWER) ile modifiye edilmiş bitüm emülsiyonu ve matris olarak modifiye edilmiş su bazlı epoksi reçinesi (MWER) ile hazırladılar. Yüzey özdirenç ve sıcaklık değişikliğine göre, iki tip iletken yapışkan tabakasının iletkenlikleri ve ısı iletim etkileri sırasıyla karşılaştırıldıktan sonra değerlendirilmiş olup, yol performansı çoklu koşullara göre belirlenmiştir. Oluşturulan kompozit tabakanın en kesiti Şekil 2.21’de görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında, karbon lifi miktarı 120 g/m^2 olduğunda ve MEAWER ile karşılaştırma yapıldığında, MWER'in yüzey direnci %18,7 daha düşük olduğunu, yüzey sıcaklığının $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ve yapışma mukavemetinin %46,1 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. MWER'in $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de termojenez (ısı oluşumu) ve ısı yayma verimliliği sırasıyla 6,9 ve $2,76 \text{ }^\circ\text{C/saat}$ 'e ulaşabildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, minimum kayma ve çekme mukavemetleri sırasıyla 1.3 ve 0.5 MPa 'ı aştığı görülmüştür. İletken yapışkan tabakanın sıcaklık değişimi ve yol performansına bağlı olarak, MEAWER ve MWER iletken yapışma tabakalarına sırasıyla 120 ve 100 g/m^2 karbon lifi serpilmesi önerilmiştir.



Şekil 2.21 Kompozit tabakanın kesit şeması (Wang vd. 2020a).

Wang vd. (2020b), çalışmalarında kaplama aktif buz çözme ve kar eritme işlemlerinde çevre dostu ve sürdürülebilirlik amaçlamışlardır. Kaplama ara tabakalarının yapıştırılması ve buz ve karların eritilmesi için iletken bağlayıcı malzeme hazırlanmıştır. İletken bağlayıcı malzeme, belirli oranda iletken faz malzemesi ve bağlayıcı malzemeden oluşmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılan SBS modifiye

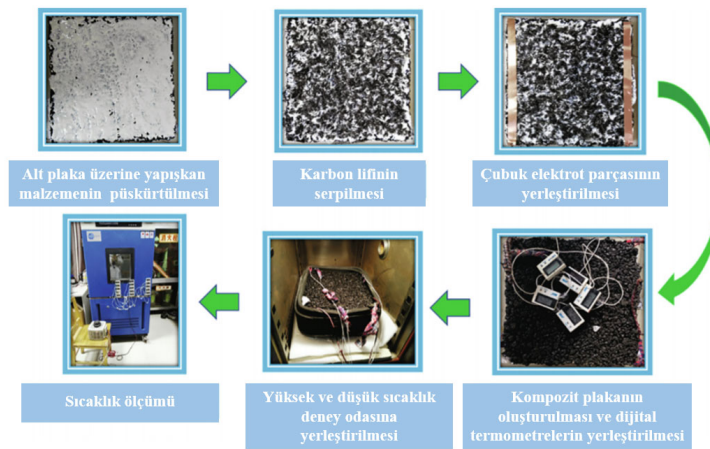
bitüm seçilmiştir. İki tür toz iletken faz malzemesi grafit ve grafen, lif iletken faz malzemesi olarak ise 6 mm uzunluğunda kesilmiş karbon lifi kullanılmıştır. Toz iletken malzemeler bitüme katılırken, lif iletken malzeme topaklanmayı önlemek amacıyla modifiye bitüm üzerine homojen şekilde yayılmıştır (Şekil 2.22). İletken faz malzemeleri, elektrotlar ve aralıkların iletken bağlayıcı tabakasının iletkenliği ve ısı oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaplama yapısında SBS ile modifiye edilmiş bitüm iletken bağlayıcı tabakasının ısıtma etkisi analiz edilmiştir. Kaplamada eriyen buz ve karı uygulamak için elektrik enerjisini iletken bağlayıcı tabakası ile ısı enerjisine dönüştürmenin uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Sonuçlar, karbon lifi iletken bağlayıcı tabakasının en iyi iletkenliğe sahip olduğunu göstermektedir. -5 °C sabit sıcaklıkta, iletken bağlayıcı tabakasına insan vücudunun güvenlik voltajı olan 36 V gerilim altında 100 dakika elektrikleştirilmesinden sonra kaplama yapısının yüzey sıcaklığı 0 °C'nin üzerine çıkabildiği, bu da kaplamadaki buzun ve karın erimesini sağladığı görülmüştür. Karbon liflerinin dağılımı, iletken bağlayıcı tabakalarının bağlayıcı performansı üzerinde belirli bir olumsuz etkiye sahip olduğu, ancak yine de iyi bir bağlayıcı performansı, su direnci ve sıcaklık değişim direnci gösterdiği belirtilmiştir.



Şekil 2.22 İletken bağlayıcı tabakasının ısıtma etkisinin deneyi (Wang vd. 2020b).

Wang vd. (2020c), çalışmalarında yol yüzeylerinde buz çözme ve kar eritme verimliliğini artırmak için ısı yalıtım etkilere sahip iletken bağlayıcı tabakası hazırladılar. Yalıtkan iletken bağlayıcı tabakanın üst kısmının sıcaklık arttırıcı etkisi ve alt kısmının soğutma etkisi farklı elektrikleştirme zamanları altında incelemiştir. Farklı malzeme bileşimlerinin yol için iletken bağlayıcı tabakasının ısı yalıtım etkisi analiz edilmiş olup, en iyi ısı yalıtkan ve iletken bağlayıcı tabakası seçilmiştir. Bu çalışmada, ısı yalıtım

etkisine sahip iletken bağlayıcı tabakası esas olarak bir iletken faz malzemesi, yapışkan malzeme ve ısı yalıtım filler malzemesinden oluşmaktadır. Isı yalıtım filler malzemesi olarak %20 oranında içi boş cam boncuklar, kaba agrega olarak bazalt, ince agrega ve mineral filler olarak kireçtaşı ve teknik gereksinimleri karşılamak amacıyla bağlayıcı malzeme olarak SBS ile modifiye edilmiş bitüm, su bazlı epoksi-reçine ile modifiye edilmiş bitüm emülsiyonu ve modifiye edilmiş su bazlı epoksi reçine bağlayıcı malzemesi kullanılmıştır. Farklı ısı yalıtım iletken bağlayıcı tabakalarının ısı iletim etkisini incelemek için, sıcaklık artışı ve ısı yalıtım deneyi tasarlamışlardır (Şekil 2.23). Tasarlanan bu deney yöntemi ile sadece iletken bağlayıcı tabakasının üst kısmının sıcaklık artışını tespit etmekle kalmayıp, aynı zamanda alt parçanın sıcaklık düşüşünü de algılamaktadır. Deney sırasında, elektrik tüketiminin güvenliğini sağlamak için, 36 V'luk bir voltaj uygulanmıştır. Sonuç olarak, modifiye edilmiş su bazlı epoksi reçine iletken bağlayıcı tabakasının performansının en iyi olduğu belirtilmiştir. Diğer iki iletken bağlayıcı tabaka ile karşılaştırıldığında, modifiye edilmiş su bazlı epoksi reçine iletken bağ tabakasının üst kısmının sıcaklık artırıcı etkisi %21,11-127,78 ve alt kısmın soğutma etkisi ise %19,78-93,62 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bir ısı yalıtkan filler malzemenin eklenmesi, ısı yalıtkan iletken bağlayıcı tabakasının etkisini geliştirmekte ve karbon lifi yayılma miktarındaki artış ile birlikte yol ısı yalıtkan iletken bağlayıcı tabakasının performans geliştirme aralığı yavaş yavaş arttığı belirtilmiştir. İletken bağlayıcı tabakası olarak 80 g/m² modifiye edilmiş su bazlı epoksi reçine/içi boş cam boncuk kullanılması tavsiye edilmiştir.



Şekil 2.23 Isı iletim deneyinin süreci (Wang vd. 2020c).

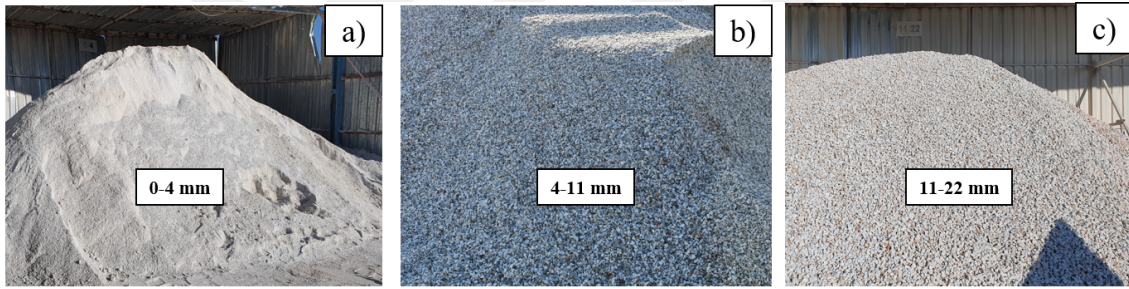
Potansiyel olarak buz ve kar ile mücadelede etkili araçlar olduğu kanıtlanan iletken asfalt betonu kaplamalar ile ilgili çalışmalar devam etmektedir (Chen ve Balieu 2020). İletken asfalt betonu karayollarında az sayıda uygulanmasına rağmen, çevreyi korumada ve trafik güvenliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Fakat İAB'nin üst tabakada kullanımı ile beraber kaplama yaşlanmaya ve çatlamaya karşı eğilimli olacaktır. İAB'nin orta ve alt tabakalarda kullanılmasında ise asfaltın yüksek ısı depolama ve düşük ısı transfer verimliliği nedeniyle yüksek enerji tüketim sorunları meydana gelecektir. Bu sorunları azaltılması için termal enerjinin yönetimi de önem arz etmektedir. (Wang vd. 2020c). Ayrıca İAB'nin üst tabakada kullanımı sırasında oluşacak güvenlik riskleri de dikkate alınarak az enerji tüketimi ile yüksek performanslı İAB kaplamaların oluşturulması sağlanmalıdır. Bu yüzden, İAB kaplamalarda kullanılacak uygun malzeme seçimi ile istenen mekanik ve iletkenlik özelliklerinin sağlanması, arzu edilen yüksek işletme verimliliği ve uygun inşaat tekniği gibi konularda daha fazla araştırmaların yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda bu araştırmalar yapılırken uygulanacak olan iletken asfalt betonu kaplamasının uzun dönem servis performansı açısından değerlendirilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında İAB kullanımı ile asfalt kaplamalardaki yaşlanmayı ve çatlamayı azaltmak için SBS modifiye bitüm kullanılmış olup, kaplamanın servis süresi boyunca mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Servis performansının artırılması için en uygun iletken katkının seçimi ile yüksek elektriksel iletkenlik sağlayarak ve oluşturulan düzenekte yer alan İAB altı yalıtım malzeme ile beraber ısının aşağıya doğru iletimini önleyerek enerji tasarrufu konusuna dikkat edilmiştir. Isıl dağılımın homojen olup olmaması durumu termal kamera ile gözlenmiştir. Bir düzenek yardımıyla laboratuvar ortamında simüle edilen sert kış koşullarını ve kalın buz tabakasının buz eritme performansı değerlendirilmiştir. İAB kaplamaların gerçek uygulamada maruz kalacakları elektriksel olarak ısıtma ve hava soğutma çevrimleri laboratuvar koşullarında simüle edilmesiyle kaplamanın uzun dönem servis performansı değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak uygulayıcılara klavuz olması amacıyla buzlanmanın önlenmesi amacıyla kendi kendine karar verebilen ve uzaktan kontrolü bilgisayar arayüz yazılımı ve mobil uygulama aracılığıyla sağlanabilen bir akıllı buzlanma önleyici sistemin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

3.1.1 Agregas

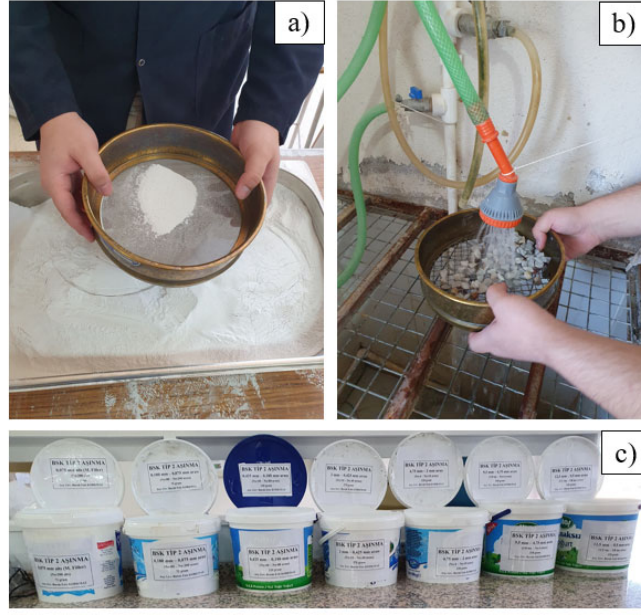
Agrega olarak kireçtaşı kullanılmış olup, 0-4 mm, 4-11 mm ve 11-22 mm olarak Afyonkarahisar KOLSAN AŞ'den temin edilmiştir (Resim 3.1). Temin edilen agregalar Çizelge 3.1'de yer alan Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) yer alan BSK Tip 2 aşınma tabakası gradasyon sınırları arasında kalacak şekilde elenip yıkandıktan sonra kurutulmuştur (Resim 3.2). Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.1 Kireçtaşı agregası, a) 0-4 mm. b) 4-11 mm. C) 11-22 mm.

Çizelge 3.1 Bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakası gradasyonu.

Elek çapı (in, No)	Elek boyutu (mm)	Geçen (%)	Şartname Sınırları	
			Min.	Max.
1/2"	12,5	100	100	100
3/8"	9,5	90	80	100
No.4	4,75	63,5	55	72
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 hazırlanma aşamaları, a) Eleme, b) Yıkama, c) Kurutma sonrası agregaların temiz kaplarda muhafaza edilmesi.

Çizelge 3.2 Agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri.

Agrega Deneyleri	Değerler
İri Agreganın Hacim Özgöl Ağırlık (>No:4)	2,683
İri Agreganın Zahirî Özgöl Ağırlık (>No:4)	2,710
İnce Agreganın Hacim Özgöl Ağırlık (No:4 – No: 200)	2,671
İnce Agreganın Zahirî Özgöl Ağırlık (No:4 – No: 200)	2,699
Filler Zahirî Özgöl Ağırlık (<No: 200)	2,738
Su Emme Deneyi (%) (>No:4)	0,4
Su Emme Deneyi (%) (No:4 – No:200)	4,0
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	23,1

3.1.2 Bitüm

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

Çizelge 3.3 50/70 penetrasyon sınıfı bitümün özellikleri.

Özellikler	50/70	Standart
Özgül Ağırlık	1,035	(ASTM D70-03 2003)
Penetrasyon Derecesi (25 °C)	52,13	(ASTM D5-06e1 2006)
Yumuşama Noktası (°C)	46,65	(ASTM D36-06 2006)
Brookfield Viskozite 135 °C'de (cP)	495,00	
Brookfield Viskozite 165 °C'de (cP)	131,00	(ASTM D4402-06 2006)

3.1.3 SBS

İstanbul Teknik firmasından temin edilen, Tayvan merkezli LCY Chemical Corporation şirketi tarafından üretilen Globalprene 3501 Stiren - Butadien - Stiren (SBS) blok kopolimer (Resim 3.3) ile bitüm modifiye edilerek karışımın sıcaklık hassasiyetini azaltmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amaçlanmıştır. SBS ile ilgili özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.3 SBS polimeri.

Çizelge 3.4 SBS polimerinin özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Molekül yapısı	-	Lineer Blok Kopolimer
Stiren / Butadien oranı	%	31 / 69
Yoğunluk	g/cm ³	0,94
Yağ içeriği	phr	Yok
Kaplin verimi	%	80
Uçucu oranı	%	0,17
Kül içeriği	%	0,60
Sertlik	Shore A	75
%5 Toluen solüsyon viskozitesi	cP	4500

3.1.4 Karbon Siyahı

Bitüme katılacak karbon siyahı ÖZERBAND Afyon konveyör band fabrikasından temin edilmiştir (Resim 3.4). Çizelge 3.5'te karbon siyahının özellikleri verilmiştir.



Resim 3.4 Karbon siyahı.

Çizelge 3.5 Karbon siyahının özellikleri.

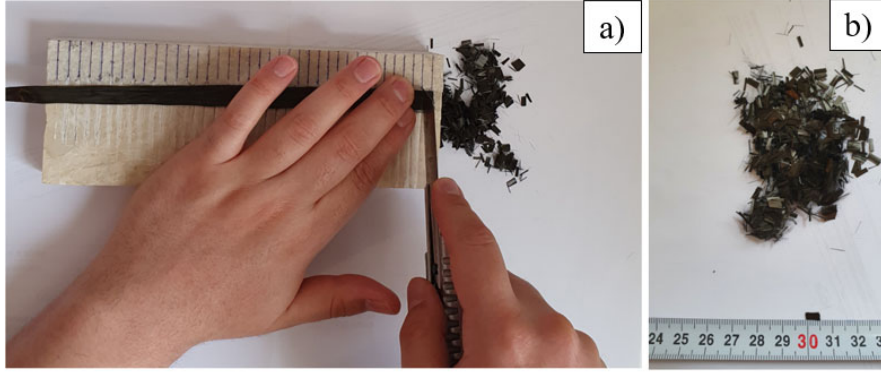
Özellik	Değer
Karbon Siyahı Zahiri Özgül Ağırlık	2,930
BET Yüzey Alanı (m ² /gr)	87,1492

3.1.5 Karbon Lifi

BSK numuneleri için iletken bileşen olarak karışıma katılacak karbon lifi Yalova'da DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler San. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Temin edilen, bobin halindeki karbon lifinin kodu 24K A-49'dur. Karbon lifinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Gürgöze (2017), yaptığı çalışmada asfalt karışımına az miktarda ve 5 mm uzunluğunda karbon lifinin katılması ile topaklanmanın önlendiği belirtildiğinden karbon lifinin uzunluğu 5 mm olacak şekilde kesme işlemi yapılmıştır (Resim 3.5).

Çizelge 3.6 Karbon lifinin özellikleri.

Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Birim Deformasyon (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Akma (g/1000 m)	Uzunluk (mm)
4900	250	2,0	1,79	1600	5

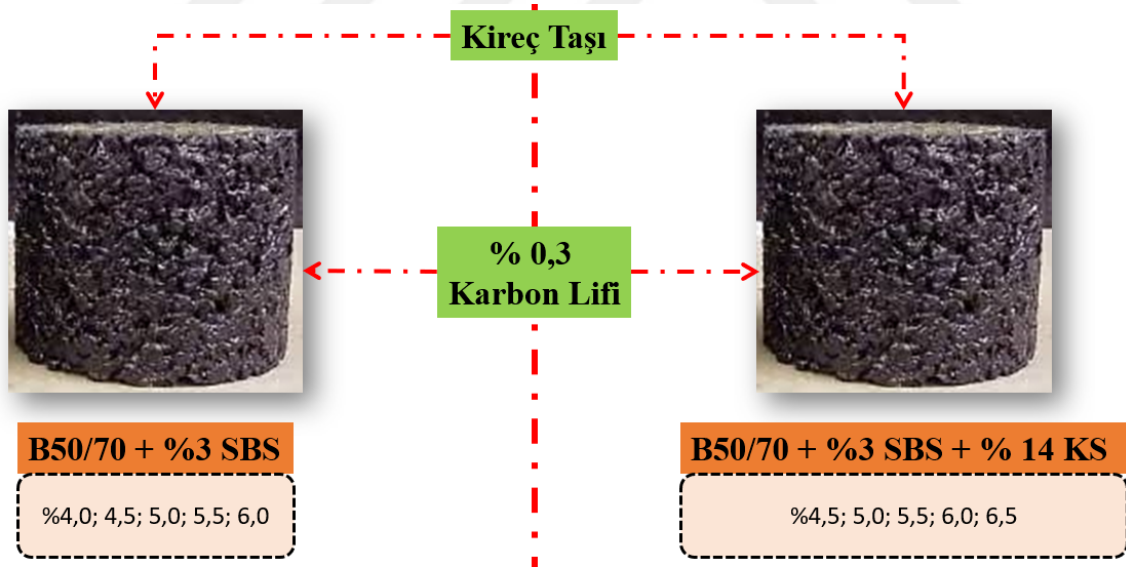


Resim 3.5 Karbon lifi, a) Karbon lifi kesimi. b) 5 mm uzunluğunda kesilmiş karbon lifi.

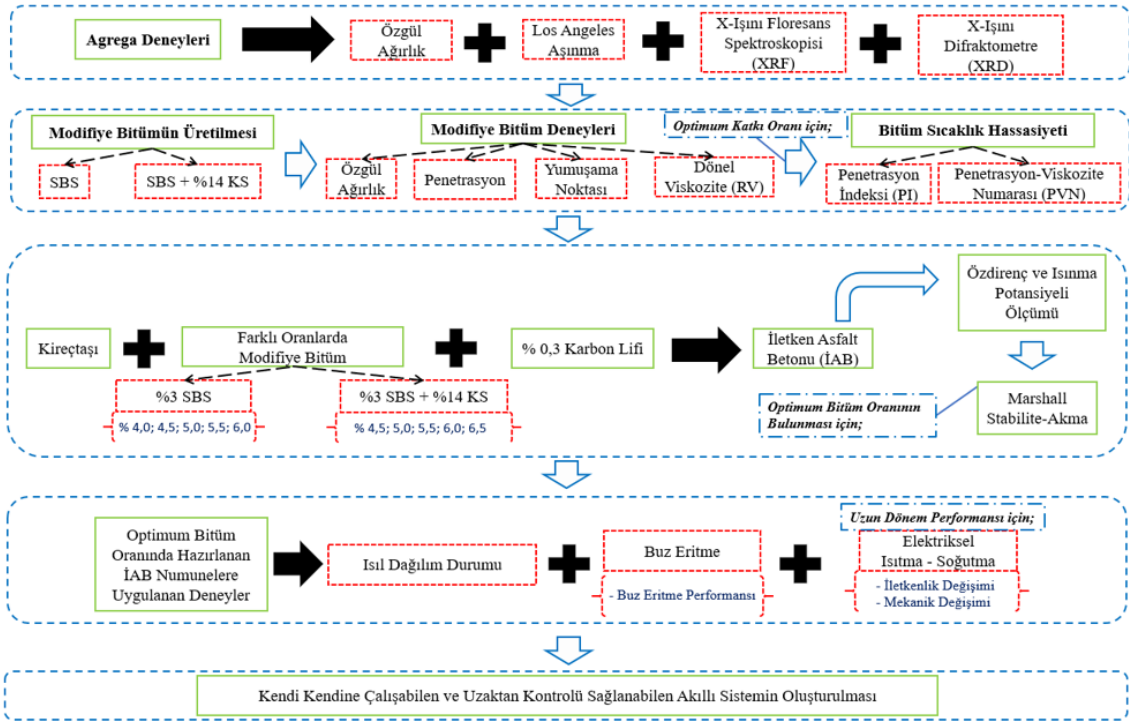
3.2 Yöntem

Agregaların özelliklerinin belirlenmesi için Özgül ağırlık, Los Angeles Aşınma, X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) ve X-Işını Difraktometre (XRD) deneyleri yapılmıştır. B50/70 penetrasyon sınıfı bitüme ağırlıkça farklı oranlarda (%0, %3, %4, %5 ve %6) SBS katılarak hazırlanan modifiye bitüm numunelerine özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen değerlerden Penetrasyon indeksi (PI) ve Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN) hesaplanarak optimum SBS katkı oranı belirlenmiş ve bulunan oranda SBS'li modifiye bitüm numuneleri üretilmiştir. Aynı zamanda B50/70 penetrasyon sınıfı bitüm Gürer vd. (2020), yaptıkları ön araştırma çalışma sonuçlarına göre %14 karbon siyahı ile modifiye edilmiştir. Böylece asfalt karışımlarında kullanılmak üzere sadece SBS'li ve hem SBS'li hem de %14 karbon siyahı katkılı olmak üzere iki farklı modifiye bitüm üretilmiştir. Kuru yöntem ile asfalt karışımına katılacak olan karbon lifi miktarı topaklanmanın önlenmesi, ekonomiklik ve optimum iletkenlik amacı dikkate alınarak yapılan ön çalışmalar sonucunda optimum karbon lifi %0,3 oranı belirlenmiştir. SBS'li modifiye bitüm + %0,3 KL (seri 1) ve SBS + %14 KS'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 Stabilite-Akma deneyi uygulanmıştır. Belirlenen optimum bitüm oranına

sahip İAB Marshall numuneleri bundan sonraki deneylerde kullanılmak üzere üretilmiştir. İAB Marshall numuneleri oda sıcaklığı koşullarında 10 dakikalık elektriksel ısıtmaya maruz bırakılarak termal kamera ile ısı dağılım durumu gözlenmiştir. Hazırlanan özel bir deney düzeneği ile, İAB Marshall numuneleri üzerinde buz kütlesi oluşturarak elektriksel iletkenlikle buz eritme süreci kamera yardımıyla kayıt altına alınmış ve numune yüzey sıcaklık değişimleri sıcaklık sensörü yardımıyla tespit edilmiştir. İAB numuneleri aynı düzenekle elektriksel ısıtma ve hava soğutma işlemine maruz bırakılarak hem iletkenlik hem de mekanik özelliklerindeki değişim incelenerek uzun dönem performans açısından değerlendirilmiştir. İletkenlik özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin öz direnç ve ısınma potansiyelleri ölçülmüştür. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ise numunelere Marshall Stabilite deneyleri uygulanmıştır. İAB numuneleri üzerindeki buzlanmanın önlenmesi amacıyla sistemin ne zaman çalışıp ne zaman çalışmayacağına kendisi karar verebilen ve uzaktan kontrolü bilgisayar arayüz yazılımı ve mobil uygulama ile sağlanabilen akıllı bir buzlanma önleyici sistem oluşturulmuştur. Tez çalışmasının özet 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 Agregaların Özelliklerinin Belirlenmesi

Agregaların özelliklerinin belirlenmesi için Özgül ağırlık, Los Angeles Aşınma, X-ışını Floresans Spektroskopisi (XRF) ve X-ışını Difraktometre (XRD) deneyleri yapılmıştır.

3.2.1.1 Agregaların Özgül Ağırlık Deneyi

a) Kaba Agregalar için Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM C127-01 (2001)₂ yöntemi kullanılarak kaba agregaların özgül ağırlığı belirlenmiştir. Kaba agregaların özgül ağırlık değerleri İAB dizayn hesaplamaları için kullanılmıştır.

Prosedür;

1. Karayolu Teknik Şartnamesi (2013) kısım 407 ve sayfa 407/2’de yer alan bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakasındaki agregaların gradasyonlarına uygun olarak No: 4 elek üzeri yıkanmış ve kurutulmuş agregalardan toplam 1000’er gram (Çizelge 3.7) olmak üzere 2 adet numune hazırlanır.

2. Numuneler su içerisinde 24 ± 4 saat oda sıcaklığında bekletilir.
3. Numuneler yüzey kuru suya doymun hale gelmesi için kuru bez yardımıyla yüzeyleri kuru hale getirilerek tartım hassasiyeti 0,01 gram olan terazide tartım işlemi yapılır (A_{kaba}).
 - Yüzey kurutma işlemi sırasında agrega gözeneklerinden suyun buharlaşmamasına dikkat edilmelidir.
4. Arşimet terazinde yer alan tel sepet yardımıyla numuneler $23 \pm 2,0$ °C su içerisine batırılarak tartım yapılır (B_{kaba}).
5. Numuneler 24 saat boyunca 110 ± 5 ayarlanmış etüvde kurutulur (C_{kaba}).
 - Numuneler 1 - 3 saat oda sıcaklığında havada soğutulmalı veya numuneler, dokunmanın rahat bir sıcaklığa (yaklaşık 50 °C) ulaşana kadar soğutulmalı ve tartım işlemi yapılmalıdır.

Çizelge 3.7 Kaba agrega özgül ağırlık gradasyonu.

Elek Aralıkları (mm)	Elek Üstü (gr)	1000 gr'a göre Elek Üstü	Kümülatif
19-12,5	0	0	0
12,5-9,5	120	274	274
9,5-4,75	318	726	1000

Kaba agrega hacim, zahiri özgül ağırlık ve su absorpsiyon yüzdesi değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanılmıştır.

$$Hacim \text{ Özgül Ağırlığı} = \frac{C_{kaba}}{A_{kaba} - B_{kaba}} \quad (3.1)$$

$$Zahiri \text{ Özgül Ağırlık} = \frac{C_{kaba}}{C_{kaba} - B_{kaba}} \quad (3.2)$$

$$Absorpsiyon (\%) = \frac{A_{kaba} - C_{kaba}}{C_{kaba}} \quad (3.3)$$

Burada;

A_{kaba} = Yüzey kuru suya doymun (YKSD) numune ağırlığı (gr),

B_{kaba} =YKSD numunesinin sudaki ağırlığı (gr),

C_{kaba} = Kuru numune ağırlığı (gr).

b) İnce Agregalar için Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM C128-01 (2001) yöntemi kullanılarak ince agrega özgül ağırlıkları belirlenmiştir. İnce agrega özgül ağırlık değerleri İAB dizayn hesaplamaları için kullanılmıştır.

Prosedür;

1. Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) kısım 407 ve sayfa 407/2'de yer alan bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakasındaki agrega gradasyonlarına uygun olarak No: 4 – No: 200 arası yıkanmış ve kurutulmuş agregalardan toplam 500'er gram (Çizelge 3.8) olmak üzere 2 adet numune hazırlanır.
2. Numuneler su içerisinde 24 ± 4 saat oda sıcaklığında bekletilir.
3. Numuneler yüzey kuru suya doymun hale gelmesi için fön makinesi veya elektrikli ocak ile yüzey kuru suya doymun (YKSD) hale getirilir. Numunelerin YKSD durumuna gelip gelmediği Abraham Hunisi ve Tokmağı yardımıyla belirlenir. YKSD hale geldiği düşünülen numuneler huni içerisine 3 aşamalı olacak şekilde her aşamada tokmak ile 25 serbest düşme yapılarak konulur. Daha sonra spatula yardımıyla numune yatay ekseninden düşey şekilde serbest düşme yapıldığında eğer numune dökülebilir hale geldiyse numune YKSD durumuna gelmiş demektir.
4. Piknometre kapağı ile beraber ağırlığı boş olarak tartılır (A_{ince})
5. Piknometre kapağında yer alan işaretli kısma kadar su doldurularak tartılır (B_{ince}).
6. Piknometre ve kapağı etüvde kurutulup soğutulduktan sonra piknometre içerisine YKSD durumuna gelmiş numune konularak piknometre kapağı ile birlikte tartılır (C_{ince}).
7. Piknometre içerisine $23 \pm 2,0$ °C saf su kapakta yer alan seviyeye kadar ilave edilir ve hava kabarcıklarının çıkması için piknometre 15 ila 20 dakika arası çalkalanır. Yüzeyde oluşan köpük peçete yardımıyla alındıktan sonra eksilen su ilave edilerek tartım işlemi yapılır (D_{ince}).

8. Piknometre içerisindeki numune bir kap içerisine alınarak 24 saat boyunca 110 ± 5 ayarlanmış etüvde kurutulur. Numune dokunmanın rahat bir sıcaklığa (yaklaşık $50 \text{ }^\circ\text{C}$) ulaşana kadar soğutulduktan sonra tartılır (E_{ince}).

Çizelge 3.8 İnce agrega özgül ağırlık gradasyonu.

Elek Aralıkları (mm)	Elek Üstü (gr)	500 gr'a göre Elek Üstü	Kümülatif
4,75-2	228	165	165
2-0,425	270	196	361
0,425-0,180	120	87	448
0,180-0,075	72	52	500

İnce agrega hacim, zahiri özgül ağırlık ve su absorpsiyon yüzdesi değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanılmıştır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{E_{ince}}{(C_{ince} - A_{ince}) + (B_{ince} - D_{ince})} \quad (3.4)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E_{ince}}{E_{ince} + (B_{ince} - D_{ince})} \quad (3.5)$$

$$\text{Absorpsiyon (\%)} = \frac{C_{ince} - A_{ince} - E_{ince}}{E_{ince}} \quad (3.6)$$

Burada;

A_{ince} = Piknometre ağırlığı (gr),

B_{ince} = Piknometre + su ağırlığı (gr),

C_{ince} = Piknometre + YKSD numune ağırlığı (gr),

D_{ince} = Piknometre + YKSD + su numune ağırlığı (gr),

E_{ince} = Kuru Numune Ağırlığı (gr).

c) Mineral Filler Zahiri Özgül Ağırlığının Tayini

ASTM C128-01 (2001) yöntemi kullanılarak mineral filler malzemesinin zahiri özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Mineral filler özgül ağırlık değerleri İAB dizayn hesaplamaları için kullanılmıştır.

Prosedür;

1. No: 200 altı filler malzemeden 100 gram olmak üzere 2 adet numune hazırlanır.
2. Piknometre, kapağı ile beraber tartılır (A_{filler}).
3. Piknometre kapağında yer alan kısma kadar $23 \pm 2,0$ °C saf su doldurularak tartılır (B_{filler}).
4. Piknometre ve kapağı etüvde kurutulup soğutulduktan sonra içerisine filler malzeme konularak tartılır (C_{filler}).
5. İçerisinde filler bulunan piknometrenin içerisine kapakta yer alan hizaya kadar $23 \pm 2,0$ °C saf su konulur. Numune içerisindeki hava kabarcıklarının çıkması için piknometre 15 ila 20 dk arası çalkalanıp, yüzeyde oluşan köpük peçete yardımıyla alınır. Daha sonra eksilen miktar kadar saf su ilave edilerek tartım işlemi yapılır (D_{filler}).
6. Piknometre içerisindeki filler malzeme bir kaba koyularak 24 saat boyunca 110 ± 5 °C ayarlanmış etüvde kurutulması sağlanır. Numune dokunmanın rahat bir sıcaklığa (yaklaşık 50 °C) ulaşana kadar soğutulduktan sonra tartılır (E_{filler}).

Filler malzeme zahiri özgül ağırlık değeri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Hacim\ Özgül\ Ağırlık = \frac{E_{filler}}{(B_{filler} - A_{filler}) + (D_{filler} - C_{filler})} \quad (3.7)$$

Burada;

A_{filler} = Piknometre ağırlığı (gr),

B_{filler} = Piknometre + su ağırlığı (gr),

C_{filler} = Piknometre + filler numunesi ağırlığı (gr),

$D_{filler} = \text{Piknometre} + \text{filler numunesi} + \text{su ağırlığı (gr)}$,

$E_{filler} = \text{Kuru numune ağırlığı (gr)}$.

3.2.1.2 Los Angeles Aşınma Deneyi

İAB numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak agregaların aşınma direnci değerleri standart Los Angeles aşınma deneyi ile belirlenmiştir (ASTM C131-01 2001).

Prosedür;

1. 14 mm ve 10 mm' lik elekler arasında kalan agregalardan toplam 2500 ± 10 gram olacak şekilde 2 adet numune tartılır (M_1).
2. Numune gradasyonuna göre belirlenen aşındırma yükü olarak 11 adet bilye numuneler ile birlikte bir tambur içine konularak kapağı sıkıca kapanması sağlanır.
3. Los Angeles Aşınma deney cihazının yapacağı toplam devir sayısı 500 olarak ayarlanıp cihaz çalıştırılır.
4. Tampur içerisindeki aşınmış numuneler tepsiye dökülerek 1,6 mm'lik elekten ıslak eleme ile elenip, elek üstü 110 ± 5 °C ayarlanmış etüvde 24 saat boyunca kurutulur. Kurutulan numune soğuduktan sonra tartım işlemi yapılır (M_2).

Los Angeles aşınma değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanılmıştır.

$$\text{Aşınma Kaybı (\%)} = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) * 100 \quad (3.8)$$

Burada;

$M_1 = \text{Numunenin deney öncesi ağırlığı (gr)}$,

$M_2 = \text{Numunenin deney sonrası 1,6 mm elek üzerinde kalan ağırlığı (gr)}$.

3.2.1.3 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi

XRF, bu çalışmada kırıtaşı agregasının kimyasal bileşimini malzeme bileşimi perspektifinden daha iyi anlamak için yapılmıştır. XRF, şu anda kimyasal bileşenlerin

kalitatif ve kantitatif analizi için en yaygın kullanılan araçlardır. Hızlı ölçüm hızı ve yüksek hassasiyet özelliklerine sahiptir (Chai vd. 2020). Temsili miktarda alınan kireçtaşı numunesi No: 200 elekten geçecek şekilde öğütme işlemi yapıldı. Deney AKÜ Maden Mühendisliği, Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilmiştir. Resim 3.6'da deneyde kullanılan X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) cihazı görülmektedir.



Resim 3.6 X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) cihazı (İnt.Kyn.6).

3.2.1.4 X-Işını Difraktometre (XRD) Deneyi

Şu anda, agreganın makroskopik (çıplak gözle görülebilen) teknik göstergeleri, asfalt kaplamadaki çeşitli bozulmaları etkili bir şekilde tahmin edememektedir. Bu nedenle agreganın gözlenen makroskopik özellikleri mezoskopik açıdan açıklanmalıdır. X-ışını difraktometresi (XRD) yalnızca agreganın mineral bileşimini tespit etmekle kalmaz, aynı zamanda kimyasal özelliklerini de ortaya çıkarır. XRD'nin ana hedefi, agreganın mineral kristalini belirlemektir. Her bir kristal malzemenin kendi özel kristal yapısı vardır: örgü tipi, düzlemlerarası aralığı, kristaldeki atom sayısı, vb. Agregası bilgisi XRD'nin kırınım modeli ile elde edilmektedir (Feng vd. 2020). Temsili miktarda alınan kireçtaşı numunesi No: 200 elekten geçecek şekilde öğütme işlemi yapıldı. Deney AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından gerçekleştirilmiştir. Resim 3.7'de deneyde kullanılan X-Işını Difraktometre (XRD) cihazı görülmektedir.



Resim 3.7 X-Işını Difraktometre (XRD) cihazı (İnt.Kyn.7).

3.2.2 Modifiye Bitüm Numunelerinin Hazırlanması

İAB dizaynlarında kullanılmak üzere SBS ve SBS + %14 KS olmak üzere iki tip modifiye bitüm üretilmiştir.

3.2.2.1 SBS Modifiye Bitüm Numunelerinin Üretilmesi

Literatürde belirtilen katkı oranları, karıştırma hızı, sıcaklığı ve süresi dikkate alınarak karıştırma prosesi oluşturulmuştur. B50/70 penetrasyon sınıfı bitüme ağırlıkça %0, %3, %4, %5 ve %6 katkı oranlarında SBS katılarak beş farklı modifiye bitüm hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler üzerinde özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama ve viskozite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen değerlerden penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite numarası (PVN) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre optimum katkı oranı belirlenmiştir. Katkısız bitümün karıştırma sıcaklığına ve hızına gelmesi için 5 dk ön karışım işlemi yapılmıştır. Eklenecek toplam SBS miktarı bitüme 15 dakika ara ile 4 aşamalı olacak şekilde ilave edilmiştir. Karışım 180 °C karıştırma sıcaklığında ve 1900 devir/dakika karıştırma hızında toplam 60 dk süre ile karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan numune 100±5 °C etüvde 40 dk dinlendirilmiştir.

3.2.2.2 SBS+KS Modifiye Bitüm Numunelerinin Üretilmesi

B50/70 penetrasyon sınıfı bitüm Gürer vd. (2020) yaptıkları ön araştırma çalışma sonuçlarına göre %14 karbon siyahı ile modifiye edilmiştir. Belirlenen optimum katkı oranında (%3) SBS modifiye bitüm hazırlandı. Hazırlanan SBS modifiye bitüme ağırlıkça %14 oranında karbon siyahı 15 dk ara ile 8 aşamalı ilave edilmiştir. Karışım 180 °C karıştırma sıcaklığında ve 1800 devir/dakika karıştırma hızında toplam 120 dk süre ile karıştırma işlemi gerçekleştirildi. Karıştırma işleminden sonra hazırlanan numune 100±5 °C etüvde 20 dk dinlendirildi. Böylece asfalt karışımlarında kullanılmak üzere sadece %3 SBS'li ve hem %3 SBS'li hem de %14 karbon siyahı olmak üzere iki farklı modifiye bitüm üretilmiştir.

3.2.3 Saf ve Modifiye Bitüm Numunelerinde Uygulanan Deneyler

Kullanılacak bitümlerin özelliklerini belirlemek ve SBS'li modifiye bitüm numunelerinde özelliklerini ve optimum katkı oranını belirlemek amacıyla özgül ağırlık, penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri yapılmıştır.

3.2.3.1 Bitüm Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM D70-03 (2003), yöntemi ile bitümün özgül ağırlığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bulunan değer İAB dizayn hesaplamalarında kullanılmıştır.

Prosedür;

1. Piknometre kapağı ile beraber tartılır ($A_{\text{bitüm}}$),
2. Piknometre içerisi $25 \pm 0,5$ °C'de saf su ile doldurulup, kapağı kapatıldıktan sonra kurulanır ve tartılır ($B_{\text{bitüm}}$),
3. Piknometre, kapağı ile beraber etüvde kurutulup soğumaya bırakıldıktan sonra içerisine bitüm konulup kapağı kapatılır ve tartılır ($C_{\text{bitüm}}$),
4. İçerisinde bitüm olan Piknometre içerisi tamamen $25 \pm 0,5$ °C'de saf su ile doldurulup, kapağı kapatılır ve Sıcaklık hassasiyeti $\pm 0,5$ °C olan su banyosunda 30 dakika bekletilir.

5. Su banyosundan çıkarılan Piknometre içerisindeki eksilen su tamamlanıp, dış yüzü kurulandıktan sonra tartılır ($D_{bitüm}$).

Bitüm numunesinin zahiri özgül ağırlık değeri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanılmıştır.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E_{bitüm}}{(B_{bitüm} - A_{bitüm}) + (D_{bitüm} - C_{bitüm})} \quad (3.9)$$

Burada;

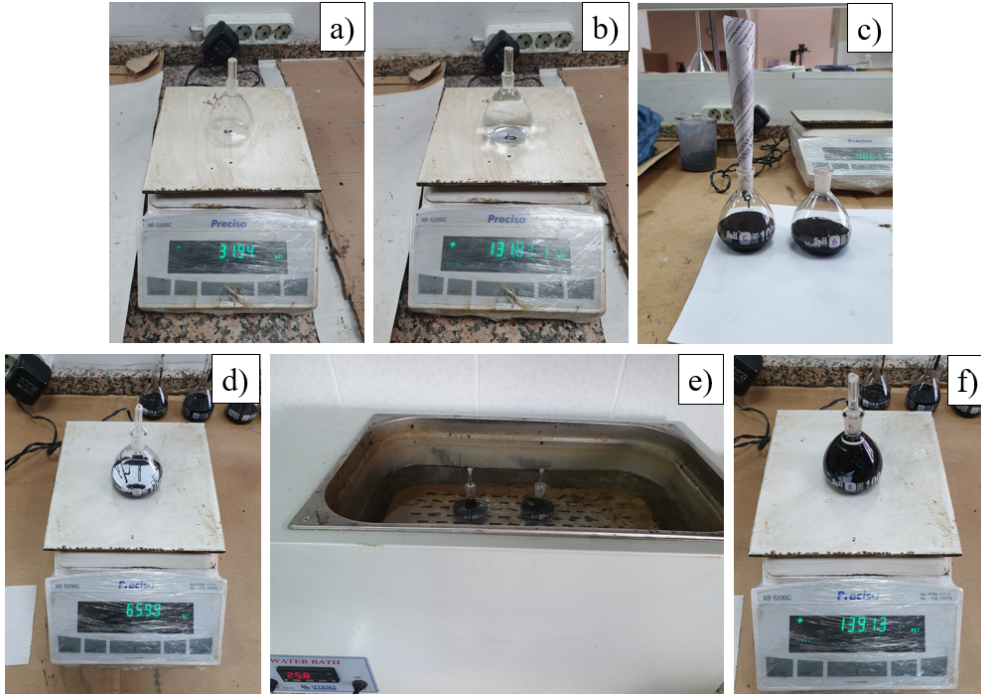
$A_{bitüm}$ = Piknometre ağırlığı (gr),

$B_{bitüm}$ = Piknometre + su ağırlığı (gr),

$C_{bitüm}$ = Piknometre + bitüm numunesi ağırlığı (gr),

$D_{bitüm}$ = Piknometre + bitüm numunesi + su ağırlığı (gr).

Deney aşamalarının özeti Resim 3.8’de gösterilmiştir.



Resim 3.8 Bitüm özgül ağırlık deneyi aşamaları, a) Boş piknometrenin ağırlığı. b) Piknometre+su ağırlığı. c) Piknometre içerisine bitümün yerleştirilmesi d) Piknometre+bitüm ağırlığı. e) Piknometre+bitüm+suyun 25 °C’de ayarlanmış su banyosunda 30 dk bekletilmesi. f) Piknometre+bitüm+su ağırlığı.

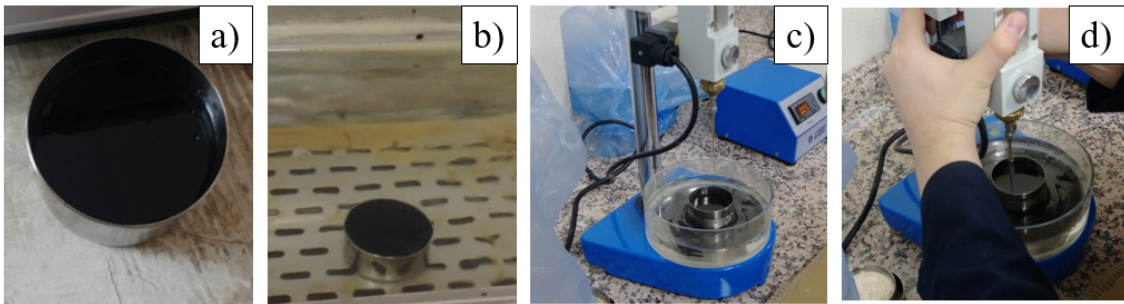
3.2.3.2 Penetrasyon Deneyi

ASTM D5-06e1 (2006) yöntemi ile standart uçlu iğnenin, belirli bir yük altında 25 °C sıcaklıkta belirli bir süre ile düşey doğrultuda bitüm numunesine batma miktarı belirlenip, bitümün kıvamlılığının tespiti amacıyla yapılmaktadır.

Prosedür;

1. Bitüm yumuşama noktası sıcaklığının 90 °C üzerini geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutulur ve penetrasyon kabına dökülür.
2. Bitüm numunesinin soğuması amacıyla oda sıcaklığı koşullarında 1 – 1,5 saat bekletildikten sonra 25 °C'e ayarlanmış su banyosunda 1 – 1,5 saat bekletilir.
3. Numune kabı penetrasyon cihazına yerleştirildikten sonra penetrasyon iğnesi ile numune yüzeyi teması sıfırlanacak şekilde iğne yüksekliği ayarlanarak 5 saniye süre boyunca iğne serbest düşmeye bırakılır.
 - Kullanılan iğne her ölçünde benzin ile temizlenmelidir.
4. Kenarları yaklaşık 1 cm uzunluğuna sahip eşkenar üçgen oluşturarak iğne numuneye batırılır ve 3 adet okuma yapılarak okunan değerlerinin ortalaması alınır.

Deney aşamalarının özeti Resim 3.9'da verilmiştir.



Resim 3.9 Bitüm penetrasyon deneyi aşamaları, a) Numunenin oda sıcaklığında bekletilmesi, b) Numunenin su banyosunda bekletilmesi, c-d) Numunenin penetrasyon cihazına yerleştirilmesi ve penetrasyon iğnesinin ayarlanması.

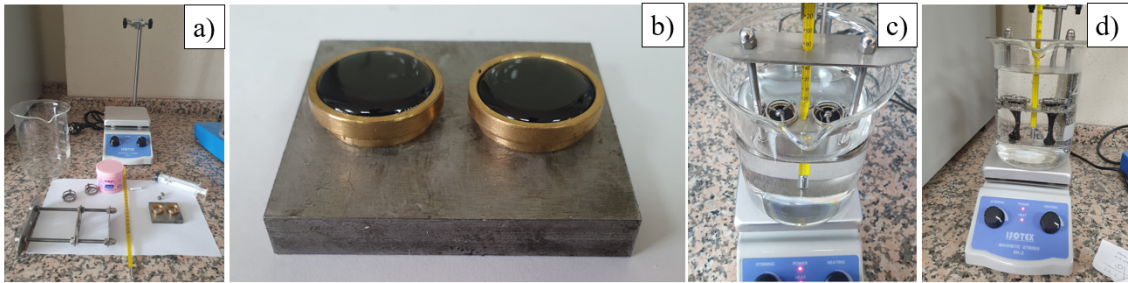
3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi

ASTM D36-06 (2006), yöntemi kullanılarak bitümün sıcaklık karşısındaki davranışını ve kıvamılığını belirlemek için yapılmaktadır.

Prosedür;

1. Bitüm, penetrasyon deneyinde olduğu gibi yumuşama noktası sıcaklığının 90 °C üzerini geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutulur.
2. Çelik plaka üzeri çok ince yağ veya vazelin ile yağlama işlemi yapılır.
 - Bitümün kimyasal yapısını bozmamak için kullanılacak kimyasal madde fazla sürülmemelidir.
3. Yüzükler içerisine bitüm taşmayacak şekilde dökülür ve oda sıcaklığında yaklaşık 30 dk boyunca bekletilir.
4. Başlangıç deney sıcaklığı 5 °C olacak şekilde içi su dolu beher hazırlanır.
5. Yüzükler cihaza uygun şekilde yerleştirilerek dakikada 5 °C ısıtacak şekilde manyetik karıştırıcılı ısıtıcı ayarlanır ve deneye başlanır.
 - Beher içerisinde yer alan manyetik karıştırıcı balık, ısının beher içerisinde homojen dağılmasını sağlamaktadır.
6. Bitüm, deney düzeneğinde yer alan taban yüzeye değdiği andaki termometredeki sıcaklık değerleri okunur.

Deney aşamalarının özeti Resim 3.10'da verilmiştir.



Resim 3.10 Bitüm yumuşama noktası deneyi aşamaları, a) Deneyde kullanılan aparatlar, b) Bitümün yüzüklere yerleştirilmesi, c) Yüzüklerin cihaza yerleştirilip deneyin başlatılması, d) Bitümün düzenek taban yüzeyine temas etmesi.

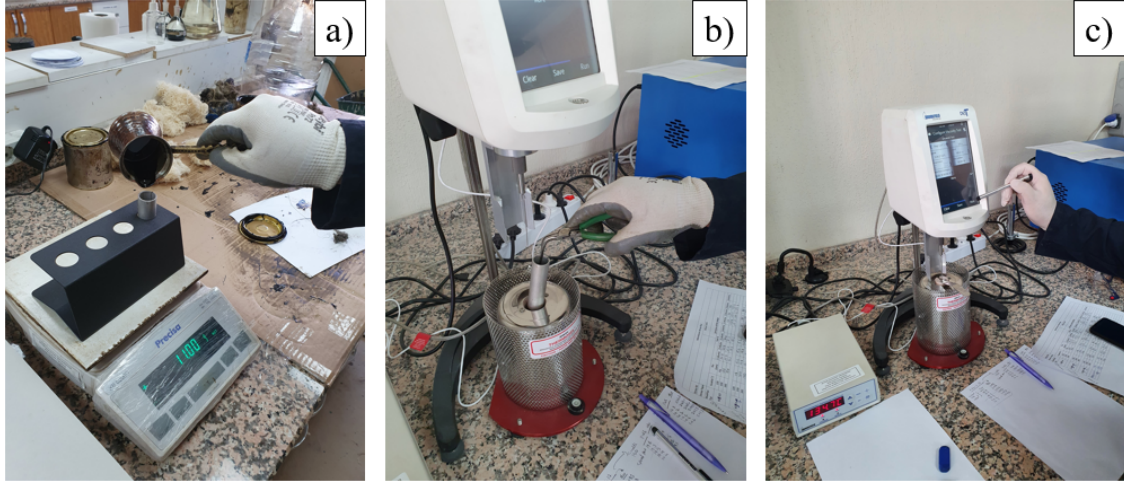
3.2.3.4 Dönel Viskozite (RV) Deneyi

Viskozite, akmaya karşı direnç olarak tanımlanabilir. ASTM D4402-06 (2006), yöntemi ile uygulama sırasında asfaltların ısıtıldıkları sıcaklık aralığı içerisindeki akma özelliğini belirlemektir. Bitümlerin, pompalama ve doldurma, boşaltma sırasındaki akma özelliğini belirlemek için Brookfield Viskozimetre cihazı kullanılmaktadır. Aynı zamanda aynı cihazla sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları viskoziteye bağlı olarak bulunabilmektedir.

Prosedür;

1. Bitüm, penetrasyon ve yumuşama noktası deneyinde olduğu gibi yumuşama noktası sıcaklığının 90 °C üzerini geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılma işlemine tabii tutularak bitümün akıcı hale gelmesi sağlanır. Diğer viskozite deneyi aparatları (tüp, klavuz, spindle ve kanca) da sıcaklık kaybı olmaması için etüvde ısıtılır.
2. Etüvde ısıtılmış deney tüpü içerisine yaklaşık olarak 11 gr bitüm konularak sıcaklığı 135 °C'e önceden ayarlanmış sıcaklık kontrolüne sahip hazneye (thermosel) yerleştirilir.
3. Spindle cihaza takılmadan önce cihaz autozero işlemi yapılır. Daha sonra spindle bitüm içerisine terazili şekilde batırılır.
4. Tüp içerisindeki bitümün ve haznenin sıcaklıkları 135 °C'de eşitlenmesi için 15 dk beklenip, deneye başlanır.
 - Deney sırasında tork değerinin %10 ile %90 arasında olmasına dikkat edilmelidir. Bu değerler dışında değer okunması durumunda rpm değeri değiştirilerek tekrar deneye başlanmalıdır.
5. 1'er dakika ara ile okuma yapılarak, okumalar arasında fark yaklaşık olarak eşit durumdaki son 3 okuma değeri not edilir.
6. Hazne sıcaklığı 165 °C'e ayarlandıktan sonra 15 dk beklenecek deneye tekrar başlanarak aşama 5'deki durum uygulanıp deney bitirilir.

Viskozite deney aşamalarının özeti Resim 3.11'de verilmiştir.



Resim 3.11 Bitüm viskozite deneyi aşamaları, a) Bitümün tüpe dökülmesi, b) Numunenin viskozite cihazına yerleştirilmesi, c) Deneyin başlatılması.

3.2.4 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti

Sıcaklığa hassasiyet, kıvam parametresindeki değişimin, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Termal ve foto oksidasyona çok meyilli olduklarından bitümlerde yüksek sıcaklık hassasiyeti istenmez. Penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite numarası (PVN) bitümün sıcaklık hassasiyetini ölçmek için kullanılabilen parametrelerdir (Mallick ve El-Korchi 2017).

3.2.4.1 Penetrasyon İndeksi (PI)

Penetrasyon indeksi (PI), penetrasyon ve yumuşama noktası testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanmaktadır. PI değeri genellikle -1 ve +1 aralığındadır ve daha yüksek bir PI daha düşük sıcaklık hassasiyeti gösterir. PI hesaplama ile ilgili klasik bir yaklaşım, aşağıdaki denklem (3.10)'da gösterildiği gibi verilmiştir (Hunter vd. 2015).

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 * \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (3.10)$$

Burada;

Pen_{25} = 25 °C'deki penetrasyon,

SP = Polimer Modifiye Bitümün (PMB) yumuşama noktası sıcaklığı.

3.2.4.2 Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN)

McLeod (1989), tarafından 25 °C'deki penetrasyona ve 135 °C'deki viskoziteye bağlı olan PI'e alternatif olarak bir penetrasyon-viskozite numarası (PVN) geliştirilmiştir. PVN değeri genellikle – 2 ve 0.5 aralığındadır. Yüksek PVN düşük sıcaklık hassasiyeti gösterirken düşük PVN yüksek sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. PVN değeri Denklem 2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Morrison vd. 1994, Zaumanis vd. 2013, Mallick ve El-Korchi 2017).

$$\text{Penetrasyon – Viskozite Numarası (PVN)} = \frac{\text{Log } L - \text{Log } X}{\text{Log } L - \text{Log } M} \cdot (-1,5) \quad (3.11)$$

$$\text{Log } L = 4,2580 - 0,79674 \cdot \text{log } P \quad (3.11a)$$

$$\text{Log } M = 3,46289 - 0,61094 \cdot \text{log } P \quad (3.11b)$$

Burada;

$X = 135^{\circ}\text{C}$ 'deki viskozite,

$L = \text{PVN}=0,0$ için 135°C 'deki viskozite,

$M = \text{PVN}=1,5$ için 135°C 'deki viskozite,

$P = 25^{\circ}\text{C}$ 'deki penetrasyon, 1/10 mm.

3.2.5 İAB Numunelerinin Üretilmesi

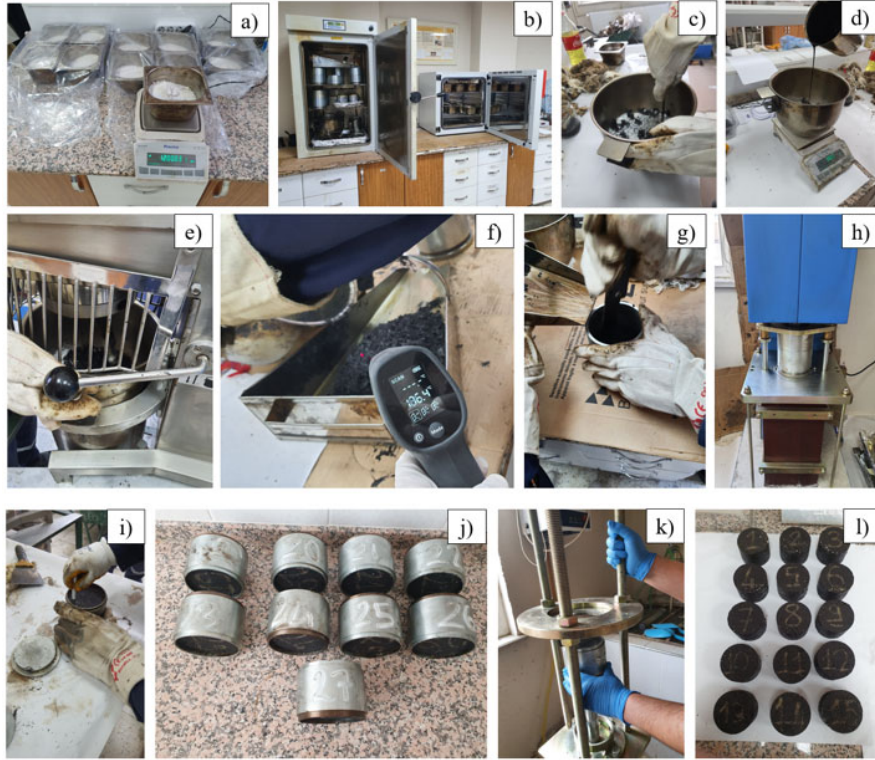
Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) kısım 407 ve sayfa 407/2'de yer alan bitümlü sıcak karışım tip 2 aşınma tabakasındaki agrega gradasyonlarına uygun olarak karışım serileri hazırlanmıştır. Her bir seri için farklı bitüm oranlarında Marshall numunesi üretilmiştir. Deneyler ASTM D 1559–89 (1992) göre gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki deneylere optimum bitüm oranında hazırlanan numuneler üzerinde devam edilmiştir. Marshall tasarım deneyi ile İAB numunesi üretim prosedürü aşağıda belirtilmiştir.

Prosedür;

1. Şartnamede yer alan gradasyona göre eleme, yıkama ve kurutma işlemine tabii tutulmuş agregalar ile gradasyona uygun olarak (BSK tip 2 aşınma tabakasına göre) toplam 1200 gram'lık agregası karışımları hazırlanır.
2. Etüv sıcaklığı, bitüm viskozite deneyinden elde edilen karıştırma sıcaklık aralığından kalacak şekilde ayarlama işlemi yapılarak bitüm, agregası ve Marshall deneyinde kullanılacak aparatlar (spatula, kalıp, kürek, mikser kabı ve bıçakları vb.) 2-3 saat etüvde bekletilir.
 - Deneyler esnasında ısı kaybını önlemek için 2-3 etüv ile çalışmak faydalı olmaktadır.
3. Etüvden çıkarılan agregası karışımı ve ısıtılmış karbon lifi mikser kabına konularak spatula yardımıyla el ile karışım işlemi yapılır (kuru karıştırma yöntemi).
4. Mikser kabı ortasına çukur açılarak istenilen miktarda (agregası ağırlıkça) bitüm dökülür.
5. Agregası, karbon lifi ve bitüm karışımı ısıtıcılı mikserde yaklaşık 1,5-2 dk süre boyunca karıştırma işlemi yapılır.
 - Isı kaybını önlemek için mikser aparatlarının karışım yapılacağı esnada etüvden çıkarılıp kullanılması önemlidir.
6. Numune karışımı bitimine az bir süre kala (yaklaşık 10 sn) kalıplar etüvden çıkarılarak alt tabanına uygun şekilde kesilmiş geçirimsiz veya yağlı kağıt konulur. Isıtılmış kürek ve kalıp iç yüzeyleri ince film halinde yağlanır.
7. Mikser kabı içerisindeki karışım kürek içerisinde dökülerek karışımın sıcaklığı el termometresi ile ölçülerek karıştırma sıcaklığı not edilir.
 - Bu aşamada karışımın viskozite deneyinde elde edilen karıştırma sıcaklığı aralığının dışına çıkıp çıkmaması kontrol edilmelidir.
8. Kürek içerisindeki iletken asfalt betonu numunesi karışımı kalıba spatula yardımıyla şişlenerek yerleştirilip, üzerine uygun şekilde kesilmiş kağıt konulur.
9. Numune kalıbı Marshall tokmağı yardımıyla her iki yüzeyine 75 vuruş yapılarak sıkıştırma işlemi yapılır.
 - Çevirme işlemi esnasında numuneden malzeme kaybının olmamasına dikkat edilmelidir.

10. Sıkıştırma işleminden sonra kalıp üst ve alt yüzeylerindeki kağıtlar alındıktan sonra sıkıştırma sıcaklığının kontrol için el termometresi ile sıcaklığı ölçülür.
 - Bu aşamada karışımın viskozite deneyinde elde edilen sıkıştırma sıcaklığı aralığının dışına çıkıp çıkmaması kontrol edilmelidir.
11. Numune üzerine yağlı tebeşir yardımıyla numune kod numarası yazılarak 24 saat boyunca uygun bir yüzey üzerinde soğumaya bırakıldıktan sonra kriko yardımıyla numune kalıptan çıkarılır.
12. Bu yapılan işlemler farklı bitüm oranlarında (Karayolları Teknik Şartnamesinde yer alan bitüm oran aralıkları dikkate alınarak) ve her bir bitüm oranından 3'er adet olmak üzere İAB numunesi üretim işlemi yapılır.

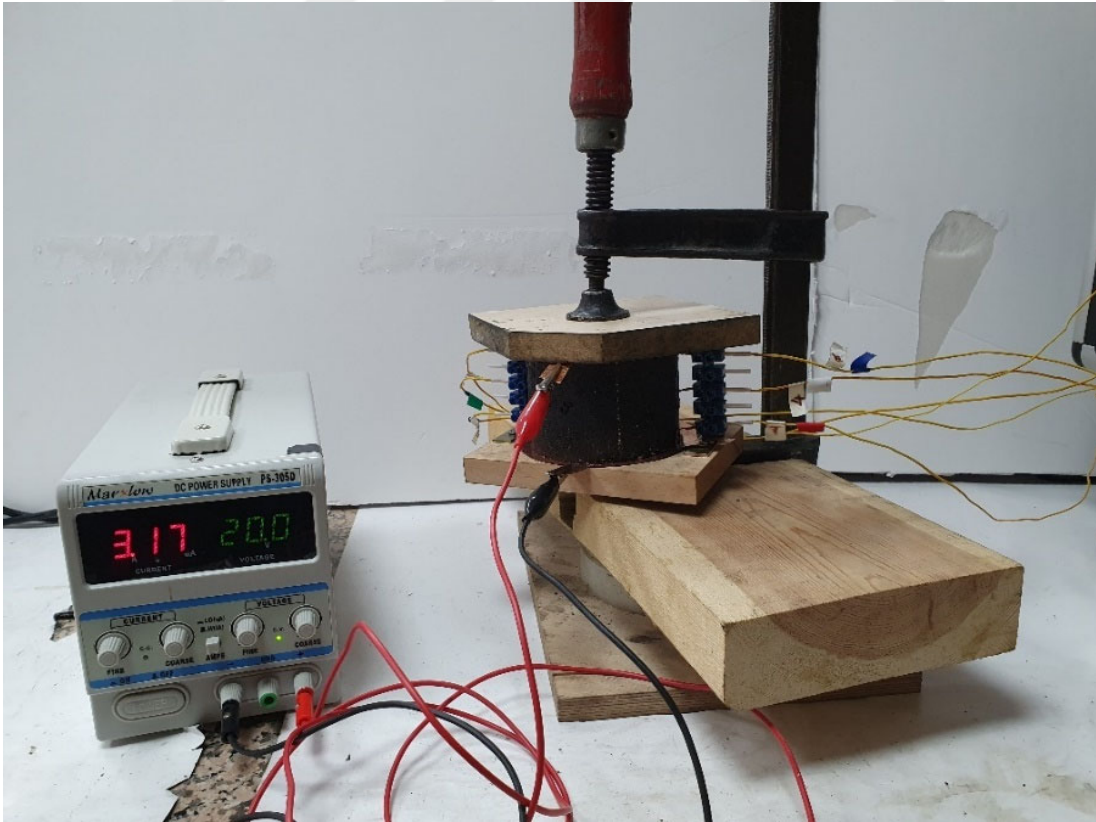
İAB numune üretim sürecinin özeti Resim 3.12'de verilmiştir.



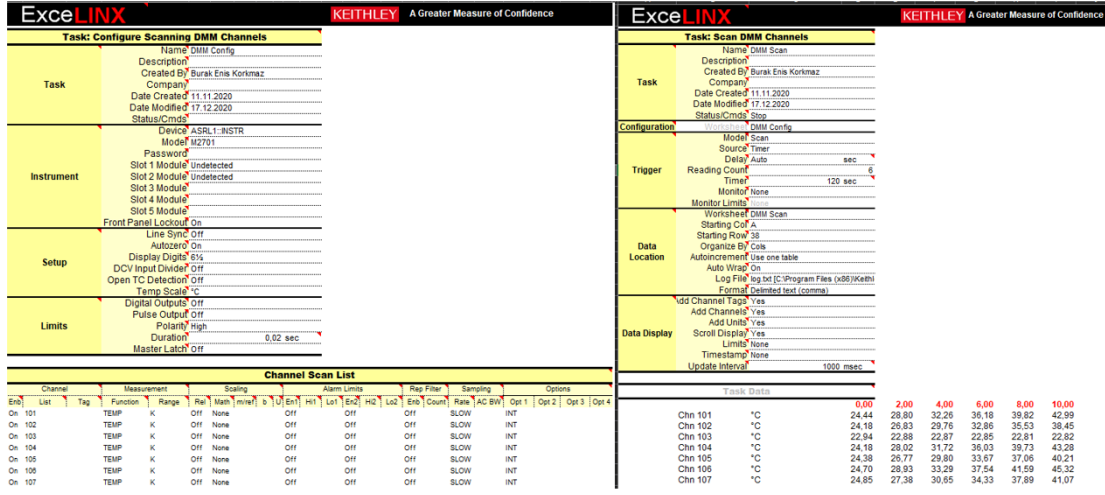
Resim 3.12 İAB numunelerinin üretim aşamaları, a) Agrega karışımlarının hazırlanması, b) Deneyde kullanılacak aparatların ve malzemelerin etüve konulması, c) Spatula ile agrega ve karbon lifinin karıştırılması, d) Bitümün mikser kabına dökülmesi, e) Isıtıcı mikser ile İAB karışımının karıştırılması, f) Sıcaklık ölçümü, g) Kürek içerisindeki malzemenin kalıba dökülerek spatula ile şişlenmesi, h) Marshall tokmağı ile numunenin sıkıştırılması, i) Numune yüzeyine tebeşir ile numune kodunun yazılması, j) Numunenin uygun bir yüzeyde oda sıcaklığında bekletilmesi, k) Numunelerin kriko ile kalıptan çıkarılması, l) Üretilen İAB numuneleri.

3.2.5.1 Üretilen İAB Numunelerinin Özdirencinin ve Isınma Potansiyelinin Ölçülmesi

Farklı bitüm oranlarında üretilen İAB numunelerinin özdirencinin ve ısınma potansiyelini belirlemek amacıyla düzenek kurulmuştur (Resim 3.13). Düzenekte numune yüzey sıcaklık değişimlerini belirlemek amacıyla yüzeye temas ettirilen sıcaklık sensörlerinin, Keithley 2700 marka datalogger ile bağlantısı yapılmıştır. Datalogger rs232 bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanarak dataloggerın Excel eklentisi (ExceLINX) üzerinden çalışan yazılım (Şekil 3.3) yardımıyla okunan sıcaklık verileri eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmış ve böylelikle veriler dijital ortamda kayıt altına alınmıştır. Numuneler oda sıcaklığı koşullarında DC güç kaynağı 20 volt'a ayarlanarak 2 prob yöntemi ile 10 dakikalık elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Elektrot ile numune temasının tam sağlanması amacıyla iletken jel sürülmüştür. Deney başlangıç ve bitiş akım değerleri güç kaynağından okunarak numunelerin başlangıç ve bitiş özdirenç değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.13 Elektrik ile ısıtma deney düzeni.



a)

b)

Şekil 3.3 Dataloggerin ExceLINX yazılım arayüzü, a) Sensör kanallarının tanıtım ekranı, b) Sensör verilerinin alındığı ekran.

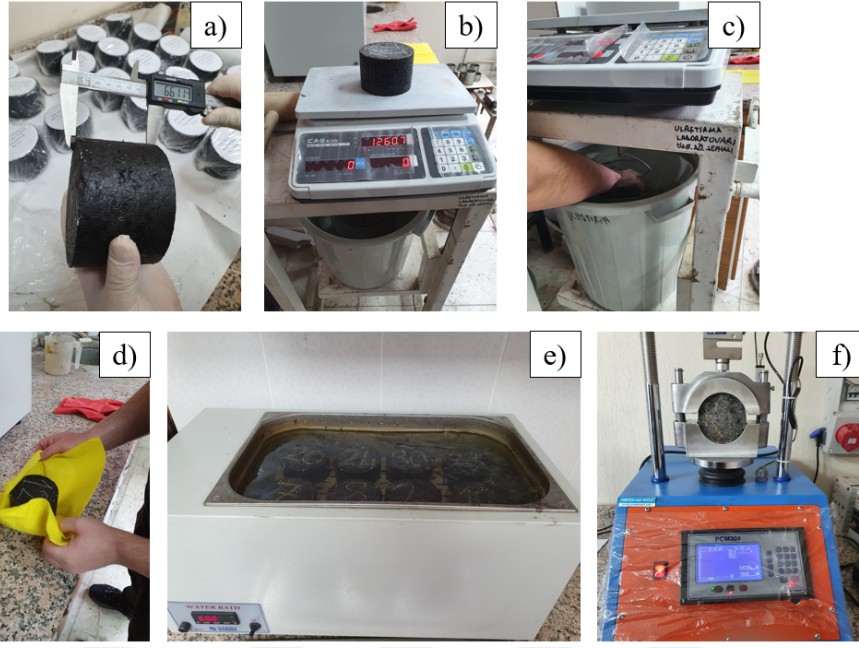
3.2.5.2 Üretilen İAB Numunelerinin Optimum Bitüm Oranının Bulunması

Farklı bitüm oranlarında hazırlanan İAB numunelerinin optimum bitüm oranının belirlenmesi için Marshall Stabilite ve Akma deneyi yapılmıştır. Deney prosedürleri aşağıda belirtilmiştir.

Prosedür,

1. Üretilen İAB numunelerinin kenarlarında çapaklar varsa temizlenerek, kumpas yardımıyla 3 farklı yüzeyden ölçüm yapılır.
2. Arşimet terazi ile numunelerin havadaki, sudaki ve yüzey kuru suya doymun hale getirilmiş ağırlıkları tartılır.
3. Numuneler 60 °C' ye ayarlanmış su banyosunda yaklaşık 40 dakika bekletilir.
4. Su banyosundan çıkarılan numuneler kurulandıktan sonra, yağlanmış Marshall cihazının çenesine yerleştirilerek deneye başlanır.
5. Deney sonunda İAB numunelerinin stabilite ve akma değerleri elde edilir.
 - Marshall stabilite değerleri, düzeltme faktörleri ile çarpılarak her briket için düzeltilmiş stabilite değerleri hesaplanmalıdır.

İAB numunelerine uygulanan Marshall Stabilite ve Akma deneyi sürecinin özeti Resim 3.14'te verilmiştir.



Resim 3.14 Marshall Stabilite ve Akma deneyi aşamaları, a) İAB numunelerinin yüksekliklerinin ölçümü, b) Havadaki ağırlık tartımı, c) Sudaki ağırlık tartımı, d) Numunenin yüzey kuru suya doygun hale getirilmesi, e) Numunelerin su banyosunda koşullandırılması, f) Numunenin Marshall cihazının yağlanmış çenesine yerleştirilerek deneyin yapılması.

Optimum bitüm oranının tespiti için Marshall Stabilite ve Akma deneyinden elde edilen değerlerden numunelerin hacim özgül ağırlığının (D_p), maksimum teorik özgül ağırlığının (D_t) boşluk yüzdesinin (V_h), agregalar arası boşluk yüzdesinin (VMA) ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin (V_f) hesaplanması gerekmektedir. Bu değerler aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

Numunenin hacmi (V), aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$V = B - C \quad (3.12)$$

Burada;

V = Numunenin hacmi (cm^3),

B = Doygun yüzey kuru ağırlığı (g),

C = Numunenin sudaki ağırlığı (g).

$$D_p = \frac{A}{V} \quad (3.13)$$

Burada;

D_p = Numunenin hacim özgül ağırlığı (g/cm^3),

A = Numunenin havadaki ağırlığı (g),

V = Numunenin hacmi (cm^3).

$$D_t = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3.14)$$

Burada;

D_t = Numunenin maksimum teorik özgül ağırlığı (g/cm^3),

W_a = Agregatın toplam ağırlığına göre bitüm yüzdesi (%),

G_{ef} = Agregatın efektif özgül ağırlığı (g/cm^3),

G_b = Bitümün özgül ağırlığı (g/cm^3).

$$VMA = 100 - \left(\frac{D_p}{G_{sb}} \right) * \left(\frac{100}{100 + W_a} \right) * 100 \quad (3.15)$$

Burada;

VMA = Agregatlar arası boşluk yüzdesi (%),

D_p = Numunenin hacim özgül ağırlığı (g/cm^3),

G_{sb} = Agregatın hacim özgül ağırlığı (g/cm^3),

W_a = Agregatın toplam ağırlığına göre bitüm yüzdesi (%).

$$V_h = \frac{(D_t - D_p)}{D_t} * 100 \quad (3.16)$$

$$V_f = \left(\frac{VMA - V_h}{VMA} \right) * 100 \quad (3.17)$$

Burada;

V_h = Numunenin boşluk yüzdesi (%),

D_t = Numunenin maksimum teorik özgül ağırlığı (g/cm^3),

D_p = Numunenin hacim özgül ağırlığı (g/cm^3)

V_f = Numunedeki asfaltla dolu boşluk yüzdesi (%),

VMA = Numunedeki agregalar arası boşluk yüzdesi (%).

Optimum bitüm oranı, 4 farklı bitüm yüzdesi değerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunmaktadır. Bunlar;

1. Bitüm yüzdesi – Pratik Özgül Ağırlık grafiğindeki maksimum Pratik Özgül Ağırlık değerine karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri,
2. Bitüm yüzdesi – Stabilite grafiğindeki maksimum Stabiliteye karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri,
3. Bitüm yüzdesi – Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi grafiğindeki % 70 (KTŞ'e göre % 65 – 75 arası olması istenmektedir) Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesine karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri,
4. Bitüm yüzdesi – Boşluk yüzdesi grafiğindeki % 4 (KTŞ'e göre % 3 – 5 arası olması istenmektedir) değerine karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri.

Bulunan optimum bitüm yüzdesi değeri 2 farklı bitüm yüzdesi değeri dikkate alınarak şartname aralığında kalıp kalmadığının kontrolü yapılmaktadır. Bunlar;

1. Bitüm yüzdesi - Akma grafiğindeki akma değeri (KTŞ'e göre 2 – 4 mm arası olması istenmektedir),
2. Bitüm yüzdesi - Numunedeki Agregalar Arası Boşluk yüzdesi grafiğindeki Numunedeki Agregalar Arası Boşluk değeri (KTŞ'e göre minimum % 14 olması istenmektedir).

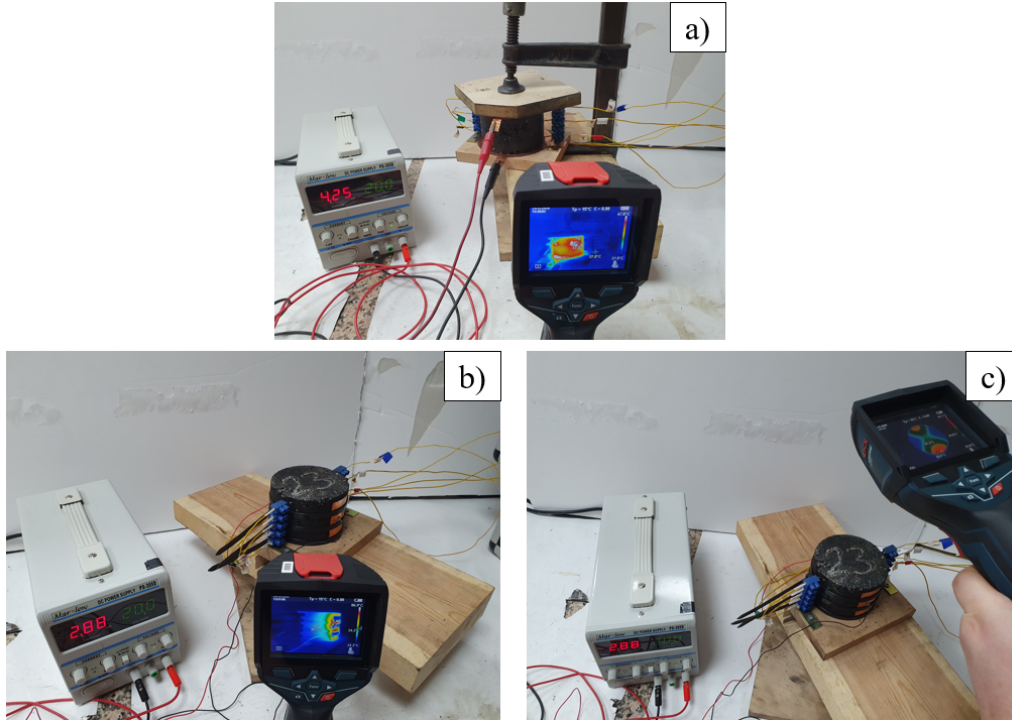
3.2.6 Optimum Bitüm Oranında Hazırlanan İAB Numunelerine Uygulanan Deneyler

Optimum bitüm oranında 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 elektriksel ısıtma ve soğutma sonrası iletkenlik ve mekanik özelliklerindeki değişim için Marshall Stabilitate-Akma deneyi.

3.2.6.1 Isıl Dağılım Durumunun Belirlenmesi

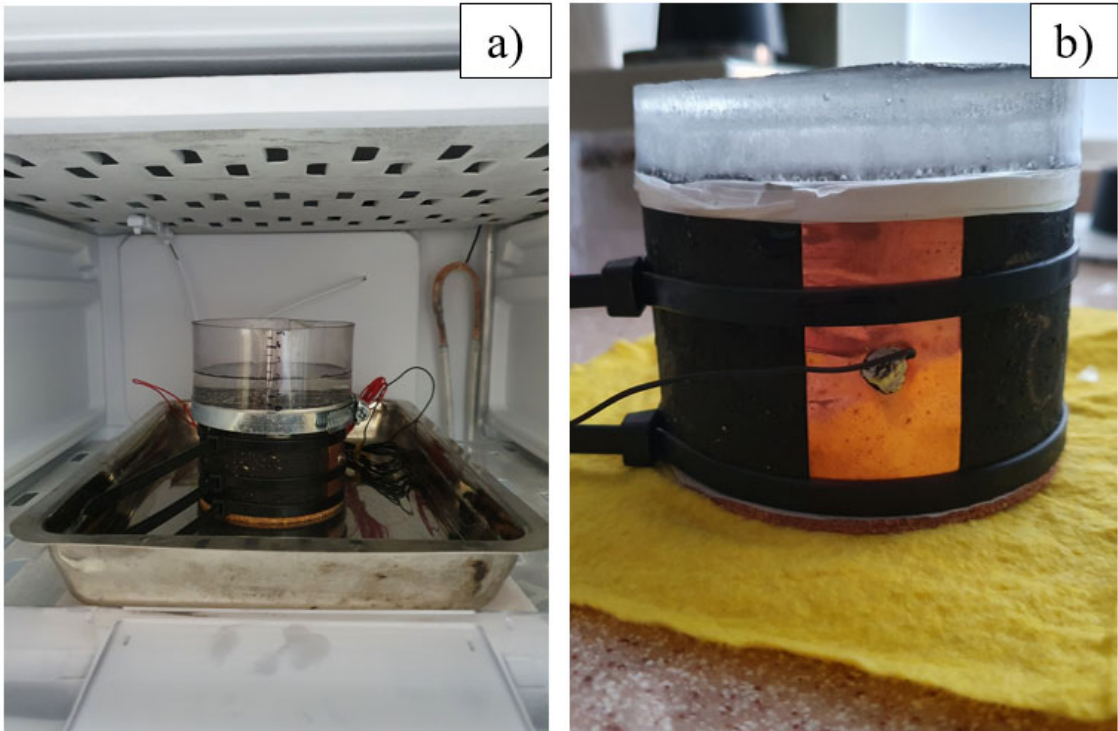
İAB numunelerinin ısıl dağılım durumunun gözlenmesi için 10 dakikalık elektriksel ısıtma deneyi yapılarak yüzeydeki ısıl dağılım termal kamera ile kayıt altına alınmıştır. 2 farklı elektrot yerleştirme durumuna göre deneyler gerçekleştirilmiştir (Resim 3.15).



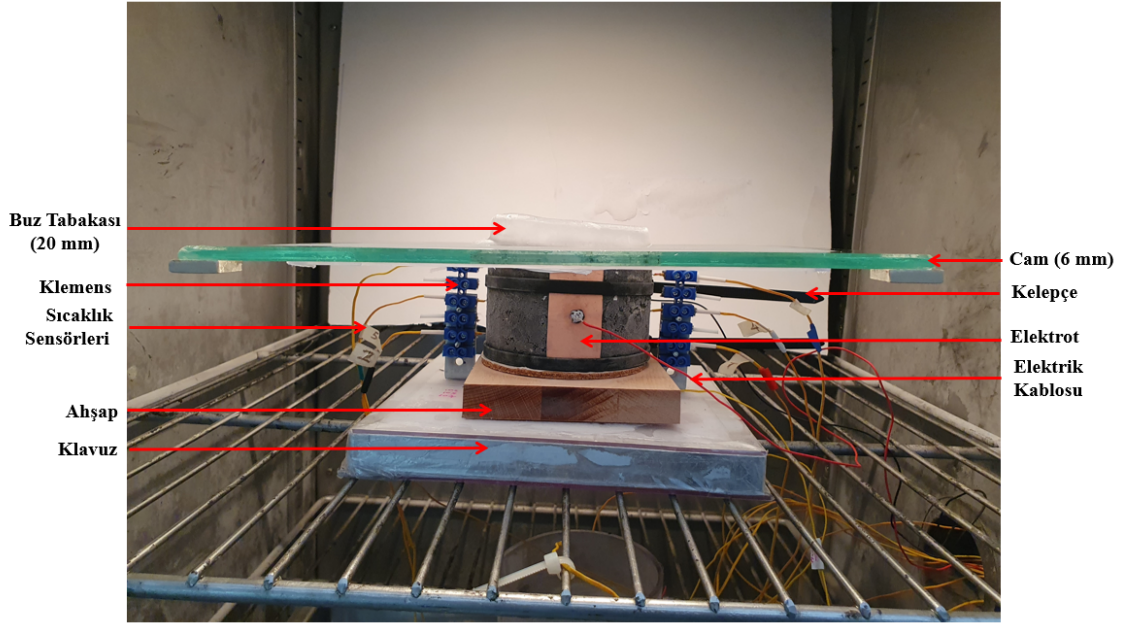
Resim 3.15 Numune yüzeyindeki ısıl dağılımın termal kamera ile gözlenmesi, a) Elektrotların üst ve alt yüzeylerine yerleştirilme durumu, b-c) Elektrotların karşılıklı yan yüzeylerine yerleştirilme durumu.

3.2.6.2 Buz Eritme Performansının Belirlenmesi

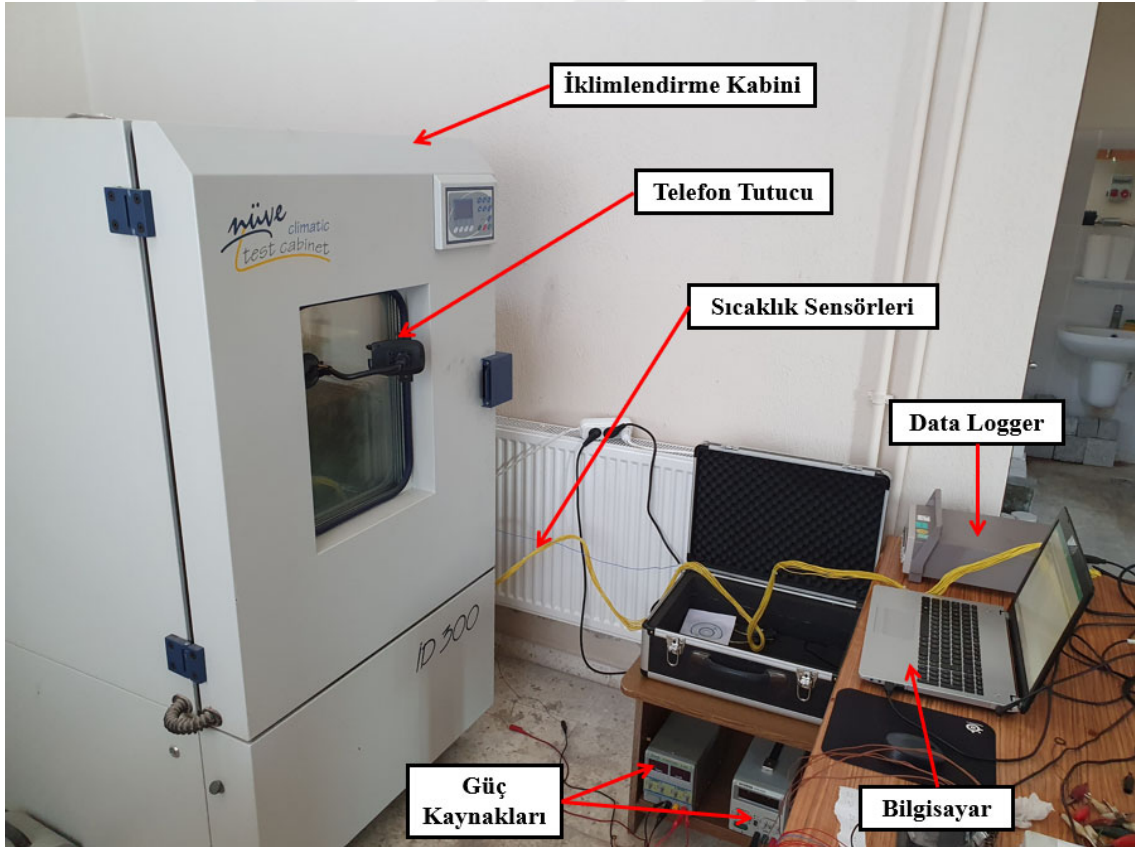
Her bir dizayn için optimum bitüm oranında hazırlanmış olan İAB Marshall numuneleri üzerinde, özel olarak hazırlanmış düzenek yardımıyla 20 mm kalınlığında buz kütlesi oluşturulmuştur (Resim 3.16). Deneyler saha uygulamalarına benzetimi yapıldığından dolayı elektrotlar numune yan yüzeylerine paralel 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 yönlenebilmesi amaçlanmıştır. İklimlendirme kabini içerisinde -20 °C ortam sıcaklık koşullarında 20 volt DC güç kaynağı ile numune üzerindeki buz eritme işlemi 2 saat boyunca video kamera ile kaydedilmiştir. Deneyler sırasında numune yüzey sıcaklık değişimleri sıcaklık sensörleri ile bilgisayar ortamına kayıt altına alınmıştır. Kabin içi ve dışı düzenekler Resim 3.17 ve Resim 3.18’de gösterilmiştir.



Resim 3.16 Numune üzerinde buz tabakasının oluşturulması, a) Hazırlanan düzenek içerisindeki suyun donması için derin dondurucuya koyulması, b) Deneye hazır hale gelmiş üzerinde buz tabakası oluşmuş numune.



Resim 3.17 Kabin içi buz eritme düzeneği.



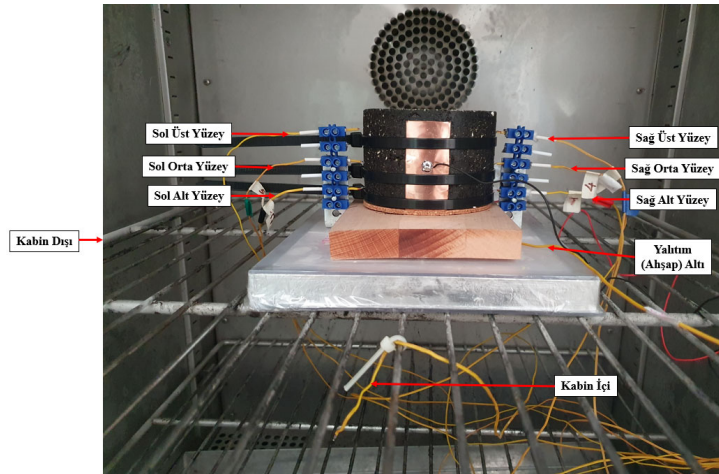
Resim 3.18 Kabin dışı buz eritme düzeneği.

3.2.6.3 Elektriksel Isıtma-Soğutmaya Tabi Tutulması

Her bir dizayn için optimum bitüm oranında hazırlanan numuneler, -20 °C ortam koşulu sağlayan iklimlendirme kabini içerisinde hazırlanacak düzenekte elektriksel olarak 4 farklı (0-5-10-15) elektriksel ısıtma-soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Bir elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi şu aşamalardan oluşmaktadır;

1. -20 °C ortam koşullarında ve numune yüzey sıcaklığı -5 °C'e geldiğinde 20 volt değerine ayarlanmış DC güç kaynağı ile elektriksel olarak numune ısıtma işlemine başlanır,
2. Numune yüzey sıcaklığı +5 °C'e geldiğinde güç kaynağı kapatılarak -5 °C'e soğuması için beklenir.

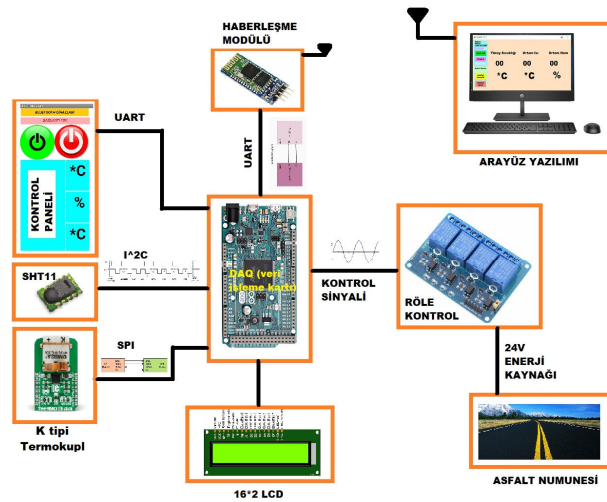
Çevrime tabi tutulan İAB numuneleri üzerinde her çevrim öncesinde ve sonrasında oda sıcaklığı koşullarında 2 prob yöntemi ile elektrot ile numune yüzeyine arasındaki temasın tam sağlanması için iletken jel kullanılarak öz direnç ölçümleri yapılmış ve iletkenlik özelliklerindeki değişim tespit edilmiştir. Aynı zamanda 0-5-10-15 çevrime maruz bırakılan numunelere Marshall Stabilitate 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 3.19'da gösterilmiştir.



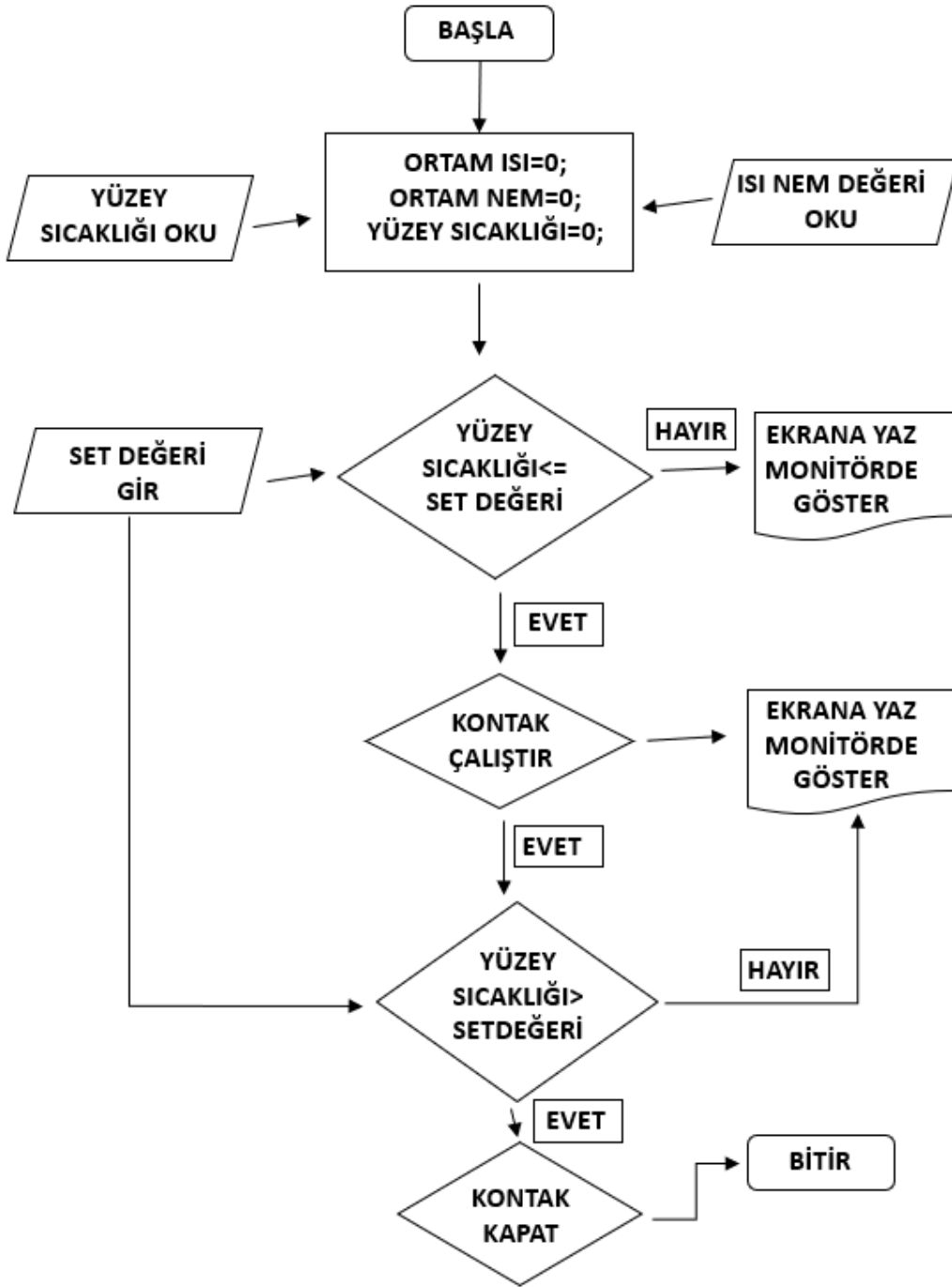
Resim 3.19 Numune elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi için hazırlanan düzenek.

3.2.7 Akıllı Buzlanma Önleyici Sistemin Geliştirilmesi

Ortam sıcaklığı, nem ve kaplama yüzey sıcaklığı değerine göre buzlanmanın önlemesi için kendi kendine karar verebilen ve uzaktan bilgisayar arayüz yazılımı ve mobil uygulama ile manuel olarak kontrolü sağlanabilen akıllı bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen akıllı sistemin mimarisi Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Mimaride yer alan sistemler arası iletişimi sağlamak için çeşitli haberleşme protokolleri kullanılmıştır. Bluetooth modülünde, bilgisayar- mikrokontroller veya mikrokontroller-çevre birimler arasında haberleşmeyi sağlayan haberleşme protokolü olan UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) kullanılmıştır. Yüzey sıcaklığını ölçen Thermokupluda, SPI (Serial Peripheral Interface) Protokolü kullanılmıştır. SPI Protokolü full-duplex olarak çalışmaktadır. Yani veri alıp verme eşzamanlı şekilde gerçekleşmektedir. Ortam sıcaklığını ve nem değerini ölçen SHT11 sensöründe, I2C Protokolü kullanılmıştır. I2C 2 adet pin üzerinden iletişim kurmayı sağlayan bir yazılım protokolüdür (İnt.Kyn.8). Akıllı sistem, ayarlanan Ortam sıcaklığı, nem ve kaplama yüzey sıcaklığı parametrelerine göre güç kaynağını otomatik şekilde açıp kapama işlemi yaparak buzlanmanın oluşmasının önüne geçmektedir. Aynı zamanda bilgisayar arayüz yazılımı ve mobil uygulama aracılığıyla sistem ile bağlantı kurularak sisteme manuel olarak müdahale edilmesi sağlanabilmektedir. Sistemin çalışma yöntemini gösteren iş akış diyagramı Şekil 3.5’te belirtilmiştir.



Şekil 3.4 Akıllı buzlanma önleyici sistemin mimarisi.



Şekil 3.5 Akıllı buzlanma önleyici sistemin iş akış diyagramı.

4. BULGULAR

4.1 Agrega Deneyleri Sonuçları

4.1.1 X-Işın Floresans Spektroskopisi (XRF) Deneyi Sonuçları

İAB numunelerinde kullanılan kireçtaşının kimyasal analizi AKÜ Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yaptırılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Deney sonuçlarından kireçtaşının en büyük kimyasal bileşeni CaO (%52,15) olarak belirlenmiştir.

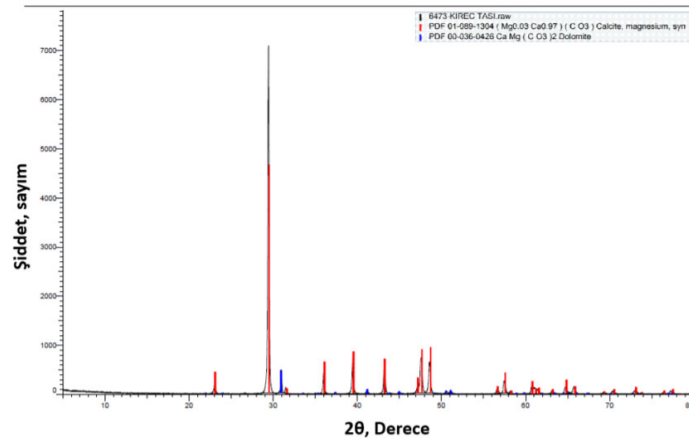
Çizelge 4.1 Kireçtaşı agregasının XRF sonuçları.

Bileşenler	Lg*	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SrO
Değerler (%)	43,13	0,03	2,01	0,74	1,53	0,01	0,03	0,12	52,15	0,04	0,19	0,02

* Kızdırma kaybı.

4.1.2 X-Işın Difraktometre (XRD) Deneyi Sonuçları

İAB numunelerinde kullanılan kireçtaşının XRD deneyi AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yaptırılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde ağırlık olarak kalsiyum magnezyumlu karbonat bileşimi (Mg_{0,03} Ca_{0,97})(CO₃) ve az miktarda dolomit (CaMg(CO₃)₂) tespit edilmiştir.

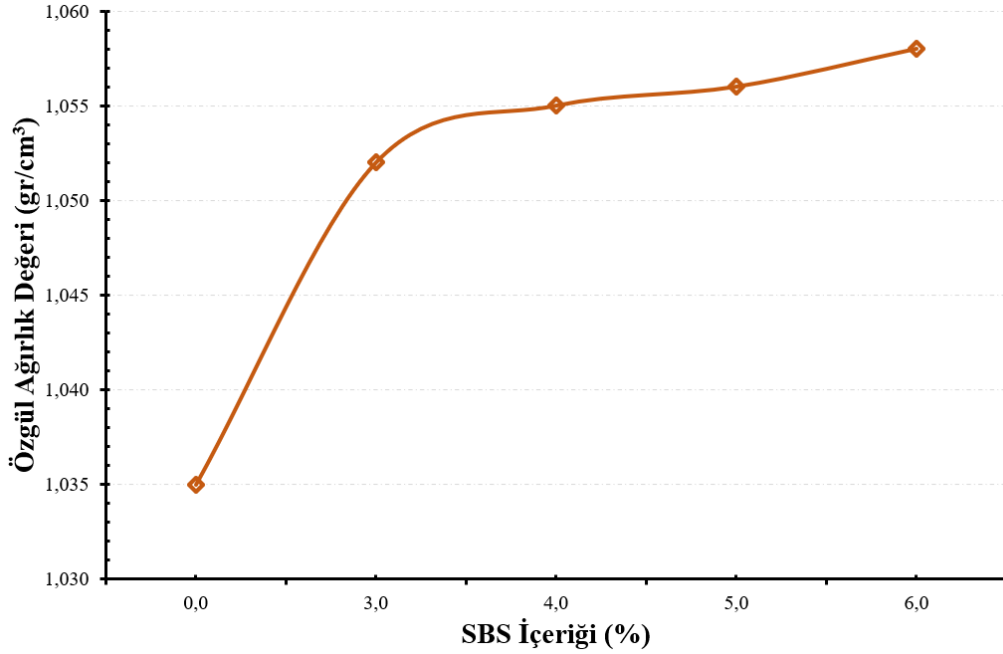


Şekil 4.1 Kireçtaşı agregasının XRD sonuçları.

4.2 Modifiye Bitüm Deneyleri Sonuçları

4.2.1 Özgül Ağırlık Deneyi Sonuçları

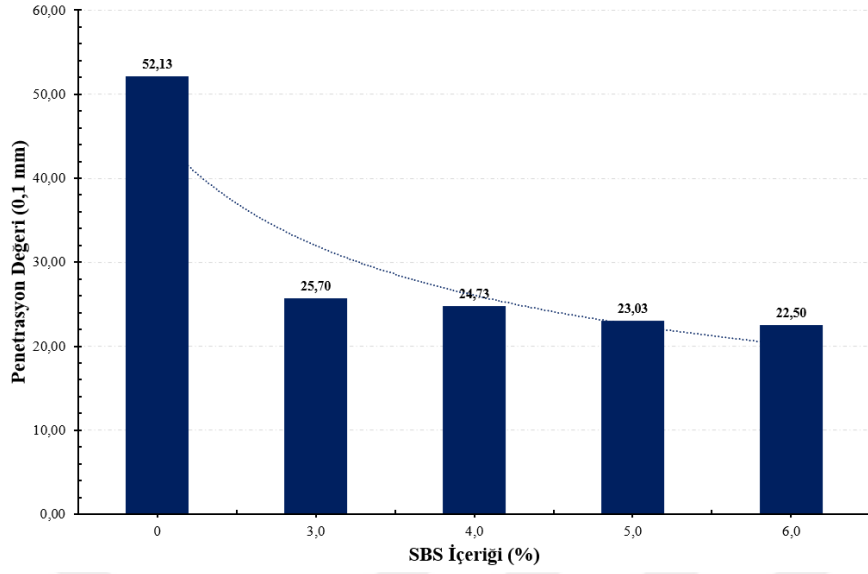
Farklı oranlarda (%0, 3, 4, 5 6) SBS ile modifiye edilen B50/70 sınıfı bitümlere uygulanan özgül ağırlık deneyi sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Deney sonuçlarından katkı oranı miktarı arttıkça özgül ağırlık değerlerinde artış görülmüştür. En çok artış %3 oranda olmuş olup, bundan sonraki oran arttıkça özgül ağırlık değerinde azalan eğimde bir artış gözlenmiştir.



Şekil 4.2 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin özgül ağırlık deneyi sonuçları.

4.2.2 Penetrasyon Deneyi Sonuçları

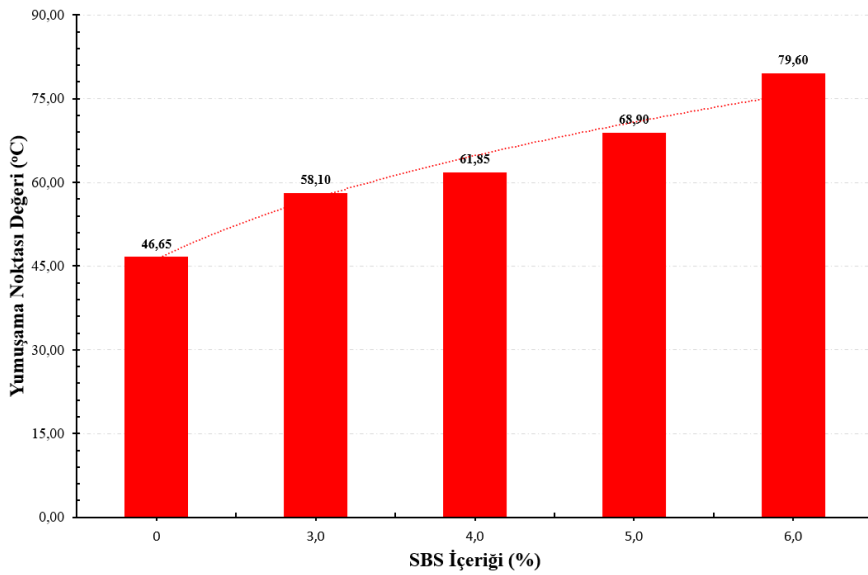
Farklı oranlarda (%0, 3, 4, 5 6) SBS ile modifiye edilen B50/70 sınıfı bitümlere uygulanan penetrasyon deneyi sonuçları Şekil 4.3’te verilmiştir. Katkı içeriğinin artışı ile beraber penetrasyon değerinde azalma meydana gelmiştir. Penetrasyon değerindeki en fazla azalma miktarı %3 SBS katkılı modifiye bitümde görülmüş olup, azalma yaklaşık %50’dir. %3’ten %6’a katkı oranı arttıkça penetrasyon değeri grafiğindeki eğim çizgisinde yataylaşma gözlenmiştir.



Şekil 4.3 Farklı oranda SBS katkıli modifiye bitümlerin penetrasyon deneyi sonuçları.

4.2.3 Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

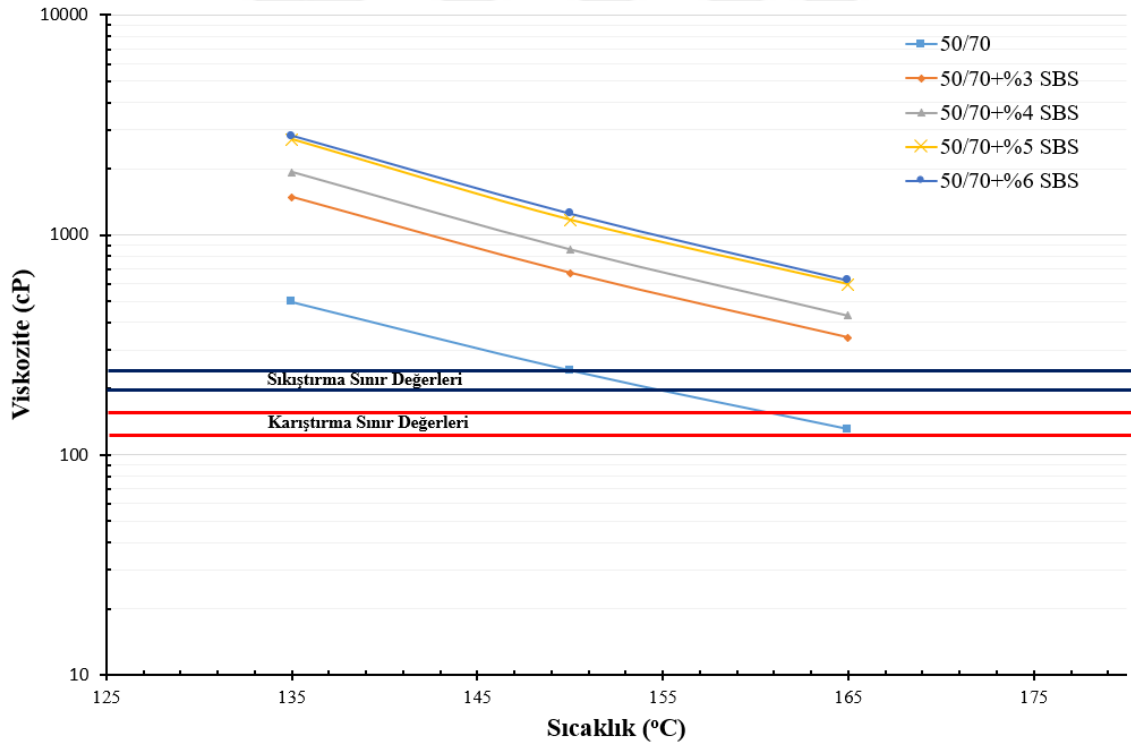
Farklı oranlarda (%0, 3, 4, 5 6) SBS ile modifiye edilen B50/70 sınıfı bitümlere uygulanan yumuşama noktası deneyi sonuçları Şekil 4.4'de verilmiştir. Katkı oranı arttıkça yumuşama noktasında artış gözlenmiştir. Modifiye bitümlerde sertleşme etkisinin bir göstergesi olan yumuşama noktasındaki artış kalıcı deformasyona karşı daha az hassasiyet gösterdiği için olumludur (Sengoz ve Isikyakar 2008).



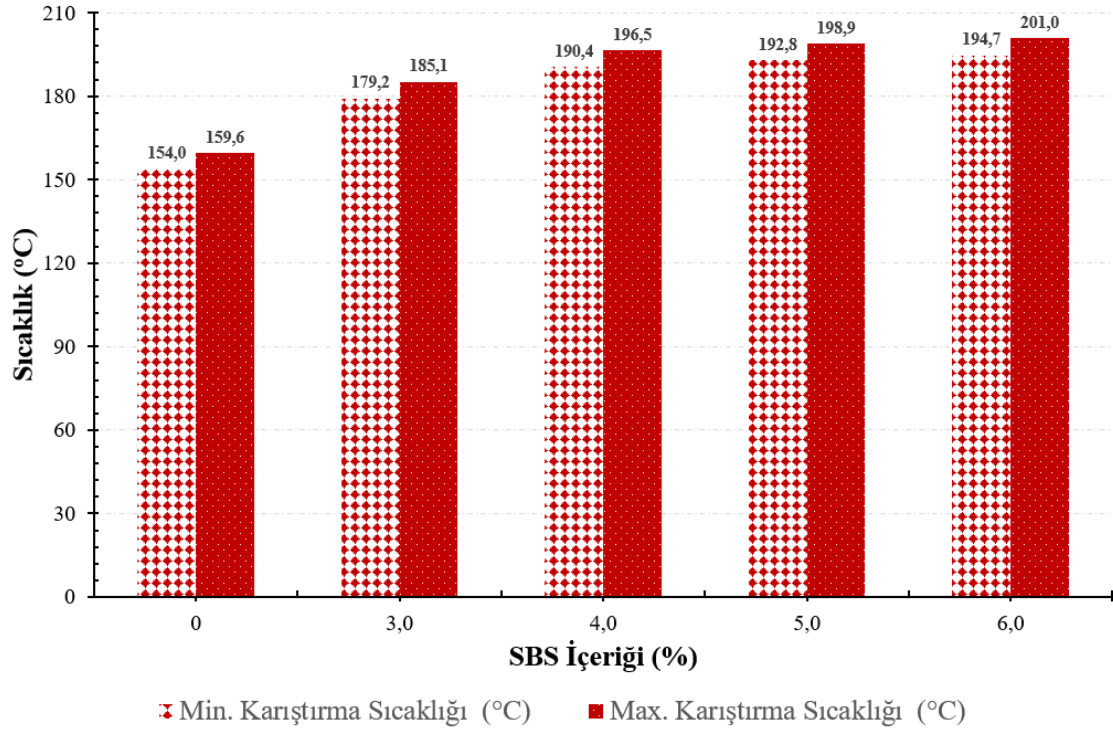
Şekil 4.4 Farklı oranda SBS katkıli modifiye bitümlerin yumuşama noktası deneyi sonuçları.

4.2.4 Viskozite Deneyi Sonuçları

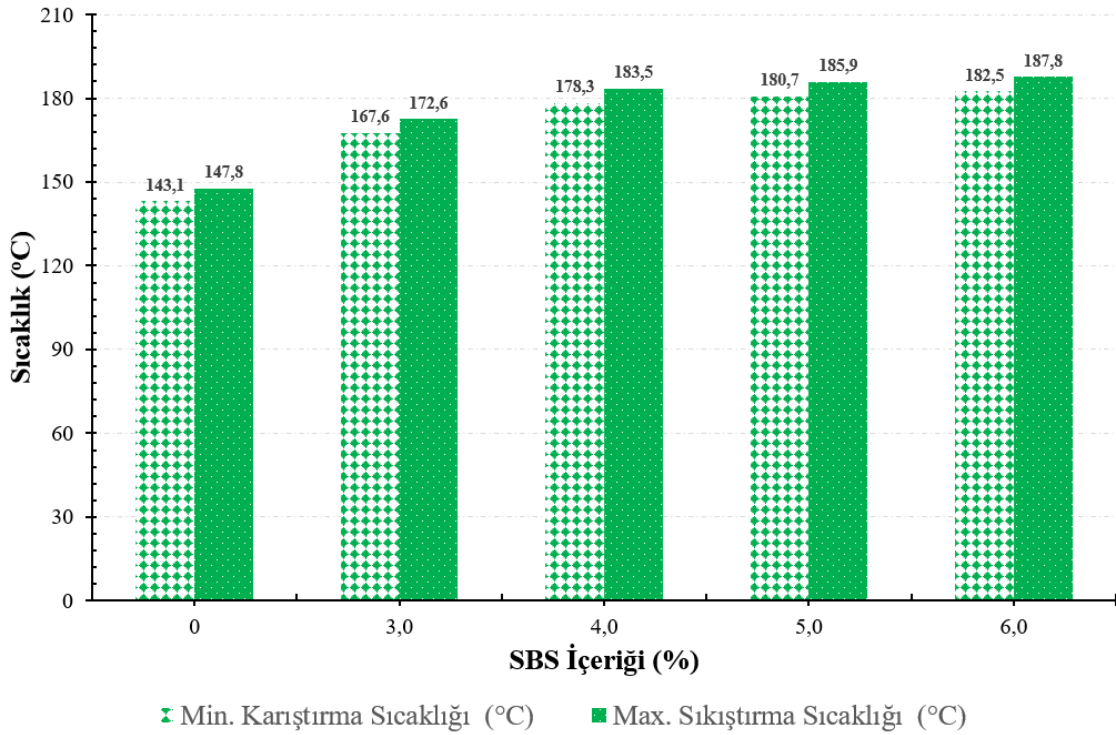
Farklı oranlarda (%0, 3, 4, 5 6) SBS ile modifiye edilen B50/70 sınıfı bitümlere uygulanan viskozite deneyi sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir. Katkı içeriğinin artması ile beraber viskozite değerlerinde artış meydana gelmiş olup, %5 ile %6 arasındaki viskozite değerleri arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ardışık katkı miktarları arasındaki en fazla viskozite farkı %0’dan %3 geçişte görülmektedir. Marshall numunelerinin üretimi sırasında dikkat edilecek olan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık değerleri viskozite değerlerine göre hesaplanarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.6’dan görüleceği üzere katkı oranı artışı ile beraber karıştırma sıcaklığı artmakta, bu da daha fazla yapım maliyetine sebep olmaktadır. Aynı zamanda Şekil 4.7’deki katkı oranı artışı ile beraber sıkıştırma sıcaklığı artışı sıkıştırma aşamasında sıcaklığın korunması için ek önlemler alınması gerektirecek durumlar oluşturabilir.



Şekil 4.5 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin viskozite deneyi sonuçları.



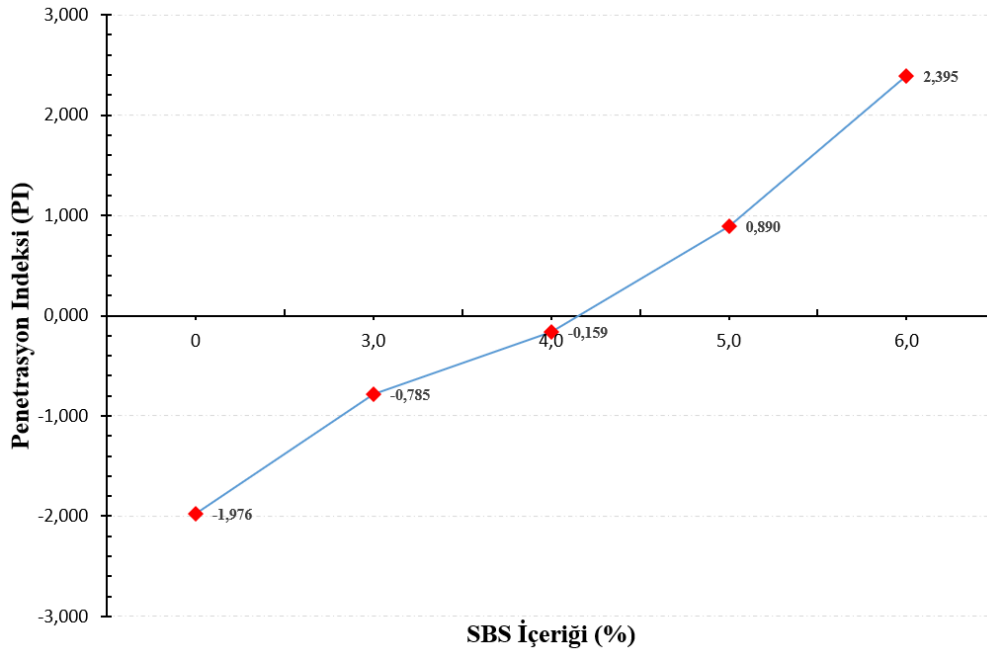
Şekil 4.6 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin karıştırma sıcaklığı grafiği.



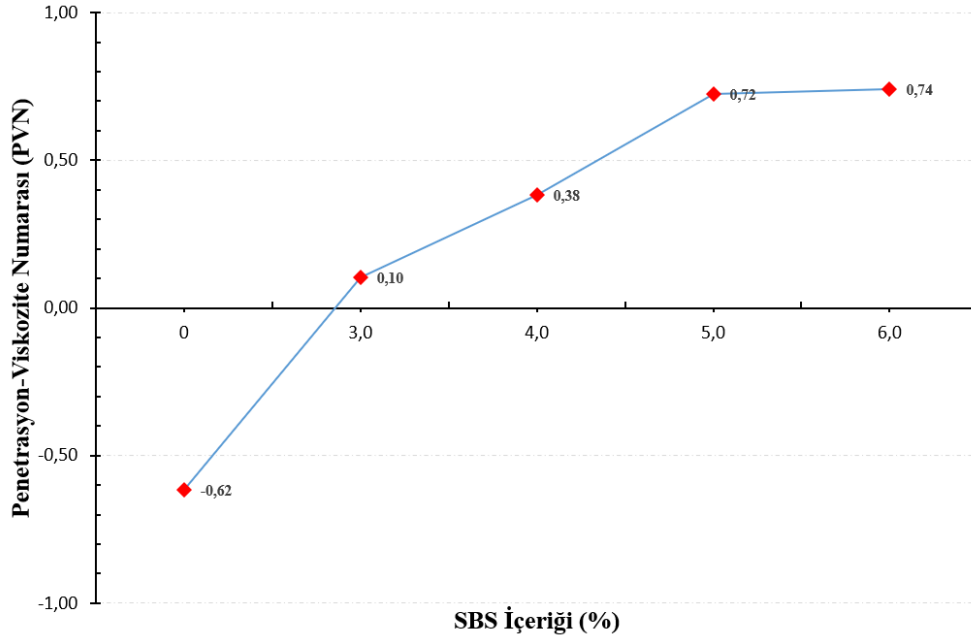
Şekil 4.7 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin sıkıştırma sıcaklığı grafiği.

4.3 Bitüm Sıcaklık Hassasiyeti Sonuçları

Bitüm sıcaklık hassasiyeti parametrelerinden olan Penetrasyon İndeksi (PI) ve Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN) değerleri penetrasyon, yumuşama ve viskozite deneylerinden elde edilen değerlerden hesaplanarak modifiye bitüme katılacak olan optimum SBS katkı oranı belirlenmiştir. Penetrasyon İndeksi (PI) ve Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN) grafikleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Penetrasyon İndeksi (PI) grafiği incelendiğinde katkı oranı attıkça PI değeri arttığı ve bunun sonucunda ısıya karşı hassasiyet azaldığı görülmektedir. Düşük PI değerleri, yüksek sıcaklık duyarlılığını gösterir. Daha yüksek PI içeren bitüm içeren asfalt karışımları, düşük sıcaklıkta çatlama ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençlidir. Arshad vd. (2016)’a göre PVN = 0 düşük sıcaklık hassasiyetini, PVN = -1,5 değeri ise yüksek sıcaklık hassasiyetini gösterdiği belirtilmiş olup, grafikte %3 katkı oranındaki PVN değeri 0’a en yakın değer olduğu için ve diğer bitüm deney sonuçlarına dikkate alınarak modifiye bitümde kullanılacak optimum SBS katkı oranı %3 olarak seçilmiştir. Kış aylarında yani soğuk iklimlerde hassasiyeti azaltmak öncelikli amaç olduğundan dolayı düşük sıcaklık hassasiyeti olan PVN=0 değerinin dikkate alınması bu açıdan önemlidir.



Şekil 4.8 Farklı oranda SBS katkılı modifiye bitümlerin Penetrasyon İndeksi (PI) grafiği.



Şekil 4.9 Farklı oranda SBS katkıli modifiye bitümlerin Penetrasyon-Viskozite Numarası (PVN) grafiği.

%3 SBS ve %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitümlerin özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 %3 SBS ve %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitümlerin özellikleri.

Özellikler	B50/70+%3 SBS	B50/70+%3 SBS+14 KS
Özgül Ağırlık	1,043	1,092
Penetrasyon Derecesi (25 °C)	25,70	23,65
Yumuşama Noktası (°C)	58,10	60,05
Brookfield Viskozite 135 °C’de (cP)	1484,00	2096,00
Brookfield Viskozite 165 °C’de (cP)	341,67	499,60
Karıştırma Sıcaklığı (Min. / Max.)	179,2 / 185,1	192,4 / 198,9
Sıkıştırma Sıcaklığı (Min. / Max.)	167,6 / 172,6	179,7 / 185,2
Penetrasyon İndeksi (PI)	-0,785	-0,571
Penetrasyon Viskozite Numarası (PVN)	0,10	0,44

4.4 Farklı Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları

Farklı bitüm oranlarına sahip % 3 SBS ve % 3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitümler ile üretilen 2 farklı İAB Marshall serisine, Özdirenç-Isınma Potansiyeli ve Marshall

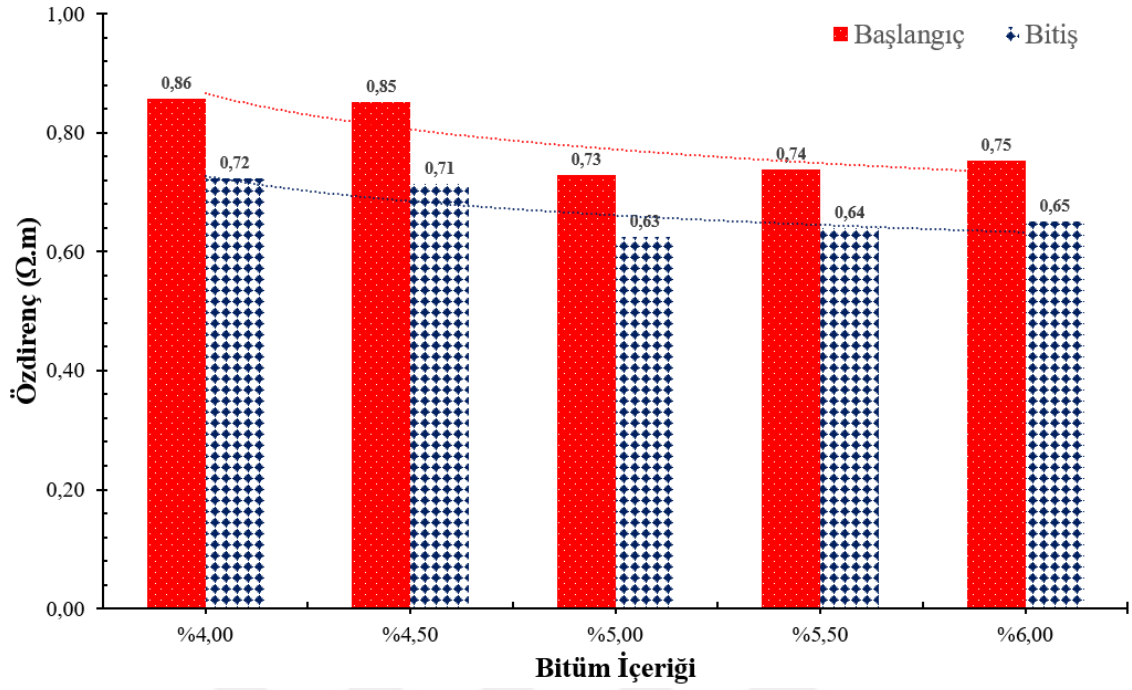
Stabilite - Akma deneyi uygulanmıştır. DC güç kaynağı 20 volt değerine ayarlanarak 10 dakika boyunca numuneler 2 prob yöntemine göre elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Deney başında ve sonunda güç kaynağındaki akımlar okunarak özdirenç değişimleri hesaplanılmıştır. Ayrıca numune yüzeylerine farklı noktalardan temas ettirilen sıcaklık sensörler ile numunelerin ısınma potansiyeli kayıt altına alınmıştır.

4.4.1 Özdirenç ve Isınma Potansiyeli Deneyi Sonuçları

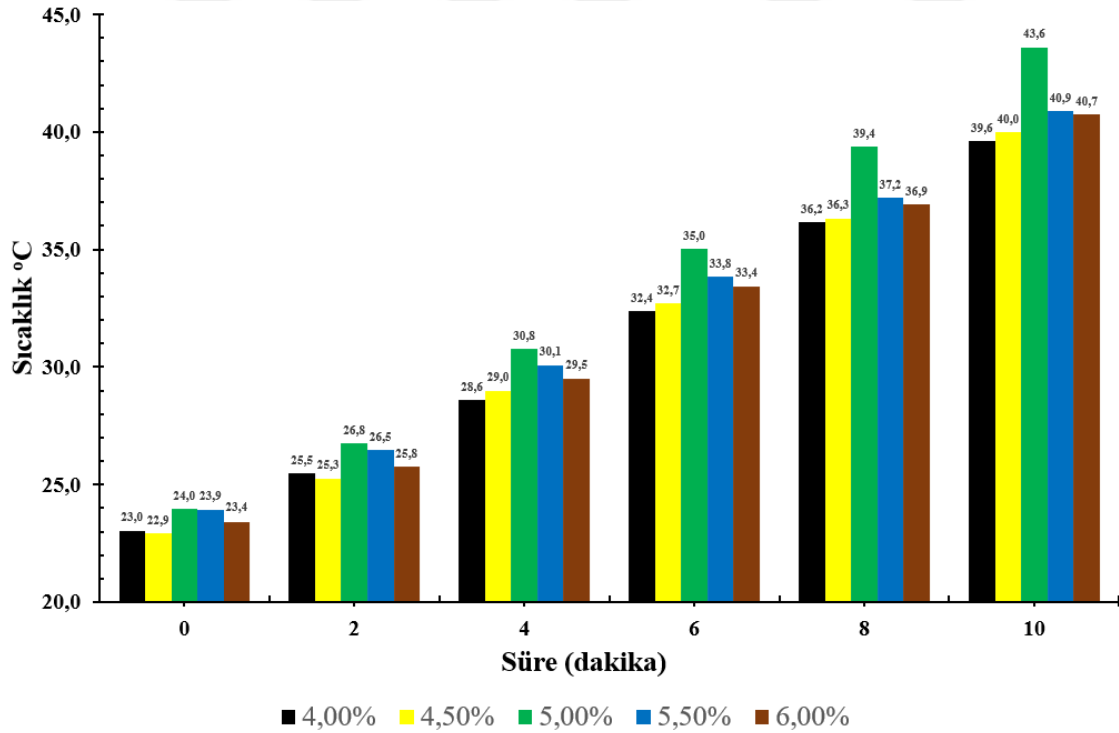
Farklı bitüm oranlarına sahip (% 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0) %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin özdirenç ve ısınma potansiyeli deney sonuçları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.10’daki özdirenç grafiğinde, %5 bitüm içeriğine kadar iletkenliğin artmasının sebebinin, bitüm miktarı artışı ile beraber yağlanma etkisi sonucu karbon liflerinin dağılımı daha iyi hale geldiği ve özdirenç değerinin azaldığı düşünülmektedir. %5 bitüm içeriğinden sonra sabit bir iletkenlik değerine ulaşmasının ise perkolasyon eşiğine ulaşıldığını göstermektedir. Şekil 4.11’de belirtilen sıcaklık değişim grafikleri özdirenç ile ilişkili bir özellik göstermiştir.

Farklı bitüm oranlarına sahip (% 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5) %3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin Özdirenç ve Isınma Potansiyeli deney sonuçları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te verilmiştir. Şekil 4.12’deki özdirenç grafiğinde, %5,5 bitüm içeriğine kadar iletkenliğin artmasının sebebinin, bitüm miktarı artışı ile beraber yağlanma etkisi sonucu karbon liflerinin dağılımı daha iyi hale geldiği ve özdirenç değerinin azaldığı düşünülmektedir. %5,5 bitüm içeriğinden sonra özdirenç azalış eğiminin yatıklaşması ise perkolasyon eşiğine ulaşıldığını göstermektedir. Şekil 4.13’te belirtilen sıcaklık değişim grafikleri özdirenç ile ilişkili bir özellik göstermiştir.

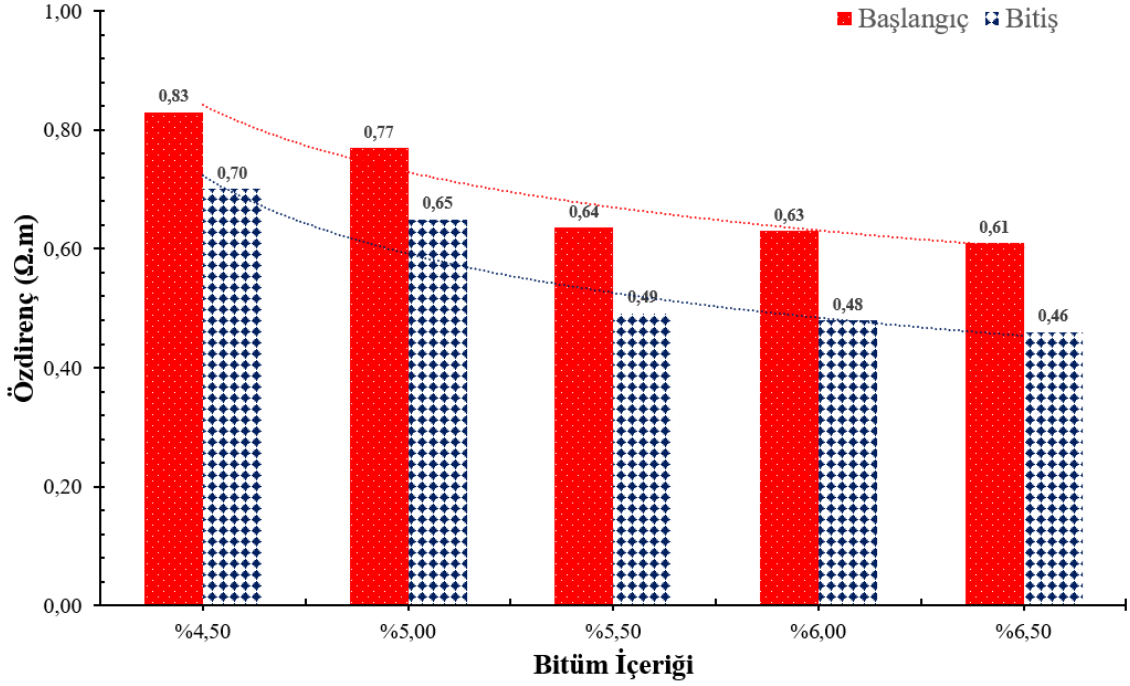
Şekil 4.10 ve Şekil 4.12’deki elde edilen özdirenç değerleri güncel literatürde (Pan vd. 2015) yer alan en düşük özdirenç değerinden (yaklaşık 10 Ω .m) daha düşük bir değer elde edilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.13’deki ısınma hızları sırasıyla 1,66 – 1,96 $^{\circ}$ C/dk ve 1,86 – 3,01 $^{\circ}$ C/dk’dır.



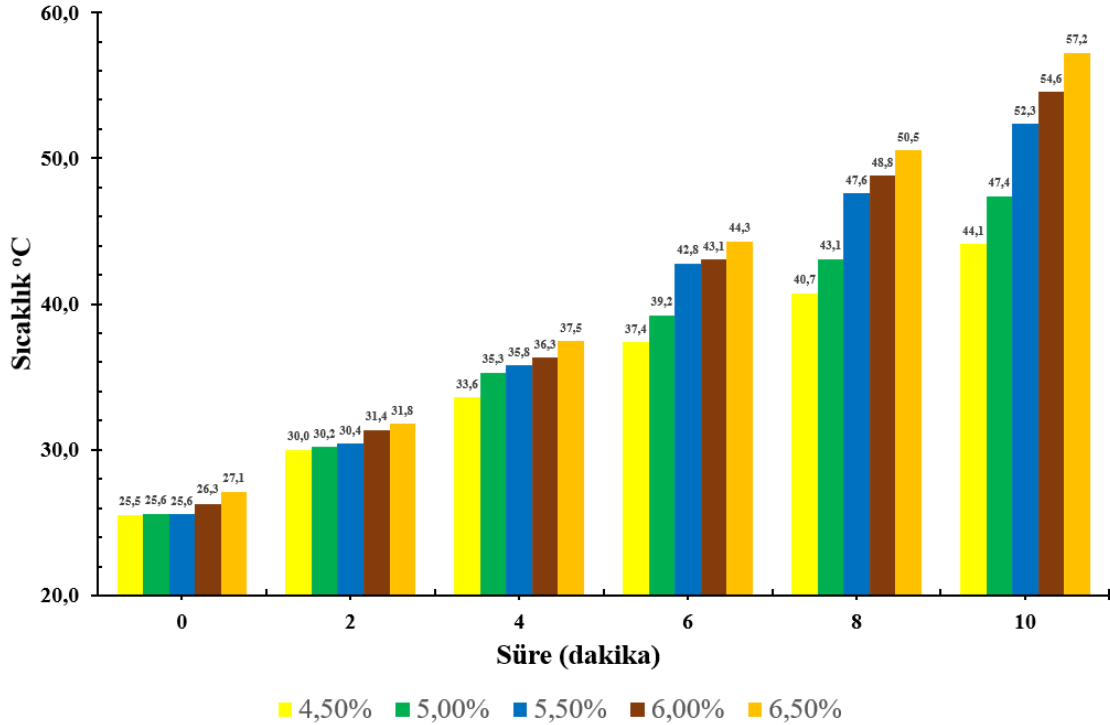
Şekil 4.10 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.



Şekil 4.11 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.



Şekil 4.12 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin özdirenç sonuçları.



Şekil 4.13 Farklı bitüm oranlarına sahip %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile hazırlanan İAB numunelerinin sıcaklık değişimleri sonuçları.

4.4.2 Marshall Stabilite – Akma Deneyi Sonuçları

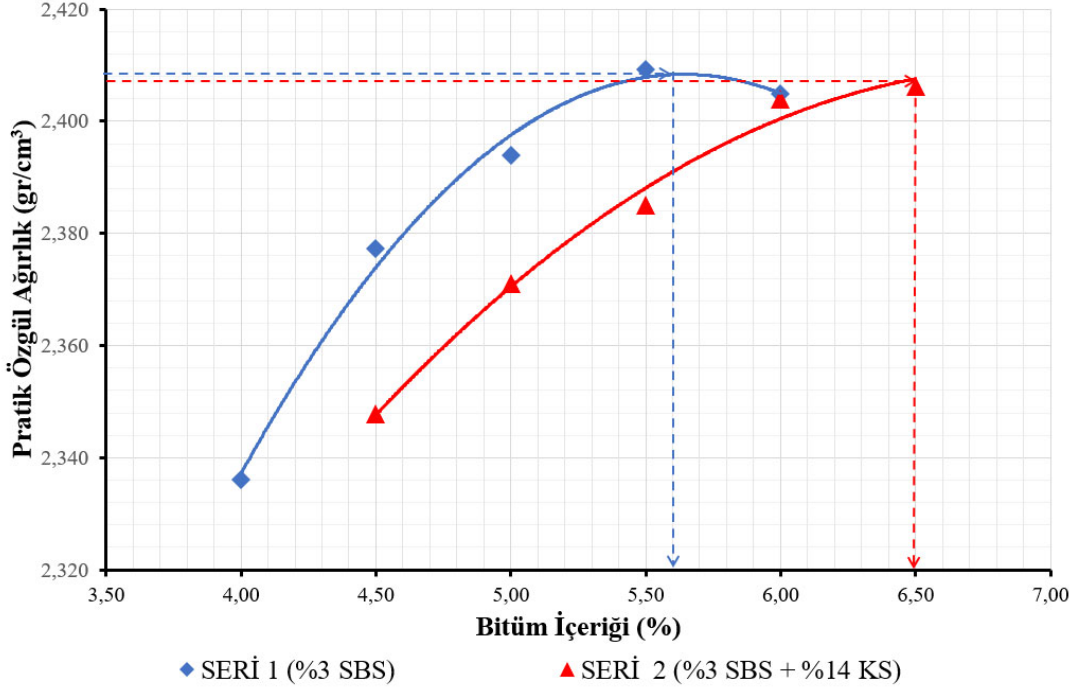
Farklı bitüm oranlarına sahip % 3 SBS ve % 3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm olmak üzere üretilen 2 farklı İAB dizaynının optimum bitüm oranının bulunması için Marshall-Stabilite deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 14-19’da gösterilmiştir.

Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçlarından optimum bitüm yüzdesi, pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk ve boşluk grafiklerinden belirlenen değerlerin aritmetik ortalamasına göre hesaplanan 2 farklı serinin optimum bitüm oranları şu şekildedir;

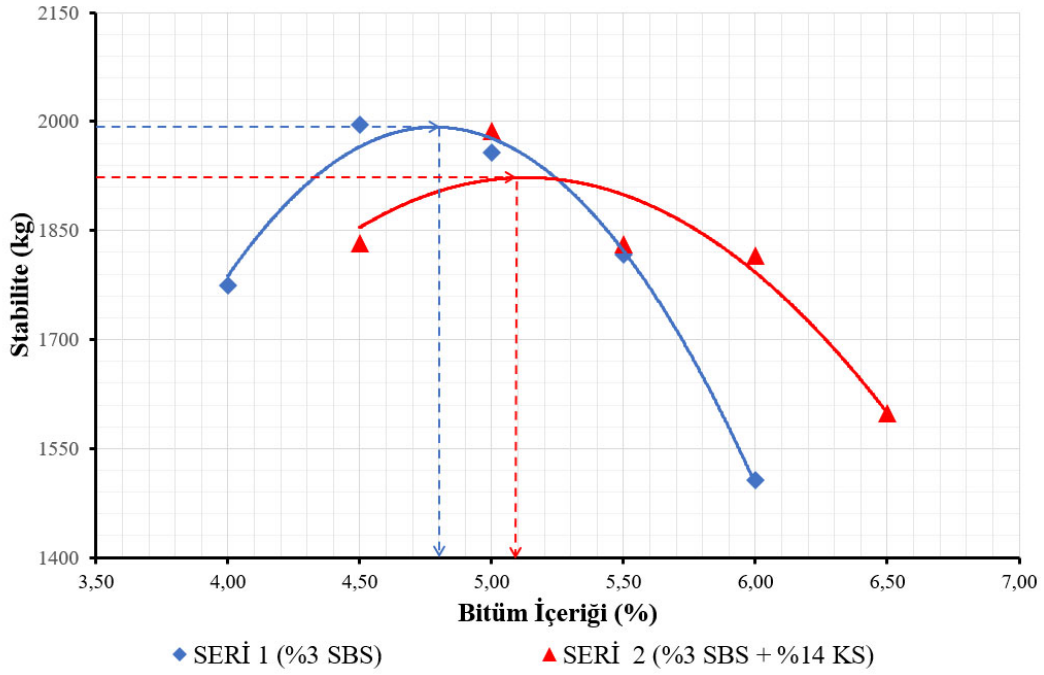
1. % 3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesi (Seri 1) için 5,10
2. % 3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesi (Seri 2) 5,70 bulunmuştur.

Optimum bitüm yüzdesi civarında her 2 seride özdirenç değerinin en düşük değere ulaşıldığı görülmüş olup, bunun sebebinin asfalt numunesi içerisinde boşlukların azalması ile karbon liflerinin temasının daha iyi sağlanarak iletkenliği artırdığı düşünülmektedir. Seri 2’deki karbon siyahı, yağı emerek optimum bitüm içeriğini artırdığından Seri 1’e göre daha fazla optimum bitüm oranı çıktığı düşünülebilir. Şekil 4.15’de Seri 2’deki stabilite değeri Seri 1’e göre daha düşük değer vermesi karbon siyahının asfalt betonundaki mekanik özelliği belli bir ölçüde etkilediği göstermektedir. Bununla beraber her 2 serinin stabilite değerleri şartname sınır değerlerinin üzerindedir. Şekil 4.17’deki her 2 serinin optimum bitüm oranındaki boşluk yüzdeleri yaklaşık %4 oranında değer vermekte olup, bu değer iletkenlik açısından da olumlu sonuç verdiği Şekil 4.10 ve Şekil 4.12’e görülmüştür. Aynı zamanda Seri 2’de Seri 1’e göre boşluk miktarındaki artışın sebebinin karbon siyahının bitümü absorbe etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.18’deki akma grafiğine göre, Seri 1 şartname üst sınır koşuluna (4 mm) yakınken, Seri 2’ ise şartname sınır koşullarını (2-4 mm) sağlamadığı görülmektedir. Bu durumun sebebinin kullanılan bitümün modifiye olması ve karbon lifi katkısının da etkilemiş olabileceği düşünülmektedir. Akma değerinin düşük olması malzemenin gevrek davranış gösterdiğini, yüksek olması ise malzemenin plastik

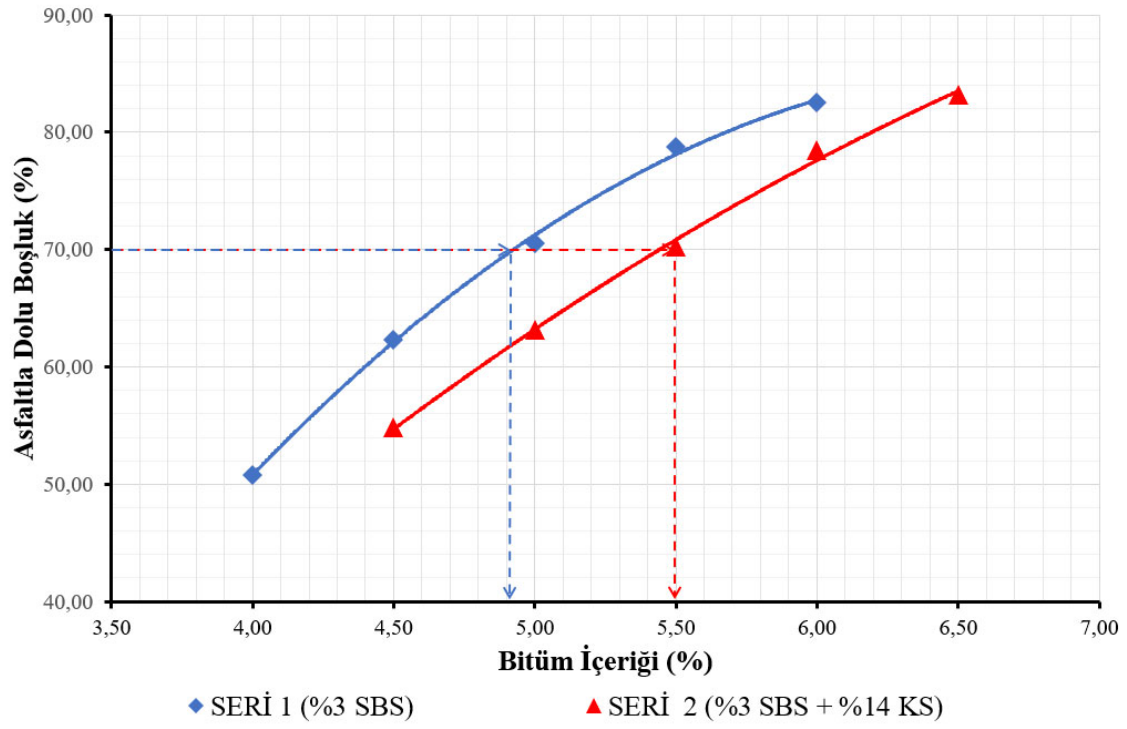
şekil değiştirme eğiliminin olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.19 VMA değerlerinin her 2 seri içinde şartname minimum koşulu olan %14 değerini sağladığı görülmüştür.



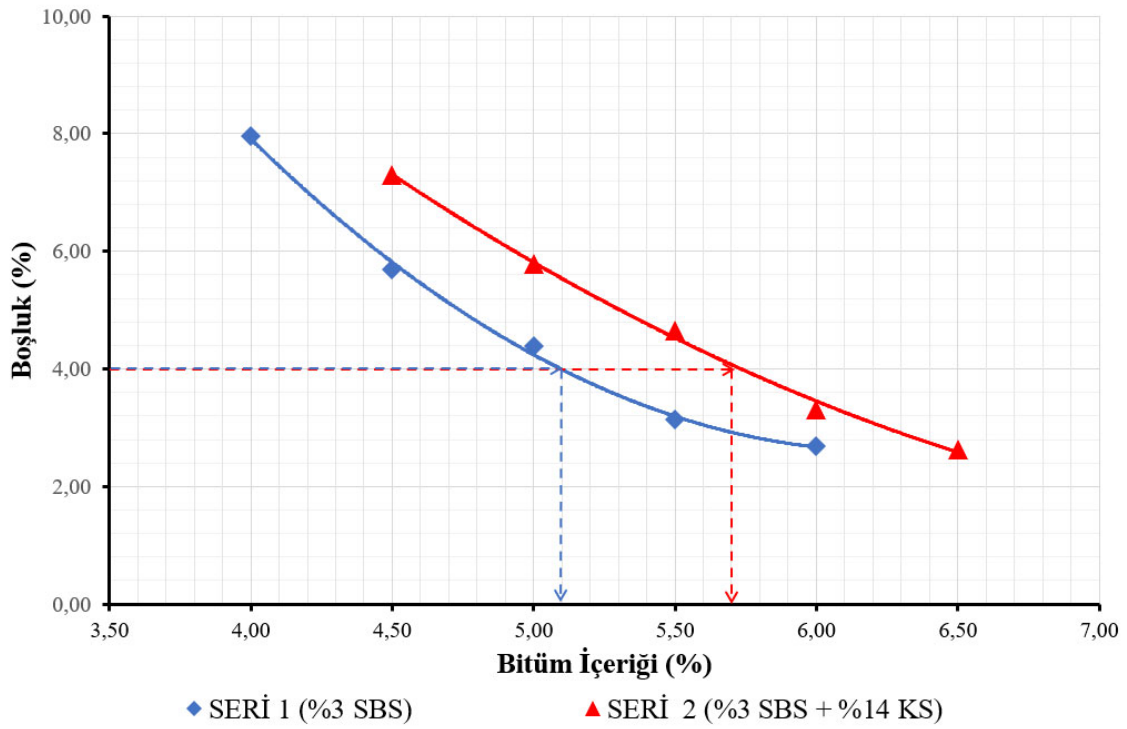
Şekil 4.14 Pratik Özgöl Ağırlık ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



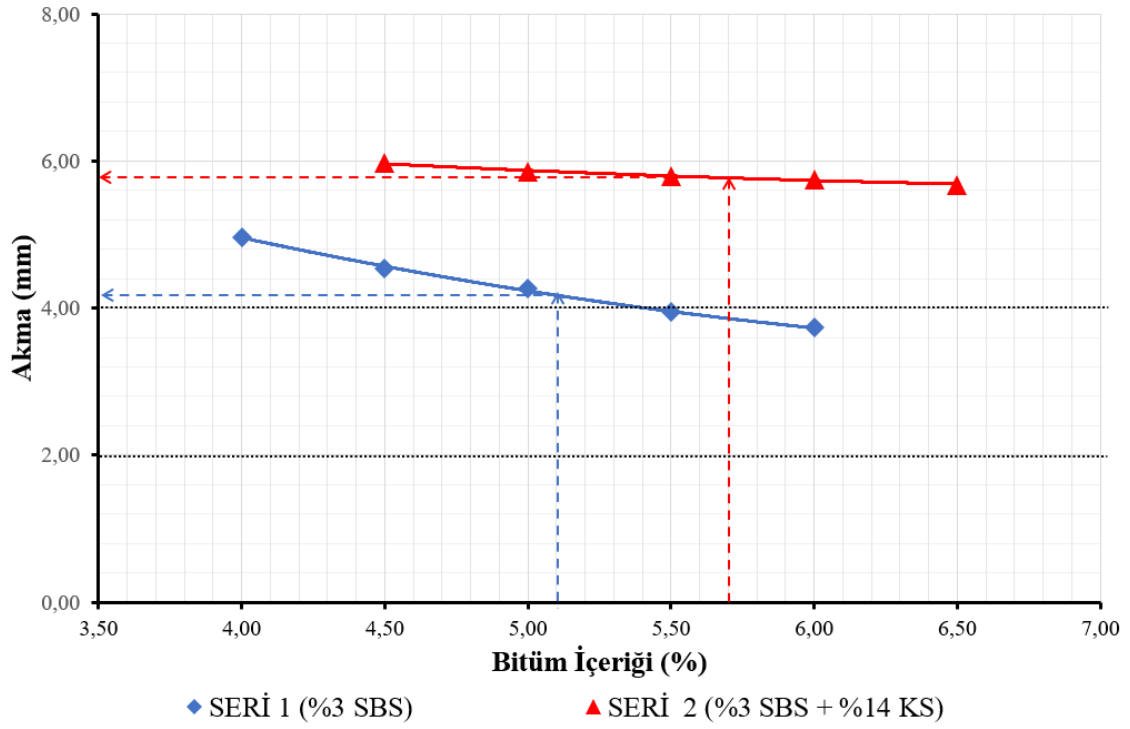
Şekil 4.15 Stabilite ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



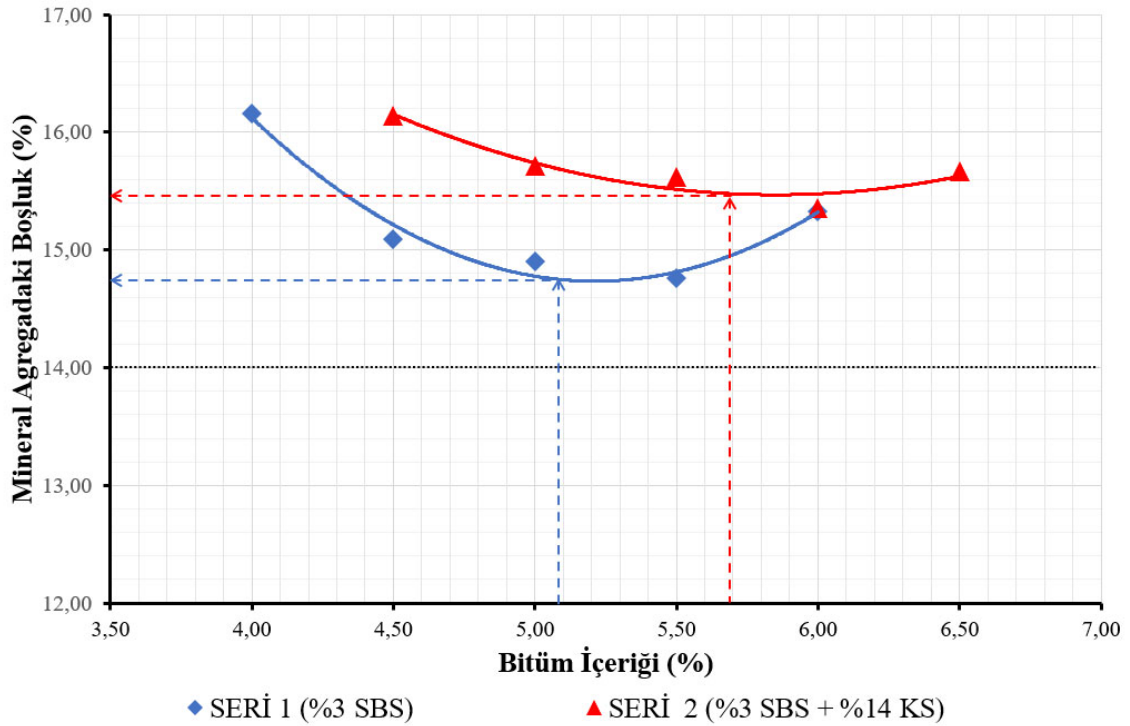
Şekil 4.16 Asfaltla dolu boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



Şekil 4.17 Boşluk oranı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

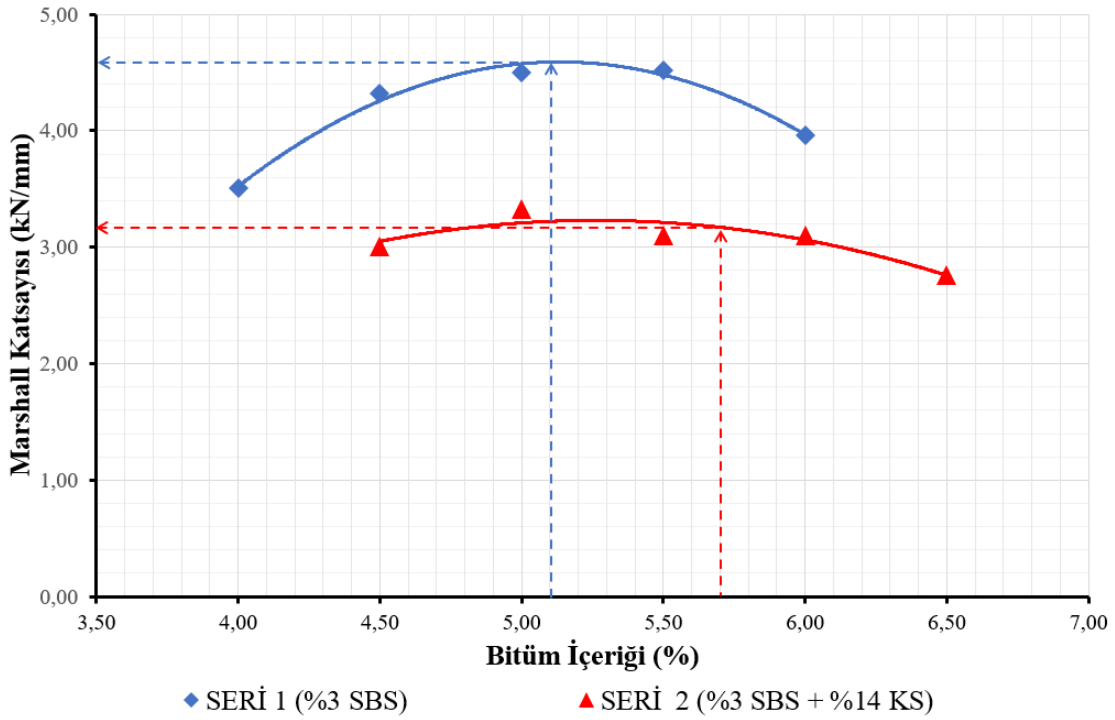


Şekil 4.18 Akma ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.



Şekil 4.19 VMA ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

Marshall stabilite değerinin akma değerine bölünmesi ile karışımın sertliğinin ve bitümlü sıcak karışımların deformasyona karşı direncinin bir göstergesi olan Marshall katsayısı (MQ) belirlenmektedir (Zoorob ve Suparma 2000, Çolak 2006, Yılmaz ve Kök 2008). Seri 1 ve Seri 2'nin Marshall katsayısı değerleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Seri 2'de Marshall katsayısı değerleri Seri 1'e göre azaldığı ve buna bağlı olarak Seri 2'deki kalıcı deformasyona karşı dayanımların Seri 1'e göre azaldığı belirlenmiştir.



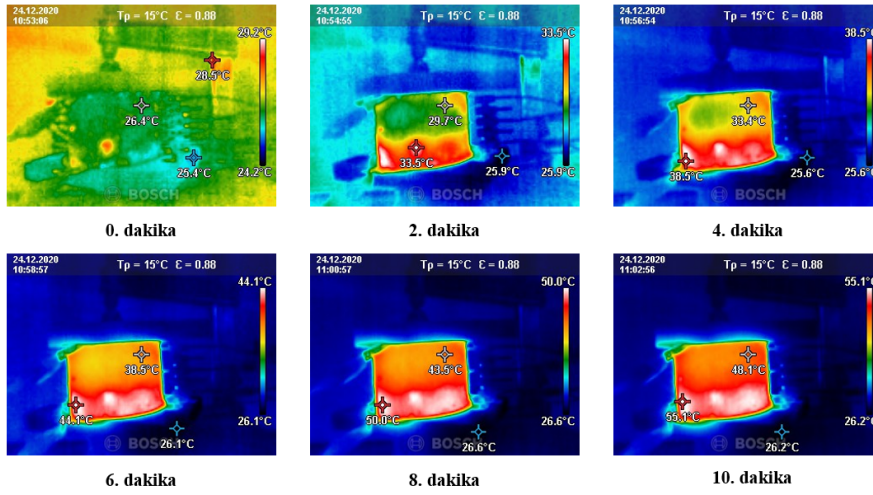
Şekil 4.20 Marshall katsayısı ile bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

4.5 Optimum Bitüm Oranlarında Üretilen İAB Numunelerinin Deney Sonuçları

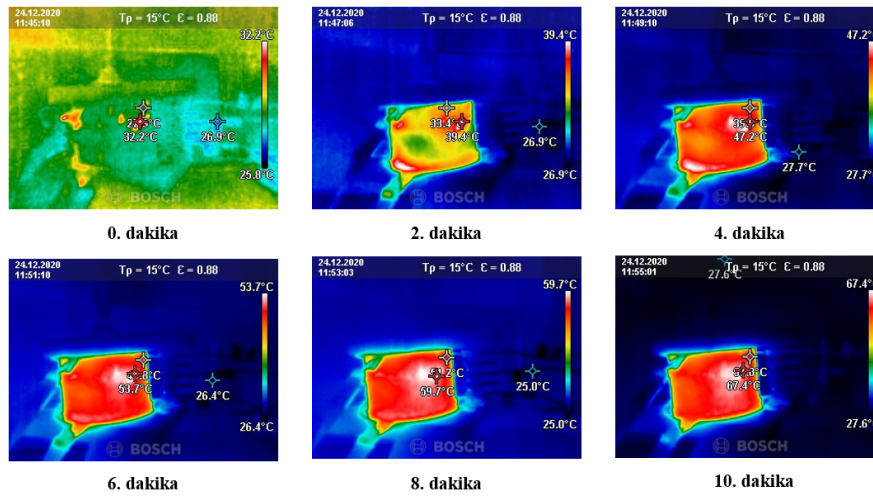
4.5.1 Isıl Dağılım Sonuçları

Optimum bitüm oranında üretilen %3 SBS modifiye bitüm katkılı İAB (seri 1) ve %3 SBS %14 KS modifiye bitüm katkılı İAB (seri 2) numuneleri 2 farklı elektrot bağlantısı (üst-alt yüzey ve karşılıklı yan yüzeyler) ile 10 dk boyunca sabit gerilim altında (20 V) elektriksel ısıtmaya maruz bırakılarak, yüzey sıcaklık değişimleri termal kamera ile gözlenmiştir. Termal kamera görüntü sonuçları Resim 4.1-4.4'de verilmiştir. Seri 1'de sıcaklığın tüm yüzeye yaklaşık eşit oranda dağılması 10 dakika sürerken, seri 2'de bu süre

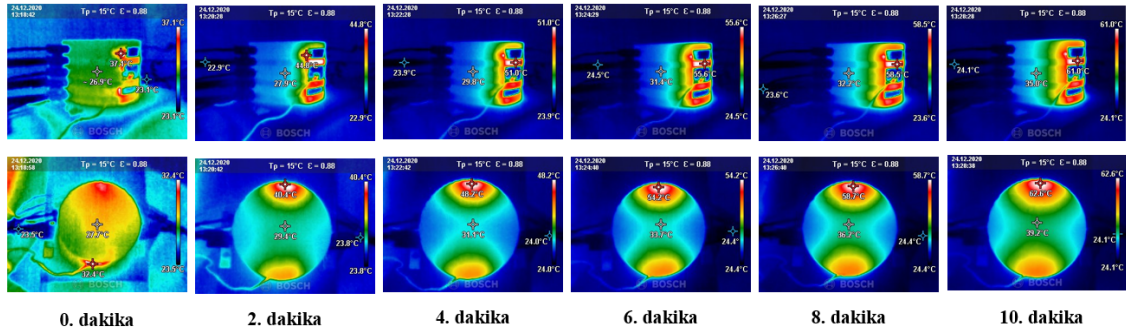
yaklaşık 4 dk olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan seri 2'nin sıcaklık dağılımı seri 1'e oranla daha homojen olduğu söylenebilir. Bu da karbon siyahı katkısının sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini göstermektedir. Seri 1 ve 2'de 10 dk boyunca ulaşılan maksimum sıcaklıklar sırasıyla 55,1 °C ve 67,4 °C'e olduğu gözlenmiştir. Böylelikle seri 2'nin ısınma potansiyelinin seri 1'e oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elektrot konumları karşılık yan yüzeylerde olduğu durumlar incelendiğinde, seri 2'deki elektrot çevresi ısı artışının yüksek olduğu ve bu değer deney sonunda maksimum 93,9 °C'e ulaştığı görülmüştür. Numune üst yüzeylerinden alınan termal görüntülerden, seri 2'deki ısı yayılım hızının seri 1'e göre daha hızlı olduğu görülmektedir.



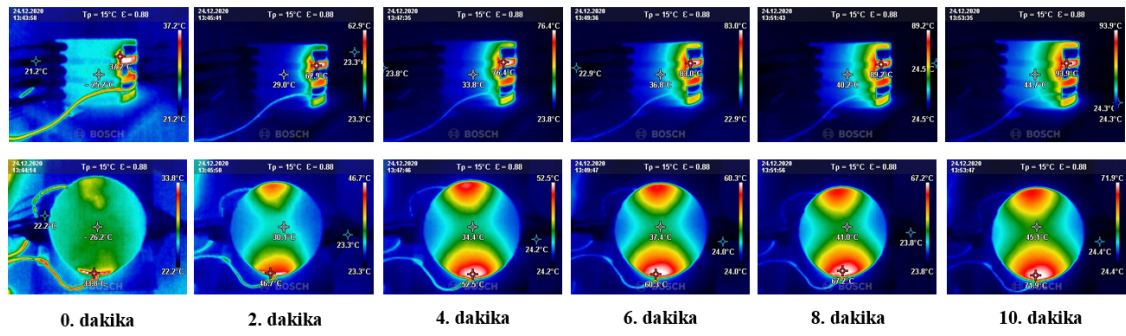
Resim 4.1 %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 1) termal kamera görüntüleri (Üst-Alt yüzey elektrot bağlantılı).



Resim 4.2 %3 SBS + %14 KS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 2) termal kamera görüntüleri (Üst-Alt yüzey elektrot bağlantılı).



Resim 4.3 %3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 1) termal kamera görüntüleri (Karşılıklı yan yüzey elektrot bağlantılı).

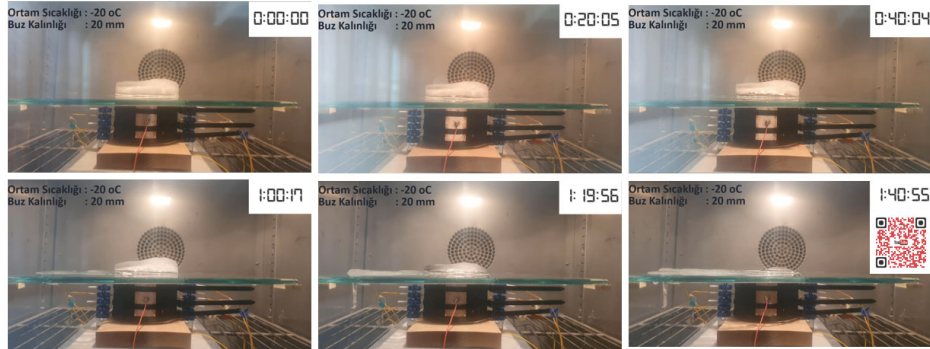


Resim 4.4 %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin (Seri 2) termal kamera görüntüleri (Karşılıklı yan yüzey elektrot bağlantılı).

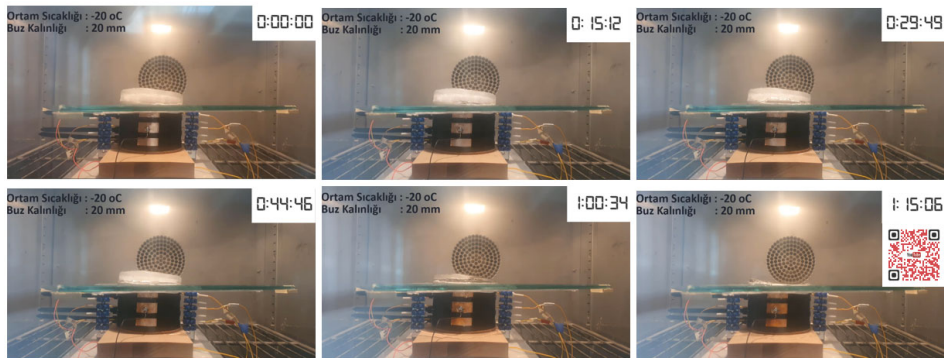
4.5.2 Buz Eritme Performansı Sonuçları

Optimum bitüm oranında üretilen %3SBS modifiye bitüm katkıli İAB (Seri 1) ve %3 SBS %14 KS modifiye bitüm katkıli İAB (Seri 2) numunelerinin yüzeyinde oluşturulan 20 mm kalınlığında buzun iklimlendirme kabini ile -20 °C ortam koşulları sağlanarak eritilmesi için 120 dakika boyunca sabit gerilim altında (20 volt) elektriksel ısıtmaya maruz bırakılmıştır. Erime süreci boyunca numune yüzeyinde bulunan buzun durumu kamera ile kayıt altına alınarak sonuçlar Resim 4.5 ve Resim 4.6'de gösterilmiştir. Aynı zamanda bu süreç boyunca yüzey sıcaklık durumları Şekil 4.21'de ve Şekil 4.22'de belirtilmiştir. Kayıt altına alınan videolardan buzun erimeye başladığı ve tamamen suya dönüştüğü durum gözlemlenerek sensör verileri ile karşılaştırılmıştır. Seri 1 ve Seri 2'deki buzun erimeye başlama süreleri sırasıyla 12. ve 8. dakika olduğu gözlemlenmiştir. Her 2 seride ortam koşullarına göre (yaklaşık -20 °C) yüzey sıcaklığı 10°C artış gösterdiği zaman buz erime sürecinin başladığı görülmüştür. Yüzey sıcaklığı sıfır dereceye ulaşma süreleri sırasıyla 22. ve 18. dakikadır. Seri 1 ve Seri 2'deki buzun tamamen suya dönüşme

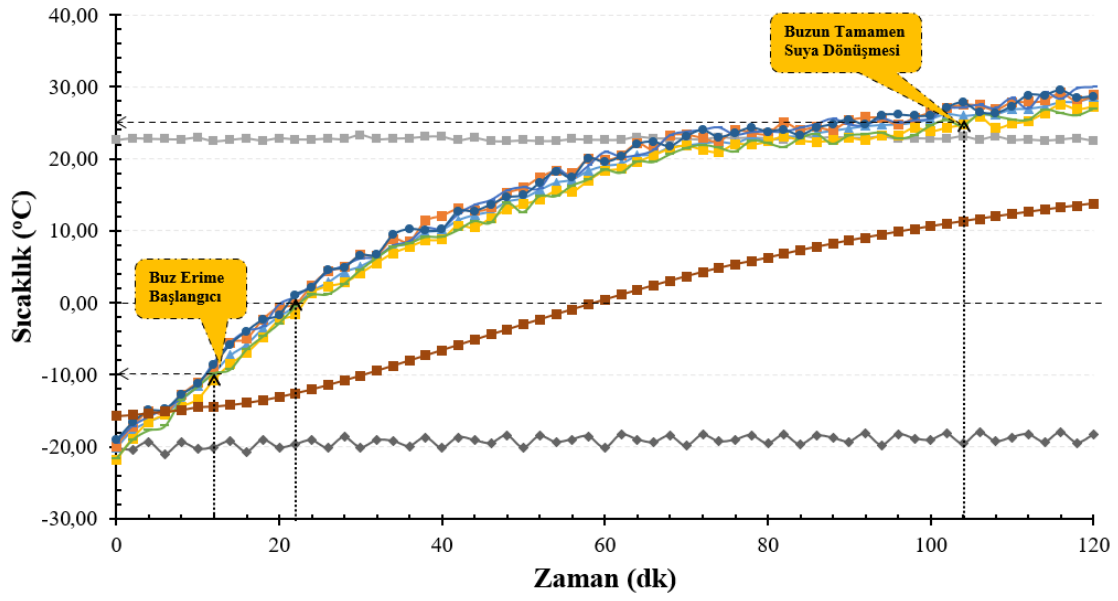
süreleri sırasıyla 104 ve 80 dakika olarak tespit edilmiştir. Buz eritme süresinde 24 dakika Seri 1'e göre tasarruf edilmiştir olup, buna göre buz eritme verimliliği yaklaşık %23,1 oranında artmıştır. Seri 1 ve Seri 2'nin ısınma hızları sırasıyla yaklaşık 0,43 °C /dk ve 0,56 °C/dk'dır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.13'den elde edilen sonuçlara göre farklı ortam sıcaklık koşullarının ısınma hızını etkilediği görülmüştür. Ortam sıcaklığı düştükçe ısınma hızının azaldığı belirlenmiştir. Seri 2 numunesinin iletkenlik açısından değerlendirildiğinde buzlanma önlemede hem performans (hızlı eritme) hem de ekonomiklik (daha düşük güç tüketimi) açıdan tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir. Her iki dizaynda da buzun suya tamamen döndüğü andaki yüzey sıcaklıklarının yaklaşık olarak aynı olduğu (25 °C) görülmüştür. Sensör verileri incelendiğinde, numune altına yerleştirilen yalıtım malzemesinin (ahşap) numune yüzey sıcaklığına göre daha düşük sıcaklık değeri gösterdiği ve bu durumun ısının buzlanmanın olduğu yöne (yukarıya) yönlendirmede başarılı olduğu belirlenmiş olup, bu sonuç enerji verimliliği sağlanması adına önem arz etmektedir.



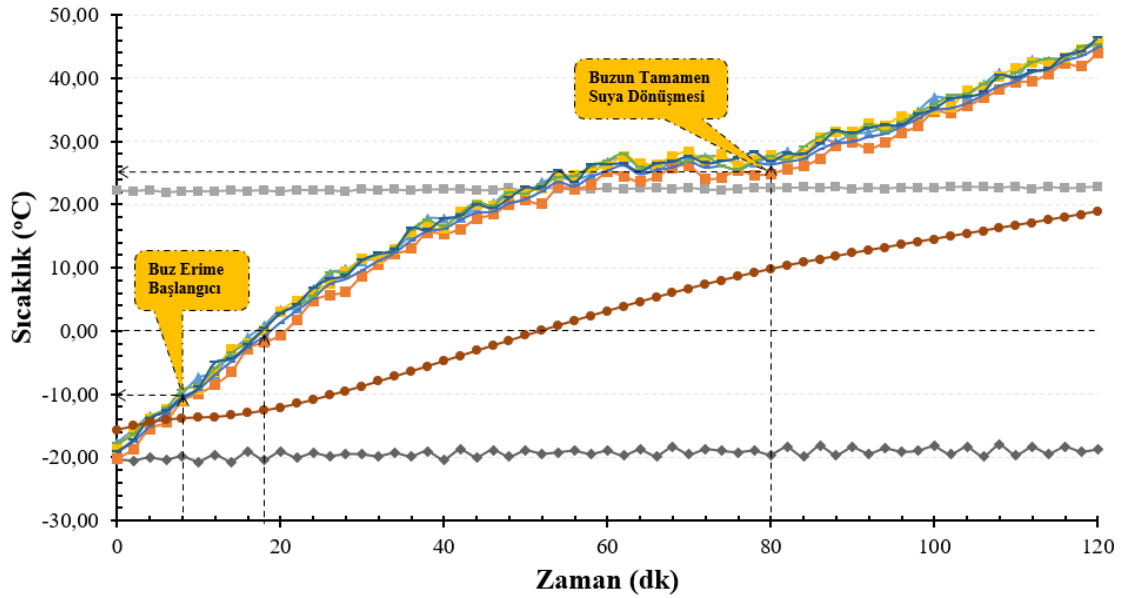
Resim 4.5 %3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri (QR kodu ile buz eritme videosunu izleyebilirsiniz.).



Resim 4.6 %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci görüntüleri (QR kodu ile buz eritme videosunu izleyebilirsiniz.).



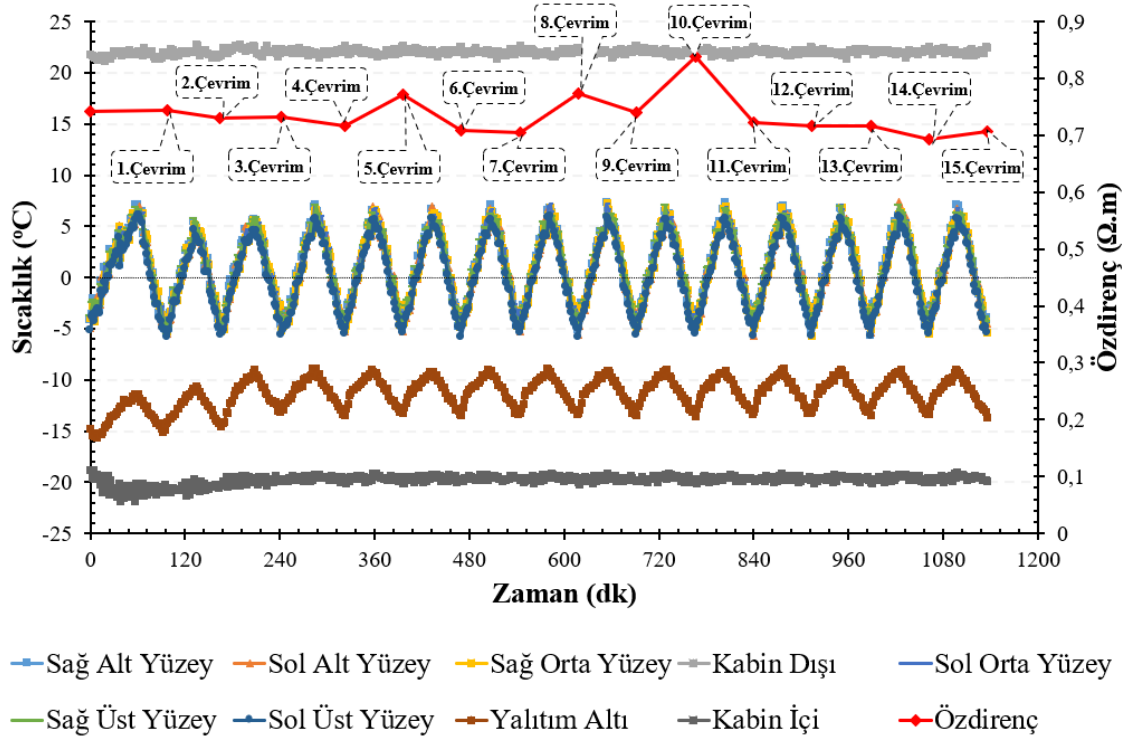
Şekil 4.21 %3 SBS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen sıcaklıklar.



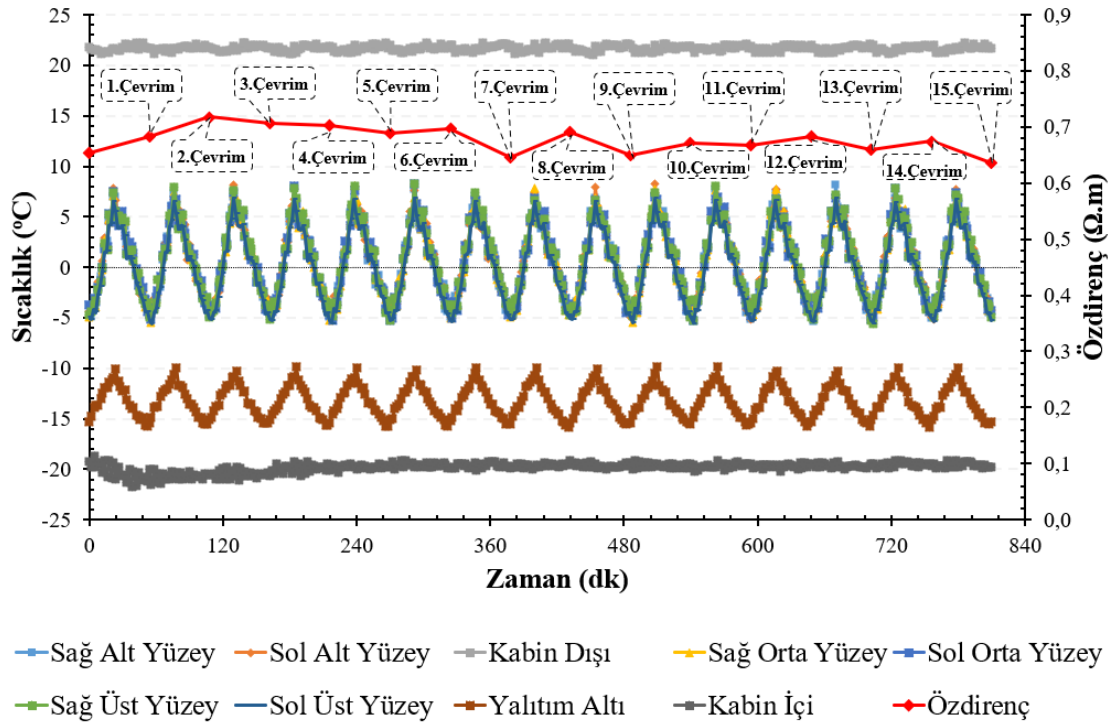
Şekil 4.22 %3 SBS + %14 KS katkıli modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin buz eritme süreci boyunca ölçülen sıcaklıklar.

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

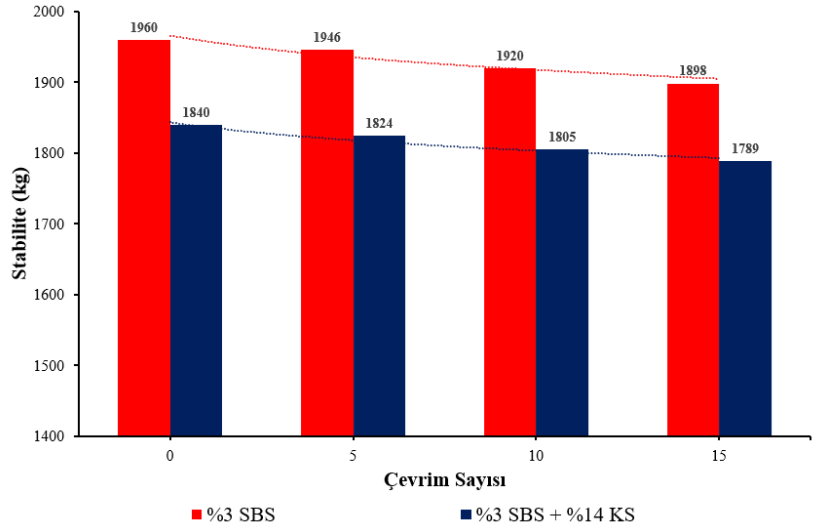
Optimum bitüm oranında üretilen %3 SBS modifiye bitüm katkılı İAB (Seri 1) ve %3 SBS %14 KS modifiye bitüm katkılı İAB (Seri 2) numunelerinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın özdirenç etkisi incelenmiş olup, sonuçlar Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te paylaşılmıştır. Seri 1'deki sonuçlar incelendiğinde 10. çevrim sonrası ani özdirenç değerinde artış gözlenmiştir. Çevrim sayısı 11'den fazlaysa, elektrik direnci ani bir artış göstermektedir. Her elektrikli ısıtma ve soğutma işlemi, numunede gerilme birikmesine neden olabilir. Gerilme elastik sınırını aştığında, elektriksel olarak iletken yol daha da tahrip olmakta ve bu da elektrik direncinde artışa neden olabilmektedir. Daha tekrar yeni iletken yolların bulunması ile özdirenç değerinde azalma meydana gelebilmektedir. Seri 1'in 15. çevrim sonrasındaki özdirenç değerini ilk duruma göre koruduğu görülmektedir. Seri 2'deki sonuçlar incelendiğinde ise çevrim boyunca özdirenç değişiminin daha stabil olduğu en son çevrim durumda ise özdirenç değerini koruduğu görülmüştür. 0-5-10-15 çevrimler sonrası Marshall Stabilite-Akma deneyleri yapılarak elektriksel ısıtma ve soğutmanın özdirenç etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Deney sonuçlarından, 15. çevrim sonunda her iki serinin stabilite değerlerinde yaklaşık %3 bir azalma meydana gelmiş olup, bu azalmanın kayda değer azalma olmadığı görülmüştür. Ayrıca stabilite değerleri şartname sınır koşullarını sağlamıştır.



Şekil 4.23 %3 SBS katkılı modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın özdirençe etkisi.



Şekil 4.24 %3 SBS + %14 KS modifiye bitüm ile üretilen İAB numunesinin elektriksel ısıtma ve soğutmanın özdirençe etkisi.

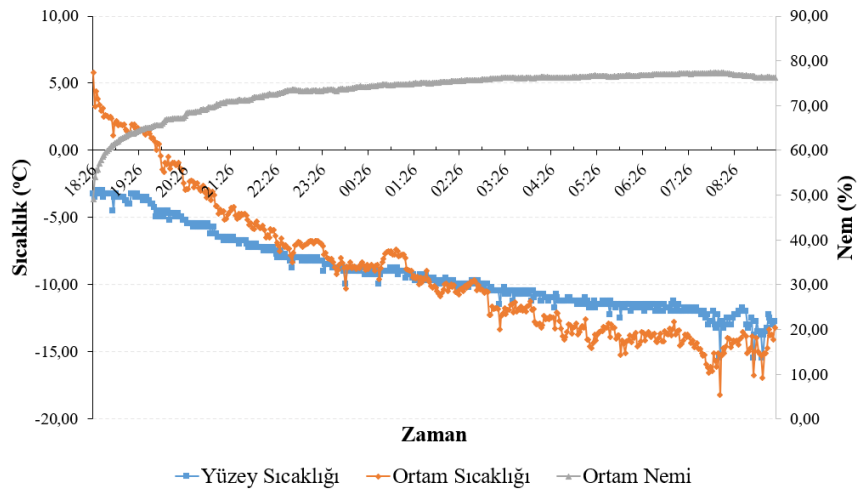


Şekil 4.25 Elektriksel ısıtma ve soğutmanın stabiliteye etkisi.

4.6 Akıllı Buzlanma Önleyici Sistem Deney Sonuçları

İAB numunesi buzlanmanın olduğu tarihte ortam sıcaklığı-nemi ve numune yüzey sıcaklık değişimlerinin ölçümü için dışarıya bırakılarak, akıllı sistemin ön deneme çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Yollarda buzlanmanın oluşum koşullarına ait bu tip veriler yapay zeka uygulamalarında işlenmesi ile ne zaman çalışıp ne zaman çalışmayacağı hakkında bir öngörüye sahip akıllı buzlanma önleyici sistemin geliştirilmesi sağlanacaktır.

24.12.2020 - 25.12.2020 Tarihleri Arasında Ölçülen Veriler



Şekil 4.26 Akıllı buzlanma önleyici sistem ön deneme çalışma sonuçları.

4.7 Maliyet Analizi

Bu aşamada çalışmada Seri 1 ve Seri 2 İAB numunelerinde kullanılan malzemelerin birim fiyat analizi yapılmış olup, geleneksel asfalt betonu birim fiyatı ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.3). Çizelge 4.3'te göre iletken asfalt beton malzemesinin maliyeti, geleneksel asfalt betonunun yaklaşık iki katıdır. Bu önemli fark çoğunlukla, geleneksel asfaltta yaygın olarak kullanılan diğer malzemelerle (örn. agrega ve bağlayıcı) karşılaştırıldığında nispeten pahalı olan iletken asfalt betonunda KL kullanımıyla ilgilidir. İşlenmemiş KL'lerin dahil edilmesiyle ilişkili maliyeti azaltmak için, geri dönüştürülmüş KL'ler kullanılabilir. Örneğin, uçaklardan elde edilen KL'ler ömürlerinin sonuna gelindiğinde geri dönüştürülebilir. Ayrıca, akıllı kaplama uygulamaları için seri üretime geçildiğinde KL'nin fiyatı önemli ölçüde düşebilir (Arabzadeh vd. 2019).

Çizelge 4.3 Maliyet analizi.

Bileşenler	Geleneksel Asfalt Betonu Miktarı (kg/ton)	İletken Asfalt Betonu Miktarı (kg/ton)		Birim Fiyatı (₺/ton)	Geleneksel Asfalt Betonu Fiyatı (₺/ton)	İletken Asfalt Betonu Fiyatı (₺/ton)	
		Seri 1	Seri 2			Seri 1	Seri 2
İri Agrega	365	365	365	21,00	7,67	7,67	7,67
İnce Agrega	575	575	575	21,00	12,08	12,08	12,08
Bitüm	60	61,2	68,4	3.068,00	184,08	187,76	209,85
Stiren							
Bütadien	0	1,84	2,05	14.000,00	0	25,76	28,7
Stadien							
Karbon Lifi	0	3	3	50.000,00	0	150	150
Karbon Siyahı	0	0	9,58	2.800,00	0	0	26,82
Toplam ton başına maliyet					203,83	383,27	435,12

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında, servis ömrü boyunca yoğun elektriksel ısıtma-soğutma etkisine maruz kalacak İAB'nin, sıcaklığa karşı hassasiyetinin azaltılması ve fiziki dayanımının şartname sınırları içerisinde kalması için SBS modifiyeli İAB üretilmiştir. İAB'nin iletkenlik özelliklerinin artırılması için birden fazla iletken katkı türü kullanılmıştır. Aynı zamanda İAB'nin AUS ile entegrasyonunun sağlanması hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- %3 SBS (Seri 1) ve %3 SBS+%14 KS (Seri 2) katkılı seriler için optimum bitüm oranları %5,10 ve 5,70 olarak bulunmuş ve bu oranların ekonomik sınırlar içerisinde yer aldığı görülmüştür.
- Seri 1 ve Seri 2'de stabilite değerleri, KTŞ tip 2 aşınma tabakası şartname sınır değerlerini sağlamışlardır. Seri 2'nin Seri 1'e göre düşük stabilite değeri vermesi karbon siyahı katkılı bitümün İAB'nin mekanik özelliklerini belli bir ölçüde olumsuz etkilediğini göstermiştir.
- Her iki serinin iletkenlik değerlerinin Pan vd. (2015) çalışmalarında belirttiği 10 Ω .m'nin çok altında değerler elde edilmiştir. Bu değerlerin literatürde görülmüş en küçük özdirenç değerleri olduğu anlaşılmıştır.
- Perkolasyon teorisine göre iletken bileşen sayısı arttığında iletkenlik değerlerinin daha da geliştiği görülmüştür. Bu durum sabit elektrik gerilimi altında sıcaklık değişimlerinde de kendini göstermiş, karbon siyahı katkılı bitümlerle üretilen numunelerde daha düşük özdirenç ve daha yüksek sıcaklık değişimleri görülmüştür. Deneysel sonuçlardan, İAB üretiminde birden fazla iletken katkı türünün kullanımının tek tip katkı türü kullanımına göre elektriksel iletkenlik açısından avantaja sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca bağlayıcı fazının da karışım iletkenliğine katkıda bulunabileceği ilk kez bu tez çalışması ile teyit edilmiştir.
- Termal kamera ile ısı dağılım durumu sonuçlarına bakıldığında karbon siyahının İAB'nin ısı dağılımını iyileştirdiği görülmüştür.
- Benzer şekilde aynı buz kütesinin erime süreleri karbon siyahı katkılı bitümlerle üretilen seride daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Aynı zamanda İAB'nin

elektriksel iletkenlik özellikleri gelişmesiyle daha az güç tüketimi ve İAB sistemi altına yerleştirilen yalıtım malzemesi ile kullanılan enerjinin daha verimli yönetilmesi sağlanmıştır.

- Elektriksel ısıtma-soğutma çevrimi sonucu Seri 1 numunesinde onuncu çevrim sonrası ani öz direnç artışı gözlenmiştir. Bu durumun sebebinin çevrim boyunca biriken gerilmenin elastik sınırı aşması durumunda iletken yolların tahrip olduğu düşünülmektedir. Seri 2 numunesinde ise iletkenlik açısından daha stabil bir durum gözlenmiştir. Her iki seride en son çevrim durumdaki iletkenlik değerlerini korunduğu görülmüştür. Onbeşinci çevrim sonunda her iki serinin stabilite değerlerinde yaklaşık %3 bir azalma meydana gelmiş olup, bu azalmanın kayda değer azalma olmadığı görülmüştür. Son durumdaki stabilite değerleri şartname sınırlarının oldukça üzerindedir. Böylelikle geliştirilen mekanik özellikler ile beraber İAB kaplamaların uzun servis ömrüne sahip olacağı ve daha az bakım-onarım gerektireceği düşünülmektedir.
- Bu sistemler için kendi kendine ne zaman devreye girip çalışacağına karar veren bir AUS mimarisi oluşturulmuş bu sayede buzlanmanın daha başlamadan önlenmesi hedefi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasıyla bu tip sistemlerin birebir ölçekte uygulanabilirliği ile ilgili önemli bir adım atılmıştır.
- İletken asfalt betondan yapılmış ısıtılmış kaplamalar için standart bir maliyet değeri yoktur, çünkü bu tip ısıtılmalı kaplama sisteminin birebir ölçekli yapımı ve yaygın kullanımı henüz gerçekleştirilememiştir. Elektriksel olarak iletken asfalt betonundan yapılmış ısıtılmalı bir kaplama sisteminin birebir ölçekli gösterimi, bu çalışmanın bir sonraki aşaması olarak düşünülmektedir.
- Karbon siyahının iletkenlik açısından olumlu etkisinden dolayı, karbon lifinin daha az miktarda karışıma katılarak Seri 1’de elde edilen iletkenlik değerlerine ulaşabileceği öngörülmektedir.
- Farklı elektrot bağlantı şekilleri ile geniş ölçekteki numunelerin buz eritme performansı açısından değerlendirilmesi yapılabilir.

- Sahada üretimi ve serilmesi sırasında ortaya çıkabilecek hataların üstesinden gelmek için kullanılacak karbon lifi miktarının biraz daha yüksek olarak karışıma katılması tavsiye edilmektedir.
- Bu tip kaplama sistemleri karayollarında buzlanmanın çoğunlukla görüldüğü köprü, viyadük, tünel gibi yol kesimlerinde uygulanabileceği gibi aynı zamanda ülkemiz savunması açısından önem arz eden soğuk iklime sahip sınır bölgelerindeki askeri havaalanlarında da uygulanarak hava savunma araçlarının her türlü iklim koşullarında güvenle kalkış ve iniş yapması sağlanmış olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Abtahi S M, Sheikhzadeh M, Hejazi S M, 2010, Fiber Reinforced Asphalt Concrete a Review, *Construction and Building Materials*, 24, 871-877.
- Ahmedzade P, Yılmaz M, Yılmaz M, 2007, Kar ve Buz ile Mücadele Etmek Amacıyla Geliştirilen Daha Etkili ve Ekonomik Yeni Yöntemler, 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül, İstanbul, 186-195.
- Ahmedzade P, Sengoz B, 2009, Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete, *Journal of Hazardous Materials*, 165, 300-305.
- Akbulut H, Gürer C, Yıldız A, Atılğan G L, 2018, Karayollarında Buzlanma Önleyici Sistem Olarak Jeotermal Enerjinin Kullanımı, IV. Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Sempozyumu ve Sergisi, 21-24 Şubat, Afyonkarahisar.
- Akin M, Huang J, Shi X, Veneziano D, Williams D, 2013, Snow Removal at Extreme Temperatures, Report No: 99085/CR11-04, 78p.
- Anonim, 2012, Minnesota Snow and Ice Control: Field Handbook for Snowplow Operators Second Revision, Minnesota Local Road Research Board (LRRB), Minnesota, USA.
- Apeageyi A K, 2011, Laboratory Evaluation of Antioxidants for Asphalt Binders, *Construction and Building Materials*, 25, 47-53.
- Arabzadeh A, Ceylan H, Kim S, Gopalakrishnan K, Sassani A, 2016, Superhydrophobic Coatings on Asphalt Concrete Surfaces Toward Smart Solutions for Winter Pavement Maintenance, *Transportation Research Board*, 2551, 10-17.
- Arabzadeh A, 2018, Nano-Engineered Heated Pavements, Iowa State University, Civil Engineering, Ph.DThesis, 166p, Iowa.
- 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.

- Arshad A K, Samsudin M S, Ahmad J, Masri K A, 2016, Microstructure of Nanosilica Modified Binder by Atomic Force Microscopy, *Jurnal Teknologi*, 78.
- Asi I M, 2007, Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mixes, *Building and Environment*, 42, 325-329.
- ASTM C127-01, 2001, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128-01, 2001, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C131-01, 2001, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5-06e1, 2006, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D36-06, 2006, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D70-03, 2003, Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4402-06, 2006, Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 1559-89, 1992, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barthlott W, Neinhuis C, 1997, Purity of the Sacred Lotus or Escape from Contamination in Biological Surfaces, *Planta*, 202, 1-8.

- Blaney L, 2007, Magnetite (Fe_3O_4): Properties, Synthesis, and Applications, *Lehigh Review*, 15, 33-81.
- Chai C, Cheng Y, Zhang Y, Zhu B, Liu H, 2020, Mechanical Properties of Crumb Rubber and Basalt Fiber Composite Modified Porous Asphalt Concrete with Steel Slag as Aggregate, *Polymers*, 12, 2552.
- Chen F, Balieu R, 2020, A State-of-the-Art Review of Intrinsic and Enhanced Electrical Properties of Asphalt Materials: Theories, Analyses and Applications, *Materials Design*, 109067.
- Chu Z, Seeger S, 2014, Superamphiphobic Surfaces, *Chemical Society Reviews*, 43, 2784-2798.
- Chung D D L, 2012, Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, 215p, Boston.
- Cong P, Xu P, Chen S, 2014, Effects of Carbon Black on the Anti Aging, Rheological and Conductive Properties of SBS/Asphalt/Carbon Black Composites, *Construction and Building Materials*, 52, 306-313.
- Çolak K M, 2006, Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Trabzon.
- Derwin D, Booth P, Zaleski P, Marsey W, Flood W, 2003, Snowfree® Heated Pavement System to Eliminate Icy Runways, Report No: 0148-7191, 9p.
- Feng P, Wang H, Ding H, Xiao J, Hassan M, 2020, Effects of Surface Texture and Its Mineral Composition on Interfacial Behavior between Asphalt Binder and Coarse Aggregate, *Construction Building Materials*, 262, 120869.
- Feng X, Jiang L, 2006, Design and Creation of Superwetting/Antiwetting Surfaces, *Advanced Materials*, 18, 3063-3078.
- Gao Q, Huang Y, Li M, Liu Y, Yan Y, 2010, Experimental Study of Slab Solar Collection on the Hydronic System of Road, *Solar Energy*, 84, 2096-2102.
- García A, Norambuena-Contreras J, Partl M N, Schuetz P, 2013, Uniformity and Mechanical Properties of Dense Asphalt Concrete with Steel Wool Fibers, *Construction Building Materials*, 43, 107-117.

- 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, 3175-3181.
- García Á, Schlangen E, van de Ven M, van Vliet D, 2011, Induction Heating of Mastic Containing Conductive Fibers and Fillers, *Materials and Structures*, 44, 499-508.
- García Á, 2012, Self-Healing of Open Cracks in Asphalt Mastic, *Fuel*, 93, 264-272.
- Guo N, Leu M C, 2012, Effect of Different Graphite Materials on the Electrical Conductivity and Flexural Strength of Bipolar Plates Fabricated Using Selective Laser Sintering, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 3558-3566.
- Gürer C, Düşmez C, 2015, Köprülerde İletken Kaplamalarla Buzlanmayla Mücadele Yöntemleri, 3. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 8-10 Mayıs, Bursa.
- Gürer C, Akbulut H, 2017, Buzlanma ile Mücadelede Yeni Bir Teknoloji: Elektriksel İletken Asfalt Betonları, 7. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 29-30 Kasım, Ankara.
- Gürer C, Akbulut H, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019a, Anti-Icing Methods for Highways and Airfield's Pavements, Third Mediterranean International Congress On Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.
- Gürer C, Düşmez C, 2019, Köprü ve Viyadük Kaplamalarında Buzlanma ile Mücadele için Kullanılabilecek İletken Asfalt Betonu Dizaynı, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 1-2 Kasım Ankara.
- Gürer C, Elmacı A, 2019, Karbon Siyahı Katkılı Bitümlerin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması, *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 1, 65-74.
- Gürer C, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019b, Investigation the Effect of Gradation Change on Electrically Conductivity in Conductive Asphalt Mixtures, Third Mediterranean International Congress on Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.
- Gürer C, Akbulut H, Boğa A R, 2020, Elektriksel İletken Bitümlü Bağlayıcı Özelliklerinin Araştırılması Rapor No: 17.KARİYER.206, 52s.

- Gürgöze H, 2017, Karbon Lif İlaveli Bitümlü Sıcak Karışımların Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110s, Afyon.
- Han B, Xun Y, Jinping O, 2014, Self-Sensing Concrete in Smart Structures, Han B, Xun Y, Jinping O (Ed.), Chapter 2 - Compositions of Self-Sensing Concrete, (13-43), Butterworth-Heinemann, 398p, Oxford.
- Hansen G L, 2016, Reuse of Aqueous Waste Streams for Transportation-Related Applications, South Dakota State University, Civil Engineering, M.Sc. Thesis, 87p, South Dakota.
- Harrison R J, Dunin-Borkowski R E, Putnis A, 2002, Direct Imaging of Nanoscale Magnetic Interactions in Minerals, Proceedings of the National Academy of Sciences, 99, 16556-16561.
- 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.
- Hunter R N, Self A, Read J, Hobson E, 2015, The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition ed. (789p), ICE Publishing London.
- Jiao W, Sha A, Liu Z, Jiang W, Hu L, Li X, 2020a, Utilization of Steel Slags to Produce Thermal Conductive Asphalt Concretes for Snow Melting Pavements, Journal of Cleaner Production, 121197.
- Jiao W, Sha A, Liu Z, Li W, Jiang W, Qin W vd.Hu Y, 2020b, Study on Thermal Properties of Steel Slag Asphalt Concrete for Snow-Melting Pavement, Journal of Cleaner Production, 277, 123574.
- Kadioğlu M, Köse A, Tunç M, 2011, Karayollarında Buzlanmayı 3 Saat Öncesine Kadar Haber Verebilen Buzlanma Erken Uyarı Sistemleri (BEUS), 5th Atmospheric Science Symposium, 27-29 April Istanbul, TURKEY, 505-511.
- Kahl S C, 2002, Agricultural by-Products for Anti-Icing and Deicing Use in Michigan, Report No: R1418, 65p.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013. Ankara, Karayolları Genel Müdürlüğü.

- Ketcham S A, Minsk L D, Blackburn R R, Fleege E J, 1996, Manual of Practice for An Effective Anti-Icing Program: A Guide for Highway Winter Maintenance Personnel, Report No: FHWA-RD-95-202, 70p.
- Kibar A, 2016, Süperhidrofobik ve Hidrofobik Yüzeyler Üzerinde Sıvı Damlası Gaz Kabarcığı ve Sıvı Jeti Dinamiğinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22, 613-619.
- Kwok N, Hahn H T, 2007, Resistance Heating for Self-Healing Composites, Journal of Composite Materials, 41, 1635-1654.
- Lai J, Qiu J, Chen J, Fan H, Wang K, 2015, New Technology and Experimental Study on Snow-Melting Heated Pavement System in Tunnel Portal, Advances in Materials Science Engineering, 2015, 1-11.
- Le Guern M, Chailleux E, Farcas F, Dreessen S, Mabile I, 2010, Physico-Chemical Analysis of Five Hard Bitumens: Identification of Chemical Species and Molecular Organization Before and After Artificial Aging, Fuel, 89, 3330-3339.
- Lee S J, Rust J P, Hamouda H, Kim Y R, Borden R H, 2005, Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete, Textile Research Journal, 75, 123-128.
- Levelton Consultants, 2007, Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts, Report No: NCHRP REPORT 577, 211p.
- Liu Q, Schlangen E, García Á, van de Ven M, 2010, Induction Heating of Electrically Conductive Porous Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 24, 1207-1213.
- Liu Q, García Á, Schlangen E, van de Ven M, 2011, Induction Healing of Asphalt Mastic and Porous Asphalt Concrete, Construction and Building Materials, 25, 3746-3752.
- Liu Q, Schlangen E, Van De Ven M, 2012, Induction Healing of Porous Asphalt, Transportation Research Record, 2305, 95-101.

- Liu X, Wu S, Ye Q, Qiu J, Li B, 2008, Properties Evaluation of Asphalt-Based Composites with Graphite and Mine Powders, *Construction and Building Materials*, 22, 121-126.
- Liu X, Wu S, 2011, Study on the Graphite and Carbon fiber Modified Asphalt Concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 1807-1811.
- Mahrez A, Karim M, Katman H, 2003, Prospect of Using Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 794-807.
- Mallick R B, El-Korchi T, 2017, *Pavement Engineering: Principles and Practice*, 3rd ed., CRC Press, 775p, Boca Raton.
- McLeod N W, 1989, Relationship of Paving Asphalt Temperature Susceptibility as Measured by PVN to Paving Asphalt Specifications, *Asphalt Paving Mixture Design and Asphalt Pavement Performance*, Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 410-489.
- Minsk L D, 1968, Electrically Conductive Asphalt for Control of Snow and Ice Accumulation, *Highway Research Record*, 57-63.
- Mokhtari A, Nejad F M, 2013, Comparative Study on Performance of Wax-Modified and Typical SMA Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 419-427.
- Monsere C M, Bertini R L, Bosa P G, 2006, Comparison of Identification and Ranking Methodologies for Speed-Related Crash Locations, Report No: FHWA-OR-RD-06-14, 110p.
- Morrison G R, Lee J K, Hesp S A, 1994, Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification, *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 231-240.
- Motz H, Geiseler J, 2001, Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources, *Waste Management*, 21, 285-293.
- Nixon W A, 2001, Use of Abrasives in Winter Maintenance at the County Level, *Transportation Research Record*, 1741, 42-46.
- Nixon W A, Williams A D, 2001, A Guide for Selecting Anti-Icing Chemicals Version 1, Report No: 420, 25p.

- Notani M A, Arabzadeh A, Ceylan H, Kim S, Gopalakrishnan K, 2019, Effect of Carbon-Fiber Properties on Volumetrics and Ohmic Heating of Electrically Conductive Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31, 04019200.
- Ollivier H, 1907, Recherches Sur La Capillarité, *J. Phys. Theor. Appl.*, 6, 757-782.
- Osborne T L, Hutcheson W R, 1989, Asphalt Compounds and Method for Asphalt Reconditioning Using Microwave Radiation. U.S Patent No: 4,849,020. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Pan P, Wu S, Xiao Y, Wang P, Liu X, 2014, Influence of Graphite on the Thermal Characteristics and Anti-Ageing Properties of Asphalt Binder, *Construction and Building Materials*, 68, 220-226.
- 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 Structures*, 26, 755-769.
- Pan P, Wu S, Hu X, Wang P, Liu Q, 2017, Effect of Freezing-Thawing and Ageing on Thermal Characteristics and Mechanical Properties of Conductive Asphalt Concrete, *Construction and Building Materials*, 140, 239-247.
- Park P, Rew Y, Baranikumar A, 2014, Controlling Conductivity of Asphalt Concrete with Graphite, Report No: SWUTC/14/600451-00025-1, 106p.
- Pike G, Seager C, 1974, Percolation and Conductivity: A Computer Study. I, *Physical Review B*, 10, 1421.
- Proctor D, Fehling K, Shay E, Wittenborn J, Green J, Avent C, Bigham R, Connolly M, Lee B vd.Shepker T, 2000, Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxygen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags, *Environmental Science & Technology*, 34, 1576-1582.
- Sandler J, Kirk J, Kinloch I, Shaffer M, Windle A, 2003, Ultra-Low Electrical Percolation Threshold in Carbon-Nanotube-Epoxy Composites, *Polymer*, 44, 5893-5899.
- Sengoz B, Isikyakar G, 2008, Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, *Construction and Building Materials*, 22, 1897-1905.

- Serin S, Morova N, Saltan M, Terzi S, 2012, Investigation of Usability of Steel Fibers in Asphalt Concrete Mixtures, *Construction and Building Materials*, 36, 238-244.
- 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-Mater. Sci. Ed.*, 17, 69-72.
- Sönmez İ, Yıldız K, Ateş Ş, Kaya M, 2018, İstanbul Metropolitan Alanda Kışla Mücadele Yönetiminin Maliyet Analizi: 2015-2017 Yılları Karşılaştırması, Gökbnar A R, Ercan C, Yıldırım Y T (Ed.), *Yerelden Globale Stratejik Araştırmalar IV*, (23-38), IJOPEC Publication, 280, 279s, London.
- Tong G, Wu W, Hua Q, Miao Y, Guan J, Qian H, 2011, Enhanced Electromagnetic Characteristics of Carbon Nanotubes/Carbonyl Iron Powders Complex Absorbers in 2–18 GHz Ranges, *Journal of Alloys Compounds*, 509, 451-456.
- Vaa T, Sivertesen Å, 2008, Winter operations in view of Vision Zero, The 4th National Conference on Surface Transportation Weather, June 16–19, Indiana, 16-26.
- Wang C, Fan Z, Shu C, Han X, 2020a, Preparation and Performance of Conductive Tack Coat on Asphalt Pavement, *Construction and Building Materials*, 251, 118949.
- Wang C, Fu H, Ma W, Zhang Z, Ji X, Han X, 2020b, Combination Design and Performance Evaluation of Conductive Bonding Layer for Asphalt Pavement Active Deicing, *Construction and Building Materials*, 263, 121037.
- Wang C, Liu L, Yuan H, Luo S, Han X, 2020c, Fabrication and Heat Conduction Performance Investigation of a Heat Insulation Conductive Bonding Layer for Asphalt Pavements, *Construction and Building Materials*, 253, 119191.
- Wang H, Yang J, Liao H, Chen X, 2016, Electrical and Mechanical Properties of Asphalt Concrete Containing Conductive Fibers and Fillers, *Construction and Building Materials*, 122, 184-190.
- Wang K, Nelsen D E, Nixon W A, 2006, Damaging Effects of Deicing Chemicals on Concrete Materials, *Cement and Concrete Composites*, 28, 173-188.
- Weber M, Kamal M R, 1997, Estimation of the Volume Resistivity of Electrically Conductive Composites, *Polymer Composites*, 18, 711-725.

- Wen S, Chung D, 2004, Effects of Carbon Black on the Thermal, Mechanical and Electrical Properties of Pitch-Matrix Composites, *Carbon*, 42, 2393-2397.
- Wu S, Mo L, Shui Z, Chen Z, 2005, Investigation of the Conductivity of Asphalt Concrete Containing Conductive Fillers, *Carbon*, 43, 1358-1363.
- Wu S, Xue Y, Ye Q, Chen Y, 2007, Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures, *Building and Environment*, 42, 2580-2585.
- 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, 871-879.
- Wu S P, Mo L, Shui Z, 2003, Piezoresistivity of Graphite Modified Asphalt-Based Composites, *Key Engineering Materials*, 249, 391-396.
- Xue Y, Wu S, Hou H, Zha J, 2006, Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture, *Journal of Hazardous Materials*, 138, 261-268.
- Yılmaz M, Kök B V, 2008, Stiren-Butidien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemlerine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesine ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23, 811-819.
- Young T J, 2016, Development of Durable Superhydrophobic Materials for Ice- and Snow-Free Airport Concrete Pavements, Iowa State University, Mechanical Engineering, M.Sc. Thesis, 66p, Iowa.
- Zaumanis M, Mallick R B, Frank R, 2013, Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *Transportation Research Record*, 2370, 17-25.
- Zhang D-C, Zhang Z-h, Yuan J, Yuan T, Li K, Chen Y, 2015, Experimental Research on Deicing System by Heating Cables for Highway Bridges, *Journal of Safety Science Technology*, 11, 90-95.

Zhang J, Das D K, Peterson R, 2009, Selection of Effective and Efficient Snow Removal and Ice Control Technologies for Cold-Region Bridges, Journal of Civil Environmental Architectural Engineering, 3, 1-14.

Zhu X, Yu Y, Li F, 2019, A Review on Thermoelectric Energy Harvesting from Asphalt Pavement: Configuration Performance and Future, Construction and Building Materials, 228, 116818.

Zoorob S, Suparma L, 2000, Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), Cement Concrete Composites, 22, 233-242.

Zube E, 1956, Wire Mesh Reinforcement in Bituminous Resurfacing, Highway Research Board, 131, 1-18.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.atmos.washington.edu/~cliff/Roadway2.htm>, 27.12.2020
- 2- <https://hgm.uab.gov.tr/uploads/pages/akilli-ulasim-sistemler-aus/aus.pdf>, 03.06.2020
- 3- <https://yolbakim.ibb.istanbul/erken-uyari-sistemi-beus/>, 08.09.2019
- 4- <https://akom.ibb.istanbul/calismalar/Sayfalar/35/Hazirlik-Planlama>, 08.09.2019
- 5- <https://asbury.com/>, 24.05.2020
- 6- <https://dal.aku.edu.tr/2016/02/29/xrf-cihazı/>, 26.12.2020
- 7- <https://tuam.aku.edu.tr/minerolojik-analiz/>, 26.12.2020
- 8- <https://devreyakan.com/seri-haberlesme-protokolleri/>, 27.12.2020

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak Enis KORKMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırşehir / 1992
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 544 502 19 92 / enis.krkmz@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Isparta Gazi Sosyal Bilimler Lisesi, (2006-2010)
Lisans : Selçuk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
(2011-2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
(2018-2021)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü (2018-devam ediyor)

Yayımları (SCI ve diğer) :

Gürer C, Akbulut H, Yarcı Ş, Korkmaz B E, Kaçaroğlu G, 2018, Türkiye'de Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Kullanım Alanlarının Değerlendirilmesi. 4. Karayolu Ulusal Kongresi ve Sergisi, 28-29 Kasım, Ankara, 25-41.
Gürer C, Korkmaz B E, Yarcı Ş, Rahmany M B, 2019, Sıcak Agregası ile Sathi Kaplama Uygulamasının Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 401-409.
Akbulut H, Gürer C, Yarcı Ş, Korkmaz B E, 2019, Bulanık Mantık Yöntemi ile Sinyalize Kavşaklarda Trafik Işığı Süresi Belirlenmesi, Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology, 1, 41-56.

- Gürer C, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019, Investigation the Effect of Gradation Change on Electrically Conductivity in Conductive Asphalt Mixtures, Third Mediterranean International Congress on Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.
- Gürer C, Akbulut H, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019, Anti-Icing Methods for Highways and Airfield's Pavements, Third Mediterranean International Congress On Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.
- Gürer C, Korkmaz B E, Rahmany M B, 2019, Isıtılmış Agrega Kullanımının Sathi Kaplamalarda Adezyon Özelliklerine Olan Etkisinin Araştırılması, International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology (ICIVILTECH 2019), 23-25 October, Afyonkarahisar.