

**ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİ
OLAN ASFALT BETONU GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cihan DÜŞMEZ

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİ OLAN ASFALT BETONU
GELİŞTİRİLMESİ

Cihan DÜŞMEZ

Danışman
Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Cihan DÜŞMEZ tarafından hazırlanan “ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİ OLAN ASFALT BETONU GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28 / 01 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Cahit GÜRER

Başkan : Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,


İmza

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


İmza

Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi


İmza

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

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

- 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.

28/01/2019

İmza
Cihan DÜŞMEZ

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖZELLİĞİ OLAN ASFALT BETONU
GELİŞTİRİLMESİ

Cihan DÜŞMEZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

Eski zamanlardan bu yana karayolu ulaşımında yaşanan en önemli problemlerin başında buzlanma ve kar birikmesi nedeniyle yolların kapanması gelmektedir. Buzlanmayla mücadelede, pasif (geleneksel) ve aktif (yeni teknoloji) yöntemler olmak üzere iki farklı yaklaşım mevcuttur. Buzlanmayı önlemede, aktif yöntemlerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Geleneksel yöntemlerin birçok olumsuz yönü bulunmaktadır. Bu tip olumsuzlukları gidermenin en etkili yolu, kar yağışı olmadan önce akıllı sistemlerle devreye giren, sürdürülebilir ve çevre dostu buzlanma ile mücadele yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Bu tez çalışması kapsamında, yol yüzeylerinde kar birikmesi ve buzlanmayı önlemek için, elektriksel iletkenlik özelliğine sahip iletken Asphalt Betonu (İAB) geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geleneksel asfalt betonları içeriği itibari ile yalıtkan bir özellik göstermektedir fakat, asfalt betonu, karışım içerisine ilave edilen bazı iletken maddelerle elektriksel iletken malzeme haline dönüştürülebilir. Şayet kaplamadan elektrik akımı geçirilirse kaplama bir direnç gibi davranacağından, kaplamada sıcaklık artışı meydana gelir ve bu suretle yol yüzeyinde buzlanmanın oluşması, akıllı teknolojilerle birlikte kullanılarak, daha oluşmadan engellenebilir.

Bu çalışmada, elektrik iletkenliğine sahip olan en verimli asfalt karışım kombinasyonunun belirlenmesi ve dizaynının yapılması amaçlanmış ve iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 25 farklı agrega ve iletken bileşen içeriğine sahip asfalt betonu (İAB) numuneleri üretilmiş ve bunlar üzerinde yapılan özdirenç, sabit (30 volt DC) elektrik gerilimi altında sıcaklık artışı ve sabit ısı kaynağı karşısında ölçülen numune sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Bu deneylerin sonucunda seçilen kireç taşı agregalı karbon tozu filler ve karbon lifi ilavesinden oluşan 2.1 ,kireç taşı agregalı karbon tozu filler, karbon lifi ve metal tozu ilavesinden oluşan 4.1 ve ince agregası kireç taşı iri agregası bazalt, karbon tozu filler ve karbon lifi metal tozu ilavesinden oluşan 4.3 serileri için Marshall dizayn deneyleri yapılarak optimum bitüm yüzdeleri, Marshall stabilite - akma özellikleri tespit edilmiş ayrıca bitüm yüzdesine bağlı olarak elektriksel iletkenliğin nasıl değiştiği saptanmıştır. Çalışma sonucunda elektriksel iletkenlik özelliği oldukça yüksek, aynı zamanda çevre dostu ve mühendislik özellikleri TCK şartnamesine (2013) uygun olan aşınma tabakası asfalt numuneleri geliştirilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen İAB'nin buzlanma önleyici sistem olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

2019, xiii + 86 sayfa

Anahtar Kelimeler: İletken asfalt betonu (İAB), kaplama ısıtma sistemleri, buzlanma önleyici sistemler, elektriksel iletkenlik, iletken asfalt betonu dizaynı.

ABSTRACT
M.Sc.Thesis

DEVELOPING ELECTRICALLY CONDUCTIVE ASPHALT CONCRETE

Cihan DÜŞMEZ

Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Since early times, the most important problems in road transport have been the closure of roads due to icing and snow accumulation. There are two different approaches to anti-icing: passive (traditional) and active (new technology) methods. The use of active methods to prevent icing is increasing day by day. Traditional methods have many negative aspects. The most effective way to eliminate such problems is to use sustainable and environmentally friendly anti-icing methods that are activated by intelligent systems before snowfall.

Within the scope of this thesis work, it is aimed to develop conductive Asphalt Concrete (CAC) with electrical conductivity to prevent snow accumulation and icing on road surfaces. Conventional asphalt concrete has an insulating property due to its content, but asphalt concrete can be converted into an electrically conductive material with some conductive materials added to the mixture. If an electrical current is passed from the pavement, due to pavement behaves as a resistance, the temperature increases in the pavement, and thus the formation of icing on the road surface can be prevented the system is by using together with intelligent technologies.

In this thesis, it was aimed to determine and design the asphalt mix combination which has the most efficient electrical conductivity, and a two-stage study was performed. In

the first stage, CAC specimens with 25 different aggregate and conductive component contents were produced and the resistivity on them, temperature increase under constant (30 volt DC) electrical voltage and specimen temperature changes measured against constant heat source were determined. As a result of these experiments, Marshall design experiments were performed for selected series (2.1, 4.1 and 4.3) and optimum bitumen percentages, Marshall stability - flow properties were determined and how electrical conductivity changed according to bitumen percentage was determined. As a result of the study, asphalt samples were developed which are very high in electrical conductivity, also have environmentally friendly and the engineering properties meet to TCK specifications (2013). It was concluded that the CAC specimens can be used as an anti-icing system.

2019, xiii + 86 page

Keywords: Conductive asphalt concrete (CAC), pavement heating systems, anti-icing systems, electrically conductivity, design of conductive asphalt concrete.

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmamda bilgi ve birikimi ile bana yol gösteren, butezinoluşmasında yaptığı yardım ve katkılarından dolayı tez danışmanım ve ailemden ayrı görmediğim destekçim Doç. Dr. Cahit GÜRER'e,

Tez çalışmamda 15.MÜH.14 numaralı proje ile desteklerini esirgemeyen Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAPK) birimine, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen lisans öğrencileri Kadir DÜZGÜN ve Dilan KARADENİZ'e, Afyonkarahisar Belediyesi Asfalt Şantiyesi laboratuvar çalışanlarına, yoğun çalışma zamanlarına rağmen eğitimim için bana zaman tanıyarak destek olan Afyonkarahisar Belediyesi Yapım Birim Sorumlusu İnş.Y.Müh. Onur SADIOĞLU'na ve yükümü hafifleten mesai arkadaşım İnş. Müh. Onur SÜRÜÇ ve tüm birim çalışanlarına, büyük desteklerinden ve saatlerce süren çeviri ödevlerinden dolayı Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT'a,

Malzeme temini hususunda; İzmir Demir Çelik San.A.Ş, Özer Konveyör Band, Turizm Sanayii ve Ticaret A.Ş, ve DowAksa İleri Kompozit Malzemeler San. Ltd. Şti ye ve yardımlarından dolayı Afyonkarahisar Belediyesi Asfalt Üretim tesislerine,

Eğitim hayatım boyunca bu günlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi destek olan annem ve babama, yoğun zamanlarda ve anlayışı sebebi ile eşim Ayşegül'e, hayatımın neşesi biricik kızım Zeynep'e ve bana bir şeyler öğreten, varlıkları ile hayatıma dokunan gülümsememi sağlamış tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Cihan DÜŞMEZ
Afyonkarahisar, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	7
2.1 Karayollarında Buzlanma ile Mücadelede Kullanılan Yöntemler.....	7
2.1.1 Buzlanma ile Mücadelede Pasif Yöntemler.....	8
2.1.1.1 Kimyasal Yöntemler	8
2.1.1.1 Fiziksel Yöntemler.....	10
2.2 Buzlanma ile Mücadelede Aktif Yöntemler	11
2.2.1 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemler	12
2.2.2 Elektriksel İletkenlik Özelliği Olan Asfalt Kaplamalar (İAB)	12
2.2.3 İletken Isıtma Kablolarıyla Buzlanmanın Önlenmesi.....	14
2.2.4 Hidronik (Jeotermal) Buzlanma Önleyici Sistemler.....	15
2.3 Elektriksel İletkenlik ve Perkolasyon Teorisi.....	17
2.3.1 Elektriksel İletkenlik.....	17
2.3.2 Perkolasyon Teorisi	19
2.4 Konu İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar	22
3. MATERYAL VE METOT.....	43
3.1 Materyal.....	43
3.2 Metot.....	44
3.2.1 X Işını Difraktometre (XRD) Analizi	45
3.2.2 X Işını Floresans (XRF) Yöntemiyle Elementel Bileşim Tayini.....	45
3.2.3 Farklı bileşenlere sahip İAB numuneler üzerinde en iyi iletkenlik özelliği olan numunelerin ön deneylerle belirlenmesi	46

3.2.4 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Numunelerinin Üretilmesi.....	48
3.2.5 Sıcak Karışım Asfalt Numunelerinin Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi.....	51
3.2.5.1 Asfalt Numunelerinde İki Prob Yöntemiyle Özdirenç Ölçümleri	51
3.2.5.2 Asfalt Numunelerinde Sabit DC Gerilim Altında Sıcaklık Değişimlerinin Belirlenmesi	52
3.2.5.3 İndüksiyon Isınması ile Numunelerin Sıcaklıklarında Meydana Gelen Değişimlerin Ölçülmesi.....	53
3.2.6 Marshall Yöntemiyle Asfalt Karışım Dizaynı	55
4. BULGULAR	57
4.1 Agrega Deneyi Sonuçları.....	57
4.2 Kimyasal Analiz Sonuçları	58
4.3 XRD Analizi Sonuçları.....	58
4.4 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Özdirenç Deneyi Sonuçları	60
4.5 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Elektrik Akımı ile Isınma Deneyi Sonuçları.....	62
4.6 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Oda Sıcaklığına Soğuma Deneyi Sonuçları	62
4.7 İndüksiyon Isınması ile Numunelerin Sıcaklıklarında Meydana Gelen Değişimler ..	63
4.8 En İyi Elektriksel İletkenlik Özelliği Gösteren İAB Serilerinin Belirlenmesi	64
4.9 İAB Numunelerin Marshall Dizaynı Sonuçları	65
4.10 En İyi İletkenlik Özelliği Gösteren Serilerin Marshall Dizayn Numunelerinde Özdirenç Ölçümü Sonuçları.....	72
4.11 En İyi İletkenlik Özelliği Gösteren Serilerin Marshall Dizayn Numunelerinde Elektrik Gerilimi ile Isınma Deneyi Sonuçları.....	73
4.12 Maliyet analizi	75
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
6. KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	86

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad Derece
cm	Santimetre
cP	Santipoise
dk	Dakika
gr	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
KN	Kilonewton
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
MPa	Mega Paskal
Pa	Pascal
m	metre
Ω	Ohm
ρ	Elektriksel Özdirenç
L	Numunenin Yüksekliği
R	Direnç
S	Elektrot İletken Alanı
I	Akım
V	Gerilim
Mm	Mikron metre
δ	Faz Açısı

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
AC	Asfalt Betonu
AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASC	Asfalt Güneş Kollektörü
ASTM	Amerika Deney ve Malzeme Kurumu
B50/70	Bitüm Penetrasyon Sınıfı
BEÇ	Batch Tipi Asfalt Plenti
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
cB	İri Agregası Bazalt
cÇC	İri Agregası Çelikhane Curufu
cfB	İri- İnce İri Agregası Bazalt
cKT	İri Agregası Kireç Taşı
ÇL	Çelik lifi
DC	Doğru Akım

Kısaltmalar (Devamı)

E	Dinamik Modülü
ECON	Elektriksel İleten Beton
EİAM	Elektriksel İletken Asfalt Mastiği
FEM	Sonlu Eleman Yöntemi
Gef	Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı
Gb	Bitüm Özgül Ağırlığı
Gsb	Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı
GT	Grafit tozu
İÇD	İndirekt Çekme Dayanımı
İAB	İletken Asfalt Betonu
KL	Karbon Lifi
MT	Metal Tozu
R	Ohm Olarak Ölçülen Direnç
ODOT	Ohio Eyaleti Karayolları İdaresi
TMA	Taş Mastik Asfalt
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi
SPT	Superpave Performans Test Cihazı
V	Briketin Hacmi-Volt
Vh	Briketin Boşluk Seviyesi
Vf	Briketteki asfaltla dolu boşluk yüzdesi
VMA	Agregalar arası boşluk yüzdesi
Wa	Agrega Ağırlığınca Bitüm Yüzdesi
Wb	Toplam karışıma göre bitüm yüzdesi
XRF	Işın Kırılım Analizi
XRD	Işın Florans Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Donlu günlerin uzun yıllar ortalamasına ait yersel dağılımı.....	5
Şekil 1.2 2013 Yılı KGM Bölge Md.leri kar mücadelesi birim maliyetleri	5
Şekil 2.1 Karayollarında buzlanma ile mücadele yöntemleri.....	7
Şekil 2.2 Geleneksel asfalt betonu ve İAB bileşenleri arasındaki farklar	14
Şekil 2.3 Bir hidronik (jeotermal) buzlanma önleyici sistemin yapısı	15
Şekil 2.4 Jeotermal ısı pompası tekniği	16
Şekil 2.5 SERSO Hidronik (Jeotermal) sistemi.	17
Şekil 2.6 Katılarda şematik enerji bantları.	18
Şekil 2.7 Elektriksel iletkenlikle ilgili perkolasyon model imajı	20
Şekil 2.8 Perkolasyon teorisi ve karıştırılmış iletken bileşenlerle iletken ağ oluşumu ..	21
Şekil 2.9 Kare bir örgüde bondperkolasyonu gelişiminin temsili	22
Şekil 2.10 Snowfree® (elektriksel iletken asfalt kaplama sistemi) ve karın eritilmesi... 23	
Şekil 2.11 Toplam iletken katkı içeriği ve hacim direnci değişimi grafiği	27
Şekil 2.12 Asfalt betonunun elektriksel özdirencini değiştirmek için strateji.....	35
Şekil 2.13 KL içeren tek fazlı ve iki fazlı numunelerdeki elektriksel özdirenç ilişkisi .	40
Şekil 2.14 Değişken iletken bileşen içeriğine bağlı olarak, sıcaklıktaki 20 °C azalma nedeniyle hacim özdirencindeki yüzde değişim ilişkisi	40
Şekil 2.15 % 1 KL ile modifiye edilen EİAM numunelerinin tekrarlanan deneyler sonrasındaki ısı oluşumunu ölçen sıcaklık grafiği.....	41
Şekil 3.1 İAB Karışımlarda kullanılan agrega ve iletken bileşenler.	43
Şekil 3.2 Tez yöntemi akış şeması.	45
Şekil 3.3 Direnç-özdirenç İlişkisi.....	52
Şekil 3.4 İndüksiyonla ısınma sonunda infrared termometre ile ölçüm yapılan numune noktaları.	54
Şekil 3.5 Isıl iletkenliğin yüksek oluşu kaplama üzerindeki karın erimesine etkisi.	55
Şekil 4.1 Kireçtaşı agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.	59
Şekil 4.2 Bazalt agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu	59
Şekil 4.3 Çelikhane cürufu agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.	60
Şekil 4.4 Farklı İAB kombinasyonu numuneler üzerinde özdirenç deneyi sonuçları....	60
Şekil 4.5 30 Volt DC gerilimi altında numunelerin sıcaklık artışları.....	62

Şekil 4.6 Numunelerin soğuma süreleri.	63
Şekil 4.7 Numunelerin indüksiyon ışıması ile ön yüzlerinde meydana gelen sıcaklık artışları.	64
Şekil 4.8 Numunelerin indüksiyon ışıması ile arka yüzlerinde meydana gelen sıcaklık artışları	64
Şekil 4.9 Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar..	66
Şekil 4.10 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar	67
Şekil 4.11 Seri 4.2 Marshall numunelerinde yapılan özdirenç ölçümü sonuçları.	68
Şekil 4.12 Seri 2.1 Marshall numunelerinde farklı bitüm %'ne karşılık sıcaklık artışı değişimleri	69
Şekil 4.13 Seri 4.1 Marshall numunelerinde farklı bitüm %'ne karşılık sıcaklık artışı değişimleri	70
Şekil 4.14 Seri 4.1 Marshall numunelerinde farklı bitüm %'ne karşılık sıcaklık artışı değişimleri	71
Şekil 4.15 Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.	71
Şekil 4.16 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar	72
Şekil 4.17 Bitümlü dolu boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi	72
Şekil 4.18 Boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi	73
Şekil 4.19 Akma değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.	74
Şekil 4.20 Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.	74
Şekil 4.21 Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Aktif yöntemlerin maliyet açısından karşılaştırılması	8
Çizelge 2.2 Kar ve buzlanma önleyici kimyasalların bazı özellikleri ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri.	9
Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan bitüm özellikleri	44
Çizelge 3.2 Çalışmada kullanılan karbon liflerin mühendislik özellikleri	44
Çizelge 3.3 BSK Aşınma Tabakası Tip 3 Gradasyonları	46
Çizelge 3.4 Agregada fraksiyon cinsine ve İAB bileşenlerine göre üretilmiş numuneler .	47
Çizelge 4.1 Agregada deneyi sonuçları.....	57
Çizelge 4.2 Kullanılan agregada ve iletken bileşenlerin kimyasal analiz sonuçları	58
Çizelge 4.3 2.1, 4.1, 4.3 serilerine ait İAB numunelerin ve geleneksel BSK'nın maliyet analizleri	75

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 1.1 Geçmişten günümüze kar ve buz ile mücadele.....	1
Resim 1.2 Kar ve buzlanma açısından kritik yol kesimleri	3
Resim 2.1 Buzlanma ile mücadelede pasif yöntemler.	11
Resim 2.2 FreezeFree® otomatik solüsyon püskürtme sistemleri.....	12
Resim 2.3 Esenboğa - Ankara yolundaki kablolu buzlanma önleyici sistem.	15
Resim 2.4 İAB tomografi görüntüleri.	28
Resim 2.5 Deney düzeneği.....	39
Resim 3.1 Karışım için yıkanıp elenen kireçtaşı ve bazalt agrega numuneleri	47
Resim 3.2 Marshall dizaynına göre numunelerin deney hazırlığı.....	48
Resim 3.3 1200 gr'lık karışımların tartılması, kalıp ve karışımların etüvde ısıtılması..	49
Resim 3.4 Isıtıcı mekanik asfalt karıştırıcısı ve bir karıştırma işlemi.....	50
Resim 3.5 Üretilen iletken asfalt betonu numuneleri.....	50
Resim 3.6 Marshall deney numunelerini hazırlamada kullanılan otomatik tokmak ve sıcak karışım asfalt numuneleri	50
Resim 3.7 İki prob yöntemi ile İAB numunelerinde öz direnç ölçümü	51
Resim 3.8 Termal kamera ile numunelerdeki sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi	53
Resim 3.9 Marshall stabilite-akma deney cihazı.....	56
Resim 4.1 Akım kontrol deneyi.	61

1. GİRİŞ

Günümüzde insan nüfusunun artması, buna bağlı olarak artan iş yükü seyahat taleplerinin de artmasına neden olmuş bu da günümüz insanların tüm dünyada daha güvenli, hızlı, konforlu, kesintisiz ve ekonomik ulaşım sistemlerine olan ihtiyacın da giderek artmasına sebep olmuştur.

Özellikle kış aylarında, soğuk bölgelerdeki karayolu ve havaalanı kaplamaları üzerinde meydana gelen kar yağışı ve buzlanmalar üstyapılarda bozulmalara yol açtığı gibi aynı zamanda uçuş iptallerine, yol kapanmalarına, trafik akımının durmasına veya yavaşlamasına neden olmakta ve trafik seyir güvenliğini tehlikeye düşürerek büyük maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır (Ağar ve Kutluhan 2005, Gürer ve Düşmez 2015). Motorlu taşıtlar hayatımıza girmeden önceki zamanlarda da kar ve buzla mücadele karayolu ulaşımındaki en önemli sorunlardan biri olma özelliğini daima korumuştur (Resim 1.1).



Resim 1.1 Geçmişten günümüze kar ve buz ile mücadele (Gürer 2014).

Türkiye, coğrafi konumu itibari ile çok farklı iklim tiplerinin görüldüğü bir ülkedir. Üç tarafının denizlerle çevrili olması, dağların uzanışı ve yeryüzü şekillerinin farklılık göstermesi, değişik iklimlerin görülmesinin en önemli nedenleri arasında sayılabilir. Genel olarak Türkiye’de karasal iklimin daha yaygın görüldüğü söylenebilir. Bu iklim; İç, Doğu ve Güneydoğu Anadolu, İç Ege bölgeleri ile Trakya'nın iç kısmında hüküm sürmektedir. Karasal iklimin görüldüğü Doğu Anadolu Bölgemizde ülkemizdeki en düşük sıcaklık değerleri (-46 °C) ile karşılaşılır. Hava koşullarının kış mevsimlerinde bu kadar kötü olması sebebiyle, karasal iklimin görüldüğü yerlerde karayollarında buzlanma, gizli buzlanma, kar birikmesi, çığ oluşumu, tipi vb. çeşitli sorunlarla

karşılaşılır (Varış 2007, Gürer 2014). Kışın, dağlık yüksek bölgelerdeki yollarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri yağın karla birlikte yolların kapanmasıdır. Türkiye’de yollar normal olarak yağın kardan ziyade rüzgâr ile taşınan karın yarmalarda birikmesinden etkilenmektedir (Gürer 2018).

Ülkemizdeki trafik kazalarında yol kusurlarının oranı %0.62 oranında olmasına rağmen, diğer ülkelerde bu oranın %2 ila 3 arasında değiştiği görülmektedir (Delice vd, 2013:187). Özellikle karlı ve buzlanmanın olduğu havalarda, yüksek taşıt hızlarında yol yüzeyi ile tekerlek bandajı arasında oluşan sürtünme direnci çok küçük değerlere ineabilmektedir. Bu alandaki çalışmalar, sürtünme direncindeki azalmanın trafik kazalarını arttırdığını ortaya koymuştur (TNZ 2005, Gürer vd. 2007, Delice vd. 2013). İngiltere Kaza Analizleri verileri kaymaya karşı dirençli yol yapımı için 3 milyonpaund (£) bir harcamaya karşılık muhtemel kazaların önlenerek 24 milyon £ bir kazanç elde edildiğini göstermiştir (BFR 1998). Xiao ve arkadaşları kayma direnci ile trafik kazaları arasındaki ilişkiyi incelemiştirlerdir. Çalışmaları, yol yüzeyinin kayma direnci değerinin %35’ten %48’e çıkması durumunda trafik kazalarının da %60 oranında azalma meydana geldiğini göstermiştir (Xiao vd. 2000). Kış aylarında buzlanmadan dolayı yol yüzeyinin kayma-sürtünme katsayılarının önemli miktarlarda azalmasından dolayı trafik güvenliği de azalmaktadır (Pan vd. 2014). Buzlanan yollarda seyahat etmek tehlikelidir. Yollardaki küçük bir buz miktarı bile kazalara neden olabilmektedir. Hava sıcaklığı ve yağış miktarı yollarda ne kadar buz olabileceğini belirler (Kadioğlu 2012).

Buzlanma ile mücadele de çok farklı yöntemler uygulanmaktadır. Günümüzde fiziksel mücadele yöntemleri ve kimyasal yöntemler en yaygın kullanılan yöntemler olmakla birlikte bu yöntemlerin hem uygulama ve güvenlik hem de altyapı ve çevre açısından bazı olumsuz sonuçları mevcuttur. Bu uygulamaların her ikisi de önemli miktarlarda personel ve iş makinası gerektirir, ani yağış durumlarında yetersiz personel ve iş makinası tüm yollarda etkili bir şekilde buzlanma ve kar birikiminin önlenmesini mümkün kılmaz. Amerika Birleşik Devletleri’nde buzlanmayı önlemek için yılda ortalama 15 milyon ton tuz kullanıldığı bilinmektedir (Wegner ve Yaggi 2001). Karayollarında özellikle kış aylarında kullanılan donmayı önleyici tuzlardan dolayı,

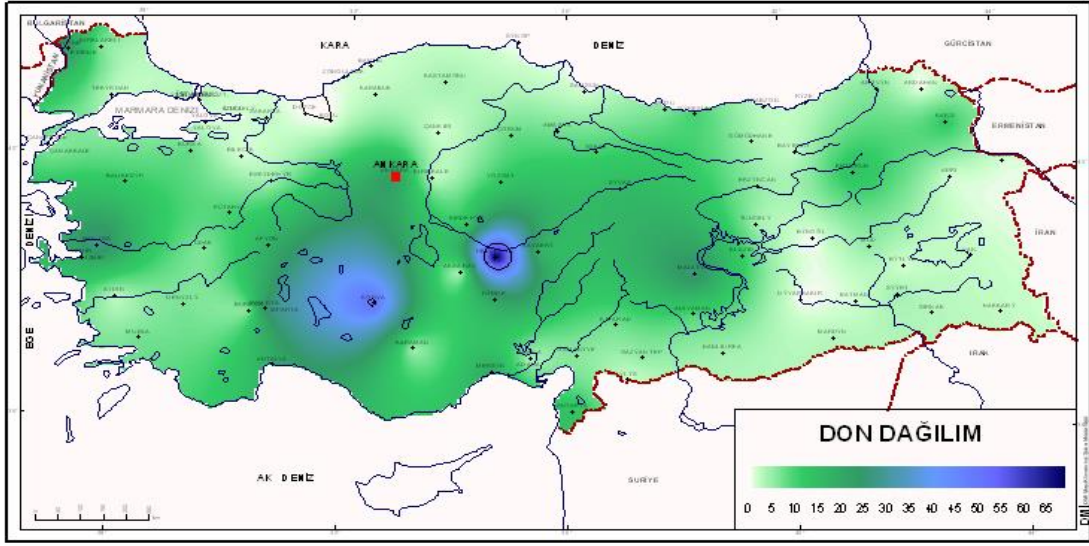
trafik güvenliği açısından önemli olan işaret bilgi sistemlerinde, taşıtlarda, asfalt yol kaplamalarında, köprü tabliye ve ayaklarında önemli korozyon hasarları oluşmakta bu da ayrıca trafik ve yol seyir güvenliğini tehlikeye düşürmektedir (Gürer 2014). Kar ve buzlanma yol güzergahlarında keskin yatay ve düşey kurbaların bulunduğu kesimlerde, güzergahların dağlık kesimlerin kuzey yamaç kısımlarında, köprülerde ve tünel çıkışlarında, havaalanı ve otogar peronu gibi yerlerde, yollarda eğimin yüksek olduğu kesimlerde, yürüyüş yolları ve yaya geçitlerinde, oto garajlarına giriş ve çıkış rampalarında, şehir içi otobüs duraklarında ayrıca önemli seyir güvenliği problemlerine neden olmaktadır. Köprü ve viyadükler, yollarda daha önce, çok ve daha çabuk buzlanmaktadır (Resim 1.2).



Resim 1.2 Kar ve buzlanma açısından kritik yol kesimleri (Gürer 2014).

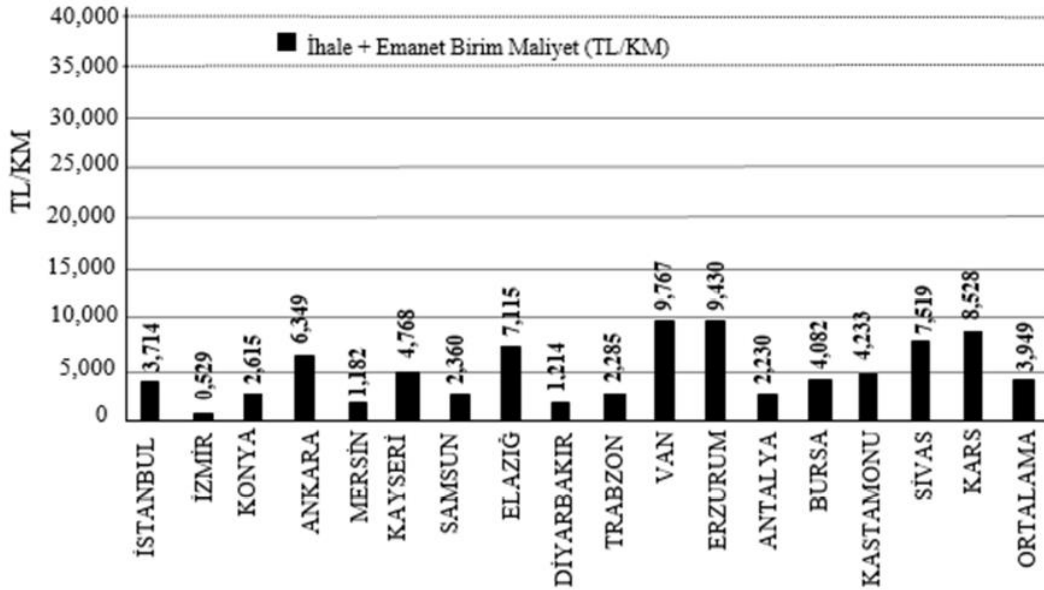
Buzlanma önlemede kullanılan tuzların neden olduğu önemli bir sorun da çevre kirliliğidir. Özellikle yol kenarlarındaki bitkilerin ölmelerine neden olmakta, yeraltı sularına karışarak diğer canlıların bünyesine de olumsuz etkiler yapabilmektedir. Buzlanma sıcaklığı sıfır derecenin, yani donma noktasının, veya bunun altına inen cisimlerin yüzeylerinde oluşur. Köprüler, viyadükler ve üst geçitler her taraftan birden soğurlar. Yollar ise altlarını örten toprak sayesinde sadece üst yüzeylerinden yani bir taraflarından soğurlar. Yol, üst yüzeyinden soğurken bir yandan da altındaki toprak yüzey tarafından belli bir süre ısıtılabilir. Yaklaşık iki metre yükseklikte ölçülen hava sıcaklığı donma noktasına kadar düşse bile yolun sıcaklığı altındaki topraktan dolayı sıfır derecenin üzerinde kalabilir. Bu nedenle köprü ve viyadüklere göre yolların donması gecikerek gerçekleşmektedir. Yolların donması için ya hava sıcaklıkları donma noktasının çok altına düşmeli ya da uzun süre donma noktasında seyretmelidir. Fakat köprü, viyadük ve üst geçitler her taraflarından hava ile temastadırlar. Diğer bir deyişle, köprü ve viyadüklerin, hava sıcaklığı donma noktasına düşünce sıcaklıklarını donma noktasının üzerinde tutabilecek yolun altındaki toprak yüzey gibi, nispeten sıcak bir yüzey ile temasları yoktur. Köprü ve viyadükler hava sıcaklıkları düşünce hızla ısı kaybedip soğumaktadırlar. Bunun sonucu olarak hava sıcaklığının donma noktasına kadar düşmesi ile köprü ve viyadüklerin donması arasındaki zaman farkı çok küçüktür. Özetle hava sıcaklıklarının 5°C civarında seyrettiği günlerde yol, köprü ve viyadüklerin sıcaklığı çiy veya kırağı noktasına düşmüş olabilmektedir (Kadıoğlu 2012, Gürer 2014, Gürer ve Düşmez 2015). Yaşanan 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi yapılarındaki durabilite sorunlarını açıkça ortaya koymuş, depremle birlikte betonarme yapılarındaki korozyon çatlakları belirginleşmiştir. Bu açıdan elektriksel iletken asfalt betonu gibi uygulamalar özellikle köprü gibi yol kesimlerinde oldukça faydalı olabilir.

Ülkemizde don olayının görülmediği yer yok denecek kadar azdır (Şekil 1.1). Özellikle İç Anadolu ve Konya don olayının en fazla rapor edildiği yerlerdendir (Kadıoğlu 2012). Ülkemizde, karla mücadele kapsamında karayollarında kullanılan tuz miktarının 100 bin ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Kar ve buz mücadelesinde kullanılan araçların bakım-onarım maliyetleri, akaryakıt giderleri ve fazla mesai gibi giderlerle beraber toplam kar ve buz mücadele maliyeti yıllık ortalama 86.000.000 TL olduğu tahmin edilmektedir (Varış 2007, Gürer 2014, Seferoğlu vd. 2015).



Şekil 1.1 Donlu günlerin uzun yıllar ortalamasına ait yersel dağılımı (Kadioğlu 2012).

2013 yılı kar ve buzla mücadele için KGM'nin bölge şubelerindeki toplam birim maliyetler Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Bu verilere göre ülkemizde kar ve buz mücadelesi için en fazla harcama yapan iller, kış mevsimi en ağır geçen Van ve Erzurum'dur. Bu iki ilde de kilometre başına yaklaşık 10 TL harcama yapılmaktadır. Türkiye ortalamasına bakılırsa kar mücadelesinde kilometre başına 4 TL harcanmıştır (Seferoğlu vd. 2015).



Şekil 1.2 2013 Yılı KGM Bölge Md.leri kar mücadelesi birim maliyetleri (Seferoğlu vd. 2015).

Genel olarak iki farklı buz kontrol stratejisi vardır: Buzlanmanın önlenmesi (anti-icing) ve buzlanmanın giderilmesidir (de-icing). Bu çalışmaların temel amaçlarında bazı farklılıklar vardır. Buzlanmanın önlenmesi çalışmaları, karın yüzeye yapışmasını ve buzlanma oluşumunu önlemeye yöneliktir. Buzlanmanın giderilmesi çalışmaları ise, yüzeyde oluşmuş buzun eritilmesi veya kaldırılması amacıyla yapılmaktadır ve bu yöntemler geleneksel yöntemler olarak da bilinmektedir (Ağar ve Kutluhan 2005, Gürer vd. 2015). Dolayısıyla buzlanmanın giderilmesi çalışmalarının amacına ulaşabilmesi; personel, makine parkı, sarf malzeme vb. imkanlara bağlıdır. Son yıllarda buzlanma ve kar birikimi ile mücadelede aktif yöntemler olarak bilinen ve buzlanmayı daha başlamadan önlemeyi amaç edinen yöntemler bazı ülkelerde uygulanmaya başlanmıştır. Bunlardan biri de elektriksel iletken kaplama teknolojileridir. Bu tip bir teknoloji ile kaplama üzerinden geçen elektrik akımı ile kaplamada sıcaklık artışı meydana gelmekte bu da buzlanmanın daha oluşmadan önlenmesini sağlamaktadır. Bu tip teknolojiler genellikle akıllı sistem ve yapay zekâ teknolojileri ile birlikte kullanılmaktadır. Yol yüzeyindeki sensörler buzlanma tehlikesini algılamakta ve bu şekilde sistem buzlanma tehlikesi başlamadan devreye girmektedir.

Bu tez çalışmasında en verimli elektriksel iletkenlik özelliğine sahip asfalt karışım kombinasyonu belirlenerek dizaynının yapılması amaçlanmıştır ve iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 25 farklı agrega ve iletken bileşen içeriğine sahip asfalt betonu (İAB) numuneleri üretilmiş ve bunlar üzerinde yapılan özdirenç, sabit (30 V DC) elektrik gerilimi altında sıcaklık artışı ve sabit ısı kaynağı karşısında ölçülen numune sıcaklık değişimleri belirlenmiş ve bunun sonucunda seçilen seriler için Marshall dizayn deneyleri yapılarak optimum bitüm yüzdeleri, Marshall stabilite-akma özellikleri tespit edilmiş ayrıca bitüm yüzdesine bağlı olarak elektriksel iletkenliğin nasıl değiştiği saptanmıştır. Çalışma sonucunda elektriksel iletkenlik özelliği oldukça yüksek, aynı zamanda çevre dostu ve mühendislik özellikleri TCK şartnamesine (2013) uygun olan aşınma tabakası asfalt numuneleri geliştirilmiş ve bu asfaltların elektrik akımını iletme ve elektrik akımı ile ısınabilme özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen İAB'nin buzlanma önleyici sistem olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu kısımda konu ile ilgili literatür üç başlık altında ele alınmıştır. Birinci kısımda karayollarında buzlanma ile mücadelede kullanılan başlıca yöntemler açıklanmıştır. İkinci kısımda elektriksel iletkenlik ve Perkolasyon teorisi anlatılmış, üçüncü kısımda ise konu ile ilgili yapılmış önceki çalışmaların özetlerine yer verilmiş ve yapılan tez çalışmasının diğer çalışmalardan farkı ortaya konulmuştur

2.1 Karayollarında Buzlanma ile Mücadelede Kullanılan Yöntemler

Günümüzde buzlanma ile mücadele yöntemleri pasif yöntemler ve aktif yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir (Şekil 2.1). Pasif yöntemlerde eritici kimyasallar veya mekanik araçlar kullanılarak buzun yol yüzeyinden kaldırılması sağlanırken, aktif yöntemlerde iletken asfalt betonu, hidronik (jeotermal), donmayan asfalt betonları gibi yöntemler kullanılarak kaplama yüzeyindeki buzun eritilmesi veya hiç oluşmaması sağlanmaktadır (Pan vd. 2014, Gürer 2014, Düşmez 2014). Bu yeni teknikler kontrol edilebilir ve etkili sistemler oldukları kadar aynı zamanda uzun dönemde maliyet etkin sistemlerdir. Çizelge 2.1’de buzlanma ile mücadelede kullanılan aktif yöntemlerin maliyet yönünden kıyaslamaları görülmektedir.



Şekil 2.1 Karayollarında buzlanma ile mücadele yöntemleri (Gürer 2014).

Çizelge 2.1 Aktif yöntemlerin maliyet açısından karşılaştırılması (Panvd. 2015).

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

2.1.1 Buzlanma ile Mücadelede Pasif Yöntemler

Kar ve buzlanma ile mücadelede genellikle kar yağışı ve buzlanma oluşuktan sonra pasif yöntemler kullanılmaktadır. Bunları en yaygın kullanımı ve çevreye verdiği zararlarla bilinen kimyasal yöntemler ve mevcut kar kütesinin uzaklaştırması ve ötelenmesine sistemine dayanan fiziksel yöntemler olarak iki başlık altında inceleyebiliriz.

2.1.1.1 Kimyasal Yöntemler

Kar ve buz çözülmesinin sağlanması ve oluşumlarının önlenmesi için ülkemizde ve tüm Dünya'da en çok kullanılan yöntemlerin başında yol yüzeyine çeşitli kimyasal maddelerin tatbik edilmesi gelmektedir. Bu maddeler; katı ve sıvı olarak iki tiptedir. Bu kimyasal maddelerin en önemli özelliği suyun donma noktasını düşürerek yol yüzeyindeki buzu ve donmuş karı eritmesidir. Katı (tanecik, toz vb.) ve sıvı (belli konsantrasyonda solüsyon vb.) halde bulunan bu maddeler ya tek başlarına ya da performanslarını arttırmak için birbirleriyle ve diğer maddelerle karıştırılmak suretiyle uygulanabilirler. Her biri, diğerlerine göre etken oldukları sıcaklık, performans özellikleri ve çevreye olan zararlı etkileri dolayısıyla farklı özelliklere sahiptir (Çizelge 2.2). Kar ve buz mücadelesi için yollarda yaygın olarak kullanılan kimyasallar ve bu kimyasalların bazı özellikleri, çevre ve altyapıya verdiği zararlar Çizelge 2.2'de özetlenmiştir (Ağar ve Kutluhan 2005, Gürer ve Düşmez 2015).

Ayrıca, Kuloğlu ve Kök (2005) beton asfalt kaplamanın geçirgenliğine bağlı olarak içine nüfuz eden tuzlu çözeltilerin, asfalt kaplamaların performansını etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, %2.5 tuzlu çözeltilere maruz kalan beton asfalt

kaplamaların rijitlik modülünün %35, yorulma dayanımının da %41 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.

Çizelge 2.2 Kar ve buzlanma önleyici kimyasalların bazı özellikleri ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri (Özcan vd. 2005).

<i>Kimyasal Madde</i>	<i>Özellikleri</i>	<i>Etken Olduğu Yaklaşık Sıcaklık (°C)</i>	<i>Çevre Üzerindeki Korozif Etkileri</i>
<i>Sodyum Klorür (NaCl)</i>	Kaya, göl ve deniz tuzu olarak yaygın olarak bulunması kolaydır. Diğer tuzlara göre maliyet olarak daha uygundur.	-3.9	Ekolojik çevreyi etkiler. Toprağa ve suya geçerek alkaliliğini artırır. Klorür içerdiği için, korozyon açısından metal yüzeylere ve betona zarar verir.
<i>Kalsiyum Klorür, (CaCl₂)</i>	Diğer kimyasal maddelere göre eridiği zaman çevreye zarar verdiği için, en düşük sıcaklıklarda buz çözmede en iyi çalışan maddelerden biridir. Soda sanayinde yan ürün olarak elde edilir.	-20	Ekolojik çevreyi etkiler. Klorür içerdiği için korozyon açısından, metal yüzeylere ve betona zarar verir. Uygulandıktan sonra yol yüzeyinde temizlenmesi zor ve kaygan bir kalıntı bırakırlar.
<i>Magnezyum Klorür (MgCl₂)</i>	Kimyasal bir madde olan magnezyum klorürün buz çözme özelliği vardır.	-15	Ekolojik çevreyi etkiler. Klorür içerdiği için korozyon açısından, metal yüzeylere ve betona zarar verir. Uygulandıktan sonra yol yüzeyinde temizlenmesi zor ve kaygan bir kalıntı bırakırlar.
<i>Potasyum Klorür (KCl)</i>	Kimyasal bir madde olan potasyum klorürün buz çözme özelliği vardır.	-7	Ekolojik çevreyi etkiler. Toprağa ve suya geçerek alkaliliğini artırır. Klorür içerdiği için, Korozyon açısından metal yüzeylere ve betona zarar verir. Düşük sıcaklıklarda iyi sonuç vermez. Klorür içeren diğer yol tuzlarına göre, metallere ve betona korozif etkisi yoktur. Bu nedenle köprüler, viyadük ve havaalanlarında kullanılır. Fakat çevre açısından yol kenarındaki bitkilerin aşırı büyümesine neden olur ve canlılar için zararlı olan NH ⁴⁺ iyonunu oluşturur.
<i>Üre [CO (NH₂)]</i>	Gübre olarak kullanılan ürenin buz çözme özelliği vardır.	-7	Klorür içermediği için diğer tuzlara göre metallere, betona ve ekolojik çevreye zararlı bir korozif etkisi yoktur. Diğer tuzlara göre maliyeti yüksektir.
<i>Kalsiyum Magnezyum Asetat (CMA)</i>	Düşük sıcaklıklarda buz çözme özelliği, metal, betona ve çevreye, düşük korozif etkisi sebebiyle son zamanlarda kullanılan kimyasal bir maddedir.	-20	Klorür içermediği için diğer tuzlara göre metallere, betona ve ekolojik çevreye zararlı bir korozif etkisi yoktur.
<i>Potasyum Asetat (KCO₂H)</i>	Düşük sıcaklıklarda buz çözme özelliği, metal, betona ve çevreye, düşük korozif etkisi sebebiyle son zamanlarda kullanılan kimyasal bir maddedir.	-20	Klorür içermediği için diğer tuzlara göre metallere, betona ve ekolojik çevreye zararlı bir korozif etkisi yoktur.

Çizelge 2.2’de görülen kalsiyum magnezyum asetat ve potasyum asetat bileşikleri çevre yönünden zararsız olarak kabul edilseler de bunların birim fiyatları diğer kimyasallara göre oldukça yüksektir. Bunlardan NaCl -3.9 °C’nin altında uygulandığında işlevsizdir (Löfgren 2001). Kış aylarında genellikle donan ve karla kaplanan yolları açmak için NaCl ve bazen de CaCl tuzları kullanılır, bu tuzlar sonuçta suların (dere, çay vb.) tuz konsantrasyonunu artırır. Sulardaki tuz konsantrasyonunun artması içme suları yanında sulama sularını ve sudaki yaşamı da büyük oranda etkilemektedir. ABD’de yapılan bir araştırmaya göre bir ton tuzun çevreye verdiği zararı gidermenin bedeli 800\$’dır. Bu maliyete tuzun yeraltı sularına verdiği zarar ve dolaylı olarak sağlık giderleri dahil değildir. Tuz yerine çevreye zarar vermeyen bir malzemenin kullanılmasının ülke ekonomisine katkısı yaklaşık yılda en az 100 milyon \$ olacağı düşünülmektedir (Yörükoğulları 2005).

2.1.1.2 Fiziksel Yöntemler

Karın yol yüzeyinden uzaklaştırılmasında farklı makine ve ekipmanlar da kullanılmaktadır. Makine ve ekipmanlardan hangilerinin kullanılacağına kar kalınlığına, biriktirme yapılacak yere göre karar verilir. Kar kalınlığı 5 cm’yi aştığında, düz kar bacağı takılmış kamyonlar ile, saatte yaklaşık 50 km hız yapılarak, kar, yoldan uzaklaştırılabilir. Bu makineler 20 cm kar kalınlığına kadar etkili olmaktadır. Kar kalınlığı 20 cm ile 50 cm arasında olan yerlerde önce V bıçaklar ile kapalı yerler açılır ve düz bıçaklar ile son temizlik yapılır. Kar kalınlığı 1 m’ye ulaşan yerlerde, daha güçlü kamyonlara takılan V bıçakları ile kar yarılr. Aynı kamyonunda bulunan yan bıçaklar yarılan yerleri genişletir ve ince kar temizliği düz bıçaklarla yapılır. Kar kalınlığı 50 cm’yi aştığında, acil haller dışında, yolun rotatifler ile açılması daha yararlı olmaktadır (Ağar ve Kutluhan 2005). Resim 2.1’de buzlanma ile mücadelede kullanılan bazı pasif yöntemler görülmektedir.



Resim 2.1 Buzlanma ile mücadelede pasif yöntemler, a) Solvent püskürtme aracı b) Rotatif kar üfleme aracı c) Karayolu tuzlama çalışması d) Kar Sıyırıcı (Gürer 2014).

Buzlanma ile mücadelede kullanılan fiziksel yöntemlerden birisi de aşındırıcı kullanımıdır. Aşındırıcılar kar ve buz kontrol çalışmasında sürtünme katsayısını arttırmak ve patinajı önlemek için kullanılır. Kimyasal etkisinin çok yavaş olduğu düşük sıcaklıklarda ve karla buzun kaplamaya çok sıkı yapıştığı durumlarda aşındırıcı kullanımı hayati önem taşır. Aşındırıcı olarak kullanmak için en uygun malzemeler, doğal kum, kömür tozu, taş ve cüruf kırıntıları, maden atıkları ve kok fırınları atıklarıdır. Genellikle kilometre şerit başına 340 kg kum uygulanır (Özdemir 2011).

Yol yüzeyine serilen aşındırıcıların hava koşulları düzeldikten sonra yol yüzeyinden kaldırılmaları gerekir yoksa trafik seyir güvenliği bakımından tehlike oluşturur ayrıca drenaj hendeklerinin tıkanmalarına da sebep olabilirler. Dolayısıyla aşındırıcı kullanımının personel ve makine giderleri açısından maliyetli olduğu söylenebilir (Gürer 2014).

2.2 Buzlanma ile Mücadelede Aktif Yöntemler

Buzlanma ile mücadelede aktif yöntemler olarak bilinen yöntemler buzlanma sorununa önceden tepki vererek buzlanmanın hiç oluşmamasını sağlama mantığı üzerine kurulan

sensörler yardımıyla devreye giren, pasif yöntemlere göre çok sayıda avantaja sahip olan yöntemlerdir. Aktif yöntemler: Otomatik solüsyon püskürtme sistemleri, elektriksel iletkenlik özelliği olan kaplamalar, iletken kablolarla ısıtma ve jeotermal yöntemlerdir

2.2.1 Otomatik Solüsyon Püskürtme Sistemleri

Bu sistemler kaplama üzerine sabitlenmiş buzlanma önleyici solüsyon püskürtme sistemleridir. Bu tip buzlanma önleme yöntemleri bir solüsyon tankı, elektrikli pompalama sistemi ve bilgisayar tabanlı bir kontrol sistemin bulunduğu bir kontrol odasından oluşur (Resim 2.2). Sistem içerisinde yerleştirilen borular ile güç ve iletişim kabloları, kimyasal solüsyonun iletildiği borular vanalara buradan da püskürtme uçlarına bağlanırlar. Bu tip sistemler otomatik yol hava kontrol bilgi sistemi ile aktif ve pasif sensörler kullanılarak entegre edilebilirler. Bu tip sistemlerin kontrol odaları ölçeklenebilir ve püskürtme sistemleri ile birden fazla şeritte buzlanma ile mücadele edebilen sistemlerdir.



Resim 2.2 Freeze Free® otomatik solüsyon püskürtme sistemleri (İnt.kyn.1)

2.2.2. Elektriksel İletkenlik Özelliği Olan Asfalt Kaplamalar (İAB)

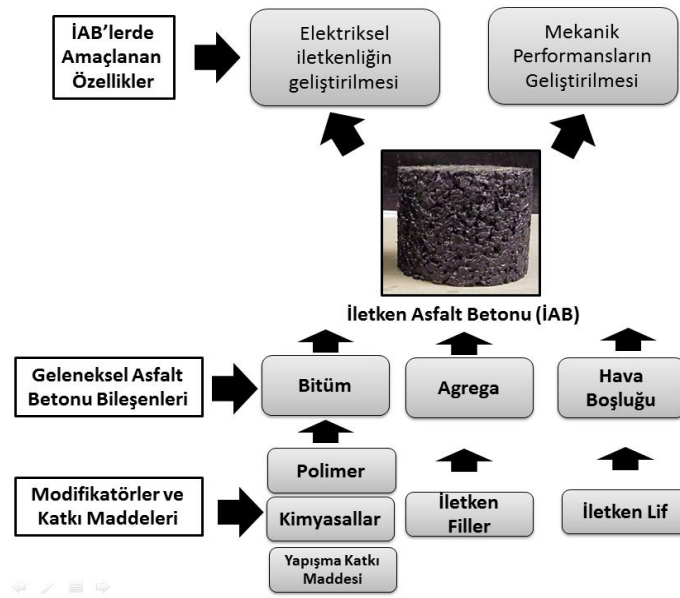
Asfalt üstyapı ısıtma sistemleri bir parçası olan iletken asfalt betonu (İAB), kar eritme ve buz çözmede yeni bir teknolojidir. Bu sistemde üstyapı uygun ölçekte ısıtma modüllerine bölünmektedir. İletkenlik düzeyi bölünmüş modüllerin büyüklüklerine ve istenilen ısı gereksinimine göre değişiklik göstermektedir. Genellikle iletkenliği 100 ohmu geçmeyen modül büyüklükleri tercih edilmektedir. İAB uygulaması Minsk tarafından 1968 yılında yeni bir kar eritme/buzlanma sistemi olarak geliştirilmiştir.

Asfalt betonun iletkenliği karışım içerisinde çeşitli iletken malzemeler katılarak elde edilir. İAB içerisinde geçirilen akım üstyapı üzerindeki kar erime ve buz çözmek için gerekli ısıyı sağlar. Bu teknik, (1) iletkenliği sağlayacak maddelerin asfaltı oluşturan malzemelere benzerlik göstermeleri ve üstyapı performansına sınırlı etkileri (Minsk ve Hanover 1971), (2) ana şebekenin ısı transfer sistemini desteklemesi ve (3) İAB aynı zamanda betonarme köprü taşıyıcıları katodik korumanın da dahil olduğu (Stratfull, 1974) ve üstyapı hasar izleme (Wu vd. 2005) gibi potansiyel işlevlerinin olması vb. avantajları ile buzlanmayla mücadelede günden güne önem kazanmaktadır.

Bir iletken asfalt buz çözücü sistemi, iletken kaplama karışımı güç kaynağı, gücü taşıyan iletken kablolar, hava koşullarını (nem, sıcaklık, rüzgâr hızı vb.) ölçen sensörler ve kontrol-izleme sisteminden meydana gelmektedir (Minsk 1968, Minsk ve Hannover 1971). Geleneksel asfalt karışımı bitüm, agrega ve mineral filler maddelerinin bir karışımıdır ve bunların tümü yalıtıcıdır. Temel İletken kompozit polimer teorisine göre düşük direnç değerine sahip İAB, asfalt betonu içerisinde çeşitli formlarda iletken özellikte, toz (grafit, karbon tozu vb.) lif ve parçacıkların eklenmesi ile aktive edilir. Bu buzla mücadele sistemi için güç kaynağı kablolar ve kontrol sistemlerinin benzer ve yaygın olmasından dolayı, asıl önemli olan hem mükemmel iletkenliğe sahip hem de kabul edilebilir mekanik özelliklere sağlayan iletken asfalt karışımının elde edilmesidir. Asfalt betonunun düşük özdirenç sahip olması için grafit, karbon tozu, karbon lifi (KL), çelik lifi (ÇL) çelikhane cürufurların dahil olduğu iletken malzemeler kullanılır (Wu vd. 2002, Ahmedzade ve Şengöz 2009, Garcia vd. 2009).

Geleneksel asfalt karışımları kaba agrega, ince agrega, asfalt bağlayıcı ve mineral filler içermektedir. Bileşenlerin yüksek özdirenç sahip olmalarından dolayı geleneksel asfalt karışımları $10^8 - 10^{12} \Omega.m$ direnç değeri ile yalıtıcı davranış gösterirler (Wu vd. 2002) Literatür taramaları bu tür yalıtıcıların bile içerisinde iletken materyaller katılarak iletkene dönüştürebileceklerini ($10 \Omega.m$ özdirenç mertebesinde düşük) belirtmektedir. Partikül boyutlarına göre üçe ayrılan materyaller: (1) grafit, karbon siyahı ve alüminyum çapakları gibi toz şeklinde (Huang vd. 2009, Wen ve Chung 2004); (2) karbon lifi (KL), çelik lifi (ÇL), çelik yünü, karbon nano lifi (KNL) gibi lif şeklinde (Garcı'a vd. 2009, Khattak vd. 2013, Wu vd. 2005); (3) kaba ve ince agrega (kısmen

yada tamamen) olarak çelik cürufu şeklinde bulunabilirler. Tek bir iletken malzeme ile modifiye edilmiş asfalt betonu bazı sınırlamalara ve zorluklara sahip olup, iletken malzeme ilavesi maliyetinin artmasının yanı sıra muhtemelen bir ölçüde mekanik performans gibi sorunlara da yol açabilir. Bununla birlikte araştırmacılar farklı tip iletken malzemelerin kombinasyonları ile hazırlan İAB'lerin yeterli mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olacağını ve uygun fayda/maliyeti sağlayacağını düşünmektedir (Huang vd. 2009, Garcı'a vd. 2009, Khattak vd. 2013, Gürer 2015). Şekil 2.2'de geleneksel asfalt betonu ve İAB bileşenleri arasındaki farklar gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Geleneksel asfalt betonu ve İAB bileşenleri arasındaki farklar (Gürer 2014).

2.2.3. İletken Isıtma Kablolarıyla Buzlanmanın Önlenmesi

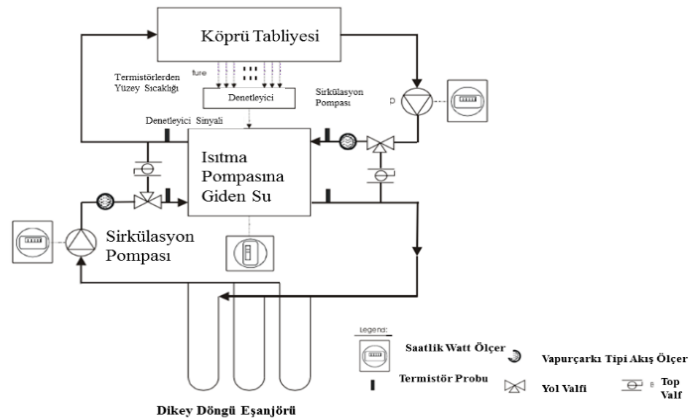
Bu tip sistemler kaplama altına yerleştirilen ısıtma kabloları ile kaplama yüzey sıcaklığının yol hava muhalefetine göre sürekli donma derecesinin üzerinde tutulması esasına göre çalışan sistemlerdir. Bu tip sistemler diğer sistemlere göre yüksek güç ve daha uzun çalışma süresi gerektirir. Genellikle ısıtma kabloları yol kaplamaları üzerinde tekerlek izlerinin yoğunlaştığı kısımlar boyunca yapılır. Yüzeye monte edilen sensörler yardımıyla kaplamanın yüzey sıcaklık değişimi sürekli takip edilir (Zhang 2009). Bu tip bir sistemin benzeri ülkemizde de protokol yolu olarak adlandırılan Esenboğa Havalimanını Ankara'ya bağlayan yol üzerinde uygulanmıştır (Resim 2.3).



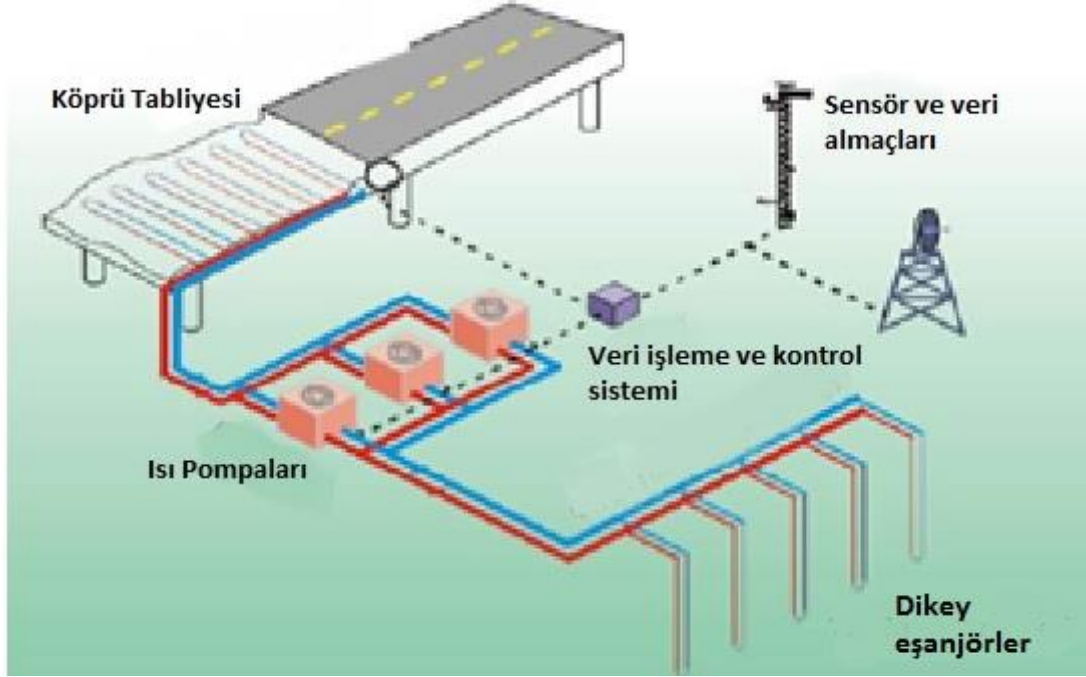
Resim 2.3 Esenboğa - Ankara yolundaki kablolu buzlanma önleyici sistem (İnt. Kyn.2).

2.2.4. Hidronik (Jeotermal) Buzlanma Önleyici Sistemler

Bu tip sistemlerde bir jeotermal ısı pompası kullanılarak yeraltından çıkarılan jeotermal su bir ısı eşanjörü tarafından bir propilen glikol karışımına verilir ve kaplama altına yerleştirilen borular içerisinde devir daim yapmak suretiyle yüzeydeki buzlanmanın önlenmesini amaçlayan sistemlerdir. Propilen glikol kullanılmasının nedeni ise suyun donma noktasını düşürmektir. Hidronik akışkan kaplama altına yerleştirilen polietilen borular içerisinde devir daim yapar. Bu boruların çapı 18 mm'dir ve birbirlerinden 300 mm uzaklıkta olacak şekilde kaplama altına döşenir. Sarmal borular yol yüzeyinin 75 mm altına yerleştirilir. Kaplama kalınlığı 200 mm olmalıdır. Birleşik Devletler'in Oklahoma eyaletinde 12×215m boyutlarındaki bir köprü tabliyesine 16 ısı pompası kullanılmış ve bu pompaların 106 kW'lık bir güç tüketimi olacağı hesaplanmıştır (Zhang vd. 2009). Bu tip sistemler özellikle köprü tabliyelerindeki buzlanmaları önlemede tercih edilmektedir. Bir hidronik sistemin çalışma yapısı Şekil 2.3'de görüldüğü gibidir. Jeotermal ısı pompası tekniğinin şematik şekli Şekil 2.4'de verilmiştir.

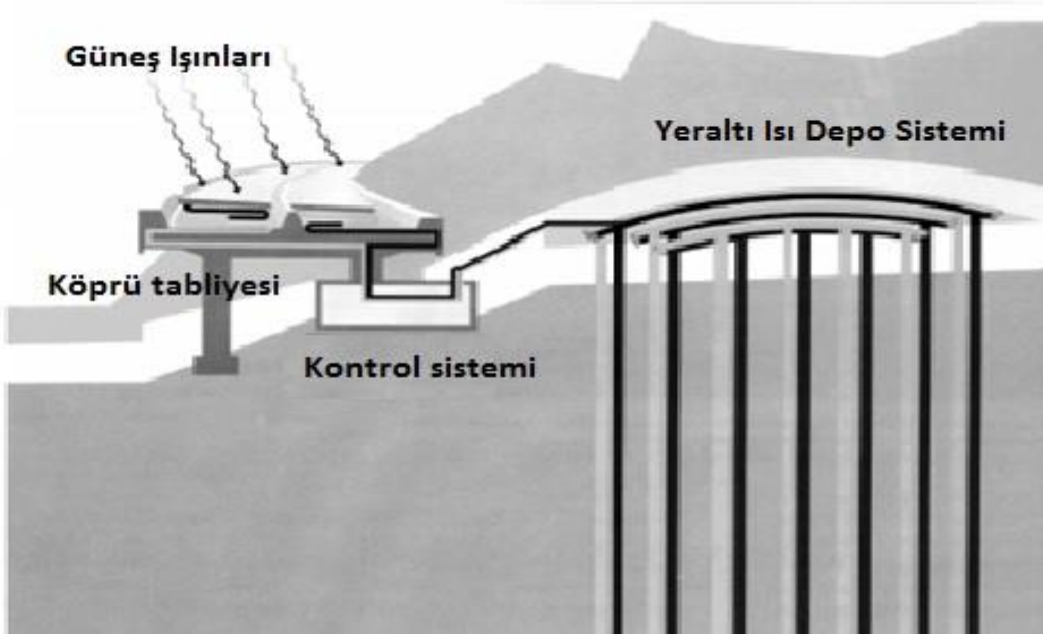


Şekil 2.3 Bir hidronik (jeotermal) buzlanma önleyici sistemin yapısı (Liu vd. 2003).



Şekil 2.4 Jeotermal ısı pompası tekniği (Tan 2015).

Hidronik sistemlerle ilgili önemli bir uygulama (SERSO) 1994 yılında İsviçre'deki bir köprü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Proje Bern Enerji İdaresi tarafından başlatılmış ve Polydynamics Ltd. tarafından uygulanmıştır. Projenin amacı: Yaz mevsiminde asfalt köprü kaplaması üzerinde oluşan 60 °C üzerine çıkabilen ısıyı yeraltı ısı alıcılarında depolamak ve kış mevsimindeki don sezonunda bu ısıdan faydalanarak köprü üzerinde oluşan buzlanmayı önlemektir. Isı köprü altına yerleştirilen borular içerisinde 1300 m²'lik bir alanda devir daim etmektedir. Yeraltı ısı alıcıları ise derinliği 65 m'ye ulaşan 92 dikey sondaj deliğinden oluşmaktadır ve toplam kapasitesi 1.94 milyon m³ kumtaşıdır. Hidrolik sistemler ısı alıcıları ve köprü tabliyeleri arasındaki bağlantı boruları, valfler ve karıştırma tanklarından oluşmaktadır. Yaz mevsiminde yol yüzeyinde oluşan ve 150000 kWh'a karşılık gelen solar radyasyonun yaklaşık %20'si depolanabilmektedir. Bu miktarın %35'i kayıp edilmektedir, kalan miktar ise kış mevsiminde köprü yüzeyinde buzlanmanın önlenmesinde kullanılmaktadır. Proje 3 milyon \$'a mal olmuştur. Şekil 2.5'de SERSO sisteminin şematik şekli görülmektedir (Lund 2015).



Şekil 2.5 SERVO Hidronik (Jeotermal) sistemi (Lund 2015).

2.3 Elektriksel İletkenlik ve Perkolasyon Teorisi

2.3.1 Elektriksel İletkenlik

Elektrik enerjisi ve ısı enerjisini geçiren cisimler iletken madde olarak adlandırılır. Elektriksel iletkenlik, malzeme içerisinde atomik boyutlarda “yük taşıyan elemanlar” tarafından gerçekleştirilir. Bunlar elektron veya elektron boşluklarıdır. İletkenliğin yüksek olması için öz direncin düşük olması gerekir. Elektriksel iletkenlik bir iletken malzemeye uygulanan elektriksel alan etkisinde yük taşıyıcılarının uzak mesafeli hareketleri sonucu oluşur. Dört farklı yük taşıyıcısı vardır.

- Elektronlar
- Yayınan katyon
- Yayınan anyon
- Elektron deliği

Metallerde serbest elektronlar eksi kutuptan artı kutba doğru hareket eden negatif yük taşıyıcılarıdır. Genelde sıvı eriyiklerde görülen iyonik iletkenlikte ise pozitif yüklü anyonlar ve negatif katyonlar (bunlar elektron değil molekül veya atomdur) elektriksel alan etkisi altında ortamda hareket ederek iletkenliği sağlarlar. Bir elektronun taşıdığı

birim yük $1,6 \times 10^{-19}$ kulondur. ($q = 1,6 \times 10^{-19}$ C) Elektron deliği $+q$ yük taşır. l (cm) boyunda A (cm²) kesitli iletken için Ohm kanunu gereği (2.1) eşitliği ile ifade edilir.

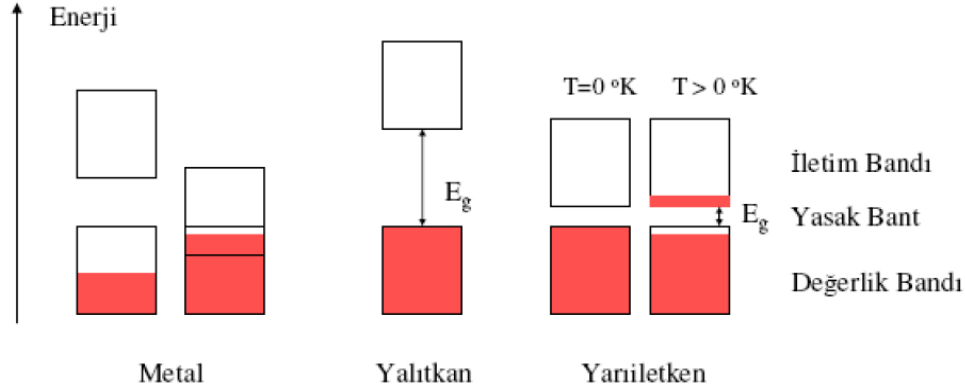
$$V = I \times R \quad (2.1)$$

Burada gerilim V (volt) ve akım A (amper) birbirlerine bir orantılılık katsayısı direnç R (Ω) ile bağlıdır ve ortamın iletkenliğini belirler. Burada,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

olur. ρ ortama göre değişen bir katsayıdır. Birimi $\Omega \cdot m$ 'dir, l ise iletken uzunluğudur birimi m 'dir.

Maddelerin iletken, yalıtkan ve yarıiletken olarak sınıflandırılmasında Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilen, bant aralığı enerjisinden yararlanılır.



Şekil 2.6 Katılarda şematik enerji bantları (Ceylan 2013).

İletkenler kısmen dolu bir valans (değerlik) bandı ve boş bir iletim bandına sahiptirler. İletim bandı boş olduğundan dolayı elektronlar serbest hareket edebilmektedirler. Metallerde üst üste binmiş bant durumu da mevcuttur. Bu yapıda elektronlar kendilerine ayrılan enerji seviyesinden daha aşağıda boş enerji seviyesi var ise, öncelikle oraya giderler (Zor 1991). Bu yapıda örtüşmeden dolayı; dolu olması beklenen valans bandının üst kısmındaki elektronlar, boş olan iletim bandının alt kısımlarına geçerler, böylece elektronların hareket edebilmeleri mümkün olur. Yalıtkanlarda ise, tamamen dolu bir valans bandı ve boş bir iletim bandı vardır. Ancak, yalıtkanlarda yasak enerji aralığı oldukça geniştir. Bu nedenle; valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişi olamayacağından, elektron hareketi görülmez. Yarı iletkenlerde bant özelliği yalıtkanlarla aynıdır fakat yasak enerji aralığı küçüktür. Yasak enerji aralığının düşük

olmasından dolayı elektronların dışarıdan yeterli enerjiyi alarak iletim bandına geçmeleri mümkündür. Bu elektronlar iletkenlik bandı içerisinde hareket ederek, yük taşıyıcı işlemi yapar ve polimer zinciri boyunca ilerler. Yarıiletkenlerin diğer bir özelliği ise mutlak sıfır da yalıtkan özellik göstermeleridir (Streetman ve Banerjee 2006).

2.3.2 Perkolasyon Teorisi

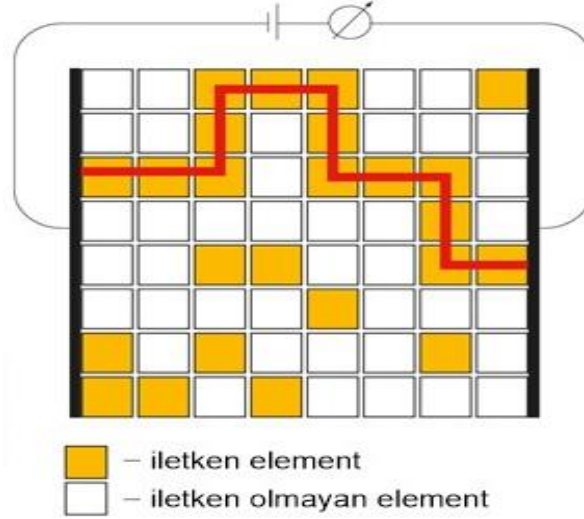
Perkolasyon, malzeme biliminde, bir 'dolgu' maddesiyle (iletken, gaz geçirgen, gibi) doldurulmuş bir malzemede aniden ortaya çıkan yeni özellikleri (örneğin, bir yalıtkan malzemede elektriksel iletkenliği, gaz bariyeri malzemede gaz geçirgenliği vb.) tanımlamak için kullanılır. Bazı durumlarda dolgu gözenekler ve boşluklar ile temsil edilebilir. Perkolasyon, fizik, kimya ve malzeme bilimlerinde, gözenekli malzemeler yoluyla sıvıların dolaşımını ve filtrelemesini, istatistiksel fizik ve matematikte, bağlı kümelerin rastgele bir grafikteki davranışını tarif eder.

Perkolasyon proseslerine örnek olarak, sıvıların sabit bir poröz faza penetrasyonu, sıvı fazın bir polikristalin tane sınırları boyunca sızdırılması, polimer jellerin oluşumu, saf olmayan yarıiletkenlerin elektrik iletkenliği ve ferromagnetizma ile gösterilebilir.

Bir dolgu maddesinin veya gözeneklerin konsantrasyonu belirli bir kritik seviyeye ulaştığında (perkolasyon eşiği), ve takiben malzeme örneğinin bir tarafından diğer tarafına dolgu partiküllerinin sürekli bir ağ yapısı yani bağlantılar kurulduğunda, perkolasyon meydana gelir.

Perkolasyon, iletken ve iletken-olmayan elementlerden oluşan iki boyutlu bir kare latis boyunca geçen elektrik akımı örneğinde gösterilebilir. Latisin iki zıt tarafında bir güç kaynağına bağlı olan metal terminaller lehimlenmiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi rastgele düzenlenmiş iletken elementlerin belli bir kritik konsantrasyonunda devre kapanır (İnt.Kyn. 3).

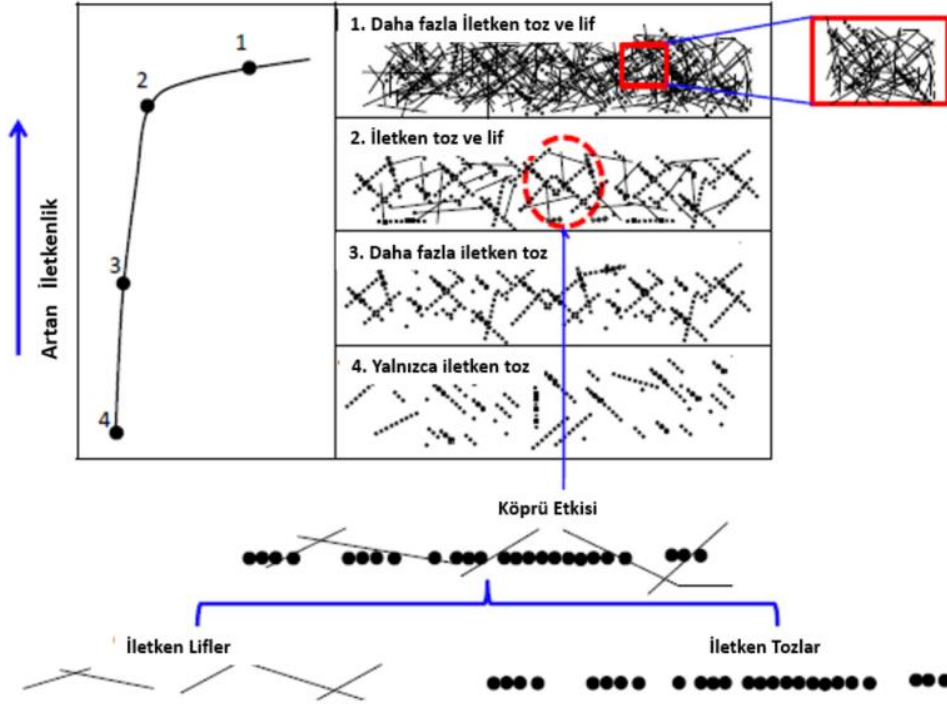
Yapılan tez çalışmasında da iletken bileşenlerin miktarı arttıkça iletken köprülerin sayısının arttığı bu sayede numunelerin yalıtkan davranıştan iletken davranışa geçtikleri görülmüştür.



Şekil 2.7 Elektriksel iletkenlikle ilgili perkolasyon model imajı (İnt. Kyn.3).

Şekil 2.8’de Elektriksel iletkenlik iletkenliğinin toz/lif konsantrasyonu ve bağlantısının bir fonksiyonu olduğunu ve perkolasyon teorisi ile açıklanabileceğini göstermektedir. 4 Numara ile gösterilen kısımda iletken tozlar bireysel kümeler oluşturmaktadır. Küçük bir miktarda iletken lif yoğun iletken toz matrisine ilave edildiğinde, bireysel kümeler birbirleriyle temasa geçerek iletken ağ oluşturur ve perkolasyon eşiğine yaklaşılır. Perkolasyon eşiğinin ötesinde lif eklenmesi iletkenlik üzerinde ihmal edilebilir bir etki oluşturur (Gopalakrishnan 2015). Şekil 2.8’de Perkolasyon teorisi ve karıştırılmış iletken bileşenlerle iletken ağ oluşumu şematik bir şekilde gösterilmiştir.

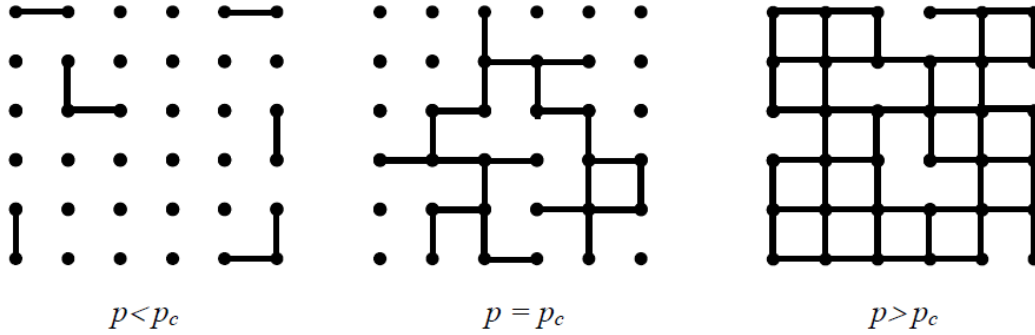
Farklı malzemelerin birbirine karıştırılmasıyla elde edilen kompozit yapının, iletkenlik ve fiziksel elastisite gibi özelliklerinde, belirli bir kritik noktadan sonra ani değişimlerin ortaya çıkması gibi süreçlerin tanımlaması, istatistiksel olarak perkolasyon teorisi ile başarılı (deneyle uyumlu) bir şekilde yapılabilir. Perkolasyon (percolation veya sızma) teorisi, ilk defa Flory ve Stockmayer tarafından, küçük moleküllerin nasıl, çok daha büyük molekülleri oluşturabildiklerini açıklayabilmek için öne sürülmüştür. Broadbent ve Hammersley tarafından 1957’de rastgele gözenekli bir ortama sıvı akışının matematiksel modellenmesi için ele alınmıştır.



Şekil 2.8 Perkolasyon teorisi ve karıştırılmış iletken bileşenlerle iletken ağ oluşumu (Gopalakrishnan 2015).

Perkolasyon teorisi, en basit olarak, her noktası dolu veya boş iki durumdan birinde olan çok geniş bir örgü (lattice) üzerinde formüle edilebilir. Perkolasyon teorisi site (bölge) perkolasyon ve bond (bağ) perkolasyon olmak üzere iki farklı ana model içerir. Site perkolasyon modelinde, örgü üzerindeki her nokta, komşusundan bağımsız olarak p olasılığı ile dolu ya da $(1-p)$ olasılığı ile boş olarak ele alınır. Bir başka deyişle, sonsuz bir örgü üzerindeki noktaların p olasılığı ile gelişigüzel işgal edilmiş olduğu düşünülür. Bond perkolasyon modelinde ise örgüdeki noktalar arası bağlar p olasılığı ile doludur veya $(1-p)$ olasılığı ile boştur. Her ikisinde de en yakın komşu noktaların ya da bağların bir küme oluşturduğu düşünülür. Örgü işgali arttıkça büyüyen kümeler birbirine bağlanarak daha büyük kümeleri oluşturur. Yani, eğer p çok küçükse bağlanmamış kümelerin sayısı fazladır. p biraz artarsa kümelerin sayısı ve ortalama büyüklüğü artar. Belli bir kritik değerde sistemin bir ucundan diğer ucuna uzanan sonsuz bir küme oluşmaya başlar. Bu haldeki p değeri eşik veya kritik değer olarak adlandırılır ve p_c ile gösterilir. Şekil 2.9’de iki boyutlu bir kare örgü parçasında bondperkolasyon aşamaları temsil edilmiştir. P ’nin eşik değeri p_c ’den küçük olduğu durumlarda sistemde sadece

belirli sayıda bağlar görülmektedir. Eşik değer p_c 'de sistemin bir ucundan diğer ucuna uzanan bir küme oluşur. p_c 'nin üzerinde ise bağ sayısı oldukça yüksek değerlere çıkar.



Şekil 2.9 Kare bir örgüde bondperkolasyonu gelişiminin temsili (Dolaştır 2009)

Eşik değer, p_c 'nin değişik sistemler için aldığı değerler matematikçiler ve deneysel çalışan gruplar tarafından araştırılmıştır. p_c değerleri örgünün geometrisine (kare, petek, elmas, kübik gibi), örgü boyutuna (2D veya 3D) göre değişim göstermektedir (Dolaştır 2009).

2.4 Konu İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

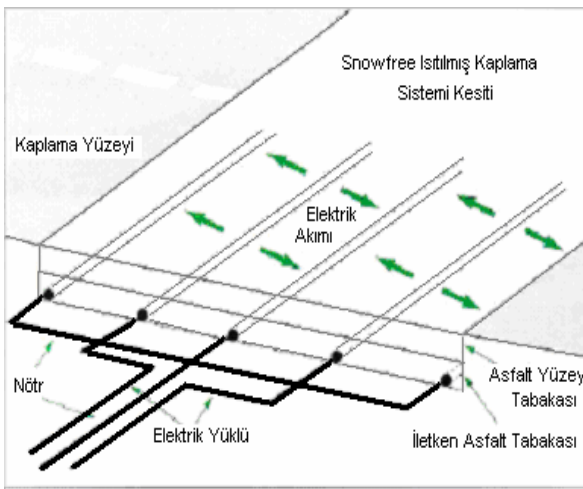
Elektriksel iletken asfalt fikri ilk olarak Minsk (1968) tarafından ortaya atılmış sonrasında Minsk ve Hanover (1971) tarafından patenti alınmıştır. Son on yılda ise giderek daha fazla sayıda araştırmacının dikkatini çekmeye başlamıştır. O zamandan beri, çelik lif, karbon siyahı gibi çeşitli iletken katkıları grafit tozu ve karbon lifi, asfalt betonuna elektriksel iletkenlik kazandırmak için kullanılmıştır. İletken asfalt betonunun olası çok işlevli uygulamaları; buz çözme, kendi kendini iyileştirme, kendini algılama, vb. 'dir (Park 2012).

Geleneksel asfalt karışım malzemesi kaba agrega, ince agrega, asfalt bağlayıcısı ve mineral filler maddesini içermektedir. Bu bileşenlerin yüksek elektriksel özdirençlerinden dolayı, geleneksel asfalt karışımı, 10^8 ile 10^{12} $\Omega.m$ arasında bir özdirenç değeri olan elektriksel yalıtkan bir malzemedir. Bu tür yalıtkan malzemelerin içerisine 10 $\Omega.m$ altında özdirenç sahip iletken malzemeler ilave edilerek iletken hale dönüştürülebilir (Panvd. 2014).

Parçacık boyutlarına göre, iletken malzemeler için üç kategori vardır:

1. Grafit, karbon siyahı ve alüminyum parçaları içeren toz malzemeler (Huang vd. 2009).
2. Karbon lifi, çelik yün, karbon nano lif ve çelik lifleri (Wue vd. 2005).
3. Kaba ve ince agrega (kısmen veya tamamen) yerine cüruf gibi katı parçacıklar (Ahmedzade ve Sengoz 2009).

Derwin vd. (2003)'a göre kış aylarında birçok havalimanında zayıf pist koşulları yaygındır. Pistte buz ve kar oluşumu meydana geldiğinde, havalimanındaki aktivite büyük bir rahatsızlık ve masrafa neden olarak durmaktadır. Bu durum yolcular için gecikmeli veya iptal edilmiş uçuş anlamına gelebilir. Havaalanı operatörü için ise uçak gecikmeleri, kar ve buz kaldırma ekipmanı, çalışması ve fazla çalışma saatleri için ek maliyetler anlamına gelir. Benzersiz bir kaplama olan Snowfree®, FAA tarafından başarılı bir şekilde test edilmiş ve O'Hare International Havaalanında bir taksi yoluna kurulmuş ve bu uygulamanın karlı ve buzlu pistlerin sorunlarını ortadan kaldırdığı düşünülmüştür. FAA ve Flood Test Laboratuvarları'nın işbirliği ile SuperiorGraphiteCo. tarafından formüle edilen Snowfree® (elektriksel iletken asfalt kaplama sistemi), pist yüzeyini ısıtmak için eşsiz grafit, asfalt ve elektrik akımını kullanır ve bu sayede kar ve buzun erimesini veya hiç oluşmamasını sağlar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Snowfree® (elektriksel iletken asfalt kaplama sistemi) ve karın eritilmesi (Derwin vd. 2003).

Snowfree® sisteminin New Jersey’de ki Route 130 Köprüsündeki kurulumu ve kullanımıyla ilgili gözlemsel araştırma ve problemlerin giderilmesine ilişkin öneriler Caggiano (1998) tarafından bildirilmiştir.

Isıtmalı kaplama sistemi, kaplama tabakaları arasında yalıtılmış elektrik iletkenli asfalt ile sandviç bir yapı oluşturmuştur. Yalıtkan tabaka üzerine belirli aralıklarla kablolar ile, kabloların üzerine elektrik iletkenliği arttırılmış grafit içeren karışım uygulanmış bu karışımın etrafı yalıtkan normal asfalt kaplamayla kaplanarak Snowfree® sistemi oluşturulmuştur. İletken asfalt, kabloların ve temel tabakasının üst yüzeyine 5 cm (2 inç) kalınlığında serilmiştir. Normal asfaltın diğer bir 5 cm’lik (2 inç) tabakası ise iletken tabakanın kenarlarını ve üstünü kaplayarak pist yüzeyini oluşturmaktadır. Kablo'lara elektrik yükü uygulanması ile elektrik yüklü kablolardan nötr kablolara doğru bir elektrik akımı meydana gelmekte ve akım iletken kaplamadan geçerken iletken kaplamanın iç direnci sayesinde ısı oluşmaktadır. Oluşan bu ısı iletken kaplamanın üzerinde bulunan normal asfalt kaplama tabakasını ısıtarak yüzeyde bulunan kar ve buzun erimesi sağlanmaktadır. Snowfree® Sistemi’nde elektrik iletkenli kaplama tabakası elde edebilmek amacıyla normal agrega yerine %25 oranında grafit kullanılmıştır. Snowfree® Sistemi uygulanan kaplama kısmının tekrarlı ağır yüklerin ani etkisine dayanabilecek yeterli durabilite ve rijitliğe sahip olduğu ayrıca geleneksel kaplamalarla dayanım bakımından benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Uygulamada, pist yüzeyinde kar birikimi veya buzlanma meydana gelmeden sistem devreye sokulmakta ve kaplama yüzeyi ısıtılmaktadır. Sistem, kaplama sıcaklığı 25°F’ye (-3,9°C) düştüğünde devreye girerek 45 watt/ft² lık (500 watt/m²) bir güç girişi ile yaklaşık 2,5 saat içerisinde kaplama yüzey sıcaklığını 34°F’ye (1°C) yükseltmektedir. Yüzey sıcaklığı 34°F’ye (1°C) ulaştığında hava şartları göz önünde bulundurularak güç azaltılmakta veya kaplama yüzeyi kuruyuncaya kadar sistem çalıştırılmaya devam ettirilmektedir. 1994 yılının kasım ayında O’Hare Uluslararası Havaalanında Snowfree® Sistemi uygulanmıştır. Sistem 120 Volt’luk bir elektrik kaynağı ve kaplamaya monte edilmiş yüzeydeki nem ile sıcaklık hakkında bilgi veren otomatik sensörler içermektedir. Sistem, 1998 yılının mayıs ayında otomobil yolunun bir kısmının yeniden yapılması sırasında kaldırılmış fakat sistemin uygulandığı kaplama kısmı aradan geçen 3,5 yıl içerisinde durabilite, güvenlik, performans ve ekonomiklik

bakımından test edilmiştir. 21,3x29,6 m (70x97 feet) boyutunda ısıtılmış bir alanı kapsayan tasarımda, 7 adet kablo 4,9 m (16 feet) aralıklarla otomobil boyunca yerleştirilmiş ve uygulanan 120 Volt'luk elektrik ile Snowfree® uygulanan kısımda karın eridiği görülmüştür (Şekil 2.13). O'Hare'de uygulanan iletken kaplama kısmı, sıcaklığın -100 F'a (-12°C) ulaştığı 4 kış mevsimi ve bazı günler sıcaklığın 100 F'ı (37,8°C) aştığı 3 yaz mevsimi süresince denenmiş ve bu süre içerisinde çeşitli çevresel ve iklimsel gerilmelere maruz kalmıştır. Uçak trafik seyirlerine dayanılarak yolun 200.000'den fazla uçak hareketine maruz kaldığı belirlenmiştir. Isıtılmış kısım üzerinde asfalt kaplamanın diğer kısımlarında görüldenden farklı önemli çatlaklar gözlenmemiştir. 1995 yılının mayıs ve aralık aylarında, uçak trafiğinden kaynaklanan tekerlek izi veya ötelenmeden dolayı kaplama profilinde oluşan deformasyonları belirlemek amacıyla profilometre testleri uygulanmıştır. Profil grafikleri, ısı dalgalarının uygulandığı periyot süresince yüzeyde herhangi bir hareket olmadığını göstermiştir. 1998 yılında sistem kaldırılincaya kadar, kaplamanın görsel denetimine devam edilmiş ve önceki verilerle birleştirilerek iletken asfaltın geleneksel karışımlarla benzer durabiliteye sahip olduğu belirlenmiştir (Derwin vd. 2003). Ayrıca sistem çalıştığı sürece yapılan ölçümler sonucunda yüzeyde insan sağlığını ve çevreyi önemli oranda etkileyecek elektrik kaçağının bulunmadığı belirlenmiştir. Sistemin uygulanması ile çevresel zararın azaltılması ve güvenliğin artırılmasının yanı sıra maliyetin azaltılması bakımından da fayda sağlanmaktadır. Sistem tasarımında grafit içeren bir asfalt üstyapı, bakır kablolar, trafolar ve anahtar takımları normal asfalt kaplamaya göre ilk yapım maliyetini 1ft² (0,09 m²) başına yaklaşık 25 \$ arttırmıştır. Fakat her bir uçuş iptali için yaklaşık 4.000 \$, her bir sapma için 15.000 \$ ve her bir erteleme için dakikada 50 \$ zarar edildiği göz önüne alındığında sistemin kısa bir sürede ilk yatırım maliyetini amorti edeceği söylenebilmektedir. 45 watt'lık maksimum güç uygulanması durumunda kaplamadaki 1ft²lik alanı ısıtmak için saatte 2.400 \$ harcamaktadır. 1999 yılında O'Hare Havaalanında sadece kar temizleme işlemi için 15 milyon \$'ın üzerinde bir harcama yapılmıştır. Bu veriler sistemin ekonomik açıdan orta vadede kendi kendini amorti ettiğini göstermektedir (Derwin vd. 2003).

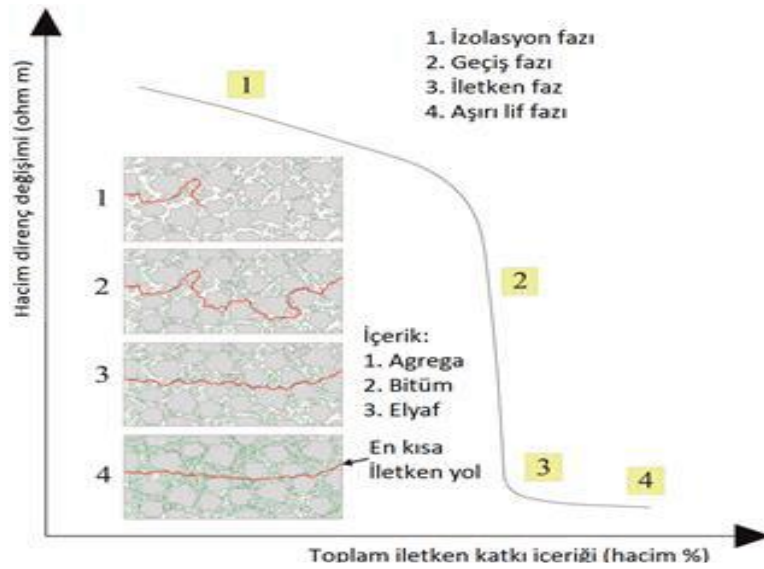
Wu vd. (2005) yaptığı çalışmada asfalt betonun özdirencinin %8 (hacimce) karbon lifi eklenmesiyle 100 Ω .m 'nin altına düştüğünü göstermişlerdir. İletken asfalt karışımı

üretmek için öz direncin $100 \Omega.m$ altına düşmesi gerekmektedir. İletken asfalt karışımı, $100 \Omega.m$ bir direnç ile üretmek için, Huang vd. (2006), $8 \mu m$ çapında ve $6 mm$ uzunluğunda çelik liflerin %2.3'ünü hacimce bitümlü bağlayıcıya eklemiştir. Garcı'a vd. (2009) 635 ila $889 \mu m$ arasında değişen bir çapa sahip çelik yünün % 6'sını (hacimce) bitümlü bağlayıcıya eklemiştir. Bu araştırmalar, daha küçük çaplı çelik liflerin asfalt karışımının iletkenliğini arttırmada daha etkili olduğunu ve karbon lifi (az miktarda) ve karbona dayalı tozların (büyük miktar) kombinasyonun, daha düşük öz dirençli İAB üretmek için maliyet-etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir. İletken malzemelerin şekli ve karakteri nedeniyle asfalt beton iletkenliğinin geliştirilmiş mekanizması şu şekilde tanımlanmıştır: Tozlar, zincirler halinde kısa menzilli temas sağlar ve lifler ise uzun menzilli bir köprüleme etkisi ve kısa devre etkisi sergilerler. (Wu vd.2002). Wu vd. (2005) 'a göre yüksek en-boy oranına sahip olduğu için, lif toz kümelerini birleştirerek iletken yolların uzunluğunu azaltır ve sonuç olarak daha düşük bir iletken toz içeriğinin malzemeyi iletken hale getirmek için yeterli olacağını belirtmişlerdir.

Garciavd. (2009) iletken asfaltın hazırlanması için üç tip iletken bileşenden bahsetmiştir. Bunlar tekli bileşen sistemi (iletken toz veya lif), karışık bileşen sistemi (iletken lif ve tozun her ikisi bir arada) ve çoklu bileşen sistemidir (karışık iletken bileşen maddeleri ve iletken agrega). Basit bileşen sisteminde, BSK içinde dağılmış çok sayıda bağlantısız kısa iletken köprü kümeleri bulunmaktadır. Farklı bir deyişle, iletken dolgu maddelerin sadece küçük bir kısmı etkin iletken köprüler oluşturmuştur ve bunların çoğu asfalt karışımının etrafına dağıldığı belirtilmiştir.

Garciavd. (2009) İletken lifleri, elektronlar için kısa yollar olarak düşünmüşlerdir. Başlangıçta, karışıma az sayıda lif eklendiğinde, iyi dağıtıldığı düşünülürse, birbirlerinden tamamen izole olurlar. Eğer o zaman numunenin elektrik öz direnci ölçülürse, BSK içerisindeki mastik harcına göre biraz daha düşük olduğu tespit edilir. Bunun nedeni, elektronların bitümün içerisinde yüksek elektriksel dirençle karşılaşmasıdır, fakat birdenbire yollarını kolaylaştıran elektriksel iletken liflere rastladıklarında iletimlerinin kolaylaştığı düşünülmektedir. Şayet karışıma daha fazla lif eklenirse, elektronların iletken yollarının sayısı artar ve öz direnç azalmaya başlar.

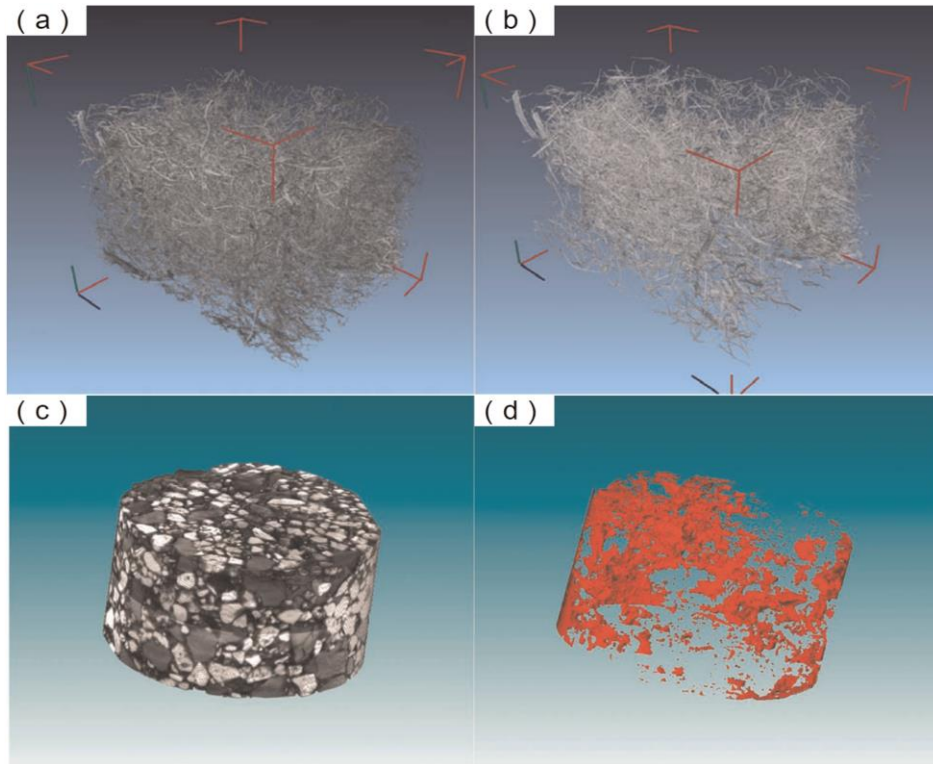
Sonunda, numunenin her iki ucunu da bağlayacak kadar çok lif olduğundan ve elektronların artık bitümün üzerinde çalışmasına gerek kalmayacaktır. Bu ilk iletken yol çok dolambaçlı bir yol olacaktır. Kısa bir lif miktarı, bu iletken yol boyunca köprülerin eğilmesi, düzleştirilmesi ve iletkenliği çok artırmak için daha fazla çalışacaktır. Mantık olarak karışımın içerisinde iletken yollar en kısa boya ulaştığında karışıma daha fazla iletken lif ilave edilmesi karışımın özdirencini düşürmeyecektir (Şekil 2.11). Bu düşüncelerin ardından, karışımın özdirencini düşürme konusunda liflerin filler maddesinden daha etkili olduğu mantığıdır: Lifler daha uzun iletken yollar oluştururken, aynı hacimdeki iletken filler maddesi karışımın içerisinde her yere dağılır (Garcia vd. 2009).



Şekil 2.11 Toplam iletken katkı içeriği ve hacim direnci değişimi grafiği (Garcia vd. 2009).

Literatürde, iletken asfalt hazırlanması için üç tip katkı kompozisyonu kullanılmıştır: tek tip katkı (İletken toz yada tek elyaf), karışık katkı sistemi (Hem iletken toz hemde elyaf), ve multikarışım katkı sistemi (Karışık toz ve elyafla birlikte iletken agregat). Basit dolgu sisteminde, iletken katkı içeriği kritik değerin ötesinde olsa bile, hala asfalt beton içine dağılmış birçok kopuk, kısa menzilli iletken kümeleri bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, iletken dolgu maddesinin sadece çok küçük bir bölümünün etkili iletken yollar oluşturduğu kalan kısmın çoğunun asfalt karışıma gelişi güzel dağıldığı görülmüştür (Garcia vd. 2009). Çalışmalarda, karbon lifi ve grafit asfalt karışımı içinde, iletken dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Yüksek en-boy oranı nedeniyle elyaf, daha

düşük bir toz içeriği ile toz kümelerini birbirine bağlar ve iletken yolların uzunluğunu azaltır. Asfalt betonun iletkenliği, çelik cürufun agregaya ikame edilmesiyle geliştirilebilir. Bunun nedeni iletken çelik cürufun, iletken yolun uzunluğunu azaltması ve asfalt betona yapısal bir iletken ağ oluşturmastır. (Zhang 2010). Resim 2.4 multi karışım İAB'nin içeriğindeki çelik yünü, çelik cürufu ve grafitin bilgisayarlı tomografilerini göstermektedir. (Garcı'a vd. 2009, Wu vd. 2013).



Resim 2.4 İAB tomografi görüntüleri : (a) Tüm elyaf kısımlar, (b) sadece bağlı elyaflar, (c) Agregaya ve çelik cürufu ve (d) bağlayıcı içeriği (Garcı'a vd.,2009, Wu vd. 2013).

Asfalt betonu numunesi boyunca yeterli bir uzunlukta iletken bir yola sahipse, yalıtkandan bir iletkene dönüştürülebilir. Bu durumda böyle bir iletken yol etkili nitelikte olmak zorundadır. Bu nitelik eşik etkisiyle yani performans iletimini göstermenin basit bir yöntemi olan Perkolasyon teorisi ile açıklanmıştır. Perkolasyon teorisinde elektrik öz dirençteki büyüklüğün, liflerin yeterli hacminde olması durumunda lif içeriğinin artması ile şiddetle azaldığını gözlemlemek mümkündür. Bu verilere dayanarak, iletken katkı içeriği değişimleri altındaki dirençteki değişiklikler dört aşamaya bölünebilir.

1. Yalıtım evresi, liflerin ayrıldığı yerde, test örneğinin her iki aşaması arasında iletken bir yol bulunmadığı; Burada sistemin öz direnç asfalt betonu ile aynı olacaktır.

2. Geçiş evresi, burada ilk perkolasyon yolları oluşur ve öz direnç çok hızlı düşer. Bu aşamada, numuneler iletkenlidir ve lifler temas halindedir; Bu faz elektrik direncinde minimumda biter.

3. İletken evre, burada lif karışımındaki maksimum dağılma seviyesine ulaşır; Bu her kum-bitüm oranı için lifin optimum içeriği olarak düşünülebilir.

4. Son olarak, aşırı lif evresinde, lif miktarı arttıkça iletken yolların uzunluğu daha fazla azalmaz. Bununla birlikte lif miktarı arttıkça kompozit malzemenin öz direncinde çok hafif bir azalma görülebileceği belirtilmiştir. En kısa iletken yola ulaşıldığında, iletken parçacıkların hacmindeki artış iletkenlikte bir artış oluşturmaz. Aslında, bu evre, karıştırma işlemi sırasında kolaylıkla ayırt edilebilir, çünkü lif hacmi çok yüksektir, böylece karıştırmak imkânsızdır ve lif topaklanmaları ortaya çıkmaya başlar (Garcia vd. 2009).

Garcia vd. (2009) yaptığı çalışmasında iletken olarak kullanılan lifin belirli bir hacmi için artan kum-bitüm oranı ile iletkenliğin azalacağını belirtmiştir. Bunun nedeni, karışım içindeki lif hacminin üzerinde bitüm hacmi veya çimento macunu ile ters orantılı olmasıdır. Buna ek olarak, lif hacmini düşürüldüğüne optimum kum-bitüm oranı büyür ve direnç aşağıya düşer, iletken olmayan bir malzemeye dönüşür. Bu olay liflerin yalnızca büyük agrega çevresindeki boş alanlarda bulunması nedeniyle olur. Bu alanlar çok büyük ve liflerin hacmi yetmiyorsa, basitçe süzülmez; Aynı, yalıtım evresi esnasındaki gibi kum-bitüm oranını sabitleyerek lif hacmini değiştirerek de gerçekleşir. Bu lifler temas etmeye başladığında, geçiş Aşamasına benzer bir olay olur ve direnç minimuma ulaştığında İletkenlik evresi olarak düşünülebilir. Kum-bitüm oranını optimumu aştığında, karışımla çalışılması zorlaşır ve liflerin dağılımı homojen olmaz. Liflerin düzgün dağılımı için yeterli bitüm yoktur, lif topaklanmaları ortaya çıkar ve öz direnç katlanarak büyür. Ayrıca, bu fazda liflerin ilavesi iletkenliği arttırmaz.

Liu vd. (2010) yaptıkları çalışmada induksiyon ısıtması için kullanılan elektriksel iletken katkı maddelerini (çelik lifler ve çelik yün) poroz asfalt betonuna ilave edilerek numune hazırlamışlardır. Çalışmanın temel amacı poroz asfalt betonun elektrik iletkenliğini ve dolaylı gerilme mukavemetini incelemek ve induksiyon ısıtması ile ısıtılabilceğini kanıtlamaktır. Gözenekli asfalt betonu elektriksel olarak iletken hale getirmek için, küçük çaplı uzun çelik yün, daha büyük çaplı kısa çelik lifler kullanılmıştır. Kısa uzunlukta ve büyük çaplı çelik lifler daha iyi güçlendirme kapasitesine sahiptir. Çelik yün ilaveli gözenekli iletken asfalt betonunun induksiyon ısıtması ile kolaylıkla ısıtıldığı da kanıtlamıştır. En iyi iletkenlik, iyi bir induksiyon ısıtma hızı ve kabul edilebilir bir dolaylı gerilme mukavemeti elde etmek için, poroz asfalt betonda çelik yünün optimum miktarı % 10 (Bitümün hacimce) olarak önerilmiştir. Asfalt betonunun kendi kendine iyileştirme kapasitesinin, induksiyon ısıtması sırasındaki sıcaklığın artmasıyla gelişeceği düşünölmüştür.

Garcia vd. (2009) yaptıkları çalışmada, asfalt harçların iletkenliğini, iletken katkı maddeleri ve lif ilavesi ile incelemiştirlerdir. Lif içeriği, kum-bitüm oranı, iletken katkı maddeleri ve lif kombinasyonunun asfalt harçı öz direncine etkisi araştırılmıştır. Grafit ve çelik yünü kullanılmış ve bu tip karışımların induksiyon enerjisi ile ısıtılabilceğini kanıtlamışlardır. Perkolasyon eşiğinin ulaşmanın, karışıma filler maddeleri ilave etmekten çok, elektriksel iletken özelliği olan liflerin ilavesi ile sağlandığını belirlenmişlerdir. Buna ilaveten perkolasyon eşiğinin, kum-bitüm oranı ve lif içeriği hacminde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Her bir kum-bitüm oranı için optimum bir lif oranı mevcuttur, bunun üstündeki oranlarda karışımı oluşturmak zordur ve elektrik öz direncin eksponansiyel olarak artacağını belirtmiştir. Bilgisayarlı tomografi kullanarak karışımın içindeki lifler görselleştirilmiştir. Son olarak, araştırmanın geçerliliği için üç farklı numune induksiyonla ısıtılmış ve sıcaklık farklılıkları ölçölmüştür. Sonuç olarak düşük öz dirence sahip numunelerin yüksek ısınma değere sahip olduğu belirtilmiştir.

Liuvd. (2010) yaptıkları çalışmada induksiyon ısıtması için kullanılan elektriksel iletken katkı maddelerini (çelik lifler ve çelik yün) poroz asfalt betonuna ilave edilerek numune hazırlamışlardır. Çalışmanın temel amacı poroz asfalt betonun elektrik

iletkenliğini ve dolaylı gerilme mukavemetini incelemek ve indüksiyon ısıtması ile ısıtılabilirliğini kanıtlamaktır. Gözenekli asfalt betonu elektriksel olarak iletken hale getirmek için, küçük çaplı uzun çelik yün, daha büyük çaplı kısa çelik lifler kullanılmıştır. Kısa uzunlukta ve büyük çaplı çelik lifler daha iyi güçlendirme kapasitesine sahiptir. Çelik yün ilaveli gözenekli iletken asfalt betonunun indüksiyon ısıtması ile kolaylıkla ısıtıldığı da kanıtlanmıştır. En iyi iletkenlik, iyi bir indüksiyon ısıtma hızı ve kabul edilebilir bir dolaylı gerilme mukavemeti elde etmek için, poroz asfalt betonda çelik yünün optimum miktarı %10 (Bitümün hacimce) olarak önerilmiştir. Asfalt betonunun kendi kendine iyileştirme kapasitesinin, indüksiyon ısıtması sırasındaki sıcaklığın artmasıyla gelişeceği düşünülmüştür. Ancak, bu gözenekli asfalt betonunun iyileştirici etkisini tespit etmek için ilave çalışmalar yapılmalıdır. Uzun çelik yünü tip 000'ın, elektriksel olarak iletken olan poroz asfalt betonu yapmak için kısa çelik lifi tip 1'den daha iyi olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, kısa çelik lifler çelik yünden daha güçlü mukavemet kapasitesine sahiptir.

Livd.'e göre (2011) karayollarında kar ve buz eritmek için bir elektro termal eleman olarak iletken asfalt betonu (İAB) kullanmak, en verimli, kullanışlı, güvenli ve çevreci muhafazakar yöntemlerden biridir. Araştırmacıların yaptığı çalışmada bileşenlerin İAB üzerindeki elektriksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Sonuçlar, İAB'un elektrik performansının iletken filler içeriği, iletken filler maddesi ve bitüm / agrega oranına bağlı olduğunu göstermektedir. Kar ve buzun erimesi işlevini gerçekleştirmede kullanılan İAB hazırlamak için en iyi yöntem, karıştırıcı-filler maddesi olarak hem grafit tozu (298 # ölçekli grafit) hem de kısa karbon fiberleri (CF) kullanmaktır. Bitüm/agrega oranı 8.0 olduğu için, grafit içeriği ağırlıkça %50'dir ve CF içeriği ağırlıkça %2.5 ile %4.0 arasındadır, İAB'un direnci yaklaşık 102 cm'ye eşit veya daha azdır. Marshall'ın kararlılığı ve İAB'un akış değeri de ulusal standartlara uygundur.

Tuzlama gibi geleneksel buz eritme yaklaşımları çevreyi kirletir ve betondaki güçlendirici çelik çubukları aşındırır. Son yıllarda ortaya çıkan karbon nano lif malzeme elektriksel iletkenliği geliştirmesi, düşük voltajda yüksek ısıtma kapasitesi, yüksek dayanım ve özellikle de korozyona karşı doğal dayanıklılık gibi bir takım özelliklere sahiptir. Bu malzeme, elektrik dirençli buz eritme sistemlerinde ısıtma elemanı olarak

mükemmel bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada araştırmacılar karbon nano lif ısıtma elemanlarını içeren bir buz eritme sisteminin etkinliğini değerlendirmeyi ve çeşitli kilit parametrelerin bu tür bir buz eritme sisteminin performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş, deney sonuçlarıyla onaylanarak karayolu koşullarına uygulandığında bu tür bir buz eritme sisteminin performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Dikkate alınan faktörler arasında hava sıcaklığı, rüzgar hızı, kaplama ve yalıtım katmanı kalınlıkları ve ısıtma girişi yer almaktadır. Sonuçlar, önerilen sistemin karayolunda buz çözme için çok etkili olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte çalışmanın sonuçlarının fizibilitesini ve etkinliğini doğrulamak için yerinde yapılacak araştırmalara ihtiyaç vardır (Zhou vd.2012)

Qun vd. (2013) iletken asfalt betonun özdirencini iki elektrot yöntemiyle belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Temas direncinin etkisi nedeniyle, ölçülen direnç her zaman gerçek özdirence eşit değildir. Gerçek özdirenci belirlemek için, ölçülen özdirenç, temas direnci ve özdirenç ile doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Ardından, değişik grafit içerikli altı numune formülasyonunu doğrulamak için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, hattın eğiminin temas direncini temsil ettiğini ve kesişimin gerçek direnci gösterdiğini göstermektedir. Grafit içeriğinin temas direnci ve gerçek özdirenci üzerindeki etkileri de ortaya çıkmaktadır. Sonuçlar, grafit içeriği %3'ün üzerinde olması halinde, direnç ölçümünün doğruluğu üzerindeki temas direncinin etkisinin daha ciddi olacağını göstermektedir. Bundan dolayı, temas direnci hesaba katılarak asfalt betonun özdirencini belirlemek gerektiğini belirtmişlerdir.

Wu vd. (2013) elektriksel iletken asfalt betonunun (İAB) özelliklerini karışıma elektriksel iletken katkı malzemeleri ilave ederek analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, karışık iletken madde kombinasyonunun, elektrik iletkenliğinde tek tip iletken madde ilavesine göre kayda değer avantajlara sahip olduğunu göstermiştir. Hem İAB'nin, hem de doğru akım yoluyla kar eritmek için etkili bir yöntem sağladığını ispatlamak için laboratuvar ve saha testleri yapılmıştır. Ek olarak, kızılötesi görüntüleme teknolojisi sıcaklık alanı dağılımı da kullanılmıştır. Ayrıca, sıcaklık, voltaj ve sıcaklık dolaşımının İAB direnci üzerine olan etkileri iletken yolların kırılması ve yeniden inşa edilmesi ile

açıklanmıştır. Son olarak, X-ışınli bilgisayarlı tomografi, karışık dolgu maddeleri için iletkenlik mekanizmaları hakkında bilgi vermiştir. İAB'de oluşturulan iletken zincirin büyük oranda asfalt harcı içindeki iletken dolgu maddesinin dağılımına bağılı olduğu gösterilmiştir.

Liu vd. (2014) karbon fillerin iletken asfalt malzemelerindeki elektriksel ve kaplama üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada asfalt malzemelerin elektrik ve yol özellikleri grafit ve karbon lifi gibi farklı iletken malzemeler kullanılarak değiştirilmiştir. Malzeme özellik değışiklikleri, DMA (Dinamik Makine Analizi), tekerlek izi, Marshall stabilite, yarma deneyleri ve elektriksel özelliğı karakterize etme ile ilgili deneylerle incelenmiştir. Sonuçlar, grafit muhtevası % 30'dan az olduğunda, depolama katsayısında ve düşük sıcaklıkta asfalt bağlayıcıların kayıp modülünde azalmalar olduğunu göstermiştir. Grafit içeriğı % 40'a eşit olduğunda modül maksimum değerlere ulaşmıştır. Ek grafit, asfalt bağlayıcıların depolama modülünü ve kayıp modülünü azaltmıştır. Artmış grafit içeriğı ile tepe faz açısı, cam geçiş sıcaklığında bir artış gösteren düşükten yüksek sıcaklığa kaymıştır. Cam geçiş sıcaklığı, asfalt bağlayıcı ve asfalt karışımının düşük sıcaklık özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Asfalt karışımına ağırlıkça % 40 oranında grafit ve % 0,3 karbon fiber eklenmesi ile asfalt karışımının direnci birden 835 Ω 'a düşmüş, Marshall stabilitesi % 4 artmış, bölünme mukavemeti % 18 artmış, dinamik istikrar ise % 78 artmıştır. Bununla birlikte, aşırı karbon lifi veya çok az karbon lifi, kaplama mukavemetini arttırmamıştır. Dolaylı gerilme deneyinde, kompozitlerin özdirençlerinin evrim süreçlerinin dört periyoda sahip olduğu bulunmuştur: tersine çevrilebilir bir algılama süreci, bir denge dönemi, sürekli artan bir periyod ve keskin bir artış periyodudur. Dört periyot malzemenin farklı iç yapılarına tekabül eder, bu da iletken asfalt karışımında hasar ve çatlakların kendi kendini izlemesinin mümkün olduğunu gösterir.

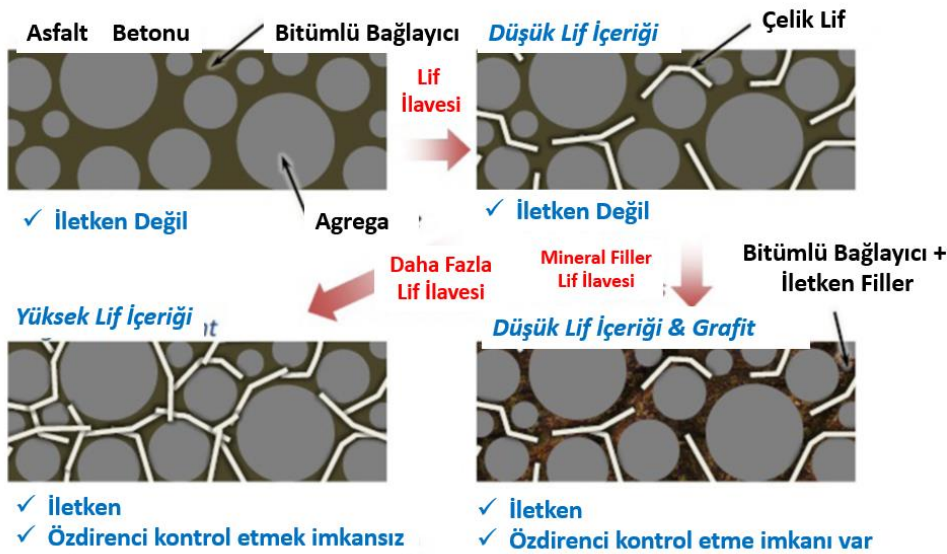
Elektriksel iletken asfalt betonu, kendi kendini iyileştirme, kendini algılama ve deformasyon gibi çeşitli çok fonksiyonlu uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. Araştırmacılara göre (2014), elektriksel iletken asfalt kompozitlerin tüm uygulama alanlarını kullanabilmek için, asfalt karışımının özdirencini kesin olarak kontrol etmek gerekir. Birincil iletken katkı maddeleri olarak iletken lifleri kullanan

önceki araştırmaların çoğu, daha hassas iletkenlik kontrolünü engelleyen, genellikle, sızma eşiği olarak bilinen, yalıtıktan iletken faza ani bir geçişi gözlemlemiştir. Asfalt betonunun elektrik iletkenliğini yalıtıktan iletken faza yumuşak bir geçişle kontrol etmeyi amaçlayan araştırmacılar, bu çalışmada alternatif bir iletken katkı maddesi olarak grafit tozlarını seçmişlerdir. Farklı partikül şekline, büyüklüğüne ve kaynağına sahip olan dokuz tip grafit, asfalt bağlayıcılarla karıştırılmış ve iletkenlik kazandırma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, araştırma ekibi iki tip grafit seçmiş ve asfalt betonunun elektrik iletkenliği üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Ekip ayrıca agrega geçişi, bağlayıcı içeriği ve bağlayıcı tipinin etkilerini de inceledi. Sonuçlar, asfalt mastiğin elektrik iletkenliğinin grafit tipine duyarlı olduğunu göstermiştir. Araştırmacılara göre doğal pul grafit, sızma eşiğini hafifletmek için etkilidir ve dolgu maddelerinin bir kısmını grafit ile değiştirerek yeterince yüksek bir iletkenlik elde edilebilir (iletkenlik 10⁻⁶ ila 10⁻² / Ω cm arasında değişmektedir). Sonuçlar ayrıca, bağlayıcı tipinin, karışımın iletkenliğinde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermiş, ancak toplam derecelendirme, hacim özdirencinde yaklaşık iki kat farklılık meydana getirmiştir. İletken asfaltın mekanik performansı da pratik saha uygulamaları için önemli bir faktördür. Dolaylı çekme deneyi sonuçları, grafit ilavesinin dolaylı çekme mukavemetini yüzde 41'e kadar arttırdığını göstermiştir. Bu çalışmadan elde edilen elektriksel ve mekanik veriler, asfalt betonunun olası çok işlevli uygulamaları için gerekli olan uygun elektrik iletkenliğini sağlamak için grafit tipi ve asfalt karışım tasarımının seçimi hakkında temel bilgiler sunmakta olup, bu da sürdürülebilir kaplamalar için teknik yeniliklere yol açacaktır (Park vd. 2014).

Vo vd. (2015) araştırmalarında iletken dolgu maddeleri kullanarak termal iletkenlik, termal difüzyon ve asfalt karışımlarının özgül ısı gibi termal özelliklerin iyileştirilmesine ve kaplamalarda tek boyutlu (1-D) simülasyon ile iletim performansının araştırılmasına odaklanmıştır. Bu çalışmada kullanılan farklı asfalt karışımları, öğütölmüş karbon lifi, kıyılmış karbon lifi, pul grafit tozu ve sentetik grafit tozu ile ayrı ayrı modifiye edilmiştir. Karbon lifi ve grafitin uygun tür ve miktarını elde etmek için, grafit ve karbon lifi ile modifiye asfalt karışımların özellikleri ölçölmüş ve iletkenlik özellikleri belirlenmiştir. Kaplama yapısında yer alan iletkenlik performansını kavramak için sonlu farklar yöntemi kullanılarak tipik bir kaplama

tasarımı üzerinde 1-D simülasyon gerçekleştirilmiştir. Termal deney ve analiz sonuçları, karbon liflerin ve grafitin asfalt karışımlarının termal özelliklerini temel olarak arttırdığını göstermiştir. Simülasyon sonuçları, her iletken dolgu maddesi ile ilişkili güvenilir ısı iletimi olduğunu göstermiştir.

Wang vd. (2016) iletken lif ve filler içeren asfalt betonlarının elektriksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Elektriksel iletken asfalt betonu, çok işlevli uygulamaları cevap verme potansiyeline sahiptir. Araştırmacılara göre bu tip bir asfalt betonunun tasarlanması, asfalt betonunun elektrik ve mekanik performansını dengelemeye ihtiyaç duyar. Çalışmanın amacı asfalt betonunun mekanik özelliklerinden ödün vermeden elektrik iletken asfalt betonunu tasarlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, elektriksel iletken katkı maddelerinin (çelik lif ve grafit) laboratuvarında ölçülen asfalt betonunun elektriksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, elyafın tek lif çekme testinden çatlağa geçme potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için kritik gömülü çelik lif uzunluğunun 9.6 mm olduğunu göstermektedir. Hem çelik lif hem de grafit, yeterince düşük özdirençli iletken asfalt betonu üretebilir, ancak asfalt betonunun iletkenliğini iyileştirmek için çelik elyaf grafitten çok daha etkilidir. Çelik elyaf ve grafitten oluşan bir kombinasyon, asfalt betonunun özdirençini daha geniş bir aralıkta hassas bir şekilde kontrol edebilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Asfalt betonunun elektriksel özdirençini değiştirmek için strateji (Wang vd. 2016).

Ayrıca, optimize edilmiş miktarda çelik elyaf içeren asfalt betonu, Marshall Stabilitesinde, tekerlek izi deformasyon direncinde, dolaylı gerilme mukavemetinde ve düşük sıcaklık çatlama direncinde, geleneksel asfalt betonuna göre önemli bir iyileşme sağlamıştır. Grafit eklenmesi, kararlı stabilite ve düşük sıcaklık performansı ile kalıcı deformasyon direncini artırabilir. Çelik lifler ve grafit içeren asfalt betonu, çelik elyaf takviye ve sertleştirme etkisini zayıflatır, ancak yine de geleneksel asfalt betonuna kıyasla mekanik performansta önemli bir gelişme gösterir.

Gürer ve Gürgöze (2017), Karbon lifli iletken asfalt betonun özelliklerini araştırmışlardır. Son yıllarda elektriksel iletken asfalt betonları kaplamanın ısıtılmasını sağlayarak karayollarında buzlanma önlemek amaçlı olarak kullanılmaktadır. Elektriksel iletkenlik, asfalt betonuna eklenen iletken malzeme ile sağlanır. Asfalt betonunda iletkenlik sağlamada çok çeşitli maddelerin kullanıldığı literatürden bilinmektedir. Araştırmacıların yaptığı çalışmada 5, 10 ve 15 mm uzunluğunda ve ağırlıkça % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarında karbon lifi (CF) katkılı asfalt betonu numuneleri üretilmiştir. Sonuç olarak asfalt betonunun elektriksel iletken bir malzemeye dönüştürmede karbon lifinin oldukça etkili olduğu, karışımlardaki karbon liflerinin miktarı arttığında, numunelerin özdirençlerinde önemli bir azalma tespit edildiği, 5 mm uzunluğundaki karbon liflerinin karışım içinde daha iyi iletken yollar oluşturma yeteneğine sahip olduğu, tüm numunelerde karbon liflerinin oranı ağırlıkça % 0.2 ve daha yüksek olduğunda, tüm örneklerin özdirenç değerlerinin önemli ölçüde azaldığı, en yüksek sıcaklık artışının % 0.5 ve 5 mm uzunluğunda karbon lifi eklenmiş numunelerde görüldüğü bildirilmiştir.

Geleneksel asfalt kaplamalar oldukça düşük iletkenlik değerine sahiptir. Vo vd. nin (2017) yaptığı çalışmada iletken dolgu maddesi içeren asfalt karışımların termal özelliklerinin gelişmesine ve iletkenlik performansının iki boyutlu simülasyon programı ile araştırılmasına odaklanılmıştır. Ayrıca karışım içerisindeki iletken dolguların yapısını gözlemlemek için asfalt karışımların mikro yapısı son derece yüksek bir büyütme ile analiz edilmiştir. Tüm bunlara ilaveten dolaylı çekme dayanımı da (IDT) araştırılmıştır. Çalışmada doğranmış karbon lifi, kesilmiş karbon lifi ve grafit tozu ile modifiye edilmiş asfalt karışımlar kullanılmıştır. Ayrıca farklı oranlarda karbon lifi ile

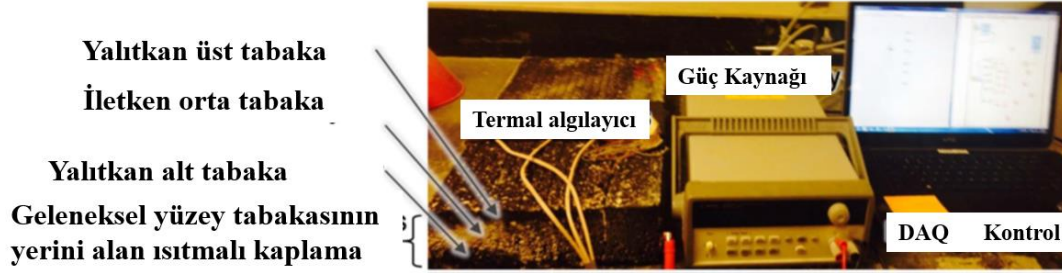
karıştırılmış olan grafit filler etkisi de değerlendirilmiştir. Karbon lifi ve grafitin uygun türü ve miktarını elde etmek için modifiye asfalt karışımların termal özellikleri, iletkenlik etkilerini değerlendirmek için, ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Isıl iletkenlik deneyleri ve analiz sonuçları karbon lifleri ve grafitin asfalt karışım numunelerinin ısıl iletkenlik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. İki farklı iletken maddenin kombinasyonundan oluşan fillerin tek grafit veya karbon lifine göre üstünlükleri olduğu görülmüştür. Simülasyon sonuçları her bir iletken filler maddesi ile ilişkili makul ve güvenilir ısı iletimi ilişkisi sunmuştur. IDT deneyi, karışımlara belirli miktarda doğranmış karbon elyafı ilave edilmesinin çekme mukavemetini arttırdığını göstermiştir. Mikro analiz sonuçları grafit parçacıklarının asfalt karışımı boyunca iletken küme oluşumu gösterdiğini, karbon liflerinin ise uzun menzilli bir iletken köprü oluşturduğunu göstermiştir. Araştırmacılar uzun vadeli ve maliyet etkinliğini değerlendirmek için sahada çalışmaların yapılması gerektiğini belirmişlerdir.

Donma-çözülme döngüleri ve bitüm malzemenin yaşlanması, asfalt kaplamanın dayanıklılığını etkileyebilecek kritik faktörler olarak kabul edilmektedir. Pan vd. (2017), iletken asfalt betonlarının termal karakteristikleri ve mekanik özellikleri üzerinde yaşlanmanın ve donma-çözülmenin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Grafitli iletken asfalt betonu asfalt güneş kollektörünün (ASC) çalışabilirliğini geliştirmek suretiyle asfalt kaplamalarla ilgili bir dizi gerçekçi problemi hafifletmek için ilginç bir yöntem sağlar. Kontrol asfalt betonu numuneleri, İAB ile aynı agrega gradasyonu ve hacim kompozisyonu ile hazırlanmıştır. Asfalt betonun ısıl özellikleri, Isı Sabitleri Analizatör cihazı tarafından incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, donma-çözülme etkisinin İAB örneklerinin hacim genişmesine ve mukavemet bozulmasına yol açacağını göstermiştir. Donma-çözme testi sırasında, termal iletkenlik ve İAB'un özgül ısı azalırken, termal difüzyivite de buna bağlı olarak artmaktadır. Yaşlanma süreci, iletken asfalt betonunun nem direnci, düşük sıcaklık ve yorulma özelliklerini bozsa da, termal iletkenlik, termal difüzyivite ve özgül ısı açısından normal ve yaşlanmış numuneler arasında önemli bir fark görülmemiştir. Asfalt betonu ile kıyaslandığında grafit kullanımı, iletken asfalt betonunun yaşlanma karşıtı özelliklerini iyileştirmiştir.

Elektrik ileten asfalt beton, kar ve buzun giderilmesi, kendini algılama, kendini iyileştirme ve enerji üretimi olmak üzere çeşitli ve çok fonksiyonlu uygulamalar için güçlü bir potansiyele sahiptir. Rewvd. (2017) sekiz adet grafit ve karbon siyahı içeren toz tipi karbon bazlı katkı maddelerinin asfalt karışımlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ham maddenin fiziksel, elektriksel ve mekanik özellikleri, asfalt mastiği ve asfalt betonu elektriksel iletkenliğe odaklanılarak deneysel olarak değerlendirilmiştir. Asfalt mastiği üzerinde yapılan deney sonuçları göstermiştir ki asfalt mastiğinin elektriksel iletkenliği üzerinde grafitin pul tipi ve parçacık şekli oldukça etkilidir. Mastik deney sonuçları esas alınarak, iki pul tipi grafit seçilmiş ve asfalt betonu örneklerine ilave edilmiştir. Sonuçlar, yeterince yüksek bir elektriksel iletkenliğinin, asfalt betonuna hacimce %2-3 oranında filler maddesi grafit katılmasıyla sağlanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, pul grafit eklenmesi, asfalt betonunun çekme mukavemetini %40'a kadar arttırmıştır. Çalışmanın bulguları, çok işlevli asfalt betonu uygulamaları için karbon bazlı toz tipi iletken katkı maddelerinin kullanılmasında temel sağlayacaktır.

Rewvd. (2018) 'ne göre kaplamalardaki kar ve buz, sürücülerin hareketliliğini ve güvenliğini olumsuz yönde etkileyecektir. Araştırmacılar maliyet etkin ve kirlilik içermeyen bir çözüm olarak, grafit filler içeren çok işlevli iletken asfalt beton kullanılarak ısıtılmalı bir kaplama sistemi önermişlerdir. Bu çalışmanın amacı, ısıtılmalı kaplama için verimli bir yapısal tasarım bulmak ve çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini değerlendirmektir. Hedefler üç aşamalı bir metodoloji ile sağlanmıştır: bir tezgah ölçekli kaplama numunesi ısınma testi ve malzeme özelliklerinin ölçümü, sabit olmayan bir durumlu ısı transfer modeli kullanılarak bir parametrik çalışma kümesi ve yaşam döngüsü değerlendirmesinin yapılması. Isı transfer analizi sonuçlarına dayanarak, enerji verimliliğini maksimize eden iletken tabakanın yeri ve kalınlığı önerilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları, ısıtılabilen kaplamanın pratik ve sürdürülebilir uygulamalarını üç sütunlu perspektiften karşılayarak, başlangıçtaki yüksek kurulum maliyetinin nihayetinde bakım maliyetinde önemli bir azalma ile telafi edildiği gerçeğini yansıtmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları ve bulguları, sürdürülebilir altyapı gelişimi ve bakımı için iletken asfalt betonunun daha geniş çapta benimsenmesini destekleyecektir.

İletken asfalt karışımının elektrik ısıtma kapasitesini doğrulamak için, 7.5 cm kalınlığında üç katmanlı bir asfalt levha örneği kullanılarak bir ısıtma testi yapılmıştır (Resim 2.5).

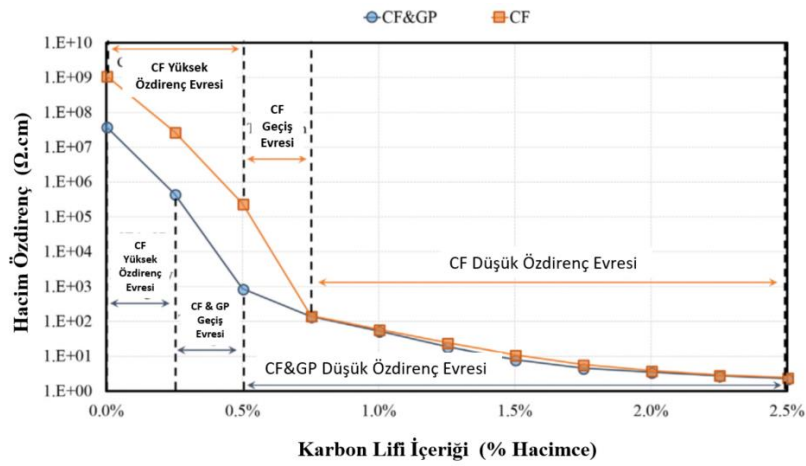


Resim 2.5 Deney düzeneği (Rewvd. 2018).

Sonuçlar, %4.8 grafit içeren 2.5 cm'lik iletken tabakaya sahip levhanın, -7°C dondurucuda 60 volt doğru akım ile yüzeyinin donma sıcaklığının üzerinde tutulması için yeterli ısıtma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, asgari yalıtım yüzey tabakasıyla kaplanmış daha ince bir iletken tabakanın, elektrik gücü için işletme maliyeti açısından daha iyi bir verimlilik sağladığını göstermektedir. Ek olarak, ısı transferi analizi, 3.000 m uzunluğunda ve 46 m genişliğinde havalimanı pisti için ısıtmalı kaldırımın günlük işletme maliyetinin 10.000 \$ 'ın biraz üzerinde olduğunu göstermektedir.

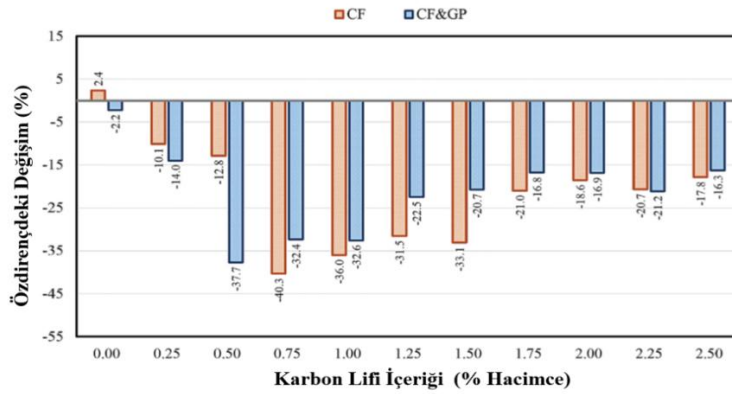
Arabzadehvd. (2018), elektriksel iletken asfalt mastiğinin ısınma potansiyelini araştırmışlardır. Bir zift-matris kompozit olan Asfalt Mastik, asfalt betonunda daha kalın agregalar tarafından oluşturulan boşlukları dolduran bitüm ve mineral filler (çok ince agregalar) içerir. Yapılan çalışmada, buzlanma giderme ve buzlanma önleme uygulamaları için asfalt mastiği karbon lifi (KL) ve grafit tozu (GT) ile modifiye edilerek tek fazlı (yalnızca KL) ve iki fazlı (KL ve GT) elektriksel iletken asfalt mastiği (EİAM) üretilmiştir. EİAM numunelerinin hacim dirençleri iki farklı sıcaklıkta ölçülmüş ve sıcaklıktaki azalmanın EİAM numunelerinin elektriksel iletkenliğini artırdığı belirlenmiştir. Hem tek fazlı hem de iki fazlı EİAM numuneleri için hacim direnç verilerinin analizi yapıldıktan sonra, tek fazlı EİAM numunelerinin ısı üretim verimliliği, optimumdan biraz daha yüksek bir iletken malzeme dozajında incelenmiştir.

Isı üretimi verimi, kızılötesi termografi (IRT) ölçümü gerçekleştirilerek, donma sıcaklığının altında değerlendirilmiştir. Şekil 2.13'ün eğrilerinde üç aşama gözlemlenebilir: yüksek direnç, geçiş ve düşük öz direnç - hepsi de EİAM'nin perkolatif davranışının bir kanıtıdır. Elektriksel iletkenlik bağlamında, iletken malzemelerin eklenmesiyle hacim direncinde düşüş (büyüklük sırasına göre) olarak algılanan davranış tanımlanır. Elektriksel iletkenlik bağlamında, perkolatif davranış, bir yalıtkan-iletken geçişi ile sonuçlanan küçük dozaj oranlarında KL gibi iletken bileşenlerin eklenmesiyle hacim direncinde ani düşüş (büyüklük sırasına göre) ve Şekil 2.13'deki geçiş aşamaları olarak tanımlanır.



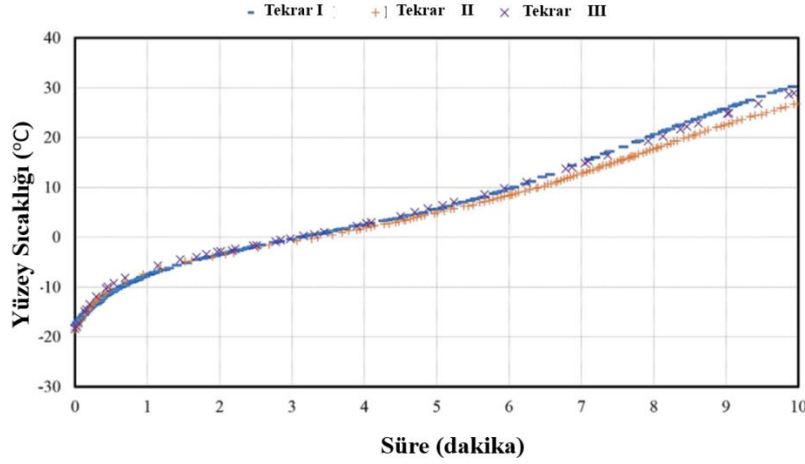
Şekil 2.13 KL içeren tek fazlı ve iki fazlı EİAM numunelerindeki elektriksel öz direnç ilişkisi (Arabzadeh vd. 2018).

Ayrıca değişken iletken bileşen içeriğine bağlı olarak, sıcaklıktaki 20 °C azalma nedeniyle hacim öz direncindeki yüzde değişim ilişkisi Şekil 2.14 de ortaya konulmuştur.



Şekil 2.14 Değişken iletken bileşen içeriğine bağlı olarak, sıcaklıktaki 20 °C azalma nedeniyle hacim öz direncindeki yüzde değişim ilişkisi (Arabzadeh vd. 2018).

Tek fazlı ve iki fazlı ECAM için optimum KL içerikleri sırasıyla % 0.75 ve % 0.5 olarak bulunmuştur ve % 5 GP'nin varlığı, KL'nin optimum içeriğinin azalmasını sağlar. Tek fazlı EİAM'nin optimum KL'i, iki fazlı EİAM'den daha düşük elde edilmiştir. Şekil 2.15 bir KL hacmi ile tek fazlı EİAM'ın ısı üretim performansını göstermektedir.



Şekil 2.15 % 1 KL ile modifiye edilen EİAM numunelerinin tekrarlanan deneyler sonrasındaki ısı oluşumunu ölçen sıcaklık grafiği (Arabzadeh vd. 2018).

%5'lik bir hacimdeki GT parçacıklarının varlığı, KL içeriği düşük olduğunda özdirençte %0.25 ve 0.5 arasında azalmaya neden olur. %5 GP eklenmesi, tek fazlı EİAM'ın düşük özdirenç bölgesinde %0.75- 2.5 KL içeriğinde hacim özdirenç azalması üzerinde çok az etkiye sahiptir. Aktif IRT analiz sonuçlarına dayanarak, seçilen KL içeriğindeki tek fazlı EİAM numunelerinin buz ve karı eritmek veya kar birikmesini ve buz oluşumunu önlemek için yeterli ısı üretme kapasitesine sahip olduğu bulunmuştur.

Gürer vd. (2018)'a göre dünyada insan nüfusunun sürekli artması ve sanayileşme sonucunda ulaşım talebi de artmakta ve özellikle de her türlü atmosfer koşullarında daha hızlı, daha konforlu ve kesintisiz seyahat günlük hayatta daha da önemli hale gelmektedir. Kış mevsiminde yol yüzeylelerinin karlı ve buzlu koşulları, seyahatlerde kesintiye, yoğun trafik kazalarına, yaralanmalara, hayat kaybına ve ciddi ekonomik maliyetlere neden olur. Son yıllarda, araştırmacılar bu tür olumsuz durumları önlemek için yeni yöntemlere odaklanmıştır. Bu yöntemler aynı zamanda aktif yöntemler olarak da bilinir çünkü buzlanmayı meydana gelmeden oluşmasını engelleyen yöntemlerdir. Aktif sistemlerle buzlanmanın önlenmesinde elektrik kablosu, iletken asfalt betonu,

hidronik (jeotermal) sistemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ısıtılan kaplama uygulamalarında kaplamanın ısı iletkenliği oldukça önemlidir. Yapılan çalışmada 5 farklı elektrik iletken asfalt betonu numunesi hazırlanmış ve numuneler üzerinde elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik ile sıcaklık artışı, sıcaklık değişimlerinin numunelerin indüksiyon etkisi ile belirlenmesi üzerine deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak kaplama uygulamaları için ısı iletkenliğin önemi vurgulanmış, asfalt betonlarının ısı özellikleri üzerinde iletken bileşenlerin önemli etkisi olduğu, karbon liflerinin elektriksel iletkenlik üzerinde oldukça etkili bir bileşen olduğu, jeotermal buzlanma önleyici sistemlerde kullanılan asfalt kaplamaların dahi ısı iletken özelliğe sahip olmaları gerektiği belirtilmiştir.

Yapılan literatür taramasından da görüleceği üzere konuyla ilgili son yıllarda önemle araştırmalar yapılmakla birlikte, ilk kez bu tez çalışması kapsamında farklı iletken bileşenlerin iletkenlik ve Marshall Stabilite-Akma zellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar optimize edilerek en iyi iletkenlik özelliklerini sağlayan asfalt betonu ve bileşenleri belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Çalışmada agrega olarak sırasıyla daha önceden Afyonkarahisar ve Kütahya Bölgelerinden temin edilmiş kireçtaşı ve bazalt kökenli, Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre aşınma tabakası Tip 3 bitümlü sıcak karışım imalatına uygun kırmataş numuneleri ve iletken bileşenler kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 İAB Karışımlarda kullanılan agrega ve iletken bileşenler.

İletken bileşen olarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metal Atölyesinden temin edilmiş Alüminyum metal lifleri (ML) ve lazer kesim metal tozları (MT), İzmir Demir Çelik AŞ'den daha önce temin edilmiş olan çelikhane cürufu, DOWAKSA A.Ş.'den daha önce temin edilmiş ve 5 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanmış olan karbon lifi, ÖZERBAND Afyon konveyör band fabrikasından temin edilmiş olan karbon siyahı malzeme mineral filler olarak, bağlayıcı olarak ise Afyon Belediyesi Asfalt Tesislerinden temin edilmiş olan B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Ahmedzade vd. (2008). karbon tozunun filler olarak kullanımının mekanik olarak herhangi bir olumsuz etkisi olmayacağını belirtmiştir. Kullanılan bitüm ve karbon lifine ait özellikler sırasıyla Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılan bitüm özellikleri.

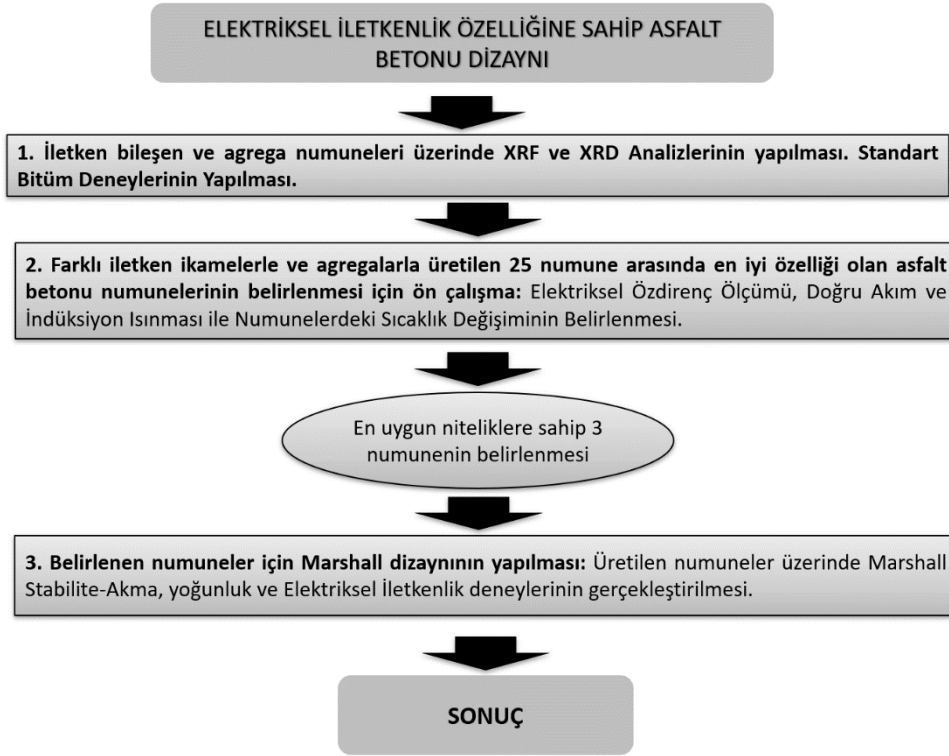
<i>Özellikler</i>	<i>Değerler</i>	<i>Standartlar</i>
<i>Temin Edilen Rafineri</i>	<i>Aliağa</i>	-
<i>Penetrasyon Derecesi</i>	50/70	-
<i>Penetrasyon Derecesi (25 °C'de)</i>	55.1	ASTM D5-06e1
<i>Özgül Ağırlık</i>	1,035	ASTM D70-09e1
<i>Yumuşama Noktası (°C)</i>	49.1	ASTMD36/D36M-09
<i>Isıtma Kaybı (%)</i>	2.2	ASTM D6-95
<i>Parlama Noktası (°C)</i>	289	ASTM D92-05a
<i>Düktilite (5 cm/dk)</i>	>100 cm	ASTM D113-07
<i>Viskosite (135°C'de)</i>	250.0 cP	
<i>Viskozite (165 °C'de)</i>	67.8 cP	ASTM D4402-06

Çizelge 3.2 Çalışmada kullanılan karbon liflerin mühendislik özellikleri(Int.Kayn.4)

<i>Lif Özellikleri</i>	<i>Değerler</i>	<i>Deney Metodu</i>
<i>Çekme Dayanımı (MPa)</i>	4900	ISO 10618
<i>Çekme Modülü (GPa)</i>	250	ISO 10618
<i>Birim deformasyon (%)</i>	2.0	ISO 10618
<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	1.79	ISO 10119
<i>Akma (g/1000 m)</i>	1600	ISO 1889

3.2 Metot

Yapılacak olan araştırmaya ait deneysel çalışma iki ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada farklı agrega ve içerikle yer değiştirilerek kullanılan iletken malzemeler ile üretilmiş asfalt betonların özdirenç gibi iletkenlik özellikleri, indüksiyon ısınması, zamana göre doğru elektrik akımı (DC) verilerek numune sıcaklıklarında ki değişim araştırılmış ve bu numunelerden en iyi özdirenç ve sıcaklık artışı gösteren üç farklı numune için Marshall dizaynı yapılarak üretilen numunelerde özdirenç ve 30 V DC gerilim altında sıcaklıklarında artışlar altı farklı bitüm yüzdelerindeki numuneler için tekrar ölçülerek tespit edilmiştir. Bu deneyler tamamlandıktan sonra standart Marshall dizaynı prosedürüne göre numunelerin Marshall Stabilite-Akma deneyleri gerçekleştirilerek, ikame edilen iletken maddelerin mekanik özelliklere olan etkileri de incelenmiş ayrıca optimum bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Tez yöntemine ait akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Tez yöntemi akış şeması.

3.2.1 X Işını Kırılım (XRD) Analizi

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Çalışmada kullanılan agregra numunelerinin XRF analizleri AKÜ TUAM Laboratuvarında gerçekleştirilmiş ve agregra içerisindeki ağırlıklı mineral bileşimleri belirlenmiştir.

3.2.2 X Işını Floresans (XRF) Yöntemiyle Elementel Bileşim Tayini

X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi elementel kompozisyonu belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir yani kantitatif (nicel) analiz yapar. X-Işınları

Floresans Spektrometresi ile; Si, Al, Ti, Mn, Mg gibi ana element oksitleri yüzde (%) ağırlık cinsinden (MnO, MgO), Rb, Ba, Sr gibi eser elementleri, Cr, Ni, Co, Cu ve Zn gibi geçiş elementlerini, La, Ce, Pr, Nd gibi nadir toprak elementlerinin ppm düzeyinde analiz edilir. Bu analizler AKÜ Maden Mühendisliği DAL Laboratuvarında bulunan Rigaku / ZSX Primus 2 cihazında gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 Farklı bileşenlere sahip İAB numuneler üzerinde en iyi iletkenlik özelliği olan numunelerin ön deneylerle belirlenmesi

- Birinci aşama agrega numunelerin yıkanıp, kurutulduktan sonra standart karayolu eleklerinden elenmesi ve özgül ağırlık ile Los Angeles aşınma deneylerine tabi tutulmasından oluşmaktadır. Kullanılması planlanan TCK Teknik Şartnamesine (2013) göre Tip 3 aşınma tabakasına ait gradasyonlar Çizelge 3.3’de görülmektedir.

Çizelge 3.3 BSK Aşınma Tabakası Tip 3 Gradasyonları (TCK 2013).

<i>ElekBoyutu</i>					<i>BEÇ KARIŞIM</i>	
<i>inç</i>	<i>mm</i>	<i>% EG</i>	<i>% Kalan</i>	<i>%</i>	<i>ElekÜstü</i>	<i>1100 gr BSK briketağırlıkları (gr)</i>
<i>1</i>	<i>25</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	0	-	-
<i>3/4</i>	<i>19</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	0	-	-
<i>1/2</i>	<i>12.5</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	0	<i>1/2 üstü</i>	0
<i>3/8</i>	<i>9.5</i>	<i>90</i>	<i>10</i>	10	<i>3/8 üstü</i>	110
<i>No:4</i>	<i>4.75</i>	<i>63.5</i>	<i>36.5</i>	26.5	<i>No:4 üstü</i>	291.5
<i>No.10</i>	<i>2</i>	<i>44.5</i>	<i>55.5</i>	19	<i>No:10 üstü</i>	209
<i>No:40</i>	<i>0.425</i>	<i>22</i>	<i>78</i>	22.5	<i>No:40 üstü</i>	247.5
<i>No:80</i>	<i>0.180</i>	<i>12</i>	<i>88</i>	10	<i>No:80 üstü</i>	110
<i>No:200</i>	<i>0.075</i>	<i>6</i>	<i>94</i>	6	<i>No:200 üstü</i>	66
<i>M. Filler %</i>				6	<i>M.Filler (gr)</i>	66
<i>KONTROL</i>				100	<i>TOPLAM (gr)</i>	1100

EG: Elekten geçen

- İkinci aşama ise farklı agrega bileşenlerine sahip asfalt betonu numunelerinin üretimini kapsamaktadır. Bu aşamada Çizelge 3.4’de verilen farklı bileşendeki numunelerin üretimleri gerçekleştirilecektir. Kullanılacak karbon lifleri %6 bitüm ağırlığının %3 yüzdesi olarak ve topaklanmayı önlemek amaçlı olarak 5 mm boyunda kullanılacaktır, metal lifleri 1 mm boyunda kullanılacaktır. Karbon siyahı, mineral filler

ile ve ayrıca metal tozu ilave edilen seriler için No:10 üstü elek aralığının ağırlıkça %12,5'i (28,5 gr) metal tozu ile yer değiştirilecektir (Resim 3.1).



Resim 3.1 Karışım için yıkayıp elenen kireçtaşı ve bazalt agrega numuneleri.

Çizelge 3.4 Agrega fraksiyon cinsine ve İAB bileşenlerine göre üretilmiş numuneler

		<i>Agrega ve İletken Bileşen Değişkenleri</i>								
		<i>İnce agrega</i>		<i>Kaba agrega</i>		<i>Filler</i>		<i>İletken Malzemeler</i>		
<i>Seri</i>	<i>Numune</i>	<i>Kireç taşı</i>	<i>Bazalt</i>	<i>Kireç taşı</i>	<i>Bazalt</i>	<i>Çelik cürufu</i>	<i>Karbon Siyahı</i>	<i>Karbon Lifi</i>	<i>Metal lifi</i>	<i>Metal tozu</i>
1.Seri	(1.1)	x		x			x			
	(1.2)		x	x			x			
	(1.3)	x			x		x			
	(1.4)	x	x				x			
	(1.5)		x			x	x			
2.Seri	(2.1)	x		x			x	x		
	(2.2)		x	x			x	x		
	(2.3)	x			x		x	x		
	(2.4)	x	x				x	x		
	(2.5)		x			x	x	x		
3.Seri	(3.1)	x		x			x		x	
	(3.2)		x	x			x		x	
	(3.3)	x			x		x		x	
	(3.4)	x	x				x		x	
	(3.5)		x			x	x		x	
4.Seri	(4.1)	x		x			x	x		x
	(4.2)		x	x			x	x		x
	(4.3)	x			x		x	x		x
	(4.4)	x	x				x	x		x
	(4.5)		x			x	x	x		x
5.Seri	(5.1)	x		x			x		x	x
	(5.2)		x	x			x		x	x
	(5.3)	x			x		x		x	x
	(5.4)	x	x				x		x	x
	(5.5)		x			x	x		x	x

- Üçüncü aşama, üretilen numuneler üzerinde deneylerin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Bu aşama numunelerde tüm numune yüzeyini kapsayan özdirenç, nokta özdirenç, akım, indüksiyon ile zamana göre numune sıcaklığındaki değişimlerin belirlenmesinden oluşmaktadır.

3.2.4 Elektriksel İletken Asfalt Betonu Numunelerinin Üretilmesi

İletken BSK numunelerinin sabit elektrik gerilimi altındaki ısınma performanslarını belirlemek için sıcaklıklarında meydana gelen değişimler karşılaştırılmıştır. Hazırlanan asfalt numuneleri içerisinde iletken bileşen olarak kullanılan ikamelerin numuneler üzerindeki sıcaklık derecelerini ve etkilerini bu deney ile incelenmiştir. Asfalt numunelerine doğru akım altında sabit 30 V gerilim uygulanmıştır. Bunun için 2 elektrot yöntemi kullanılarak 10 dk boyunca sabit gerilim altında doğru akım geçirilmiş ve sıcaklıklarındaki değişim her iki dakikada bir numune ortasındaki üç farklı noktadan lazer termometre ile ölçülerek belirlenmiştir. Hesaplamalarda bu ölçümlerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır. Tüm numunelerden akım geçirilmeden önce numune başlangıç sıcaklıkları kaydedilmiştir.



Resim 3.2 Marshall dizaynına göre numunelerin deney hazırlığı.

İletken BSK numunelerin üretilmesi için Marshall yöntemindeki numune üretme tekniği kullanılmıştır. Bütün bu işlemler için şu işlem adımları takip edilir:

- Kullanım için önerilen malzemeler proje şartnamelerini sağlamalıdır.
- Kaba, ince ve mineral filler agregalarının şartnamelerinin istekleri doğrultusunda oranlandırması yapılır.
- Kullanılacak malzemelerin yoğunluk ve boşluk analizleri, karışımda kullanılacak agregaların hacim özgül ağırlıkları ve bitüm özgül ağırlıkları tespit edilir.

Marshall Metodunda standart, silindirik 64 mm yükseklik 102 mm çapında deney numuneleri üretilir. Deney numuneleri hazırlanırken ilk olarak agregalar 105-110 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur. İstenen fraksiyonlarda elenip, kurutulan agregalardan, ayrı ayrı kaplarda 1100 gr’lık karışım tartımları yapılır. Hazırlanan karışımlar ve bitüm etüve konularak sıcaklıklarının 3-4 saat süre boyunca 165-170 °C’ye gelmesi beklenilir (Resim 3.3). Sıkıştırma işlemine başlamadan yarım saat öncesinde numune kalıpları, tokmak başlığı, mikser karıştırma kabı ve ucu, spatula, metal numune küreği gibi metal aparatlar da etüv içerisine yerleştirilerek ısıtılır. Isıtma işleminden sonra agrega ve asfalt çimentosu tamamıyla üniform bir asfalt dağılımına sahip karışımı meydana getirmek için mekanik karıştırıcı ile homojen bir dağılım elde edilene kadar 3-5 dakika karıştırılır. Resim 3.4’de karıştırma işleminde kullanılacak ısıtıcı mekanik karıştırıcı ve Resim 3.5’de ise üretilen asfalt numuneleri görülmektedir.



Resim 3.3 Karışımların tartılması, kalıp ve karışımların etüvde ısıtılması.

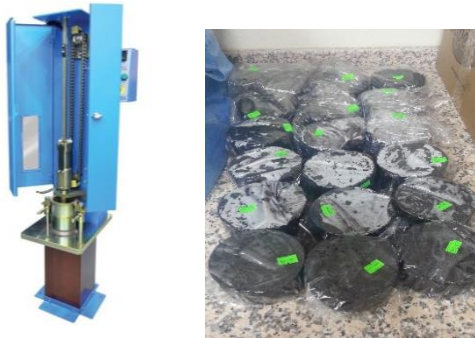


Resim 3.4 Isıtıcı mekanik asfalt karıştırıcısı ve bir karıştırma işlemi (Gürer 2005).



Resim 3.5 Üretilen iletken asfalt betonu numuneleri.

Bitüm 170 ± 20 °C viskozite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık, karıştırma sıcaklığıdır. Karışım kalıbın içine yerleştirilmeden önce kalıbın tabanına, ölçüsüne göre kesilmiş filtre kağıdı yerleştirilir. Numuneler 101.6 mm çapında ve 76.2 mm yüksekliğindeki numune kalıbında, 457.2 mm den düşen 4536 gr ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Resim 3.6'da numuneleri sıkıştırma işleminde kullanılacak otomatik tokmak görülmektedir.



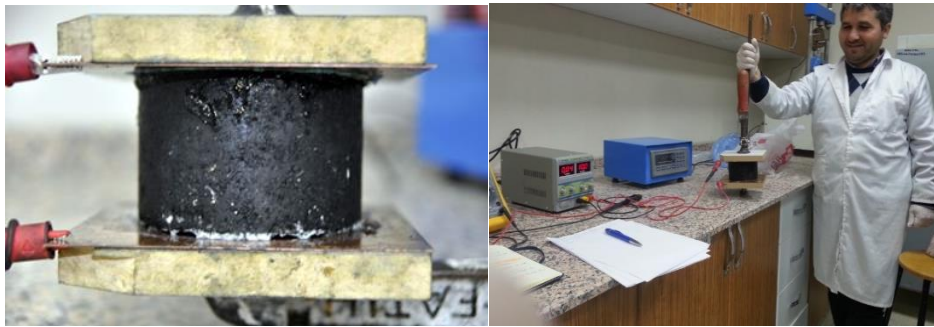
Resim 3.6 Marshall deney numunelerini hazırlamada kullanılan otomatik tokmak ve sıcak karışım asfalt numuneleri.

Sıkıştırma uygulanacak numunelerin dizaynı ağır trafik yüklerine göre yapılmış alt ve üst yüzeyine 75 darbe uygulanmıştır. Sıkıştırmadan sonra numuneler oda sıcaklığında hareket esnasında deformasyon yapamayacak duruma gelene kadar soğumaya bırakılır. Daha sonra numuneler bir hidrolik kriko yardımıyla, 24 saat sonra, oda sıcaklığında soğuduktan sonra, kalıplarından çıkarılır. Daha sonra üretilen asfalt betonu numuneleri üzerinde de aşağıda belirtilen deneyler yapılmıştır.

3.2.5 Sıcak Karışım Asfalt Numunelerinin Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi

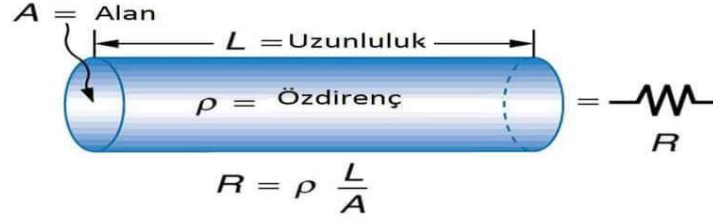
3.2.5.1 Asfalt Numunelerinde İki Prob Yöntemiyle Özdirenç Ölçümleri

İAB 'nin özdirencini ölçmek için, 2 prob ve 4 prob metodunun dâhil olduğu mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde, 4 prob yönteminde, problemlerin hazırlanan numunenin sıkışma safhasında numune içerisinde kalması ve sürekli zarar görmesi sebebiyle kullanışsız ve düşük fayda/maliyete sahip bir yöntem olduğu görülmektedir. Buna karşılık, iki prob yönteminde elektrotlar numunenin dışına tutturuldukları için asfalt betonun sıkıştırılması sırasında hasar görmezler. Bundan dolayı, İki prob yöntemi İAB'nin iletkenliğini ölçmede potansiyel bir araç olarak görülmektedir (LiuandWu 2009, Qun vd.. 2013). İki- prob yöntemi ile özdirenç ölçümü Resim 3.7' de görülmektedir. Ölçülen direnç değeri, hem numunenin hem de kullanılan iletkenin ve levhanın kontak direnç değerlerinin toplamına eşit olacaktır. Özdirenç, akım vb. elektriksel özelliklerin ölçülmesinde Fluke marka multimetre cihazı, elektrot olarak ise silindirik sıcak karışım asfalt numunelerinin alt ve üst yüzeyine tamamen temas sağlayacak bakır levhalar kullanılmıştır. Bakır levhalar ile numune arasındaki hava boşluklarını doldurmak için de iletken jel madde kullanılmıştır.



Resim 3.7 İki prob yöntemi ile İAB numunelerinde özdirenç ölçümü.

Elektriksel özdirenç ise Ohm kanuna göre Şekil 3.3 deki R eşitliği kullanılarak elde edilecektir.



Şekil 3.3 Direnç özdirenç ilişkisi

Burada;

ρ =Elektriksel özdirenç ($\Omega \cdot m$)

l =Elektrot mesafesi (m)

R =Ohm olarak ölçülen direnç

S =Elektrot iletken alanıdır (m^2).

Bu ölçümde elektrik alan sabit kabul edilecek ve son etkileri önemsiz sayılacaktır.

3.2.5.2 Asfalt Numunelerinde Sabit DC Gerilim Altında Sıcaklık Değişimlerinin Belirlenmesi

İletken asfalt (İAB) numunelerinin sabit elektrik gerilimi altındaki ısınma performanslarını belirlemek için sıcaklıklarında meydana gelen değişimler karşılaştırılmıştır. Hazırlanan asfalt numuneleri içerisinde iletken bileşen olarak kullanılan çeşitli maddelerin numuneler üzerindeki sıcaklık arttırma dereceleri ve etkileri bu deney ile incelenmiştir. Öncelikle Asfalt numunelerine doğru akım altında sabit 30 V gerilim uygulanmıştır. Bunun için 2 prob yöntemi kullanılarak 10 dk boyunca sabit gerilim altında doğru akım geçirilmiş ve sıcaklıklarındaki değişim her iki dakikada bir numune ortasındaki üç farklı noktadan infrared termometre ile ölçülerek belirlenmiştir (Resim 3.8).



Resim 3.8İnfrared termometre ile numunelerdeki sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi

Hesaplamalarda bu ölçümlerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır. Tüm numunelerden akım geçirilmeden önce numune başlangıç sıcaklıkları kaydedilmiş ve sonrasında akım verilmeye başlanmış ve 10 dk sonra numunelerde ki sıcaklık değişimleri belirlenmiştir.

3.2.5.3 İndüksiyon Isınması ile Numunelerin Sıcaklıklarında Meydana Gelen Değişimlerin Ölçülmesi

Sıcak karışım asfalt numuneleri içerisindeki iletken bileşenlerin, numunelerin ısınma oranları üzerindeki etkileri bu deney ile incelenecektir. İndüksiyon ile ısıtma temassız ısıtma işlemi olarak bilinir ve elektromanyetik indüksiyon ile Joule ısı kanunlarına dayanmaktadır. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon kanununa göre elektromotor kuvveti değişen bir manyetik alan içinde bir kapalı devrenin etrafında üretilir ve bu devre tarafından sınırlanan herhangi bir manyetik yüzeyden geçen manyetik akının değişim oranı ile orantılıdır. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon kanunu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.1)$$

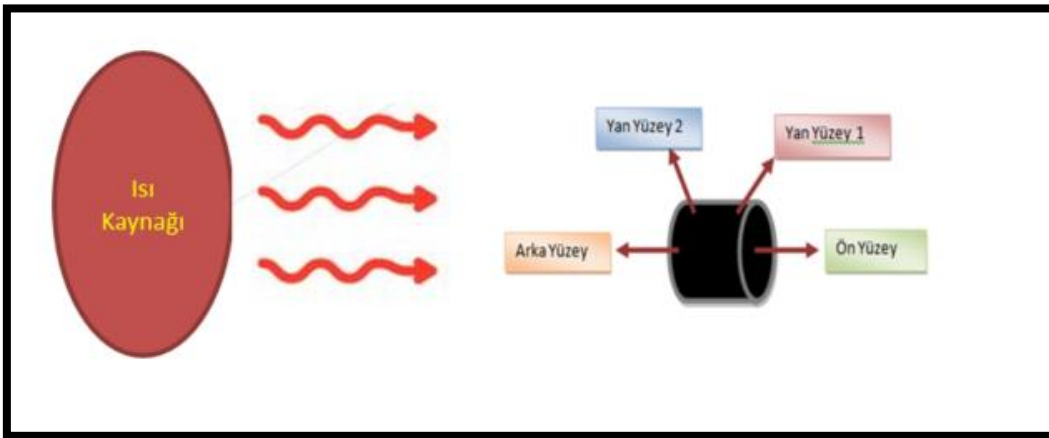
Burada ε , elektromotor kuvveti (v), B ise *Weber (Wb)* olarak manyetik akı'dır. Uygulamada bunun anlamı, bir elektrik akımı manyetik akı ile temas ettiği zaman lif boyunca ilerlerleyeceğidir. Elektrik akımı iletken lif (bileşen) boyunca ilerlerken bir ısı oluşturur. Bu Joule ısı kanunudur ve Joule'un ilk yasası olarak (3.2) eşitliği ile ifade edilir.

$$P = I^2 \times R \quad (3.2)$$

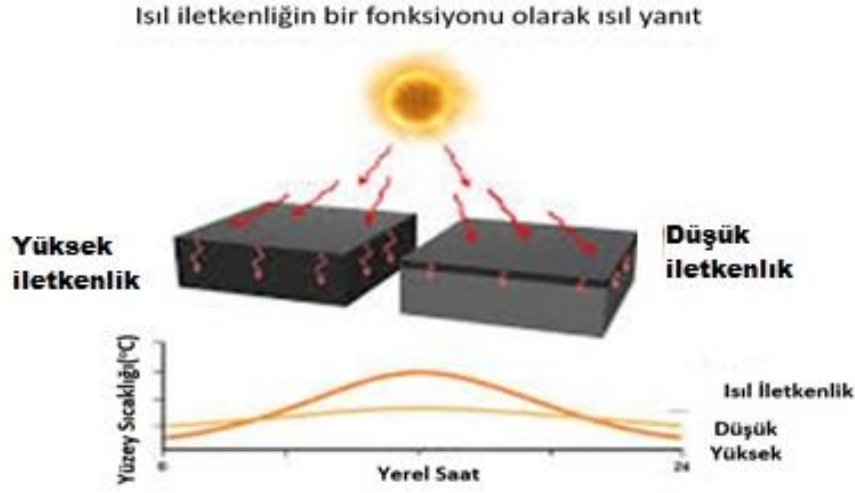
Burada P bir t birim zamanı içerisindeki sabit bir I akımı ile bir R direncine sahip iletken üzerinde üretilen ısı $Q = I^2 R t$ 'dir. Bu yasa bir direnç ile karakterize edilebilen herhangi bir devre için geçerlidir. Ohm kanunu ε voltajı için, R direncine sahip bir devreden geçen akımı (3.3) eşitliği ile belirtir.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \quad (3.3)$$

Bu iki eşitlik kullanılarak güç $P = \left(\frac{\varepsilon}{R}\right)^2$ olarak ifade edilebilir. İndüklenen elektromotor kuvveti manyetik akıdaki değişim oranına bağlıdır. İndüksiyon donanımları sabit bir frekansa sahip bir ısıtma sistemi için sabit bir elektromotor kuvvet üretilir. Joule ısınması ile ısınma hızı numunenin öz direnci ile ters orantılıdır. Dolayısıyla düşük öz direnç, yüksek ısınma oranı anlamına gelmektedir (Liu vd., 2010). Bu deney kapsamında üretilen asfalt betonu numuneleri sabit bir uzaklıktan indüksiyon ile ısınma etkisine bırakılmış ve zamana bağlı olarak numune sıcaklığında meydana gelen değişimler olarak infrared termometre ile belirlenmiştir (Şekil 3.4). Dolayısıyla elektriksel iletken olan malzemelerin aynı zamanda ısı iletimleri de iyidir. Bunun doğal bir sonucu olarak bu tip iletken asfalt üzerindeki buzlanmanın kaybolması, sistemden elektrik akımı geçmesi dahi, hava şartları normale döndüğünde, daha çabuk meydana gelir (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 İndüksiyonla ısınma sonunda infrared termometre ile ölçüm yapılan numune noktaları.



Şekil 3.5 Isıl iletkenliğin yüksek oluşu kaplama üzerindeki karın erimesine etkisi.

3.2.6 Marshall Yöntemiyle Asfalt Karışım Dizaynı

Bu deneyler kapsamında üretilen iletken Marshall numunelerinin yoğunluk ölçümleri, akma-stabilite deneyleri gerçekleştirilmiş ve optimum bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır.

- Oda sıcaklığına kadar soğumuş olan briket numune kalıptan bir numune çıkarma krikosu yardımı ile çıkarılır.
- Çıkarılan numuneler 24 saat süreyle laboratuvar ortamında bekletilir.
- Numuneler bir kumpas yardımıyla üç farklı noktadan ölçülür.
- Ölçülen numunelerin havadaki, 25 °C’de sudaki ve yüzey kuru suya doygun durumdaki tartımları yapılır.
- Tartımları yapılan numunelerin stabilite ve akma deneylerine geçmeden önce numuneler 60±1 °C’deki su banyosunda 30-40 dakika bekletilir.
- Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Akma ölçer yerleştirilerek sıfırlanır. Deneyde; üst segman sabittir. Maksimum yüke erişinceye kadar, alt segmanın hareket etmesiyle dakikada 50,8 mm’lik bir hızla yükleme yapılır. Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilir ve Marshall stabilite değeri kaydedilir. “Marshall Stabilitesi” adı verilen bu değer numunenin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Ayrıca numunenin çökme miktarı olan akma değeri ölçülür.

- Numune yüksekliği 63,5 mm'den farklıysa Marshall Stabilite d¼zeltme katsayıları kullanılarak y¼ke d¼zeltme fakt¼r¼ uygulanır. Ayrıca bu deneyle karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu bulunan agregaya boşluğu y¼zdesi de saptanır (¼nal ve Kahramangil 1993, Umar ve Ağar 1991, ASTM D 1559-89 1992, Hunter ve Self 2015). Şekil 3.9'da Marshall stabilite akma deney cihazı g¼r¼lmektedir.



Resim 3.9 Marshall stabilite-akma deney cihazı.

4. BULGULAR

4.1 Agregada Deneyi Sonuçları

Agregada numuneleri üzerinde özgül ağırlık, su emme, Los Angeles aşınma ve darbelenme deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. İnce bazalt agregası dizayn yapılan serilerde kullanılmadığı için bu numunelere özgül ağırlık deneyi yapılmamıştır. Numunelerin Los Angeles aşınma kayıplarının şartname üst sınırının altında olduğu görülmektedir. Darbelenme kaybı deneyi sonuçlarına göre de tüm agregada numunelerinin kabul edilen üst sınır değerinin (%18) oldukça altında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak kullanılan agregada numuneleri BSK üretimi için oldukça uygundur.

Çizelge 4.1 Agregada deneyi sonuçları

Agregada Deneyleri	Sonuçlar (gr/ cm ³)	
	Kireçtaşı	Bazalt
İri Agregada Hacim Özgül Ağırlık (>No:4)	2.721	2.673
İri Agregada Zahiri Özgül Ağırlık (>No:4)	2.730	2.772
İnce Agregada Hacim Özgül Ağırlık (No:4-200)	2.186	*-
İnce Agregada Zahiri Özgül Ağırlık (No:4-200)	2.592	*-
Karbon Tozu Filler Agreganın Zahiri Özgül Ağırlık	2.930	*-
Su Emme Deneyi (%) (>No:4)	0.4	4.0
Su Emme Deneyi (%) (No:4 – No:200)	4.0	8.7
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	23.1	15.8
Darbelenme Kaybı (%)	5.03	3.50
NaSO ₄ Donma Kaybı (%)	0.69	7.53
Karbon Tozu Filler BET Yüzey Alanı (m ² /gr)	87.1492	

*İnce agregada olarak bazalt kullanılmadı.

4.2 Kimyasal Analiz Sonuçları

Tez çalışması kapsamında kullanılan agregada ve iletken bileşenlerin kimyasal analizleri AKÜ DAL Laboratuvarında X-ışını floresans spektrometresi (XRF) yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Karbon tozunun tamamına yakını potada yandığı için kimyasal analizi yapılamamıştır. Isıl ve elektriksel iletkenlik üzerinde etkili olduğu düşünülen Demir-oksit (Fe₂O₃) bileşeni çelikhane cürufu agregası içerisinde %33.6, bazalt agregası içerisinde %9.018 oranında önemli miktarlarda bulunmaktadır. Kireçtaşında ise % 0.074 oranında bulunmaktadır.

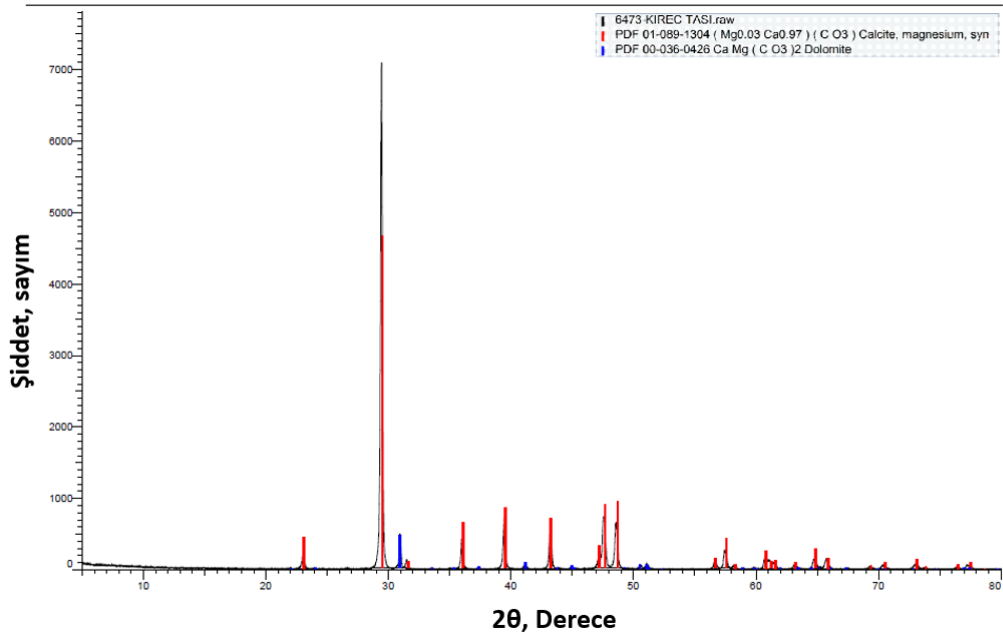
Çizelge 4.2 Kullanılan agrega ve iletken bileşenlerin kimyasal analiz sonuçları

	<i>Çelikhane Cürufu</i> (%)	<i>Bazalt</i> (%)	<i>Kireçtaşı</i> (%)
*LoI	0.000	3.416	42.593
Na ₂ O	1.440	2.336	0.042
MgO	2.420	4.115	1.590
Al ₂ O ₃	9.720	16.119	0.175
SiO ₂	18.7	50.573	0.407
P ₂ O ₅	0.413	0.371	0.005
SO ₃	0.311	0,076	0.028
Cl	0.573	-	-
K ₂ O	0.109	2.269	0.025
CaO	25.700	9.757	55.035
TiO ₂	0.572	0,941	-
V ₂ O ₅	0.105	-	-
Cr ₂ O ₃	1.900	0.021	-
MnO	4.040	0.188	-
Fe ₂ O ₃	33.60	9.018	0.074
CuO	0.040	-	-
ZnO	0.096	0.013	-
SrO	0.042	0.153	0.026
ZrO ₂	0.022	0.023	-
Nb ₂ O ₅	0.024	-	-
BaO	0.164	0.160	-
WO ₃	0.087	-	-
Rb ₂ O	-	0.013	-
As ₂ O ₃	-	0.008	-

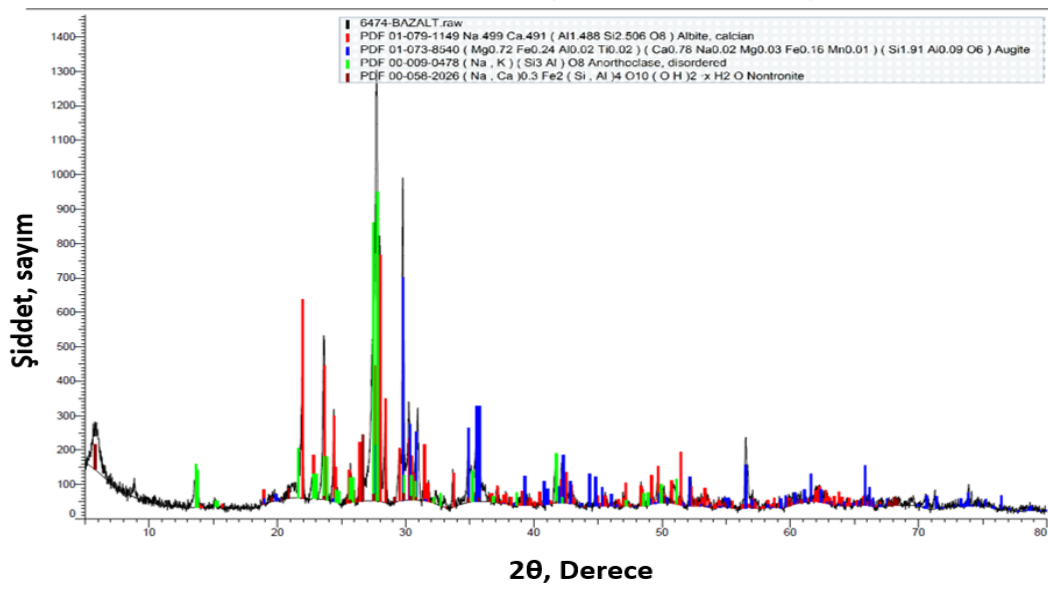
*Kızdırma Kaybı

4.3 XRD Analizi Sonuçları

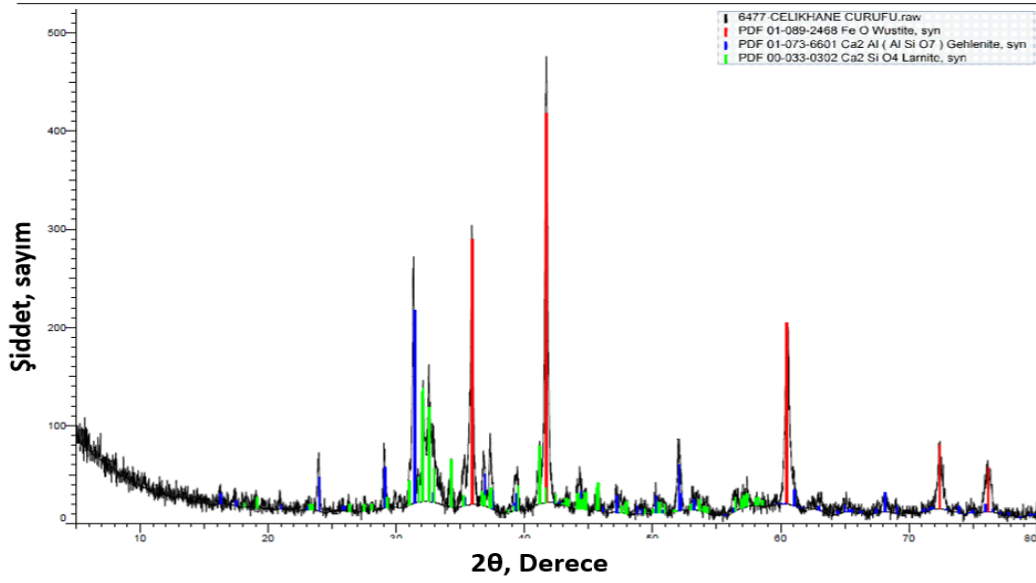
Agrega numuneleri üzerinde XRD analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.1-2-3 ve 4’de verilmiştir. Yapılan XRD analizi neticesinde kireçtaşı numune içerisinde ağırlıklı olarak magnezyum oksit (MgO), kalsit (CaCO₃) ve az miktarda dolomit [CaMg(CO₃)₂] tespit edilmiştir. Bazalt numuneler içerisinde ise ağırlıklı olarak sırasıyla albit [NaCa(AlSi₂O₈)], ojit [(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al)₂O₆], anortoklaz [(Na,K)AlSi₃O₈] ve nontronit [(CaO_{0.5},Na)_{0.3}Fe₃₊₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·nH₂O] belirlenmiştir. Çelikhane cürufu numunelerde ise bir oksit minerali olan wustit (FeO), gehlenit [Ca₂Al(AlSi)O₇] ve larnit [Ca₂SiO₄] tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 Kireçtaşı agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.



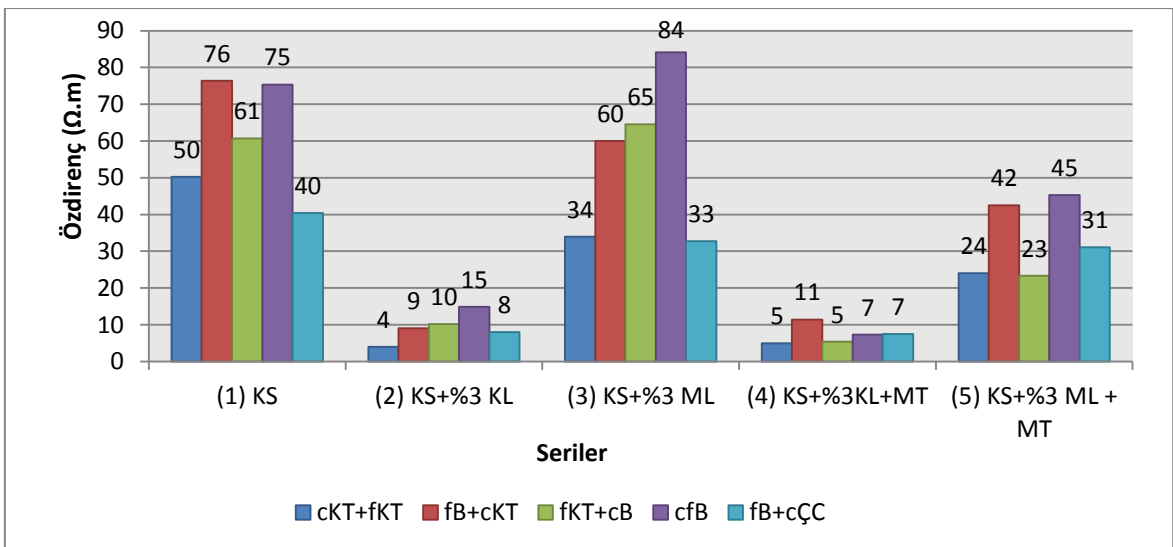
Şekil 4.2 Bazalt agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.



Şekil 4.3 Çelikhane cürufu agregasının yüzeyine ait XRD spektrumu.

4.4 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Özdirenç Deneyi Sonuçları

Numunelerin özdirençlerinin hesaplanabilmesi sabit gerilim altında (5-10-15-20-25-30 V) numunelerden geçen akım değerleri ölçülmüş buradan direnç değerleri hesaplanmış ve numune yükseklikleri ile kesit alanlarından yola çıkılarak özdirenç değerleri $\Omega.m$ olarak hesaplanmıştır. Farklı bileşenli asfalt betonlarının özdirenç değişimleri Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4 Farklı İAB kombinasyonu numuneler üzerinde özdirenç deneyi sonuçları.

Özdirençlerdeki en yüksek düşüş değerleri Seri 2 ve Seri 4 numunelerinde elde edilmiştir. En az düşüşün ise Seri 1’de olduğu görülmüştür. Araştırma sonuçları tek iletken bileşenin özdirenç düşürmede çok fazla etkili olmayacağını göstermiştir. Seri 2 ve Seri 4’ün ortak özelliği karbon lifi içeriyor olmalarıdır. Karbon lifi ve metal tozunun özdirenç düşüşünde oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. Fakat iki farklı iletken bileşen birlikte kullanıldığında, numunelerin özdirençlerindeki düşüş daha belirgin olmuştur.

Seri 1 sonuçlarına göre iri agrega fazında kireçtaşı ve çelikhane cürufu kullanılması diğer agrega türlerine göre özdirenç düşüşünde daha etkili olmuştur. Demir içerdiği bilinen bazalt numunesi özdirenç düşüşünde beklenildiği kadar etkili olamamıştır. Ortalama en düşük özdirenç değeri 4. seride elde edilirken, 2. serideki 2.1 numunesinde 4.1 Ω m değeri ile en düşük özdirenç değeri tespit edilmiştir. Pan vd. (2014) göre özdirençin 10 Ω m’nin altına düşmesiyle malzeme yalıtkan olmaktan çıkarak iletken hale gelmektedir. Seri 2 ve 5 numunelerinde bu durumun gerçekleştiği Şekil 4.4’de görülmektedir. Bununla birlikte tüm numunelerin iletken hale geldiği yapılan akım kontrol deneyi ile de tespit edilmiştir (Resim 4.1).

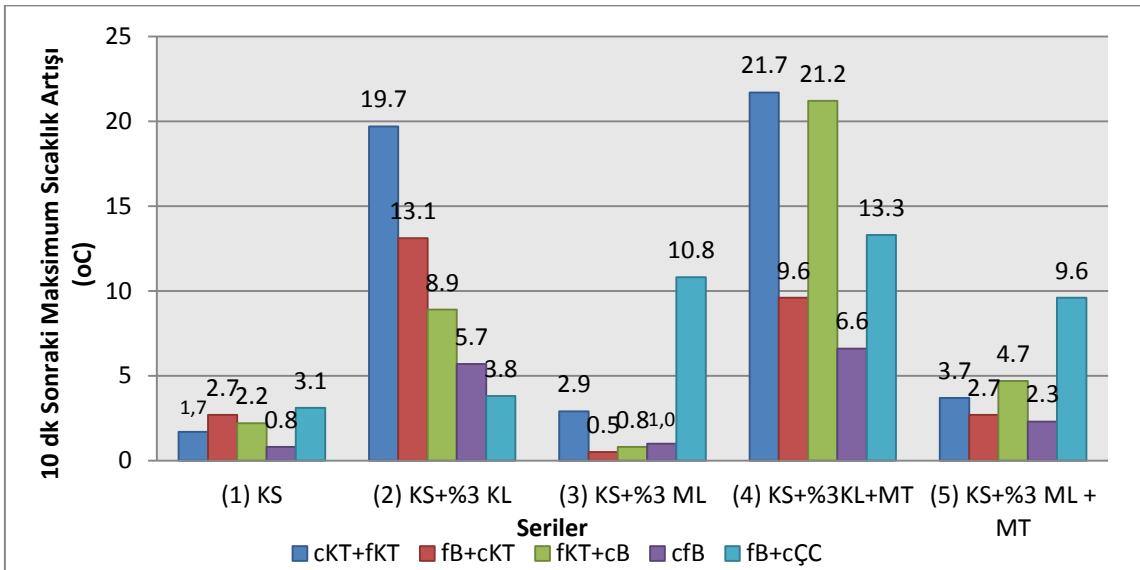


Resim 4.1 Akım kontrol deneyi.

Bu deney ile İAB numuneleri direnç olarak bir devre üzerine bağlanmış ve verilen hem DC hem AC akımda elektrik ampulünün yandığı görülmüştür (Şekil 4.5).

4.5 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Elektrik Akımı ile Isınma Deneyi Sonuçları

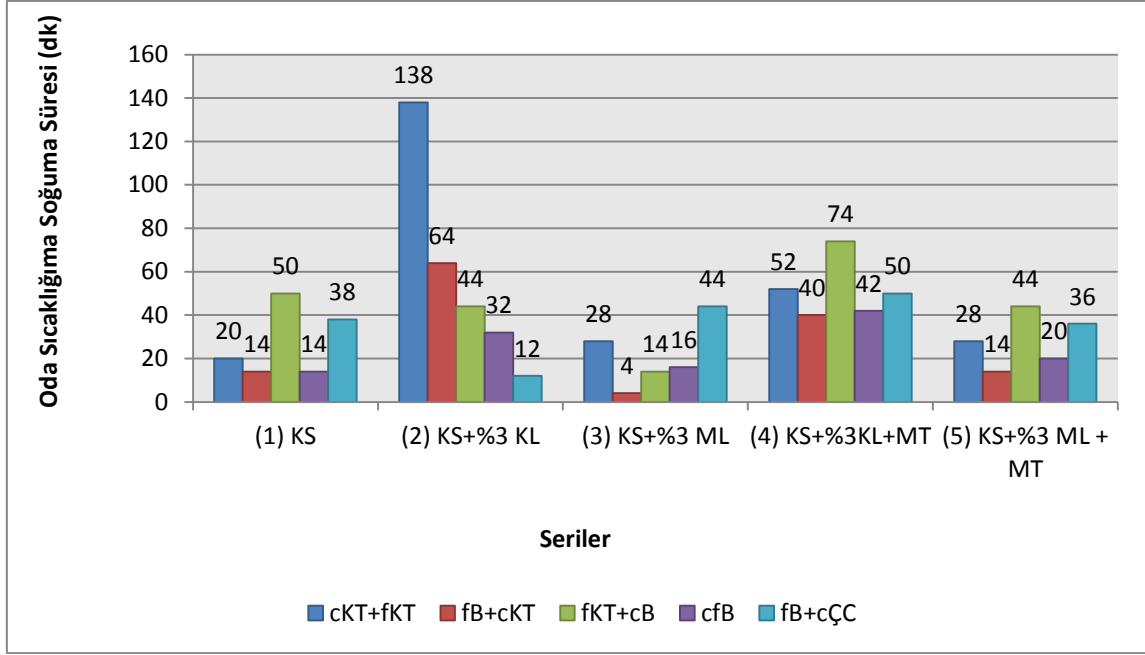
Üretilen farklı İAB numuneleri üzerinde sabit 30 volt gerilim altında yapılan 10 dk'lık ısınma deneyi sonucunda numunelerdeki sıcaklık artışları belirlenmiştir. En büyük sıcaklık artışı sırasıyla (2.1), (4.1) ve (4.3) nolu numunelerde görülmüştür. Karbon siyahı filler tek başına sıcaklık artışında etkili olmamıştır. Karışımlara karbon lifi takviyesi sıcaklık artışında oldukça etkili olmuştur. İçeriğinde metal ağırlıklı agrega ve lif bulunan numunelerde de (3.5), (4.5) ve (5.5) sıcaklık artışı oldukça belirgindir. Numunelerin sıcaklık artışlarında karbon lifi iletken bileşeninin oldukça etkili olduğu görülmüştür. 30 volt DC gerilim altında numunelerin 10 dk sonraki maksimum sıcaklık artışları Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 30 Volt DC gerilimi altında numunelerin sıcaklık artışları.

4.6 Farklı İAB Kombinasyonu Numuneler Üzerinde Oda Sıcaklığına Soğuma Deneyi Sonuçları

Isıtılan numunelerdeki elektrik gerilimi kapatıldıktan sonra başlangıç (oda sıcaklıklarına) ne kadar sürede soğuduklarını belirlemek amacıyla da soğuma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Soğuma deneyleri sonuçları Şekil 4.6'da görülmektedir.

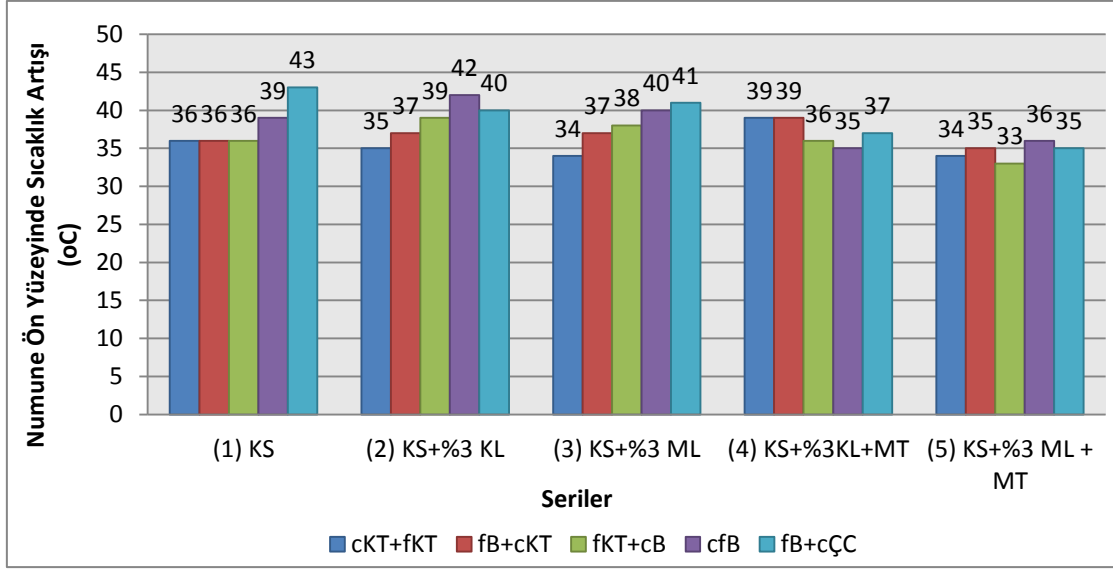


Şekil 4.6 Numunelerin soğuma süreleri.

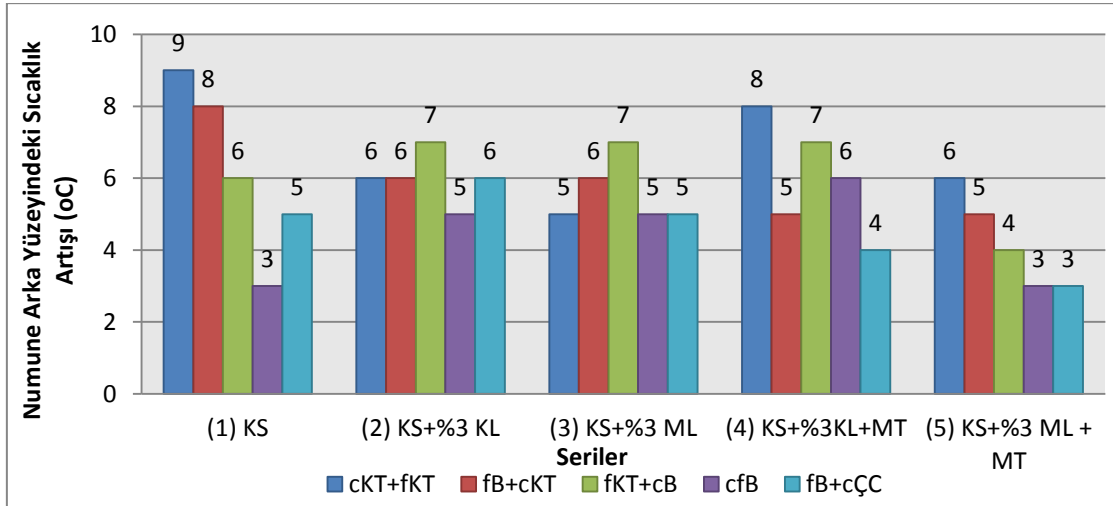
Elde edilen sonuçlara göre 2.1 numunesinin en geç soğuyan seriye ait olduğu bunu 4.3 ve 2.2 numunelerin takip ettiği görülmektedir. Bu seri numunelerin en önemli özelliği numunedeki kaba ve ince agreganın kireçtaşı olmasıdır. Mineral filler karbon tozu olup, ilave iletken malzeme olarak karbon lifi bulunmaktadır.

4.7 İndüksiyon Işınması ile Numunelerin Sıcaklıklarında Meydana Gelen Değişimler

İndüksiyon ısınması ile numunelerin sıcaklıklarında meydana gelen artışlarda iletken bileşen mi yoksa agrega tipi mi daha etkili sorusunun cevabını bulmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Buna göre bir ısı kaynağı önüne bırakılan numunelerde ki ön ve arka yüzlerinde meydana gelen sıcaklık artışları sırasıyla Resim 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Ön ve arka yüzey sıcaklık farkları düşünüldüğünde agrega olarak bazalt ve çelik çürufu içeren 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 numuneler en yüksek sıcaklık farklarını göstermiştir. En düşük sıcaklık farkları ise kireç taşı agrega içeren 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 numunelerinde görülmüştür. kendi içlerinde değerlendirildiğinde elektrik iletkenliği artan numunelerde sıcaklık farkı düşmüş ısı iletkenliğinin arttığı görülmüştür. 2.1, 4.1 ve 4.3 numuneleri sıcaklık farkları sırasıyla 29, 31, 29 derece ile en iyi ısı iletkenliğe sahip numuneler arasındadır.



Şekil 4.7 Numunelerin induksiyon ısıması ile ön yüzlerinde meydana gelen sıcaklık artışları



Şekil 4.8 Numunelerin induksiyon ısıması ile arka yüzlerinde meydana gelen sıcaklık artışları

4.8 En İyi Elektriksel İletkenlik Özelliği Gösteren İAB Serilerinin Belirlenmesi

Yapılan öz direnç, 30 V sabit elektrik gerilimi ile ısınma, oda sıcaklığında soğuma ve induksiyon ısıması ile soğuma deneyleri sonucunda en iyi elektriksel iletkenlik özelliğini gösteren numuneler belirlenmiştir. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi en düşük öz direnç değerlerinin 2. ve 4. Seri numuneleri olduğu görülmektedir. Bu serilere ait numuneler arasında 2.1(iri ince agrega kireç taşı, karbon siyahı ve %3 karbon lifi ilaveli), 4.1(iri ince agrega kireç taşı, karbon siyahı %3 karbon lifi ve metal tozu

ilaveli), ve 4.3 (iri agrega bazalt, ince agrega kireç taşı, karbon filler %3 karbon lifi ve metal tozu ilaveli) nolu numunelerin öz direnç değerleri sırasıyla 4, 5 ve 5 Ω m olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde 30 V sabit elektrik gerilimi altında benzer şekilde en yüksek sıcaklık artışları da (19.7, 21.7 ve 21.2 °C) bu numunelerde tespit edilmiştir. Oda sıcaklığında en uzun soğuma süreleri de bu numunelerde ölçülmüştür. Bir ısı kaynağı karşısında ön ve arka yüzeylerindeki ısınma değerlerine bakıldığında ise tüm numunelerinin ön yüzey sıcaklık artışlarının ortalama 37.3 °C, arka yüzey sıcaklık artışlarının 5.6 °C olduğu belirlenmiştir. Sırasıyla 2.1, 4.1 ve 4.3 numunelerindeki ön yüzey sıcaklık artışları 35, 39 ve 36 °C arka yüzey sıcaklık artışları ise 6, 8 ve 7 °C olarak belirlenmiştir. Tüm bu değerlendirmeler neticesinde en iyi elektriksel iletkenlik performansı gösteren numuneler 2.1, 4.1 ve 4.3 numuneleri olduğuna karar verilmiş ve bu numuneler için Marshall dizaynı yapılmıştır.

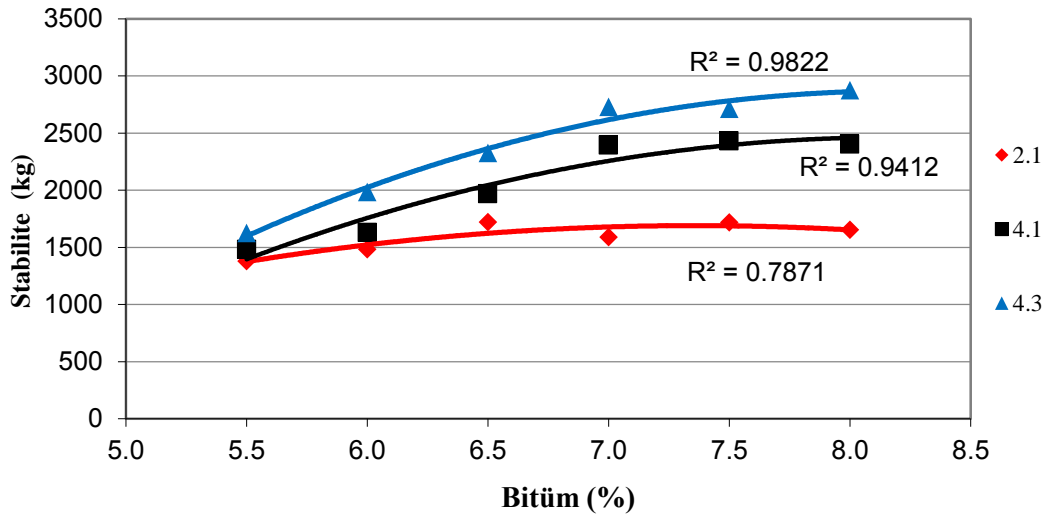
4.9 İAB Numunelerin Marshall Dizaynı Sonuçları

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en iyi elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip olduğu düşünülen 2.1, 4.1 ve 4.3 nolu serilere ait numunelere Marshall Dizaynı yapılmıştır. Kuru agrega karışımları TCK şartnamesi (2013) Tip-3 aşınma tabakası dizayn limitlerinin ortasındaki gradasyon eğrisine uygun olarak hazırlanmışlardır. Ağırlıkça % 5.5- 6.0- 6.5- 7.0- 7.5- 8.0 bitüm miktarlarının her biri için üç ayrı elektriksel iletken bitümlü sıcak karışım briketleri dökülmüştür. Mineral filler olarak karbon tozu kullanıldığı için başlangıç bitüm miktarı %5.5 olarak belirlenmiştir. Bu numuneler üzerinde ağırlık-hacim ilişkilerini belirlemek amacıyla havadaki, sudaki ve yüzey kuru suya doygun ağırlıkları ve ayrıca yükseklik ve çapları ölçülmüştür. Bunlara ilaveten numuneler Marshall Stabilite-Akma deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan bazı özelliklerin filler ve bitüm miktarına bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla grafikler çizilmiştir. Bunlar:

- Stabiliteye karşılık bitüm ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,
- Hacim özgül ağırlığa karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,
- Bitümle dolu boşluk oranına karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,
- Boşluk yüzdesine karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,

- Mineral agregalar arasındaki boşluğa karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,
- Akma değerine karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi,
- Marshall Katsayısına karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi grafikleridir.

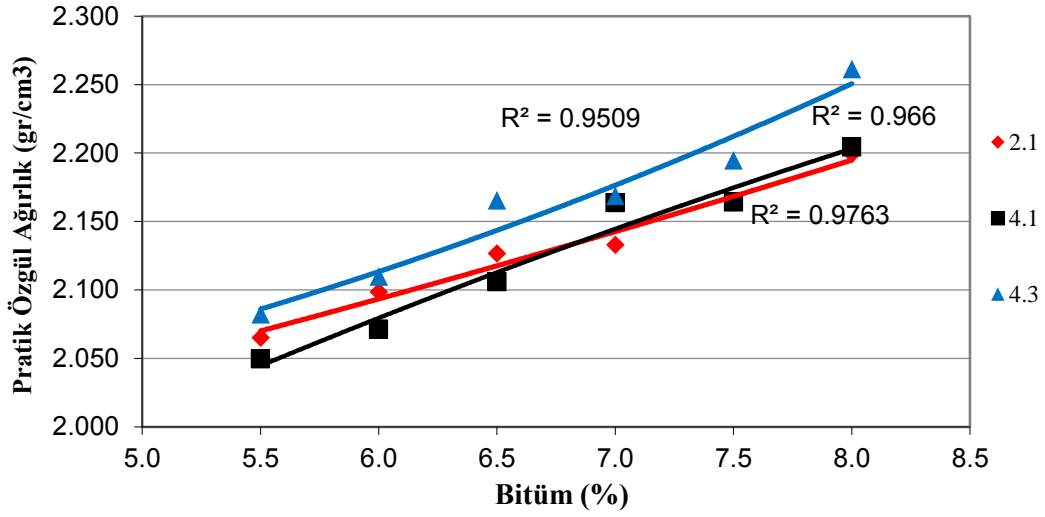
Seçilen seriler için yapılan Marshall dizaynı sonunda her bir seri için optimum bitüm miktarları hesaplanmıştır. Sırasıyla 2.1, 4.1 ve 4.3 serileri için optimum bitüm miktarı % 7,33, 7,30 ve 7,37 olarak hesaplanmıştır. Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki değişimler Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9 Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

Marshall Stabilite değeri en önemli bitümlü karışım özelliklerinden birisidir. Marshall Stabilite değerinin aşırı yüksek veya düşük olması istenmez. Karayolu Teknik Şartnamesi aşınma tabakası Tip 3 için minimum 400 kg’lık stabilite sınırı bulunmaktadır. Stabilite değerinin yüksek oluşu karışımın geçirimsiz, daha durabil, trafiğin hızlanma ve yavaşlamalarından kaynaklanan düşey ve yatay gerilmelere karşı daha dayanıklı olduğunun bir göstergesidir (Hunter ve Self 2015, Gürer 2005). Her üç seriye ait iletken BSK numunelerin stabilite değerleri sınır değer oldukça üzerindedir. 4.1 ve 4.3 serilerinin daha gevrek bir malzeme davranışı sergileyecekleri düşünülmektedir. Tüm seriye ait numunelerde grafiklerde eğimin sifıra yaklaştığı görülmüştür (Şekil 4.15). Optimum bitüm oranını belirlemek için eğrilerdeki maksimum stabilite değerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri esas alınan dört parametreden birisidir.

Bitümlü sıcak karışımlar için diğer önemli bir özellik ise yoğunluktur. Yoğunluğun artması ile, durabilite, geçirimsizlik ve stabilite gibi fiziksel özelliklerinin de daha iyi olması beklenir. Yoğunluğu yüksek olan karışımlarda bitüm oksidasyonu vb. etkiler neticesinde meydana gelen yaşlanmanın daha yavaş olduğu bilinmektedir ve bunun neticesinde durabilite özelliğinde artış, soyulma sonucu meydana gelen sökülme bozulmalarında azalma beklenir. Tüm serilere ait numunelerde ağırlıkça bitüm yüzdesine karşılık pratik özgül ağırlık değerlerine ait değişimler Şekil 4.10'da görülmektedir.

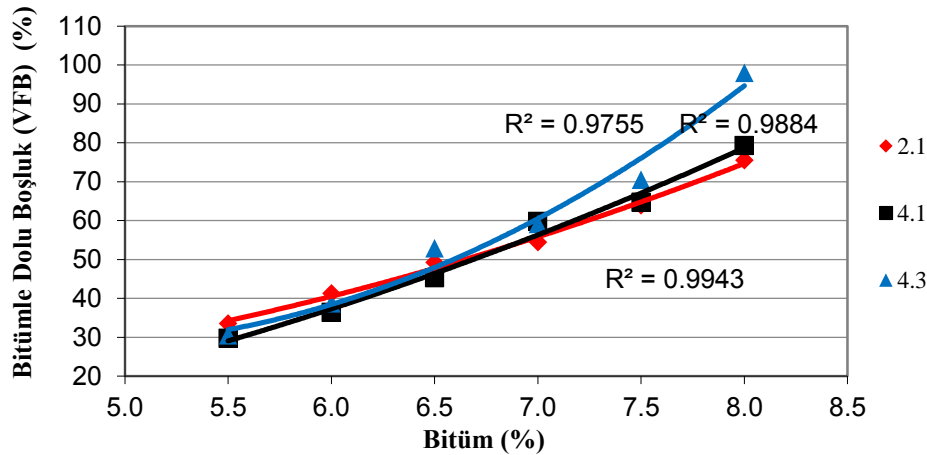


Şekil 4.10 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

Sırasıyla 2.1, 4.1 ve 4.3 serileri için en yüksek pratik özgül ağırlık değerleri **2,199, 2,204 ve 2,261 gr / cm³** olarak elde edilmiştir. En yüksek pratik özgül ağırlık değeri 4.3 serisine ait numunelerinde elde edilmiştir. Beklenildiği gibi Marshall stabilite değerinin de 4.3 serisinde en yüksek değerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.10). Pratik özgül ağırlık ve bitüm yüzdesi arasındaki ilişkiler oldukça tutarlıdır.

Bitümlü dolu boşluk (VFB), bitümlü sıcak karışımlarda plastisite, durabilite ve kaplamanın sürtünme katsayısı üzerinde etkili bir özellik olup aynı zamanda agrega daneleri etrafında kesin bir bitüm filmi oluşumunda da bu özellik etkili olmaktadır. Bu da kaplamanın durabilitesi açısından oldukça önemli bir husustur (Gürer, 2005). Asfalt

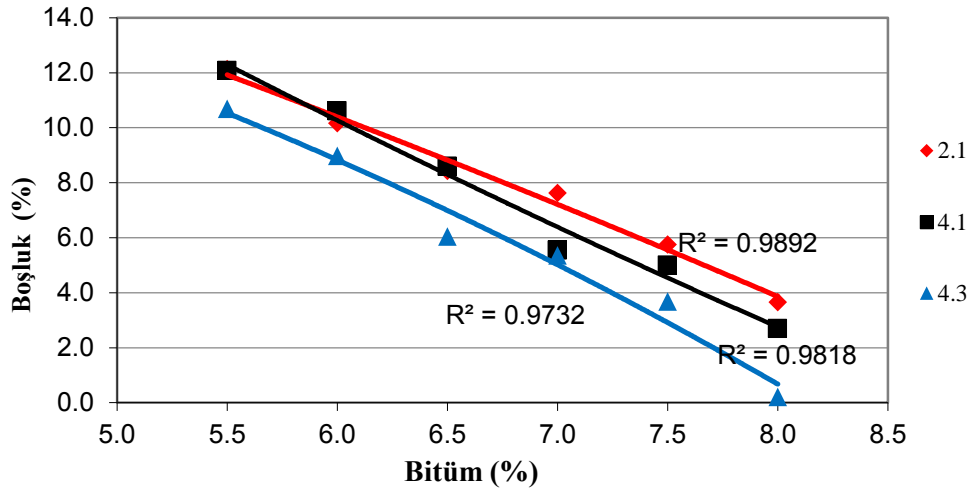
kaplamaların sürtünme katsayısı kaplamanın yüzey dokusu kadar bitümlü sıcak karışımlardaki bitüm yüzdesi ve boşluk yüzdesiyle de ilgilidir (Umar ve Açar 1994). 2.1, 4.1 ve 4.3 nolu serilerde VFB yüzdesi sırasıyla % 74- % 80- % 82- % 78- % 70 ve % 77 olarak elde edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre bitümlü dolu boşluk miktarında Tip 3 için bir alt ve üst sınır bulunmamaktadır. En yüksek VFB yüzdesi 4.3 serisinde görülmüşken en düşük değer ise 2.1 serisinde görülmüştür. VFB numunesinde iri agreganın bazalt oluşunun işlenebilirliği daha zorlaştırdığı ve bunun neticesinde karışımın daha yüksek bitüm ihtiyacı olduğu, gradasyonun (No 10 üstü elek aralığı % 12.5'nin) gözeneği daha az olan metal tozu oluşundan dolayı VFB değerinin de yükseldiği görülmektedir. Pratik özgül ağırlık ve bitüm yüzdesi ilişkileri de bu sonucu doğrulamaktadır (Şekil 4.11). Bu tez çalışmasında Tip 3 aşınma tabakası dizaynı kullanıldığı için optimum bitüm miktarının belirlenmesinde VFB esas alınmamıştır, dolayısıyla üç parametre (Stabilite, Pratik Özgül Ağırlık ve Boşluk yüzdesi) esas alınmıştır.



Şekil 4.11 Bitümlü dolu boşluk (VFB) ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Bitümlü sıcak karışımlar için önemli bir özellik de boşluktur. Bitümlü sıcak karışımlarda boşluk için Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) Tip 3 aşınma tabakası dizaynı için bir alt ve üst sınır %5-12 arasında tanımlanmıştır. Bu sınır aralık tanımlanmasının en önemli nedeni bitümlü sıcak karışımlarda olası bir kuma bozulmasını önlemek içindir. Üst sınır belirlenmesinin nedeni ise bitümlü sıcak karışımların alt tabakalara su geçirimsizliğinin olması, yeterli stabilitesinin sağlanması ve bitüm oksidasyonunun (yaşlanmasının) azaltılmasıdır (Açar ve Umar 1994, Gürer

2005). 2.1, 4.1 ve 4.3 serisi numuneler için optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen boşluk yüzdeleri sırasıyla % 6,2, % 5,2 ve % 3,6 olarak hesaplanmıştır. Pratik özgül ağırlık bitüm yüzdesi ilişkilerinden de beklenildiği gibi, 4.3 serisinin boşluk yüzdesinin şartname sınırlarından az olduğu bunun da ilerleyen süreçte kuma bozulmasına yol açabileceği değerlendirilmiştir. Kuma bozulmasına eğilim açısından en iyi davranışı 2.1 serisinin izleyeceği anlaşılmaktadır. Bitüm yüzdesine karşılık boşluk yüzdelerindeki değişimler Şekil 4.12’de verilmiştir.

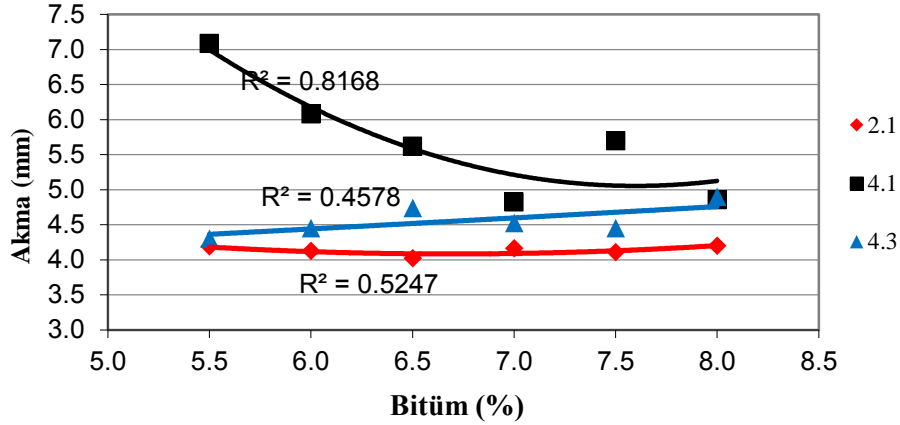


Şekil 4.12 Boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Marshall dizayn yönteminde gerçekleştirilen dizaynın kontrol edilmesi bakımından üç önemli özelliğe ait ilişkinin de grafiklendirilmesi gerekir. Bunlar Akma-Bitüm yüzdesi, mineral agrega içerisindeki boşluk-bitüm yüzdesi ve Marshall katsayısı-bitüm yüzdesi grafikleridir. Bu grafikler bitümlü sıcak karışımın uzun dönem davranışı hakkında bazı göstergeler içerir.

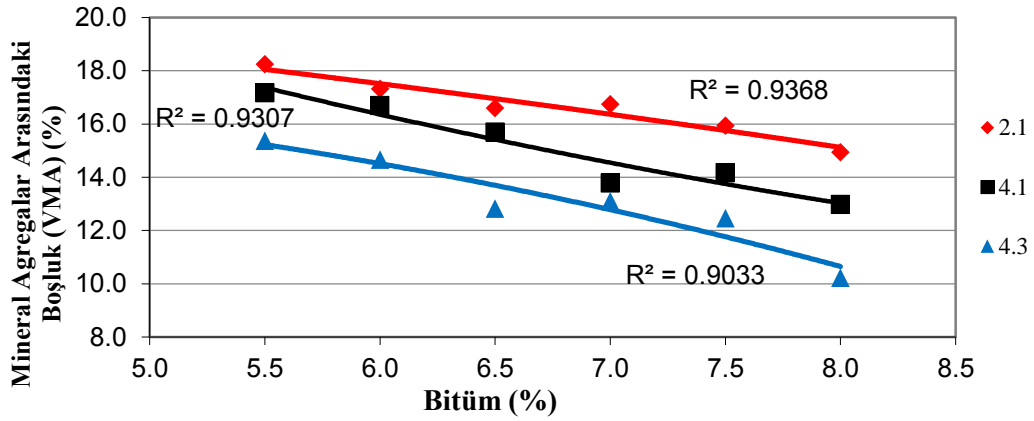
Akma değeri bitümlü sıcak karışım kaplamaların plastiklik ve esneklik özelliklerini yansıtan bir özellik olup Marshall briketlerinin kırıldığı andaki yüke karşılık gelen deformasyon değeri olarak da bilinir. Akma, sıkışmış karışımların içsel sürtünmelerinin dolaylı bir ölçüsüdür. Akma ile iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki bulunmaktadır (Gürer 2005). 2.1, 4.1 ve 4.3 serilerinde optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen akma değerleri 4,10, 5,10 ve 4,70 mm’dir. TCK (2013) teknik şartnamesi akma değerlerinin 2 ila 4 mm arasında olmasını önermektedir. Akma sonuçlarına göre 4.1 ve 4.3 serilerinin plastik deformasyona olan eğilimleri daha yüksek olmakla birlikte

tüm numunelerin değerleri üst limit üzerindedir. Yalnızca 2.1 numunesinde sınır değere yakın bir değer elde edilmiştir. Akma değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi Şekil 4.13’de görülmektedir.



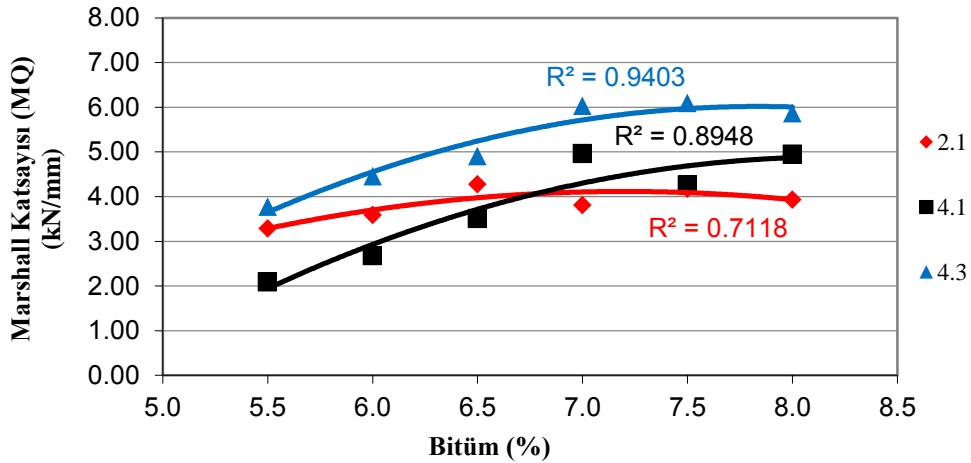
Şekil 4.13 Akma değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Mineral agregalar arasındaki boşluk değeri (VMA) sıkıştırılmış kaplama karışımları içerisindeki bitümlle dolu boşluklar da dâhil olmak üzere agrega danecikleri arasındaki hava boşluklarıdır. Mineral agregalar arasındaki boşluk, karışımındaki bitüm ve hava boşluğu için gerekli olan hacime tekabül eden kullanılabilir hacmi temsil eder. Dolayısıyla mineral agregalar arasındaki boşluk arttıkça agregalar üzerindeki bitüm film kalınlığının artacağı ve karışımın durabilitesinin yükseleceği söylenebilir (Gürer, 2005). Tip-3 aşınma tabakası dizaynı için VMA için alt ve üst sınır değer bulunmamaktadır. 2.1, 4.1 ve 4.3 serilerinde optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen VMA yüzdeleri 15,70, 14,00 ve 12,00 olarak elde bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 2.1 serisinin durabilite özelliklerinin diğer serilere göre daha iyi olacağı söylenebilir. Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14 Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

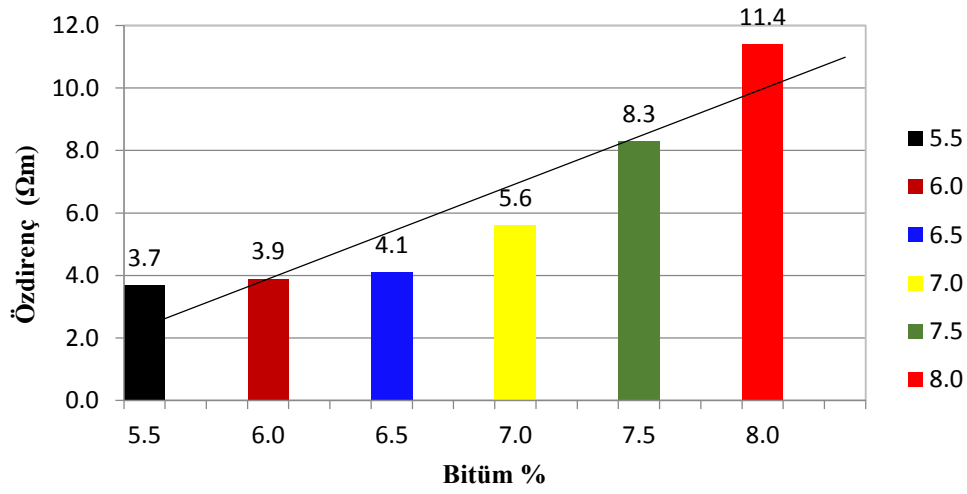
Bitümlü sıcak karışım dizaynında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör de Marshall katsayısıdır (MK). Marshall Stabilite değerinin akma değerine olan oranı olarak da bilinir. Bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerinin dolaylı olarak değerlendirilmesinde kullanılır. Marshall katsayısı değeri yüksek olan numunelerin yüksek deformasyon ile kırılmaları beklenilir (Hunter ve Self 2015, Lavin 2003, Çelik vd. 2007). Üretilen iletken bitümlü sıcak karışım numunelerinde 2.1, 4.1 ve 4.3 serileri için Marshall katsayısı değerleri sırasıyla 4,10, 4,60 ve 6,00 kN/mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar 4.3 serisine ait numunelerin diğer karışımlara göre daha rijit davranış sergileyeceğini göstermektedir (Şekil 4.15).



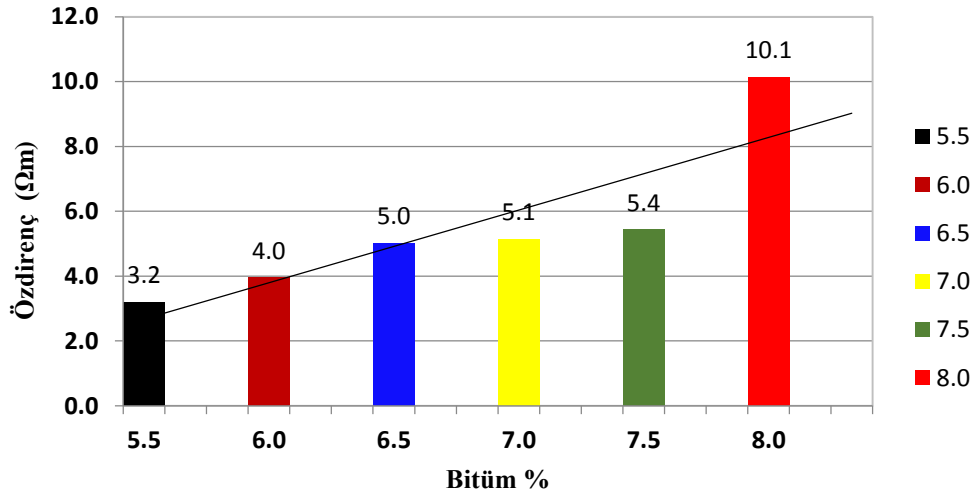
Şekil 4.15 Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

4.10 En İyi İletkenlik Özelliği Gösteren Serilerin Marshall Dizayn Numunelerinde Özdirenç Ölçümü Sonuçları

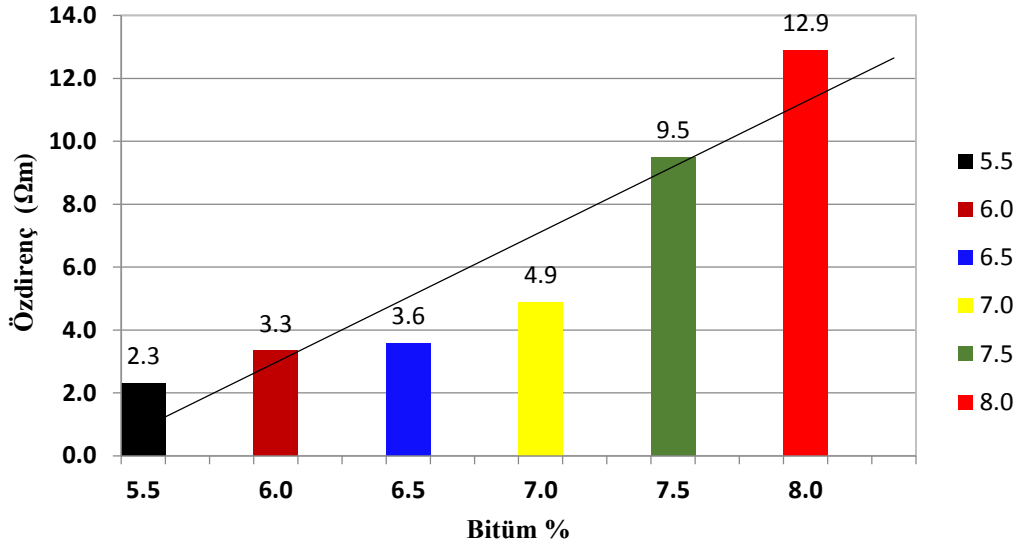
Marshall dizaynı için üretilen İAB numuneleri üzerinde özdirenç deneyleri tekrarlanmış ve bitüm miktarı değişimiyle birlikte numunelerde özdirenç değişimleri belirlenmiştir. Tüm numunelerde bitüm miktarının artışıyla birlikte özdirenç değerlerinde de artış görülmektedir (Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18). % 7.0 bitüm miktarına kadar **2.1, 4.1 ve 4.3** numunelerindeki özdirenç artışları 1,9 1,9 ve 2,6 Ωm olarak önemsiz sayılabilecek değerde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.16 Seri 2.1 Marshall numunelerinde yapılan özdirenç ölçümü sonuçları



Şekil 4.17 Seri 4.1 Marshall numunelerinde yapılan özdirenç ölçümü sonuçları



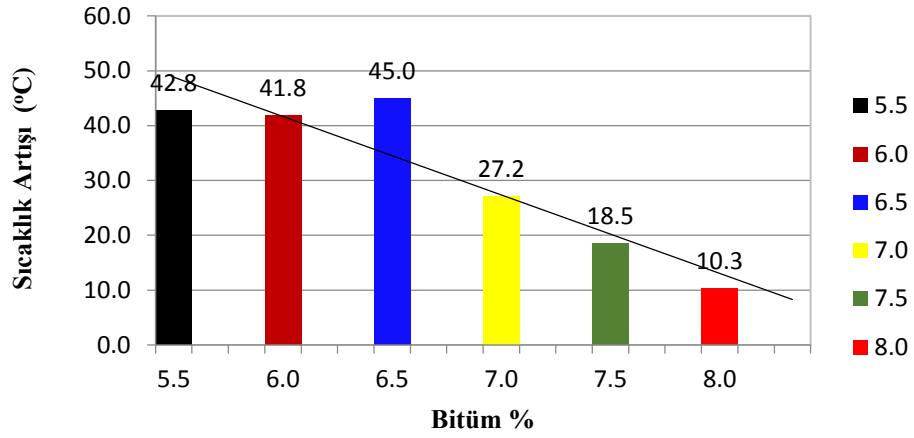
Şekil 4.18 Seri 4.2 Marshall numunelerinde yapılan özdirenç ölçümü sonuçları

Bununla birlikte en yüksek bitüm yüzdesinde ise (% 8,0) belirgin bir yükselme görülmektedir. 2.1, 4.1 ve 4.3 numunelerindeki özdirenç artışları sırasıyla 7.7, 6.9 ve 10,6 Ωm olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerin hala iyi iletken oldukları söylenebilir.

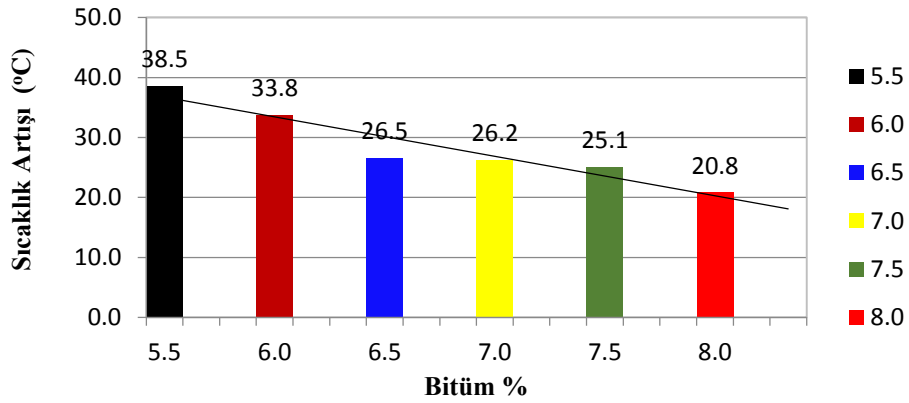
4.11 En İyi İletkenlik Özelliği Gösteren Serilerin Marshall Dizayn Numunelerinde Elektrik Gerilimi ile Isınma Deneyi Sonuçları

Marshall dizaynı için üretilen İAB numuneleri üzerinde 30 Volt DC elektrik gerilimi altında ısınma deneyleri tekrarlanmış ve bitüm miktarı değişimiyle birlikte numunelerde sıcaklık artışları belirlenmiştir. Tüm serilerde bitüm yüzdesi artışıyla birlikte sıcaklık artışlarında azalma görülmüştür. Deney sonuçlarına göre 2.1 ve 4.3 serilerinde % 7,0 bitüm miktarında üretilen numunelerde sıcaklıktaki azalma belirgin bir şekilde düşerken (16,6 ve 32,2 °C) , 4.1 serisinde ise % 6.5 bitüm miktarlarında numunelerdeki sıcaklık azalması belirgin bir şekilde azalmıştır (12 °C). 2.1, 4.1 ve 4.3 Serilerinde en yüksek bitüm miktarına karşılık (% 8,0) gelen sıcaklık kaybı yüzdeleri sırasıyla % 76, % 46 ve % 78 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre karışımdaki bitüm miktarı artışından en az etkilenen kireçtaşı agregalı KS ve KL ilaveli 4.1 serisi olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.19-20 ve 21'de 2.1, 4.1 ve 4.3 serisi Marshall numunelerinde 30 V

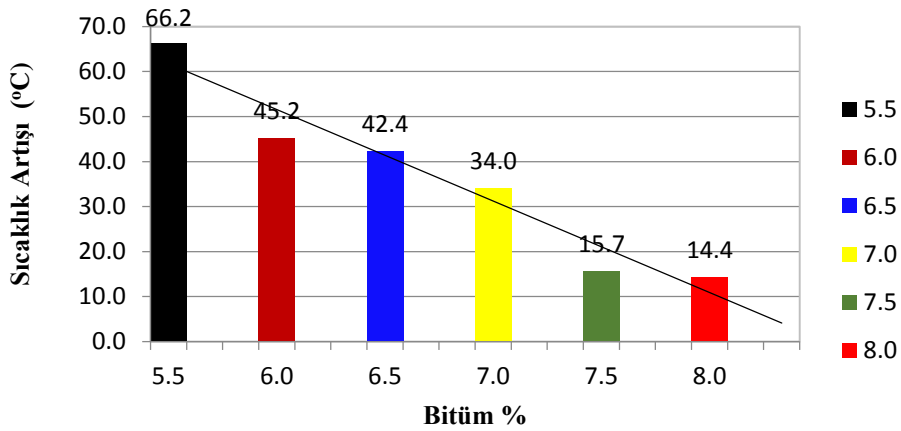
sabit DC elektrik gerilimi altında farklı bitüm yüzdesine karşılık sıcaklık artışı değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.19 Seri 2.1 Marshall numunelerinde farklı bitüm yüzdesine karşılık sıcaklık artışı değişimleri



Şekil 4.20 Seri 4.1 Marshall numunelerinde farklı bitüm yüzdesine karşılık sıcaklık artışı değişimleri



Şekil 4.21 Seri 4.3 Marshall numunelerinde farklı bitüm yüzdesine karşılık sıcaklık artışı değişimleri

4.12 Maliyet Analizi

Bu aşamada çalışmada kullanılan İAB numunelerinin 2.1, 4.1, 4.3 serileri karışım numuneleri için birim fiyat analizi yapılmış ve geleneksel BSK birim fiyatları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.3). Birim fiyat analizinde kullanılan fiyatlar piyasa araştırması yapılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 Çalışmada kullanılan 2.1, 4.1, 4.3 serilerine ait numunelerin ve geleneksel BSK'nın ton başına maliyet karşılaştırması

Malzeme	Normal BSK Miktarı (kg/ton)	2.1 seri İAB Miktarı (kg/ton)	4.1 seri İAB Miktarı (kg/ton)	4.3seri İAB Miktarı (kg/ton)	Birim Fiyatı (₺/ton)	Normal BSK Bileşen.Fiyatı (₺/ton)	2.1 Seri İAB Bileşen . Fiyatı (₺/ton)	4.1 Seri İAB Bileşen . Fiyatı (₺/ton)	4.3 Seri İAB Bileşen . Fiyatı (₺/ton)
İri Agrega Kireç Taşı	340	335	335	yok	13,00	4,42	4,36	4,36	-
İnce Agrega Kireç Taşı	540	530	504	503	14,00	7,56	7,42	7,06	7,04
İri Agrega Bazalt	-	-	-	335	16,00	-	-	-	5,36
İnce Agrega Bazalt	-	-	-	-	17,00	-	-	-	-
Bitüm	60	73	73	74	2.300,00	138,00	167,90	167,90	170,20
Mineral Filler	60	-	-	-	15,00	0,90	-	-	-
Karbon Siyahı	yok	60	60	60	2.800,00	-	168,00	168,00	168,00
Karbon Lifi	yok	2	2	2	50.000,00	-	100,00	100,00	100,00
Metal Tozu	yok	yok	26	26	1.000,00	-	-	26,00	26,00
Toplam ton başına maliyet:						150,88	447,68	473,31	476,60

Sonuçlardan da görüldüğü gibi İAB numunelerinin birim fiyatlarının geleneksel BSK numunelerine göre yüksek olduğu, bununla birlikte bu tip iletken asfalt betonlarının kış aylarında buzlanma problemi olan köprü, tünel çıkışları, eş düzey kavşaklar, düşey eğim vb. kesimlerde kullanılması ile buzlanmadan kaynaklanan trafik kazalarının azalabileceği ve uzun vade de fayda maliyet oranının yüksek olacağı düşünülmektedir.

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında elektriksel iletkenlik özelliği olan asfalt betonu dizaynı için iki aşamadan oluşan bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 25 farklı agrega ve iletken bileşen kombinasyonuna sahip numunelerden en iyi elektriksel iletkenlik özelliğine sahip asfalt betonu karışımlarından üç tanesi belirlenmiş ve ikinci aşamada ise bu belirlenen seriler için Marshall dizaynları yapılmış ve optimum bitüm yüzdeleri hesaplanmış ayrıca serilerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin bitüm yüzdesi değişiminden nasıl etkilendiği belirlenmiştir. Çalışmalar neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Elektriksel iletkenlik açısından en etkili iletken bileşenin karbon lifi olduğu anlaşılmıştır. Karbon lifi içeren 2 ve 4 numaralı serilerin her ikisinde de elde edilen ortalama özdirenç değerleri 11.2 ve 7.0 $\Omega.m$ 'dir. Garcı'a vd. (2009)' ve Wang vd. (2016)'nin de belirttiği gibi karbon lifi (az miktarda) ve karbona dayalı tozların (büyük miktar) kombinasyonu, daha düşük özdirençli iletken asfalt betonu üretmek için etkili bir yöntemdir. 4.1 ve 4.3 serisi numuneler karbon tozu fillere ilaveten hem karbon lifi hem de metal tozu içerdiğinden 2.1 serisine göre daha iletkenidir dolayısıyla bulgular bu durumu doğrulamaktadır.
- 10 dk boyunca sabit 30 V DC gerilimi altındaki en yüksek sıcaklık artışları ise benzer şekilde 3 ve 4 numaralı serilerde görülmüştür. Sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı serilerdeki ortalama sıcaklık artışları 2.1, 10.2, 3.2, **14.5** ve 4.6 ° C olarak belirlenmiştir. Özdirenç sonuçlarıyla benzer şekilde en yüksek sıcaklık artışı değerleri de **4 numaralı** seride elde edilmiştir.
- Çalışmada tamamen kireçtaşı, ince bazalt -iri kireç taşı, ince kireç taşı-iri bazalt, ince ve iri agregasının her ikisi birden bazalt ve ince agregası bazalt ve iri agregası çelikhane cürufu olmak üzere beş farklı agrega kombinasyonu kullanılmıştır. Bu kombinasyonlar açısından değerlendirme yapıldığında sırasıyla ortalama 23,4, 39,6, 32,8, 45,2 ve 23,8 $\Omega.m$ 'lik özdirenç değerleri elde edilmiştir. Agregası açısından değerlendirildiğinde ise; tamamen kireçtaşı ve ince:

bazalt + iri: çelikhane cürufu olan serilerin ortalama iletkenlik üzerinde daha etkili olduğu düşünülmektedir. Agregasına göre sıcaklık artışları, tamamen kireçtaşı, ince bazalt - iri kireç taşı, ince kireç taşı - iri bazalt, ince ve iri agregasının her ikisi birden bazalt ve ince agregası bazalt ve iri agregası çelikhane cürufu olan serilerde sırasıyla 9.9, 5.7, 7.6, 3.3 ve **8.1 °C** olarak belirlenmiştir. Bu deneyden elde edilen sonuçlara göre de tamamen kireçtaşı ve ince agregası bazalt iri agregası çelikhane cürufu olan numunelerin elektrik akımı ile ısınması da daha fazladır. Sonuçlar kaba ve ince agregasınun gruplanmasına göre değerlendirildiğinde, kaba agregası kireç taşı, bazalt ve çelikhane cürufu numuneler gruplanarak ortalama sıcaklık artışlarına bakıldığında, sırasıyla ortalama 7.8, 5.4 ve **8.1 °C** sıcaklık artışı elde edilmiştir. Dolayısıyla kaba agregası çelikhane cürufu olan numunelerde daha fazla sıcaklık artışı görülmüştür. Aynı gruplama ince agregasınun yapıldığında ise ince agregasınun kireç taşı kökenli agregalardan oluşan karışımda ortalama **8.8 °C**, ince agregası bazalt kökenli agregalardan oluşan karışımda ortalama **5.7 °C** sıcaklık artışı görülmüştür. Dolayısıyla karışım içerisindeki iletken bileşen kadar agregasınun de asfalt karışımın özdirenç ve sıcaklık artışları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Kireçtaşı ve çelikhane cürufu kullanılması diğer agregasınun türlerine göre özdirençin azaltılmasında daha etkili olmuştur. Demiroksit bileşenleri içeren bazalt numunesi özdirenç düşüşünde beklenildiği kadar etkili olamamıştır.

- Çalışma sonucunda mineral filler olarak karbon siyahı ile birlikte karbon lifi ve metal tozu kullanımının sıcak karışım asfalt kaplamaları iletken hale getirmede oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte karışımın özdirençini düşürme konusunda, Garcı'a vd., (2009).’ nin, da belirttiği gibi, liflerin filler maddesinden daha etkili olduğu görülmüştür.
- Çevre ve güvenlik açısından değerlendirildiğinde, buzlanmayla mücadele için iletken asfalt betonu (İAB) uygulamaları, geleneksel buz çözücü yöntemlere göre çok sayıda avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. İAB uygulamalarının hayata geçirilmesiyle kritik yol kesimlerinin hiçbir zaman buzlanmaması ve kar

yağışı sonucu kapanmaması sağlanacağı gibi, bu teknolojilerin havaalanlarında kullanılmasıyla uçak iptalleri ve gecikmeleri de yaşanmayacaktır. Ayrıca trafik kazaları da azalacaktır. Tüm bunlara ilaveten, ęevreye zararlı buzlanma önleyici tuzların ve kimyasal solüsyonların kullanımı ve buna bağlı olarak kaplamalardaki olumsuz etkileri azalacaktır. Arağlarda tuzlamadan kaynaklı korozyon hasarları da azalmış olacaktır. İAB kaplamalar yalnızca iletkenlik açısından değil aynı zamanda atıkların da değerlendirilmesi bakımından da ęevre dostu kaplamalardır.

- Seçilen 2.1, 4.1 ve 4.3 serilerinin optimum bitüm miktarları ekonomiklik sınırı içerisinde dir. Stabilit e değerleri şartname sınır değerinin üzerindedir. Akma değerleri şartname sınırlarına göre yüksek olmakla birlikte 2.1 serisi sınır değer civarındadır. Marshall dizaynı sonuçları göze alındığında İAB numunelerin geleneksel asfalt betonlarına yakın davranış sergiledikleri görölmektedir.
- Sonuç olarak seçilen 2.1, 4.1 ve 4.3 numunelerinin buz ve karı eritmek veya kar birikmesini ve buz oluşumunu önlemek için yeterli ısı üretme kapasitesine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Kutluhan, S. (2005). Karayollarında kış bakımını kar ve buz kontrolü. *TMMOB İMO İstanbul Bülten* **76**: 10-16.
- Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *J. Hazard. Mater* **165**(1): 300–305.
- ASTM D 6927-06. (2006). Standard test method for Marshall stability and flow of bituminous mixtures. In *Annual Book of ASTM Standards*, USA.
- Arabzadeh, A, Ceylan, H, Kim, S, Sassani, A, Gopalakrishnan, K, Mina, M. (2018). Electrically-conductive asphalt mastic: Temperature dependence and heating efficiency. *Materials and Design* **157**: 303-313.
- Aydal, D. (2018). Jeokimya Uygulama Notları. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, *JEM 304 Jeokimya Uygulama Notları*.
- BFR. (1998). Basic Road Statistic. British Road Federation, *BFR statistics book*. London s:238.
- Caggiano, M.F., Bentley M. (1998). Route 130 bridge snowfree installation electrical analysis and recommendations. New Jersey Department of Transportation. Final Report. Report no: FHWA-NJ-1998-008.
- Çelik, O.N., Yonar, F., Ceylan, S. (2007). Filler Effects on Bituminous Hot Mixture Performance. Proc. 7th National Cong. On Transportation, İstanbul, 196-204.
- Dolaştır, F. (2009). Polimer malzemelerin elektriksel dirençlerinin ve optik geçirgenliklerinin ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Edirne, 90s.
- García, A., Schlangen, E, van de Ven, M., (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials* **23**(10): 3175–3181.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan H., Kim S., Yang S., and Abdulla H. (2015) Electrically conductive mortar characterization for self-heating air field concrete pavement

- mix design .*International Journal of Pavement Research and Technology* **8**(5): 315-324.
- Gürer, C. (2005). Atık Mermer Parçalarının Bitümlü Yol Kaplamalarında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Gürer, C. (2014). Bitümlü Karışımlar. Lisansüstü Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Gürer, C., Düşmez, C., Gevrek, L. (2015). İletken Asfalt Betonu Uygulamaları. 8. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 257-262. Ankara.
- Gürer, C., Düşmez, C. (2015). Köprülerde iletken asfalt kaplamalarla buzlanmayla mücadele yöntemleri. 3. *Köprüler Viyadükler Sempozyumu*, Bursa.
- Gürer, C., Gürgöze, H. (2017). Investigation the characteristics of conductive asphalt concrete with carbonfibre. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, **6**: 57-63.
- Gürer, C., Boğa, A.R., Akbulut, H. (2018). Investigation of thermal conductivity properties of electrically conductive pavements. Proceedings 3rd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS), 495-498. Skopje, Macedonia.
- Huang, B.S., Chen, X.W., Shu, X. (2009). Effects of electrically conductive additives laboratory-measured properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* **21**(10): 612–617.
- Hunter, R.N., Self, A. (2015) The Shell Bitumen Handbook. 6th Edition.
- Lavin, P. (2003). Asphalt Pavements; A Practical Guide To Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects, 1st ed. Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Li, H., Zhu, L., Qi, X., Sun, M., Zhang, X. (2011). Properties of asphalt conductive concrete containing carbon fibers and graphite powder. First International

- Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 600-607, Wuhan, China.
- Liu, X., Wu, S. (2009). Research on the conductive asphalt concrete's piezoresistivity effect and its mechanism. *Construction and Building Materials* **23**(8): 2752–2756.
- Liu, Q., Erik, S., García, A., Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete, *Construction and Building Materials* **24**: 1207-1213.
- Liu, X., Liu, W., Wu, S., Wang, C. (2014). Effect of carbon fillers on electrical and road properties of conductive asphalt materials. *Construction and Building Materials* **68**: 301-306.
- Liu, X., Rees, S.J., Spitler, J.D. (2003). Simulation of a Geothermal Bridge Deck Anti-icing System and Experimental Validation. TRB 82nd Annual Meeting. Washington DC, US
- Lund JW. Pavementsnowmelting. <http://www.oit.edu/docs/default-source/geoheat-center-documents/publications/snow-melting/tp108.pdf?sfvrsn=2>
- Löfgren, S. (2001). The chemical effects of deicing salt on soil and stream water of five catchments in southeast Sweden, *Water Air Soil Pollution* **130** (1–4): 863–868.
- Kadioğlu M. (2012). Türkiye’de iklim değişikliği risk yönetimi. Türkiye’nin iklim değişikliği II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 172 s.
- Khattak, M.J., Khattab, A., Rizvi, H.R. (2013) “The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology”. *Construction and Building Materials* **30**: 257–264.
- Kuloğlu N. ve Kök B.V. (2005). Karayollarında Kar ve Buz Mücadelesinde Kullanılan Tuzun Beton Asfalt Kaplamaya Etkisi., *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **17** (1): 87-96.
- Minsk, L.D. (1968). Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation. *Highway Research Record* **227**: 57–63.

- Minsk, L.D., Hanover, N.H. (1971). Electrically conductive asphaltic concrete. Patent 3573427 A, USA.
- Önal, M.A., Kahramangil, M. (1993). Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Daire Başkanlığı. 200s. Ankara.
- Özdemir, E. (2011). Karayolu üstyapılarında buzlanmayla mücadelede ısıtılmış agrega kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 97s.
- Özcan, E., Güngör, N., Şen, H. (2005). Kimya Laboratuvar Şefliği Laboratuvar Tanıtım Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Pan, P., Wu, S., Xiao, F., Pang, L., Xiao, Y. (2014). Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications, *Journal of Intelligent Material, Systems and Structures*, 1-15.
- Pan P. Wu S., Hu X., Wang P., Liu Q. (2017). Effect of freezing-thawing on thermal characteristics and mechanical properties of conductive asphalt concrete. *Construction and Building Materials* **140**: 239-247.
- Park, P. (2012). Characteristics and applications of high-performance fiber reinforced asphalt concrete. Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan.
- Park, P., Rew, Y., Baranikumar, A. (2014). Controlling electrical conductivity of asphalt concrete for multi-functional applications, Report no: SWUTC/14/600451-00025-1. Texas A&M Transportation Institute College Station, Texas.
- Qun, Y., Xu, L., Ping, W. (2013). Resistivity measurement of conductive asphalt concrete based on two electrode method. *J. Cent. South Univ* **20**: 2599-2604.
- Rew, Y., Baranikumar A., Tamashauskyy, A.V., El-Tawil, S., Park, P. (2017). Electrical and mechanical properties of asphaltic composites containing carbon based fillers. *Construction and Building Materials* **135**: 394-404.

- Rew, Y., Shi, X., Choi, K, Park, P. (2018). Structural design and lifecycle assessment of heated pavement using conductive asphalt. *Journal of Infrastruct. Syst* **24**(3): 04018019.
- Seferoğlu A.G., Seferoğlu M.T., Akpınar M.V. (2015). Karayolu ve havayolu kaplamalarında kullanılan kar ve buzla mücadele yöntemlerinin mali analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*, **3**(1): 407-416.
- Stratfull, R.F. (1974) “Experimental cathodic protection of a bridge deck” *Transportation Research Record*, **500**: 1–15.
- Tan, Y. (2015). Active de-icing & snow technology of pavement in coldr egion. Presentation notes. School of Transportation science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
- TCK (2013). Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Transit New Zealand (TNZ), RCA, Roding NZ. (2005). Chipsealing in New Zealand, Transit New Zealand, Road Controlling Authorities, Roding New Zealand, Wellington, New Zealand.
- Umar, F., Ağar, E. (1994). Yol Üstyapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Yayınları, 1.Baskı, İstanbul.
- Variş, M. (2007). Karayolları esnek üstyapılarında buzlanma ile mücadele yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı. Isparta. 83s.
- Vo, HV., Park D.W, Seo, W.J., Yoo, B.S. (2017). Evaluation of asphalt mixture modified with graphite and carbon fibers for winter adaptation: thermal conductivity improvement. *Journal of Materialsof Civil Engineering* **29**(1): 48-54
- Vo, H.V., Park D.W., Seo, W.J., Im, J.S. (2015). Effect of conductive filler size andtype on thermal properties of asphalt mixtures. *Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure*, ASCE, 1-7.

- 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.
- Wegner W., Yaggi M. 2001. Environmental impacts of road salt and alternatives in the New York City watershed. *Stormwater*, **2**: 24–31.
- Wu SP, Mo LT, Shui ZH, vd.. (2005b). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, **43**(7): 1358–1363.
- Wu SP, Mo LT, Shui ZH. (2002). An improvement in electrical properties of asphalt concrete. *Journal of Wuhan University of Technology. Materials Science Edition*, **17**(4): 69–72.
- Xiao, J., Kulakowski, B., El-Gindy, M. (2000). Prediction of Risk of Wet Pavement Accidents: FuzzyLogic Model. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. **17** (1): 28-36.
- Yörükoğulları, E. (2005). Doğal zeolitlerin karayollarında buz/kar çözücü olarak kullanımı. Madencilik bülteni inceleme. *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, 40-42.
- 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 and Architectural Engineering*, **3**(1): 1-14.
- Zhou, X., Zhaohui, J.Y., Chang, C., Song, G. (2012). Numerical assessment of electric roadway deicing system utilizing emerging carbon nano fiber paper. *Journal of Cold Regions Engineering*, **26**: 1-15.

İnternet Kaynakları

- 1) http://www.energyabsorption.com/products/products_freezefree_automated.asp,
29.10.2015
- 2) <http://www.mechanic.com.tr/ankara-protokol-yolu-danfoss-devi-sayesinde-ulasima-acik/>, 14.11.2018
- 3) <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/perkolasyon-percolation.html>, 14.11.2018
- 4) www.aksaca.com, 05.06.2016
- 5) <http://merlab.metu.edu.tr/tr/x-isini-difraktometresi>, 11.10.2018

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cihan DÜŞMEZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar – 23.07.1981
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0506 734 4435/cihandusmez@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi, (1992-1999)
Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, (1999-2004)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2015- 2019)
Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Komut Harita Müh/Afyonkarahisar, 2004-2005
6.Jet Üst komutanlığı/ Balıkesir , 2005-2006
Afyonkarahisar Belediyesi /Afyonkrahisar, (2006- devam)

Yayınları (SCI ve diğer):

Gürer C., Akbulut H., Düşmez C., Gevrek L. 2014 Karayollarında Yüzey Sürtünme Özelliklerinin Karayolu Trafik Güvenliğine Etkileri, Özler Kitabı , Ankara.

Düşmez C. 2014, Kar ve Buzlanmayla Mücadelede Aktif Yöntemler ve İletken Asfalt Betonunu, Y.L.Semineri, Afyonkarahisar

Gürer C., Düşmez C. 2015. Köprülerde İletken Kaplamalarla Buzlanmayla Mücadele Yöntemleri. Özler Kitabı, s.53, Bursa.

Gürer C., Düşmez C., Gevrek L. 14-15 Mayıs 2015. İletken Asfalt Betonunu Uygulamaları. 8. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu. s.257-262. Ankara.