



**ELEKTRİKSEL İLETKEN TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA  
GRADASYONUN İLETKENLİK ÜZERİNE OLAN ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Serhat DÜZAĞAÇ**

**Danışman**

**Doç. Dr. Cahit GÜRER**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Eylül 2019**

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.37 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİKSEL İLETKEN TAŞ MASTİK ASFALT**  
**KARIŞIMLARDA GRADASYONUN İLETKENLİK ÜZERİNE**  
**OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Serhat DÜZAĞAÇ**

**Danışman**  
**Doç. Dr. Cahit GÜRER**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Eylül 2019**

## TEZ ONAY SAYFASI

Serhat DÜZAĞAÇ tarafından hazırlanan “ELEKTRİKSEL İLETKEN TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA GRADASYONUN İLETKENLİK ÜZERİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 20/09/2019 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

**İmza**

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

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

**Üye** :Doç. Dr. Nihat MOROVA  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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.**

20/09/2019



Serhat DÜZAĞAÇ

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**ELEKTRİKSEL İLETKEN TAŞ MASTİK ASFALT KARIŞIMLARDA  
GRADASYONUN İLETKENLİK ÜZERİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Serhat DÜZAĞAÇ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı  
**Danışman:** Doç. Dr. Cahit GÜRER

Son yıllarda karayollarında buzlanmanın önlenmesiyle ilgili olarak elektriksel iletken asfalt kaplamaların kullanımıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Asfalt karışımlarda elektriksel iletkenlik üzerinde birçok parametrenin etkili olduğu bilinmektedir. Bunlardan agrega gradasyonunun ne derece etkili olduğu daha önce kapsamlı bir şekilde çalışılmamıştır. Bu tez kapsamında üç farklı agrega gradasyonu ve %6.5, %7, %7.5, %8, %8.5, %9 bitüm oranlarında üretilen taş mastik asfalt (TMA) karışım numunelerine 5 mm uzunlukta ve ağırlıkça %0.2 oranında Karbon Lifi (KL) ilave edilerek iletken TMA numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde iki elektrot yöntemi ile elektriksel özdirenç, sabit elektrik gerilimi altında sıcaklık değişimleri, ultrases geçiş hızları, Marshall stabilite-akma değerleri ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak gradasyon değişiminin TMA karışımların iletkenlik özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

**2019, x + 64 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Taş Mastik Asfalt (TMA), Buzlanma Önleme, Gradasyon Değişimi, Elektriksel İletkenlik.

**ABSTRACT**  
M.Sc.Thesis

INVESTIGATION THE EFFECT OF GRADATION ON CONDUCTIVITY AT  
ELECTRICALLY CONDUCTIVE STONE MASTIC ASPHALT MIXTURES

Serhat DÜZAĞAÇ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Cahit GÜRER

In recent years, numerous researches have been performed on the use of electrically conductive asphalt pavements to prevent icing on roads. It was known that numerous parameters are effective on the electrical conductivity of asphalt mixtures. The effectiveness of aggregate gradation has not been studied extensively before. In this thesis, three different aggregate gradations and 6.5%, 7%, 7.5%, 8%, 8.5%, 9% bitumen rates of stone mastic asphalt (SMA) mixture samples with 5 mm length and 0.2% by weight Carbon Fiber (CF) specimens were prepared. Electrical resistivity by two electrode method, temperature changes under constant electric voltage, ultrasound transition velocity, Marshall stability-flow values were measured on these specimens and the results were compared. As a result, it was seen that the gradation change had an effect on the electrical conductivity properties of SMA specimens.

**2019, x + 64 page**

**Keywords:** Stone Mastic Asphalt (SMA), Anti-icing, Change of aggregate gradation, Electrical conductivity.

## TEŞEKKÜR

Hazırlamıő olduğum tez alıőmamda bilgi ve birikimi ile bana yol gösteren ve bu tezin oluőmasında yaptığı yardım ve katkılarından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Cahit GÜRER'e

Laboratuvar çalıőmalarımnda yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Ayfer ELMACI'ya, Karbon lifleri temin ettiğimiz Dowaksa İleri Kompozit Malzemeler San.Ltd.Şti.'ye, Agregaları temin ettiğimiz Afyonkarahisar Belediyesi Asfalt Őantiyesi ve Kolsan A.Ő.'ye

Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAPK) birimine "18.FEN.BİL.3" numaralı proje ile tez çalıőmasına verdikleri katkıdan dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca bu günlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi destek olan aileme teşekkür ederim.

Serhat DÜZAĞAÇ  
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 .....	3
2.1 Yol Üstyapısı .....	3
2.1.1 Rijit Üstyapı.....	3
2.1.2 Yarı – Rijit (Kompozit) Üstyapı.....	4
2.1.3 Esnek Üstyapı .....	4
2.2 Taş Mastik Asfalt .....	6
2.3 Buzlanma İle Mücadelede Kullanılan Yöntemler .....	9
2.4 İletkenlik Teorisi.....	14
2.5 Elektriksel İletkenlik ve Gradasyon Etkisi ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	16
3. MATERYAL VE METOT .....	29
3.1 Materyal .....	29
3.2 Metot.....	31
3.2.1 Marshall Metodu İle Asfalt Numunelerinin Üretilmesi .....	33
3.2.2 TMA Numunelerinin Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi .....	37
3.2.3 Sabit Elektrik Gerilimi İle Numunelerin Sıcaklık Değişimlerin Belirlenmesi.	39
3.2.4 Ultrases Deneyi .....	40
4. BULGULAR .....	42
4.1 Elektriksel Özdirenç Sonuçları .....	42
4.2 Sabit Gerilim Altında Tekli Numunelerde Sıcaklık Artış Değerlerinin Belirlenmesi .....	44
4.3 Sabit Gerilim Altında İkili Numunelerde Sıcaklık Artış Değerlerini Belirlenmesi	45

4.4 Ultrases Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	46
4.5 Marshall Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	47
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....	55
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	64



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

°C	Santigrad Derece
cm	Santimetre
dk	Dakika
gr	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
KN	Kilonewton
m <sup>3</sup>	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
µm	Mikron metre

### Kısaltmalar

---

A	Briketin Havadaki Ağırlığı
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
AC	Asfalt Betonu
ANN	Yapay Sinir Ağları
ASTM	Amerika Deney ve Malzeme Kurumu
B50/70	Bitüm Penetrasyon Sınıfı
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
Dp	Briketin Hacim Özgül Ağırlığı
Dt	Briketin Torik Özgül Ağırlığı
E	Dinamik Modülü
ECON	Elektriksel İleten Beton
FEM	Sonlu Eleman Yöntemi
Gef	Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı
Gb	Bitüm Özgül Ağırlığı
Gsb	Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı

---

## Kısaltmalar (Devam)

---

İÇD	İndirekt Çekme Dayanımı
İAB	İletken Asfalt Betonu
KL	Karbon Lifi
PP	Polipropilen
R	Ohm Olarak Ölçülen Direnç
ODOT	Ohio Eyaleti Karayolları İdaresi
TMA	Taş Mastik Asfalt
SMB	Splitt Mastix Binder
SPT	Superpave Performans Test Cihazı
V	Briketin Hacmi
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

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.1 TMA 1A Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri .....	42
Şekil 4.2 TMA 2A Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri. ....	42
Şekil 4.3 TMA 8S Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri .....	43
Şekil 4.4 1A, 2A ve 8S tekli numunelerindeki sıcaklık değişimleri .....	44
Şekil 4.5 Tekli numunelerde sabit gerilim altındaki sıcaklık değişimleri.....	45
Şekil 4.6 Ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçları.....	47
Şekil 4.7 Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar....	48
Şekil 4.8 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.....	49
Şekil 4.9 Bitümle dolu boşluk (VFB) ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.....	50
Şekil 4.10 Boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi. ....	51
Şekil 4.11 Akma ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi. ....	52
Şekil 4.12 Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi. ....	53
Şekil 4.13 Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 3.1</b> TMA Tip 1A, 2A ve Alman standardı TMA 8S gradasyonlarının karşılaştırması .....	30
<b>Çizelge 3.2</b> Bitümün mühendislik özellikleri.....	30
<b>Çizelge 3.3</b> Çalışmada kullanılan karbon liflerin mühendislik özellikleri (İnt. Kyn. 7)	30
<b>Çizelge 3.4</b> Agregada özellikleri.....	31
<b>Çizelge 3.5</b> İletken TMA serileri için kullanılan bitüm ve karbon lifi miktarları. ....	32



## RESİMLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Resim 2.1</b> Rijit üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı (Yaseen 2016) .....	4
<b>Resim 2.2</b> Esnek üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı (Yaseen 2016).....	5
<b>Resim 2.3</b> Esnek üstyapı tipik tabakaları (Ayçiçek 2011) .....	6
<b>Resim 2.4</b> TMA'nın uygulama aşamaları (Gürer 2017).....	6
<b>Resim 2.5</b> Selülozik elyaf (İnt. Kyn. 1) .....	7
<b>Resim 2.6</b> Taş mastik asfalt kaplamanın uygulama katmanları (İnt. Kyn. 2).....	9
<b>Resim 2.7</b> Kar ve buzlanma ile mücadele yöntemleri (Gürer 2014).....	9
<b>Resim 2.8</b> Kar ve buzlanma ile pasif mücadele yöntemleri (Gürer 2014).....	11
<b>Resim 2.9</b> Kar ve buzlanma ile aktif mücadele yöntemleri (Gürer 2014) .....	12
<b>Resim 2.10</b> Geleneksel asfalt ve iletken asfalt betonu bileşenleri (Gürer 2014) .....	13
<b>Resim 2.11</b> İletken asfalt betonunda kullanılan özdirenci düşük iletken malzemeler (İnt. Kyn. 3, İnt. Kyn. 4, İnt. Kyn. 5, İnt. Kyn. 6) .....	14
<b>Resim 2.12</b> Toplam iletken madde içeriği ve hacim direnci grafiği (Garci'a 2009) .....	15
<b>Resim 2.13</b> İletken ve modelinin şematik gösterimi (Wu <i>et al.</i> 2005) .....	16
<b>Resim 2.14</b> Çeşitli grafit tiplerinin hacim dirençlerinin karşılaştırılması (Pank 2014) .....	21
<b>Resim 3.1</b> Asfalt karışımı için yıkanıp elenen bazalt ve kireçtaşı numuneleri .....	29
<b>Resim 3.2</b> TMA karışımında iletkenlik için kullanılan 5 mm karbon lifi.....	31
<b>Resim 3.3</b> Karışımlara bitüm eklenmesi ve TMA karışımın kalıplara konulması.....	34
<b>Resim 3.4</b> TMA karışımın ısıtıcılı mekanik mikser ile karıştırılması.....	35
<b>Resim 3.5</b> TMA numunelerinin Marshall Tokmağında sıkıştırılması .....	36
<b>Resim 3.6</b> Üretilen TMA numuneleri .....	36
<b>Resim 3.7</b> İki Elektrot yöntemi ile tekli numune özdirenç ölçümü .....	37
<b>Resim 3.8</b> İki Elektrot yöntemi ile 2'li birleştirilmiş numunelerin özdirenç ölçümü .....	38
<b>Resim 3.9</b> Tekli iletken asfalt numunelerin elektrik akımı ile ısıtılması .....	39
<b>Resim 3.10</b> 2'li birleşim iletken asfalt numunelerin elektrik akımı ile ısıtılması .....	39
<b>Resim 3.11</b> İletken TMA numunesinin ultrases ölçümü.....	41

## 1. GİRİŞ

Ulaşım insanların ve eşyaların yararlı olduğu düşünölen bir amaç için yer değiştirmesidir (Yayla 2013). Ulaşımın konforlu bir şekilde geręekleşmesi için bazı parametreler vardır. Bunlar hızlı, konforlu geręekleşmesi, emniyetli, düzenli olması ve kesintiye uğramamasıdır. Bu parametrelerden güvenlik karayolu mühendislerinin ve konuyla ilgili araştırmacıların sağlaması zorunlu hedefleri arasındadır. Kış aylarında karayollarında meydana gelen buzlanma ve yağış gibi iklim koşullarından kaynaklanan problemler yol güvenliğini tehdit eden unsurlardandır. Ayrıca soğuk hava şartları ve buzlanmayı önlemek için yol yüzeyine serpilene tuz ve çeşitli kimyasal solösyonlar asfalt kaplamalarda önemli hasarlara ve problemlere neden olmaktadır (Gürgöze 2017). Bunlardan en önemlisi yol yüzeyindeki buzlanmadan dolayı kayma sürtünme katsayısının seyir güvenliğini tehdit edecek boyutlara kadar azalması ve duruş mesafesinin kısılmasından dolayı ölümlü ve maddi hasarlı trafik kazalarına neden olmasıdır. Yol yüzeyinin pürüzlölüğü, taşitlara uygun bir frenleme ve iyi bir enine denge imkânı sağlamak için gereklidir. Bir taşıt için “fren uzunluğu” reaksiyon süresi sonunda yapılan frenle taşıtın frenlerinin bloke oluşundan tamamen duruncaya kadar yol yüzeyi üzerinde kayarak gittiği mesafedir (Varış 2007). İstatistikler soğuk hava koşullarının yıllık %10-15 trafik kazalarının en büyük sebepleri olduğunu belirtmiştir ve bu da çok büyük ekonomik kayıplara ve ölümlere neden olmuştur (Yehia *et al.* 2000). Bu nedenle, karın ve buzun zamanında müdahale ile yol yüzeyinden kaldırılması ve asfalt kaplamasının trafikte seyir güvenliğinin sağlanması, soğuk mevsimlerde en çok endişe duyulan hususlardır. Özellikle karayollarındaki tünel içi, girişleri ve çıkışları, köprüler, eğimin yüksek olduğu bölümler (rampa-yokuş), otobüs durakları, yonca kavşaklar, frenlemelerin sık olduğu eş düzey ve farklı düzey kavşak kesimleri bu tip problemlerin yaşanabileceği yol kesimleridir. Bunlar arasında en tehlikeli yol kesimleri ise köprülerdir. Köprülerin tüm yüzeyleri atmosferik etkilere açık olduğu için bu yol kesimlerinde buzlanma diğer kesimlere göre daha önce meydana gelir. Köprülerde buzlanma ile mücadele solösyon ve tuz kullanımı korozyona sebep olarak hem asfalt kaplamalarda hem de taşıyıcı sisteme, çelik konstrüksiyona zarar verebileceğinden bu tip yol kesimlerinde elektriksel iletken kaplama gibi yenilikçi yöntemlerle buzlanmanın önlenmesi daha kritik öneme haiz olmaktadır.

Son yıllarda buzlanma ile mücadelede kullanılan yeni yöntemlerden birisi elektriksel iletkenlik özelliği olan asfalt kaplamalardır. Bu tür kaplamalar elektrik akımı ile ısınabilmekte ve bu sayede hiç buzlanma problemi görülmemektedir (Gürer 2014). İletken Asfalt Betonu (İAB) uygulaması Minsk tarafından 1968 yılında yeni bir kar eritme/buzlanma çözücü geliştirilmiştir. Asfalt betonun iletkenliği karışım içerisine çeşitli iletken malzemeler katılarak elde edilir. İAB içerisinden geçirilen akım üstyapı üzerindeki kar eritme ve buz çözmek için gerekli ısıyı sağlar.

Köprülerde asfalt kaplama türü olarak en çok kullanılan kaplama türlerinin başında taş mastik asfalt (TMA) karışımlar gelmektedir. Özellikle köprülerde kullanılan BSK tabakalarının ömürlerinin uzun, bakım onarım maliyetlerinin düşük, sürüş konforunun yüksek olması her zaman hedeflenen bir amaç olduğu için bu gibi yol kesimlerinde TMA karışımlar kullanılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yapılan tez çalışmasında üç farklı gradasyonda iletken TMA karışımları üretilmiş ve numuneler üzerinde elektriksel iletkenlikle ilgili deneyler yapılarak iletken bitümlü karışımlarda gradasyonun etkili olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Yol Üstyapısı

Karayolu yapısı, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak belirlenmiş olan bir güzergâh boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilebilmesi ve üzerinde taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanır. Karayolu; yapısı, görevi, yapım sırası ve özellikleri açısından alt ve üstyapı olarak iki ayrı bölümde incelenebilir (Ayçiçek 2011).

Karayolu tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölgeye altyapı denir. Altyapı, yolun dolgu kesimlerinde dışarıdan getirilen malzemedir, yarma kesimlerinde ise doğal zeminden oluşur. Altyapının karayolu yapısındaki görevi, istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üstyapı tarafından aktarılan yükleri geniş bir yüzeye yaymak ve yolu dış etkilere karşı korumaktır (Ayçiçek 2011).

Üstyapı ise trafik yüklerini taşıyan ve altyapının taşıyabileceği değere kadar indirerek altyapıya aktaran, düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlayan alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşan tabakalı bir yapıdır. Üstyapılar, tabakalardan kullanılan malzemelerin özelliklerine göre rijit, yarı-rijit (kompozit) ve esnek olmak üzere üçe ayrılırlar.

#### 2.1.1 Rijit Üstyapı

Yüklerin büyük bölümünün beton plaka tarafından karşılandığı, kalan kısmının altyapıya aktarıldığı üstyapı tipidir. Beton plaka yüksek elastisite modülü ve rijitliği sayesinde yükün büyük bir kısmı karşılar, yükün kalan küçük kısmı ise alt yapıya aktarır. Üstyapı tabanının dayanımına bağlı olarak plakanın altına temel tabakası yapılabilir ya da yapılmayabilir. Temel tabakasının görevi beton plaka için düzgün bir taban oluşturmak ve yeterli drenajı sağlamaktır. Rijit üstyapılar genellikle ağır trafik yüküne maruz kalan karayolları ve havaalanlarında taşıtlar için gerekli sürüş konforu ve

sürüş emniyetini temin etmek amacıyla kullanılırlar. Resim 2.1’de Rijit üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı gösterilmektedir.



**Resim 2.1** Rijit üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı (Yaseen 2016).

### 2.1.2 Yarı-Rijit (Kompozit) Üstyapı

Yarı rijit üstyapılarda esnek üstyapılardan farklı olarak, granüler temel veya alt temel yerine çimento bağlayıcılı granüler temel veya çimento ile stabilize edilmiş alttemel kullanılır. Bu tabakaların üzerine sırasıyla bitümlü temel, asfalt betonu, binder ve aşınma tabakaları serilir (Arıkan 1997).

Yarı rijit üstyapılar, zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak bitümlü karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak elde edilir (Tunç 2007).

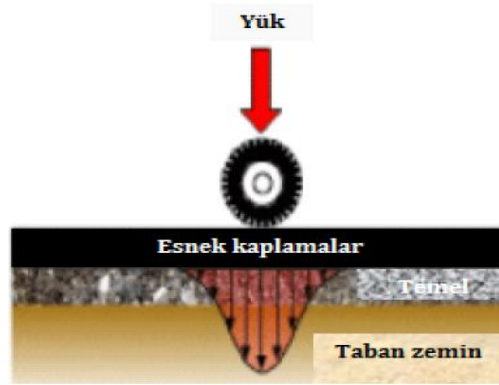
### 2.1.3 Esnek Üstyapı

Yüklerinin büyük bir kısmının üstyapıyı oluşturan bitümlü bağlayıcılı ya da bağlayıcısız tabakalar tarafından taşındığı, kalan kısmın tabana aktarıldığı üstyapı tipidir. Stabilitesi, agrega kenetlenmesine, dane sürtünmesine ve kohezyona bağlıdır (Orhan 2012).

Esnek Üstyapı tabakalarını şu kısımlara ayırabiliriz;

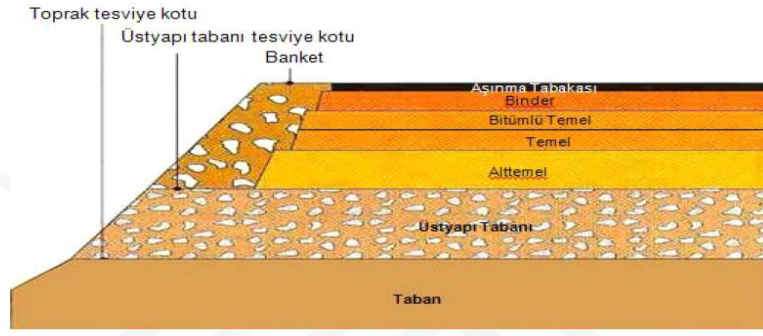
- Kaplama tabakaları
- Temel (Çimento Bağlayıcı Granüler Temel)
- Alttemel (Kırmataş, Kum-Çakıl)
- Seçme Malzeme Tabakası
- Stabilize Edilmiş Zemin (veya ıslah edilmiş zemin) (Tunç 2004).

Esnek üstyapılarda asfalt kaplamasına gelen trafik yükü sırasıyla temel, alt temel tabakalarına yayılarak doğal zemine intikal eder. Bu nedenle yükün taşınmasında her tabaka önemlidir. Tabaka kalınlıkları yüke ve zemin özelliklerine bağlı belirlenir (Yeğinobalı 2009). Tabaka kalınlıkları zemin taşıma gücü ve trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanır. Resim 2.2’de Esnek üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı gösterilmektedir.



**Resim 2.2** Esnek üstyapılarda trafik yüklerinin zemine aktarımı (Yaseen 2016).

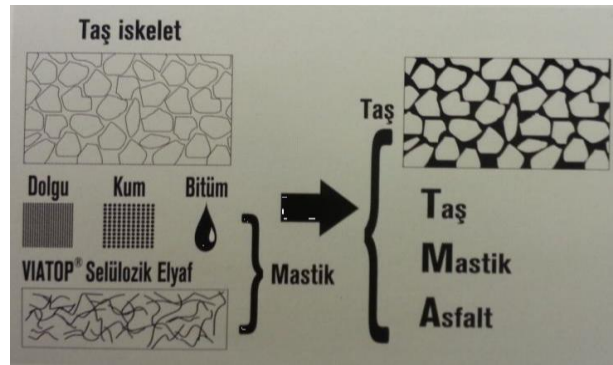
Esnek üstyapıların yapımında sırasıyla doğal zemin üzerine sıkıştırılmış zemin tabakası, alt temel, temel ve bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaları serilir. BSK tabakaları bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından oluşur. BSK tabakaları kaplamanın üst kısmında olması sebebiyle gerilmelere ve çevresel etkilere karşı temel ve alt temel tabakalarına göre daha dirençli olmak zorundadır. Bu nedenle bu tabakalarda mekanik özellikleri daha iyi olan malzemeler kullanılması gerekmektedir. Resim 2.3’de Esnek üstyapı tipik tabakaları gösterilmektedir.



**Resim 2.3** Esnek üstyapı tipik tabakaları (Ayçiçek 2011).

## 2.2 Taş Mastik Asfalt

Avrupa'da taş mastik asfalt olarak adlandırılan, yirmi yılı aşkın süredir küresel asfalt kaplama pazarını oldukça yüksek bir hızla devralmıştır. TMA karışımı veya Almanya'daki ismiyle "Splitt mastix Asphalt" 1960'lı yılların ortalarından beri bilinmektedir. TMA, iri agregadan oluşmuş bir iskelet ile boşlukları dolduran ince agrega filler-bitüm harcının karışımıdır (Orhan 2012).



**Resim 2.4** TMA'nın uygulama aşamaları (Gürer 2017).

TMA karışımlar %70-80 oranında kaba agrega, %20-30 oranında ince agrega ile minimum %6.5 gibi yüksek bir oranda bitümden oluşur. Karışımda kaba agreganın daha fazla olması sonucu oluşan boşluklar ince harç ile kapatılır. Bu ince harç mineral filler, bitüm ve bitümü tutan elyaf ile doldurulmaktadır. Bu elyaf sayesinde daha yüksek miktarda kullanılan bitüm, kaba agrega üzerinde süzülmeden tutunabilir (Gürer 2017).



**Resim 2.5** Selülozik elyaf (İnt. Kyn.1).

TMA'nın asfalt betonuna göre büyük üstünlüklere sahip olduğu belirtilmektedir. Bu avantajlar şöyle özetlenebilir.

- Uzun çalışma ve servis ömrü,
- Yüksek iri agrega içeriği ve kenarlı agrega parçacıklarının güçlü iskeletine bağlı deformasyona karşı yüksek direnç oluşturması,
- Bağlayıcı içeriği artığı için artan yorulma ömrü,
- Sert ve kaba agrega tanelerinin varlığı nedeniyle artan aşınmaya direnci,
- Katman yüzeyinin kaba dokusundan dolayı işletme sırasın su sıçratmaları daha azdır,
- Gürültü azaltma özelliğini olması,
- Kesikli gradasyon sahip agrega yapısından dolayı yüksek sürtünme seviyesi sağlar ve fren mesafesini kısaltır, bu sayede trafik güvenliği artar (Blazejowski 2011).

Taş mastik asfaltlar uzun servis ömürleri, daha seyrek bakım gerektirmeleri vb. özelliklerinden dolayı köprü, tünel gibi yol kesimlerinde sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu nedenden dolayı bu çalışma kapsamında üç farklı taş mastik asfalt gradasyonu kullanılarak iletken TMA numuneleri üretilmiştir.

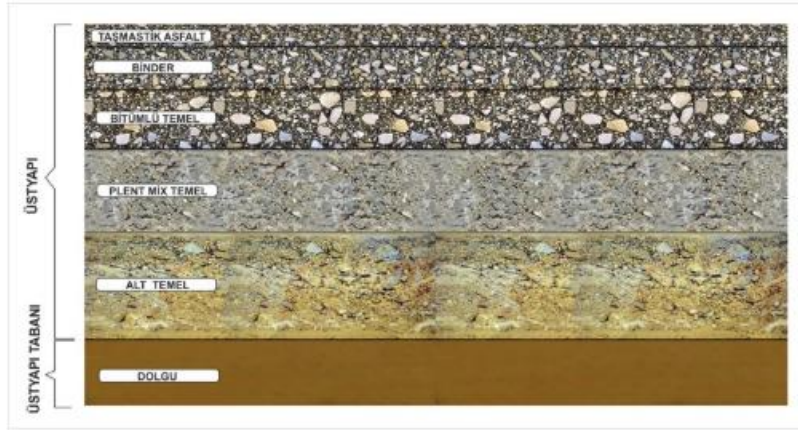
Dezavantajları da şöyle özetlenebilir.

- Yüksek bitüm oranı ve mevcut bitümün süzülmesini önlemek amacıyla elyaf kullanma zorunluluğu,
- Yüksek bitüm oranı, elyaf ve daha dayanıklı agregaya kullanma zorunluluğundan dolayı yüksek maliyet,
- Karıştırma, serme ve sıkıştırma sıcaklıklarının 10-15°C daha yüksek oluşu, karıştırma süresinin 10-15 sn. daha uzaması,
- Bağlayıcının yüzeyde toplanmaması için TMA karışımının 40°C'ye kadar soğumadan yolun trafiğe açılmaması gerekir. Bu yüzden yolun hizmete açılma süresinin uzamasıdır.

Genel olarak, iyi tasarlanmış bir TMA aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Yüksek stabilite, tekerlek izinde deformasyona karşı direnç,
- İyi bir yüzey sürtünme özelliği,
- Durabilite özelliklerinin iyileşmesi ve yaşlanmanın azalması,
- Yüzeyden trafiğin etkisiyle su sıçramanın azalması,
- Trafik gürültüsünün azalması,
- Karışımın homojenliğinin artmasıdır (Woodside *et al.* 1999).

TMA karışımlar genellikle aşınma tabakalarında kullanılır. TMA karışımları önceleri yüzey kaplamaları için dizayn edilmelerine karşın Almanya ve ABD gibi ülkelerde, binder (orta) tabakalarında da (Splittmastixbinder–SMB adıyla) denenmeye başlanmıştır (Gürer 2017). Resim 2.6'da Taş mastik kaplamanın uygulama katmanları gösterilmiştir.



**Resim 2.6** Taş mastik asfalt kaplamanın uygulama katmanları (İnt. Kyn.2).

### 2.3 Buzlanma ile Mücadelede Kullanılan Yöntemler

Kış aylarından karayollarında buzlanma ve yağış gibi iklim koşullarından kaynaklanan problemler karayolu ulaşımında güvenliği tehdit eden en önemli unsurlardan birisidir. Ayrıca soğuk hava koşulları asfalt kaplamada, kar ve buzlanmadan dolayı, önemli hasarlara ve problemlere neden olmaktadır. Yukarıda bahsedilen olumsuzlukları önlenmesi için kar ve buzlanmayla mücadele yöntemlerine gerek duyulmuştur. Kar ve buzlanma ile mücadele yöntemleri, geleneksel ve yenilikçi yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Resim 2.7’de kar ve buzlanma ile mücadelede kullanılan yöntemler verilmiştir.



**Resim 2.7** Kar ve buzlanma ile mücadele yöntemleri (Gürer 2014).

Yol yüzeyindeki kar birikimi ve buzlanma gibi olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için geleneksel olarak kar yağışından sonra fiziksel ve kimyasal mücadele yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler yağıştan sonra uygulandıkları için pasif yöntemler olarak adlandırılmaktadır.

Pasif yöntemlerin dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Fiziksel yöntemler yoğun işgücü, araç parkı ve yakıt gerektiren yöntemler olup, yağışın sürekli olması durumunda etkisiz kalmaya başlarlar.
- Kimyasalların sebep olduğu, çevre kirliliği ile ekolojik yaşama negatif etkileri bulunmaktadır.
- Köprülerde ve üst yapı yardımcı elamanlarında, asfalt kaplamalarda ve araçlarda korozyon kaynaklı hasarlar oluşturmaktadır (Cahit 2014).

Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan kar ve buz giderme yöntemi kimyasal kullanımı ve tuzlamadır. Bu yöntemler buzlanmaya karşı yetersiz kalmanın yanında asfalt kaplamasına sistematik olarak zarar vermekte ve ömrünü azaltmaktadır. Örneğin, buzu çözen kimyasalların kullanımı asfalt kaplamaları ve köprü güvertelerini korozyona uğratmakla kalmaz, aynı zamanda toprak ekolojik çevresi üzerinde yıkıcı etkiye sahiptir (Wang *et al.* 2006). Kimyasal madde ve tuz kullanımı, düşük maliyetli bir çözüm olarak görülmesinin yanı sıra hava sıcaklığının çok düşük olduğu şartlarda beklenen faydayı sağlamamaktadır. Örneğin NaCl gibi tuzlar sıcaklık  $-3.9^{\circ}\text{C}$ 'nin altına düştüğünde buz eritmede yetersiz kalmaktadır (Cahit 2014).

Kar ve buzlanmada kullanılan diğer bir pasif yöntem paletli kar öteleme makineleri ve kar blowerlarıdır. Kar kaldırma makineleri, yüksek bakım gerekliliği, büyük miktarda insan gücü ve malzeme kaynağı gerektirir. Makine titreşimi ve mekanik cihazın yanlış kullanımı da doğal servis süresi boyunca asfalt kaplamasının yüzeyinin hasar görmesine neden olacaktır.



**Resim 2.8** Kar ve buzlanma ile pasif mücadele yöntemleri: a) kar bloweri b) kar sıyırıcı c) solvent serici d) tuzlama çalışması (Gürer 2014).

Kar-buz mücadelesi için en etkili bir yöntem kar-buz olayı ortaya çıkmadan önce çalışmaya başlayan bir aktif eritme sistemi istihdam etmektir. Aktif bir sistem sorunla birlikte eş zamanlı olarak devreye giren sistemlerin tümüdür. Kar ve buz ile mücadele etmek amacıyla geliştirilmiş yeni bir kimyasal yöntem olan “Otomatik Buzlanmayı Önleyici Sprey” sistemi yerleştirilen otomatik bir buz uyarım sistemi yardımıyla gerekli bilgileri alıp ve anında müdahale yapabilen bir yöntemdir. Otomatik Buzlanma Önleyici Sprey Yönteminin temel prensibi, uygulama bölgesine yerleştirilen sistemle kaplamaya buzlanmayı önleyici kimyasalların püskürtülmesi ve bu sayede buzla kaplama yüzeyi arasında kimyasal bir tabaka oluşturularak buzun kaplamaya yapışmasını engellemektir. Otomatik buz önleme sistemi bütün yol tiplerine uygulanabilmesine rağmen özellikle köprülerde kullanılmaktadır ama optimum düzeyde dahi olsa kullanılan kimyasalların kaplama ve köprülerdeki zararları aynı zamanda çevreye verdiği zararlar unutulmamalıdır. Bu tip solüsyonlar yüzeyin kayganlaşarak trafik seyir güvenliğinin de tehlikeye düşmesine yol açabilmektedir (Gürer 2014). Güvenlik şartları için sadece kar ve buzlanma ile mücadele sürecinde değil mücadele sonrasındaki koşullara da önem verilmelidir.

Aktif sistemlerin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Bu yöntemler oldukça etkili ve çevre dostu yöntemlerdir.
- Uzun dönem maliyetlerinin pasif sistemlere göre daha düşük olduğu söylenebilir.
- Kontrol edilebilir sistemlerdir.
- Soğuk havalar için acil eylem planlarının başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlarlar.

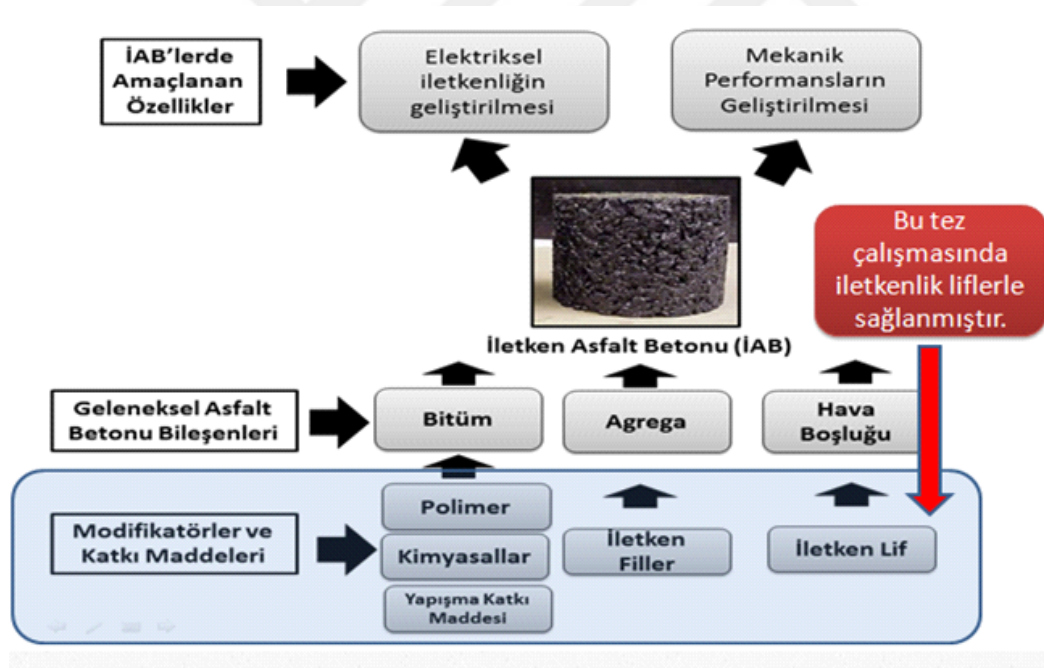
Günümüzde mevcut çalışmalar ile buzlanmayı önlemede geleneksel yöntemlerin sebep olduğu sorunları önlemek, asfalt kaplamasındaki yüzeyin buzlanmasını önlemek ve karı eritmek için bilim insanları ve mühendisler araştırma içine girmiştir. Son yıllarda, “İAB” (Minsk, 1968), “Hidronik üstyapı sistemi” (Lee *et al.* 1984), “Donmaya dirençli asfalt karışımları” (Zhou ve Tan 2009) ve tuz modifiyeli karışımlar (Liu *et al.* 2014) aktif kar eritme sistemleri ile ilgili çalışmalara örnek olarak verilebilir.



**Resim 2.9** Kar ve buzlanma ile aktif mücadele yöntemleri: a) solüsyon püskürtme sistemleri b) donmayan asfalt karışımlar c) hidronik buz eritme sistemleri d) elektrik kablolarıyla buz eritme sistemleri (Gürer 2014).

Bu araştırmaların odaklandığı noktalardan birisi de iletken asfalt betonu teknolojisidir. Kış aylarında emniyetli sürüş sağlamak için geliştirilmiş aktif bir buzlanma ile mücadele yöntemidir. İletken Asfalt Kaplamalar, hava sıcaklığı düşüşleri ve nem artışlarına duyarlı almaçlarla devreye giren aktif sistemler olup buzlanmayı daha oluşmadan önleyebilmektedir.

Geleneksel asfalt karışımları kaba agrega, ince agrega, asfalt bağlayıcı ve mineral filler içermektedir. Bileşenlerin yüksek özdirence sahip olmalarından dolayı geleneksel asfalt karışımları  $10^8$ - $10^{12}$   $\Omega$ .m direnç değeri ile yalıtkan davranış gösterirler (Wu *et al.* 2002). Literatür taramaları bu tür yalıtkanların bile içerisine iletken materyaller katılarak iletken hale dönüştürebileceklerini (10  $\Omega$ .m özdirenç mertebesinden düşük) belirtmektedir. Resim 2.10'da iletken asfalt betonlarını oluşturan bileşenler görülmektedir.



**Resim 2.10** Geleneksel asfalt ve iletken asfalt betonu bileşenleri (Gürer 2014).

Rodgers vd. (2010) bitümü karbon siyahı ve demir tozu ile modifiye ederek özdirence azalttıklarını rapor etmişlerdir. Partikül boyutlarına göre üçe ayrılan malzemeler:

- Grafit, karbon siyahı ve alüminyum çapakları gibi toz şeklinde (Wen and Chung 2004);
- Karbon fiber (CF), çelik fiber (SF), çelik yünü, karbon nanofiber gibi lif şeklinde (Wu *et al.* 2005);
- Kaba ve ince agrega olarak çelik cürufu şeklinde bulunabilirler.

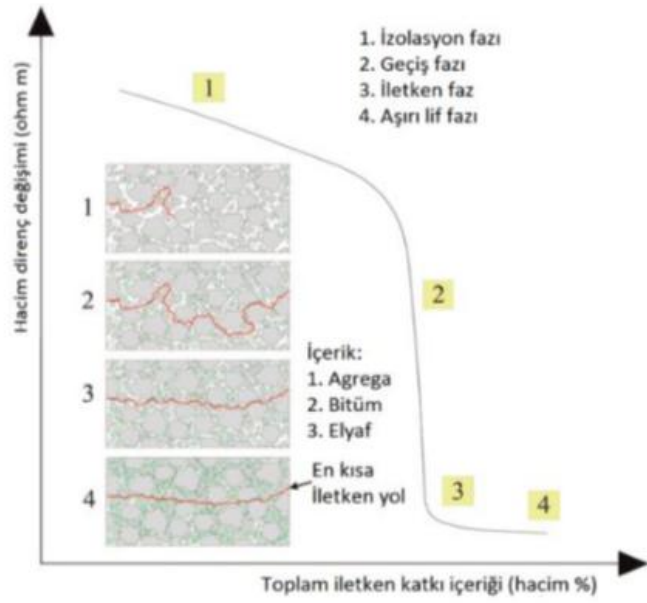


**Resim 2.11** İletken asfalt betonunda kullanılan öz direnci düşük iletken malzemeler  
(İnt. Kyn.3, İnt. Kyn.4, İnt. Kyn.5, İnt. Kyn.6).

Tek bir iletken malzeme ile ilave edilmiş asfalt betonları bazı sınırlamalara ve zorluklara sahip olup iletken bileşen ilavesi ile maliyetinin artmasının yanı sıra bir ölçüde mekanik performansla ilgili sorunlarda olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar farklı tip iletken malzemelerin kombinasyonları ile hazırlan İAB'lerin yeterli mekanik ve elektriksel özelliklere sahip ve uygun fayda/maliyeti sağlayacağı belirtilmiştir (Pan 2014).

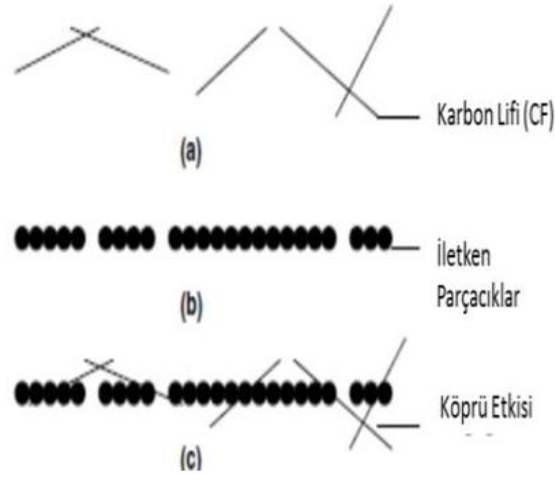
## 2.4 İletkenlik Teorisi

Asfalt betonu numunesi boyunca yeterli bir uzunlukta iletken bir yola sahipse, yalıtkandan bir iletkene dönüştürülebilir. Bu durumda böyle bir iletken yol etkili nitelikte olmalıdır. Bu nitelik eşik etkisiyle yani performans iletimini göstermenin basit bir versiyonu olan Perkolasyon teorisi ile açıklanmıştır. İAB için, iletken bileşenin içeriği kritik bir değere (eşik değeri) ulaştığında, öz direnç 7-10  $\Omega$ .m değerine veya daha aşağı değere inebilmektedir. Resim 2.12'de yalıtılmış faz, geçiş fazı ve iletken faz da dahil olmak üzere üç farklı fazı göstermektedir (Garcı'a 2009).



**Resim 2.12** Toplam iletken madde içeriği ve hacim direnci grafiği (Garcı'a 2009).

Geçiş fazında, özdirenç, kritik içerik olarak adlandırılan iletken dolgunun küçük bir değişimi ile az ya da fazla bir şekilde azalır. Yine, özdirençte hem yalıtılmış fazda (kritik içerik altında) hem de faz sonrası (kritik içerik ötesinde) ufak değişiklikler gözlenmektedir. Yalıtılmış fazda, bağlı iletken köprüler çok etkili bir iletken hat oluşumu göstermemektedirler. Bu durumda özdirenç, çok yüksektir ve geleneksel asfalt betondakine benzerdir. İletken malzemenin konsantrasyonu kritik içeriğe ulaştıktan sonra, iletken köprü etkili bir iletken yol oluşturmak için yeterli seviyeye gelir. Bu durumda asfalt betonu yalıtıktan, iletkenliğe dönüşmektedir. İletken faz sonrasında, iletken dolgu hacmindeki artış, belli bir değerden sonra iletkenliğin daha fazla azalmasını sağlamamaktadır. Bu nedenle, asfalt betonuna aşırı miktarda iletken malzeme ilavesi özdirenci etkili bir şekilde azaltmaz (Garcı'a 2009).



**Resim 2.13** İletken ve modelinin şematik gösterimi (a) ve (b): Basit filler sisteminde dizayn edilmiş devam etmeyen iletken köprü, (c) karma filler sisteminde düzenlenmiş sürekli iletken yol (Wu *et al.* 2005).

Resim 2.13.b’de Perkolasyon teorisine göre dolgu içeriği az olması durumunda iletken parçacıklar arasındaki boşluklar nedeniyle iletken köprü sağlanamıyor (c) de ise karma filler sisteminde düzenlenmiş bir asfalt betonu içinde karbon lifleri sayesinde iletken parçacıklar arasında köprü etkisi ile iletkenlik sağlanıyor.

## 2.5 Elektriksel İletkenlik ve Gradasyon Etkisi ile İlgili Önceki Çalışmalar

Fitzgerald (2000) yapmış olduğu “Karbon-Karbon Ön Formları ve Takviyeli Asfalt Sıcak Karışımlar İçin Karbon Lifinin Yeni Uygulamaları” başlıklı tez çalışmasında, bitümlü karışımlara karbon lifi (KL) ilavesinin etkilerini araştırmıştır. Araştırma sonucunda karbon lifi ilavesinin elektriksel özdirençte azalmaya neden olduğu ve bu sayede buzlanma önleyici kaplamalar olarak kullanılabileceğini tespit etmiştir. Ayrıca karbon lifi ilavesinin bitümlü sıcak karışımların (BSK) mekanik özelliklerinin gelişiminde pozitif yönde bir etkiye sebep olduğu ve gelişen mekanik özellikler sayesinde çevresel şartlara karşı durabil ve uzun ömürlü kaplamaların oluşmasının sağlanabileceği belirtilmiştir. Fitzgerald, BSK'lara ilave edilen karbon liflerinin zayıf dağılım eğiliminde olduğu bu nedenle uzun karıştırma sürelerine ihtiyaç olduğu fakat uzun karıştırma sırasında agrega ile uzun süreli temas halinde karbon liflerinin bozulmaya maruz kaldığını tespit etmiştir. Çalışma sonucunda karbon lifi dağılım

yöntemi olarak liflerin bitüm ile birlikte düşük yoğunluklu poietilen malzeme ile yaprak şeklinde matris malzemesi olarak sarılması önerilmiştir.

Wu vd. (2002), “Asfalt Betonunun Elektrik Özelliklerinde Bir İyileştirme” başlıklı çalışmada kristalize grafit ve mikrokristalin grafit ilavesinin asfalt karışımın elektriksel özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucu asfalt karışıma ağırlıkça %0 ile %20 arasında değişen oranlarda grafit ilavesi ile  $10-10^3 \Omega$  civarında dirençli bir iletken asfalt betonu elde edildi. Bu çalışmada farklı asfalt numuneleri üretmek için penetrasyon derecesi 65 olan bitüm, bazalt agregalar, kireçtaşı filler, kristalize grafit ve mikrokristal grafit kullanılmıştır. Farklı tip ve oranlarda iletken madde ilavesi üretilen asfalt karışımların elektriksel özdirençleri ve sıcaklıkları ölçülerek hesaplamalar yapılmıştır. Termal test sonuçları grafit parçacıklar gibi iletken malzemelerin eklenmesi ile özdirenci  $10 \Omega$ 'a kadar olan iletken asfalt betonu elde edilebileceğini, kristalize grafit parçacıklarının dirençlilik üzerindeki etkisi, mikro kristalli grafit parçacıklarınıninkine benzer olduğunu ancak kristalize grafit partikülleri, direnci düşürmede daha etkili olduğunu göstermiştir. Elektriksel iletkenlik ile sıcaklığın ilişki incelendiğinde mikrokristalli grafit asfalt betonunun direnci sıcaklıkla sürekli arttığı, bununla birlikte, kristalize grafit asfalt betonu için sıcaklık artışıyla birlikte bir dönme direnci oluştuğu görülmüştür. Mikrokristalli grafit katkılı asfalt karışım  $80^\circ\text{C}$  kadar dönüm noktası oluşmadan sıcaklık arttıkça özdirenci orantılı bir şekilde artar. Kristalize grafit katkılı asfalt betonunda sıcaklık özdirenç bir süre arttıktan sonra dönüm noktası oluşur ve bu noktadan sonra özdirenç sıcaklıkla düşme eğilimine geçer. Kristalize grafit katkılı asfalt betonu için %3, %3.5 ve %4 kristal grafit içerikleri için dönüm noktası sırasıyla  $25^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$  ve  $35^\circ\text{C}$  olarak belirlendi. Sonuç olarak asfalt betonunun iletken mekanizması esas olarak partiküller temas iletken teorisi ve tünelleme etkisi ile açıklanmıştır. Grafit parçacıklarının içeriği, sıcaklığı ve asfaltın içeriği grafit parçacıkları arasındaki boşlukları ve temas hallerini değiştirebilir.

Ding vd. (2008), Grafit katkılı iletken taş mastik asfalt (TMA) hazırlanması Üzerine Deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada iletken TMA numunelerin hazırlanmasında asfalt bağlayıcı olarak modifiye edilmiş bitüm, agrega-mineral filler olarak kırma taş bazalt ve öğütme kireçtaşı tozu, elyaf olarak da polyester elyaf

kullanılmıştır. Asfalt karışımına üç farklı tip grafit (LZ100-92 pul grafit, LG150-94 pul grafit ve LG150-96 pul grafit) %0, 10, 30, 40 oranlarında olmak üzere çeşitli oranlarda ilave edildikten sonra batırma türü elektrot kullanılarak iletken TMA'nın elektrik performansı ölçülmüş ve grafit tipinin asfalt karışımlarının elektrik performansının iyileştirilmesine olan etkisi araştırılmıştır. Direnç test sonuçları, TMA karışımlara iletken malzeme olarak grafit eklendiğinde elektriksel performansı etkili bir şekilde artırdığı, grafit içeriğinin belirli bir değeri aştığında ise iletken karışım direnci üzerinde kızaklama etkisi yarattığı, iletken malzemelerin geometrik ve malzeme parametrelerinin iletken performanslarını etkileyen başlıca faktörler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca grafit içeriğinin artmasıyla, iletken TMA'nın optimum bitüm miktarının %6.1 den %8.9'a arttığı, Marshall Stabilite değerinin 10.74 kN dan 8.41 kN'a düştüğü, bununla birlikte kaplama malzemesi olarak uygulama güvenliğini sağlayan diğer performansların yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Zaman, sıcaklık ve voltaj gibi dış faktörlerin ise iletken TMA'nın elektrik performansı üzerinde farklı etkiler oluşturduğu, iletken TMA karışımların direncinin zamanla önemli miktarda değişmediği ancak sıcaklık ve voltajdan önemli miktarda etkilendiği gözlemlenmiştir.

Côté vd. (2013), Bitümlü karışımların ısı iletkenliğini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kloritist ve bazalt bitümlü arışımlar için farklı gradasyonlarda dört farklı karışım ve deneyin tekrarlanabilirliğini doğrulamak için her gradasyon tipi için iki numune hazırlanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre bitümlü karışım numunesinin termal iletkenliğinin agreganın mineral orijinli olup olmadığına ve hava boşluğu miktarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitümün, Portland çimentosu ve tortul kayalarda bulunan doğal bağlayıcılar gibi diğer bağlayıcı türlerine benzer şekilde agrega parçacıkları arasında termal köprü oluşturduğu görülmüştür. Agrega gradasyonun termal iletkenliğe etkisini araştırmak için maksimum boyut 10 mm'den 20 mm'ye kadar ve dolgu maddesi miktarı (0-5 mm) %7.5 ila %33.5 arasında olan farklı gradasyon dağılımları çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ısı iletkenliğinin agrega boyutundan önemli ölçüde etkilenmediğini görülmüştür.

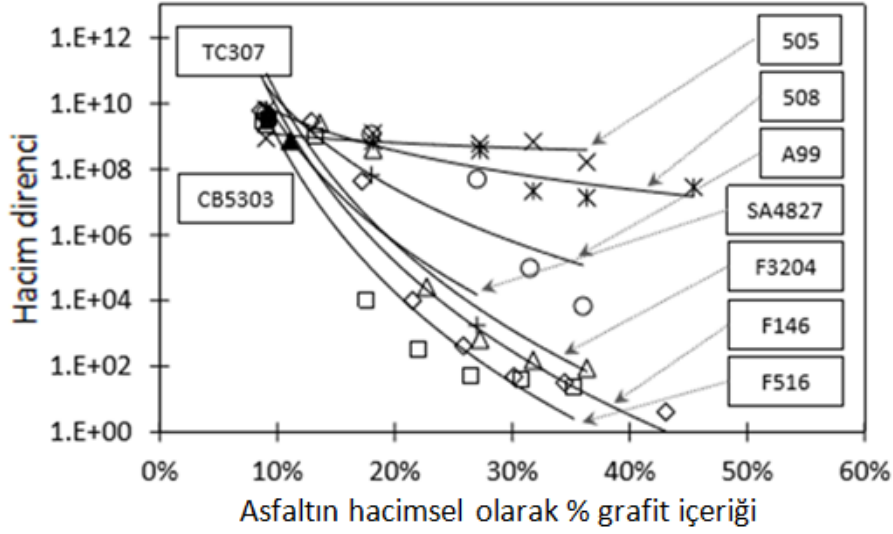
Dai vd. (2013), "Çatlak İyileştirme Deneyleri Aracıyla Mastik ve Asfalt Betonu Kirişlerin Elektriksel Olarak İletkenlikleri Üzerinde İndüksiyon İyileştirici Etkilerinin

Araştırılması” başlıklı çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada indüksiyon ısıtmalı mastik asfalt ve asfalt beton kiriş numunelerinin elektro aktif iyileşme kapasitesini araştırmak için numunelere iletken çelik yünü elyaflar karıştırılmıştır. Mastik asfalt ve asfalt beton kirişlerin hazırlanmasında agregaya bağlayıcı olarak hacim olarak %1.60 bitüm, iletken bir bileşen olarak asfalt bağlayıcı madde hacmine göre %5.66 çelik yün elyaf kullanıldı. Daha sonra, mastik asfalt kirişler indüksiyon iyileşme süreci ve üç noktalı eğilme deneyi altında kırık iyileşme döngüleri ile, asfalt beton kirişleri ise elastik bir temel desteği ile ve iyileşme prosedürü vasıtasıyla modifiye edilmiş üç noktalı eğilme deneyleri kullanılarak çatlak iyileşme döngüleri test edilmiştir. Kırılma deneylerinden önce, tüm numuneler oluşmamış deformasyon ve viskoelastik limitleri için dondurucuda 20°C'de 6 saat boyunca şartlandırılmıştır. Daha sonra İyileşme sürecinde, numuneler kısa bir süre içinde farklı sıcaklıklarda (60°C, 80°C ve 100°C ) ısıtılmıştır. Mastik asfalt numunelerinin test verileri mastik asfalt numunelerde bu üç sıcaklıkta iyileşmenin tamamen olabileceğini, mikro çatlakların 60°C sıcaklıkta iyileştirildiğini, 80°C ve 100°C ısıtma sıcaklıklarında binder numunelerin altında çeltikli çatlakları doldurduğundan dolayı numunenin kırılma gerilmesinde artış meydana geldiğini gösterdi. Asfalt beton örnekleri üç sıcaklık için test edilmiştir. 100°C ısıtma sıcaklığı, Birkaç çatlak iyileşme döngüsünden sonra, diğer iki sıcaklığa göre daha yüksek pik yüklemeye değerine sahip olduğu için indüksiyon iyileşmesi için optimum seçenek olduğu, ancak 60°C ve 80°C ısıtma sıcaklığı altı kırık iyileşme döngüsünden sonra dayanımın %50'den yüksek olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, numunelere katılan çelik yün elyafların elektriksel iletkenliği artırdığı, İndüksiyon iyileştirme tekniklerinin ise kaplama servis ömrünü uzatabileceğini göstermiştir.

Pan vd. (2014), “İletken Asfalt Betonlu: Yapı Tasarımı, Performans ve Pratik Uygulamaları Üzerine Bir İnceleme” adlı çalışmasında BSK karışımlarının elektriksel iletkenliğin elektriksel olarak iletken farklı katkı maddesi ilavesi ile geliştirilebileceği, iletken katkı maddesinin şekil, boyut, kompozisyon ve bitüm ile uyumunun iletkenlik üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Asfalt betonunun iletkenliği esas olarak bitüm harcı içindeki iletken fillerin dağılımına bağlıdır. Bunun yanında Sıcaklık, voltaj ve

yükleme gibi servis koşullarının, iletken bitüm öz direnci üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.

Park P. vd. (2014), “Grafitli Asfalt Betonu İletkenliğinin Kontrolü” başlıklı çalışmada asfalt betonunun elektriksel iletkenliği ve mekanik özellikleri üzerine farklı tipte grafitlerin ilavesi, bağlayıcı tipi ve agrega gradasyonlarının etkileri incelenmiştir. Üretilen asfalt betonu numunelerinin iletkenlik özellikleri asfalt mastikleriyle karşılaştırılmıştır. Asfalt betonu numuneleri, içerisine iletkenliği sağlamak için sekiz farklı grafit ( F146/F3204/F516 pul grafit, 505/508 amorf grafit, A99 yapay grafit, SA4827 Ultra yüksek yüzey alanına sahip grafit, TC307 yüksek yüzey alanına sahip grafit) ve karbon siyahı (CB5303) ilave edilerek üretilmiştir. Asfalt karışımlarda agrega gradasyonun elektriksel özellikler üzerindeki etkisi incelemek için maksimum agrega boyutu büyüklük sıralaması D-3>D-5>D-6 olan üç farklı gradasyonda numuneler üretilmiştir. Asfalt numuneleri üzerinde yapılan direnç ölçümleri sonucunda farklı gradasyonlu asfalt betonu numunelerinin hacimsel elektrik dirençlerinin kontrol karışımıyla (grafitsiz) neredeyse aynı olduğu ve ölçülen elektriksel direnç büyüklüklerinin D-3>D-5>D-6 şeklinde olduğu belirlenmiştir. D-3 karışımı en büyük maksimum agrega boyutuna sahip olduğundan, en az miktarda ince agrega ve bağlayıcı içerdiği, bu nedenle, sonuçlar elektrik direncinin grafit içeriğinin asfalt harcı oranına (ince agrega ve bağlayıcı) bağlı olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, aynı miktarda grafit eklendiğinde, daha kaba agrega içeren numune daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Asfalt karışımlara ilave edilen çeşitli grafit tiplerinin elektriksel özellikler üzerine etkileri incelendiğinde ilk göze çarpan gözlem, tüm pul-tip grafitlerin (F146, F3204, F516) öz dirençleri benzer eğilimlerdir. Asfalt mastik hacmine göre grafit içeriği arttıkça direnç değerleri yeterince düşük seviyelere inmektedir. Amorf ve yapay grafit tipleri (505, 508, A99), iletkenliği arttırmada etkisiz kalmıştır. Numuneler, yüksek içeriklerde bile yüksek hacim direncine sahiptir. Yüksek yüzey alanlı grafit (SA4827) ile oluşturulan numunelerin karışım zorluğu gözlemlenmiş ve bu nedenle ancak grafit içeriği %18’e kadar olan numuneler hazırlanmıştır. TC307 ve CB5303 grafit tiplerinin karıştırılmasındaki zorluklar nedeniyle grafit içeriği sadece yüzde 7 olan örnekler hazırlanabilmiştir.



**Resim 2.14** Çeşitli grafit tiplerinin hacim dirençlerinin karşılaştırılması (Park 2014).

Gopalakrishnan vd. (2015) yaptıkları “Kendinden Isıtılmalı Havaalanı Beton Kaplama Karışım Tasarımı için Elektriksel Olarak İletken Harç Karakterizasyonu” başlıklı çalışmasında iletken özellik gösteren karbon tozu ve karbon liflerinin tip ve oranlarını, iletken harç özellikleri, kaplamanın ısınma performansı ve hava alanlarında buzlanma önleyici kaplamaları için istenen elektriksel ve mekanik özellikleri karşılayıp karşılamadığını araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda farklı oranlarda iletken malzemeler ilave edilmiş harç numuneleri ile iletken malzeme ilavesi yapılmamış şahit numunelerin elektriksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. 6 mm uzunluğunda karbon lifi ilave edilmiş numunelerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin herhangi bir dayanım ve işlenebilirlik kaybı olmadan karbon tozu ilave edilmiş numunelere göre arttığı gözlemlenmiştir. Karbon tozu ilaveli numuneler arasında ise grafit tozu ile hazırlanmış numunelerde çok az dayanım ve işlenebilirlik kaybı ile elektriksel iletkenliğin gelişim sağladığı tespit edilmiştir. Havaalanlarında buzlanma önleyici kaplama uygulamalarında iletken harçların ısınma özelliklerine karbon lifi ve tozu gibi iletken özellik gösteren malzeme ilavelerinin dayanım ve işlenebilirlik özellikleri üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadan ısınma performansını geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Chen vd. (2015), “Rastgele Agregalı Mikro Yapılı Asfalt Betonunun Etkili Isıl İletkenliğinin Belirlenmesi” başlıklı çalışmada asfalt betonunun etkin termal iletkenliğini hesaplamak için sabit bir ısı transfer işlemi uygulayarak sonlu elemanlar (FE) modeli geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan asfalt betonunun (bağlayıcı, agregalı ve hava boşluğu) üç fazlı mikro yapı modelleri agregalı boyutu ve gradasyona bağlı olarak rastgele üretilmiştir. Hesaplama maliyetini azaltan hiyerarşik bir çerçeve kullanarak farklı büyüklükteki agregaların çeşitli uzunluk ölçeklerinde etkisini değerlendirmek için çok ölçekli simülasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Tahmin sonuçları, deney verileriyle doğrulanmış ve diğer analitik modellerden tahmin edilen sonuçlardan daha iyi doğruluk göstermiştir. Asfalt betonunun etkin termal iletkenliği üzerine hava boşluğu içeriği ve dağılımının etkileri, hafif agregalı, iletken ve yalıtım katkıları olan asfalt bağlayıcının etkileri analiz edilmiştir. Genel olarak, etkin termal iletkenliğin, hava boşluklarının artması veya kaba agregalı içeriğinin azalması ile azaldığı tespit edilmiştir.

Vo vd. (2015), asfalt karışımlarının ısı özellikleri üzerinde iletken filler tipi ve boyutunun etkisini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Asfalt karışımının ısı iletkenliğini iyileştirmek için pul ve sentetik olmak üzere 2 tip grafit tozu, kıyılmış ve öğütülmüş olmak üzere 2 tip karbon lifi farklı bitüm içeriklerinde kullanılmıştır. İletken filler malzemeler kullanarak modifiye edilen asfalt karışımların özgül ısı, termal iletkenlik, termal yayılma gibi ısı özellikleri ölçülerek hesaplamalar yapılmıştır. Termal test sonuçları, hem grafit hem de karbon lifinin asfalt karışımlarının termal özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini, ama grafit tozunun karbon lifine kıyasla termal özellikler üzerinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Genel olarak, toz filler için, sentetik grafit tozu (SG) karışımları pul grafit tozu (FG) karışımlarına kıyasla SG'nin ısı iletkenliği daha yüksek olduğundan dolayı biraz daha yüksek ısı iletkenlik göstermiştir. Elyaf dolgu maddeleri için, öğütülmüş karbon lifi (MF) karışımlar, daha küçük lif çapına sahip olmasından dolayı, kıyılmış karbon lifi (CF) karışımlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik göstermiştir. Sonuç olarak grafit tozunun termal iletkenliği arttıkça ve karbon lifinin ise boyutu küçüldükçe, asfalt karışımların ısı iletkenliği daha çok artmaktadır.

Demirkaya (2016) yapmış olduğu “Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması” başlıklı çalışmasında karbon fiber ile modifiye edilmiş asfalt karışımların mekanik özelliklerini ve stabilitesini araştırmak için belli oranlarda kırılmış karbon fiber katkılı asfalt betonu numuneleri üretmiş ve bu numuneler üzerinde çeşitli testler yapmıştır. 3 farklı uzunlukta (3, 6 ve 12 mm) kırılmış karbon fiberlerin farklı oranlarda karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testlerle en iyi mekanik özelliği gösteren uzunluk ve oran elde edilmeye çalışılmıştır. Marshall stabilite deneyi sonucu % 0,5 oranındaki 12 mm uzunluğundaki karbon fiber ilaveli asfalt karışımın en iyi mekanik değeri verdiği tespit edilmiştir.

Taherkhani (2016), “Asfalt Betonunun Mekanik Özellikleri Üzerine Nanokül ve Naylon Fiberlerin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı çalışmasında rastgele dağıtılmış naylon fiberler ve nanoclay ilavesiyle takviyenin bir asfalt betonunun bazı mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri açıklanmaktadır. 25 mm naylon elyafın farklı yüzdeleri ile takviye edilmiş asfalt betonunun özellikleri, farklı yüzdelik nano tabaka içeren karışımların özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Marshall stabilitesi, esnek modül, dinamik sürünme ve yorulma ömrü gibi mühendislik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin hazırlanmasında asfalt bağlayıcı olarak penetrasyon derecesi 60/70 olan bitüm, silisli agrega, nanokül ve naylon lifler kullanılmıştır. Karışımları güçlendirmek için kullanılan elyaflar karışım maksimum agrega büyüklüğü olan 25 mm uzunluğunda ilave edilmiştir. Naylon elyaflar, %0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 (toplam karışımın ağırlığına göre) farklı yüzdelerinde ve nanokül %2, %4 ve %7'de (bitüm ağırlığında) kullanılmıştır. Liflerin eklenmesinin, yorulma çatlamasına karşı direnci arttırmada nanokülden daha etkili olduğu bulunmuştur. Asfalt betonun kalıcı deformasyonuna karşı direnç, karışımdaki nanokül ve naylon elyaf içeriğinin artmasıyla artar. Naylon elyaf kullanmaktan ziyade sadece nanokül kullanarak veya hem nanokül hem de naylon elyaf kullanılarak daha yüksek direnç elde edilebilir.

Gürer ve Gürgöze (2017), “Karbon Lifli İletken Asfalt Betonunun Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmalarında asfalt betonunun iletkenlik özelliğini arttırmada karbon fiberin uzunluğu ve miktarının etkilerini araştırmışlardır. İletken Asfalt Betonu örneklerinin üretilmesinde kireçtaşı esaslı agrega, bağlayıcı olarak 60/70 penetrasyon

dereceli bitüm ve iletken bileşen olarak karbon lifi kullanılmıştır. İletken bileşik olarak kullanılan karbon lifi üç farklı uzunluk (5, 10, 15 mm) ve 5 farklı ağırlık (%0.1, %0.2, %0.3, %0.4 ve %0.5) oranında kullanılarak numuneler üretilmiştir. Daha sonra üretilen numuneler üzerinde iki elektrot yöntemiyle direnç ve sabit elektrik gerilimi altındaki numunelerin sıcaklık artış değerleri belirlenerek karbon lifi ile elektriksel iletkenlik ilişkisi belirlenmiş ve yapılan deney sonuçları değerlendirilmiştir. Elektriksel özdirenç deneyi sonuçlarına göre karışımlarda karbon liflerinin artması ile numunelerin özdirenç değerlerinin azaldığı ve en iyi sonuçların Seri-1 numunelerinde alındığı tespit edilmiştir. %0.1 Karbonlifi içeren numunelerinin özdirenç değerleri sırasıyla seri 1: 36.7  $\Omega$ m, seri 2: 45.9 ve seri 3: 59.4  $\Omega$ m olarak belirlenmiştir. %0.2 karbon fiber eklenmiş numunelerde özdirenç %0.1 karbon fiberli numunelere göre önemli ölçüde azalmıştır. Sabit elektrik gerilimi altındaki numunelerin sıcaklık artış değeri ölçümü test sonuçlarına göre numuneleri etkili bir şekilde elektriksel olarak iletken hale dönüştürmek için karışımdaki karbon lifi miktarı ve uzunluğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tüm örneklerde, elektrik akımının süresine bağlı olarak sıcaklığın arttığı belirlenmiştir. Karışımda karbon lifi miktarının artmasıyla da numunelerin sıcaklıklarında artış meydana geldiği ve en yüksek sıcaklık artışı, seri 1'deki örneklerin %0.5 oranında karbon fiber ilavesiyle 47.7°C olarak elde edildi. Ayrıca çalışma kapsamında hem TMA hem de BSK numunelerde aynı ölçümler gerçekleştirildiği için, elektriksel iletkenlik üzerinde gradasyonun da etkili olduğu belirtilmiştir. Aynı iletken bileşen içeriğine sahip TMA numunelerin BSK numunelerine göre daha iletken oldukları belirlenmiştir.

Vo vd. (2017), asfalt karışımın ısıl özellikleri üzerine iletken dolgu boyutunun ve tipinin etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada asfalt karışımın termal iletkenlik, ısıl yayılma, iletken dolgu maddeleri kullanılarak asfalt karışımın özgül ısı, gibi termal özelliklerin geliştirilmesine ve kaplamada tek boyutlu (1D) simulasyon kullanarak iletkenlik performansına odaklanılmıştır. İletken Asfalt Betonu örneklerinin üretilmesinde bazalt esaslı agrega, bağlayıcı olarak 25°C de 61 penetrasyon dereceli bitüm ve iletken bileşen olarak pul grafit tozu (G), sentetik grafit tozu (SG), doğranmış karbon lifi (SF), öğütülmüş karbon lifi (MF) kullanılmıştır. İletken bileşik olarak kullanılan pul grafit tozu (G) ve sentetik grafit tozu (SG) bitümlü bağlayıcı hacminin %5, 10, 15, 20

doğranmış karbon lifi (SF) bitümlü bağlayıcı hacminin %1 ve 2, öğütölmüş karbon lifi (MF) ise bitümlü bağlayıcı hacminin %2, 4, 6, 8, 10 oranında kullanılarak numuneler üretilmiştir. Grafit ve karbon lifi ile modifiye edilmiş asfalt karışımların iletkenlik özellikleri ölçölmüş ve uygun cins ve miktarda karbon lifi ve grafit elde etmek ve numunelerin iletkenlik özelliklerini değerlendirmek için hesaplamalar yapılmıştır. Termal deney ve analiz sonuçlarına göre karbon lifleri ve grafit, temel olarak asfalt karışımların termal özelliklerini arttırdığı, ancak belirli bir miktarı aştığında, iyileşmenin artık olmadığı hatta azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, toz doldurucularda SG karışımları, SG'nin termal iletkenliğinin daha yüksek olmasından dolayı G karışımına kıyasla biraz yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu, lifli dolgular için ise MF karışımların termal iletkenliğinin CF karışımlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Karbon liflerin özelliğinden dolayı bir elyafın kalınlığı boyunca ısı transferi, uzunluk boyunca ısı transferinden önemli ölçüde daha düşüktür. Karbon lifi ile yapılan karışımlar bu durumda grafit tozuna kıyasla daha iyi sonuç verir. En yüksek termal iletkenliği sağlayan optimum miktarda iletken dolgu maddesi içeren karışımlar G20, SG10, CF1 ve MF6 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum aşırı miktarda iletken malzeme bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerinde ve asfalt karışımların hacimsel özelliklerinde değişikliklere neden olmasıyla açıklanmıştır.

Pan vd. (2017), iletken asfalt betonu termal özellikleri üzerinde çevresel şartların ve malzeme bileşiminin etkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada 7 farklı mineral agrega, bağlayıcı olarak AH-70 (0.169 W/mK), AH-90 (0.177 W/mK) ve modifiye bitüm (0.191 W/mK), filler malzemesi olarak grafit tozu kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. AH-70 ve AH-90 bitümlü bağlayıcı, modifiye bitümün asfalt betonunun termal iletkenliği üzerine etkisi karşılaştırılmıştır. -20 ile 60°C arasında servis sıcaklığı değiştirilerek asfalt karışımın termal iletkenliği incelenmiştir. AH-70, AH-90 ve modifiye bitümle hazırlanan asfalt karışımların termal iletkenlikleri sırasıyla %8.9, % 7.1 ve %7.5 oranında düşmüştür. Bağlayıcının sıcaklığın artmasının asfaltın termal iletkenliği üzerinde nispeten küçük bir etkiye sahip olduğu görölmüştür. Ayrıca donma-çözölme döngülerinin, hacim genleşmesi ve bağ bozulması nedeniyle iletken asfalt betonunun termal özelliklerinin güçlü bir şekilde etkilendiği ve

asfalt betonun ısıl özelliklerinde yaşlanma öncesi ve sonrası fark olmadığı tespit edilmiştir.

Liu vd. (2017), “Çelik Cüruf / Çelik Elyaf Kompozit Asfalt Karışımının Mekanik, Isıl, İndüksiyonla Isıtma ve İyileştirici Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışmada Çelik cürufu ve / veya çelik lifi ilavesinin asfalt karışımının mekanik, ısıl, indüksiyonlu ısınma ve iyileştirme özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada farklı asfalt numuneleri üretmek için penetrasyon derecesi 62,3 olan baz bitüm, bazalt agregalar, kireçtaşı dolgu, çelik cüruf ve çelik lifler kullanılmıştır. Karışımın iletkenliğini sağlayan çelik lifler karışıma başka bir malzeme ile yer değiştirmeden, çelik cürufu ise kaba agregaları kısmen değiştirmek suretiyle kullanılmıştır. Numunelerde çelik elyaflar %6.0 (bitüm hacmine göre) önerilen çelik elyaf içeriğine göre 70-130 µm aralığında ortalama 4.2 mm uzunluğunda kullanılmıştır.

Çalışmada bazalt asfalt karışımı (BA), kaba agregalar 9.5-13.2 mm ebadında çelik cürufu değiştirilmesi suretiyle modifiye edilmiş bazalt asfalt karışımı SS, BA ve SS ye %6 çelik elyaf ilave edilmiş asfalt karışımı SF ve SF+SF asfalt karışımları olmak üzere dört farklı tip numuneler üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Çelik lifler veya çelik cüruf içeren numuneler nem hasarından sonra hala daha yüksek stabilite gösterdiği ve asfalt karışımının su stabilitesini arttırdığı belirlenmiştir. Marshall stabilite açısından SF, SS ve SF + SS'in Marshall stabilitesi değerleri BA ya kıyasla %11.1, %18.4 ve %28.9 artmıştır. Bunun yanında tüm karışımların MSR'si, asfalt karışımı için tipik olarak standartlaştırılmış değer (% 80) minimum endeksini karşıladığı, SF, SS ve SF + SS'in MSR'si, BA'ya kıyasla sırasıyla %8.0, %14.7 ve %10.4 arttığı görülmüştür. Çelik cürufu ve çelik fiberin ilavesinin partikül kaybına karşı direnci ve asfalt karışımının kırılma enerjisini iyileştirdiği görülmüştür. BA, SS, SF ve SF+SS numunelerinin parçacık kayıpları sırasıyla 9.46, 7.84, 4.88 ve 3.97 olarak ölçülmüştür. BA'nın diğer üç asfalt karışımına kıyasla en büyük parçacık kaybı oranına sahip olduğu, SF+SS ise en düşük parçacık kaybı oranını gösterdiği görülmektedir. Asfalt karışımına çelik lifler eklemek, partikül kaybını azaltabilir ve bu da karışımın dayanımında bir iyileşme olduğunu gösterir. Çelik cürufunun eklenmesi, BA ile karşılaştırıldığında parçacık kaybını biraz azaltabilir. Bunun nedeni, yüksek aşınma direnci ve gözenekli

yapıya sahip çelik cürufunun özellikleri ile açıklanabilir. Kırılma enerjilerinin karşılaştırılması yapıldığında ise Bazalt asfalt karışımı ile karşılaştırıldığında, SF, SS ve SF + SS'nin kırılma enerjisi sırasıyla %20.9, %29.1 ve %41.2 arttığı ve iletken malzeme ilavesinin asfalt karışımının kırılma direncini artırabileceğini göstermektedir. Bunun yanında SF ve SF+SS'nin çatlama sonrası enerjisinin, BA'ya kıyasla %31.9 ve %14.1 arttığını, çelik elyaf ilavesinin asfalt karışımının tokluğunu arttırdığı söylenebilir. Son olarak çelik elyaf ve çelik cüruf ilavesinin asfalt karışımların termal parametreleri ile ilgili olarak BA ile karşılaştırıldığında, SF'nin termal iletkenliği ve termal difüzyonu sırasıyla %10.2 ve %16.3 artarken, hacimsel ısı kapasitesi %5.3 oranında azalmıştır. SF+SS'nin termal iletkenliği ve termal difüzyonu sırasıyla %6.6 ve %18.1 artarken hacimsel ısı kapasitesi %9.7 azalmıştır. Bu, çelik lifin, asfalt karışımının hacimsel ısı kapasitesini düşürürken, termal iletkenliği ve termal difüzyonu arttırdığı anlamına gelir. Çelik cürufu, asfalt karışımının termal parametreleri üzerinde ters bir etki göstermiştir. BA'ya çelik cürufu eklendikten sonra ısıl iletkenlik ve asfalt karışımının ısıl difüzyonu %5.7 ve %18.3 azalırken, hacimsel ısı kapasitesi %15.4 arttı. Çelik lifi ve çelik cürufunun eklenmesinin asfalt karışımının termal parametrelerini etkileyeceği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, SS+SF'nin termal parametreleri, çelik liflerinin ve çelik cürufunun ters etkilerinden dolayı BA'dan en az farkı göstermiştir. Karışımların malzeme özellikleri, termal sabitlerdeki değişikliklerin temel nedenidir. Bir tür metal malzeme olarak, çelik lifler iyi iletkenliğe ve ısı yayılımına sahiptir. Bazalt taşı ve asfalt ile karşılaştırıldığında, çelik liflerin iletkenliği ve termal difüzyonu daha yüksekti. Çelik liflerin ısı kapasitesi bazalt ve asfalttan daha düşüktür. Bazı metal elementler içermesine rağmen, çelik cürufu içindeki çok sayıda minik gözenek, ısı transferini ve yayılmasını engelleyerek karışımın iletkenliğini ve termal yayılımını azaltır. Küçük gözenekler ayrıca karışımın ısı kapasitesinin artmasına yardımcı olan bir ısı depolama kapasitesine sahiptir. Çelik liflerinin ve çelik cürufunun ters etkilerinden dolayı, SS+SF'nin termal parametreleri, çelik liflerinin ve çelik cürufunun oranı ile güçlü bir şekilde ilişkili olacaktır.

Arabzadeh vd. (2018), “Elektriksel olarak iletken asfalt mastiği: Sıcaklık bağımlılığı ve ısıtma verimliliği” başlıklı çalışmada buzlanmayı önleyici ve buz çözücü uygulamalar için karbon fiber (KF) ve grafit tozu (GT) ile modifiye edilmiş tek fazlı

(sadece KF) ve çift fazlı (hem KF hem GT içeren) elektriksel olarak iletken asfalt mastiği (EİAM) üretilerek elektriksel duyarlılıkları araştırıldı. EİAM 'lerin hacim dirençliliği sıcaklığın etkisinde ölçülerek değerlendirildi. Sıcaklıktaki düşüşün EİAM'ın elektrik iletkenliğini artırdığını ortaya koydu. Hem tek fazlı hem de iki fazlı ECAM örnekleri için hacim direnç verilerini analiz ettikten sonra, Isı üretim verimi, donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda aktif kızılötesi termografi uygulaması aracılığıyla (AKT) değerlendirildi. AKT analiz sonuçlarına dayanarak, Seçilen KF içeriğinde buz oluşumu ve karın birikmesini önleyici yada buz ve karı eritmek için tek fazlı EİAM'ların yeterli ısı üretme kabiliyetine sahip olduğu, tek fazlı EİAM için optimum KF içeriği %0.75 olduğu sonucuna varıldı. Bunun yanında karbon fiber içeriği %0.25 ve %0.5 düştüğünde GT parçacıklarının %5'lik bir hacim içeriğinde bulunması hacim direncinde büyük bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

Düşmez (2019), “Elektriksel İletkenlik Özelliği Olan Asfalt Betonu Geliştirmesi” adlı 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 buzlanma önleyici sistemlerde kullanılabilecek elektriksel iletkenlik özelliği oldukça yüksek ve mühendislik özellikleri TCK şartnamesine (2013) uygun olan aşınma tabakası asfalt numuneleri geliştirilmiştir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Materyal

Çalışmada mineral filler ve ince agrega olarak Afyonkarahisar'da faaliyet gösteren KOLSAN AŞ'den temin edilmiş kireçtaşı ve iri agrega olarak Afyonkarahisar Asfalt Üretim Tesislerinden temin edilen, Kütahya Bölgesinden çıkarılan bazalt kökenli agrega kullanılmıştır (Resim 3.1). TMA karışımlarda karbon lifi kullanıldığından ve bu malzeme aynı zamanda elyaf etkisi gösterdiği için ek olarak elyaf kullanılmasına gerek kalmamıştır. Bu sonuca Gürgöze (2017) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışması sonucundan ulaşılmıştır. TMA numuneleri için iletken bileşen olarak kullanılacak karbon lifi ise Yalova'da DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler San.Ltd.Şti'den temin edilmiştir. Temin edilen karbon lifinin kodu 24K A-49 dur. Kullanılan karbon lifine ait malzeme özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak Afyonkarahisar Asfalt üretim tesislerinden temin edilmiş, Aliğa Rafinerisi kökenli, 50/70 penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan üç farklı taş mastik asfalt agrega gradasyonları Çizelge 3.1'de, bitüm özellikleri Çizelge 3.2'de, karbon lifinin özellikleri Çizelge 3.3'de ve agrega özellikleri ise Çizelge 3.4'de görülmektedir.



**Resim 3.1** Asfalt karışımı için yıkanıp elenen bazalt ve kireçtaşı numuneleri.

**Çizelge 3.1** TMA Tip 1A, 2A ve Alman standardı TMA 8S gradasyonlarının karşılaştırması.

<b>Elek Boyutu (mm)</b>	<b>25</b>	<b>19</b>	<b>12.5</b>	<b>9.5</b>	<b>8</b>	<b>5.6</b>	<b>4.75</b>	<b>2</b>	<b>0.425</b>	<b>0.180</b>	<b>0.075</b>	<b>0.063</b>
TMA Tip 1A % Geçen	100	100	95	62.5	-	-	32.5	25	17	13	10	-
TMA Tip 2A % Geçen	100	100	100	85	-	-	35	25	17	13	10	-
Alman Standardı TMA 8S % Geçen	100	100	100	100	95	40	-	25	-	-	-	10

**Çizelge 3.2** Bitümün mühendislik özellikleri.

<b>Özellikler</b>	<b>Değerler</b>	<b>Standartlar</b>
Temin Edilen Rafineri	Aliğa	-
Penetrasyon Derecesi	50/70	-
Penetrasyon Derecesi (25°C'de)	57.3	ASTM D5-06e1
Özgül Ağırlık	1.035	ASTM D70-09e1
Yumuşama Noktası (°C)	48.2	ASTMD36/D36M-09
Isıtma Kaybı (%)	2.1	ASTM D6-95
Parlama Noktası (°C)	275	ASTM D92-05a
Düktilite (5 cm/dk)	>100 cm	ASTM D113-07
Viskosite (135°C'de)	256.0 cP	
Viskozite (165°C'de)	68.6cP	ASTM D4402-06

**Çizelge 3.3** Çalışmada kullanılan karbon liflerin mühendislik özellikleri (İnt. Kyn.7).

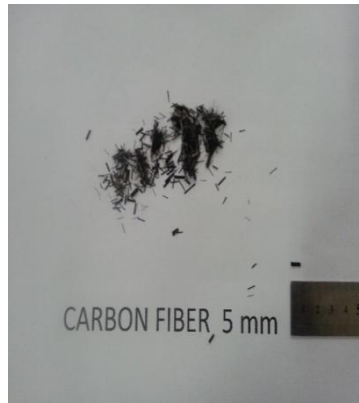
<b>Lif Özellikleri</b>	<b>Değerler</b>	<b>Deney Metodu</b>
Çekme Dayanımı (MPa)	4900	ISO 10618
Çekme Modülü (GPa)	250	ISO 10618
Birim deformasyon (%)	2.0	ISO 10618
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.79	ISO 10119
Akma (g/1000 m)	1600	ISO 1889

**Çizelge 3.4** Agrega özellikleri.

Agrega Deneyleri	Sonuçlar (gr/cm <sup>3</sup> )	
	Kireçtaşı	Bazalt
İri Agrega Hacim Özgül Ağırlık (>No:4)	2.721	2.673
İri Agrega Zahiri Özgül Ağırlık (>No:4)	2.730	2.772
İnce Agrega Hacim Özgül Ağırlık (No:4-200)	2.186	*-
İnce Agrega 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 <sub>4</sub> Donma Kaybı (%)	0.69	7.53

### 3.2 Metot

Bu tez çalışma kapsamında öncelikle agrega, mineral filler, bitüm ve karbon fiberler temin edilmiştir. Karbon lifleri 5mm uzunluğunda maket bıçağı ile kesilip, agreganın ağırlıkça %0.2'si oranında karbon lifi ilaveli (Resim 3.2), farklı bitüm oranlarında standart 64 mm yüksekliğinde, 102 mm çapında ve 1200 gr ağırlığında TMA numuneleri hazırlanmıştır.



**Resim 3.2** TMA karışımında iletkenlik için kullanılan 5 mm karbon lifi.

Numunelerde Karayolları Teknik Şartnamesine (2013)' e göre aşınma tabakası Tip 1A ve Tip 2A TMA ve Alman Standartı 8S TMA imalatlarına uygun kırmataş ve mineral filler malzemeler kullanılmıştır. Farklı gradasyona sahip her seride 18 adet numune olmak üzere 3 seri üretimi yapılmıştır.

1.seri 18, 2. Seri 18 ve 3. Seri 18 olmak üzere toplamda 54 adet TMA Marshall numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde bitüm oranı ilk 3 döküm için %6.5 ile başlamış art arda gelen her 3 numunede bir %0.5 arttırılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde elektriksel iletkenlik (Dıştan temas ile 2 elektrot yöntemi), sabit gerilim ile ısınma ve ultrases deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

TMA numuneleri için optimum bitüm değeri, aynı agrega ve gradasyon aralıkları kullanıldığı için, Gürer vd. (2016) tarafından hazırlanan rapordaki %6.5 değeri kullanılmıştır. Çizelge 3.5'de İletken TMA serileri için kullanılan bitüm ve karbon lifi miktarları gösterilmiştir.

**Çizelge 3.5** İletken TMA serileri için kullanılan bitüm ve karbon lifi miktarları.

Numune No	Bitüm %	Bitüm Ağırlığı (gr)	Lif Uzunluğu (mm)	Lif Oranı % (Asfalt Briketi Ağırlığına)	Lif Ağırlığı/Briket (g)
1 2 3	6.5	13	5	0.2	2.4
4 5 6	7	14	5	0.2	2.4
7 8 9	7.5	15	5	0.2	2.4
10 11 12	8	16	5	0.2	2.4
13 14 15	8.5	17	5	0.2	2.4
16 17 18	9	18	5	0.2	2.4

### 3.2.1 Marshall Metodu İle Asfalt Numunelerinin Üretilmesi

Marshall kaplama karışım dizayn metodunun kavramları, daha önceden Mississippi Devlet Karayolları Departmanı Bitümlü Malzemeler Mühendisi olan Bruce Marshall tarafından formüle edilmiştir. Marshall deney yöntemleri, ASTM tarafından standart hale getirilmiştir. İlgili yöntem ASTM gösterimi D 1559 “Marshall teçhizatı kullanılarak bitümlü karışımların plastik akmaya karşı direnci” kısmında verilmektedir. Marshall metodu yalnızca penetrasyon veya viskoziteye göre sınıflandırılmış asfalt çimentosu kullanan ve maksimum boyutu 25 mm veya daha küçük agregalar içeren sıcak asfalt kaplama karışımlara uygulanabilmektedir. Bu metot, sıcak asfalt karışımların laboratuvarında dizaynı için öngörülmüştür (Uluçaylı 2002).

Marshall Metodu için işlem deney numunelerin hazırlanması ile başlar. Bütün bu işlemlerin başlangıcı için şunlar takip edilir (Uluçaylı 2002) ;

- Kullanım için önerilen malzemelerin proje şartnamelerinin koşullarını karşılamalıdır.
- Agrega karışım kombinasyonları proje şartname gradasyon koşullarını sağlamalıdır.
- Yoğunluk ve boşluk analizlerinde kullanım için, karışımda kullanılan tüm agregaların karışım ile asfalt çimentosunun özgül ağırlığı belirlenmesi gerekmektedir.
- Marshall yöntemiyle standart, silindirik 64 mm yükseklik 102 mm çapında deney numuneleri kullanılır. Bu numuneler ısıtma-karıştırma ve sıkıştırma işlemlerinden oluşan özel bir yöntemle hazırlanır. Marshall Metodu ile karışım dizaynının en önemli iki esas özelliği, sıkıştırılmış deney numunelerinde yoğunluk-boşluk analizi ve stabilite-akma deneyleridir.

Briketlerin hazırlanması şu şekilde gerçekleşmektedir;

- Deney numuneleri hazırlanırken ilk olarak agregalar 105-110°C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur.

- Daha sonra İstenen fraksiyonlarda elenip, ayrı ayrı kaplarda 1200 gr'lık karışım için tartımları yapılır.
- Hazırlanan karışımlar ve bitüm etüve konularak sıcaklıklarının 160°C'ye gelmesi beklenilir. TMA numunelerinde sıcaklık 185°C alınır.
- Sıkıştırma işlemine başlamadan yarım saat öncesinde numune kalıpları, Marshall tokmak başlığı, mikser karıştırma kabı ve ucu, spatula, metal numune küreği gibi metal aparatlar da etüv içerisine yerleştirilerek ısıtılır.
- İstenilen ısıya gelen agregayı karıştırma kabına boşaltılarak kuru olarak karıştırılır.
- Agregaya ağırlığına göre karışımın içerisine konulması gereken bitüm miktarı konulur.



**Resim 3.3** Karışımlara bitüm eklenmesi ve TMA karışımının kalıplara konulması.

Konulan bitümün agregaya içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için ısıtıcılı mekanik mikserde homojen bir dağılım elde edilene kadar 2-3 dk. Karıştırma işlemi yapılır. Resim 3.4 TMA karışımının ısıtıcılı mekanik mikser ile karıştırılması gösterilmektedir.



**Resim 3.4** TMA karışımının ısıtıcılı mekanik mikser ile karıştırılması.

Karışım kalıbın içine yerleştirilmeden önce kalıbın tabanına, ölçüsüne göre kesilmiş filtre kağıdı yerleştirilir. Karışım, kalıba boşaltılır ve ısıtılmış bir spatula ile iç kısımlarından ve çevresinden 10-15 kez çabukça darbelenerek sıkıca yerleştirilir. Numuneler 101.6 mm (4 inç) çapında ve 76.2 mm yüksekliğindeki numune kalıbında, 457.2 mm'den düşen 4536 gr ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Sıkıştırma uygulanacak TMA numunelerin her iki yüzeyine 50 darbe uygulanır (TCK 2013).



**Resim 3.5** TMA numunelerinin Marshall Tokmağında sıkıştırılması.

Sıkıştırmadan sonra numuneler numaralandırılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Son olarak soğumaya bırakılan numuneler bir hidrolik kriko yardımıyla kalıplarından çıkarılır ve elektriksel iletkenlik deneyleri için soğumaya bırakılır.



**Resim 3.6** Üretilen TMA numuneleri.

Temas aralığındaki direnci azaltmak için, elektrot ve numune arasında sıkı temas sağlamak önemlidir. Bunun için literatürde elektrot ile numune arasına grafit yağı veya

numune etrafına bakır bir bant dönmek gibi yöntemler önerilmektedir (Wu *et al.* 2009, Huang *et al.* 2009).

### 3.2.2 TMA Numunelerinin Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi

Standart asfalt numunesinde elektriksel özdirenci ölçümü için iki elektrot ve dört elektrot yöntemi olmak üzere yaygın olarak iki yöntem kullanılmaktadır. İki elektrotlu yöntem,  $10^6 \Omega.m$  dan yüksek özdirençli malzemelere uygulanır, dört elektrot yöntem ise 1 den  $10^5 \Omega.m$  kadar değişen özdirençli malzemelere uygulanır. İAB'nin özdirencini ölçmek için 4 elektrot yöntemde, elektrotlar hazırlanan numunenin sıkışma safhasında numune içerisinde kalması ve sürekli zarar görmesi sebebiyle kullanışsız ve düşük faydaya sahip bir yöntem olduğu görülmektedir. Buna karşılık, iki elektrot yönteminde elektrotlar numunenin dışına tutturuldukları için asfalt betonun sıkıştırılması esnasında zarar görme ihtimali yoktur. Bundan dolayı, İki elektrot yöntemi İAB'nin iletkenliğini ölçmede önemli bir yöntem olduğu görülmektedir (Liu and Wu 2009).

İki elektrot yöntemi ile özdirenç ölçümleri her farklı bitüm serisi için (6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0) tekli, ikili birleştirilmiş numuneler olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7 ve 3.8'de ölçümler görülmektedir.



**Resim 3.7** İki Elektrot yöntemi ile tekli numune özdirenç ölçümü.



**Resim 3.8.** İki Elektrot yöntemi ile 2'li birleştirilmiş numunelerin özdirenç ölçümü.

Ölçülen direnç değerinin numunenin, 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 kullanılmıştır. Asfalt numunelerinin özdirençlerinin hesaplanabilmesi için sabit gerilim altında (20-30 V) numunelerden geçen akım değerleri cihazdan okunmuştur. Ölçülen bu değer ile direnç değeri hesaplanıp numune yükseklikleri ile kesit alanlarından yola çıkarak özdirenç değerleri  $\Omega.m$  olarak hesaplanır. Elektriksel özdirenç ise Ohm kanuna göre (3.2) eşitliği kullanılarak elde edilir.

Numunelerin direnci ( $\rho$ ) aşağıdaki denklemlere göre hesaplandı:

$$V = I \times R \quad (3.1)$$

$$\rho = R \times \frac{S}{L} \quad (3.2)$$

Burada;

$\rho$ =Elektriksel özdirenç

$L$ =İletken BSK Numune Yüksekliği (m)

$R$ =Ohm olarak ölçülen direnç

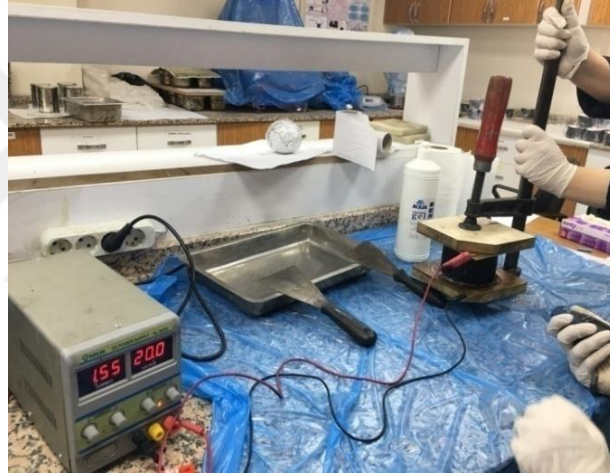
$S$ =Elektrot iletken alanıdır ( $m^2$ )

$V$ = Gerilim

$I$ =Akım

### 3.2.3 Sabit Elektrik Gerilimi İle Numunelerin Sıcaklık Değişimlerin Belirlenmesi

Karbon lifi içerikli TMA numunelerinde iletken bileşen ilavesinin sabit gerilim altında (20-30 Volt) sıcaklık değişimine olan etkileri bu deney ile incelenmiştir. Tekli Numunelere 20 Volt, 2'li numunelere 30 Volt gerilim uygulanarak sıcaklıklarında meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Bunun için 2 elektrot yöntemi kullanılarak 10 dk. boyunca sabit gerilim altında doğru akım geçirilmiş ve sıcaklıklarındaki değişim her iki dakikada bir numune ortasındaki 3 farklı noktadan lazer termometre ile yüzey sıcaklıkları ölçülerek belirlenmiştir. Yapılan bu işlemler 2'li numuneler içinde kıyasen uygulanmıştır. Hesaplamalarda bu ölçümlerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır. Tüm numunelerden akım geçirilmeden önce numune başlangıç sıcaklıkları kaydedilmiştir.



**Resim 3.9** Tekli iletken asfalt numunelerinin elektrik akımı ile ısıtılması.



**Resim 3.10** 2'li Birleşim iletken asfalt numunelerinin elektrik akımı ile ısıtılması.

### 3.2.4 Ultrases Deneyi

Genellikle beton numunelerinde beton basınç dayanımı ile beton yoğunluğu arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılan bir test yöntemi olan ultrases deneyi, betonun içine gönderilen ses üstü dalgasının betondan geçiş hızı üzerinden betonun yoğunluğu hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Betonun yoğunluğu ile sesüstü dalga arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Ses bir tür dalga çeşidi olmakla beraber yayılması iletimle olmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, sesüstü dalganın hızı daha az olmaktadır. Yoğunluğu fazla olan bir betonda ise boşluk miktarı az olacak ve sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçiş süresi kısa dolayısıyla ses dalgasının geçiş hızında fazla olacaktır (Erdoğan 2003).

Beton kalitesinin denetlenmesi ve değerlendirilmesi için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de ultrasonik test cihazı ile değerlendirme yöntemidir. Ultrasonik test cihazı, alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi esasına dayanır. Bu hasarsız yöntem, çok sayıda nokta üzerinden okuma yapılabilmesi, zamandan tasarruf sağlanması ve taşıyıcı elemanlara zarar vermemesi açısından tercih edilir. Her ne kadar hasarsız olması açısından tercih edilen bir yöntem olsa da güvenilirliği açısından karot alma ve diğer yöntemlerle birlikte kullanılması daha iyi sonuç verir (Int. Kyn. 8).

Ultra-ses dalgalarının betonda yayılma hızları ölçülerek;

- Betonun homojenliği,
- Betonda kusur, çatlak vb.,
- Elastisite modülü,
- Beton dayanımı hakkında veriler elde edilebiliriz.

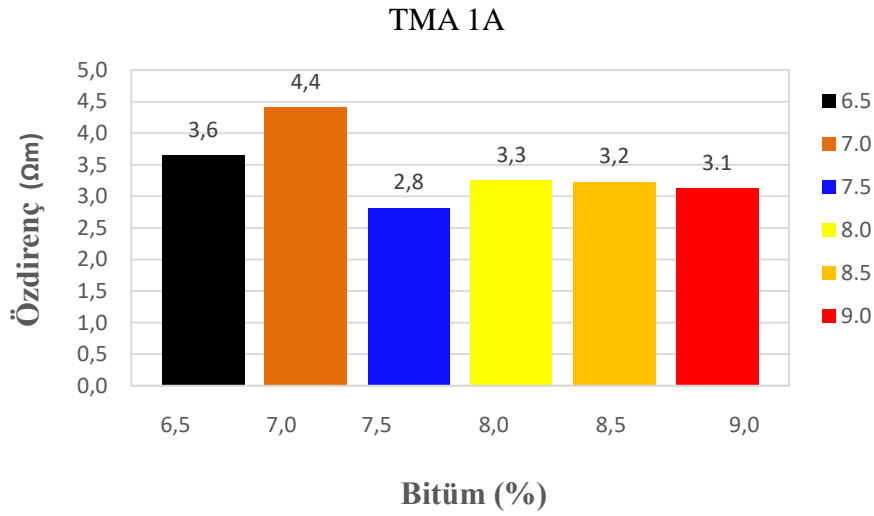


**Resim 3.11** İletken TMA numunesinin ultrases ölçümü.

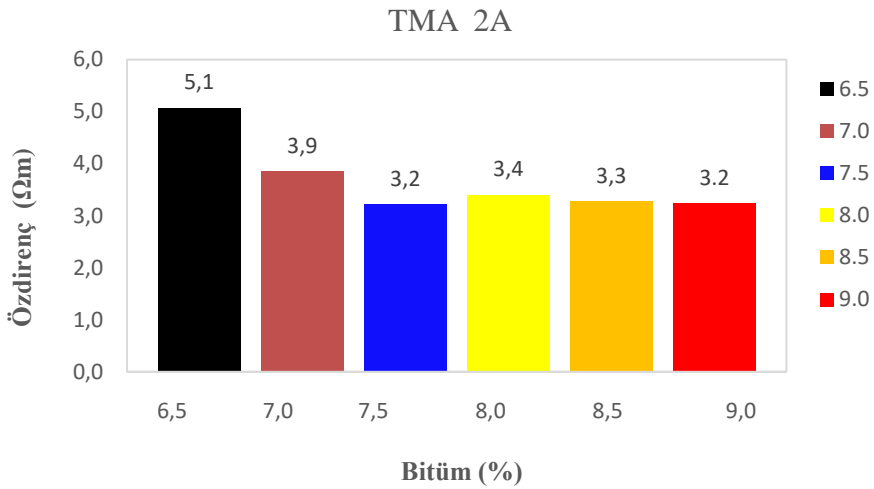
## 4. BULGULAR

### 4.1 Elektriksel Özdirenç Sonuçları

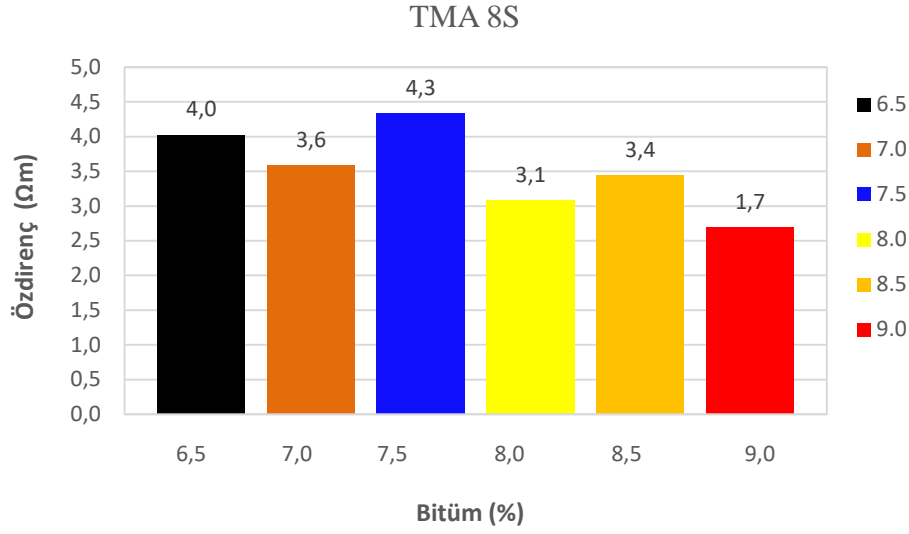
Tüm seri numunelerinin iletken olup olmadığını belirlemek için dıştan temas ile iki elektrot yöntemi ile özdirenç ölçümleri yapılmış ve elde edilen değerler grafik halinde gösterilmiştir. Buna göre sırasıyla TMA 1A, 2A ve 8S serilerine ait özdirenç ölçüm sonuçları Şekil 4.1, 4.2, 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.1 TMA 1A Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri.



Şekil 4.2 TMA 2A Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri.

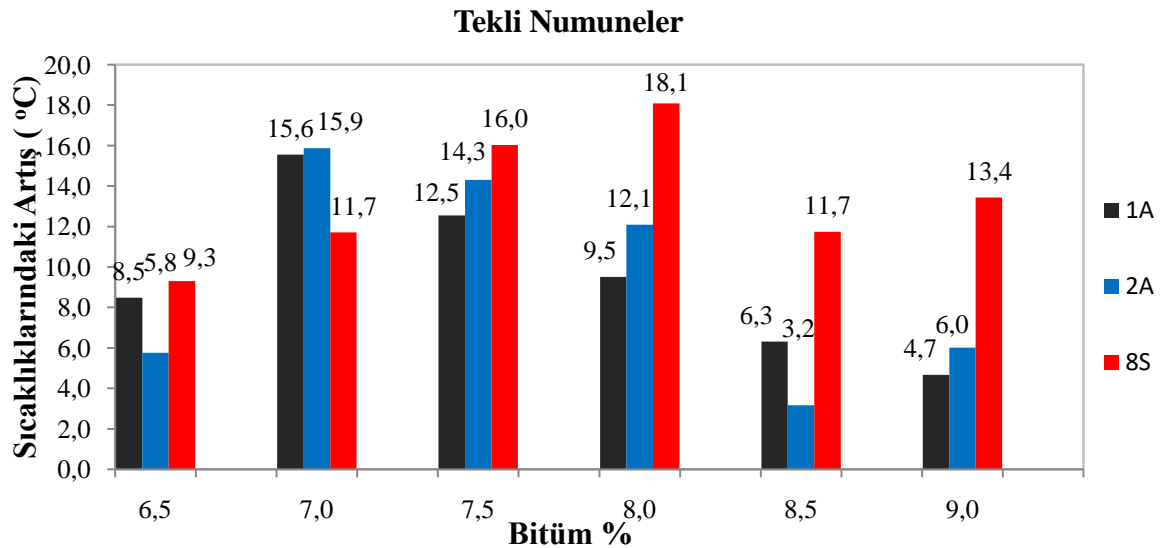


**Şekil 4.3** TMA 8S Serilerinde bitüm yüzdesine göre özdirenç değişimleri.

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'ten de görüldüğü gibi 2A, 1A ve 8S serilerinde ortalama özdirenç değerlerinin sırasıyla 3.7, 3.4 ve 3.5  $\Omega m$  olduğu görülmüştür. %8.0, 8.5 ve 9.0 bitüm miktarlarında 1A ve 2A serilerindeki özdirenç değerleri birbirine yakındır. Her üç numune de ise %8.0 ve 8.5 değerlerinde birbirine yakın özdirenç değerleri elde edilmiştir. Genel olarak gradasyon değişiminin iletken TMA karışımların iletkenlik özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bunda da en büyük faktörün gradasyon değişiminin oluşturduğu boşluk yüzdeleri olduğu düşünülmektedir. Tüm grafiklerde bitüm miktarının artışıyla birlikte yoğunluk arttığı için iletkenliğinde artış gösterdiği düşünülmektedir. 1A ve 2A serisi numunelerde %8.0 bitüm yüzdesinden sonra artış neredeyse sabitlenmişken 8S serisi numunelerde %9.0 bitüm yüzdesinde en düşük özdirenç değeri elde edilmiştir. 8S serisi TMA numunelerinin 1A ve 2A serilerine göre daha ince gradasyona sahip oluşu ve dolayısıyla bitüm ihtiyacının yüksek oluşunun bunun üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Bitüm yüzdesinin artmasıyla birlikte işlenebilirlik de daha kolay olmakta ve karışım içerisindeki karbon liflerinin de daha homojen dağılım gösterdiği düşünülmektedir. Bitüm yüzdesinin artması karışımın mikserde karışmasını kolaylaştırdığı ve bu sayede karbon liflerinin daha iyi dağıldığı ve böylece yüksek bitüm yüzdelerinde daha düşük özdirenç değerlerinin elde edildiği görülmektedir.

## 4.2 Sabit Gerilim Altında Tekli Numunelerde Sıcaklık Artış Değerlerinin Belirlenmesi

Bu deneyler kapsamında tekli ve ikili, numunelerde sabit gerilim altında sıcaklıklarında meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Tekli numunelere 20 V gerilim verilerek sıcaklıklarda meydana gelen değişimler infrared termometre ile numune ortasındaki üç noktadan ölçülerek 10 dk'lık elektrik gerilimi sonrasında Marshall numunelerindeki sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Bitüm miktarına göre 1A, 2A ve 8S tekli numunelerindeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.4'te görülmektedir.



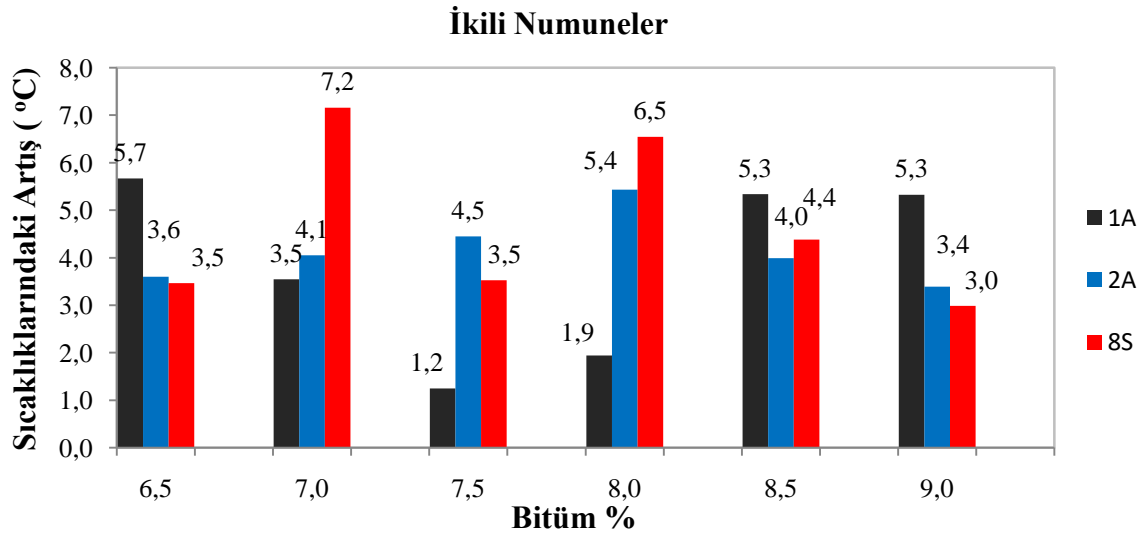
Şekil 4.4 1A, 2A ve 8S tekli numunelerindeki sıcaklık değişimleri.

Tekli numunelerde ikili birleşim numunelerine göre sıcaklık artışları oldukça yüksektir. Tüm bitüm yüzdelerinde sıcaklık artışları her üç seri numunelerinde değişkendir. TMA 1A numunesinde %7 bitüm oranına kadar sıcaklık artmış ve en yüksek değer olan 15.6°C'ye ulaşmış, sonrasında bitüm yüzdesi arttıkça sıcaklık değişimi azalarak en düşük değer 4.7°C'ye ulaşmıştır. TMA 2A numunesinde %7 bitüm oranına kadar sıcaklık artmış ve en yüksek değer olan 15.9°C'ye ulaşmış, sonrasında bitüm yüzdesi arttıkça sıcaklık değişimi azalan bir eğilim göstermiştir. TMA 1A ve 2A numunelerinde bitüm yüzdesinin artışıyla birlikte sıcaklıklarda meydana gelen azalmalar oldukça belirgindir.

Tüm numunelerde belirli bitüm yüzdesine kadar sıcaklıklar da artış, bitüm yüzdesi arttıkça da azalma eğilimi görülmektedir. Buna karşılık TMA 8S serisi numunelerde %8 bitüm oranına kadar sıcaklık artmış ve 18.1°C ile en yüksek değere ulaşmıştır. Daha sonrasında bitüm oranı artmasıyla sıcaklık değerlerinde düşmeler meydana gelmiştir. Tekli numuneler üzerinde yapılan sabit gerilim altında sıcaklık artışı deneyi de gradasyonun, iletkenlik üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Tüm serilerin agrega cinsleri, iletken karbon lifi ve bitüm miktarları aynı olmasına rağmen, gradasyon farkından dolayı, elde edilen sonuçlar oldukça farklıdır.

#### 4.3 Sabit Gerilim Altında İkili Numunelerin Sıcaklık Artışlarının Belirlenmesi

İkili numunelere 30 V gerilim verilerek sıcaklıklarda meydana gelen değişimler infrared termometre ile numune ortasındaki üç noktadan ölçülerek 10 dk'lık elektrik gerilimi sonrasında Marshall numunelerindeki sıcaklık değişimleri belirlenmiştir. Bitüm miktarına göre 1A, 2A ve 8S ikili numunelerindeki ortalama sıcaklık değişimleri Şekil 4.5'de görülmektedir



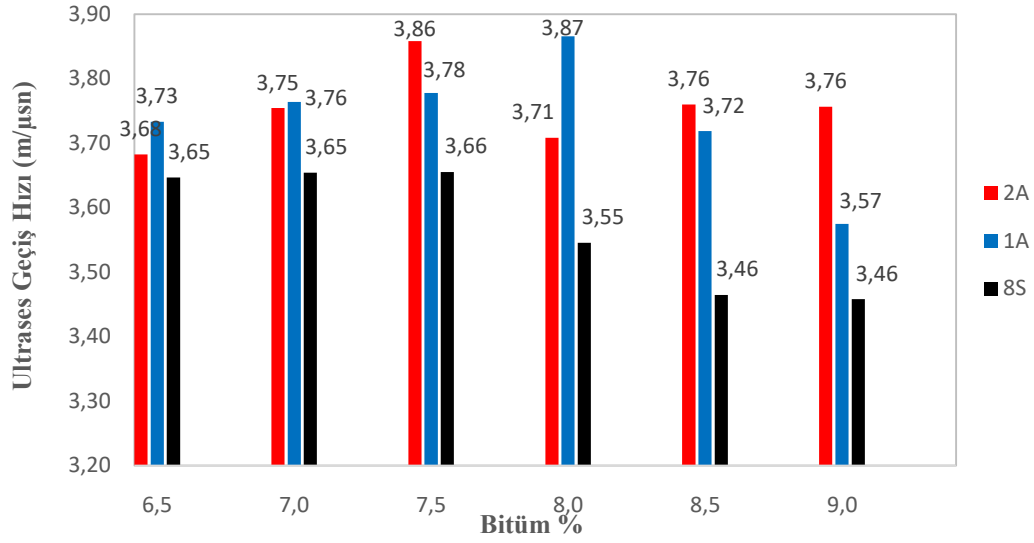
Şekil 4.5 Tekli numunelerde sabit gerilim altındaki sıcaklık değişimleri.

En yüksek sıcaklık artışları, TMA 1A serisinde %6.5 bitüm oranında 5.7°C, TMA 2A serisinde %8.0 bitüm oranında 5.4°C ve TMA 8S serisinde ise %7 bitüm serisinde 7.2°C

olarak belirlenmiştir. TMA 1A serisinde %7.5 bitüm oranına kadar sıcaklıklar düşmüş ve en düşük değer olan 1.2°C'ye ulaşmış, %7.5 bitüm oranı sonrasında bitüm oranı artmasıyla sıcaklık değerleri artmaya başlamıştır. TMA 2A serisinde ise 1A serisine göre tersi bir durum gözlenmiş, %8 bitüm oranına kadar sıcaklıklar artmış ve en yüksek değer olan 5.4°C'ye ulaşmış, %8 bitüm oranı sonrasında bitüm oranı artmasıyla sıcaklık değerleri düşmeye başlamıştır. TMA 8S serisinde ise bitüm oranı artışıyla önce sıcaklık değerlerinde artış sonrasında azalmalar görülmüş, en yüksek sıcaklık değeri olan 7.2°C'ye %7 bitüm oranında ulaşılmıştır. 2A ve 8S numunelerinde bitüm yüzdesinin 8.0'ın üzerine çıkmasıyla numunelerde ortalama sıcaklık artışlarında azalma görülürken 1A numunelerinde ise %8.0 bitüm miktarının üzerinde artış görülmektedir. Tekli ölçümlerde, tüm bitüm yüzdelerinde, numunelerdeki sıcaklık artışları birbirinden farklıdır. Numunelerdeki sıcaklık artışlarının farklı oluşunda gradasyon farkının ve karışım esnasında iletken malzeme olan lif dağılımlarının farklı oluşunun etkili olduğu düşünülmektedir.

#### **4.4 Ultrases Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Üretilen 2A, 1A ve 8S numunelerinde gradasyon değişiminin etkisini görebilmek için ultrases deneyi gerçekleştirilmiş ve numunelerdeki geçiş hızları karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 4.6). Ultrases geçiş hızı ile numune serilerinin gradasyonları arasında ilişki olduğu geçiş hızlarının değişimlerinden görülmektedir. %6.5-7.0 bitüm arasında geçiş hızlarında her üç seri numunelerinde artış, sonrasında ise ultrases geçiş hızlarında azalma görülmektedir. Marshall yöntemine göre de en yüksek yoğunluk değerleri genelde bu aralıklarda elde edilmektedir. Malzemenin yoğun olduğu bitüm yüzdelerinde ultrases geçiş hızları da yüksek elde edilmektedir.



Şekil 4.6 Ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçları.

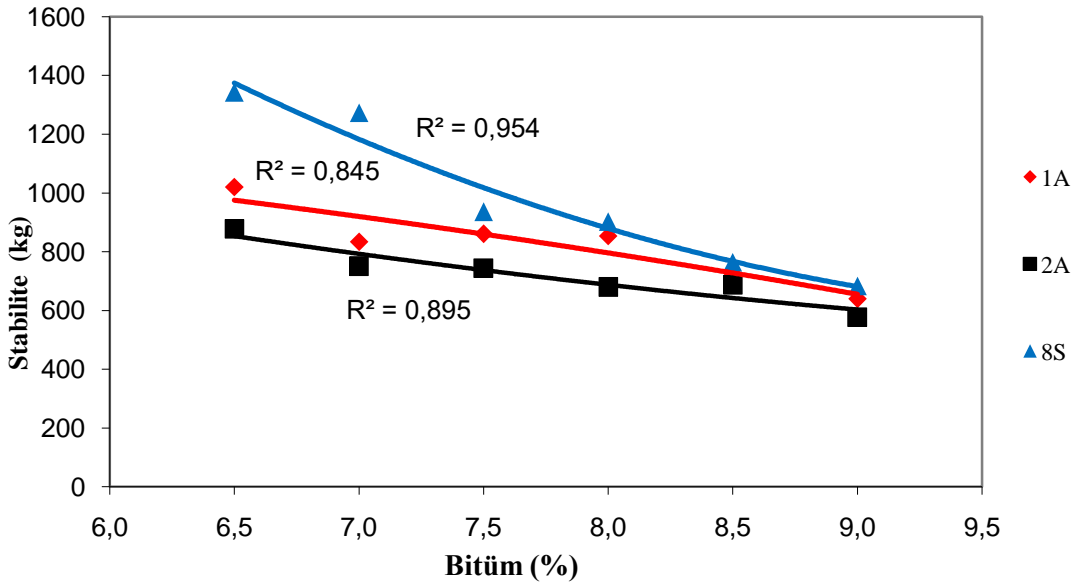
#### 4.5 Marshall Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 1A, 2A ve 8S serisi TMA numunelerine ait Marshall Dizaynı yapılmıştır. Kuru agrega karışımları TCK şartnamesi (2013) Tip-1A ve 2A taş mastik asfalt aşınma tabakası dizayn limitlerinin ortasındaki gradasyon eğrisine uygun olarak hazırlanmışlardır. Karışımlarda karbon lifi kullanıldığı için ayrıca elyaf kullanılmamıştır. 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. Bu numuneler üzerinde ağırlık-hacim ilişkilerini belirlemek amacıyla havadaki, sudaki ve yüzey kuru suya doymun ağırlıkları ve ayrıca yükseklik ve çapları ölçülmüştür. Bunlara ilaveten numuneler Marshall Stabilite-Akma deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan Stabilite, yoğunluk, akma gibi bazı özelliklerin 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.

Sırasıyla 1A, 2A ve 8S serileri için optimum bitüm miktarı %6.50, 6.78 ve 6.50 olarak hesaplanmıştır. Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki değişimler Şekil 4.7’de görülmektedir.

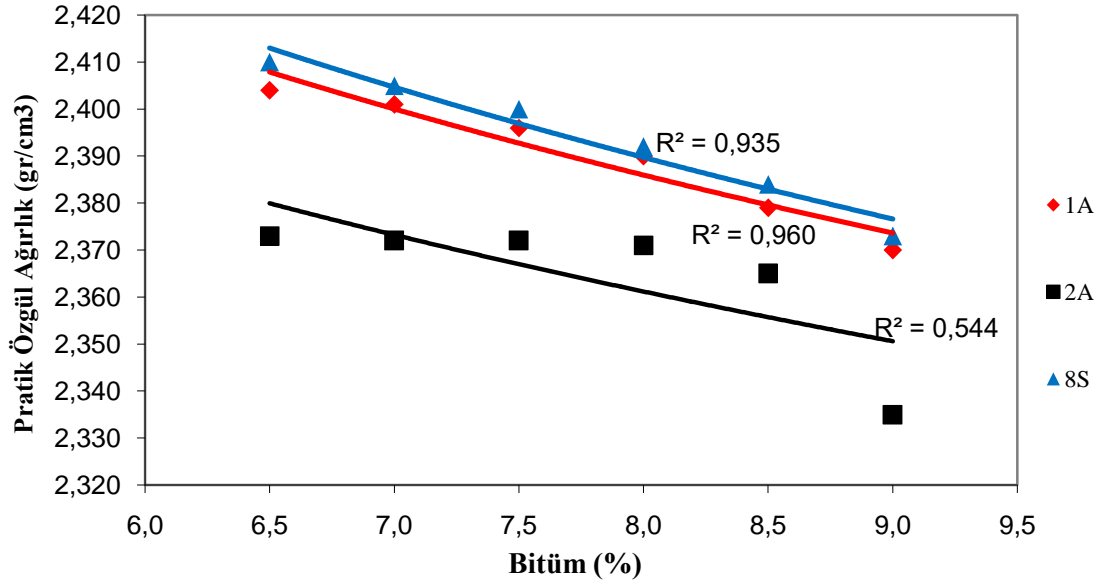


Şekil 4.7 Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

Her üç seriye ait iletken TMA numunelerin maksimum stabilite değerleri sırasıyla 1020, 877 ve 1322 kg olarak elde edilmiştir. 8S serisinin daha gevrek davranış sergileyeceği düşünülmektedir. Tüm seriye ait numunelerde grafiklerde bitüm miktarının artışıyla birlikte stabilite değerlerinde de azalma elde edilmiştir.

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 4.8’de görülmektedir.

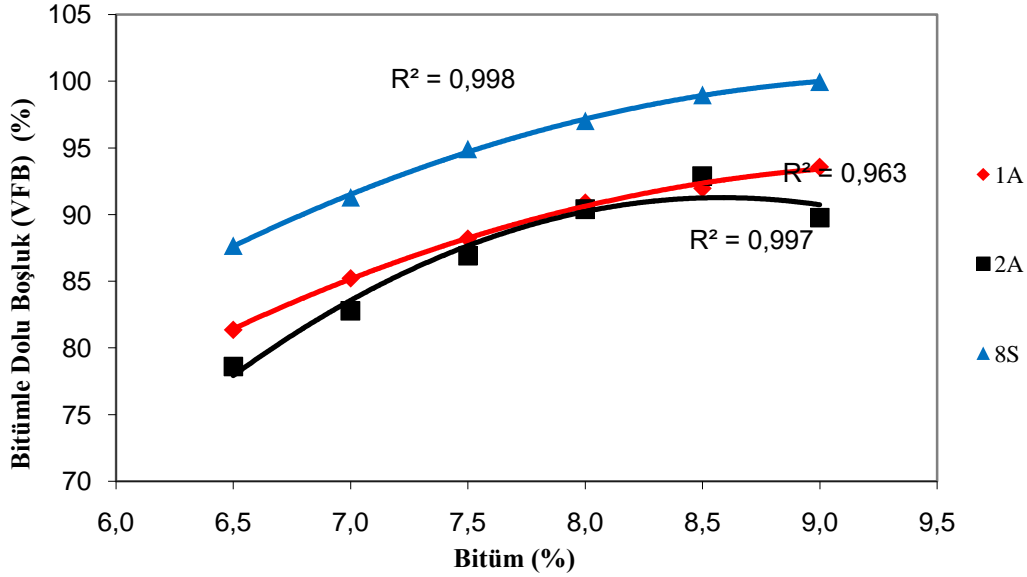


Şekil 4.8 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

Sırasıyla TMA 1A, 2A ve 8S serileri için en yüksek pratik özgül ağırlık değerleri 2.404, 2.373 ve 2.410 gr/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Tüm serilerde bitüm yüzdesinin artmasıyla pratik özgül ağırlık değerleri de artmıştır. En yüksek pratik özgül ağırlık değeri 8S serisine ait numunelerinde elde edilmiştir. Beklenildiği gibi Marshall stabilite değerinin de 8S serisinde en yüksek değerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).

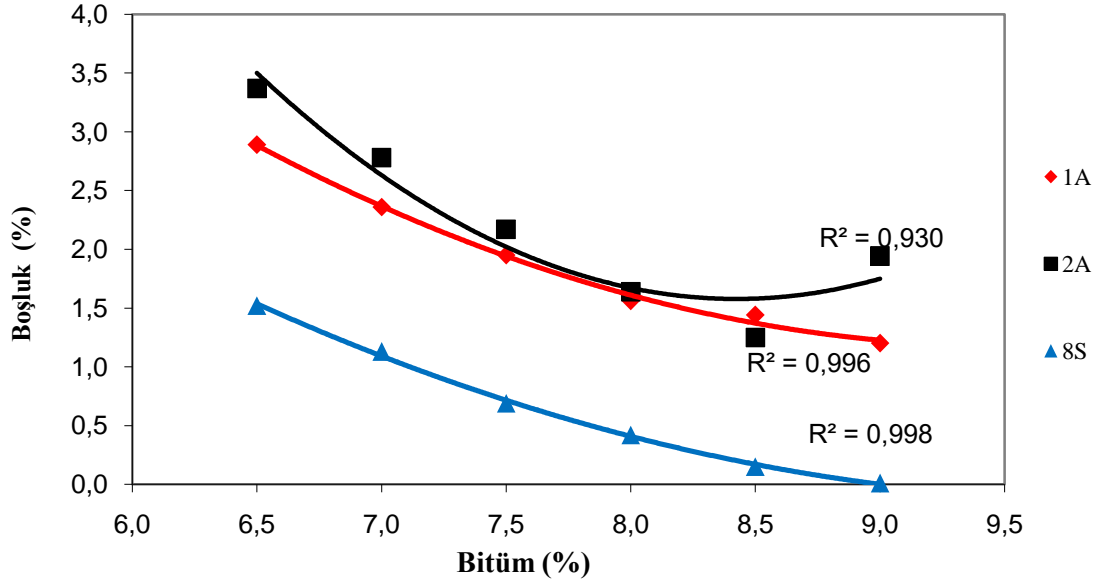
Bitümlü dolu boşluk (VFB), bitümlü sıcak karışımlarda plastisite, durabilite ve kaplamanın sürtünme katsayısı üzerinde etkili bir özellik olup aynı zamanda agrega daneleri etrafında kesin bir bitüm filmi oluşumunda da bu özellik etkili olmaktadır. Bu da kaplamanın durabilitesi açısından oldukça önemli bir husustur (Gürer 2005). Asfalt kaplamaların sürtünme katsayısı kaplamanın yüzey dokusu kadar bitümlü sıcak karışımlardaki bitüm yüzdesi ve boşluk yüzdesiyle de ilgilidir (Umar ve Ağar 1994). TMA 1A, 2A ve 8S nolu serilerde VFB yüzdesi sırasıyla %88, %81, %94 olarak elde edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre bitümlü dolu boşluk miktarında

TMA dizaynı için bir alt ve üst sınır bulunmamaktadır. En yüksek VFB yüzdesi 8S serisinde görülmüşken en düşük değer ise 2A serisinde görülmüştür (Şekil 4.9).



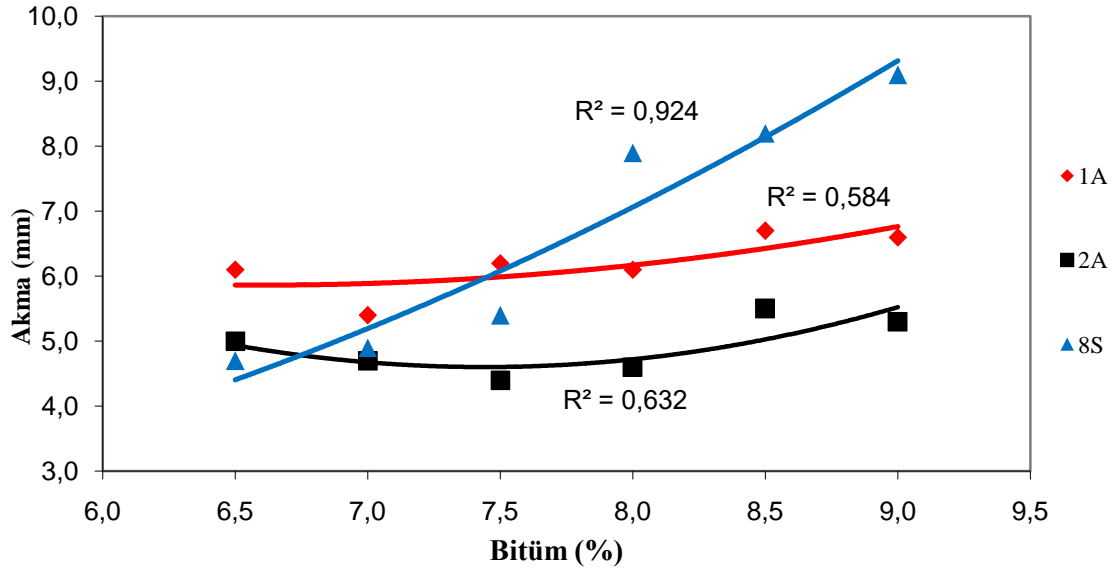
Şekil 4.9 Bitümle dolu boşluk (VFB) ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Bitümlü sıcak karışımlar için önemli bir özellik de boşluktur. 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 (Ağar ve Umar 1994, Gürer 2005). Bitüm yüzdesine karşılık boşluk yüzdelerindeki değişimler Şekil 4.10'da görülmektedir. TMA 1A, 2A ve 8S serisi numuneler için optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen boşluk yüzdeleri sırasıyla %2.9, %2.9 ve %1.5 olarak hesaplanmıştır. 8S serisi numunelerin boşluk yüzdesinin şartname sınırlarından az olduğu bunun da ilerleyen süreçte kuma bozulmasına yol açabileceği değerlendirilmiştir. 1A ve 2A serileri ise şartname sınırı içerisinde (%2-4). Kuma bozulmasına eğilim açısından en iyi davranışı 1A ve 2A serilerine ait numunelerin izleyeceği anlaşılmaktadır.



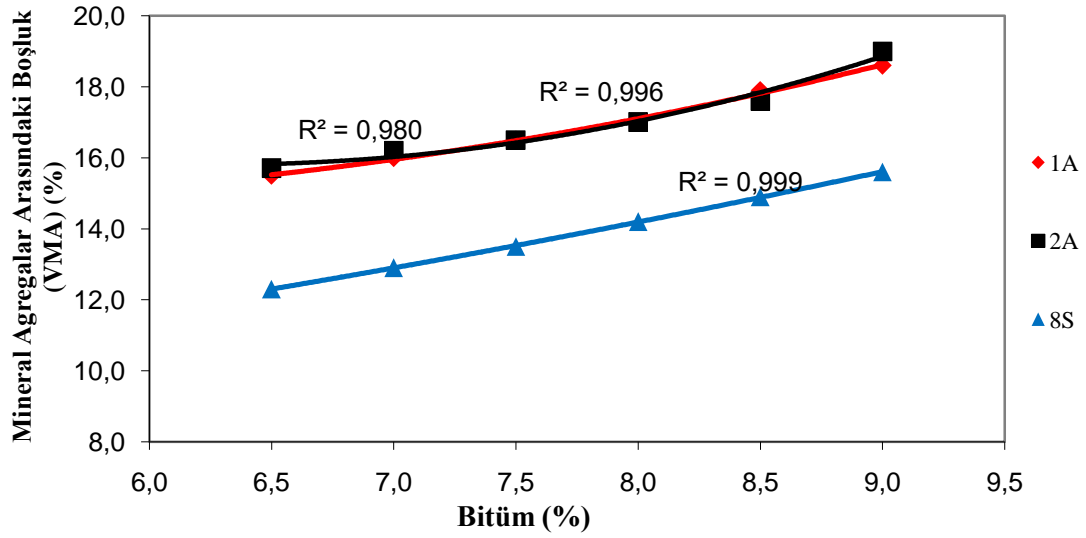
Şekil 4.10 Boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

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). Akma değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi Şekil 4.11’de görülmektedir. 1A, 2A ve 8S serilerinde optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen akma değerleri 4.40, 4.75 ve 4.40 mm’dir. Akma sonuçlarına göre 2A serisi numunelerin plastik şekil değiştirme eğilimi diğerlerine göre daha yüksektir. 1A ve 2A serilerinde bitüm oranı artmasıyla akma değerlerinde benzer bir değişim meydana gelmiştir. 8S serisinde ise bitüm oranı artmasıyla akma değerlerindeki değişimin 1A ve 2A numunelerine göre fazla olduğu gözlemlenmiştir.



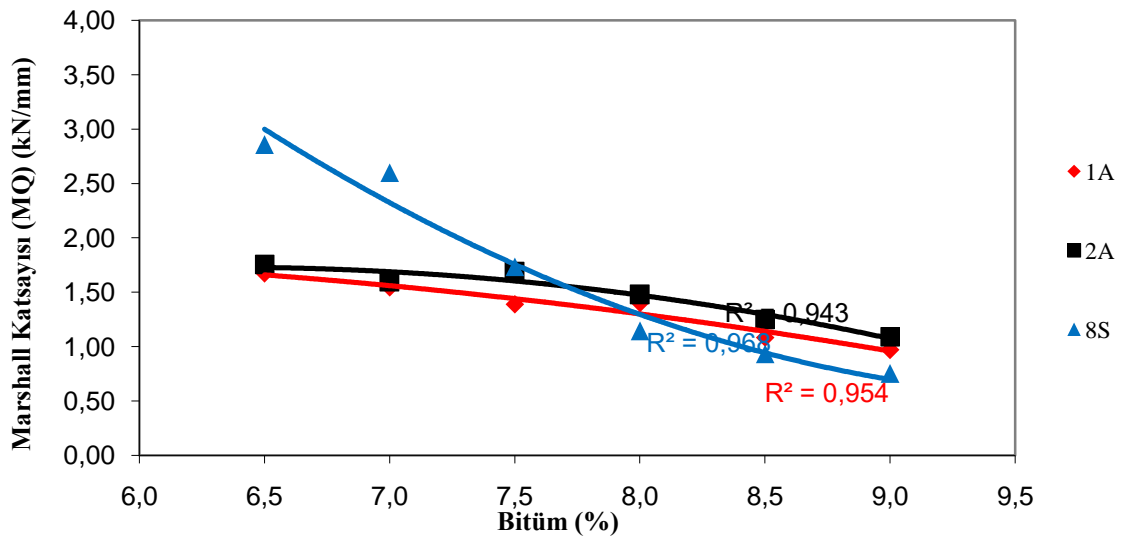
Şekil 4.11 Akma ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Mineral agregalar arasındaki boşluk değeri (VMA) sıkıştırılmış kaplama karışımları içerisindeki bitümlü dolu boşluklar da dâhil olmak üzere agrega danecikleri arasındaki hava boşluklarıdır. Mineral agregalar arasındaki boşluk, karışımdaki bitüm ve hava boşluğu için gerekli olan hacme 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). Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.12’de verilmiştir. Tip-3 aşınma tabakası dizaynı için VMA için alt ve üst sınır değer bulunmamaktadır. TMA 1A, 2A ve 8S serilerinde optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen VMA yüzdeleri 15.80, 16.00 ve 12.30 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 1A ve 2A serisinin durabilite özelliklerinin birbirine yakın ve 8S serisine göre daha iyi olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.12 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 (Lavin 2003, Çelik *et al.* 2007). Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

Üretilen iletken TMA numunelerinde 1A, 2A ve 8S serileri için Marshall katsayısı değerleri sırasıyla 1.40, 1.70 ve 1.73 kN/mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar 1A serisine ait numunelerin diğer karışımlara göre plastik deformasyona daha az eğilimli olduğunu göstermektedir. Tüm serilerde bitüm oranı artmasıyla marshall katsayısı azalmaktadır. Elde edilen katsayının düşüklüğü genel olarak tüm numunelerin plastik deformasyona karşı dirençli olacağını düşündürmektedir.



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında farklı gradasyonlardaki TMA asfalt numunelerinde gradasyona ve bitüm yüzdesine bağlı olarak elektriksel iletkenlik özelliklerinin değişip değişmediği laboratuvar deneyleri ile bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Karbon lifi kullanımının TMA numunelere elektriksel iletkenlik özelliği kazandırdığı görülmüştür.
- Üç farklı gradasyonda üretilmiş numunelerde farklı gradasyonlara bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. TMA 1A serisinde %6.5-%7.0 bitüm oranları arasında bitüm oranının artmasıyla özdirençlerde artış, daha sonrasında artan bitüm oranıyla azalma meydana gelmiştir. TMA 2A serisinde %6.5-%7.0 bitüm oranları arasında bitüm oranının artmasıyla özdirençlerde düşüş, %8.0-%9.0 bitüm oranları arasında ise birbirine yakın özdirenç değerleri elde edilmiştir. TMA 8S serisinde ise artan bitüm oranlarında özdirenç değerlerinde yükseliş ve düşüşler yaşanmış, genel olarak artan bitüm oranıyla özdirençlerde azalma eğilimi gözlemlenmiştir. TMA 1A, TMA 2A ve TMA 8S serisinde üretilen numunelerde artan bitüm oranı ile özdirençler artmış sonrasında özdirençlerde azalma eğilimi görülmüştür. TMA2 serisinde ise artan bitüm oranına bağlı olarak numune sıcaklıklarında da artan bir eğilim gözlemlenmiştir. En düşük özdirenç değerleri TMA 8S serisi numunelerde elde edilmiştir. En düşük özdirenç değerlerinin yüksek bitüm yüzdelerinde (%7.5, %7.5 ve %9.0) elde edilmesi karışımların taş mastik asfalt oluşuna dolayısıyla bitüm ihtiyaçlarının fazla olmasına, yüksek bitüm yüzdelerinde yoğunluklarının da daha yüksek oluşuna bağlanmıştır. Bu durum gradasyon değişiminin özdirenç değerlerinin dolayısıyla numunelerin iletkenliklerinin değişiminde etkili olabileceğini düşündürmektedir.
- Tekli numunelerde ikili birleşim numunelerine göre sıcaklık artışları oldukça yüksektir. Tüm bitüm yüzdelerinde sıcaklık artışları her üç seri numunelerinde

değişkendir. Tekli numunelerde TMA 1A ve 2A serilerinde en yüksek sıcaklık artışları %7.0 bitüm oranında ve sırasıyla 15.6 ve 15.9°C, TMA 8S serisinde ise %8.0 bitüm oranında 18.1 °C olarak elde edilmiştir. TMA 1A ve 2A serilerinde %7 bitüm oranına kadar sıcaklık artmış ve sırasıyla en yüksek sıcaklık değeri olan 15.6°C ve 15.9°C'lere ulaşmış, sonrasında bitüm yüzdesi arttıkça sıcaklık değişimi azalarak en düşük sıcaklık değeri olan 4.7°C ve 6.0°C'lere ulaşmıştır. TMA 8S serisinde ise %8.0 bitüm oranına kadar sıcaklık artmış ve en yüksek değer olan 18.1°C'ye ulaşmış, sonrasında bitüm yüzdesi arttıkça sıcaklık değişimi azalmıştır. Tüm serilerde en yüksek sıcaklık artışı TMA 8S serilerinde meydana gelirken TMA 1A ve 2A numunelerinde bitüm yüzdesinin artışıyla birlikte sıcaklıklarda belirgin azalmalar meydana gelmiştir.

- İkili numunelerde ise TMA 1A, 2A ve 8S serilerinde en yüksek sıcaklık artışı %6.5, %8.0 ve %7.0 bitüm yüzdelinde 5.7°C, 5.4°C ve 7.2°C olarak belirlenmiştir. İkili birleşim numunelerinde direncin artması sıcaklık artışı miktarlarının azalmasının en önemli nedenidir. İkili birleşim numunelerinde farklı bitüm yüzdelinde en yüksek sıcaklık artışlarının görülmesinin en önemli nedeninin iletken malzeme karbon liflerinin karıştırılması sırasındaki tesadüfi dağılımı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
- Marshall dizayn sonuçlarına göre tüm numunelerin optimum bitüm yüzdeleri hesaplanmış. Tüm serilerde stabilite, pratik özgül ağırlık, bitümle dolu boşluk, boşluk, akma, mineral agregalar arasındaki boşluk gibi değerlerinde farklılıklar olduğu görülmüştür. Birbirine yakın gradasyon değerlerine sahip 1A ve 2A serilerinde bu parametrelere ait değerlerin de birbirlerine yakın olduğu bununla birlikte 8S serisinde ise belirgin farklılıkların olduğu görülmüştür.
- Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde Gürgöze'nin (2017) belirttiği gibi gradasyon değişiminin iletkenlik üzerinde etkili olabileceği bununla birlikte en büyük faktörün ise iletken bileşen karbon lifinin tesadüfi dağılımı olduğu düşünülmektedir. Numunelerdeki iletken bileşen karbon lifinin TMA

karışımların elektriksel iletken hale getirilmesinde oldukça etkili olduğu da görülmüştür.



## 6. KAYNAKLAR

- Arabzadeh, A., Ceylan, H., Kimc, S., Sassani, A., Gopalakrishnan, K. and Mina, M. (2018). Electrically conductive asphalt mastic: Temperature dependence and heating efficiency. *Materials and Design*, **157**: 303-313.
- Arıkan, E. (1997), Sathi Kaplamalarda Su Etkisi Altında Agregası ile Bitümlü Bağlayıcı Arasındaki Yapışma Yeteneğinin Kullanılan Malzemelere Bağlı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trafik Planlaması ve Uygulaması Anabilim Dalı, Ankara.
- Ayçiçek, S. (2011), Esnek Üstyapılarda İmalat ve Uygulama Kusurları, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İstanbul.
- Blazejowski, K. (2011). Stone Matrix Asphalt Theory and Practice. New York, 25-182.
- Chen, J., Wang H., ASCE, A.M. and Li, L. (2015). Determination of effective thermal conductivity of asphalt concrete with random aggregate micro structure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**: 04015045.
- Côté, J., Grosjean, V. and Konrad, J.M. (2012). Thermal conductivity of bitumen concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **40**: 172-180.
- Çelik, O.N., Yonar, F., Ceylan, S. (2007). Filler effects on bituminous hot mixture performance. 7th National Congress on Transportation, İstanbul, 196-204.
- Dai, Q., Wang, Z. and Hasan, M. (2013). Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests, *Construction and Building Materials*, **49**: 729-737.
- Demirkaya, Ö. (2016). Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ding, Q., Wu, X., Liu, X. and Hu S. (2008). Experimental research on preparing conductive SMA doped graphite, *Airfield and Highway Pavement*, 15-18.

- Düşmez, C. (2019). Elektriksel İletkenlik Özelliği Olan Asfalt Betonu Geliştirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 513-604.
- Fitzgerald, R.L. (2000). Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon-carbon pre-forms. Master's Thesis, Michigan Technological University, 62p.
- García, A., Schlangen, E., Van de Ven, M., (2009), Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, **23**: 3175-3181.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., Kim. S., Yang, S. and Abdulla, H. (2015). Electrically conductive mortar characterization for self-heating airfield concrete pavement mix design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **8**: 315-324.
- Gürer, C. (2014). Bitümlü Karışımlar: İletken Asfalt Betonları, Yayınlanmamış Lisansüstü Ders Notları, Afyonkarahisar.
- Gürer, C. (2017). Bitümlü Karışımlar. Lisansüstü Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Gürer, C. and Gürgöze, H. (2017). Investigation the characteristics of conductive asphalt concrete with carbon fibre, *International Journal of Innovative Research in Science*, 57-63.
- Gürgöze, H. (2017). Karbon Lif İlaveli Bitümlü Sıcak Karışımların Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Huang, B.S., Chen, X.W. and Shu, X. (2009). Effects of electrically conductive additives on laboratory-measured properties of asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **21**: 612-617.

- Lavin, P. (2003). Asphalt pavements; A practical guide to desing, production and maintenance for engineers and architects, 1st edition. Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Lee, R.C., Sackos, J.T. and Nydahl, J.E. (1984). Bridge heating using ground-source heat pipes. *Transportation Research Record*, **962**: 51-56.
- Liu, X.M. and Wu, S.P. (2009). Research on the conductive asphalt concrete's piezo resistivity effect and its mechanism. *Construction and Building Materials*, **23**: 2752-2756.
- Liu, Z.Z., Xing, M.L., Chen, S.F. and He, R. (2014). Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **51**: 133-140.
- Liu, O., Li, B., Schlangen, E., Sun, Y. and Wu, S. (2017). Research on the mechanical, thermal, induction heating and healing properties of steel slag/steel fibers composite asphalt mixture, *Applied Sciences*, **7**: 1088.
- Minsk, L.D. (1968). Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation. *Highway Researc Record*, **227**:57-63.
- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. Karayolları Genel Müdürlüğü, ARGE Daire Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 39.
- TL Asphalt-StB 07, (2012), German Technical Conditions of Delivery for Asphalt Mixtures for the Construction of Road Pavements, Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development, Germany.
- 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*, **26**: 1-15.
- Pan, P.,Wu, S.,Xiao, F., Pang, L. and Xiao, Y. (2014). Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **26**: 755-769.

- Pan, P., Wu, S., Hu, X., Liu, G. And Li, B. (2017). Effect of material composition and environmental condition on thermal characteristics of conductive asphalt concrete, *Materials* 2017, **10**: 218.
- Park, P., Rew, Y. And Baranikumar, A. (2014). Controlling conductivity of asphalt concrete with graphite, Report 600451-00025-1 Project Title: Controlling Electrical Conductivity of Asphalt Concrete for Multi functional Applications.
- Rodgers, W.J., Gunay, B. and Woodside, A. (2010). Rheological and electrical properties of modified bitumen. *Transport*, **163**: 175-182.
- Taherkhani, H. (2016). Investigating the effects of nanoclay and nylon fibers on the mechanical properties of asphalt concrete. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **49**: 235 – 249.
- TCK, (2013). Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Tunç, A. (2004). Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- Tunç, A. (2007). Yol malzemeleri ve Uygulamaları. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Uluçaylı, M. (2002). Asphalt El Kitabı, İSFALT yayınları, 500.
- Variş, M. (2007). Karayolları Esnek Üstyapılarında Buzlanma İle Mücadele Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Vo, V.H., Park, D.W., Seo, W.J.and Im, J.S. (2015). Effect of conductive filler size and type on thermal properties of asphalt mixtures. Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation. August 2-5, 2015, Fairbanks, Alaska
- 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 Materials in Civil Engineering*. **29**: 04016176.
- Yaseen, F.A. (2016). Anfis Yönteminin Yol Üstyapılarının Yapısal Analizinde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

- Yayla, N. (2013). Karayolu Mühendisliği. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yeğınobalı, A. (2009). Niçin beton yol ?. TÇMB, Ar-Ge/Y 09.01, Ankara.
- Yehia, S., Tuan, C.Y., Ferdon, D. and Chen, B. (2000). Conductive concrete overlay for bridge deck deicing. *Materials Journal*, **97**: 172-181.
- Zhou, C.X. and Tan, Y.Q. (2009). Study on anti-icing performance of pavement containing a granular crumb rubber asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, **10**: 281-294.
- Wen, S. And Chung, D.D.L. (2005). Pitch-matrix composites for electrical, electro magnetic and strain-sensing applications. *Journal of Materials Science*, **40**: 3897-3903.
- Woodside, A.R., Woodward, W.D.H. and Akbulut H. (1999). Stone mastic asphalt: assessing the effect of cellulose fibre additives. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1998, **127**: 103 – 108.
- Wu, S.P., Mo, L.T., Shui, Z.H. (2002). An improvement in electrical properties of asphalt concrete. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, **17**: 69–72.
- Wu, S., Mo, L., Shui, Z., Xuan, D., Xue, Y. and Yang, W. (2002). An improvement in electrical properties of asphalt concrete. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*. Dec. 2002 Vol. 17 No. 4.
- Wu, S.P., Mo, L.T. and Shui, Z.H. (2005). The conductive mechanism in graphite-modified asphalt concrete. *Progress in Natural Science*, **15**: 446–452.
- Wu, S.P., Mo, L.T., Shui, Z.H., *et al.* (2005b). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, **43**: 1358–1363.
- Wu, S., Liu, X. and Yang, X. (2009). Smart characteristics of conductive asphalt concrete. *Journal of Central South University: Science and Technology*, **40**: 1465–1470.

## İnternet Kaynakları

- 1) <http://osupp.com/> 04.04.2019
- 2) <http://www.simgemat.com.tr/tr/CevreArge/InovatifUrunler/> 04.04.2019
- 3) <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/grafit/>04.04.2019
- 4) <http://tr.pvcsino.net/>04.04.2019
- 5) <http://www.technobee.com.tr/>04.04.2019
- 6) <http://www.azichem.de/>04.04.2019
- 7) <http://www.dowaksa.com/> 13.05.2019
- 8) <http://insaatteknigi.blogspot.com/2014/06/ultrasonik-test-cihaz.html> 21.04.2019



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serhat DÜZAĞAÇ  
Doğum Yeri ve Tarihi : İZMİT – 29.12.1979  
Yabancı Dili : İngilizce / 2018-YÖKDİL- 75  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0530 606 34 79/serhatduzagac@hotmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Lisesi, (1995-1997)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, (2014-2016)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,  
(2016-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Afyonkarahisar Belediyesi, (2005- Devam ediyor)