



**UÇUCU KÜL İÇEREN ASFALT BETONUNUN KENDİNİ İYİLEŞTİRME
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mert ATAKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2019

Mert ATAKAN tarafından hazırlanan “UÇUCU KÜL İÇEREN ASFALT BETONUNUN KENDİNİ İYİLEŞTİRME PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kürşat YILDIZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/11/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Mert ATAKAN
21/11/2019

UÇUCU KÜL İÇEREN ASFALT BETONUNUN KENDİNİ İYİLEŞTİRME PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mert ATAKAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2019

ÖZET

Karayolu kapıdan kapıya ulaşım sağladığı için yeri doldurulamaz bir ulaşım türüdür. Karayolu inşasında genellikle asfalt kaplama tercih edilmektedir. Bir karayolu trafiğe açıldıktan sonra, trafik yükleri, bitümün yaşlanması, iklim koşulları gibi sebeplerle asfalt kaplamada zamanla bozulmalar başlamaktadır. Bu bozulmalar sonucu hem yüksek maliyetli bakım ihtiyacı doğmakta hem de bozulmalar yol güvenliğini tehlikeye sokmaktadır. Bu sorunlara çözüm olması için, bu tez çalışmasında kendini iyileştirebilen asfalt betonu üzerine çalışılmıştır. Çalışmada asfalt betonunda filler olarak uçucu kül kullanılarak, asfalt betonundaki çatlakların mikrodalga ısıtması yöntemi ile kendini iyileştirme performansı incelenmiştir. Bu amaçla birinci aşamada uçucu kül ve kontrol numunelerinin mikrodalga ısınma hızları termal kamera kullanılarak tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise numunelere üç noktalı eğilme deneyi ile hasar verilmiş ve numunelerde oluşan hasarlar mikrodalga ısıtması ile iyileştirilmiştir. Daha sonra iyileşen numuneler tekrar eğilme deneyine tabi tutularak iyileşme performansları belirlenmiştir. Numunelerin iyileştirme öncesi ve sonrası çatlak genişlikleri ise çatlak mikroskobu ile ölçülmüştür. Sonuç olarak mikrodalga ısıtma sıcaklığının ve ilk hasar boyutlarının iyileşme performansında belirleyici faktörler olduğu görülmüştür. Asfalt betonunda filler olarak uçucu kül kullanımının mikrodalga ısınma hızını artırdığı ve optimum iyileşme sıcaklığının 75-100 °C olduğu görülmüştür. İyileşme performansında uçucu kül kullanımının etkileri sınırlı kalsa da uçucu külün farklı karışım ve yükleme koşullarında iyileşme performansını artırabileceği öngörülmektedir.

Bilim Kodu : 91125
Anahtar Kelimeler : Asfalt betonu, Kendi kendine iyileşme, Mikrodalga ısıtması, Uçucu kül, Çatlak genişliği, Çatlak iyileşmesi, Üç noktalı eğilme
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Kürşat YILDIZ

EVALUATION OF SELF-HEALING OF ASPHALT CONCRETE CONTAINING FLY

ASH

(M. Sc. Thesis)

Mert ATAKAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2019

ABSTRACT

Since the highway provides door-to-door transport, it is an irreplaceable transportation mode. Asphalt pavements are usually preferred in highway constructions. After a highway is opened to traffic, deteriorations occur in the course of time due to traffic loads, ageing and weather conditions in asphalt pavement. As a result of these deteriorations both costly maintenance necessity arises, and deteriorations put in danger the road safety. In order to solve this problem, self-healing of asphalt concrete was studied in this thesis. In the study, self-healing performance of cracks in asphalt concrete was examined via microwave heating method, by using fly ash as filler in asphalt concrete. For this purpose, at the first step microwave heating rates of fly ash and control specimens were determined by using thermal imaging camera. At the second step, specimens were damaged via three-point bending test and the damage which emerged in specimens were healed by microwave heating. Then, healing performance of healed specimens were determined by tested them again with three-point bending test. Crack size of the specimens were measured with the help of crack microscope before and after healing process. As a result, it was observed that initial damage size and microwave heating temperature are indicative factors for healing performance. It was observed that using fly ash as filler in asphalt concrete increased microwave heating rate and it was monitored that optimum healing temperature is between 75-100 °C. Although the effect of using fly ash to healing performance was limited, it is estimated that fly ash may improve healing performance in different loading case and different mixes.

Science Code : 91125
Key Words : Asphalt concrete, Self-healing, Microwave heating, Fly ash, Crack size, Crack-healing, Three point bending
Page Number : 95
Supervisor : Asst. Prof. Kürşat YILDIZ

TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmaların yürütülmesinde ve tezin metin haline getirilmesinde öncelikle değerli katkıları için danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Kürşat YILDIZ'a, deneysel çalışmada kullanılan mikrodalga ısıtıcının teminini sağlayan, Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, çatlak mikroskobunun teminini sağlayan Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e, deneyde kullanılan termal kameranın temininde yardımcı olan Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a, eğilme deneylerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI'ya ve Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne, deneyde kullanılan çelik mesnetlerin üretiminde yardımcı olan İmalat Mühendisliği Bölümü'ne, deneysel verilerin düzenlenmesinde yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Harun KINACI'ya ve Arş. Gör. Zülal TÜZÜNER'e bu tez çalışmasını bilimsel araştırma projesine dönüştürme sürecinde yardımcı olan Arş. Gör. Anıl ÖZDEMİR'e, deneysel çalışmalardaki teknik desteği için Tekniker Osman AYDIN'a ayrıca deneysel çalışmalara 07/2019-06 nolu proje ile destek olan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne değerli katkıları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1. Karayolu Kaplamaları	5
2.2. Esnek Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler.....	5
2.2.1. Bitümlü bağlayıcılar.....	6
2.2.2. Agregalar.....	7
2.3. Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar	9
2.3.1. Deformasyonlar.....	9
2.3.2. Ayrışmalar.....	11
2.3.3. Çatlamlar	13
2.4. Kendi Kendine İyileşme Kavramı.....	16
2.4.1. Mikrokapsül yöntemi	17
2.4.2. Mikrovasküler sistem.....	17
2.4.3. İçi oyuk lif yöntemi.....	18

2.5. Asfaltın Kendi Kendine İyileşme Mekanizması	18
2.6. Asfaltın Betonunun İyileşmesini Etkileyen Faktörler.....	21
2.6.1. Bitümün özelliklerinden kaynaklanan faktörler.....	21
2.6.2. Asfalt karışımından kaynaklanan faktörler	24
2.6.3. Dış etkenler	25
2.7. İndüksiyon ve Mikrodalga Isıtması Yöntemleri	27
2.7.1. İndüksiyon ısıtması yöntemi	27
2.7.2. Mikrodalga ısıtması yöntemi.....	34
2.8. Kapsül Yöntemi ve Diğer Yöntemler	42
2.8.1. Kapsül yöntemi	42
2.8.2. Diğer yöntemler	43
2.9. Uçucu Kül	43
3. MATERYAL VE METOT	45
3.1. Bitüm.....	45
3.2. Agregası.....	46
3.4. Mikrodalga Fırın	47
3.5. Uçucu Kül ve Diğer Malzemelerin Isınma Hızlarının Belirlenmesi.....	47
3.6. Numunelerin Hazırlanması	49
3.6.1. Optimum bitüm oranının bulunması	49
3.6.2. Numunelerin üretilmesi.....	51
3.7. Isınma Hızlarının Belirlenmesi	54
3.7.1. Numunelerin ortalama yüzey sıcaklığının (OYS) ölçümü.....	54
3.7.2. Numunelerin iç sıcaklığının ölçümü	56
3.8. İyileşme Performansının Belirlenmesi	56

Sayfa

3.8.1. Eğilme deneyinde kullanılan mesnetlerin üretimi	57
3.8.2. Üç noktalı eğilme deneyi	58
3.8.3. Numunelerin mikrodalga ısıtması ile iyileştirilmesi	61
3.8.1. Çatlaklardaki iyileşmenin görsel olarak belirlenmesi	63
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	67
4.1. Isınma Hızları	67
4.1.1. Numunelerin ortalama yüzey sıcaklığı.....	67
4.1.2. Numunelerin iç sıcaklığı	68
4.2. İyileşme Performansı	69
4.2.1. Eğilme dayanımları	69
4.2.2. Isıtma süreleri.....	73
4.2.3. İyileştirme sıcaklıkları.....	74
4.2.4. Hasar boyutları	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan bitümün özellikleri	45
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan agrega gradasyonu	46
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.....	49
Çizelge 3.4. Marshall deneyi sonucu belirlenen asfalt karışımının özellikleri	51
Çizelge 3.5. Oluşturulan numune grupları	51
Çizelge 4.1. SPSS programında yapılan Pearson korelasyon analizi	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Agregaların gevşeyerek sökülme problemine yol açması	12
Şekil 2.2. Mikrokapsül ve mikrovasküler iyileşme sistemleri.....	18
Şekil 2.3. İçi oyuk lifler ile kendiliğinden iyileşme.....	18
Şekil 2.4. Bölgesel düzeydeki kohezif ve adhezif çatlak tipleri	19
Şekil 2.5. Çatlak ve çatlak oluşum bölgesi	20
Şekil 2.6. Temas açısı ile ıslatma arasındaki ilişki	22
Şekil 2.7. Asfalt betonunda iyileşme ve sıcaklık ilişkisi	25
Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda iyileşme seviyesi ve zaman ilişkisi.....	26
Şekil 2.9. Hacimsel öz direncin katkı miktarına göre değişimi	28
Şekil 2.10. İndüksiyon ısıtmasının şematik gösterimi	30
Şekil 2.11. Yoğun ve poroz asfalt karışımlarının sıcaklıkla değişen iyileşme seviyeleri	31
Şekil 2.12. Manyetik soğurucu tabakanın çalışma prensibi.....	32
Şekil 2.13. Elektromanyetik spektrum.....	35
Şekil 2.14. Bir mikrodalga ışını	35
Şekil 2.15. Mikrodalga (solda) ve geleneksel (sağda) ısıtma sisteminin karşılaştırılması	36
Şekil 2.16. Asfalt betonunun mikrodalga etkisi ile iyileşmesi a) Mikro çatlağı olan asfalt betonu b) Katkısız normal asfalt betonunun mikrodalga ile iyileşmesi c) Ferrit katkılı asfalt betonunun mikrodalga ile iyileşmesi	38
Şekil 2.17. Mikrodalga ısıtması aracının çalışma prensibi	41
Şekil 2.18. Yaşlanmış bitümün yenileyici içeren mikro kapsüller ile kendi kendini iyileştirme işlemi a) Asfalt karışımının yapısı b) Mikro çatlak oluşumu ve kapsülün açılması c) Yenileyici maddenin çatlak içine akması sonucu yaşlanmış bitümün kapilarite ve difüzyon ile kendi kendini iyileştirmesi.....	42
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan agreganın granülometri eğrisi ve şartname sınırları	46

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Uçucu kül, silis dumanı ve demir (III) oksit malzemelerinin ısınma mikrodalga fırında ısınma hızları	48
Şekil 3.3. Mikrodalga ısıtması ile iyileştirme döngüsü.....	62
Şekil 4.1. Numunelerin termal kamera ile elde edilen ortalama yüzey sıcaklıkları	68
Şekil 4.2. Numunelerin 120 s sonunda ulaştığı iç sıcaklıklar	68
Şekil 4.3. Numunelerin iç sıcaklıklarının zamana göre değişimi	69
Şekil 4.4. Numunelere ait ilk eğilme dayanımlarının histogramda dağılımı	70
Şekil 4.5. Numune gruplarına ait ilk eğilme dayanımları.....	70
Şekil 4.6. Bir UK numunesinin eğilme deyininde elde edilen yük-deplasman grafiği.....	71
Şekil 4.7. Numune gruplarına ait eğilme dayanımlarında görülen değişim	72
Şekil 4.8. Numune gruplarına göre ilk ve ikinci iyileşme oranları	72
Şekil 4.9. İyileşme sıcaklıklarının ısıtma sürelerine göre değişimi	73
Şekil 4.10. İyileşme oranları ve iyileşme sıcaklıklarının ilk hasar boyutlarına göre gruplanarak karşılaştırılması	74
Şekil 4.11. İyileştirme sıcaklıklarının numune gruplarına göre karşılaştırılması	75
Şekil 4.12. Çatlak genişliklerinin diğer değişkenlerle ilişkisi a) İyileşmeden önce-birinci iyileşme oranı b) İyileşmeden sonra-birinci iyileşme oranı c) İyileşmeden önce-ilk eğilme dayanımı d) İyileşmeden sonra-ikinci eğilme dayanımı.....	76
Şekil 4.13. Bütün numunelere ait ilk hasar boyutuna göre iyileşme oranları	77
Şekil 4.14. Hasar boyutlarına göre iyileşmeden önce ve sonra ortalama çatlak genişlikleri.....	78

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tipik bir esnek kaplamayı oluşturan tabakalar	5
Resim 2.2. Bir kavşakta meydana gelen ondülasyon.....	10
Resim 2.3. Ayırışma kusurlarından olan çukurlar	11
Resim 2.4. Asfalt kaplamada bitüm kusması.....	12
Resim 2.5. Timsah sırtı çatlaklar	13
Resim 2.6. Kenar çatlağı.....	13
Resim 2.7. Enine ve boyuna çatlaklar.....	14
Resim 2.8. Bir yaya geçidinde görülen kayma (ötelenme) çatlağı	15
Resim 2.9. Büzülme (blok) çatlakları	15
Resim 2.10. Esnek kaplama altında yer alan rijit kaplamanın yansıma çatlaklarına sebebe olduğu görülmektedir	16
Resim 2.11. İndüksiyon ısıtması düzeneği	29
Resim 2.12. Asfalt mastik kirişin üç noktalı eğilme deneyi	30
Resim 2.13. Hollanda’da bulunan A58 karayolunda araca monte edilmiş indüksiyon cihazı ile yapılan iyileştirme işlemi	33
Resim 2.14. HEALROAD projesinde yol yüzeyine indüksiyon ısıtması uygulanması	34
Resim 2.15. Isıtma deney düzeneği a) Mikrodalga fırın ve b) İndüksiyon ısıtma sistemi	39
Resim 2.16. Numunelerin -18 °C ‘ye soğutulması ve 3 noktalı eğilme deneyi	40
Resim 2.17. Buz erime deneyi için hazırlanan numune.....	41
Resim 3.1. Deneyde kullanılabilirliği test edilen malzemeler	48
Resim 3.2. Agrega, bitüm ve Marshall kalıbının etüvde ısıtılması.....	50
Resim 3.3. Yarı silindirik numunenin kesildikten sonraki görüntüsü	52
Resim 3.4. Silindir numunelerin kesilerek yarı silindir numunelerin oluşturulması	53

Resim	Sayfa
Resim 3.5. Deneyde kullanılan yarı silindirik numune boyutları	53
Resim 3.6. Deneyde kullanılan kontrol ve uçucu kül (UK) numuneleri	54
Resim 3.7. Termal kamera ile elde edilen bir görüntü örneği	55
Resim 3.8. Numunenin termal kamera ile görüntülenmesi işlemi.....	55
Resim 3.9. Numunenin iç sıcaklığının ölçülmesi işlemi	56
Resim 3.10. Çelik mesnetlerin Autocad ortamında tasarlanması işlemi	57
Resim 3.11. Eğilme deneyinde kullanılacak çelik mesnetlerin üretim aşaması	58
Resim 3.12. Üç noktalı eğilme deneyinde numunenin kırılması a) Yüklemeden önce numunenin yerleşimi b) Kırılan numunede çatlak oluşumu.....	59
Resim 3.13. Üç noktalı eğilme deney düzeneği.....	59
Resim 3.14. Numunelerin derin dondurucuda soğutma işlemi.....	60
Resim 3.15. Numune yüklenirken sıcaklığının kontrol edilme işlemi.....	60
Resim 3.16. Numunelerin mikrodalga ısıtması ile iyileştirilmesi işlemi.....	61
Resim 3.17. Mikrodalga ile ısıtılan numunelerin sıcaklığının kızılötesi termometre ile ölçümü	62
Resim 3.18. Çatlak mikroskobu ile kurulan fotoğraflama düzeneği.....	63
Resim 3.19. Çatlak mikroskobu ile numunelerin incelenmesi işlemi.....	64
Resim 3.20. Autocad ortamında çatlak genişliklerinin belirlenmesi a) İyileşmeden önce b) İyileşmeden sonra.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
cm ³	Santimetreküp
dk	Dakika
gr	Gram
Hz	Hertz
kN	Kilo Newton
mm	Milimetre
s	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

CK	Çatlak kapanma oranı
d ₁	İyileşmeden önceki çatlak genişliği
d ₂	İyileşmeden sonraki çatlak genişliği
F ₁	Birinci eğilme dayanımı
F ₂	İkinci eğilme dayanımı
F ₃	Üçüncü eğilme dayanımı
KT	Kalker tozu
OYS	Ortalama yüzey sıcaklığı
S ₁	Birinci iyileşme oranı
S ₂	İkinci iyileşme oranı
UK	Uçucu kül içeren numuneler

1. GİRİŞ

Karayolu, kapıdan kapıya ulaşım sağladığı için yeri doldurulmaz bir ulaşım türüdür. Türkiye’de yük ve yolcu taşımacılığı, çok yüksek oranlarda karayolu ile yapılmaktadır. Ülkemizdeki toplam yük taşımacılığının %88,3’ü ve yolcu taşımacılığının %91,8’i karayolu ile yapıldığı ve Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı’nın kontrolündeki yatırımların %65’i bu konuda yapıldığı rapor edilmiştir [1].

Ülkemizde karayolu yapımında sıklıkla asfalt kaplamalar kullanılmaktadır. Bunun sebepleri arasında esnek üst yapının rahat ve konforlu bir sürüş sağlaması, ilk yapım maliyetlerinin nispeten düşük olması, kolay işçilik gerektirmesi ve onarım faaliyetlerinin hızlı yapılabilmesi sayılabilir. Asfalt kaplamalar agrega, asfalt çimentosu ve fillerden oluşan bitümlü sıcak karışım dediğimiz karışımın asfalt plantlerinde hazırlanıp, yol yüzeyine finişerle serilmesi şeklinde yapılmaktadır. Böyle bir yolun hizmete açılmasından hemen sonra trafik yükleri, hava koşulları, nem gibi nedenlerle bozulmalar başlamaktadır. İlk önce küçük çatlaklar olarak başlayan bu bozulmalar zamanla ilerleyerek derin çatlaklara daha sonra da çukur gibi daha ciddi bozulmalara yol açtığı bildirilmiştir [2].

Karayolu asfalt kaplamalarında meydana gelen bu bozulmalar hem trafiğin güvenliğini tehlikeye atmakta hem de onarım işlemlerine yüksek bütçeler ayrılmaktadır. Bunlara ek olarak onarım sırasında trafik aksamaktadır. Bu bozulmalara genellikle yama, dolgu gibi tamir metotlarıyla çözüm bulunmakta veya bozulan kaplamanın sökülüp yeniden yapılması yoluna gidilmektedir. Uygulanan tamir metotları ise meydana gelen bozulmanın türüne göre değişiklik göstermektedir.

Meydana gelen bozulmalar genel olarak deformasyonlar (tekerlek izi, çökme, ondülasyonlar, kabarmalar), ayrışmalar (çukurlar, sökülmeler, kaygan yüzeyler) ve çatlaklar (timsah sırtı yorulma çatlakları, derz çatlakları, kayma çatlakları) olarak üç ana başlıkta toplanabilir. Esnek kaplamalarda en yaygın görülen bozulmalar çatlaklardır. Çatlakların onarımı ise oldukça zordur. Çatlakların genişliği 3 mm’den daha geniş ise kumla karıştırılmış asfalt emülsiyonu yardımıyla onarılabilir. Eğer çatlaklar 0,3 mm ile 3 mm arasında ise ısıtılmış katbek asfalt (Asfalt çimentosunun benzin gibi diğer petrol ürünleri ile karıştırılması ile elde edilir.) ile onarılabilir. Eğer çatlakların genişliği 0,3 mm’den (300µm)

daha az ise geleneksel yöntemlerle onarmanın neredeyse imkansız olduğu ifade edilmiştir [3].

Aslında asfalt yüzeyindeki mikro çatlakların zamanla kendi kendine iyileşebildiği bilinen bir gerçektir. Bazin ve Saunier 1967’de ilk defa asfaltın kendiliğinden iyileşmesi kavramını ortaya çıkarmıştır [4]. Çalışmalarında asfaltın yüke maruz kaldıktan sonra, dinlenmesine izin verildiğinde hasarların iyileşebildiğini ve sıcaklığın bu olayda önemli bir rol oynadığını bulmuşlardır. Bu çalışmadan sonra kendini iyileştirme bir araştırma konusu olmuştur.

Kendini iyileştiren asfalt konusunda iki yöntem ön plana çıkmaktadır; kapsül yöntemi ve ısıtma yöntemi. Bunlardan ilk olarak kapsül yönteminde yenileyici madde asfalt karışımına yeterli dayanımda bir kapsül içerisinde eklenir. Çatlak meydana geldiğinde meydana gelen gerilme ile kapsül yırtılarak açılır ve yenileyici madde çatlak içine kılcallık etkisiyle akarak çatlığı doldurur ve buradaki bitümü yumuşatarak özelliklerini yeniler. Yani yaşlanmayı tersine çevirerek, zamanla gevrek hale gelmiş bitümü, eski haline dönüştürür. Böylece çatlaklar kendiliğinden iyileşebilir [5,6]. Bu yöntemde kullanılan kapsüllerin tek kullanımlık olması yöntemin sürdürülebilirliği açısından önemli bir dezavantajdır [2].

İkinci olarak ısıtma yöntemi ise asfaltın zaten potansiyelinde olan kendiliğinden iyileşme özelliğini daha iyi bir hale getirmeyi hedefler. Asfaltın reolojik özellikleri pek çok etkene bağlı olduğu gibi en çok sıcaklığa bağlıdır. Asfaltın sıcaklığı, türüne ve katkılara göre değişmekle birlikte 30-70 °C dolaylarına geldiğinde, asfaltın Newtonian akışkan gibi davranmaya başlayacağı ifade edilmiştir [7]. Böylece asfalt kılcallık yardımı ile çatlakların içine akarak çatlakları doldurur ve iyileşme sağlanır. Genellikle ortam sıcaklığı yeterince yüksek olmadığı için asfaltın dış müdahale ile ısıtılması gerekir. Konvansiyonel ısıtma yöntemlerinde asfalt tabakasının tümünün ısıtılması oldukça güçtür. Bu yöntemler genellikle yüzeysel bir ısınma sağlar. Bu yüzden bu konuda indüksiyon ısıtması veya mikrodalga ısıtması gibi tabakanın tümüne etki edebilecek yöntemler daha ön plana çıkmaktadır.

İndüksiyon ısıtması elektromanyetik dalgalarla iletken maddeleri ısıtmanın bir yoludur. Evlerde kullanılan indüksiyon ocaklar bunun bir örneğidir. Bir iletken olan metaller bu yöntemle ısıtılabilir ve demir çelik sanayisinde bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır. Normal bir asfalt betonu iletken olmadığı için bu yöntemle ısıtılamaz. Isınmanın sağlanması için

asfalt karışımına çelik yünü veya çelik lifleri gibi iletken malzemeler eklenmesi gerektiği önceki çalışmalarda ifade edilmiştir [8].

Mikrodalga ısıtması ise indüksiyon yöntemine benzer bir yöntemdir. Frekansları 300-300000 MHz arasında olan dalgalar mikrodalgalar olarak sınıflandırılır. Mikrodalga ısıtmasında elektromanyetik dalgalar, dipol momentini oluşturabilen polar moleküllerin dönme hareketi yapmasını ve böylece ısınmasını sağlar. Örneğin su polar bir molekül yapısına sahip olduğu için mikrodalga fırında ısıtılabilir [9]. Metaller ise bu dalgaları yansıtıcı özellikte oldukları için ısıtılamayacağı düşünülebilir ancak metal tozlarının verimli bir şekilde mikrodalga ısıtması ile ısıtılacağı bugün bilinmektedir [10]. Bu yüzden tıpkı indüksiyon ısıtmasında olduğu gibi asfalt karışımına metalik malzemeler ekleyerek asfaltın ısınma hızını artırılabilir [11].

Bu tez çalışmasında mikrodalga ısıtması yöntemi tercih edilmiş ve ısınmayı hızlandırıcı madde olarak çevresel bir kirletici olan uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün mikrodalga ile ısınma özelliğinin nispeten yüksek olması ve endüstriyel atık olarak ülkemizde ve dünyada bolca bulunması bu seçimdeki başlıca faktör olmuştur.

Araştırma metodolojisi temel olarak üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki deneylere hazırlık aşaması olup bu aşamada gerekli malzemeler hazırlanmış, granülometri ve özgül ağırlık gibi malzeme özellikleri belirlenmiş, deneylerde kullanılacak numuneler üretilmiştir. İkinci aşamada numuneler mikrodalga fırında ısıtılarak termal görüntüleri kaydedilmiş ve ısınma hızları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise öncelikle numuneler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş ve hasar gören numunelerin mikrodalga ısıtması ile iyileşmesi sağlanmıştır. Daha sonra ikinci bir üç noktalı eğilme deneyi ile iyileşme yüzdeleri belirlenmiştir. Ayrıca çatlak mikroskobu ile numune üzerindeki çatlaklar incelenerek görsel olarak iyileşme olup olmadığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında ele alınan kendini iyileştiren asfalt kaplama konusu servis ömrünün uzun olması ve bakım maliyetlerini azaltması yönüyle dikkate değerdir. Ayrıca, enerjiyi etkin bir biçimde kullanan mikrodalga ısıtmasının kullanımı ve uçucu kül gibi çevresel bir kirleticinin ekonomiye kazandırılması yönüyle de sürdürülebilir çevre konusunda önemli bir adımdır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Karayolu Kaplamaları

Yol kaplaması taşıt lastiklerinin doğrudan temas ettiği, yükü yol temeline aktaran yapıdır [12]. Yol kaplamaları genel olarak üç tipte incelenebilir. Bunlar rijit, esnek ve kompozit kaplamalardır. Rijit kaplamalar taban zemini yani sıkıştırılmış zemin üzerine yerleştirilen genelde bir temel ile desteklenen beton plaklardan meydana gelir. Esnek kaplamalar ise granüler (kohezyonsuz zemin) bir alt temel/temel takası üzerine serilen, taban zemini ile desteklenmiş asfalt betonundan ibarettir (Resim 2.1). Kompozit kaplamaların ise zamanla bozulan beton kaplamaların onarımında asfalt kullanımıyla ortaya çıktığı ifade edilmiştir [3,13].



Resim 2.1. Tipik bir esnek kaplamayı oluşturan tabakalar

2.2. Esnek Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler

Asfalt betonu bitüm, agrega ve fillerin yüksek sıcaklıklarda belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bir karışımdır. Bitümlü sıcak karışım dediğimiz bu karışım finişer ile yol temeli yüzeyine serilip silindirler ile sıkıştırılarak esnek kaplamalar inşa edilmektedir. Esnek kaplamalarda kullanılan bu malzemelere kısaca aşağıda değinilmiştir.

2.2.1. Bitümlü bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar farklı moleküler ağırlıklara sahip hidrokarbonlardan oluşan organik malzemelerdir [13]. Bitüm binlerce yıl önce özellikle orta doğuda var olan petrol rezervleri nedeniyle bu bölgedeki insanlar tarafından biliniyor ve kullanılıyordu. O zamanlarda kullanım amacı genellikle su yalıtımdı ve yaklaşık 5000 yıl boyunca bu amaçla kullanılmıştır. Bitümü yol kaplamalarında kullanmak için ilk girişimler ise ancak 19. yüzyılın ortalarında Avrupa’da başlamıştır [14].

Asfalt kelimesi Avrupa’da genellikle bitüm, agrega ve diğer malzemelerden oluşan karışımlar için kullanılmaktayken, Kuzey Amerika’da asfalt sözcüğü bitüm ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır [14]. Ülkemizde her iki kullanım da yaygın olduğundan kavram karmaşasını önlemek amacıyla agrega ve bitümden oluşan karışımdan asfalt betonu, asfalt karışımı veya bitümlü sıcak karışım olarak bahsedilmiştir. Bağlayıcıdan ise bitüm, asfalt veya asfalt çimentosu olarak bahsedilmiştir.

Farklı alanlarda kullanılan bitümlü bağlayıcıların elde edildiği kaynaklar 5 başlıkta ifade edilmiştir [14].

Göl asfaltı

Doğada göl halinde bulunurlar. Dünyadaki en büyük bu tipteki rezerv Orta Amerika’da Karayip Adalarında bulunan Trinand ve Bermuda’da bulunan asfalt gölleridir [3,15,16].

Kaya asfaltı

Porozitesi yüksek kayaların bünyesinde absorbe ettiği petrolün zamanla uçucu maddelerinin kaybı ile meydana gelir. Bu tip kayalarda %20’ye kadar asfalt bulunabilir [3,17,18].

Gilsonit

Amerika’nın Utah eyaletinde fazlaca bulunan bir doğal asfalt çeşididir. Penetrasyonu çok düşük (sert) yumuşama noktası ise çok yüksektir (115° C ila 190° C arası). Elde edilmesi fazla işçilik gerektirdiğinden, gilsonit nispeten pahalı bir asfalttır. Bu yüzden kullanım

alanları kısıtlıdır. Yine de bitümün penetrasyon değerini değiştirmek için kullanılır [14,19,20].

Katran

Kömürün karbonizasyonu (Karbon içeriğini yükseltmek amacıyla oksijensiz ortamda ısıtma) veya damıtılması ile elde edilen sıvı veya yarı katı asfalt çeşitleridir [3,14,21].

Rafine asfalt

Ham petrolün rafineride damıtılmasıyla elde edilmektedir. Ülkemizde ve dünyada en çok kullanılan bitümlü bağlayıcı türüdür [14].

2.2.2. Agregalar

Agregalar, doğal kayalardan elde edilebildiği gibi diğer malzemelerin üretim sürecinin yan ürünleri de (çelik üretiminin bir yan ürünü olan cüruf vb.) [22] agrega olarak kullanılabilir. Agregalar karayolu inşasında kullanılan malzemelerin önemli bir bileşenidir. Portland çimento betonunun ve bitümlü sıcak karışımın ağırlıkça %70-%85'lik kısmını agrega oluşturur. Agreganın fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri hem esnek kaplamalarda hem de rijit kaplamalarda önemli bir rol oynar [13].

Agregaların sınıflandırma kriterleri genel olarak aşağıda belirtilmiştir;

Mineralojik özellikler

Agregalar genel olarak doğal ve yapay olarak ikiye ayrılırlar. Doğal olan agregalar dere malzemesi, volkanik kayalar, tortul kayalar ve metaformik kayalar olarak sınıflandırılabilir. Doğal agregalar genellikle konkasörlerde kırılarak kırmataş olarak kullanılmaktadır. Yapay agregalar ise yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir [3,23–25].

Boyut sınıflandırması

Agregalar dane boyutlarına göre kaba, ince ve filler olarak sınıflandırılır. Kaba agregalar No.4 (4,76 mm) elek üstünde kalan, ince agrega No.4 elekten geçen ve No.200 (0,075 mm) elek üstünde kalan filler ise No.200 elekten geçen boyuttaki agregalardır [3].

Gradasyon sınıflandırması

Agrega gradasyonu bir agrega karışımının içerdiği her dane boyutunun yüzdesini verir. Genelde standart elekler üzerinde kalan agrega miktarlarının agrega karışımına oranı ile ifade edilir. Agreganın gradasyonu kaplama performansı ile doğrudan ilişkilidir. Gradasyon sınıfları kesikli gradasyon, yoğun-sürekli gradasyon, boşluklu-sürekli gradasyon ve tek-boyutlu gradasyon olarak ifade edilmektedir [3,13,26].

Biçim sınıflandırması

Agrega danelerinin biçimleri yol kaplamasının performansına etki etmektedir. Agreganın daneleri küresel, kübik, yassı ve ince-uzun gibi şekillerde olabilir. Agreganın danelerinin şekli yassılık ve ince-uzunluk indeksleri kullanılarak ifade edilir [3,27].

Yüzey yapısı sınıflandırması

Agregaların yüzey yapısı, yüzeylerinin pürüzlülük durumuna göre bir sınıflandırmadır. Pürüzsüz yüzeyli (cilalı) agregalar düşük kayma mukavemeti, zayıf adezyon ve düşük kilitlenme özelliği nedeniyle betonun işlenebilirliğini artırması yönünde avantajlıdır fakat bağlayıcılı veya bağlayıcısız üst yapı tabakalarında cilalı agrega kullanmaktan kaçınılması gerekir [3,28].

Porozite sınıflandırması

Agreganın danelerinin sahip olduğu boşluk oranına göre yapılan sınıflandırmadır. Görünür porozite yani su emme kapasitesi, bitümün emilmesini de etkilediğinden önemli bir malzeme özelliğidir [3,29].

Yüzey alanı ve boşluk sınıflandırması

Agrega danelerinin toplam yüzey alanı ve agregada daneleri arasındaki boşluk oranı bağlayıcı veya bağlayıcısız karışımların bütün özelliklerine doğrudan etki eden önemli faktörlerdir. Agregada karışımlarını oluştururken kullanılan seçilecek olan gradasyon ile, optimum yüzey alanı ve boşluk oranını elde etmek mümkündür [3].

Özgül ağırlık sınıflandırması

Karışım hesaplarının yapılabilmesi için karışımda kullanılan agreganın özgül ağırlığı bilinmelidir. Zahiri (görünür) özgül ağırlık, kuru özgül ağırlık ve doymun-kuru yüzey özgül ağırlık olmak üzere üç çeşit özgül ağırlık kullanılmaktadır [3,30].

2.3. Esnek Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar

Esnek kaplamalar servise açıldıktan sonra zamanla bozulmaya başlamaktadır. Bozulmaların başlıca nedenleri trafik yükleri, iklim ve çevre etkisi, yapım ve tasarım hataları ve malzeme hataları olarak sayılabilir. Meydana gelen bozulmalar deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamlar olmak üzere üç başlıkta sınıflandırılabilir.

2.3.1. Deformasyonlar

Deformasyonlar yolun inşasından bir süre sonra görülen yapısal bozukluklardır. Bu bozulmalar kalıcı şekil değiştirmeler olup yol ekseni boyunca veya yolun belirli kısımlarında görülmektedir. Sürüş konforunu ve emniyetini olumsuz etkilediğinden, onarım yapılması gerekir [3].

Aşağıda bazı deformasyon tiplerine değinilmiştir.

Teker izleri

Özellikle ağır taşıt trafiğinin olduğu yollarda çok sık karşılaşılr. Bu tip bozulmalar hızlı araçlar için tehlikelidir. Ayrıca yüzey suyunun drenajını olumsuz yönde etkiler ve kışın kusurlu bölgelerde buzlanmalara sebep olur [31].

Üniform olmayan yüzey bozuklukları

Bu tip bozulmalar zemin ve temel tabakalarındaki oturmalarından kaynaklanabilir[3].

Bölgesel çökme (oturmalar)

Yetersiz sıkıştırma ve zemin problemlerinden kaynaklanır. Yüzey drenajı problemlerine sebep olur [3].

Ondülasyonlar (dalgalanmalar veya yığılmalar)

Bu tip bozulmalar yaya geçitleri, otobüs durakları ve kavşaklar gibi duraklamaların fazla olduğu bölgelerde görülür [32].



Resim 2.2. Bir kavşakta meydana gelen ondülasyon [33]

Kabarmalar

Zeminin kabarması sonucu oluşan bozulmalardır [34].

Lastik deseni

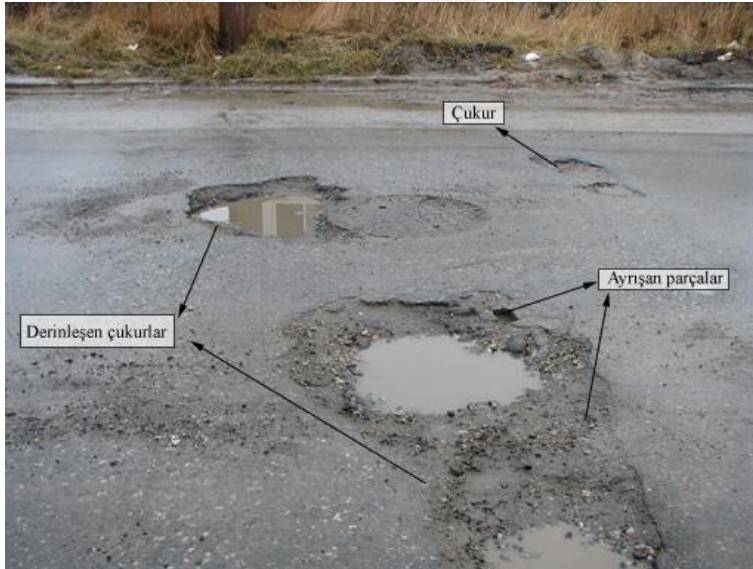
Bu tip bozulmalar ağır taşıtların lastik yüzeylerinde bulunan desenin kaplama yüzeyinde iz bırakması şeklinde oluşur. Hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde, genelde tekerlek izi sorunuyla birlikte görülür [35].

2.3.2. Ayrışmalar

Bu tip bozulmalar aşınma tabakasının zamanla küçük parçalar halinde ayrışarak kopması ve kaplama yüzeyinden ayrılması şeklinde görülür. Bu kusurlar onarılmazsa zamanla büyüyüp derinleşerek daha ciddi bozulmalara yol açar [3].

Çukurlar

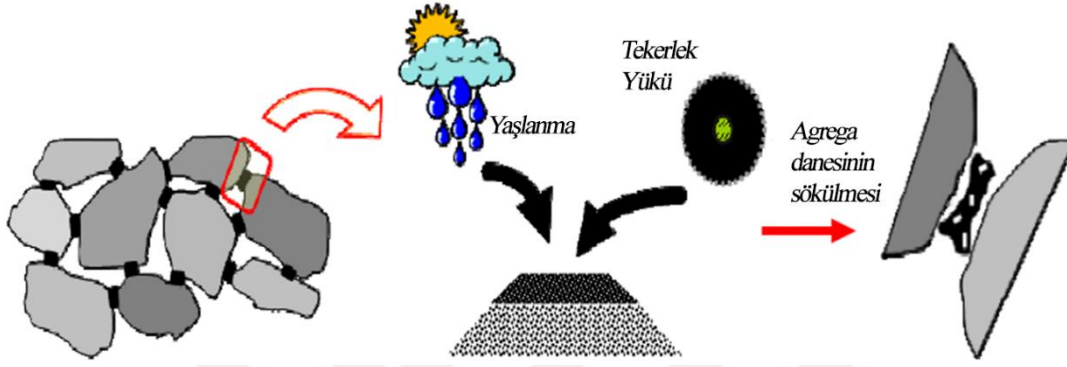
Çanak şeklinde çukurlar olarak görülür ve zamanla ayrışan parçaların artmasıyla derinleşir [36].



Resim 2.3. Ayrışma kusurlarından olan çukurlar [37]

Sökülmeler

Trafik yükleri ve çevresel faktörler nedeniyle aşınma tabakasındaki agregaların zamanla gevşeyerek yerinden sökülmesiyle gerçekleşir. Bu tip bozulmalar başta yavaş ilerler ancak bir agrega danesi söküldükten sonra domino etkisiyle hızla devam eder [38].



Şekil 2.1. Agregaların gevşeyerek sökülme problemine yol açması [38]

Kaygan yüzeyler

Bu bozulmalara agrega soyulması, agrega cilalanması ve asfaltın kusması neden olur. Agreganın soyulması ve cilalanması kullanılan agreganın mekanik özellikleri ile ilgilidir. Kusma problemi ise genelde yeterli boşluk oranına sahip olmayan asfalt karışımının özellikle sıcak yaz aylarında içindeki bitümün genişleyerek kaplama yüzeyine yayılması şeklinde görülür. Sürtünme direncini azalttığı için, bu tür bozulmalar sürüş güvenliğini olumsuz etkiler [39,40].



Resim 2.4. Asfalt kaplamada bitüm kusması [41]

2.3.3. Çatlamlar

Timsah sırtı çatlaklar (Yorulma ve stabilite çatlakları)

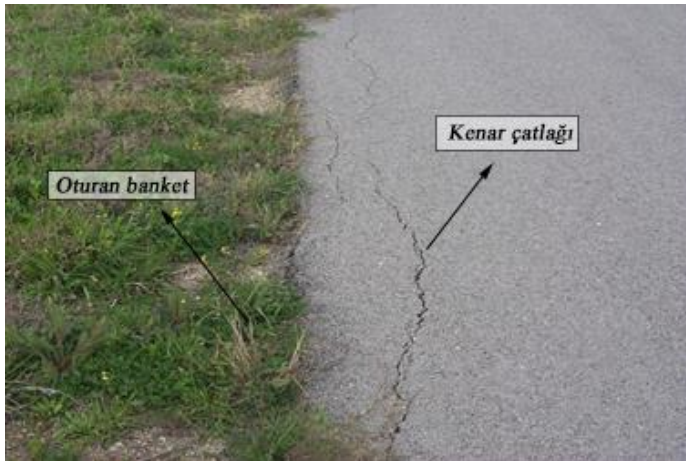
Ağır trafik yüklerinin tekerrürü sonucu kaplamanın yorulma mukavemetinin aşılması sonucu oluşurlar. Oluşan çatlaklar timsah sırtına benzediği için bu adı almıştır [18,42].



Resim 2.5. Timsah sırtı çatlaklar [43]

Kenar çatlakları

Bu tip çatlaklar kaplama ile banket arasında görülür. Genel olarak banketin yanal desteğinin yetersiz olması, banketlerde oturma gibi nedenlerden oluşurlar [44].



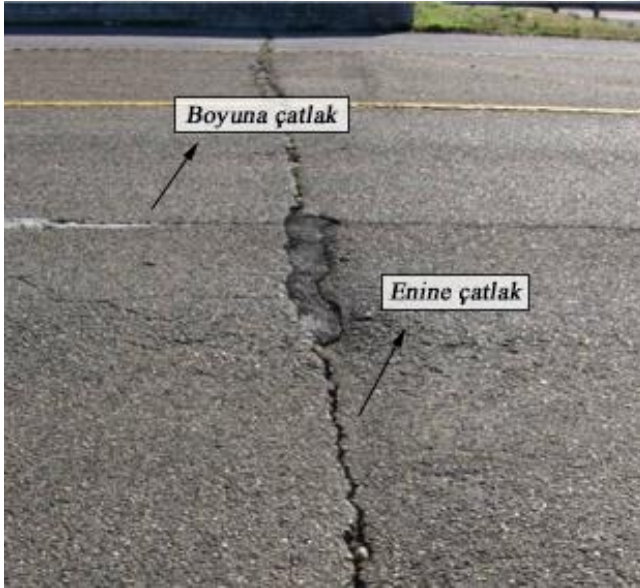
Resim 2.6. Kenar çatlakları [45]

Boyuna çatlaklar

Bu çatlaklar yol eksine paralel olarak uzun bir hat boyunca görülür. Genellikle yüklemeler nedeniyle oluşmazlar. Kötü yapılmış inşaat derzleri, termal büzölmeler, yansıma çatlakları ve taban zeminindeki oturmalar nedeniyle oluşurlar [44].

Enine çatlaklar

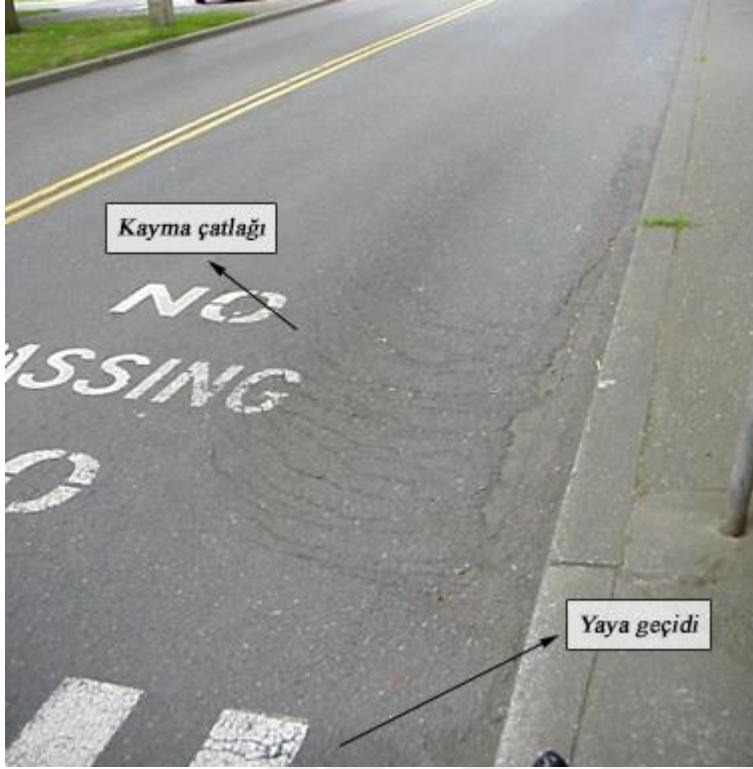
Bu tip çatlaklar yol eksenine neredeyse dik açılarda görülür. Genellikle sıcaklığın düşmesiyle meydana gelen termal büzölmelerden kaynaklanır [44].



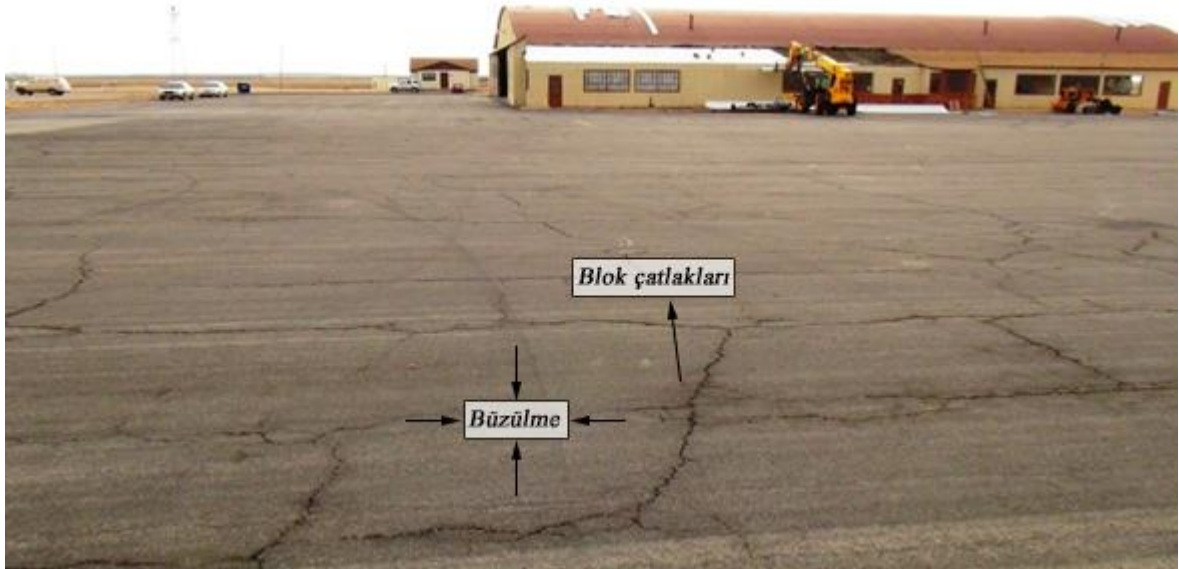
Resim 2.7. Enine ve boyuna çatlaklar [46]

Kayma (ötelenme) çatlakları

Bu tip çatlaklar, taşıt tekerleklerinin yol kaplamasına uyguladıkları yatay kuvvetlerin etkisi ile oluşur. Genellikle frenleme kuvvetinin yüksek olduğu otobüs durağı, kavşaklar gibi bölgelerde sık görülür [44].



Resim 2.8. Bir yaya geçidinde görülen kayma (ötelenme) çatlağı [47]



Resim 2.9. Büzülme (blok) çatlakları [45]

Büzülme (blok) çatlakları

Bu tip çatlaklar genelde büyük boyutlu bloklar halinde görülürler. Zeminde, temelde veya bitümlü tabakada meydana gelen hacim değişiklikleri nedeniyle meydana gelirler. Genelde düşük hacimli yollarda daha fazla görülür [44].

Yansıma çatlakları

Bozulmuş bir esnek veya rijit kaplama üzerine takviye tabakası olarak bir esnek kaplama inşa edildiğinde, alt tabakadaki çatlakların yanal genişleme ve büzülme hareketi sonucu üst tabakada düşey hareket meydana gelmektedir. Bu hareket sonucunda yansıma çatlakları meydana gelmektedir. Yani alt tabakadaki çatlaklar üst tabakaya yansımış olmaktadır. Bu çatlaklar alt tabakadan üst tabakaya doğru yaklaşık 45° eğimle yayılmaktadır [3,48].



Resim 2.10. Esnek kaplama altında yer alan rijit kaplamanın yansıma çatlaklarına sebep olduğu görülmektedir [45]

2.4. Kendi Kendine İyileşme Kavramı

Kendini kendine iyileşme kavramı aslında pek çoğumuzun yakından tanıdığı bir kavramdır. İnsanların ve diğer canlıların yaralarının kendi kendine iyileşmesi veya kırılan kemiklerin kendi kendini tamir etmesi bu olgunun doğadaki örnekleridir. Kendi kendine iyileşen

malzemeler ise tıpkı canlı bir dokudaki gibi, hasar aldığıında kendini yenileyerek ilk haline dönebilen malzemelerdir.

Başka bir deyişle kendi kendine iyileşme bir malzemenin dış müdahale olmadan meydana gelen hasarları onarabilme kabiliyetine denir. Ancak birçok kendi kendine iyileşen malzeme dış bir müdahale olmadan fonksiyonlarını gerçekleştirememektedir. Bu yüzden kendi kendine iyileşme otonom (dış müdahale olmadan iyileşme) ve otonom olmayan (dış müdahale gerektiren) olarak iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır [49].

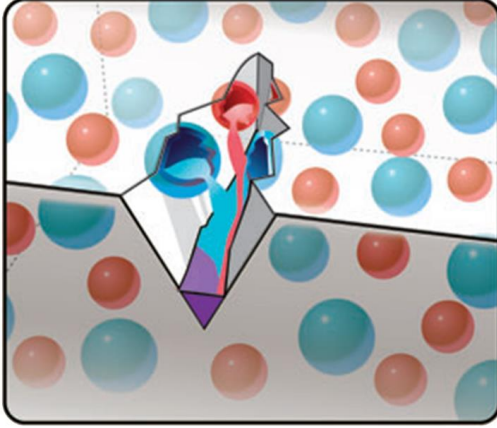
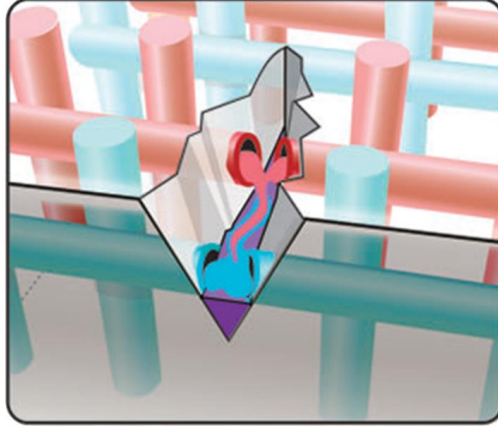
Kendi kendine iyileşen malzemelerde kullanılan bazı metotlar aşağıda verilmiştir;

2.4.1. Mikrokapsül yöntemi

Bu yöntemde bir sert bir kabuktan oluşan kapsül içine yenileyici madde gaz ya da sıvı halde koyulur ve bu kapsüller kendi kendine iyileşmesi tasarlanan malzemenin içine karıştırılır. Malzeme hasar aldığıında kapsül yırtılarak açılır ve yenileyici madde çatlak içine akarak çatlağı kapatır [49].

2.4.2. Mikrovasküler sistem

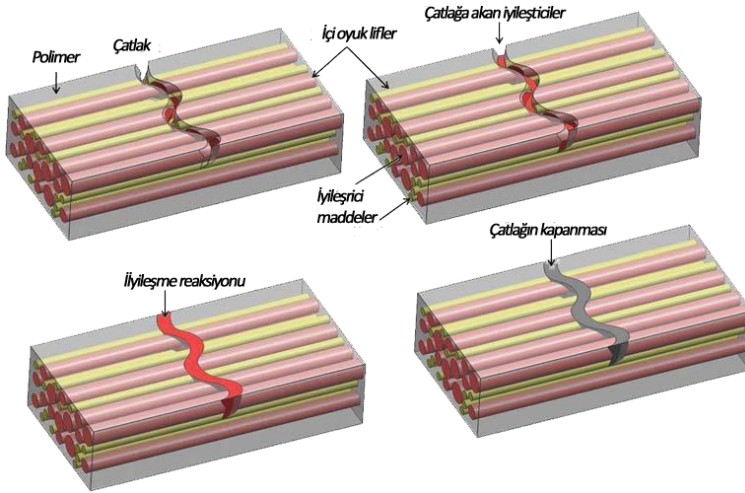
Kapsül yönteminin sağladığı iyileştirici madde miktarının sınırlı kalması nedeniyle ortaya çıkmış bir sistemdir. Hayvan ve bitkilerde görülen vasküler sistemle benzer şekilde çalışır. Canlılardaki gibi hasar gören bölge, kan damarlarına benzeyen kanallarla taşınan yenileyici yardımıyla iyileşir [50,51].

Mikrokapsül sistemi*Mikrovasküler sistem*

Şekil 2.2. Mikrokapsül ve mikrovasküler iyileşme sistemleri [52]

2.4.3. İçi oyuk lif yöntemi

İçi oyuk, boru şeklinde liflerin içine yerleştirilen iyileşme ajanları, malzeme hasar aldığı anda çatlığa akarak iyileşmeyi sağlar. Mikrokapsül yönteminde kapsül içinde bulunan iyileştirici ajanların sınırlı hacimde olması ve bu iyileştirici maddelerin tamamı tükendiğinde bunun anlaşılması nedeniyle, oyuk lif yöntemi geliştirilmiştir[49].



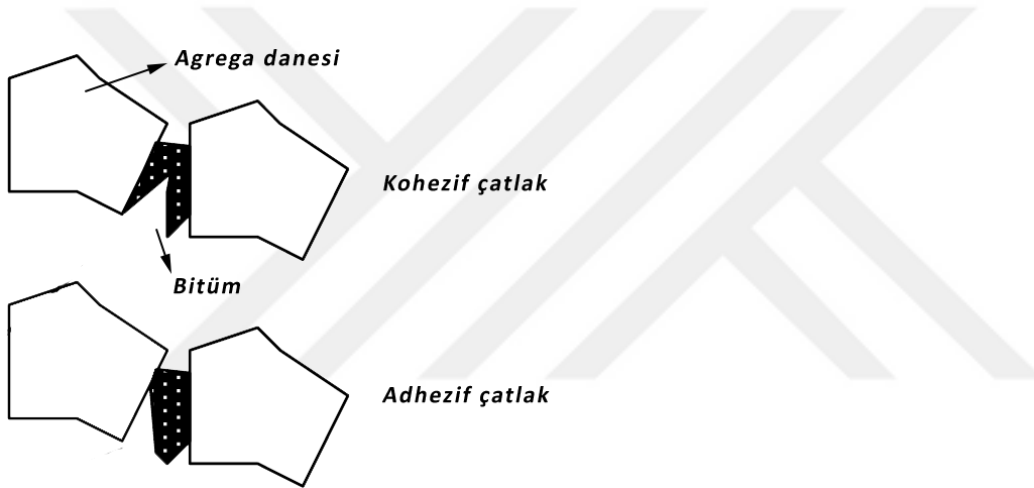
Şekil 2.3. İçi oyuk lifler ile kendiliğinden iyileşme[49]

2.5. Asfaltın Kendi Kendine İyileşme Mekanizması

Asfalt yüzeyindeki mikro çatlakların zamanla kendi kendine iyileşebildiği bilinen bir gerçektir. Bazin ve Saunier 1967’de ilk defa asfaltın yüke maruz kaldıktan sonra,

dinlenmesine izin verildiğinde hasarların iyileşebildiğini ve sıcaklığın bunda büyük bir rol oynadığını bulmuşlardır. Böylece asfaltta kendi kendine iyileşme kavramı ortaya çıkmıştır [4].

Asfalt betonunda farklı ölçeklerde iyileşme görülebilmektedir. Qiu makro düzeyde ve bölgesel düzeyde gerçekleşen iyileşmeyi şöyle açıklamıştır. Makro düzeyde görülen iyileşmede mikro çatlaklar, iki dingil yükü arasındaki dinlenme süresince veya yazın maruz kaldığı yüksek sıcaklık etkisiyle iyileşebilir. Bölgesel düzeyde ise, asfalt karışımının kohezif veya adhezif bölgelerinde görülebilir. İyileşme bitümün içinde olduğunda kohezif, agrega-bitüm yüzeyleri arasında olduğunda adhezif olarak nitelendirilebilir (Şekil 2.4) [53].



Şekil 2.4. Bölgesel düzeydeki kohezif ve adhezif çatlak tipleri

Lytton ve çalışma arkadaşları asfalttaki iyileşme mekanizmasını açıklarken, iyileşmenin malzeme özelliklerinin yenilenmesi ve bitümde veya asfalt karışımındaki çatlamların azalması anlamına geldiğini ayrıca bunun iki yolla açıklanabileceğini bildirmişlerdir; fizikokimyasal yol ve mekanik yol [2].

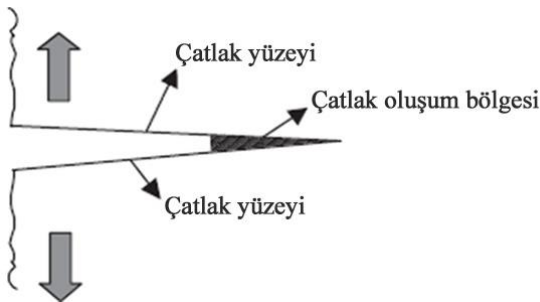
İyileşme fizikokimyasal olarak açıklanırsa, yorulma kaynaklı mikro hasarları yavaşlatacak şekilde asfaltın kimyasal yapısının kendini tamir etmesi olayıdır. Asfaltın veya asfalt karışımının kompozisyonuyla ve fizikokimyasal yapısıyla alakalıdır [2].

Asfaltın iyileşmesi mekanik olarak ele alındığında, Williams ve çalışma arkadaşları, mikro hasarlardaki iyileşmenin gerçekten var olduğunu ve ölçülebilir olduğunu, ayrıca bunun kaplamanın performansını önemli oranda artırdığını bulmuşlardır. Çalışmalarında gerilme dalgası deneyi (kaplamaya uygulanan darbelere kaplamanın verdiği tepkiyi ölçerek

gerçekleştirilen hasarsız bir deney metodu) kullanarak mikro çatlakların büyümesi ölçülmüş ve asfalt kaplamada meydana gelen iyileşme sahada incelenmiştir. Sahada yapılan gözlemlere göre dinlenme zamanlarında asfalt kaplamada iyileşme meydana geldiğini bulmuşlar ve dinlenme zamanlarını artırmanın kaplamanın servis ömrünü artıracığını önermişlerdir [54].

Asfaltın iyileşme mekanizması asfaltta meydana gelen moleküler etkileşimlerle de açıklanabilmektedir. Kim ve çalışma arkadaşları, farklı asfalt karışımlarında farklı iyileşme oranları olduğunu ve bunun bağlayıcıların moleküler yapısındaki farklılıktan kaynaklandığını bulmuşlardır [55].

2008'de Bhasin ve çalışma arkadaşları bir çatlaktaki moleküler düzeydeki iyileşmeyi Schapery'nin terminolojini kullanarak açıklamışlardır. Bhasin ve arkadaşarı, asfalt yüzeyinde iyileşmesi beklenen bir çatlağın, çatlak oluşum bölgesi ve çatlak olarak iki bölümden oluştuğunu ifade etmiştir. Çatlak oluşum bölgesi birçok nano veya mikro çatlaktan oluşur. Bu nano çatlaklar dış yükün etkisi ile uzayıp kaynaşarak daha büyük olan asıl çatlığa dönüşme eğilimindedir. Asıl çatlak ile çatlak oluşum bölgesinin en temel farkı ise asıl çatlak dış yük taşıyamazken, çatlak oluşum bölgesinin yük taşıyabilmesidir[56–58].



Şekil 2.5. Çatlak ve çatlak oluşum bölgesi [57]

Dış yük kaldırıldığında ilk önce hacimce viskoelastik geri dönme gerçekleşir. İkinci aşamada ise çatlak oluşum bölgesinde iyileşme başlar. Viskoelastik geri dönme malzemeye hasar vermeyecek kadar küçük kuvvetlerde bile, her zaman gerçekleşirken, iyileşme yalnız yüksek gerilme veya şekil değiştirme meydana getirebilecek, malzemeye zarar verecek kadar büyük dış yükler uygulandıktan sonra gözlenebilir. Viskoelastik geri dönme malzemenin aynı yüzeydeki molekülleri arasında bir yeniden düzenlenmedir. İyileşme ise, bir nano çatlağın

yüzeyleri arasında moleküllerin difüzyonu ile gerçekleşen, malzemenin ilk konumuna dönmeye çalışmasıdır [57,58].

İyileşmenin üç adımını Wool ve O'Connor aşağıdaki gibi açıklamıştır [59];

- 1) Bir nano çatlakın iki yüzünün de ıslanması.
- 2) Bir yüzden diğerine moleküllerin difüzyonu.
- 3) Difüze olan moleküllerin rastgele dağılarak malzemeyi ilk dayanımına ulaştırmaya çalışması.

Bu iyileşme sürecinin uygulanan yükler kalktığında başlayıp tüm mikro çatlaklar kapanana kadar durmadan devam edeceği ifade edilmiştir.

2.6. Asfaltın Betonunun İyileşmesini Etkileyen Faktörler

Asfalt betonunun iyileşmesini etkileyen faktörler üç başlıkta incelenebilir; bitümün özellikleri, karışımın özellikleri ve çevre etkisi.

2.6.1. Bitümün özelliklerinden kaynaklanan faktörler

Asfalt karışımında kullanılan bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, iyileşmeyi etkilediğini gösteren önemli bilimsel çalışmalar literatürde mevcuttur. Kullanılan bitümün tipi, viskoelastik özellikleri, yaşlanma durumu, yüzey enerjisi, difüzyon özellikleri, modifiye durumu gibi karakteristikleri iyileşmeyi etkileyen faktörler arasında sayılabilir.

Bitümün tipi

Gómez-Meijide ve çalışma arkadaşları çalışmalarında asfalt karışımında kullanılan bitümün, asfaltın indüksiyon ısıtması ile kendi kendine iyileşmesine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında beş farklı bitüm tipi kullanarak, bitümün termal genleşme, rijitlik ve viskozite özellikleri ile kendi kendine iyileşme arasında lineer olmayan anlamlı bir ilişki olabileceğini bildirmişlerdir [60].

Viskoelastik özellikleri

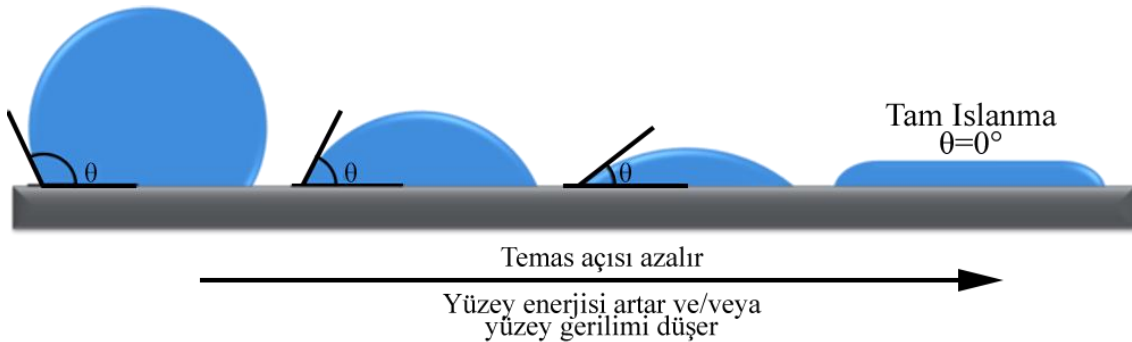
Bitüm viskoelastik, yani düşük sıcaklıklarda elastik yüksek sıcaklıklarda viskoz bir sıvı gibi davranan bir malzemedir. Kim ve çalışma arkadaşları çalışmalarında üç farklı bitümdeki çatlakları taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelemişler ve kullanılan bağlayıcının viskozitesinin asfaltın iyileşme hızını etkilediğini bildirmişlerdir [61].

Yaşlanma (oksidasyon) durumu

Tang ve çalışma arkadaşları, bitümün yaşlanmasının asfaltın kendi kendine iyileşmesi için gerekli olan optimum sıcaklığı artırdığını bildirmişlerdir [62].

Yüzey enerjisi ve temas açısı

Bir sıvı malzemeyi oluşturan moleküller birbirlerine çekme kuvveti uygular. Sıvının iç kısmındaki moleküller her yönde çekilirken, yüzeydeki moleküller yalnız yüzeyin altındaki moleküller tarafından çekilir. Bu yüzden yüzeydeki tek molekül sırası sıkışarak zar şeklinde bir yapı meydana getirir. Malzemelerin yüzeyinde moleküller arası bağlardan dolayı ortaya çıkan bu etkiye, yüzey gerilimi denir. Yüzey enerjisi ise sıvının yüzey alanını 1 cm^2 artırmak için gerekli olan enerjiye denir. Katı maddelerde yüzey enerjisi kavramını kullanmak daha doğrudur. Bir katı yüzeyle, bir sıvının oluşturduğu yüzeye ise temas açısı denmektedir. Temas açısı ve yüzey enerjisi bir sıvının katıyı ne kadar ıslatabileceğinin bir ölçüsüdür [63]. Hefer ve çalışma arkadaşları asfaltın yüzey enerjisini hesaplayabilmek için temas açısını kullanmışlardır [64].



Şekil 2.6. Temas açısı ile ıslatma arasındaki ilişki [65]

Bitümün sıcaklığı ile yüzey gerilimi arasında ters bir orantı olduğu önceki çalışmalardan bilinmektedir [66]. Yüzey enerjisi ise sıcaklığın artmasıyla, artmaktadır. Araştırmacılar bitümün yüzey enerjisi arttıkça ıslanmanın arttığını, dolayısıyla bunun da iyileşmeyi artıracığını bildirmişlerdir [57,58,67].

Moleküler özellikleri

Araştırmacılar, asfaltın kimyasal kompozisyonunun ve moleküler yapısının ve difüzyon özelliklerinin asfaltın kendi kendine iyileşme yeteneğini etkilediğini bildirmişlerdir [55,68]. Bhasin ve çalışma arkadaşları, asfaltın moleküler yapısının ve kendi kendine difüzyon kabiliyetinin, kendi kendine iyileşme üzerindeki etkilerini araştırmak için moleküler dinamik simülasyonları (matematiksel ve istatistiksel veriler kullanan bir bilgisayar simülasyonu) kullanmışlardır. Moleküllerin zincir uzunluklarının ve dallanmalarının yüzeyler arası kendi kendine difüzyon kabiliyetini etkilediği, dolayısıyla kendi kendine iyileşme üzerinde bir etkisi olduğunu bildirmişlerdir [68].

Modifiye durumu

Bazı araştırmacılar polimerler modifikasyonunun, asfaltın iyileşmesine küçük hatta negatif bir etkisi olduğunu bildirmişlerdir [6]. İyonomerler, nano-partiküller, süpermoleküler kauçuklar gibi bazı yenilikçi modifikasyonların kendini iyileştirme için yararlı olmadığı ve normal yumuşak bir bitümün en iyi iyileşmeyi gösterdiği bildirilmiştir [53]. Ancak Canestrari ve çalışma arkadaşları SBS polimerin modifiyer olarak kullanıldığında, asfaltın kendinden iyileşme potansiyelini artırdığını bildirmişlerdir [69].

Termal genişleme etkisi

Grossegger ve Garcia, yakın zaman önce yapmış oldukları çalışmada bitümün termal genişmesinin, asfaltın kendi kendine iyileşmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıcaklığın artmasıyla meydana gelen termal genişlemenin asfaltın kendi kendine iyileşme performansını olumlu etkilediğini bildirmişlerdir [67].

2.6.2. Asfalt karışımından kaynaklanan faktörler

Asfalt karışımında kullanılan agrega tipi, agrega gradasyonu, boşluk oranı gibi faktörler iyileşmeyi etkilemektedir.

Agreganın yapısal özellikleri

Kim ve Roque yapmış oldukları çalışmada agreganın birbirine kenetlenmesi, film kalınlığı, mineral agrega içindeki boşluk oranı gibi yapısal özelliklerinin kendi kendine iyileşmeyi etkilediğini bildirmişlerdir [70].

Agrega gradasyonu

Abo-Qudais ve Suleiman yapmış oldukları çalışmada maksimum dane boyutu olarak 12,5 mm, 19 mm ve 25 mm şeklinde üç farklı tipte agrega gradasyonu kullanmışlardır. Maksimum dane boyutu 25 mm olan karışımda en fazla iyileşme görüldüğünü, ondan sonra ise 19 mm olan karışımdan görüldüğünü bildirmişlerdir. Maksimum dane boyutunun 25 mm olduğu karışımda agregaların yüzey alanının daha az olduğu için ve bunun sonucunda da asfalt film tabakası daha kalın olduğu için iyileşmenin daha fazla olabileceğini ifade etmişlerdir.

Asfalt karışımındaki hava boşluk oranı

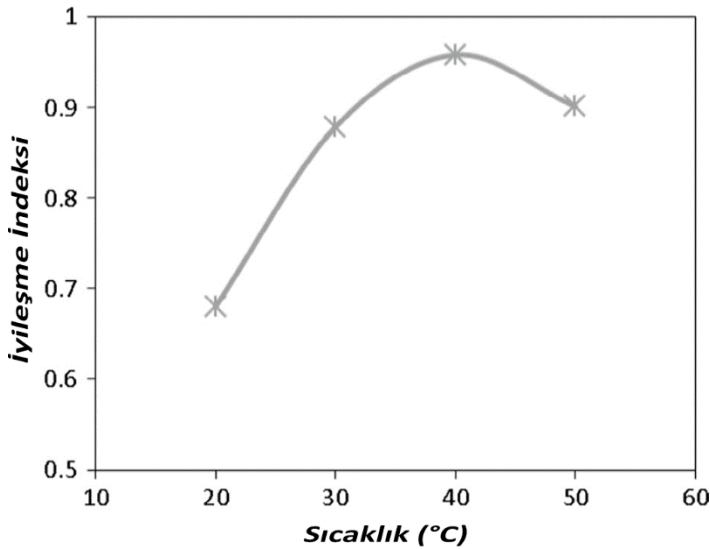
Gomez ve çalışma arkadaşları yapmış oldukları çalışmada asfalt karışımındaki boşluk oranının, kendi kendine iyileşmeye olan etkisini incelemişlerdir. Yoğunluğu fazla olan karışımın, hava boşluk oranı fazla olan karışımdan her zaman daha fazla iyileşme seviyesine ulaşabildiğini bildirmişlerdir. Yoğunluğu daha fazla olan karışımda, hasarın oluşma aşamasında daha çok agrega danelerinin kırılması şeklinde çatlak oluştuğu için iyileşmenin daha zor olduğunu çünkü kırılan bir agrega danesinin eski dayanımına ulaşmasının daha zor olduğunu açıklamışlardır [71].

2.6.3. Dış etkenler

Başta sıcaklık ve dinlenme süresi olmak üzere, yükleme geçmişi, hasar boyutu, nem gibi dış etkenler asfaltın iyileşmesini etkilemektedir.

Sıcaklık

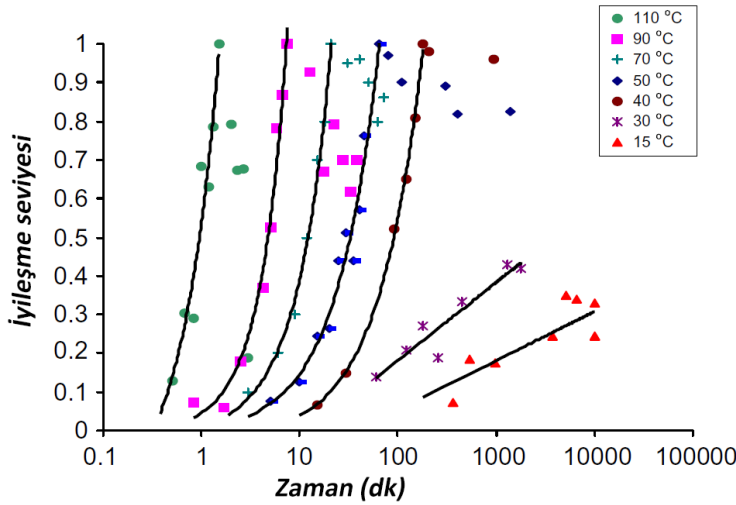
Asfaltın iyileşme yeteneğini etkileyen dış faktörlerin en önemlisi sıcaklıktır. Bugüne kadar yapılan birçok çalışmada, sıcaklık artışının asfaltın iyileşmesini hızlandırdığı (Şekil 2.7) ifade edilmiştir [4,72–74]. Bhasin ve çalışma arkadaşlarının yayınladığı bir raporda, ısıtmanın asfaltın yorulma ömrünü %50 oranında uzatabileceği bildirilmiştir [75]. Tang ve çalışma arkadaşları ise bitümün optimum iyileşme sıcaklığını bulmak için dinamik kesme reometresi kullanarak, bitümün viskozite-akış özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça asfaltın iyileşme indeksinin de arttığı, yumuşama noktasından sonra ise azaldığını bulmuşlar ve asfaltın yumuşama noktasının iyileşme için optimum sıcaklık olduğunu ifade etmişlerdir [62]. Bir başka çalışmada ise bitümün optimum iyileşme sıcaklığının bitümün türüne göre değişmekle birlikte 30 °C ila 70 °C arasında olabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 2.7. Asfalt betonunda iyileşme ve sıcaklık ilişkisi [62]

Dinlenme süresi

Dinlenme süresinin, asfaltın kendi kendine iyileşmesini önemli derecede etkilediği, hasar gören asfalt betonunun dinlenmesine izin verildiğinde iyileşebileceği bir çok araştırmacı tarafından ifade edilmiştir [4,54,72,73,76,77]. Garcia, asfaltın farklı sıcaklıklarda iyileşmesi için gerekli dinlenme süresini, Arrhenius eşitliğini kullanarak matematiksel olarak hesaplamıştır [78].



Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda iyileşme seviyesi ve zaman ilişkisi [78]

Yükleme geçmişi ve hasar boyutu

Bazı araştırmacılar hasar boyutunun asfaltın betonunun kendi kendine iyileşmesinde önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir [53,77]. Hasar boyutu küçük olduğunda (mikro çatlaklar gibi) asfaltta kendi kendine iyileşmenin fazla olduğu ancak kopma noktasını geçtiğinde minimum düzeyde iyileşme olduğu ifade edilmiştir. Büyük boyuttaki çatlaklarda ise iyileşmenin çok zor olduğu bildirilmiştir [53].

Nem

Asfaltın kendi kendine iyileşmesine çevresel nemin etkisini inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Grossegger ve Garcia son zamanlarda bu konuda bir çalışma yapmıştır. Çalışmalarında bir su içinde numune, suda bekletilip çıkarılmış (suya doymuş) bir numune ve kuru bir numuneyi ele alarak iyileşme durumlarını incelemişlerdir. Su içindeki numunede bir iyileşme tespit

edilmemiştir. Bunun nedenini, su ile bitümün benzer özgül ağırlığa sahip olması ve bu yüzden suyun bitümün çatlaklara girmesini önlemesi olarak düşünmüşlerdir. Sudan çıkarılıp kurmaya bırakılan numunede ise, buharlaşmanın ve numune içinde kalan suyun yarattığı hidrostatik basıncın iyileşmeyi artırdığını tespit etmişlerdir [79].

2.7. İndüksiyon ve Mikrodalga Isıtması Yöntemleri

Asfaltın kendi kendine iyileşebilme kapasitesi oldukça karışık bir olgudur ve iyileştirme süresi, iyileştirme sıcaklığı, çatlağın durumu, modifiyer malzeme kullanımı gibi değişik etkenlere bağlıdır [80]. Bu etkenlerin içinde iyileşme sıcaklığı ön plana çıkmaktadır. Asfalt betonunun sıcaklığı arttırıldığında iyileşme oranının da arttığı geçmiş araştırmalarda rapor edilmiştir [76,81]. 2011’de Garcia asfalt karışımının sıcaklığını artırmanın, iyileşme hızını artırdığını ve iyileşmenin sağlanması için belirli bir sıcaklık ve zamanın olduğunu bildirmiştir [78]. Hatta birçok araştırmacı, kışın görülen çatlakların yazın ortadan kaybolduğunu bildirmiştir [82]. Son yıllarda asfaltın sıcaklığını dış müdahale ile artırarak iyileşmenin sağlandığı pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle indüksiyon ve mikrodalga ısıtması yöntemleri kullanılmıştır.

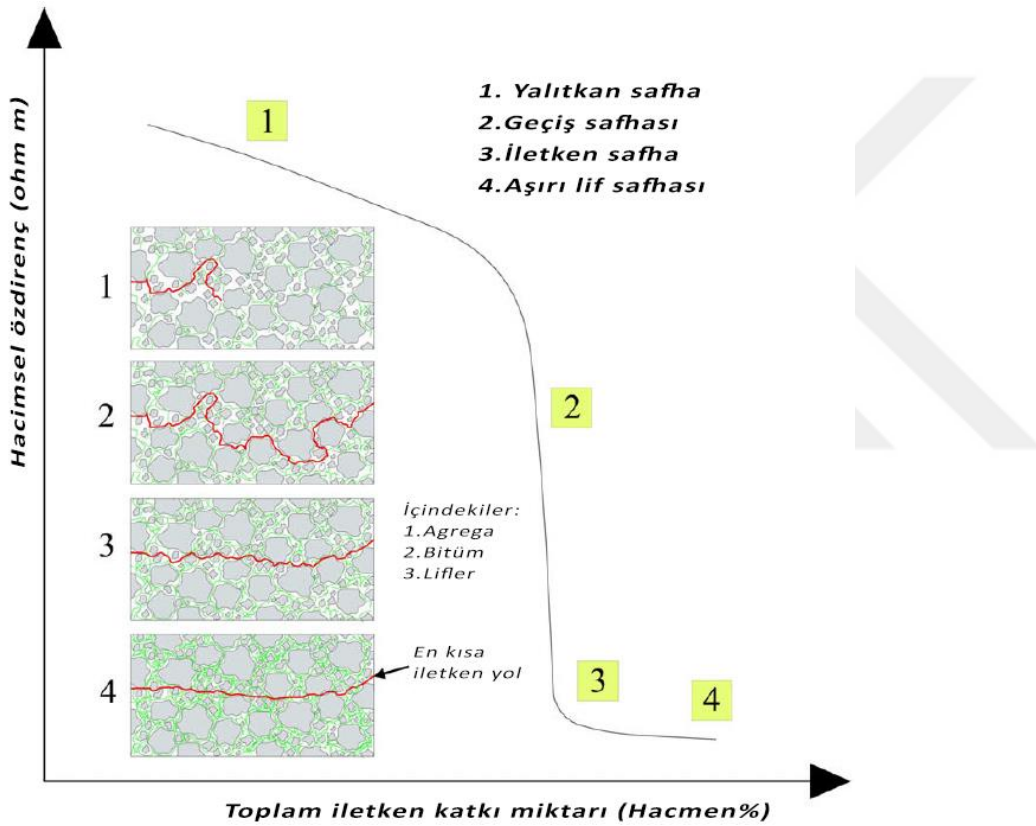
2.7.1. İndüksiyon ısıtması yöntemi

İndüksiyon ısıtmasının temeli 1831’de elektromanyetik indüksiyon prensibini bulan Michael Faraday’a dayanır. Bu prensibe göre, üzerinden değişken bir akım geçen iletkenler yakınında bulunan başka bir iletken üzerinde gerilim indüklenmesine neden olur. Yani akımın oluşturduğu elektromanyetik alan yakınındaki iletkenler üzerinde gerilim oluşturur. İndüksiyon ısıtması ise, elektromanyetik bir alan içerisine konan, metal veya elektriksel olarak iletken bir malzemenin, malzeme içinde indüklenen akımların ısı meydana getirmesi ile gerçekleşir [83].

İndüksiyon ısıtması ile asfalt kaplamaların ısıtılabilmesi için asfalt betonunun elektriksel olarak iletken olması gerekmektedir. Asfalt kaplamanın elektriksel olarak iletkenliğini artırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Wu ve çalışma arkadaşları 2005’te asfalt betonunu elektrik ile ısıtarak kar ve buz çözme fikriyle, iletken asfalt betonu tasarlamışlardır. Asfalt betonunun iletkenliğini artırmak için, asfalt karışımına karbon tozu ve grafit gibi iletken malzemeler eklemiştirler [84]. Yine Wu ve çalışma arkadaşları elektriksel iletken asfalt

betonunun bir sensör gibi çalışarak kendi yorulma hasarlarını tespit edebileceğini ortaya koymuştur [85].

Garcia ve çalışma arkadaşları, kum-asfalt harcındaki (asfalt mastik) kum-asfalt oranının ve karışıma eklenen iletken malzemelerin miktarının elektriksel iletkenliğe etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, kum-asfalt oranının elektriksel iletkenlikte önemli bir rol oynadığını ve her kum-asfalt oranı için optimum bir iletken malzeme oranı olduğunu ortaya koymuşlardır [86].

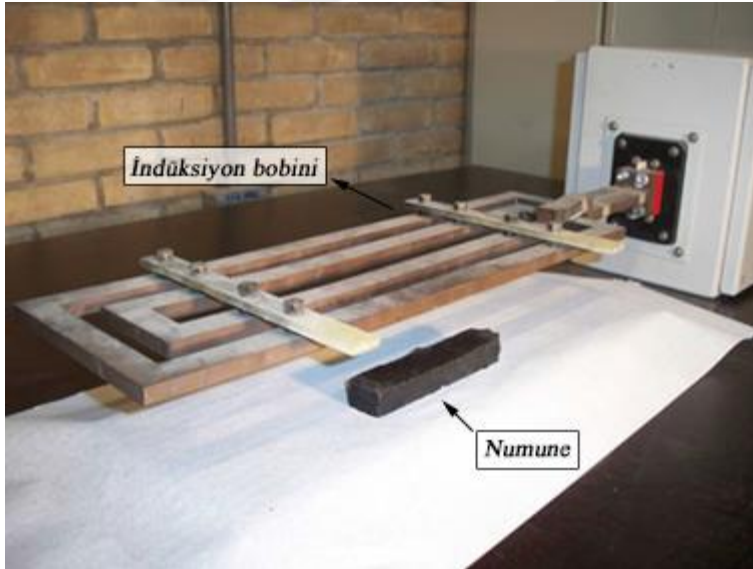


Şekil 2.9. Hacimsel öz direncin katkı miktarına göre değişimi [86]

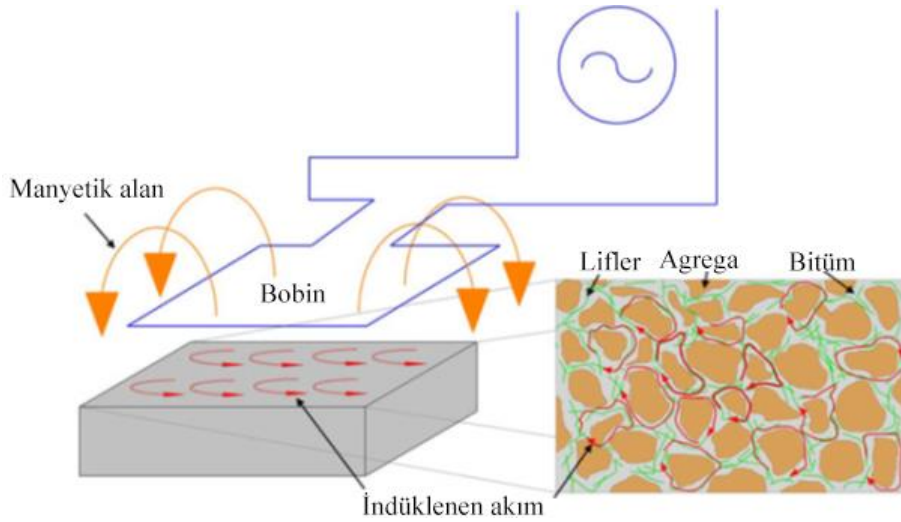
Garcia ve çalışma arkadaşları asfaltın iletkenliğindeki değişimi, hacimsel öz direncine bakarak belirlemiştir. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere birinci safhada iletken katkı malzemelerinin (karbon lif vb.) miktarı az olduğu için, lifler birbirlerinden ayrık durumda, iletken bir yol oluşturamazlar ve asfalt karışımı yalıtıcıdır. İkinci safhada iletken malzemelerin miktarındaki artışla, lifler birbirine temas ederek elektriğin iletilebileceği yeni yollar oluşturmaya başlamıştır ve iletkenlik hızla artmaya başlamıştır. İletkenlikte bu artış iletken safha denilen üçüncü safhada optimum düzeye ulaşır. Katkı miktarı optimumdur ve

asfalt karışımı yeterince iletken değildir. Dördüncü safhada ise iletken liflerin miktarı çok fazladır ve liflerin miktarındaki artış, oluşacak iletken yolu daha fazla kısaltamaz. Bu durumda liflerin artışıyla birlikte asfalt karışımının öz direnci hafifçe azalmaktadır. Aslında liflerdeki aşırılık karışım aşamasında da görülebilmektedir. Liflerin miktarı o kadar yüksektir ki karıştırması imkansızdır, lifler karışımda kümelenmeye başlamaktadır [86].

Asfalt karışımına iletken lif ve tozlar karıştırarak iletkenliği artırıldıktan sonra, asfalt betonuna doğrudan elektrik vererek ısınması sağlanabileceği gibi indüksiyon ısıtması ile de ısınması sağlanabilir. Asfalt betonunun indüksiyon ısıtması ile ısıtılabilmesi ve bunun kendi kendine iyileşmede kullanılabilmesi fikrini ilk olarak Garcia ve çalışma arkadaşları geliştirmiştir [86]. Daha sonra yine aynı araştırmacılar tarafından poroz asfaltta indüksiyon ısıtması için kullanılacak optimum katkı miktarı üzerine bir başka araştırma yapılmıştır. Sonuç olarak, poroz asfalt karışımında %10 oranında (bitüm miktarına oranla) çelik yünü kullanarak, optimum ısınma elde edilebileceğini önermişlerdir [8]. Garcia ve çalışma arkadaşları bir diğer çalışmalarında ise her kum-asfalt yüzdesi için optimum bir lif katkı oranı olduğunu ifade etmişlerdir [87].



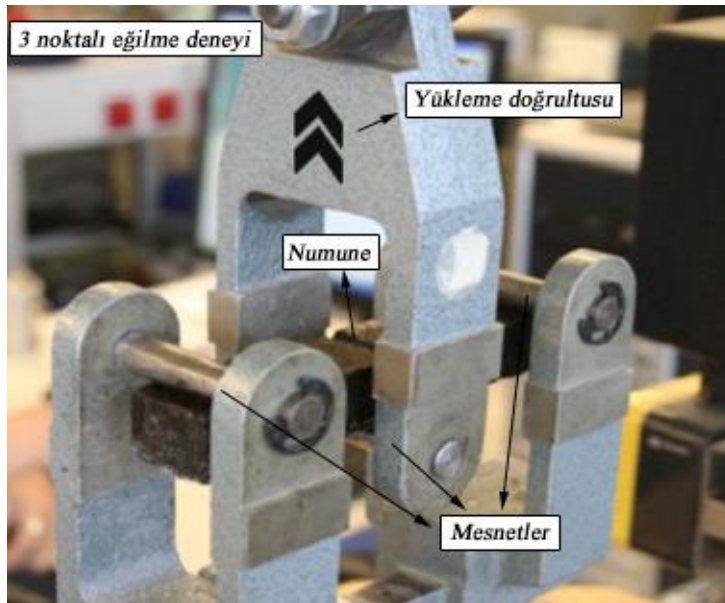
Resim 2.11. İndüksiyon ısıtması düzeneği [87]



Şekil 2. 10. İndüksiyon ısıtmasının şematik gösterimi [87]

Garcia ve çalışma arkadaşları, 2011’de kendi kendine iyileşen poröz asfaltın karışım işlemini ve karışımın kompozisyonunu optimize etmek için bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak 1,5 dk karıştırma süresi ve bitüm hacmine oranla %4 oranında çelik yünü kullanımını optimum değerler olarak bildirmişlerdir [88].

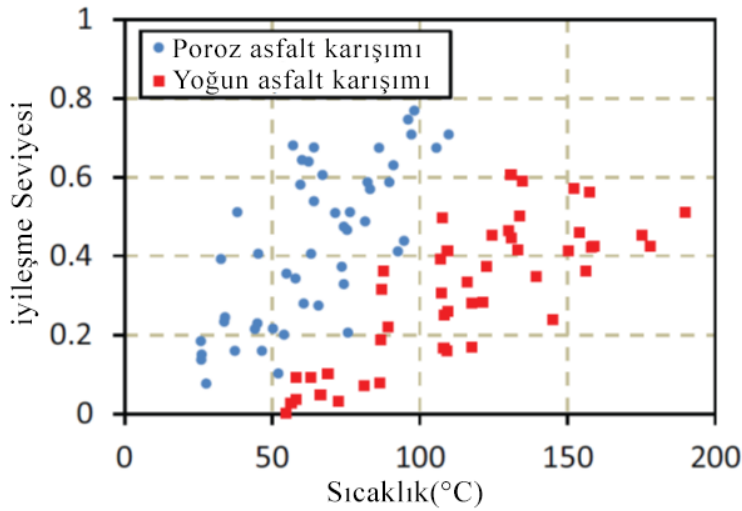
Liu ve çalışma arkadaşları çelik yünü veya çelik lifi katkısıyla asfalt karışımının indüksiyon ısıtması ile hızlıca ısıtılabileceğini bildirmişlerdir. Hazırladıkları asfalt mastik (asfalt-kum karışımı) kiriş üzerindeki çatlakların indüksiyon ısıtması ile iyileştirilebileceğini üç noktalı eğilme deneyini kullanarak göstermişlerdir [82].



Resim 2.12. Asfalt mastik kirişin üç noktalı eğilme deneyi [82]

Garcia ve arkadaşları, 2013'te indüksiyon ısıtmasının yoğun gradasyonlu asfalt betonunda oluşan çatlakların iyileşmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Sıcaklığın artışıyla iyileşme seviyesinde artış olduğunu ve iyileşmenin gerçekleşmesi için belirli bir alt sıcaklık olduğunu belirtmişlerdir. Bu sıcaklığın üzerinde asfaltın Newtonian akışkan gibi davranmaya başladığı için iyileşmeyi artırdığını bildirmişlerdir [89].

Garcia ve çalışma arkadaşları, 2015'te, poroz asfalt ile yoğun asfalt betonunun indüksiyon ısıtması ile iyileşme özelliklerini karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Yoğun asfalt karışımının, poroz asfalt karışımına göre daha yüksek sıcaklıklarda iyileşebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca yoğun asfalt karışımı için en fazla %51, poroz asfalt karışımında ise en fazla % 71 iyileşme görüldüğü bildirilmiştir [90].

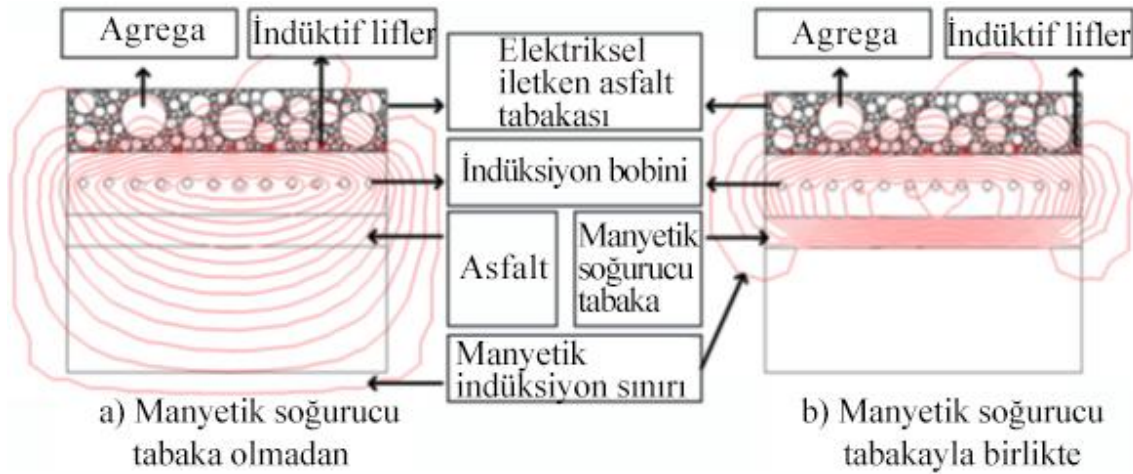


Şekil 2.11. Yoğun ve poroz asfalt karışımlarının sıcaklıkla değişen iyileşme seviyeleri [90]

Menozzi ve çalışma arkadaşları, 2015'te, ilk defa yorulma çatlaklarının indüksiyon ısıtması ile iyileştirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu amaçla asfalt karışımı numunesine indirekt çekme yorulma deneyi ile hasar verilmiş ve daha sonra indüksiyon ısıtması yöntemiyle iyileştirilmiştir. İyileşmenin gerçekleşmesi için optimum bir hasar boyutu olduğunu yani ileri boyuttaki hasarların indüksiyon ısıtması yöntemiyle iyileştirilemeyeceği belirtilmiştir. Ayrıca bu yöntemle asfalt numunelerinin yorulma ömrünün %30 oranında arttığı bildirilmiştir [7].

Lizasoain-Arteaga ve çalışma arkadaşları, indüksiyon ısıtması ile kendi kendine iyileşen asfalt karışımlarını, çevreye olan etkisi bakımından araştırmış ve sıklıkla trafik sıkışıklığı gözlenen yoğun noktalarda kullanımının avantajlı olduğunu bildirmişlerdir [91].

Pamulapati ve çalışma arkadaşları, asfalt karışımına alüminyum lifleri ilave etmenin çelik liflerine oranla daha iyi iyileşme performansı gösterdiğini bildirmiştir [92]. Vila-Cortavitate ve çalışma arkadaşları ise, indüksiyon ısıtması ile kendi kendine iyileşme için asfalt karışımına endüstriyel yan ürünler karıştırmış ve yeterli düzeyde ısınma ve iyileşme sağlamışlardır. Kullanılan endüstriyel yan ürünler kumlama, parlatma, döküm ve torna gibi işlemlerde meydana gelen metalik toz, talaş ve cüruf gibi malzemelerden oluşmaktadır [93]. Liu ve çalışma arkadaşları, kısa süre önce, elektriksel iletken bir tabaka ve manyetik soğurucu bir tabakadan oluşan, indüksiyon bobininin bu tabakalar arasına yerleştirildiği farklı bir indüksiyon ile iyileşme modeli önermişlerdir. Bu tabakalardan elektriksel iletken tabakada atık metal talaşı ve manyetik soğurucu tabakada ise atık ferritler (küçük oranda metalik malzemeler ile büyük oranda demir (III) oksitin harmanlanması ile üretilen seramik bir malzeme) kullanmışlardır. Sonuçta çoklu tabakalı asfalt kaplama tasarımının indüksiyon ile ısıtma performansını önemli derecede artırdığını bildirmişlerdir [94].



Şekil 2.12. Manyetik soğurucu tabakanın çalışma prensibi [94]

A58 Karayolunda yapılan saha uygulaması

İndüksiyon ısıtması ile iyileşebilen asfalt kaplama ilk defa 2010'da Hollanda'da Vlissingen şehrinin yakınındaki A58 Karayolunun bir kesimine inşa edilmiştir. Yolun bu kesiminde daha yüksek sökölme direnci gözlenmiş ve 2014'te indüksiyon ısıtması ile iyileştirildiğinde

yüksek derecede iyileşme gözlenmiştir. Sonuç olarak yazarlar, Hollanda’da indüksiyon ısıtması ile iyileşen asfalt betonuna yatırım yapılırsa yılda 90 milyon Avro tasarruf edileceğini ayrıca asfalt kaplama servis ömrünün %50 artacağını tahmin ettiklerini ifade etmişlerdir [2].



Resim 2.13. Hollanda’da bulunan A58 karayolunda araca monte edilmiş indüksiyon cihazı ile yapılan iyileştirme işlemi [95]

HEALROAD Projesi

İndüksiyon ısıtması yönteminin sahada uygulandığı bir diğer örnek ise Avrupa Araştırma Alanı Ağları (ERA-Nets) tarafından desteklenen bir proje olan HEALROAD projesidir. Bu projenin amacı küçük bir karayolu kesimini indüksiyon ısıtması ile iyileşebilen asfalt betonu ile inşa etmek, yola yükler uygulayarak hasar vermek ve daha sonra indüksiyon yöntemi ile iyileştirerek bu yöntemin uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla 2017 yılının İlkbaharında Almanya’nın Köln şehrinde amaca yönelik bir karayolu kesimi inşa edilmeye başlanmış ve aynı yılın haziran ayında bitirilmiştir. Daha sonra gerçek bir trafik akışının yükünü simüle edebilen BAST MLS30 hareketli yük simülatörü cihazı ile yola hasar verilmiştir. Daha sonra yol yüzeyine indüksiyon ısıtması uygulayarak çatlakların kendi kendine iyileşmesi sağlanmıştır [2,96].

Yapılan çalışmanın sonucu Fransa’nın Nice şehrinde gerçekleşen bir konferansla açıklanmıştır. Ekonomik performans üzerine yapılan analizlerin sonucuna göre ilk yatırım maliyeti %2 gibi hafif bir artış gösterse de bakım maliyetlerindeki %21’den %27’ye kadar bir düşüş faydalı görülmektedir. Yakıt tüketimi, CO₂ emisyonu ve trafik kazaları gibi diğer

maliyetlerdeki azalma ise toplam %11 ila %24 arasında olduğu söylenmektedir. Toplamda, maliyetlerde %4 tasarruf sağlanacağı tahmin edilmektedir. Çevresel etkileri konusunda ise HEALROAD karayolu kesimi ve geleneksel bir asfalt kaplama karşılaştırıldığında, HEALROAD teknolojisi 17 orta vadeli etkinin 14'ünde ve uzun vadeli etkilerin tamamında daha üstün bir performans sergilemiştir [96].



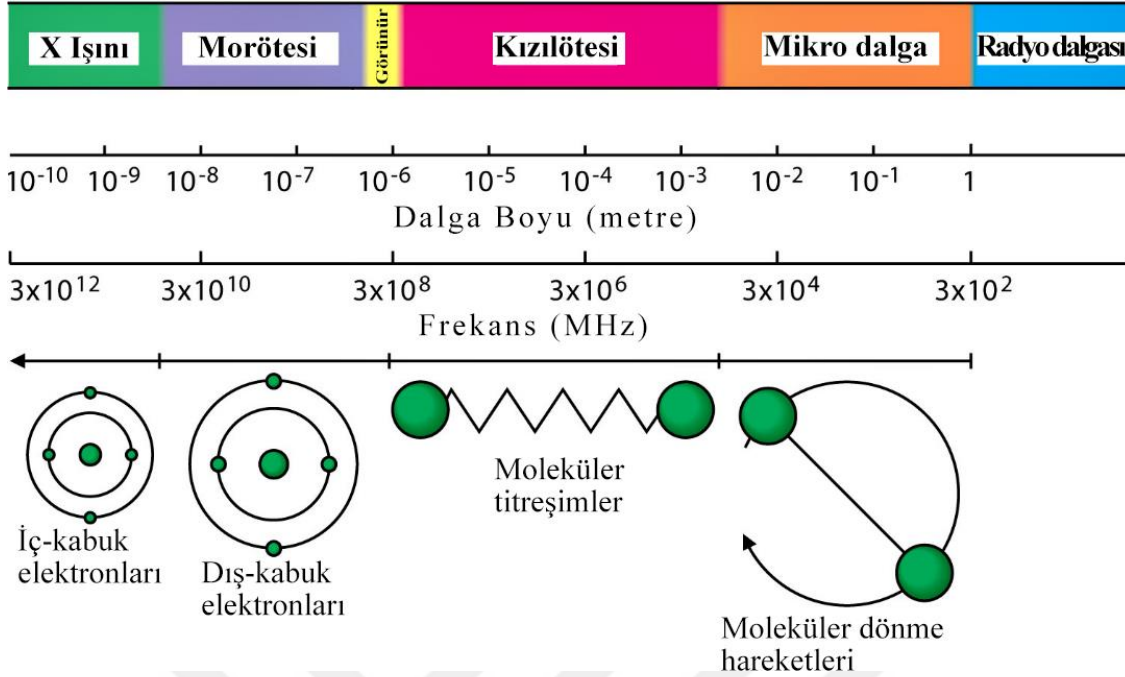
Resim 2.14. HEALROAD projesinde yol yüzeyine indüksiyon ısıtması uygulanması [97]

2.7.2. Mikrodalga ısıtması yöntemi

Mikrodalga teknolojisi, 2. Dünya Savaşı sırasında radar cihazlarının sabit frekansta mikrodalga üretebilmesi için megnetonun tasarlanmasıyla ortaya çıkmıştır. Percy LeBaron Spencer'in radar deneyleri yaparken kazayla cebindeki çikolatanın erimesi, mikrodalga ile yiyeceklerin ısıtılacağı fikrini bulmasına sebep olmuştur. Bu olaydan sonra ilk ticari ev tipi mikrodalga fırını 1954'te tanıtılmıştır [9].

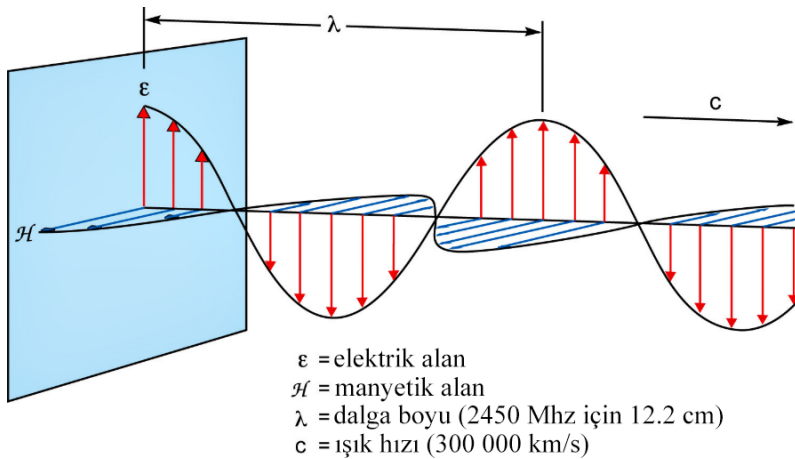
Mikrodalgaların tanımı

Frekansları 300 MHz ila 300 GHz arasında olan elektromanyetik dalgalar mikrodalgalar olarak sınıflandırılır. Ev tipi mikrodalga fırınlarda genel olarak 2,45 GHz frekans kullanılmaktadır [9].



Şekil 2.13. Elektromanyetik spektrum [9]

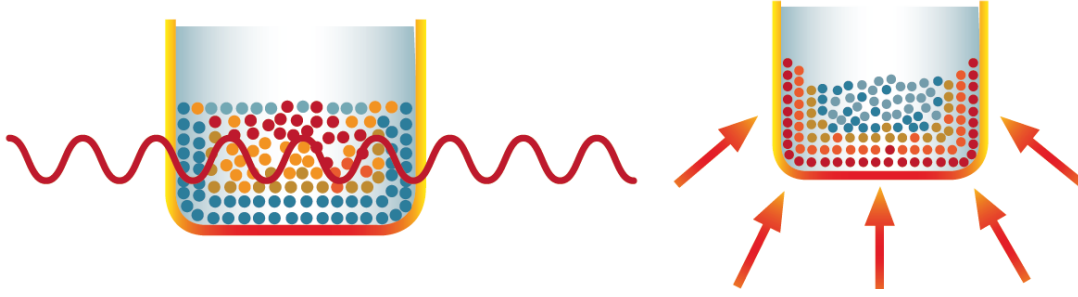
Mikrodalga enerjisi elektrik alan ve manyetik alandan meydana gelir fakat ısınmayı sağlayan enerji yalnız elektrik alan tarafından taşınmakta, ayrıca mikrodalgalar ışık hızında (saniyede 300 000 km) yayılmaktadır.



Şekil 2.14. Bir mikrodalga ışını [9]

Mikrodalga ile ısıtmanın prensibi

Geleneksel ısıtma yöntemlerinde ısı malzemenin yüzeyinden etki ederek iç kısımlarına doğru yayılır. Bu tür ısıtma sistemlerinde ısınmanın hızı ısıtılan malzemenin ve içinde bulunduğu kabın termal iletkenlik özelliklerine bağlı olduğu için hızlı ve etkin değildir [98].



Şekil 2.15. Mikrodalga (solda) ve geleneksel (sağda) ısıtma sisteminin karşılaştırılması [98]

Mikrodalga ısıtmasında ise mikrodalgaların moleküller tarafından soğurulmasıyla, ısı moleküler düzeyde malzemenin içinde üretilir. Malzeme içindeki moleküllerden yayılan ısı, termal iletkenlik özelliklerinden bağımsız olduğu için sıcaklık artışı çok hızlı ve verimli gerçekleşir. Mikrodalgaların malzeme tarafından soğurulabilmesi iki şekilde gerçekleşir; dipol etkileşimler ve iyonik iletimler [9,98].

Dipol etkileşim, dipol momenti oluşturan polar moleküllerin hızla değişen elektrik alanda kendilerini tekrar konumlandırmak için dönme hareketleri yapmasıdır. Bu dönme hareketleri sonucunda sürtünmeden kaynaklanan ısı üretilmiş olur [9,98].

Mikrodalga enerjisinin ısıya dönüşmesinin ikinci yolu ise iyonik iletimdir. Bir iyonik çözelti içindeki serbest iyonlar yüklü parçacıklardır ve elektrik alandaki süratli polarize değişimler ile hareket ederek birbiriyle çarpışır. Bu çarpışmalar sonucunda ortaya çıkan kinetik enerji ısı enerjisine dönüşür [9,98].

Mikrodalga ile ısıtılabilen malzemeler

Eğer malzeme önceki başlıkta belirtildiği gibi polar bir molekül yapısına sahipse veya serbest iyonlardan oluşuyorsa mikrodalga ışınlarını soğurur ve ısınma gerçekleşir. Örneğin su polar bir molekül yapısına sahip olduğu için mikrodalga fırında ısıtılabilir.

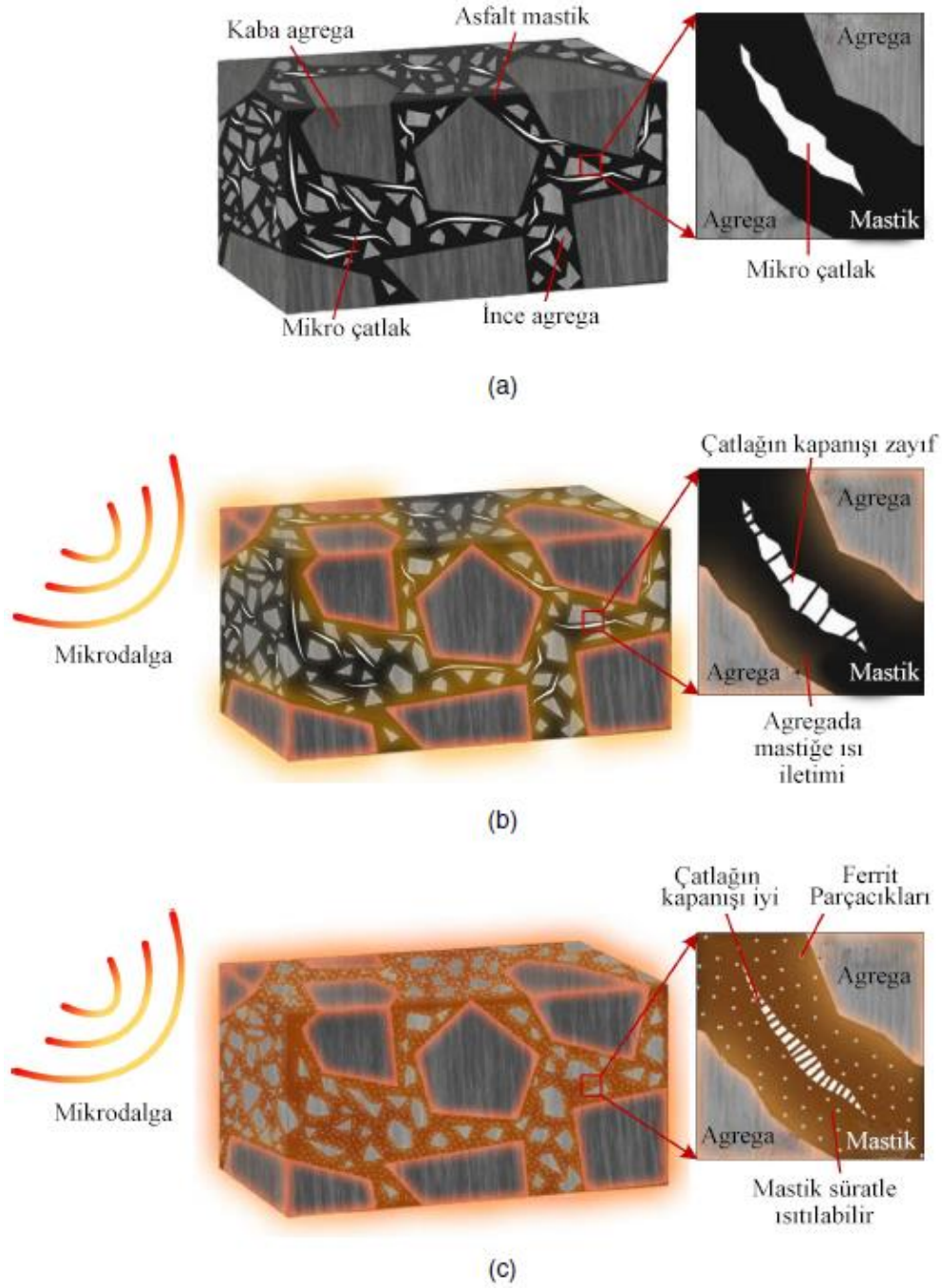
Elektriksel olarak iletken olan metaller, grafit gibi malzemeler ise mikrodalga ışınlarını yansıtıcı özellikte oldukları için normalde mikrodalga ile ısıtılamazlar. Ancak metal tozlarının verimli bir şekilde mikrodalga ısıtması ile ısıtılabilceği bugün bilinmektedir [10]. Bu yüzden tıpkı indüksiyon ısıtmasında olduğu gibi asfalt karışımına metalik malzemeler ekleyerek asfaltın ısınma hızını artırılabilir [11].

Mikrodalga ile iyileşme konusunda yapılan çalışmalar

Gallego ve çalışma arkadaşları, 2013'te, mikrodalga ısıtma yöntemi ile asfaltın kendi kendine iyileşebileceği fikrini ortaya çıkarmışlardır [11]. O zamandan beri mikrodalga ile asfaltın iyileştirilmesi konusunda birçok araştırma yapılmıştır [11,22,25,99–113]. Mikrodalga ile kedi kendine iyileşmeyi sağlamak için asfalt karışımına neredeyse tüm çalışmalarda kullanılan çelik yününe ek olarak çeşitli katkı malzemeleri ilave edilmiştir. Bunlar arasında çelik talaşı [102,108,109,111], karbon nano tüp (CNT) [112], grafin [112], çelik cürufu [22,25,105,107,108] karbon siyahı tozu [106], aktif karbon tozu [113], grafit [101], geri dönüşüm asfalt kaplama [102,108] ve silisyum karbür [109] bulunmaktadır. Bu katkı malzemelerinden geri dönüşüm asfalt kaplama kullanımının ve silisyum karbür ilavesinin iyileşmeyi biraz azalttığı bildirilmiştir. Diğer katkı malzemelerinin ise iyileşmeyi olumlu etkilediği bildirilmiştir.

Mikrodalga ile iyileşmeyi ilk defa uygulayan, Gallego ve arkadaşları çalışmalarında asfalt karışımına çelik yünü ekleyerek, mikrodalga fırında ısınma hızlarını incelemişlerdir. Kalınlıkları farklı olan, kaba ve orta diye nitelendirdikleri çelik yünlerini kullanılmıştır. Deneyde 2,45 GHz frekansta çalışan ve 1,2 kW çıkış gücünde olan standart bir mikrodalga fırın kullanmışlardır. Sonuç olarak orta çelik yününün daha iyi ısınma sağladığını gözlemlemişlerdir. Çelik yünü kullanılmayan numunede ısınma olmasına rağmen, enerji verimliliğini sağlamak için çelik yününün gerekli olduğu ve %0,2 oranında kullanılmasının yeterli olacağı çıkarımını yapmışlardır. İndüksiyon ısıtmasında bu oranın on katı yani yaklaşık %2 oranında çelik yünü kullanıldığı için mikrodalga ısıtmasının daha avantajlı olabileceğini öne sürmüşlerdir [11].

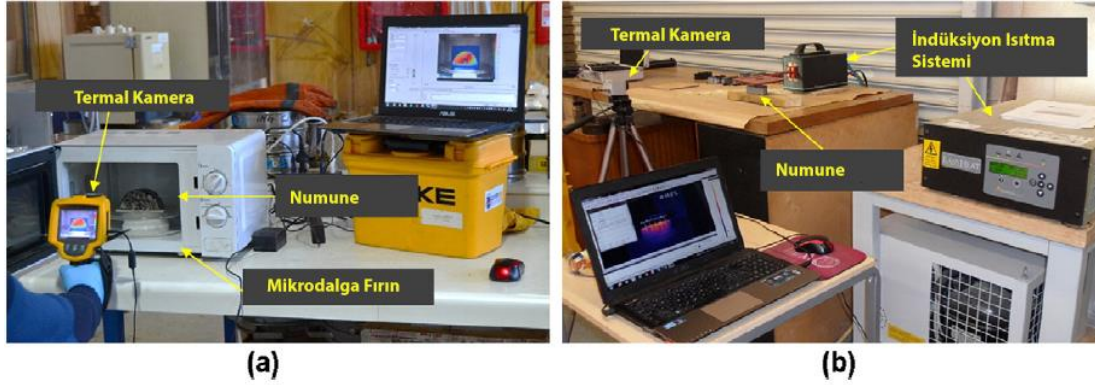
Zhao ve çalışma arkadaşları çalışmalarında ZnNi (çinko-nikel) ferrit parçacıklarını, asfalt betonuna filler olarak karıştırarak ZnNi ferritin mikrodalga ile ısınma hızına etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak ZnNi ferritin mikrodalga ısınma hızını iyi derecede artırdığını ve iyileşme performansını olumlu etkilediğini bildirmişlerdir [114]. Ferrit katkılı asfalt betonunun mikrodalga ısınması ile iyileşmesi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Asfalt betonunun mikrodalga etkisi ile iyileşmesi a) Mikro çatlağı olan asfalt betonu b) Katkısız normal asfalt betonunun mikrodalga ile iyileşmesi c) Ferrit katkılı asfalt betonunun mikrodalga ile iyileşmesi [114]

Mikrodalga ve indüksiyon ile ısıtma yöntemlerini karşılaştıran bazı çalışmalar yapılmıştır. Norambuen-Contreras ve Garcia çalışmalarında dört farklı oranda çelik yünü ilave edilmiş yarı silindirik numuneler, iyileşmeden önce ve sonra üç noktalı eğilme testi ile değerlendirilmiştir (Resim 2.15). Deneyler sonucunda mikrodalga ısıtması yönteminin indüksiyon ısıtması yönteminden daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. İyileşme

döngülerinde, iyileşme seviyesinin her iki yöntem için de giderek azaldığını ancak bu azalmanın mikrodalga yönteminde daha az olduğunu belirtmişlerdir. Mikrodalga yönteminde, bitümün parlama noktasından daha yüksek sıcaklıklar gözlemlendiği ve numune zarar gördüğü için yazarlar 40 saniyenin altındaki ısıtma sürelerini gelecekteki çalışmalar için tavsiye etmişlerdir [110].



Resim 2.15. Isıtma deney düzeneği a) Mikrodalga fırın ve b) İndüksiyon ısıtma sistemi [110]

Mikrodalga ve indüksiyon yöntemini karşılaştıran bir diğer çalışmada, katkı içermeyen normal asfalt betonunun indüksiyon ısıtması ile hiç ısıtılamazken, mikrodalga ısıtması ile ısıtılacağı ifade edilmiştir. Yine aynı çalışma çelik yünü katkılı asfalt betonunun mikrodalga ısıtmasında biraz daha iyi performans gösterdiği, çelik cürufu katkılı asfalt betonunda ise mikrodalga ısıtmasının biraz şekilde daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [104].

Gonzalez ve çalışma arkadaşları geri dönüşüm asfalt kaplama ve çelik talaşı ile yapmış oldukları çalışmada indüksiyon ve mikrodalga yöntemlerinin her ikisini de kullanmışlardır. Her iki yöntemde de geri dönüşüm asfalt kaplama katkısının iyileşmeyi biraz azattığı, çelik yünü kullanımının ise artırdığını bildirmişlerdir. Çelik talaşı katkılı asfalt betonunun ise, mikrodalga yöntemi ile iyileştirmede çok daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [102].

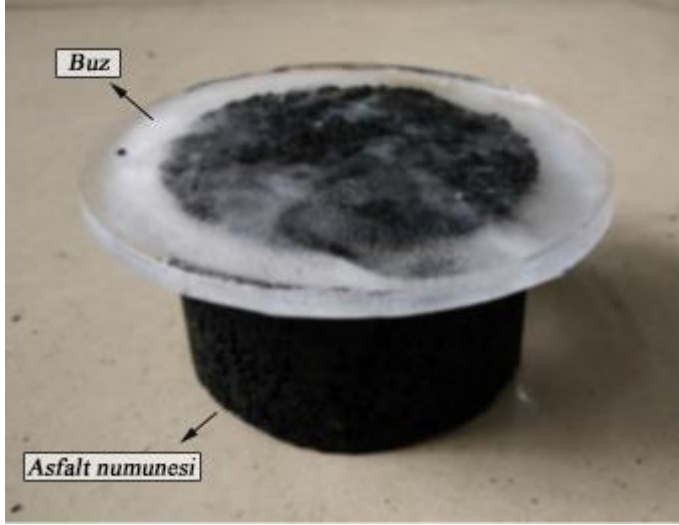
Phan ve çalışma arkadaşları çalışmalarında çelik cürufu agregasının, mikrodalga iyileşme yöntemi ile kendini iyileştiren asfalt karışımında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hazırlanan numunelerde iletkenliği artırmak için çelik cürufunun yanı sıra değişik oranlarda çelik yünü kullanılmıştır. Agregada olarak ise normal agregada ile çelik cürufu agregası kullanılmıştır. Numuneler soğutulduktan sonra üç noktalı eğilme testi ile iyileşme

döngülerindeki iyileşme seviyeleri bulunmuştur (Resim 2.16). Hem mikrodalga ile ısınma hızında hem de iyileşme döngülerinde, çelik cürufunun normal agregadan daha iyi performans sergilediği ortaya koymuşlardır. Döngüler devam ettikçe, ölçülen dayanım hem çelik cürufu kullanılan hem de normal agrega kullanılan numuneler için aşama aşama düşmüştür. Kullanılan tüm çelik yünü oranları içinde %2 oranının en verimli sonucu verdiğini belirtmişlerdir [25].



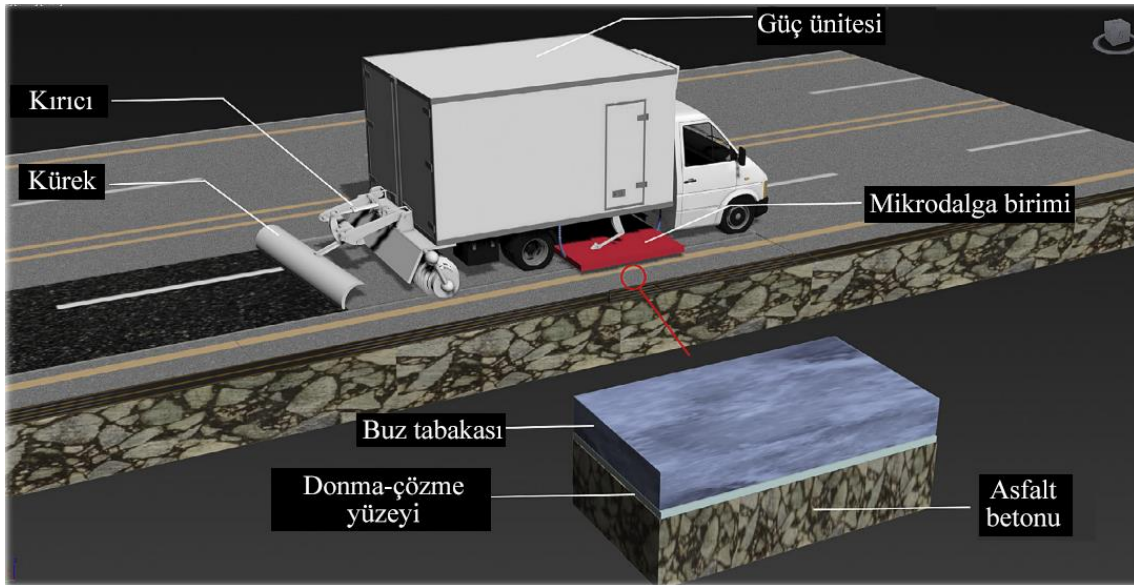
Resim 2.16. Numunelerin -18 °C 'ye soğutulması ve 3 noktalı eğilme deneyi [25]

Mikrodalga ısıtması ile asfaltın sıcaklığını artırmak, kış aylarında buz çözme çalışmalarına da konu olmuştur [100,105]. Sun ve çalışma arkadaşları çalışmalarında kendini iyileştiren asfalt karışımında, kar ve buzun erime özelliklerini araştırmışlardır (Resim 2.17). Çelik lifi ve çelik cürufu olmak üzere iki çeşit katkı malzemeli numune kullanılmıştır. Deney mikrodalga ve indüksiyon ısıtması yöntemleri ile yapılmıştır. Katkı malzemeleri hem mikrodalga ısıtmasında hem de indüksiyon ısıtması yönteminde buz erime performansını önemli derecede artırmıştır. Numune ile buz arasındaki yüzeyin erimesi ile buzun numuneden ayrıldığı gözlenmiş ve böylece buzun tamamının erimesine gerek kalmadan yüzeyden uzaklaştırılmasının mümkün olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak çelik cürufunun kullanılan numunelerde indüksiyon ile ısınmasının sınırlı olduğu gözlenmiştir. Buz erime özelliğinin yanı sıra karışımın kendini iyileştirme durumu da incelenmiş ve mikro çatlakların su ile dolu olması nedeniyle, iyileşmenin düşük seviyede kaldığını gözlemlemişlerdir. Bu yüzden buz eritme işleminden sonra iyileşme için başka bir ısıtma işlemi daha yapılması tavsiye edilmiştir.



Resim 2.17. Buz erime deneyi için hazırlanan numune [100]

Çin’de mikrodalga ısıtması ile yol yüzeyindeki buzları çözmek için pratikte kullanılabileceği söylenen bir araç konsepti geliştirilmiştir (Şekil 2.17). Bu tasarıma göre araçta bulunan mikrodalga üreten jeneratör, katkı maddeli (çelik yünü, çelik cürufu vb.) asfaltı ısıtarak yol yüzeyindeki buzları gevşetmektedir. Daha sonra yüzeyde serbest kalan buz parçaları kırıcı birim tarafından küçük parçalara ayrılır ve kürüyücü yardımıyla yol dışına atılabilmektedir [105,115]. Bu tasarımın mikrodalga ısıtmasıyla kendi kendine iyileşme için de uygulanabileceği düşünülmektedir.



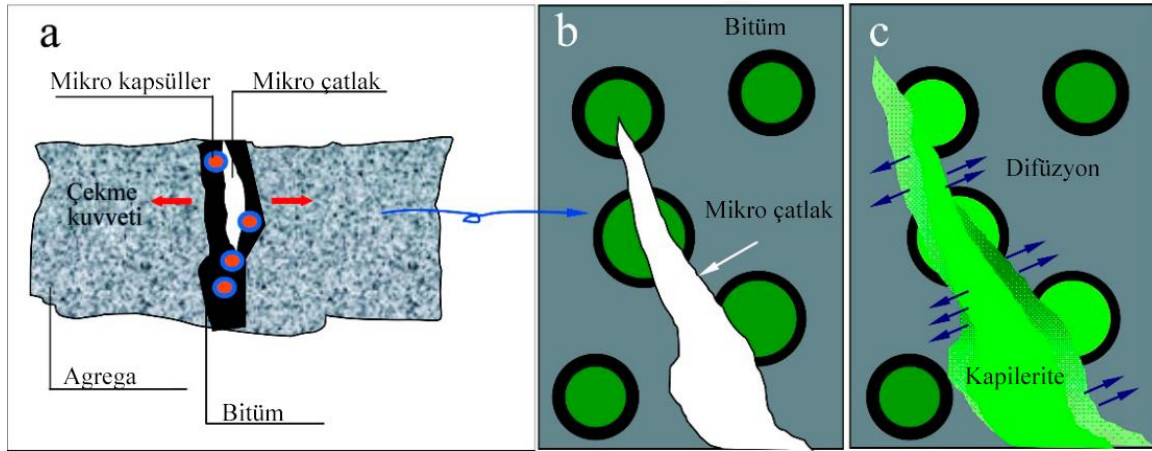
Şekil 2.17. Mikrodalga ısıtması aracının çalışma prensibi

2.8. Kapsül Yöntemi ve Diğer Yöntemler

2.8.1. Kapsül yöntemi

Kapsül ile iyileşme yöntemi, 2001’de, polimerler malzemelerde kendini iyileştirme konusunda White ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya çıkarılmıştır [116] Daha sonra kapsül yöntemi ile iyileşme araştırma konusu olmuş ve son yıllarda kapsül yöntemi ile iyileşme asfalt karışımlarında da uygulanmaya başlamıştır.

Asfalt karışımlarında kullanılan kapsül yönteminde, sertleşmiş bitümü yumuşatıcı özellikte olan bir yenileyici madde, mikro kapsüller içine koyulur ve bu kapsüller asfalt karışımına ilave edilir. Daha sonra belirli bir hasar eşiğini geçen kapsülün yırtılmasıyla, yenileyici madde çatlak içine akarak buradaki yaşlanmış ve sertleşmiş bitümü yumuşatarak çatlağın kapanmasını sağlar[2,6,117].



Şekil 2.18. Yaşlanmış bitümün yenileyici içeren mikro kapsüller ile kendini iyileştirme işlemi a) Asfalt karışımının yapısı b) Mikro çatlak oluşumu ve kapsülün açılması c) Yenileyici maddenin çatlak içine akması sonucu yaşlanmış bitümün kapilarite ve difüzyon ile kendini iyileştirilmesi [118]

Asfaltın kapsülle iyileştirilmesi için, şimdiye kadar iki çeşit kapsül hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Birinci yöntem poroz agregayı yenileyici ile doyurduktan sonra, kalsiyum iyonları varlığında sodyum aljinat kullanarak kapsülleme [119,120] veya epoksi reçinesi ve çimentodan oluşan sert bir kabukla kaplayarak [121] kapsülleri hazırlamaktır. İkinci yöntem ise yenileyici maddeyi, üre formaldehit [122], metanol melamin formaldehit [123,124] veya fenol formaldehit [125] maddelerinin yerinde polimerleşmesi ile kapsüllemekten ibarettir.

2.8.2. Diğer yöntemler

Asfalt ve polimerlerde, malzemenin kendi kendine iyileşme potansiyelini artırmak için nano parçacıklar kullanarak yapılan çalışmalar mevcuttur [126–128]. Bunun yanı sıra iyonomerler [129–131] ve süpermoleküler kauçuklar [132] gibi polimerlerde uygulanan bazı kendi kendine iyileşme metotları da literatürde mevcuttur.

Gómez-Meijide ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu, kızılötesi ışınlarla asfalt betonunun ısıtılarak, güneş ışınlarının simule edildiği çalışma da farklı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Araştırmacılar bu ısıtma metodunun indüksiyon ısıtmasına göre verimli ve etkin olmadığını, sıcaklığın derinlere nüfuz etmeyip yüzeysel kaldığını bildirmişlerdir [71].

2.9. Uçucu Kül

Uçucu kül termik santrallerde kömürün yanmasından meydana gelen bir yan üründür ve çevresel bir kirletici olarak bilinmektedir [133]. Blissett ve Rowson'nın [134] tahminine göre, dünya çapında yıllık 750 milyon ton uçucu kül üretilmektedir ve Wang [135] bu uçucu külün kullanım oranının %25 civarında olduğunu tahmin etmektedir. Bu yüzden bu çevresel kirletici ile başa çıkmak için uçucu külün değerlendirilebileceği yeni kullanım alanları bulmak önemli bir ihtiyaçtır.

Uçucu külün asfalt betonunda filler olarak kullanılmasının asfaltın mekanik özelliklerine etkisi konusunda bazı çalışmalar yapılmıştır. Tapkın, uçucu külün asfalt karışımında filler olarak kullanılmasının yorulma dayanımını artırdığını bildirmiştir. Ayrıca uçucu külün, yoğun gradasyonlu aşınma tabakalarında filler olarak etkin bir biçimde kullanılabileceğini ifade etmiştir [136].

Likitlersuang ve Chompoorat yapmış oldukları çalışmada uçucu külün ve portland çimentosunun, asfalt karışımında filler olarak kullanımını incelemiştir. Sonuç olarak uçucu kül ve çimentonun filler olarak kullanımının asfalt karışımının dayanım, rijitlik ve soyulma direncini artırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ve portland çimentosunun birlikte kullanımının sıcak ve nem etkisinde tekerlek izi oluşumuna karşı direnci artırabileceğini ifade etmişlerdir [137].



3. MATERYAL VE METOT

Üç noktalı eğilme deneyi dışındaki, deneysel çalışmaların tümü Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Asfalt Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve uygulanan metodoloji bu bölümde başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Bitüm

Deneysel çalışmalarda 50/70 penetrasyon derecesinde Kırıkkale Petrol Rafinerisinden temin edilen bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün karakteristik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan bitümün özellikleri

Özellik	Değer	Sınır	Deney Yöntemi
Penetrasyon, 10 ⁻¹ mm	50/70		TS EN 1426
Yumuşama Noktası, °C	46-54		TS EN 1427
Parlama Noktası, °C	230	En az	TS EN ISO 2592
Çözünürlük (ağırlıkça), %	99	En az	TS EN 12592
Yumuşama noktası yükselmesi, °C	9	En çok	TS EN 1427
Sertleşmeye karşı direnç * 163 °C'ta			
Kütle değişimi (Isıtmadaki kayıp), %	0,5	En çok	TS 121 veya TS EN 12607-1 veya TS EN 12607-2
Kalıcı Penetrasyon, %	50	En az	TS EN 1426
Sertleştirmeden sonra yumuşama noktası, °C	48	En az	TS EN 1427
* Referans olarak sadece RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) metodu kullanılmalıdır			

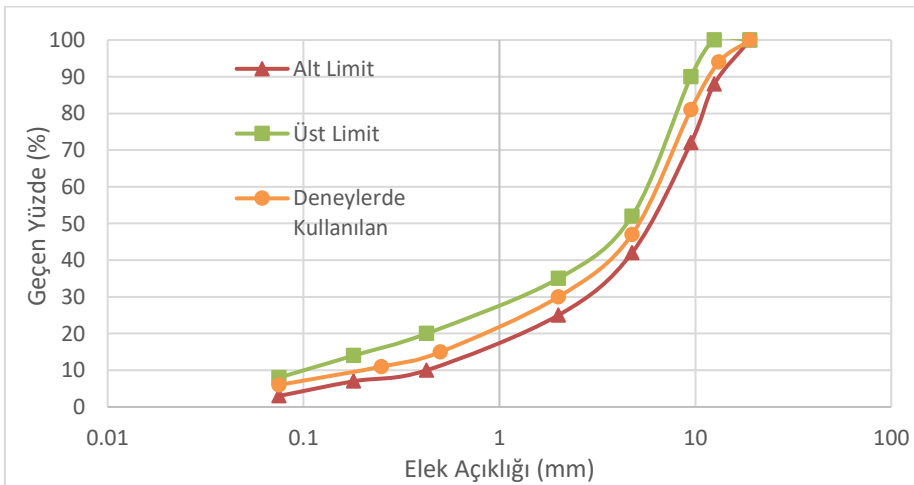
Karşım hesaplarında kullanılmak üzere, bitümün özgül ağırlığı ise piknometre yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Piknometre deneyi 0,01 g hassasiyetinde terazi ile gerçekleştirilmiş olup, karışımda kullanılan bitümün özgül ağırlığı 1,023 g/cm³ olarak bulunmuştur.

3.2. Agreg

Deney numunelerinin hazırlanmasında Ankara'nın Mamak ilçesine bağlı Kıbrıs Köyü taş ocağından temin edilen kalker cinsi kırma taş agrega kullanılmıştır. Bu ocaktan elde edilen agrega, Ankara Büyükşehir Belediyesi tarafından inşa edilen asfalt kaplamalarda kullanılmaktadır. Agreganın tamamı boylarına göre ayrıldıktan sonra her numune hazırlanırken Çizelge 3.2'de verilen gradasyonda karıştırılarak kullanılmıştır. Seçilen gradasyon Karayolu Teknik Şartnamesindeki [138] aşınma tabakası için verilen alt ve üst limitler dahilindedir (Şekil 3.1).

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan agrega gradasyonu

Elek açıklığı (mm)	Kalan (%)	Geçen Yığılımlı (%)	1200 gr için kalan (gr)
19	0	100	0
13,2	6	94	72
9,5	13	81	156
4,75	34	47	408
2	17	30	204
0,5	15	15	180
0,25	4	11	48
0,075	5	6	60
Elek Altı	6	0	72
Toplam	100	-	1200



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan agreganın granülometri eğrisi ve şartname sınırları

Karışımında kullanılan agreganın özgül ağırlığını belirlemek amacıyla her boydaki agreganın numunesin ayrı ayrı özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Kaba agreganın özgül ağırlığı belirlenirken Arşimet terazisi kullanılmıştır. İnce agreganın özgül ağırlığı piknometre yöntemi ile bulunurken, filler malzemeninki ise Le Chatelier balonu yardımıyla bulunmuştur.

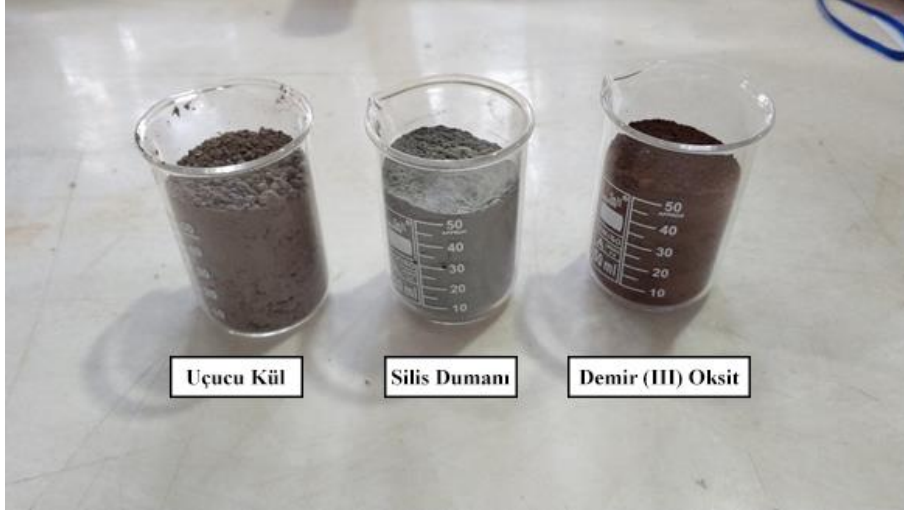
Asfalt karışımında filler olarak iki çeşit malzeme kullanılmıştır. Birincisi, elek analizi yapılmış olan kalker agregasının tozu yani kalker tozu (KT), ikincisi ise uçucu küldür (UK). Kullanılan uçucu kül malzemesinin özellikleri alt başlıkta verilmiştir.

3.4. Mikrodalga Fırın

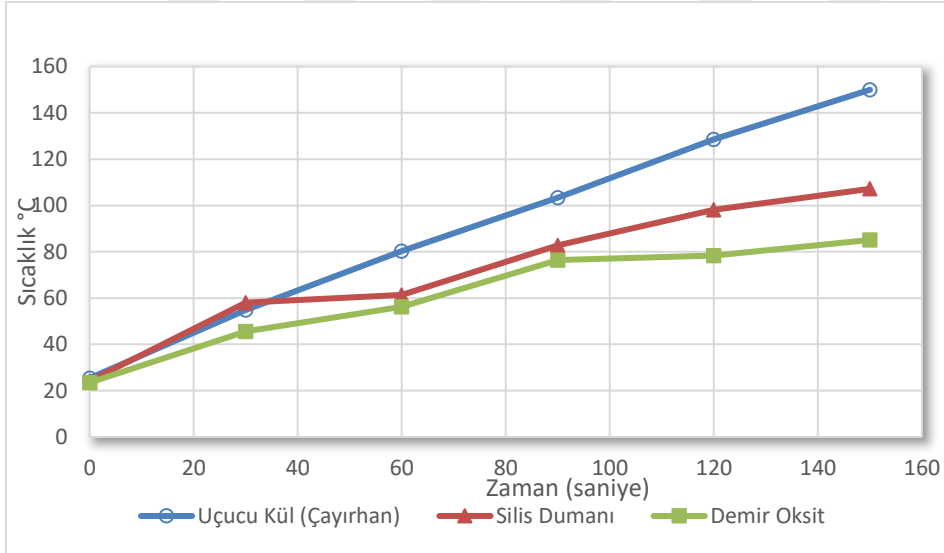
Deneyde kullanılan mikrodalga fırın 2450 Mhz çalışma frekansına sahip olan standart ev tipi mikrodalga fırındır. Cihazın ısıtma gücü 800 W olarak, tam güçte kullanılmıştır.

3.5. Uçucu Kül ve Diğer Malzemelerin Isınma Hızlarının Belirlenmesi

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan mikrodalga soğurucu malzemenin seçiminde ön deneyler yapılmıştır. Ön deneye tabi tutulan malzemeler uçucu kül, silis dumanı ve demir (III) oksittir. Bu malzemelerin seçiminde çevre kirlenici, atık malzemeler olması ve mikrodalgada ısınma kabiliyetleri açısından metal oksitleri içermesi dikkate alınmıştır. Malzemeler etüvde sabit ağırlığa kadar kurutulduktan sonra oda sıcaklığına gelene kadar beklenmiştir. Daha sonra bu malzemeler mikrodalga fırında ısıtılmış ve her 30 saniyede bir çıkarılarak sıcaklıkları daldırma tipi termometre ile ölçülmüştür. Bu malzemelerin mikrodalga fırında ısınma hızları Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu sonuca göre en hızlı ve yeterli ısınma, uçucu küldür olduğu için uçucu kül asfalt karışımında filler olarak kullanılmıştır.



Resim 3.1. Deneide kullanilabilirliđi test edilen malzemeler



Şekil 3.2. Uçucu kül, silis dumanı ve demir (III) oksit malzemelerinin ısınma mikrodalga fırında ısınma hızları

Karışıma ilave edilen uçucu kül Çayırhan Termik Santralinden temin edilmiş olup, bu malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kullanılan uçucu külün birim hacim ağırlığı Le Chatelier balonu ile bulunmuş olup $2,43 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu [139]

Uçucu külün kimyasal kompozisyonu (%)			
SiO ₂	46,6	Na ₂ O	1,01
Al ₂ O ₃	12,4	K ₂ O	2,28
Fe ₂ O ₃	9,74	SO ₃	5,52
CaO	14,5	Kızdırma kaybı	1,08
MgO	7,23		

3.6. Numunelerin Hazırlanması

Deneyde kullanılan numuneler bitüm, agrega ve fillerden oluşan asfalt karışımıdır. Numunelerin hazırlanmasındaki ilk aşama optimum bitüm oranının tespit edilmesi olmuştur. Optimum bitüm oranı bulunduğundan sonra numunelerin üretilmesine geçilmiştir.

3.6.1. Optimum bitüm oranının bulunması

Asfalt karışımında kullanılacak bitüm oranını belirlemek için Marshall deneyi (ASTM D1559-89, ASTM D6927-15) yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle yüzey alanı metodu kullanılarak 6 farklı bitüm oranı belirlenmiştir. Belirlenen bitüm oranlarındaki numuneler aşağıda verilen işlem sırasında üretilmiştir.

- Uygun gradasyonda hazırlanan agrega ve bitüm etüvde 150 °C'ta kadar ısıtıldı.
- Isıtılan agrega ve bitüm etüvden alındı ve daha önceden belirtilen bir oranda karıştırılarak bitümlü karışım hazırlandı.
- Karışımlar önceden ısıtılan Marshall kalıplarına dökülerek, otomatik Marshall kompaktöründe, her iki yüzüne de 75'er darbe ile sıkıştırıldı.
- Numune soğuduktan sonra, kalıptan çıkarıldı.
- Daha sonra numunenin özgül ağırlığını ve boşluk oranını hesaplamak amacıyla, numune havada ve suda tartıldı ve boyutları ölçülerek üzerine etiket yerleştirildi.



Resim 3.2. Agrega, bitüm ve Marshall kalıbının etüvde ısıtılması

Hazırlanan numunelerin Marshall stabilite ve akma değerlerini ölçmek için numuneler 60 °C su banyosunda, 30-45 dk bekletilerek uygun sıcaklığa ulaşması sağlandı. Sudan çıkarılan numuneler 20 saniye içinde Marshall stabilite cihazında yüklenerek Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edildi.

Elde edilen değerlerden yararlanarak optimum bağlayıcı oranını aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

A: Maksimum birim ağırlığı veren asfalt çimentosu oranı yüzdesi,

B: Maksimum Marshall stabilitesini sağlayan asfalt çimentosu yüzdesi,

C: Şartnamede belirtilen boşluk oranı yüzdesini sağlayan asfalt çimentosu yüzdesi,

D: Şartnamede belirtilen bağlayıcı ile dolu agregaya boşluğu yüzdesini sağlayan asfalt çimentosu yüzdesi olmak üzere, optimum bağlayıcı oranı R aşağıdaki bağıntı ile bulunmuştur.

$$R = \frac{(A + B + C + D)}{4} \quad (3.1)$$

Optimum bitüm oranı ağırlıkça kullanılan agregaya oranla %5,20 olarak bulunmuştur. Bu oranda hazırlanan bir kontrol grubu numune ve bir uçucu kül grubu numunenin özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Bulunan bu değerler Karayolları Teknik Şartnamesinde aşınma tabakası için verilen değerlere uygun olup deneyde bu karışım oranları kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Marshall deneyi sonucu belirlenen asfalt karışımının özellikleri

Filler olarak kalker tozu kullanılan numune özellikleri	
Filler (ağırlıkça), %	6
Bitüm (ağırlıkça), %	5,20
Birim ağırlık, gr/cm ³	2,40
Boşluk, %	2,00
Bitümle dolu boşluk (VFA), %	85,18
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	13,52
Marshall Stabilitesi, kN	10,33
Akma, mm	4,55
Filler olarak uçucu kül kullanılan numune özellikleri	
Filler (ağırlıkça), %	6
Bitüm (ağırlıkça), %	5,20
Birim ağırlık, gr/cm ³	2,40
Boşluk, %	2,03
Bitümle dolu boşluk (VFA), %	85,03
Agregalar Arası Boşluk (VMA), %	13,54
Marshall Stabilitesi, kN	12,21
Akma, mm	3,78

3.6.2. Numunelerin üretilmesi

Deneyde kullanılan numune grupları

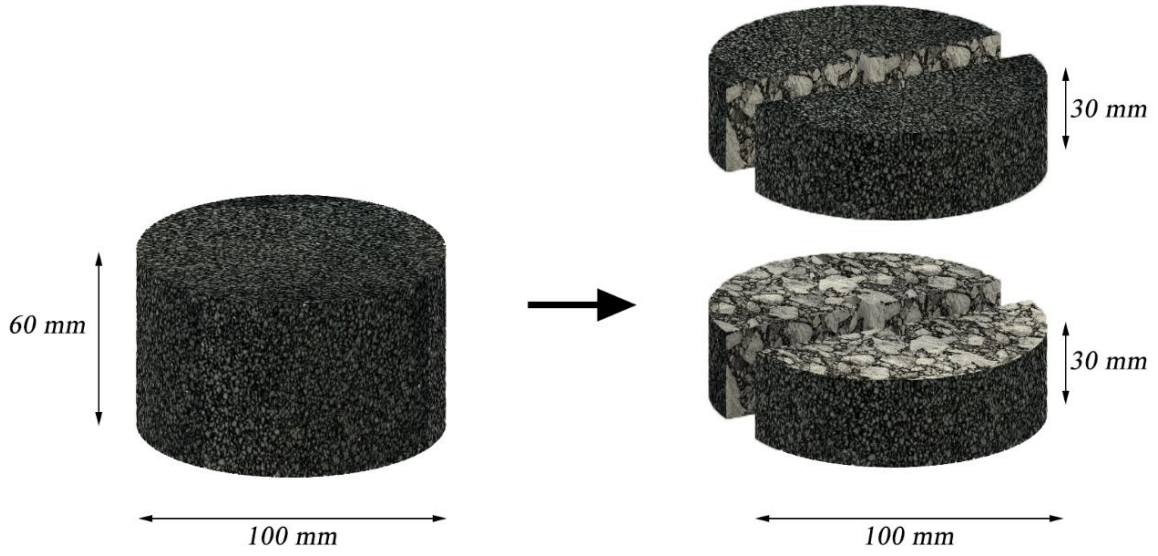
Deneyde iki numune grubu kullanılmıştır. Birinci tip kalker agregası, filler olarak kalker tozu ve bitümden oluşan kontrol (K) grubudur. İkinci tip ise kalker agregası, filler olarak uçucu kül ve bitümden oluşan uçucu kül (UK) grubudur. Oluşturulan numune grupları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Oluşturulan numune grupları

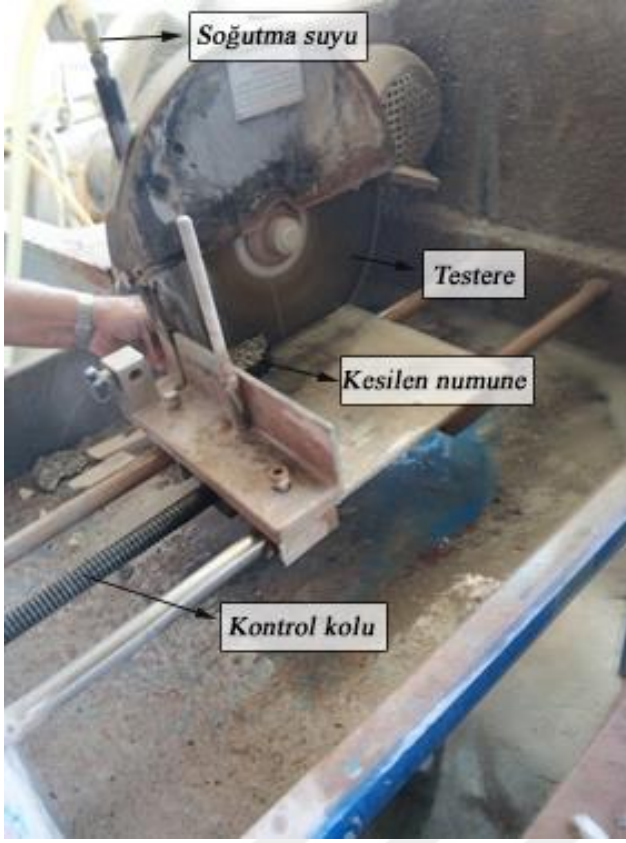
Numune Grubu	Numune İçeriği
Kontrol Numuneleri (K)	Bitüm+ Agregası+ Kalker Tozu
Uçucu Kül Numuneleri (UK)	Bitüm+ Agregası+ Uçucu Kül

Yarı silindirik numunelerin oluşturulması

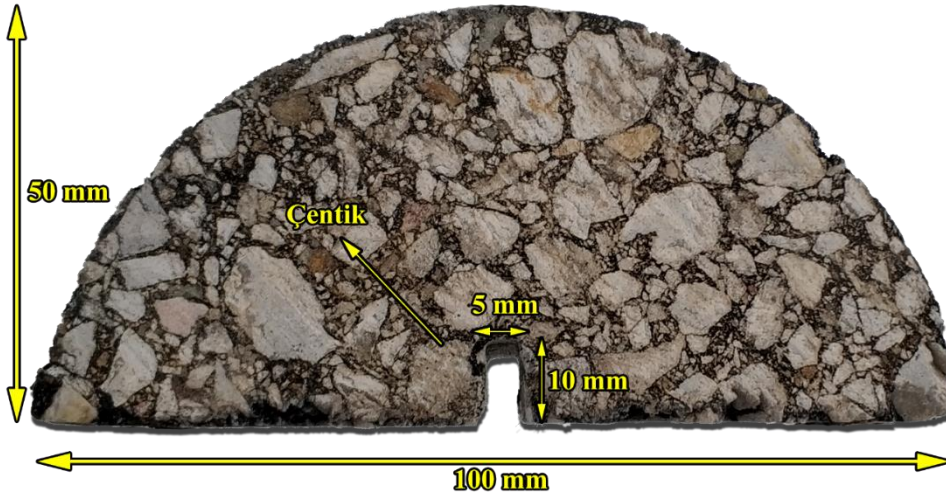
Marshall numunelerinin hazırlanması kısmındaki yol izlenerek 65-67 mm yüksekliğinde ve 101,6 mm çapında silindir asfalt numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu numuneler simetri eksenleri boyunca kesilerek 4 adet yarı silindir numune elde edilmiştir (Resim 3.3). Deney sırasında çatlakların oluşumunun kontrollü olması için, yarı silindirik numunelerin düz yüzeyine eni 5 mm ve derinliği 10 mm olan bir çentik yapılmıştır. Kesim işleminden sonra ıslanan numunenin kuruması için bir gün süreyle beklenmiştir.



Resim 3.3. Yarı silindirik numunenin kesildikten sonraki görüntüsü



Resim 3.4. Silindir numunelerin kesilerek yarı silindir numunelerin oluşturulması



Resim 3.5. Deneyde kullanılan yarı silindirik numune boyutları



Resim 3 6. Deneyde kullanılan kontrol ve uçucu kül (UK) numuneleri

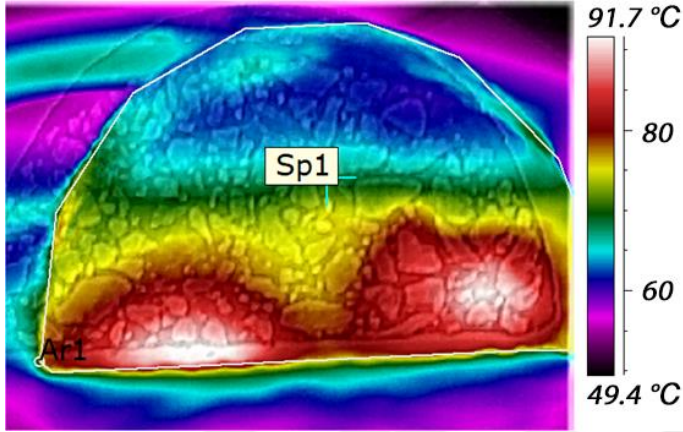
3.7. Isınma Hızlarının Belirlenmesi

Isınma hızlarının belirlenmesi deneyinde bir adet UK numunesi ve bir adet kontrol numunesi mikrodalga fırında ısıtılmış ve sabit zaman aralıklarında sıcaklıkları ölçülmüştür. İlk deneyde numunelerin yüzey ve iç sıcaklıkları ölçülürken, ikinci bir deneyde yalnız iç sıcaklıkları ölçülmüştür.

3.7.1. Numunelerin ortalama yüzey sıcaklığının (OYS) ölçümü

Numunenin yüzey sıcaklığı ölçülürken, ölçümlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla, deney sonunda yüzey sıcaklığının yanı sıra iç sıcaklığı da ölçülmüştür. Bu amaçla yarı silindirik numuneden biri alınmış ve termometrenin gireceği genişlikte ve yaklaşık 2 cm derinliğinde bir delik açılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığındaki numune mikrodalga fırına koyularak ısıtılmaya başlanmıştır. Numune fırından 20 saniye aralıklarla çıkarılarak yüzey sıcaklığı ve sıcaklık dağılımı termal kamera ile belirlenmiştir. Ölçümler 120 s sonuna kadar devam etmiş, 120 saniyenin sonunda ise daldırma tipi termometre ile iç sıcaklığı da ölçülmüştür. Elde edilen termal kamera görüntüleri bilgisayar ortamında düzenlenerek her numunenin ortalama yüzey sıcaklığı (OYS) tespit edilmiştir. OYS elde edilirken termal görüntü

bilgisayar ortamında düzenlenerek, her bir piksele ait sıcaklık verisi elde edilmiş ve numunenin sınırladığı alan içerisindeki bütün piksellere ait sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri üç kere tekrarlanmış, elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



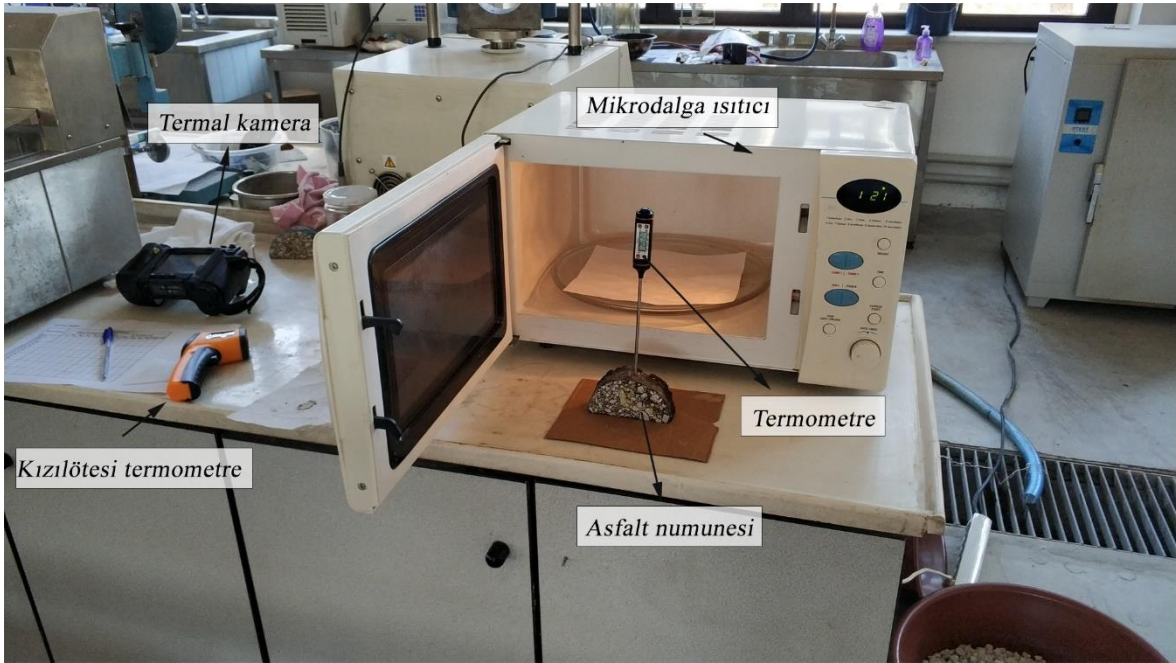
Resim 3.7. Termal kamera ile elde edilen bir görüntü örneği



Resim 3.8. Numunenin termal kamera ile görüntülenmesi işlemi

3.7.2. Numunelerin iç sıcaklığının ölçümü

İkinci bir sıcaklık hızı deneyinde ise yarı silindirik numunenin üzerine açılan delikten daldırma tipi termometre yardımı ile yalnız iç sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçümler her 20 saniyede bir numune çıkarılarak yapılmış olup 120 saniye sonuna kadar devam edilmiştir. Daldırma tipi termometreyle ölçüm yapılırken 1-1,5 dk süreyle ölçümün bitmesi beklenmiştir. Son olarak numune, oda sıcaklığında bırakılarak soğutulmuş ve aynı deney iki kere daha tekrarlanarak, üç deneyden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.



Resim 3.9. Numunenin iç sıcaklığının ölçülmesi işlemi

3.8. İyileşme Performansının Belirlenmesi

İyileşme seviyelerinin tayini için yarı silindirik numune için üç noktalı eğilme deneyi kullanılmıştır (ASTM D8044-16). Bu amaçla ilk önce eğilme testi için kullanılacak mesnetlerin dizaynı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numune üç noktalı eğilme deneyinde, kırılana kadar yüklenip numuneye bir hasar verilmiştir ve kırılmadan önceki maksimum kuvvet eğilme dayanımı olarak belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise hasar görmüş numune mikrodalga ile iyileştirilmiş ve tekrar eğilme dayanımı belirlenmiştir. Bulunan ikinci eğilme dayanımı ilk eğilme dayanımına oranlanarak iyileşme oranı elde edilmiştir.

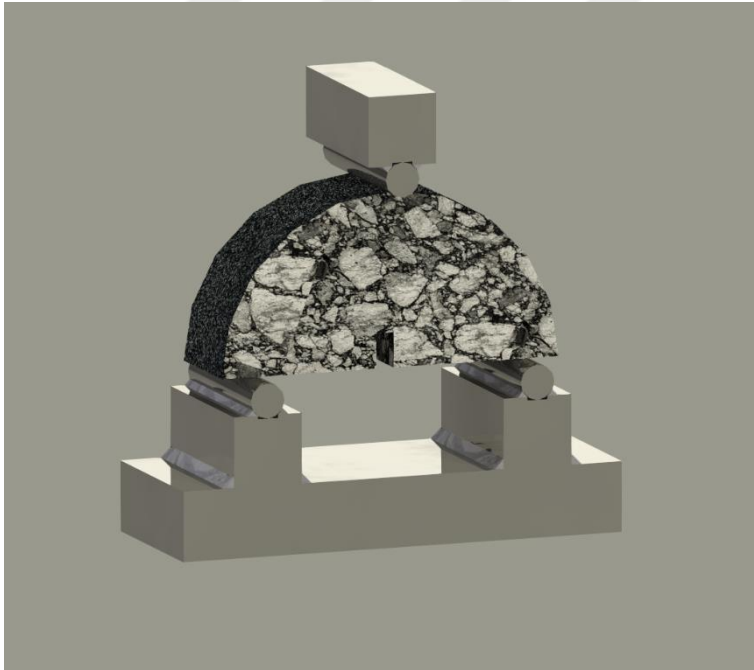
[106]. Elde edilen ilk eğilme dayanımı F_1 ve ikinci eğilme dayanımı F_2 olmak üzere, iyileşme oranı S aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$S = \frac{F_2}{F_1} \quad (3.2)$$

Daha sonra deney bir kez daha tekrarlanarak aynı numunenin ikinci kez iyileşmesi sağlanmıştır (bkz. Şekil 3.3). İlk aşamada bulunan iyileşme oranı S_1 ikinci aşamada bulunan iyileşme oranı S_2 olarak adlandırılmıştır. İkinci iyileşme oranı da aynı şekilde, son bulunan eğilme dayanımının (F_3) ilk eğilme dayanımına (F_1) oranlanmasıyla bulunmuştur.

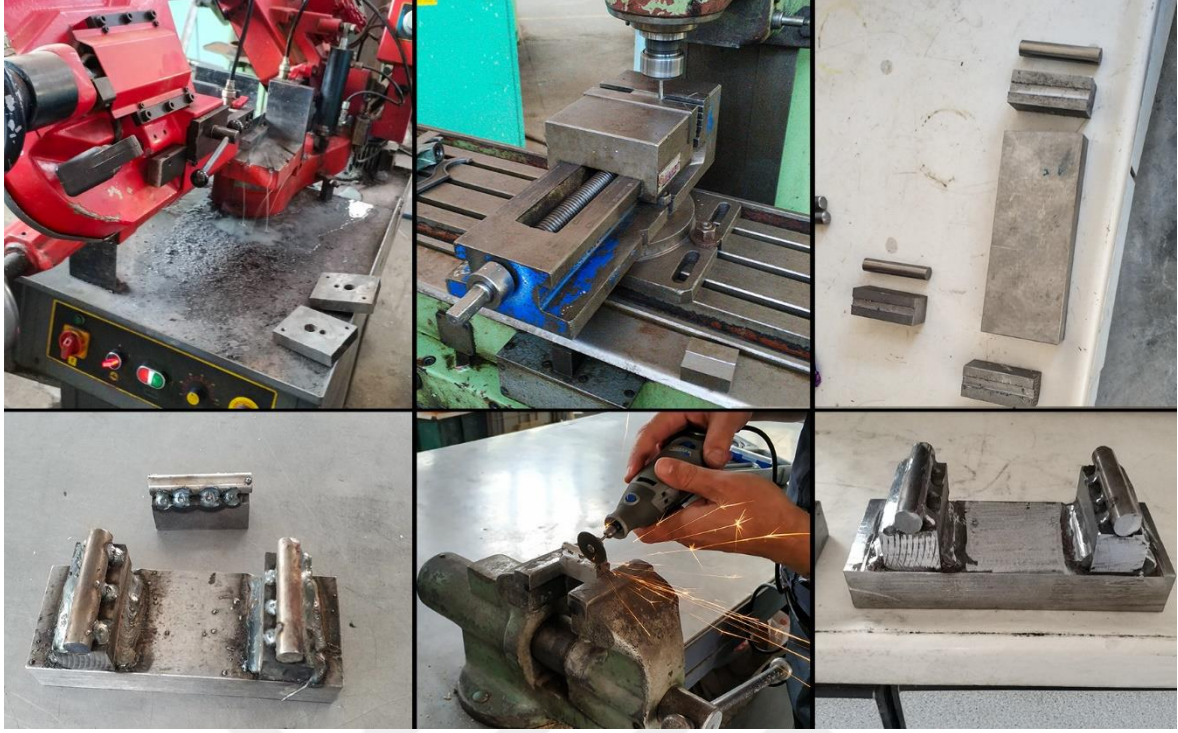
3.8.1. Eğilme deneyinde kullanılan mesnetlerin üretimi

Eğilme deneyinde kullanılmak üzere çelikten bir mesnet düzeneği tasarlanmıştır. Bu tasarıma göre mesnet açıklığı 80 mm olarak belirlenmiştir. Düzeneğin tasarımı Resim 3.10'da verilmiştir.



Resim 3.10. Çelik mesnetlerin Autocad ortamında tasarlanması işlemi

Düzeneğin üretimi için metal plakalar metal testeresiyle kesildikten sonra freze ile gerekli şekil verilmiş ve son olarak kaynak ve taşlama yapılarak son hali elde edilmiştir. Üretim aşaması Resim 3.11'de verilmiştir.

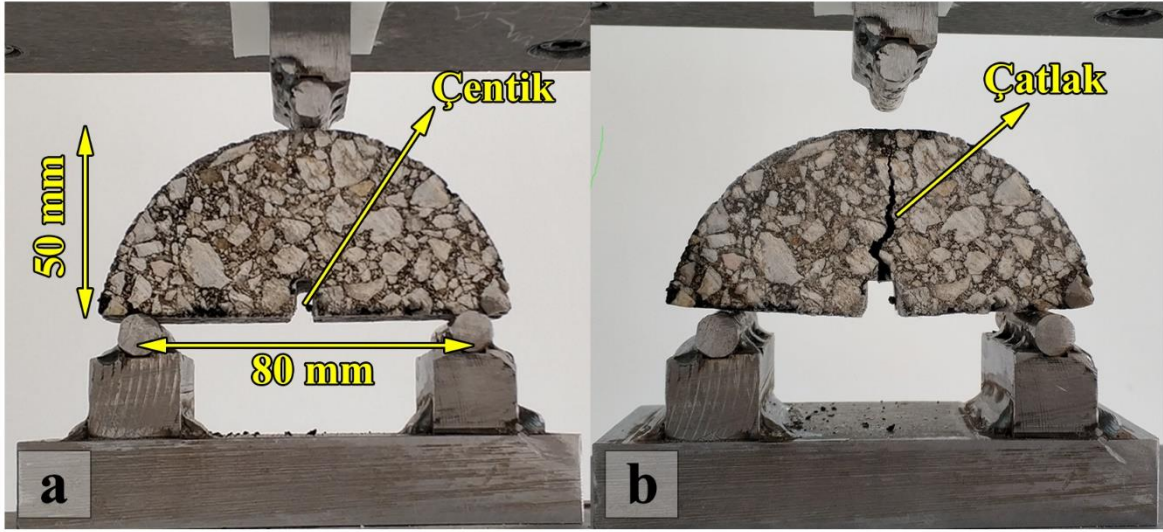


Resim 3.11. Eğilme deneyinde kullanılacak çelik mesnetlerin üretim aşaması

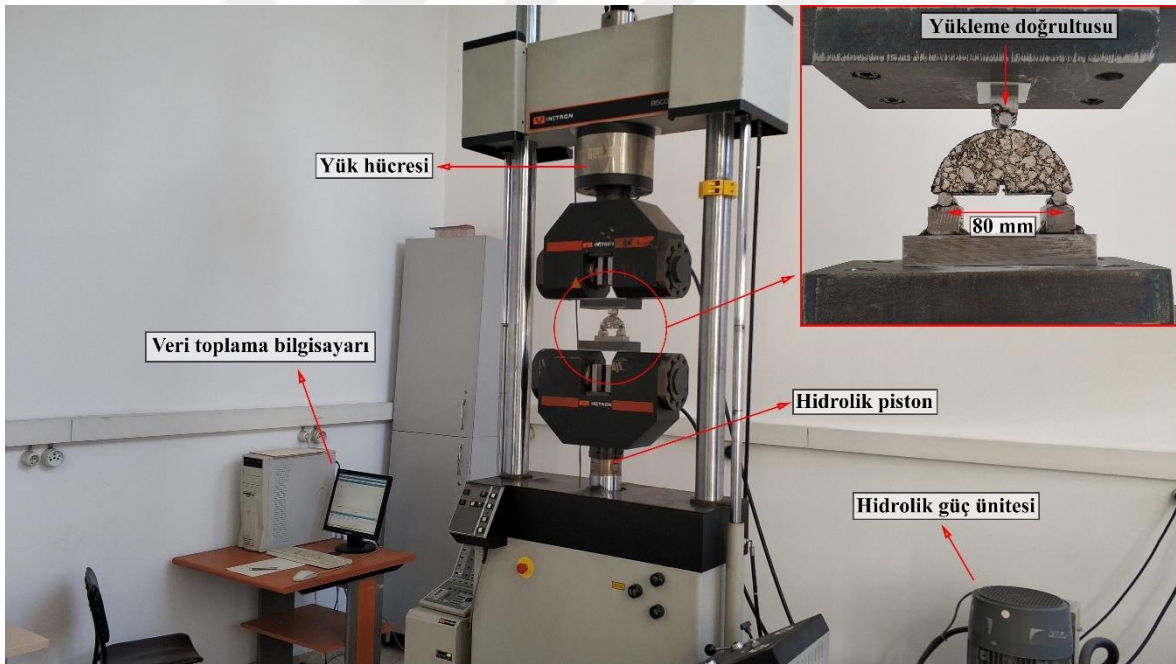
3.8.2. Üç noktalı eğilme deneyi

Kullanılan deney düzeneği

Üç noktalı eğilme deneyi için Instron 8503 cihazı kullanılmıştır (Resim 3.13). Daha önce üretilmiş olan mesnetler cihaza monte edilmiş ve cihazın gerekli ayarları yapılmıştır. Yarı silindirik numune açıklığı 80 mm olan mesnetler arasına Resim 3.12’de görüldüğü gibi yerleştirilmiş ve orta noktasından yüklenecek şekilde üç noktalı eğilme deneyine hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.12. Üç noktalı eğilme deneyinde numunenin kırılması a) Yüklemeden önce numunenin yerleşimi b) Kırılan numunede çatlak oluşumu



Resim 3.13. Üç noktalı eğilme deney düzeneği



Resim 3.14. Numunelerin derin dondurucuda soğutma işlemi



Resim 3.15. Numune yüklenirken sıcaklığının kontrol edilme işlemi

Eğilme deneyine başlamadan önce numune $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de en az 3 saat bekletilerek kırılgan hale gelmesi sağlanmış ve böylece eğilme deneyinde gevrek kırılma olması sağlanmıştır (Resim 3.14). Numune yüklenirken $0,5\text{ mm/dk}$ deformasyon hızı kullanılmış olup cihazın yükleme kapasitesi 500 kN 'dur. Literatürdeki benzer çalışmalarda aynı yükleme hızının kullanıldığı

görülmektedir [71,102,108–110]. Numune kırıldığında numunenin taşıdığı maksimum kuvvet, eğilme dayanımı olarak kaydedilmiştir (Resim 3.12).

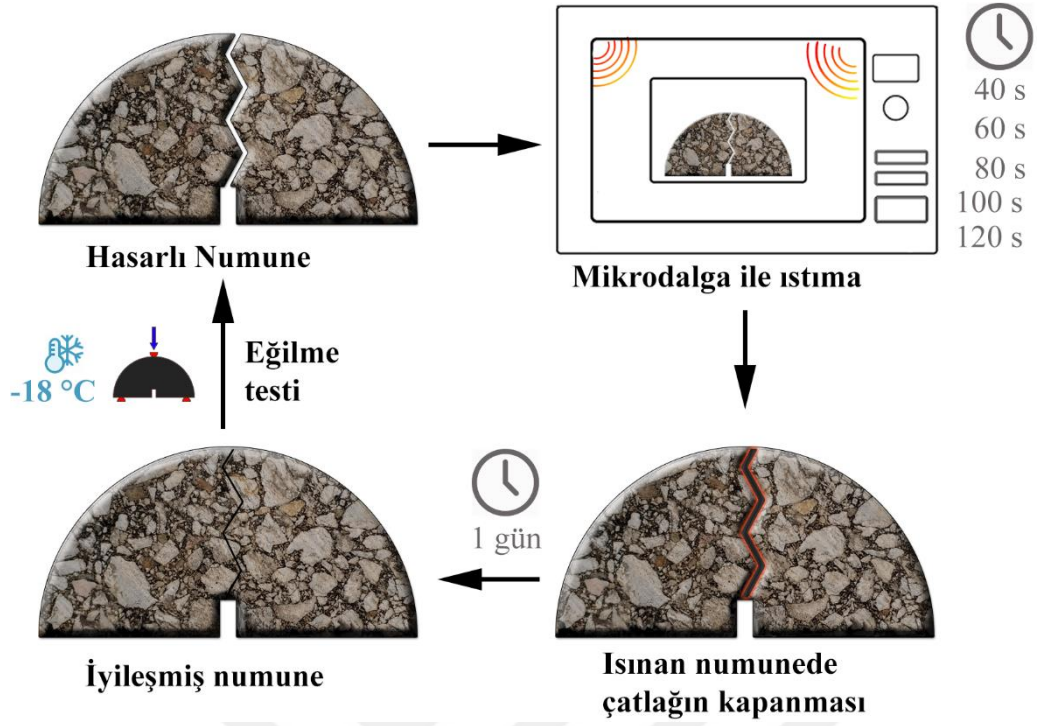
Kırılan numune ortam sıcaklığından daha soğuk olduğu için yüzeyinde nem yoğunlaşması meydana geleceği için numune yüzeyindeki nem, mikrodalga ısıtması deneyinde normalden fazla ısınmaya neden olması muhtemeldir. Bunu önlemek için numune, bez veya kâğıt havluya sarılı halde en az 3 saat bekletilerek, numunenin sıcaklığının oda sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarda da aynı yol izlediği görülmektedir [25,102,108,110].

3.8.3. Numunelerin mikrodalga ısıtması ile iyileştirilmesi

Hasarlı numunelerin mikrodalga fırında belirli sürelerde ısıtılarak iyileşmesi sağlanmıştır. Isıtma süreleri 40, 60, 80, 100 ve 120 saniye olarak belirlenmiştir. Numune ısındıktan sonra numunenin sıcaklığı kızılötesi termometre ile ölçüldükten sonra bir gün süreyle bekletilerek kendi kendine iyileşmesi sağlanmıştır.



Resim 3.16. Numunelerin mikrodalga ısıtması ile iyileştirilmesi işlemi



Şekil 3.3. Mikrodalga ısıtması ile iyileştirme döngüsü



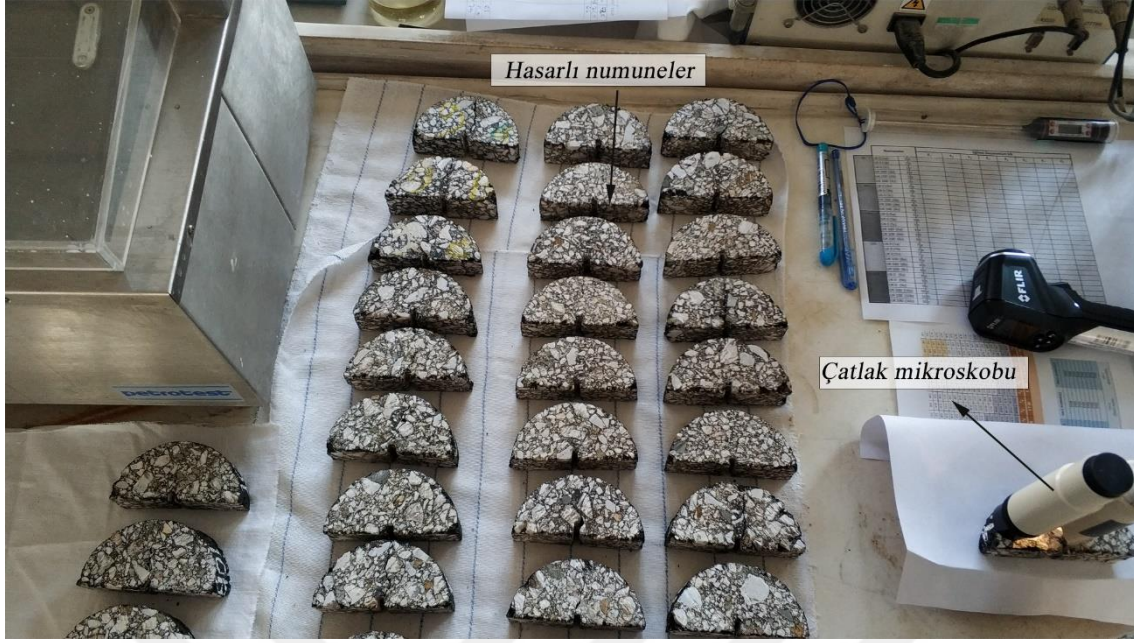
Resim 3.17. Mikrodalga ile ısıtılan numunelerin sıcaklığının kızılötesi termometre ile ölçümü

3.8.1. Çatlaklardaki iyileşmenin görsel olarak belirlenmesi

Hasar görmüş numunelerde meydana gelen çatlaklar iyileşmeden önce ve sonra fotoğraflanarak çatlağın iyileşme performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla 40x büyütme özellikli çatlak mikroskobu ve telefon kamerası kullanarak bir fotoğraflama düzeneği kurulmuştur (Resim 3.18).



Resim 3.18. Çatlak mikroskobu ile kurulan fotoğraflama düzeneği

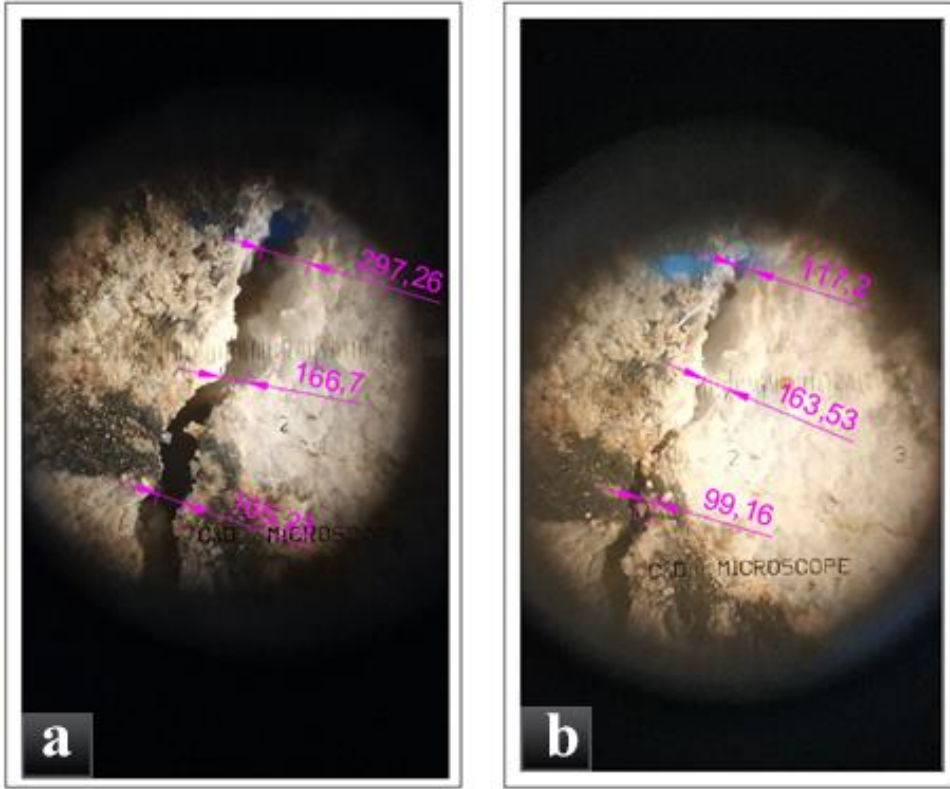


Resim 3.19. Çatlak mikroskobu ile numunelerin incelenmesi işlemi

Numunelerden elde edilen iyileşme öncesi ve sonrası çatlak fotoğrafları Autocad ortamına aktarıldıktan sonra çatlakların genişlikleri sayısal olarak belirlenmiş ve iyileşme öncesi ve sonrası durumu kıyas edilmiştir (Resim 3.20).

Çatlaktaki iyileşmeyi sayısal olarak ifade etmek için çatlak kapanma (CK) oranı adı verilen bir oran tanımlanmıştır. Çatlak kapanma oranı, iyileşmeden sonra, çatlak genişliğinde meydana gelen azalmanın, çatlağın ilk genişliğine oranlanmasıyla elde edilmiştir. İyileşmeden önceki çatlak genişliği d_1 ve iyileşmeden sonraki çatlak genişliği d_2 olmak üzere CK aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$CK = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \quad (3.3)$$



Resim 3.20. Autocad ortamında çatlak genişliklerinin belirlenmesi a) İyileşmeden önce b) İyileşmeden sonra



4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Isınma Hızları

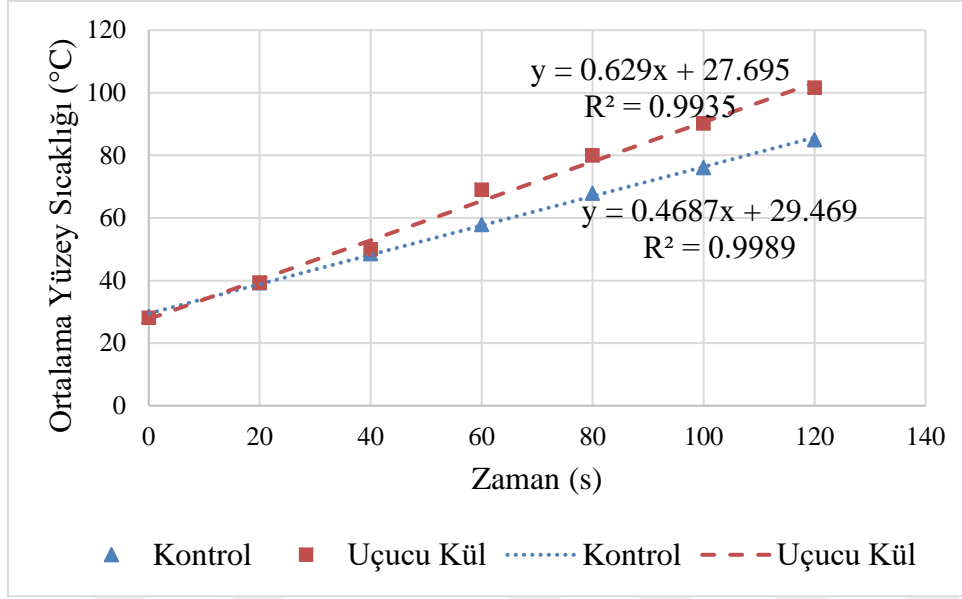
Yapılan deneysel çalışmanın, ısınma hızlarının belirlenmesi aşamasında, tezin materyal ve metot kısmında anlatıldığı gibi uçucu kül içeren numune ve kontrol numunesinin mikrodalga ısınma hızları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular alt başlıklar halinde verilmiştir.

4.1.1. Numunelerin ortalama yüzey sıcaklığı

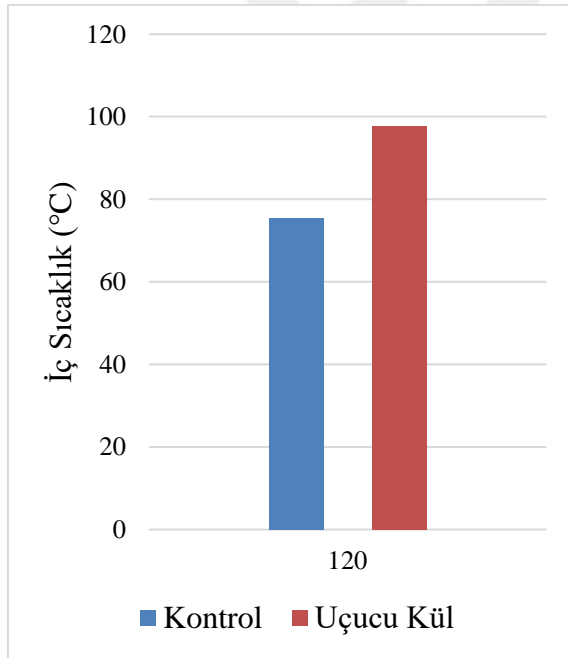
Termal kamera görüntülerinin bilgisayar ortamında değerlendirilmesiyle ortaya çıkan ortalama yüzey sıcaklıklarının (OYS), ısıtma zamanına göre değişimi Şekil 4.1’de görülmektedir. Grafikte, UK ve kontrol numunelerinin sıcaklıklarının oda sıcaklığından başlayıp, lineer bir şekilde arttığı, gözlenmektedir. Grafikte daha hızlı ısındığı görünen UK numunelerindeki bu artış ortalama %14’tür. Bu verilere ayrıca lineer regresyon analizi uygulanmış, anlamlı olduğu görülmüştür ve R^2 değerleri grafik üzerinde verilmiştir (Şekil 4.1).

Elde edilen termal kamera görüntüleri incelendiğinde ise sıcaklık dağılımlarının homojen olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak agrega karışımındaki mineralojik özellikleri farklı olan bazı agrega danelerinin aşırı ısınması olduğu düşünülmektedir (bkz. Resim 3.7).

Numunelerin yüzey sıcaklığı ölçülürken, bu ölçümlere ek olarak 120 s sonunda iç sıcaklık ölçümü de alınmıştır. Numunelerin 120 s sonunda ulaştığı sıcaklıklar ise Şekil 4.2’de sütun grafiği olarak verilmiştir. Bu ölçüm yüzey sıcaklığının doğruluk oranını artırmak için yapılmış olup, 120 s’de görülen sıcaklık değerleri, ortalama sıcaklık değerini doğrular niteliktedir.



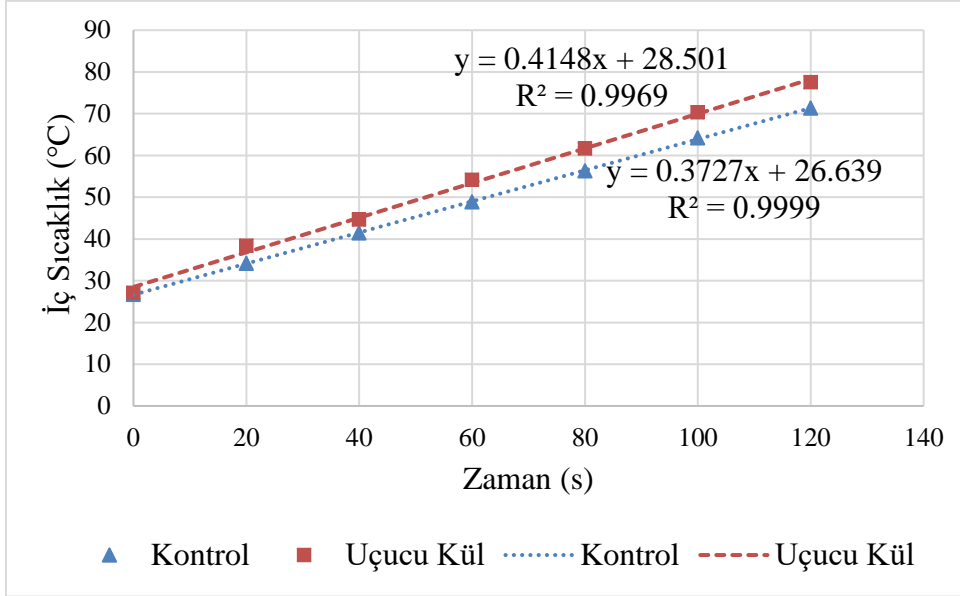
Şekil 4.1. Numunelerin termal kamera ile elde edilen ortalama yüzey sıcaklıkları



Şekil 4.2. Numunelerin 120 s sonunda ulaştığı iç sıcaklıklar

4.1.2. Numunelerin iç sıcaklığı

Numunelerin OYS ölçümünden sonra, aynı numunelerin bu sefer de yalnız iç sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu deneyde, önceki iç sıcaklık ölçümünde dikkate alınmayan ara sıcaklıklar da ölçülerek Şekil 4.3'teki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Numunelerin iç sıcaklıklarının zamana göre değişimi

Grafikte verilerin artış biçimi ve iki numune grupları arasındaki fark, OYS deneyindeki ile benzerlik göstermektedir. Buna karşın, her iki numune grubunda da 120 s sonunda ulaşılan sıcaklık verisi açıkça önceki deneyden düşüktür. Buradaki farkın, daldırma tipi termometre ile sıcaklık ölçümünün nispeten uzun sürmesi (1-1,5 dk) nedeniyle numunenin soğuması olduğu düşünülmektedir.

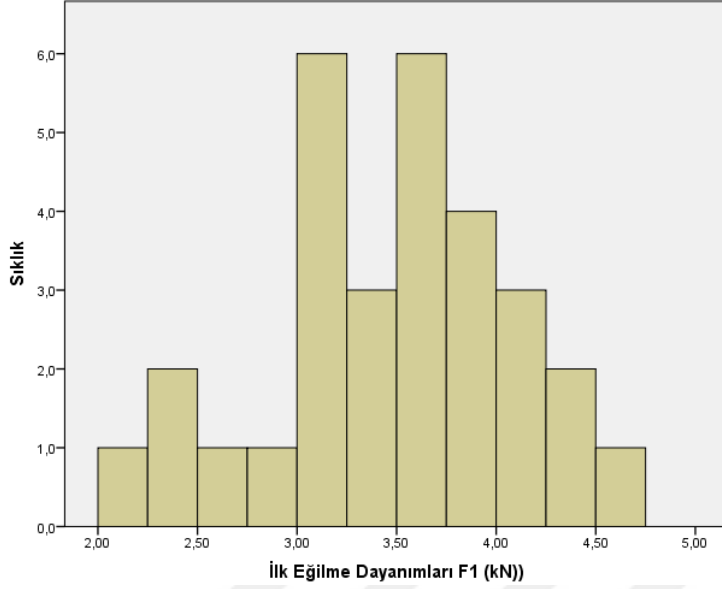
4.2. İyileşme Performansı

İyileşme performansının belirlenmesi aşamasında tezin materyal ve metot kısmında anlatıldığı şekilde bir dizi deneysel işlem yapılmıştır. Deneysel işlemler sırasıyla; üç noktalı eğilme deneyi, çatlak genişliklerinin ölçülmesi, mikrodalga ısıtması ile iyileştirme, tekrar çatlak genişliklerinin ölçümü ve tekrar eğilme deneyi şeklindedir. İyileşme performansı konusunda elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

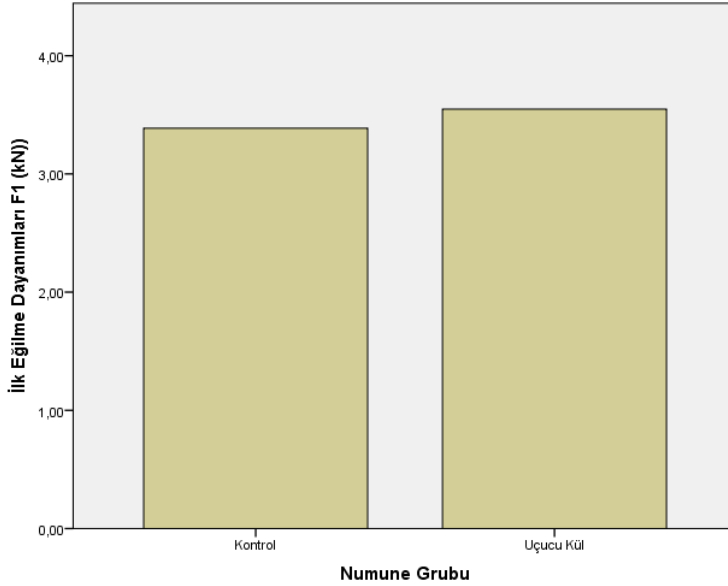
4.2.1. Eğilme dayanımları

Yapılan üç noktalı eğilme deneyleri neticesinde elde edilen veriler bu bölümde grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 4.4'te numunelerin ilk eğilme dayanımları histogram olarak gösterilmiştir. Eğilme dayanımı değerlerinin, normal dağılıma yakın olduğu görülmektedir bu yüzden numuneler arasında aykırı değerli bir numune yoktur çıkarımı yapılabilir.

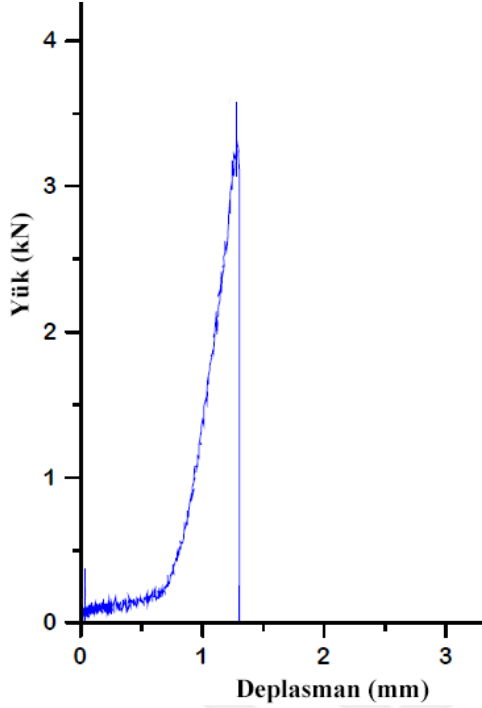
Şekil 4.5'te UK ve kontrol grubuna ait ilk eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. UK numunelerinin ortalama eğilme dayanımları, kontrol numunelerinkinden %5 daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre, uçucu külün asfalt betonunda filler olarak kullanımının, düşük sıcaklıktaki eğilme dayanımını artırdığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.4. Numunelere ait ilk eğilme dayanımlarının histogramda dağılımı



Şekil 4.5. Numune gruplarına ait ilk eğilme dayanımları

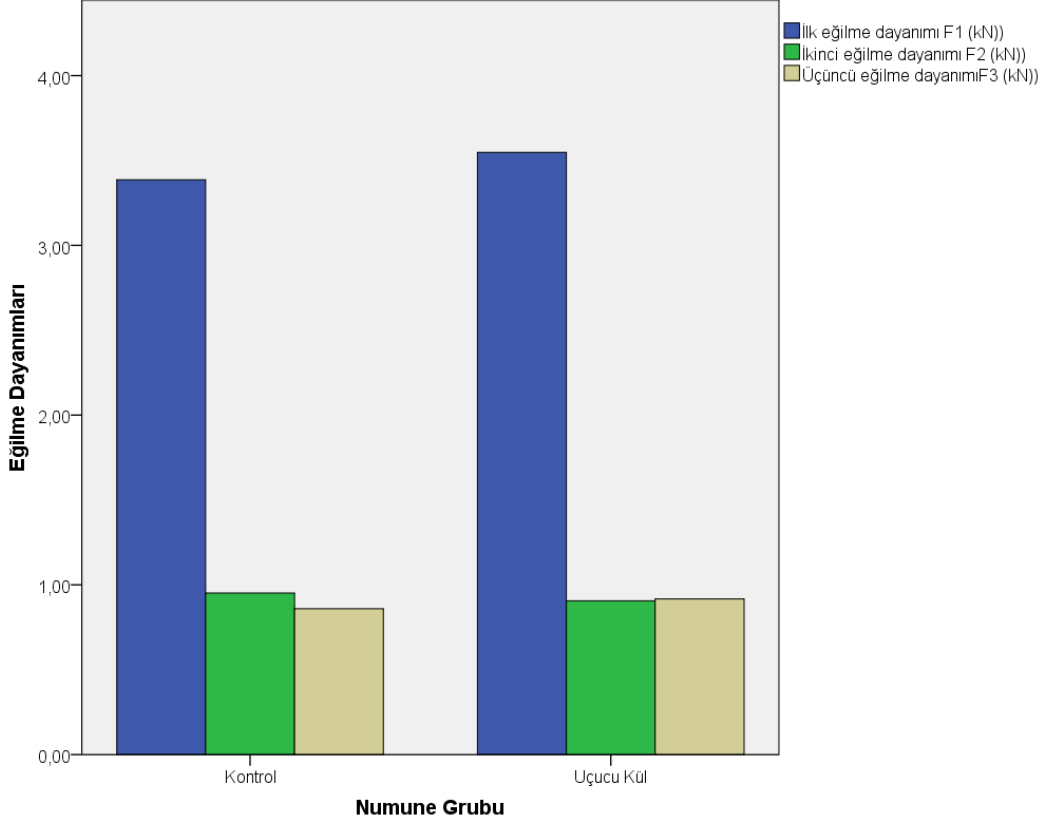


Şekil 4.6. Bir UK numunesinin eğilme deyiminde elde edilen yük-deplasman grafiği

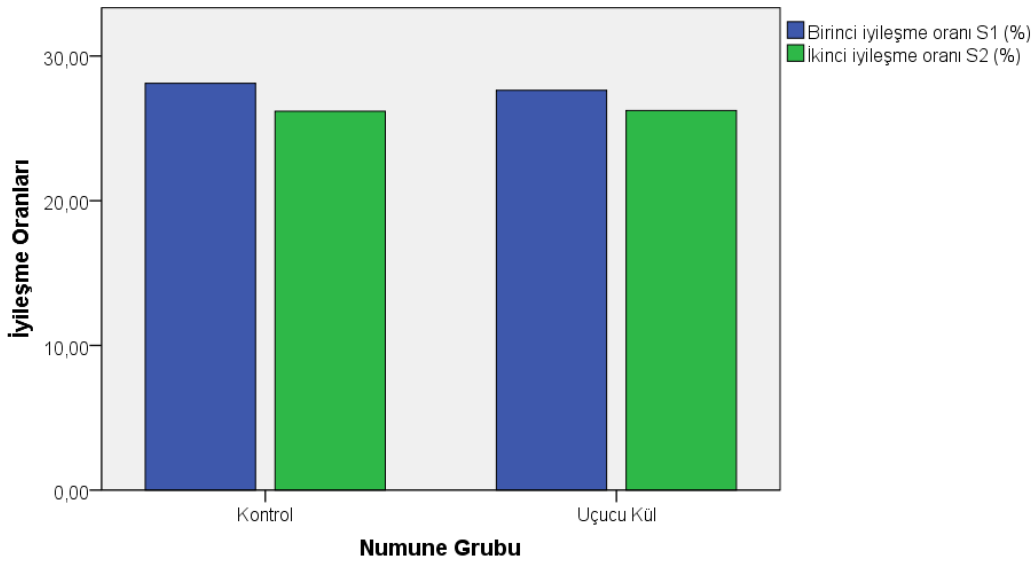
Bir UK numunesinin üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen yük deplasman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, deney sonucunda gevrek bir kırılma meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 4.7'de numune gruplarının, iyileşme döngüleri sonucu elde edilen birinci, ikinci ve üçüncü eğilme dayanımları verilmiştir. Burada elde edilen sonuç oldukça önemlidir. Numuneler ilk defa kırıldığında yüksek bir eğilme dayanımı elde edilirken, iyileşmelerden sonra ölçülen ikinci ve üçüncü dayanım birinciye göre oldukça düşüktür. Buna karşın ikinci ve üçüncü dayanımlar arasında dikkate değer bir fark yoktur. Bu sonucun, kullanılan asfalt karışımının yoğun gradasyonlu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Numuneler yoğun grasyonlu olduğu için, birinci yükleme testinde numunelerde meydana gelen hasarın büyük bir kısmı agrega danelerinde gerçekleştiği düşünülmektedir. Mikrodalga ile iyileşme metodu, bitümün ısınarak çatlakları doldurması prensibi ile gerçekleştiğinden, kırılan agrega danelerinin tekrar iyileşmesi mümkün olmamıştır. Bunun yerine bu çatlaklar kısmen bitümle dolmuş ancak tamamen iyileşmemiştir. Bu sebeple ilk iyileşmede görülen dayanımlar ile ikinci iyileşmede görülen dayanımlar, kırılan agrega danelerinin sınırladığı bir seviyeye kadar ulaşabilmiştir. İlk ve ikinci iyileşme seviyelerinin birbirine yakın değerlerde olduğu Şekil 4.8'de görülmektedir. Literatürde de yoğun gradasyonlu asfalt betonunda iyileşme

seviyesinin düşük olmasının nedeninin, hasar olurken agrega danelerinin büyük oranda kırılmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir [71].



Şekil 4.7. Numune gruplarına ait eğilme dayanımlarında görülen değişim

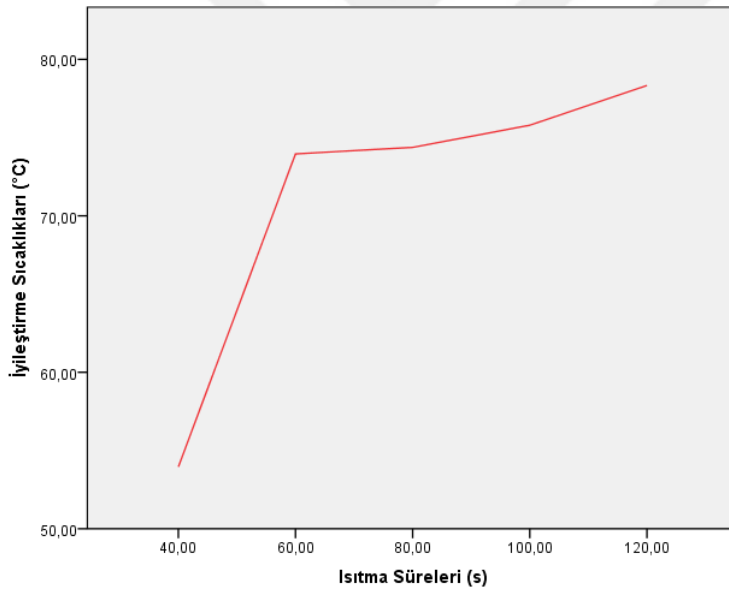


Şekil 4.8. Numune gruplarına göre ilk ve ikinci iyileşme oranları

Şekil 4.8’de eğilme dayanımlarının, ilk eğilme dayanımına oranlanmasıyla elde edilen iyileşme oranlarının durumu grafiksel olarak ifade edilmiştir. İkinci iyileşme oranlarının birinciye göre hafifçe azaldığı görülmektedir. Literatürde de yapılan benzer çalışmalarda, iyileşme döngülerinde görülen iyileşme oranlarının yavaş yavaş azaldığı ifade edilmiştir ve bu azalışın ısınma sonucu bitümün yaşlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [25].

4.2.2. Isıtma süreleri

Numuneleri iyileştirmek amacıyla yapılan ısıtma işlemi 40, 60, 80, 100 ve 120 s sürelerde mikrodalga fırın kullanılarak gerçekleştirilmiş ve numunenin ısıtma sonunda ulaştığı sıcaklık iyileşme sıcaklığı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler grafiksel olarak aşağıda verilmiştir.

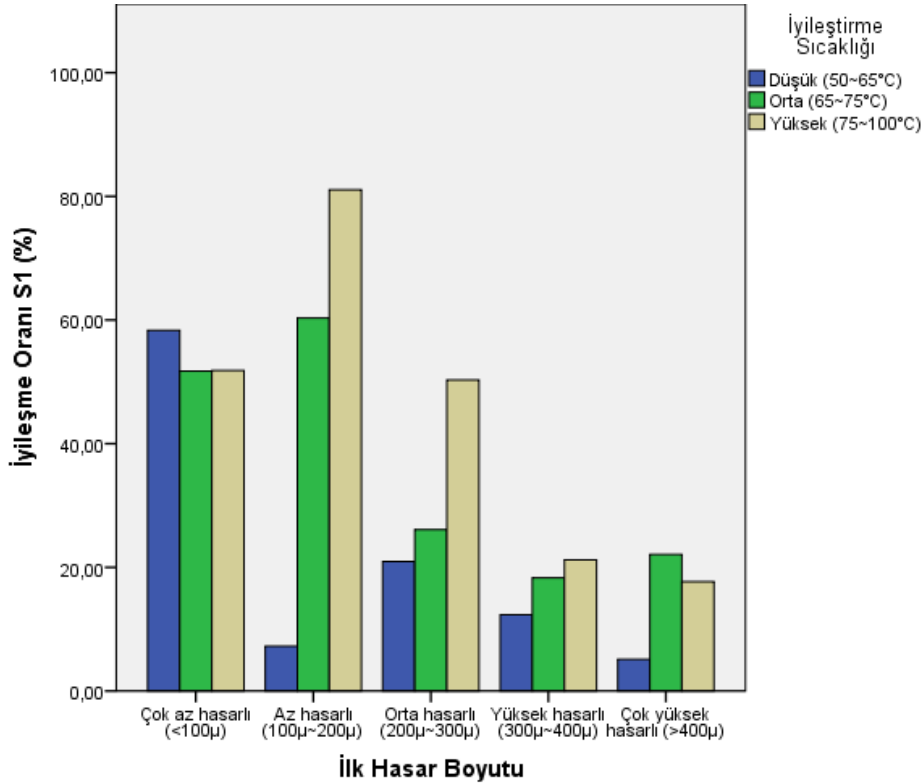


Şekil 4.9. İyileşme sıcaklıklarının ısıtma sürelerine göre değişimi

Şekil 4.9’de ısıtma süreleri ile iyileştirme sıcaklıkları arasındaki ilişki grafiksel olarak ifade edilmiştir. Isıtma süreleri ile iyileştirme sıcaklıkları arasında pozitif yönlü yüksek korelasyon olduğu ve ilişkinin anlamlı olduğu SPSS programında, Pearson korelasyon analizi ile hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısı 0,645 olarak bulunmuştur. Grafikte dikkat çeken bir diğer detay, iyileştirme sıcaklıklarının 40 s ile 60 s arasında, 60-120 s arasındaki eğime göre daha yüksek bir eğimle artmasıdır. Sıcaklık artışının genelde lineer olması kabul gördüğünden, bunun deney numunelerinden veya ölçümden kaynaklanan bir hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

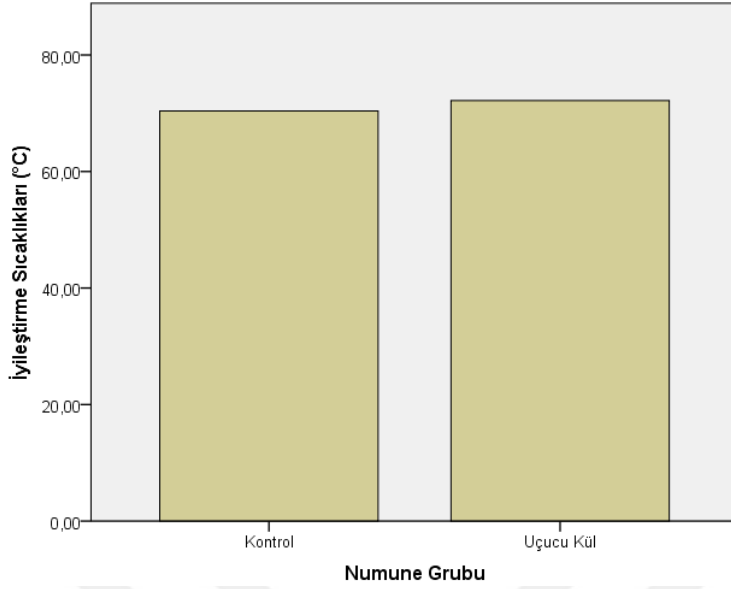
4.2.3. İyileştirme sıcaklıkları

Numunelerin mikrodalga ısıtması sonucu ölçülen iyileştirme sıcaklıkları ve iyileşme oranı arasındaki ilişki Şekil 4.10'da ilk hasar boyutlarına göre gruplandırılarak verilmiştir. Grafikte az, orta ve yüksek hasarlı numune gruplarında sıcaklık artışının iyileşme performansını artırdığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, mikrodalga iyileştirme sıcaklıklarındaki artışın, iyileşme oranlarını artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.10. İyileşme oranları ve iyileşme sıcaklıklarının ilk hasar boyutlarına göre gruplanarak karşılaştırılması

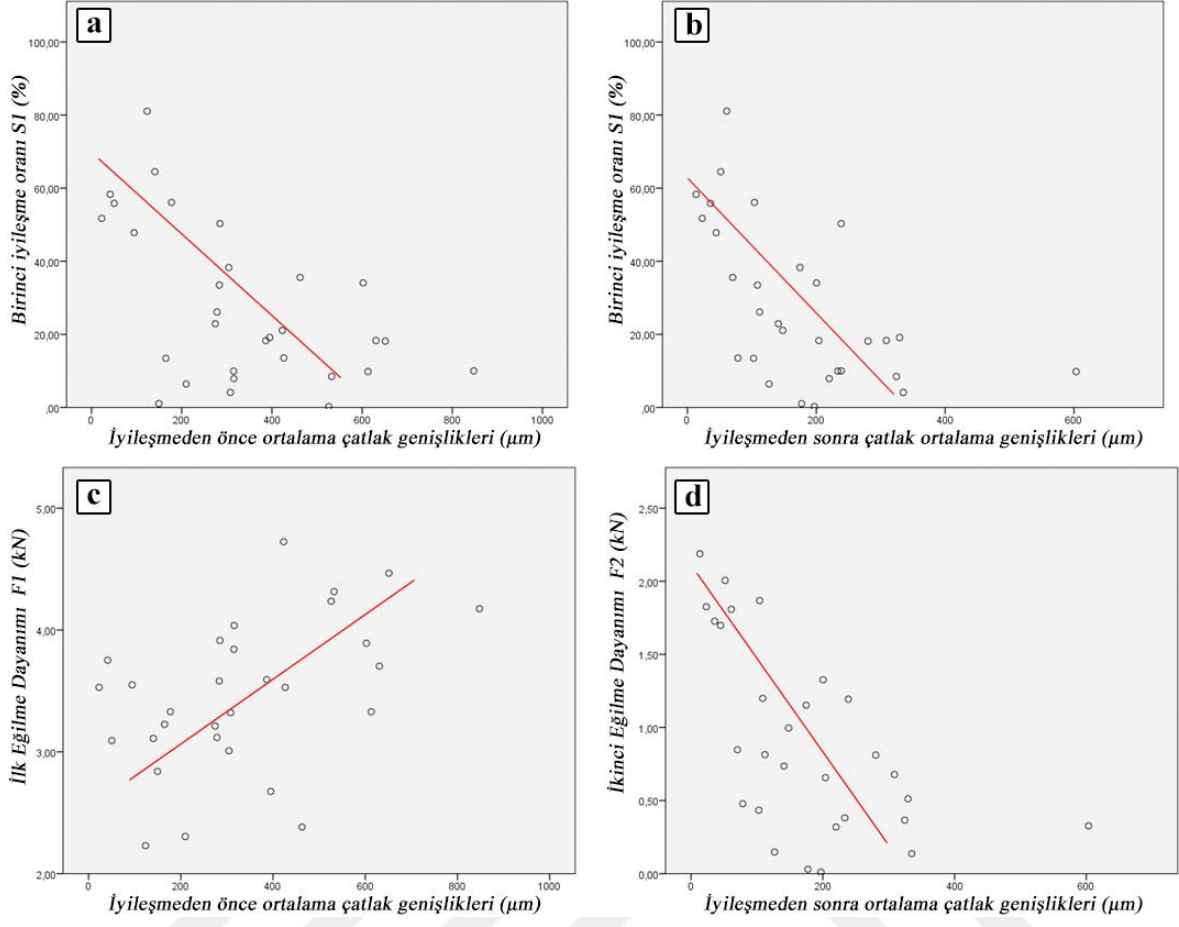
Numunelerin iyileştirilmesi esnasında ölçülen iyileştirme sıcaklıkları, numune grupları için Şekil 4.11'da grafiksel olarak ifade edilmiştir. Grafikte, uçucu kül kullanımının iyileşme sıcaklıklarını ortalama olarak %2 artırdığı görülmüştür. Bu artışın gerçekte daha yüksek olduğu ancak, asfalt karışımında kullanılan mineralojik özellikleri farklı olan bazı agrega danelerinin sonucu etkilediği tahmin edilmektedir.



Şekil 4.11. İyileştirme sıcaklıklarının numune gruplarına göre karşılaştırılması

4.2.4. Hasar boyutları

İyileşmeden önceki ve sonraki ortalama çatlak genişliklerinin, iyileşme oranı ve eğime dayanımları ile arasındaki ilişkiyi saptamak için, SPSS programında Pearson korelasyon analizi yapılmış olup sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kullanılan değişkenlere ait serpilme diyagramları ise Şekil 4.12’de verilmiştir. Numunedeki hasar boyutu arttıkça iyileşme oranının düştüğü görülmektedir. Hasarın boyutu sayısal olarak ifade edilirse 300 mikrondan büyük çatlaklarda %40’a kadar iyileşme görülmüştür, 200 mikrondan küçük çatlaklarda ise %60’a varan iyileşme görülmüştür (Şekil 4.12a).



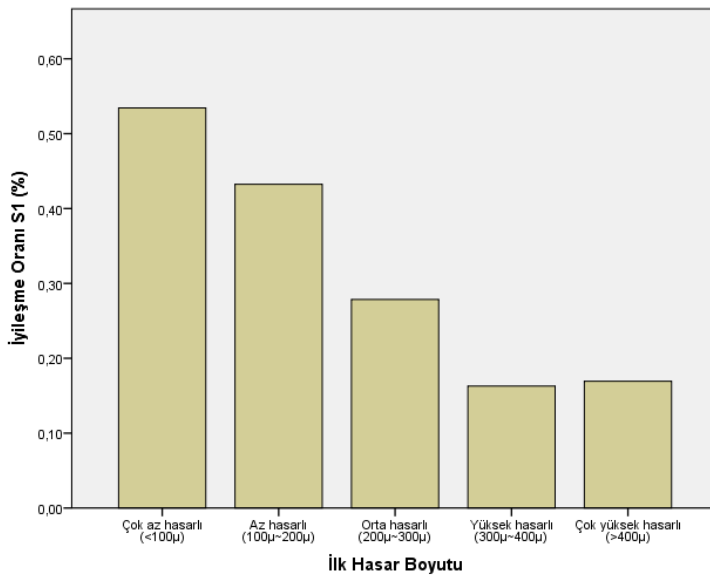
Şekil 4.12. Çatlak genişliklerinin diğer değişkenlerle ilişkisi a) İyileşmeden önce-birinci iyileşme oranı b) İyileşmeden sonra-birinci iyileşme oranı c) İyileşmeden önce-ilk eğilme dayanımı d) İyileşmeden sonra-ikinci eğilme dayanımı

Çizelge 4.1. SPSS programında yapılan Pearson korelasyon analizi

Değişkenler		r	P	Açıklama	Yorum
S ₁	İyileşmeden önceki çatlak genişlikleri	-0,552	0,002	-Negatif yönde anlamlı -Orta derecede korelasyon	Numunedeki hasar düzeyi arttıkça iyileşme oranı düşmekte, iyileştirme zorlaşmaktadır. Kapanan çatlaklar iyileşme oranını arttırmıştır Çatlak genişliği arttıkça, çatlakların kapanması zorlaşmaktadır.
S ₁	İyileşmeden sonraki çatlak genişlikleri	-0,579	0,010		
F ₂	İyileşmeden sonraki çatlak genişlikleri	-0,554	0,010		
F ₁	İyileşmeden önceki çatlak genişlikleri	0,461	0,010	-Pozitif yönde anlamlı -Orta derecede korelasyon	Eğilme dayanımı yüksek olan numunelerde daha büyük hasar oluşmaktadır.

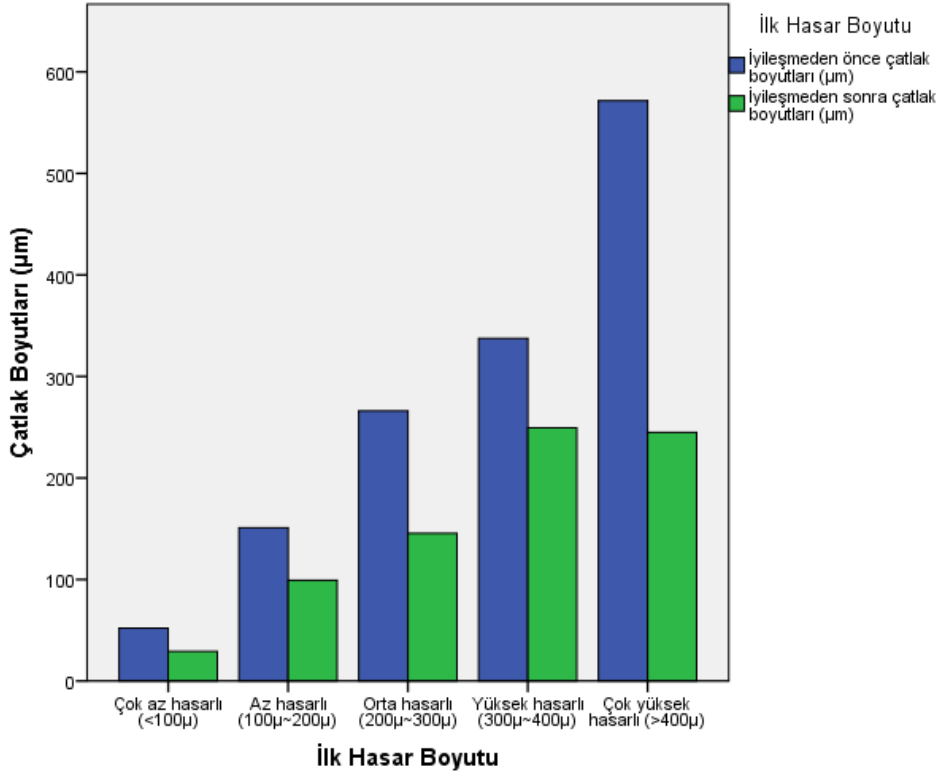
r: Pearson korelasyon katsayısı

Şekil 4.13'te iyileşme oranlarının ilk hasar boyutuna göre değişimi verilmiştir. Numunelerdeki ilk çatlak genişliği yani hasar boyutu arttıkça iyileşme performansının düştüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 4.13. Bütün numunelere ait ilk hasar boyutuna göre iyileşme oranları

Şekil 4.14'te iyileşmeden önce ve sonra ölçülen ortalama çatlak genişlikleri, hasar gruplarına göre grafiksel olarak ifade edilmiştir. İyileşmeden sonra çatlak genişliklerinde önemli miktarda (ortalama %47) azalma görülmektedir.



Şekil 4.14. Hasar boyutlarına göre iyileşmeden önce ve sonra ortalama çatlak genişlikleri

Çatlak kapanma (CK) oranı

Çatlakların iyileşmeden önceki ve sonraki boyutları kullanılarak çatlak kapanma (CK) oranı oluşturulduğundan, tezin materyal ve metot kısmında bahsedilmiştir. CK oranları ile iyileşme performansının bir göstergesi olan iyileşme oranları arasındaki ilişki olup olmadığını belirlemek için, bu iki değişken arasında, SPSS programında korelasyon analizi yapılmış ve aralarındaki ilişkinin anlamsız olduğu görülmüştür. İyileşme oranları, iyileşme performansının literatürde çoğunlukla kullanılan bir göstergesi olduğu için, çatlak kapanma oranının bu gösterge ile uyumsuz olmasından, çatlak kapanma oranının bu çalışmada iyileşme performansını yansıtmadığı düşünülmektedir. Yine de bu konuda daha kapsamlı araştırmalar yapılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında mikrodalga ısıtmasıyla kendi kendine iyileşen asfalt karışımında, uçucu kül kullanımının iyileşme ve ısıtma performansına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla filler olarak yalnız uçucu kül içeren UK numuneleri ve filler olarak yalnız kalker tozu içeren kontrol numuneleri bir dizi deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmanın ısınma hızlarının belirlenmesi aşamasında, uçucu külün asfalt betonunda kullanımının mikrodalga ısınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. İyileşme performansının belirlenmesi aşamasında ise üç noktalı eğilme deneyi ile hasar verilen numune, mikrodalga ısıtması ile iyileştirilerek, iyileşme performansı belirlenmiştir. İyileşme performansı belirlenirken, iyileşme oranı, çatlak kapanma oranı (CK) ve çatlak genişlikleri dikkate alınmıştır.

Sonuçlar

Isınma hızlarının belirlenmesi aşamasında, elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Mikrodalga ile ısıtılan numunelerdeki sıcaklık değişiminin lineer olduğu görülmüştür.
- Yapılan deneylerde, asfalt betonunda uçucu kül kullanımının, mikrodalga ısıtma hızını ortalama %14 oranında artırdığı görülmüştür.
- Elde edilen termal kamera görüntülerinden, sıcaklığın homojen dağılmadığı görülmektedir. Mineralojik özellikleri farklı olan bazı agrega danelerinin aşırı ısınarak sıcaklığın homojen dağılmamasına neden olduğu düşünülmektedir.
- Yapılan ölçümlerde OYS'nin, numunenin iç sıcaklığıyla benzeştiği, dolayısıyla mikrodalga ısınma etkisinin yalnız yüzeyle sınırlı kalmadığı anlaşılmıştır. Benzeşmeyen iç sıcaklık değerlerinin, ölçüm yaparken meydana gelen soğumadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada, numunelerin mikrodalga iyileşme performanslarının belirlenmesi aşamasında elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır;

- UK kullanımının düşük sıcaklık eğilme dayanımını %5 artırdığı görülmüştür.

- Isıtma süreleri ile iyileştirme sırasında ölçülen sıcaklıklar arasında yüksek korelasyon görülmüştür. Korelasyon katsayısı $r=0,645$ 'tir.
- Numuneler hasar boyutlarına göre gruplandırılarak, iyileşme performansı bakımından karşılaştırıldığında, optimum iyileştirme sıcaklığının 75-100 °C olabileceği görülmüştür.
- Numunelerdeki ilk hasar düzeyi arttıkça, iyileşme performansı düşmektedir. Çatlak genişliği 300 mikrondan fazla olan numunelerde %40'a kadar iyileşme görülürken, 200 mikrondan az olan numunelerde ise %60' varan iyileşmeler görülmüştür.
- İyileşme sonrası ölçülen çatlak genişlikleri ile iyileşme performansı ilişkilidir. İyileşme sonrası ölçülen çatlakların boyutu arttıkça, iyileşme performansının düştüğü görülmüştür.
- İlk eğilme deneyinde, numunelerde meydana gelen hasarın büyük kısmının agrega danelerinin kırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle, hasarlı numunelerin iyileştirilmesinde agrega danelerindeki iyileşme sınırlı kaldığı için, bu durum iyileşme performansını da sınırlamıştır.
- Birinci ve ikinci iyileşme oranları arasındaki farkın, sıcaklık etkisiyle, bitümün yaşlanması olduğu düşünülmektedir.
- Çatlak kapanma oranları ve iyileşme oranları arasında yapılan korelasyon analizi anlamlı değildir. Bu yüzden, bu çalışmada CK oranlarının iyileşme performansını temsil etmediği görülmüştür.
- Eğilme dayanımı yüksek olan numuneler ile eğilme deneyinde meydana gelen çatlak genişlikleri arasında pozitif yönlü orta derecede korelasyon olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle eğilme dayanımı yüksek olan numuneler daha yüksek hasar almışlardır. Eğilme dayanımı yüksek olan numunelerde eğilme deneyi yapılırken yükleme doğrultusunda bazı iri agrega danelerinin konumlanması ve bu yüzden daha gevrek kırılarak hasar boyutunun arttığı tahmin edilmektedir.
- Bu çalışmada bir çevre kirletici atık olan uçucu külün asfalt karışımında kullanılarak değerlendirilmesi ayrıca enerjiyi verimli bir şekilde kullanan mikrodalga ısıtmasının kullanılması, sürdürülebilir çevre açısından da önemlidir.

Asfalt betonunu numunelerin, mikrodalga ısıtmasıyla kendi kendine iyileşme performansı ortalama olarak değerlendirildiğinde, uçucu kül kullanımının etkileri sınırlı kalmasına rağmen bazı numune gruplarında iyileşme performansının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanında, laboratuvar ortamında öngörülemeyen bazı değişkenlerin sonuçları

etkileyebileceğinden, UK etkisinin uygulamada daha yüksek performans gösterebileceği ayrıca laboratuvar ortamında bulunan küçük farkların uygulamada büyük farklara dönüşebileceği öngörülmüştür. UK kullanımının kontrol numunelerine göre oluşturduğu farklar ise aşağıda verilmiştir.

- Düşük sıcaklık eğilme dayanımında ortalama %5 artış sağlamıştır,
- İyileşmeyi ortalama %2 azaltmıştır,
- İyileşme sıcaklıklarında ortalama %2 artış sağlamıştır,
- İlk eğilme deneyinde oluşan çatlak genişliğini ortalama %6 azaltmıştır,
- İyileşmeden sonraki çatlak genişliğinde ortalama %2 artışa neden olmuştur,
- Çatlak kapanma oranlarında ortalama %4'lük azalışa neden olmuştur.

Öneriler

- Asfalt betonunun mikrodalga ile kendi kendine iyileşmesi konusunda, uçucu kül kullanımının etkileri sınırlı kalmıştır. Fakat bu malzemenin asfaltın mekanik özelliklerini iyileştirebileceği bilindiğinden, çelik yünü gibi liflerle veya çelik cürufu agregası ile birlikte kullanılarak daha farklı sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.
- Optimum iyileşme süresi ve sıcaklığı konusunda elde edilen verilerin iyileştirilmesi amacıyla, uygulanan iyileşme süreleri 20 s yerine 10 s aralıklarla belirlenerek ve çalışmada sıcaklık kontrollü mikrodalga kullanarak çalışmaya hassasiyeti artırılabilir. Sonraki aşamada ise bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilebilir.
- Düşük düzeydeki hasarların iyileşmesi daha kolay olduğundan, uçucu kül kullanımının iyileşmeye olan etkisini, yorulma deneyiyle değerlendirmenin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- Deneylerde yoğun gradasyonlu asfalt numuneleri kullanıldığı için her iki numune grubunda da iyileşmenin sınırlı kaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle, uçucu külün yoğun gradasyonlu asfalt karışımı yerine, poroz asfalt karışımında kullanılmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- İyileşme sonrası ölçülen çatlak genişliklerinin, iyileşme performansının bir göstergesi olabileceği bu tez çalışmasında gözlemlenmiştir. Bu veri göz önünde bulundurulduğunda, iyileşme sonrası çatlak genişlikleri ölçülerek bir iyileşme denetim

mekanizması geliştirilmesinin, yöntemin sahada uygulanabilirliği açısından faydalı olabileceği düşünülmektedir.

- CK oranları ile iyileşme oranları arasındaki ilişki, farklı karışım tiplerinde incelendiğinde bu oranın iyileşme performansının bir göstergesi olabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. Türkiye İstatistik Kurumu (2011). *Ulaştırma İstatistikleri Özeti*. Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu Matbaası, 2-3.
2. Xu, S., García, A., Su, J., Liu, Q., Tabaković, A. and Schlangen, E. (2018). Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced Materials Interfaces*, 5 (17), 1–21.
3. Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 1-50.
4. Bazin, P. and Saunier, J. (1967). *Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes*. in: International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 553–569.
5. Shu, B., Wu, S., Dong, L., Norambuena-Contreras, J., Yang, X., Li, C., Liu, Q. and Wang, Q. (2019). Microfluidic synthesis of polymeric fibers containing rejuvenating agent for asphalt self-healing. *Construction and Building Materials*, 219, 176–183.
6. Sun, D., Sun, G., Zhu, X., Guarin, A., Li, B., Dai, Z. and Ling, J. (2018). A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement. *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 65–93.
7. Menozzi, A., Garcia, A., Partl, M.N., Tebaldi, G. and Schuetz, P. (2015). Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples. *Construction and Building Materials*, 74, 162–168.
8. Liu, Q., Schlangen, E., García, Á. and van de Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24 (7), 1207–1213.
9. Hayes, B.L. (2000). *Microwave Synthesis Chemistry at the Speed Light*. Matthews: Cem Publishing, 11-28.
10. Singh, S., Gupta, D., Jain, V. and Sharma, A.K. (2015). Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 30 (1), 1–29.
11. Gallego, J., Del Val, M.A., Contreras, V. and Páez, A. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*, 42, 1–4.
12. Croney, D. and Croney, P. (1991). *Design and Performance of Road Pavements*. (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 15-16.
13. Papagiannakis, A.T. and Masad, E.A. (2008). *Pavement Design and Materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 1-160.

14. Read, J. and Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. (Fifth Edition). London: Thomas Telford Publishing, 1-10.
15. Liao, M.-C., Chen, J.-S., Airey, G.D. and Wang, S.-J. (2014). Rheological behavior of bitumen mixed with Trinidad lake asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 361–367.
16. Maharaj, R. (2009). A comparison of the composition and rheology of trinidad lake asphalt and trinidad petroleum bitumen. *International Journal of Applied Chemistry*, 5 (3), 169–179.
17. Cai, L., Shi, X. and Xue, J. (2018). Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS. *Construction and Building Materials*, 172 204–211.
18. Li, R., Karki, P. and Hao, P. (2020). Fatigue and self-healing characterization of asphalt composites containing rock asphalts. *Construction and Building Materials*, 230, 116835.
19. Yaşar, E. (2015). Obtaining of modified bitumen with optimum quality through mixing of natural bitumen (gilsonite), bitumen and thinner oil. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 1 (3–4), 103–107.
20. Jahanian, H.R., Shafabakhsh, G. and Divandari, H. (2017). Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*, 131, 156–164.
21. Slesinski, A., Fic, K. and Frackowiak, E. (2018). New Trends in Electrochemical Capacitors. *Advances in Inorganic Chemistry*, 72, 247–286.
22. Sun, Y.H., Liu, Q.T., Wu, S.P. and Shang, F. (2014). Microwave Heating of Steel Slag Asphalt Mixture. *Key Engineering Materials*, 599, 193–197.
23. Cao, W., Liu, S. and Feng, Z. (2013). Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 41, 474–479.
24. Kamani, M. and Ajalloeian, R. (2020). The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape. *Construction and Building Materials*, 230, 117016.
25. Phan, T.M., Park, D.W. and Le, T.H.M. (2018). Crack healing performance of hot mix asphalt containing steel slag by microwaves heating. *Construction and Building Materials*, 180, 503–511.
26. Ezzat, E.N. and Abed, A.H. (2019). The influence of using hybrid polymers, aggregate gradation and fillers on moisture sensitivity of asphaltic mixtures. *Materials Today: Proceedings*.
27. Bessa, I.S., Branco, V.T.F.C., Soares, J.B. and Neto, J.A.N. (2015). Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (7), 04014212.

28. Kuang, D., Wang, X., Jiao, Y., Zhang, B., Liu, Y. and Chen, H. (2019). Influence of angularity and roughness of coarse aggregates on asphalt mixture performance. *Construction and Building Materials*, 200, 681–686.
29. Franesqui, M.A., Yepes, J., García-González, C. and Gallego, J. (2019). Sustainable low-temperature asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates and crumb rubber modified bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 207, 44–56.
30. Kvasnak, A., West, R., Michael, J., Loria, L., Hajj, E.Y. and Tran, N. (2010). Bulk Specific Gravity of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate: Evaluating the Effect on Voids in Mineral Aggregate. *Transportation Research Record*, 2180 (1), 30–35.
31. Mousavinezhad, S.H., Shafabakhsh, G.H. and Jafari Ani, O. (2019). Nano-clay and styrene-butadiene-styrene modified bitumen for improvement of rutting performance in asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 226, 793–801.
32. Wang, H. and Al-Qadi, I.L. (2010). Evaluation of Surface-Related Pavement Damage due to Tire Braking. *Road Materials and Pavement Design*, 11 (1), 101–121.
33. İnternet: Corrugation and Shoving. (2019). Web: <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/corrugation-and-shoving/> adresinden 24 Kasım 2019 'da alınmıştır.
34. Dafalla, M.A. and Shamrani, M.A. (2011). Road Damage Due to Expansive Soils: Survey of the Phenomenon and Measures for Improvement. in: Design, Construction, Rehabilitation and Maintenance of Bridges, *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia, 73–80.
35. Behnke, R., Wollny, I., Hartung, F. and Kaliske, M. (2019). Thermo-mechanical finite element prediction of the structural long-term response of asphalt pavements subjected to periodic traffic load: Tire-pavement interaction and rutting. *Computers & Structures*, 218, 9–31.
36. Liu, M., Han, S., Han, X., Qi, X. and Dong, S. (2019). Microcapsule and polymer reinforcement techniques developed asphalt for use of pothole repairs in winter and rainy seasons. *Cold Regions Science and Technology*, 167, 102865.
37. İnternet: Ancora buche sulla strada di Piovino. (2018, Eylül 23). Web: <http://www.novaratoday.it/social/segnalazioni/ancora-buche-sulla-strada-di-piovino-5894894.html> adresinden 24 Kasım 2019'da alınmıştır.
38. Liu, Q. (2012). *Induction Healing of Porous Asphalt Concrete*, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, Delft.
39. Wang, D., Liu, P., Xu, H., Kollmann, J. and Oeser, M. (2018). Evaluation of the polishing resistance characteristics of fine and coarse aggregate for asphalt pavement using Wehner/Schulze test. *Construction and Building Materials*, 163, 742–750.
40. Park, T. (2007). Causes of bleeding in a hot-in-place asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 21 (12), 2023–2030.

41. İnternet: Ford, B. (2017, Temmuz 31). Extreme Heat Could Cause Pavement Bleeding. Web: <https://ripcityradio.iheart.com/featured/portland-local-news/content/2017-07-31-extreme-heat-could-pavement-bleeding/> adresinden 24 Kasım 2019'da alınmıştır.
42. Abo-Qudais, S. and Suleiman, A. (2005). Monitoring fatigue famage and crack healing by ultrasound wave velocity. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 20 (2), 125–145.
43. İnternet: Bad Pavement Cracks: When Crack Sealing Just Won't Cut It. (2019). Web: <https://sableasphalt.com/bad-pavement-cracks-when-crack-sealing-just-wont-cut-it/> adresinden 24 Kasım 2019'da alınmıştır.
44. Adlinge, S.S. and Gupta, A. (2009). Pavement Deterioration and its Causes. *Mechanical & Civil Engineering*, 17 (4), 9–15.
45. İnternet: Flexible Pavement Distresses. (2019). Airport Pavement Maintenance Recommendation Tool. Web: <https://acrp-pavement-tool.tti.tamu.edu/browse-full-list.htm> adresinden 19 Ekim 2019'da alınmıştır.
46. Dong, Q., Jiang, X., Huang, B. and Richards, S.H. (2013). Analyzing Influence Factors of Transverse Cracking on LTPP Resurfaced Asphalt Pavements through NB and ZINB Models. *Journal of Transportation Engineering*, 139 (9), 889–895.
47. İnternet: Slippage Cracking. (2019). Web: <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/slippage-cracking/> adresinden 24 Kasım 2019'da alınmıştır.
48. Wang, X. and Zhong, Y. (2019). Reflective crack in semi-rigid base asphalt pavement under temperature-traffic coupled dynamics using XFEM. *Construction and Building Materials*, 214, 280–289.
49. Ghosh, S.K. (2009). *Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies and Applications*, Weinheim: Wiley-VCH, 1-10.
50. Toohey, K.S., Sottos, N.R., Lewis, J.A., Moore, J.S. and White, S.R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. *Nature Materials*, 6 (8), 581–585.
51. Therriault, D., White, S.R. and Lewis, J.A. (2003). Chaotic mixing in three-dimensional microvascular networks fabricated by direct-write assembly. *Nature Materials*, 2 (4), 265–271.
52. Blaiszik, B.J., Kramer, S.L.B., Olugebefola, S.C., Moore, J.S., Sottos, N.R. and White, S.R. (2010). Self-Healing Polymers and Composites. *Annual Review of Materials Research*, 40 (1), 179–211.
53. Qiu, J. (2012). *Self Healing of Asphalt Mixtures Towards a Better Understanding of the Mechanism*, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, Delft.

54. Williams, D., Little, D.N., Lytton, R.L., Kim, Y.R. and Kim, Y. (2001). *Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete, Volume 2: Laboratory and Field Testing to Assess and Evaluate Microdamage and Microdamage Healing*. Texas Transportation Institute, Research Report 7229, College Station, 1-112.
55. Kim, Y.R., Little, D.N. and Benson, F. (1990). Chemical and Mechanical Evaluation On Healing Mechanism Of Asphalt Concrete (With Discussion). in: *Asphalt Paving Technology 1990*, 240–275.
56. Schapery, R.A. (1989). On the mechanics of crack closing and bonding in linear viscoelastic media. *International Journal of Fracture*, 39 (1–3), 163–189.
57. Little, D.N. and Bhasin, A. (2007). Exploring Mechanism of Healing in Asphalt Mixtures and Quantifying its Impact. in: *Self Healing Materials An Alternative Approach to 20 Centuries*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 205–218.
58. Bhasin, A., Bommavaram, R., Vasconcelos, K. and Little, D.N. (2008). A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties. *Road Materials and Pavement Design*, 9 (1), 219–242.
59. Wool, R.P. and O'Connor, K.M. (1981). A theory crack healing in polymers. *Journal of Applied Physics*, 52 (10), 5953–5963.
60. Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Garcia, A. and Vansteenkiste, S. (2018). Effect of bitumen properties in the induction healing capacity of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 190 131–139.
61. Kim, Y.R., Little, D.N. and Burghardt, R.C. (1991). SEM Analysis on Fracture and Healing of Sand-Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3 (2), 140–153.
62. Tang, J., Liu, Q., Wu, S., Ye, Q., Sun, Y. and Schlangen, E. (2016). Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 113, 1029–1033.
63. Aydar, A.Y. ve Bağdatlıoğlu, N. (2014). Yemeklik Yağların Yüzey Gerilimi ve Temas Açılarının Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler. *Akademik Gıda*, 12 (1), 108–114.
64. Hefer, A.W., Bhasin, A. and Little, D.N. (2006). Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (6), 759–767.
65. İnternet: Spooner, E. (2019). A Guide to Surface Energy, Web: <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy> adresinden 19 Ekim 2019'da alınmıştır.
66. Drelich, J., Bukka, K., Miller, J.D. and Hanson, F. V (1994). Surface Tension of Toluene-Extracted Bitumens from Utah Oil Sands as Determined by Wilhelmy Plate and Contact Angle Techniques. *Energy & Fuels*, 8 (3), 700–704.

67. Grossegger, D. and Garcia, A. (2019). Influence of the thermal expansion of bitumen on asphalt self-healing. *Applied Thermal Engineering*, 156, 23–33.
68. Bhasin, A., Bommavaram, R., Greenfield, M.L. and Little, D.N. (2011). Use of Molecular Dynamics to Investigate Self-Healing Mechanisms in Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (4), 485–492.
69. Canestrari, F., Virgili, A., Graziani, A. and Stimilli, A. (2015). Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders. *International Journal of Fatigue*, 70, 351–360.
70. Kim, B. and Roque, R. (2006). Evaluation of Healing Property of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1970 (1), 84–91.
71. Gómez-Meijide, B., Ajam, H., Lastra-González, P. and Garcia, A. (2016). Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating. *Construction and Building Materials*, 126, 957–966.
72. Raithby, K.D. and Sterling, A.B. (1970). The Effect Of Rest Periods On The Fatigue Performance Of A Hot-Rolled Asphalt Under Reversed Axial Loading And Discussion. in: *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 134–152.
73. Little, D.N., Lytton, R.L., Williams, D. and Kim, Y.R. (1998). An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the application of micromechanics first principles of fracture and healing. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 1-41
74. Shen, S., Chiu, H.-M. and Huang, H. (2010). Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22 (9), 846–852.
75. Bhasin, A., Narayan, A. and Little, D. (2009). *Laboratory investigation of a novel method to accelerate healing in asphalt mixtures using thermal treatment*, Texas Transportation Institute, Report 476660-00005-1, College Station, 1-22.
76. Bonnaure, F., Huibers, A. and Boonders, A. (1982). A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 51, 104–128.
77. Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L., D’Angelo, J., Davis, R., Rowe, G., Reinke, G., Marasteanu, M., Masad, E., Roque, R. and Tashman, L. (2002). Use of dynamic mechanical analysis (DMA) to evaluate the fatigue and healing potential of asphalt binders in sand asphalt mixtures. in: *Asphalt Paving Technology 2002*, College Station, Texas, United States, 176–206.
78. García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, 93, 264–272.
79. Grossegger, D. and Garcia, A. (2019). The effect of water and pressure on the self-healing of macro cracks in asphalt mortar beams. *Construction and Building Materials*, 229, 116941.

80. Qiu, J., van de Ven, M., Wu, S., Yu, J. and Molenaar, A. (2012). Evaluating Self Healing Capability of Bituminous Mastics. *Experimental Mechanics*, 52 (8), 1163–1171.
81. Daniel, J.S. and Kim, Y.R. (2001). Laboratory Evaluation of Fatigue Damage and Healing of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13 (6), 434–440.
82. Liu, Q., Wu, S. and Schlangen, E. (2013). Induction heating of mastic asphalt for crack control. *Construction and Building Materials*, 41, 345–351.
83. Dereci, S. (2010). İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
84. Wu, S., Mo, L., Shui, Z. and Chen, Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, 43 (7), 1358–1363.
85. Wu, S., Liu, X., Ye, Q. and Li, N. (2006). Self-monitoring electrically conductive asphalt-based composite containing carbon fillers. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 512–516.
86. García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. and Liu, Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, 23 (10), 3175–3181.
87. García, Á., Schlangen, E., Van De Ven, M. and Van Vliet, D. (2011). Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (2), 499–508.
88. García, Á., Schlangen, E., Ven, M. Van De and Bochove, G. Van (2012). Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 30, 59–65.
89. García, A., Bueno, M., Norambuena-Contreras, J. and Partl, M.N. (2013). Induction healing of dense asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 1–7.
90. García, A., Norambuena-Contreras, J., Bueno, M. and Partl, M.N. (2015). Single and multiple healing of porous and dense asphalt concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26 (4), 425–433.
91. Lizasoain-Arteaga, E., Indacochea-Vega, I., Pascual-Muñoz, P. and Castro-Fresno, D. (2018). Environmental impact assessment of induction-healed asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1546–1556.
92. Pamulapati, Y., Elseifi, M.A., Cooper, S.B., Mohammad, L.N. and Elbagalati, O. (2017). Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers. *Construction and Building Materials*, 146, 66–75.
93. Vila-Cortavitarte, M., Jato-Espino, D., Castro-Fresno, D. and Calzada-Pérez, M. (2018). Self-healing capacity of asphalt mixtures including by-products both as aggregates and heating inductors. *Materials*, 11 (5), 80.

94. Liu, K., Fu, C., Dai, D., Jin, C., Li, W., Li, S. and Xu, X. (2019). Induction heating performance of asphalt pavements incorporating electrically conductive and magnetically absorbing layers. *Construction and Building Materials*, 229, 116805.
95. van Bochove, G. (2016). *Self Healing Asphalt - Extending the service life by induction heating of asphalt*. in: Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague.
96. İnternet: Final conference shows efficiency of the HEALROAD solution by reducing costs in around 4%. (2018, Mart 28). Web: <http://healroad.eu/news/final-conference-shows-efficiency-of-the-healroad-solution-by-reducing-costs-in-around-4/> adresinden 19 Ekim 2019'da alınmıştır.
97. İnternet: ERFbrussels. (2017, Ekim 27). The European Union Road Federation (2017). Demonstration of the #HEALROAD solution to promote selfhealing asphalt pavement in Germany [Tweet]. Web: <https://twitter.com/ERFbrussels/status/923840081303097345> adresinden 19 Ekim 2019'da alınmıştır.
98. Gümüşderelioğlu, M. ve Kaynak, G. (2012). Mikrodalgalar ve Uygulamaları. *Bilim ve Teknik*. 38–42.
99. Norambuena-Contreras, J. and Gonzalez-Torre, I. (2017). Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures. *Applied Sciences*, 7 (10), 1076.
100. Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Hu, J., Yuan, Y. and Ye, Q. (2018). Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating. *Applied Thermal Engineering*, 129, 871–883.
101. Wang, H., Yang, J., Lu, G. and Liu, X. (2018). Accelerated Healing in Asphalt Concrete via Laboratory Microwave Heating. *Journal of Testing and Evaluation*, 48 (2), 19.
102. González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L. and Schlangen, E. (2018). Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating. *Journal of Environmental Management*, 214, 242–251.
103. Tabaković, A., O'Prey, D., McKenna, D. and Woodward, D. (2019). Microwave self-healing technology as airfield porous asphalt friction course repair and maintenance system. *Case Studies in Construction Materials*, 10.
104. Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Zeng, W., Chen, Z., Ye, Q. and Pan, P. (2017). Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate. *Construction and Building Materials*, 150, 673–680.
105. Gao, J., Guo, H., Wang, X., Wang, P., Wei, Y., Wang, Z., Huang, Y. and Yang, B. (2019). Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers. *Journal of Cleaner Production*, 206, 1110–1122.

106. Jahanbakhsh, H., Karimi, M.M., Jahangiri, B. and Nejad, F.M. (2018). Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*, 174, 656–666.
107. Li, C., Wu, S., Chen, Z., Tao, G. and Xiao, Y. (2018). Enhanced heat release and self-healing properties of steel slag filler based asphalt materials under microwave irradiation. *Construction and Building Materials*, 193, 32–41.
108. González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L. and Schlangen, E. (2018). Effect of RAP and fibers addition on asphalt mixtures with self-healing properties gained by microwave radiation heating. *Construction and Building Materials*, 159, 164–174.
109. González, A., Valderrama, J. and Norambuena-Contreras, J. (2019). Microwave crack healing on conventional and modified asphalt mixtures with different additives: an experimental approach. *Road Materials and Pavement Design*, 20 (1), 1–14.
110. Norambuena-Contreras, J. and Garcia, A. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Materials & Design*, 106, 404–414.
111. Norambuena-Contreras, J., Gonzalez, A., Concha, J.L., Gonzalez-Torre, I. and Schlangen, E. (2018). Effect of metallic waste addition on the electrical, thermophysical and microwave crack-healing properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 187, 1039–1050.
112. Li, C., Wu, S., Chen, Z., Tao, G. and Xiao, Y. (2018). Improved microwave heating and healing properties of bitumen by using nanometer microwave-absorbers. *Construction and Building Materials*, 189, 757–767.
113. Wang, Y., Liu, Z. and Hao, P. (2019). Investigation on mechanical and microwave heating characteristics of asphalt mastic using activated carbon powder as electromagnetic absorbing materials. *Construction and Building Materials*, 202, 692–703.
114. Zhao, H., Zhong, S., Zhu, X. and Chen, H. (2017). High-efficiency heating characteristics of ferrite-filled asphalt-based composites under microwave irradiation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (6), 04017007.
115. Gao, J., Sha, A., Wang, Z., Tong, Z. and Liu, Z. (2017). Utilization of steel slag as aggregate in asphalt mixtures for microwave deicing. *Journal of Cleaner Production*, 152, 429–442.
116. White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H., Moore, J.S., Kessler, M.R., Sriram, S.R., Brown, E.N. and Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409 (6822), 794.
117. Xu, S., Tabaković, A., Liu, X., Palin, D. and Schlangen, E. (2019). Optimization of the Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt. *Applied Sciences*, 9 (3), 468.
118. Su, J.F., Yang, P., Wang, Y.Y., Han, S., Han, N.X. and Li, W. (2016). Investigation of the self-healing behaviors of microcapsules/bitumen composites by a repetitive direct tension test. *Materials*, 9 (7), 600.

119. Xu, S., Tabaković, A., Liu, X. and Schlangen, E. (2018). Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 169, 379–387.
120. Micaelo, R., Al-Mansoori, T. and Garcia, A. (2016). Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials*, 123, 734–744.
121. García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M. and Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 184 (1–3), 603–611.
122. Li, R., Zhou, T. and Pei, J. (2015). Design, preparation and properties of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 99, 143–149.
123. Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E. and Wang, Y.-Y. (2015). Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method. *Materials and Structures*, 48 (12), 4067–4076.
124. Su, J.-F., Schlangen, E. and Qiu, J. (2013). Design and construction of microcapsules containing rejuvenator for asphalt. *Powder Technology*, 235, 563–571.
125. Lv, L., Yang, Z., Chen, G., Zhu, G., Han, N., Schlangen, E. and Xing, F. (2016). Synthesis and characterization of a new polymeric microcapsule and feasibility investigation in self-healing cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 105, 487–495.
126. Golestani, B., Nam, B.H., Moghadas Nejad, F. and Fallah, S. (2015). Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. *Construction and Building Materials*, 91, 32–38.
127. Ganjei, M.A. and Aflaki, E. (2019). Application of nano-silica and styrene-butadiene-styrene to improve asphalt mixture self healing. *International Journal of Pavement Engineering*, 20 (1), 89–99.
128. Amin, G.M. and Esmail, A. (2017). Application of nano silica to improve self-healing of asphalt mixes. *Journal of Central South University*, 24 (5), 1019–1026.
129. Varley, R.J., Shen, S. and van der Zwaag, S. (2010). The effect of cluster plasticisation on the self healing behaviour of ionomers. *Polymer*, 51 (3), 679–686.
130. Varley, R.J. and van der Zwaag, S. (2008). Towards an understanding of thermally activated self-healing of an ionomer system during ballistic penetration. *Acta Materialia*, 56 (19), 5737–5750.
131. Varley, R. (2007). Ionomers as Self Healing Polymers. in: *Self Healing Materials An Alternative Approach to 20 Centuries*. Dordrecht, Netherlands: Springer 95–114.

132. Cordier, P., Tournilhac, F., Soulié-Ziakovic, C. and Leibler, L. (2008). Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. *Nature*, 451, 977–980.
133. Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (3), 327–363.
134. Blissett, R.S. and Rowson, N.A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, 1–23.
135. Wang, S. (2008). Application of Solid Ash Based Catalysts in Heterogeneous Catalysis. *Environmental Science & Technology*, 42 (19), 7055–7063.
136. Tapkın, S. (2008). Mechanical evaluation of asphalt–aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (1), 27–40.
137. Likitlersuang, S. and Chompoorat, T. (2016). Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (5), 337–344.
138. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü. 407.
139. Sevim, Ö. and Demir, İ. (2019). Optimization of fly ash particle size distribution for cementitious systems with high compactness. *Construction and Building Materials*, 195, 104–114.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATAKAN, Mert
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.07.1994, Isparta
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 543 537 96 09
 e-mail : mertatakan@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/ İnşaat Müh.	2016
Lise	Isparta Anadolu Öğretmen Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2017-2018	Yeşil Ay Yapı Denetim.	Kontrol Elemanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Atakan M., Yıldız, K. (2019). *Improving Microwave Heating Characteristic of Asphalt Binder by Using Fly Ash*. 4. International Sustainable Buildings Symposium'da sunuldu, Dallas, Texas, ABD

Hobiler

Kitap okuma, yüzme



GAZİ GELECEKTİR..