

**KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARINDA TERMAL ALAN YÖNTEMİ İLE
PERFORMANS TAHMİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şule YARCI

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre GÜRAKSIN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2021

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.09 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARINDA TERMAL ALAN
YÖNTEMİ İLE PERFORMANS TAHMİNİ

Şule YARCI

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre GÜRAKSIN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Şule YARCI tarafından hazırlanan “Karayolu Esnek Üstyapılarında Termal Alan Yöntemi ile Performans Tahmini” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 05 / 07 / 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre GÜRAKSIN

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Meltem SAPLIOĞLU
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

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

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre GÜRAKSIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

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

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

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

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

05 / 07 / 2021

Şule YARCI



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPILARINDA TERMAL ALAN YÖNTEMİ İLE PERFORMANS TAHMİNİ

Şule YARCI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gür Emre GÜRAKSIN

Dünya genelinde en fazla kullanılan ulaşım türü karayollarıdır. Karayolu esnek üstyapıları belirli zaman diliminde hizmet etmek üzere planlanırlar. Devamlı olarak atmosfer koşullarının ve mekanik yüklerin etkisinde olan üstyapılar, proje ömrünü tamamlamadan farklı türde bozulmalara maruz kalmaktadırlar. Hizmet ömrünü tamamlamadan bozulan üstyapılar sadece trafik güvenliğini tehlikeye atmakla kalmayıp aynı zamanda çok yüksek ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Çok uzun zamandır yapılan üstyapı performansını belirlemeye dair çalışmalar ile, Üstyapı Yönetim Sistemi kapsamında oluşturulan Mevcut Hizmet Verilebilirlik İndeksi (Present Serviceability Index – PSI), Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index – PCI), Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index – IRI) gibi performans modelleri aracılığıyla üstyapının hizmet düzeyi takip edilmekte ve doğru zamanda doğru müdahalelerin yapılması amaçlanmaktadır. Bu modeller için ihtiyaç duyulan verilerin toplanması da en önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, üstyapıda meydana gelen sıcaklık farkı göz önünde bulundurularak, oluşmuş çatlakların şiddetinin ve su sızması nedeniyle granüler malzemedeki meydana gelecek termal alanların, performans indeksi oluşumuna destek sağlayacağı dikkate alınmıştır. Çalışmaya konu olan üstyapı kesimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsündeki esnek üstyapı şeklinde planlanan yollar olup meydana gelen timsah sırtı çatlakların performans değerlendirilmesi, görüntü işleme tekniklerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Bozulmaların tetiklenmesindeki en önemli faktörün yetersiz drenaj olması, esnek

kaplama altına çatlaklar vasıtasıyla sızan suyun, donma-çözünme açısından tehlike arz etmesi ve daha büyük çatlaklara ve hatta kaplamayı parçalayıp çukurlara yol açması gibi nedenlere dayanan bir motivasyon ile kaplamanın tabakasının altındaki suyun yüzeyde oluşturduğu sıcaklık farkı dikkate alınmıştır. Aynı zamanda çatlağın kapladığı alan da göz önünde bulundurularak bir performans indeksi geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda toplanan görüntülerden, görüntü işleme teknikleri ile elde edilen verilerin ışığında kaplama performansı değerlendirilmesinde kullanılabilecek bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelin, hızlı bir şekilde performans değerlendirmesi yapılmasına imkân verdiği görülmektedir.

2021, xii + 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Üstyapı, Üstyapı Performans Değerlendirmesi, Tahribatsız Bozulma Tespiti, Akıllı Ulaşım Sistemleri, Görüntü İşleme Teknikleri.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PERFORMANCE ESTIMATION OF FLEXIBLE PAVEMENTS BY THERMAL AREA METHOD

Şule YARCI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Hüseyin AKBULUT

Co-Supervisor: Asst. Prof. Gür Emre GÜRAKSIN

Highways are the most used mode of transportation around the world. Flexible pavements are planned to serve in a certain time period. Road pavements, which are constantly exposed to atmospheric conditions and mechanical loads, are exposed to different types of deterioration before completing the project life. Pavements that deteriorate before completing their service life not only endanger traffic safety, but also cause very high economic losses. The service level of the pavement is monitored with performance models such as Present Serviceability Index (PSI), Pavement Condition Index (PCI), International Roughness Index (IRI), which have been created as a Pavement Management System for a long time to determine the pavement performance, and it is aimed to make the right interventions at the right time. The collection of data needed for these models is one of the most important parameters. In this study, considering the temperature difference on the pavement, it was taken into account that the severity of the cracks formed and the thermal fields that will occur in the granular material due to water infiltration will support the formation of the performance index. The pavement section, which is the subject of the study, was created by using image processing techniques to assess the performance of alligator cracks that occur on the roads planned as flexible pavement in Afyon Kocatepe University ANS Campus. The temperature difference created by the water under the layer of the pavement on the surface is taken into account, with a motivation based on the fact that the most important factor in triggering deterioration is insufficient drainage, the water leaking under the flexible pavement

through cracks poses a danger in terms of freezing-thawing, and it causes larger cracks and even potholes by breaking the pavement. taken. At the same time, a performance index was developed considering the area covered by the crack. At the end of the study, a model was created that can be used in the evaluation of pavement performance in the light of the data obtained by image processing techniques from the images collected. It is seen that this created model allows a rapid performance evaluation.

2021, xii + 95 pages

Keywords: Pavement, Pavement Performance Evaluation, Non-Destructive Distress Detection, Intelligent Transportation Systems, Image Processing Technics.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT'a ve ikinci tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gr Emre GÜRAKSIN'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarım ve arkadaşlarım teşekkür ederim. Bu tez çalışmasını 20.FEN.BİL.09 numaralı proje ile AK-BAPK tarafından destekleyen Afyon Kocatepe niversitesine teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı annem Sibel YAZAR'a, saha çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı Okan KILIÇ'a ve aileme teşekkür ederim.

Şule YARCI
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Ulaştırma.....	3
2.2 Ulaştırma Türleri.....	4
2.3 Karayolu.....	6
2.3.1 Karayolu Tanımı	6
2.3.2 Karayolu Yapısı	6
2.3.2.1 Karayolu Altyapısı	6
2.3.2.2 Karayolu Üstyapısı	7
2.4 Esnek Üstyapıda Bozulma	11
2.4.1 Esnek Üstyapı Bozulmalarının Nedenleri	11
2.4.2 Esnek Üstyapı Bozulma Değerlendirmesi ve Performans	12
2.4.3 Esnek Üstyapı Bozulma Çeşitleri.....	13
2.4.3.1 Esnek Üstyapıda Meydana Gelen Çatlaklar	15
2.5 Üstyapı Yönetimi.....	19
2.5.1 Esnek Üstyapıda Bozulma Tespit Yöntemleri	21
2.5.1.1 Gözleme Dayalı Tespit Yöntemleri.....	22
2.5.1.2 Tahribatsız Deney Yöntemleri	22
2.5.1.3 Tahribatlı Deney Yöntemleri.....	27
2.5.2 Esnek Üstyapıda Bakım ve Onarım Yöntemleri	29
2.5.2.1 Onarım Yöntemleri.....	29
2.5.2.2 Bakım Yöntemleri	33

2.6 Konuya İlişkin Yapılmış Çalışmalar.....	36
3. MATERYAL ve METOT	41
3.1 Materyal.....	41
3.1.1 Veri Toplanan Saha Hakkında Bilgiler	43
3.1.2 Telefona Monte Edilebilir Termal Kamera.....	45
3.1.3 Termal El Kamerası	45
3.1.4 Dijital Görüntü İşleme Teknikleri.....	46
3.2 Metot.....	47
3.2.1 Verilerin Toplanması	48
3.2.2 Verilerin İşlenmesinde Kullanılan Görüntü İşleme Teknikleri.....	51
3.2.2.1 Görüntü Analizi.....	52
3.2.3 Verilerden Elde Edilen Değerlerle İndeks Geliştirilmesi.....	54
3.2.4 İndeks Hesabı için Geliştirilen Grafikselle Kullanıcı Arayüzü	63
4. BULGULAR	65
4.1 Toplanan Görüntülerin Analizi.....	65
4.1.1 A Alanından Toplanan Veriler.....	65
4.1.2 B Alanından Toplanan Veriler	72
4.1.3 C Alanından Toplanan Veriler	79
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	88
6. KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

m ²	Metrekare
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
km/s	Kilometre / Saat
°C	Derece Celcius
%	Yüzde

Kısaltmalar

AASHTO	The American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Deney ve Malzeme Derneği)
CBR	California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
DCP	Dynamic Cone Penetration Test (Dinamik Koni Penetrometresi)
FWD	Falling Weight Deflectometer (Düşen Ağırlık Deflektometresi)
GPR	Ground-penetrating Radar (Zemin Penetrasyon Radarı)
HMA	Hot Mix Asphalt (Sıcak Karışım Asfalt)
IRI	International Roughness Index (Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi)
PCI	Pavement Condition Index (Üstyapı Durum İndeksi)
PI	Plastisite İndeksi
PMMS	Pavement Maintenance Management System (Üstyapı Bakım Yönetim Sistemi)
PSI	Present Serviceability Index (Mevcut Hizmet Verilebilirlik İndeksi)
PTAI	Pavement Thermal Area Index (Üstyapı Termal Alan İndeksi)
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (Geri Kazanılmış Asfalt Kaplama)
RD	Rut Depth (Tekerlek İzi Derinliği)
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves (Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Türkiye’de ulaşım türlerine göre yurtiçi yolcu taşıma oranı (İnt.Kyn.1).....	5
Şekil 2.2 Türkiye’de ulaşım türlerine göre yurtiçi yük taşıma oranı (İnt.Kyn.1).....	6
Şekil 2.3 Karayolu üstyapı enkesiti (AASHTO 1993).....	8
Şekil 2.4 Esnek üstyapıdaki çatlakların sembolik gösterimi (Raya 1992).....	16
Şekil 2.5 Üstyapı performansı tahmin eğrisi (Hergüner ve Açar 2011).	21
Şekil 2.6 Dinamik Koni Penetrometresi cihazının gösterimi (Hong vd. 2016).	25
Şekil 2.7 GPR testi altında kaplama yapısını gösteren bir şema (NCHRP 2004).....	25
Şekil 2.8 Sismik testleri ifade eden şema (NCHRP 2004).....	26
Şekil 3.1 Veri toplamak amacıyla geliştirilen aparat.	42
Şekil 3.2 Veri toplamada kullanılan termal el kamerası.	42
Şekil 3.3 Veri toplamada kullanılan ve telefona monte edilebilen termal el kamerası.	42
Şekil 3.4 Veri toplanan asfalt kaplamaların şematik enkesit gösterimi.	43
Şekil 3.5 Veri toplanan ilk alan olan A alanı.	44
Şekil 3.6 Veri toplanan ikinci alan olan B alanı.....	44
Şekil 3.7 Veri toplanan üçüncü alan olan C alanı.	44
Şekil 3.8 Normal görüntü akış diyagramı.	53
Şekil 3.9 Termal görüntü akış diyagramı.	53
Şekil 3.10 Timsah sırtı çatlak için sonuç değeri - bozulma yoğunluğu (ASTM 2009)..	56
Şekil 3.11 ASTM D 6433-07’deki timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki düşük seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R ² değeri.....	57
Şekil 3.12 ASTM D’deki 6433-07 timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki orta seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R ² değeri.....	57
Şekil 3.13 ASTM D 6433-07’deki timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki yüksek seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R ² değeri.....	58
Şekil 3.14 Esnek üstyapı bakım ve onarım metodu seçimi (Sağlık ve Güngör 2008) ...	61
Şekil 3.15 Bakım-onarım yöntemi önerisinin alansal grafiği.....	62
Şekil 3.16 PTAI -kullanıcı arayüzü görüntü paneli.....	63
Şekil 3.17 PTAI -kullanıcı arayüzü iklim etki katsayısı (k) hesaplama paneli.	64
Şekil 3.18 PTAI -kullanıcı arayüzü görüntü yükleme paneli.....	64
Şekil 3.19 PTAI -kullanıcı arayüzü sonuç paneli.....	64

Şekil 4.1 A alanındaki 8 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	67
Şekil 4.2 A alanındaki 8 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	67
Şekil 4.3 A alanındaki 8 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	68
Şekil 4.4 A alanındaki 14 numaralı çatlak - normal görüntü işleme aşamaları.....	69
Şekil 4.5 A alanındaki 14 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	69
Şekil 4.6 A alanındaki 14 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	71
Şekil 4.7 B alanındaki 1 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	73
Şekil 4.8 B alanındaki 1 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	73
Şekil 4.9 B alanındaki 1 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	74
Şekil 4.10 B alanındaki 15 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	75
Şekil 4.11 B alanındaki 15 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	75
Şekil 4.12 B alanındaki 15 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	76
Şekil 4.13 B alanındaki 19 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	77
Şekil 4.14 B alanındaki 19 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	77
Şekil 4.15 B alanındaki 19 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	78
Şekil 4.16 C alanındaki 1 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	81
Şekil 4.17 C alanındaki 1 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	81
Şekil 4.18 C alanındaki 1 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	82
Şekil 4.19 C alanındaki 2 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	83
Şekil 4.20 C alanındaki 2 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	83
Şekil 4.21 C alanındaki 2 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	84
Şekil 4.22 C alanındaki 10 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.....	85
Şekil 4.23 C alanındaki 10 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.....	85
Şekil 4.24 C alanındaki 10 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kaplama performansı değerlendirme indeksleri.	13
Çizelge 3.1 Telefona monte edilebilir termal kameranın teknik özellikleri.....	45
Çizelge 3.2 El termal kamerasının teknik özellikleri	46
Çizelge 3.3 İndeks geliştirilmesinde kullanılan değerler.	55
Çizelge 3.4 ASTM D 6433-07’de yer alan grafik eğrilerinin denklem ve R^2 değerleri. 58	58
Çizelge 3.5 PTAI için bozulma sınıfları için normal görüntü alan oranları.....	59
Çizelge 3.6 PTAI için genel denklemde y yerine yazılacak değer aralıkları	59
Çizelge 3.7 PTAI için bozulma sınıflarına ait denklemler.....	60
Çizelge 3.8 PTAI ve A_{TEA} değerine göre önerilen bakım-onarım yöntemleri.	62
Çizelge 4.1 A alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).	66
Çizelge 4.2 B alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).....	72
Çizelge 4.3 C alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).....	80
Çizelge 4.4 Görsellerin PTAI değerleri ve önerilen bakım – onarım yöntemleri.	87

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Düşük (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddetli timsah sırtı çatlak örneği.....	18
Resim 2.2 Dynatest model düşen ağırlıklı deflektometre cihazı (İnt.Kyn.4).....	24
Resim 3.1 Veri toplanan A alanının yağmur sonrası görüntüleri.....	48
Resim 3.2 Veri toplanan B alanının yağmur sonrası görüntüleri.....	49
Resim 3.3 Veri toplanan C alanının yağmur sonrası görüntüleri.....	49
Resim 3.4 Veri toplama sürecinden örnek görüntüler.	50
Resim 3.5 Termal el kamerası ile toplanan normal (a) ve termal (b) görüntü örneği....	51
Resim 3.6 Mobil termal kamera ile toplanan normal (a) ve termal (b) görüntü örneği.	51

1. GİRİŞ

Toplumlar gelişmeye başladıkça talepleri de farklılıklar göstermeye başlamıştır. Bu talepler ve taleplerin karşılanmasına ilişkin gelişmeler, her bir dönem için farklı şekilde insan yaşamına yansısı bile, insanların var olmaya başladıklarından beri en temel eğilimlerinden biri hayatta kalabilmek için hareket etmektir. Bu hareketlilik, insanın doğası gereği aldığı enerjiyi harcama, temel ihtiyaçlarını karşılayabilmek için farklı bölgeler arasında hareket etme ve sezdiği bir tehlikeden kaçma gibi davranışlarla ortaya çıkabilir. Bu nedenle ulaşım, önce bireylerin gelişmesine katkı sağlamış, ardından bunu toplumsal boyuta taşımıştır.

Ülkelerin sağlık, ticaret, ekonomi, eğitim gibi politikalar konusundaki gelişiminde çok önemli olan ve canlı ve cansız varlıkların bir noktadan başka bir noktaya belirli bir amaç uğruna taşınması olarak tanımlanabilecek olan ulaşımın, mühendislik açısından emniyet, ekonomi ve konfor sağlayabilen kriterlerde olması beklenmektedir. Emniyet kavramı, şartname ve standartlara uygun şekilde can ve mal güvenliğini gözeten bir yapım sürecini; ekonomi kavramı, kaynakların doğru şekilde yönetilerek kullanılmasını ve israfın önüne geçmeyi ifade etmektedir. Bu koşulların sağlanabilmesi için ulaştırma sistemlerinin doğru şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir.

Karayolları, diğer inşaat projelerinin aksine devamlı olarak atmosfer koşullarına maruz kaldığından hem yüzey hem de yeraltı sularının yıkıcı etkileri hızlı bir bozulmaya neden olmaktadır. Özellikle, kent sakinlerinin yaşam kalitesini doğrudan etkileyen ve altyapı tesislerini de bünyesinde barındırdığı için şehirlerarası yollara nazaran ilave bir özen gerektiren şehir içi yollarda altyapı çalışmalarıyla ilgili olarak yapılan müdahaleler, tekrarlı yükün maruz kaldığı bölgeler, yetersiz drenaj ve inşa hataları gibi pek çok sebeple oluşan çatlamalardan sızan sular nedeniyle bozulmaya başlayan üstyapının, donma-çözülme döngüsüne de maruz kalması üstyapının servis kabiliyetini tamamen yitirmesine neden olacaktır. Donma-çözülme durumunun olmadığı yerlerde granüler tabakalara ulaşan su, asfalt tabakasının altındaki desteğin azalmasına, hatta ortadan kalkmasına neden olmakta, bu da malzemenin gerilme sınır değerlerinin aşılmasına ve dolayısıyla üstyapıda oluşan çatlaklar nedeni ile bozulmaya yol açmaktadır. Bunun önüne

geçebilmek için, bütün ulaştırma sistemleri gibi karayollarında da bir üstyapı yönetimi ve üstyapının belirlenen proje ömrünü tamamlayabilmesi için performans tahminine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu, karayolu projelerinde doğru müdahalenin belirlenmesi için de önem arz eder.

Karayolu üstyapı yönetimi temelinde çok uzun zamandır performans modelleri kurulmaya çalışılmaktadır. Bu modellerden en yaygın kullanılanları Mevcut Hizmet Verilebilirlik İndeksi (Present Serviceability Index – PSI), Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index – PCI), Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index – IRI) olup bu yöntemler ile üstyapının belirlenen hizmet süresini tamamlaması arzulanmaktadır. Oluşturulan modellerde belirlenen indeksler vasıtasıyla doğru zamanda doğru müdahalenin yapılması hedeflenmektedir. Dolayısıyla bu modeller ile yapılacak performans analizi için doğru ve hızlı veri toplamak önemli hale gelmektedir.

Drenajı iyi yapılmış bir yolda bile en yaygın görölen bozulma türlerinden biri olan çatlak oluşumu sonrasında alt tabakalara su sızması durumu kaçınılmazdır. Böylece sızan su, alt tabakalarda sıcaklık farkları yaratacak ve üst tabakalara bu sıcaklık farkını yansıtacaktır. Bu bağlamda yapılan çalışmada, Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Yerleşkesi'ndeki asfalt yol kaplamalarından termal görüntüleme yöntemi kullanılarak elde edilmiş görseller MATLAB paket programı yardımıyla işlenerek sıcaklık farkının oluştuğu alan, incelenen görüntüdeki timsah sırtı çatlağın alansal büyüklüğü gibi değışkenler kullanılarak bir indeksin belirlendiğı, duruma uygun bakım, onarım veya yeniden yapım yönteminin önerildiğı bir performans indeksi oluşturulması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Ulaştırma

İnsanların yaşamlarını sürdürebilmek adına temel ihtiyaçlarını karşılayabilme ve olası tehlikelere karşı kendilerini koruyabilme gerekçesinden doğan hareketlilik talebi, binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. 500.000 yıl önce başlayan bir ulaşım türü sayılabilecek yürüme aktivitesinin uzun bir dönem geçerli olmasının akabinde su yollarının ulaşım için önem kazanması, hayvanların kızıklar yardımıyla taşımacılıkta kullanılması gibi aktivitelerle insanların bu hareketlilik talebi karşılanmaya başlamıştır (Schiller ve Kenworthy 2010). Kızak benzeri araçların kullanılmasıyla ilgili zorluklar yaşayan topluluklar için uygun bir arazi elde etme ihtiyacı doğmuştur. Bu durum yeni yolların oluşmasını sağlamıştır. Yol yapım tekniklerinde ilk kayda değer gelişmelerin MÖ 5000 yıllarında tekerlek icadı ile başladığı kabul edilmektedir. MÖ 3500 yılına ait Mezopotamya bölgesinde rastlanan ilk önemli yollar, MÖ 1500'ten öncesine ait Girit adasındaki taş kaplamalı yol, MÖ 359 yılına ait Mısır-Babil arasında inşa edildiği anlaşılan yol ve Orta ve Güney Amerika'da Maya, Aztek ve İnkalardan kalan yol kalıntıları, yol inşaatı açısından tarihte ilk sayılabilecek önemli örnekler teşkil etmektedir (Yayla 2011).

Yol inşaatı, Roma İmparatorluğu ile yaklaşık MÖ 400 ile MS 400 arasında zirve yapmıştır. Roma İmparatorluğu'nun sona ermesinden sonraki 1000 yıl boyunca, Avrupa'da yol yapımı durmuştur. Karayolu taşımacılığı, yakındaki kasabaları ve şehirleri en kolay yollardan birbirine bağlayacak şekilde yönlendirilmiş ve Roma karayolu sisteminin çoğu terk edilmiştir (Schiller ve Kenworthy 2010).

18. yüzyılın son yarısında yeniden yol inşaatı ile ilgili çalışmalar devam etmiştir. Roma yollarından esinlenen bu yollarda materyal bulma ve işçilik ile ilgili problemler yaşanmış ve bununla ilgili olarak da büyük kütleli plaka taşlar, malzeme olarak kullanılmıştır. Bu yol inşaatlarında malzeme olarak kırmataş uygulayan J. L. Mc-Adam (İskoçya, 1756-1836) sayesinde 1950'lere kadar yaygın kullanılan makadam tip yol ortaya çıkmıştır. Makadam yollarda en üstteki yol tabakası, bir silindir yardımıyla kırma

taşın sıkıştırılması ve taş tozu hamuru yardımıyla aradaki boşlukların doldurulması ile oluşturulmuştur. Ayrıca Pierre Tresaguet (Fransa, 1716-1796) tarafından geliştirilen yeni yol yapım yönteminde doğal zemin içine açılan hendek, büyük taşlarla doldurulduktan sonra sert kayanın kırılması ile elde edilen çakıl tabaka ile kapatılmıştır. Tüm bu oluşumlar sırasında 1747'de Paris'te kurulan Yol ve Köprü İnşaatı Okulu ile yol mühendisliği gelişmeye başlamıştır (Yayla 2011).

19. yüzyıl boyunca, Paris'in öncülüğünde birçok Avrupa şehri bulvarlar oluşturarak ve kaldırımları genişleterek ve ağaçlar, parklar ve gezinti alanları ekleyerek sokaklarını güzelleştirmeye başlamıştır. Bu olanaklar, bisiklete binmeyi teşvik etmiştir. Ayrıca bu yüzyıl içerisinde, 18. yüzyılın başlarında madencilik ve taşımacılık için kullanılmaya başlayan ilkel buhar motorları geliştirilmiştir. Buharlı gemilerin kullanımı artmış, bununla birlikte demiryolu taşımacılığı da önemli hale gelmiştir. Buharlı demiryolu hareketinin başarısı büyük ölçüde, 1829 yılında 'Roket' lokomotifi ile Liverpool ve Manchester'ı bağlayan ilk modern demiryolu hattını geliştiren George Stephenson'a dayandırılmıştır (Schiller ve Kenworthy 2010).

Otomobilin 20. yüzyılın başlarında keşfedilmesi ve 1. Dünya Savaşı sonrası ulaşımda kullanılmasıyla karayolu inşaatı yeniden önemsenmeye başlamıştır. Motorlu taşıtlara geçildiğinde mevcut yol kaplamaları taşıt bandajları için yetersiz kalmış ve bu kaplama için bir bağlayıcı gerekliliği doğmuştur. Bu ihtiyacın sonunda, yuvarlanma yüzeyinin düzgün olmasını sağlayan ve daha dayanıklı olan bitümlü kaplamalar ortaya çıkmıştır (Yayla 2011).

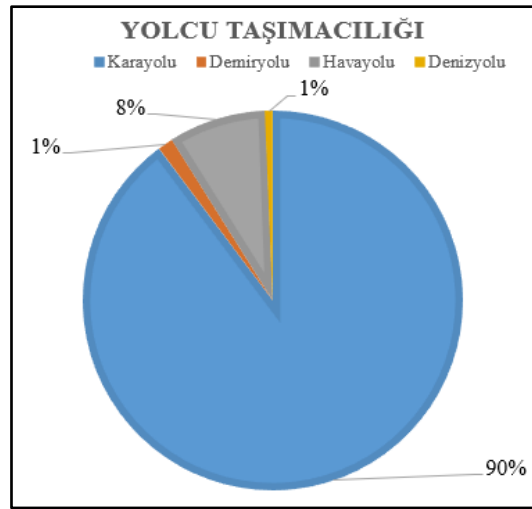
2.2 Ulaştırma Türleri

Ulaşım türleri, kara, hava ve su aracılığıyla olmak üzere 3 temel türde değerlendirilmektedir. Kara aracılığıyla yapılan ulaşım, karayolu ve demiryolu ulaşımını kapsamaktadır. Karayolu sadece modern otoyolları değil, aynı zamanda şehir içi yolları, tali yolları ve köy yollarını da içermekte ve çok çeşitli kara taşıtı ve yayaya hizmet sağlamaktadır. Demiryolları uzun mesafe seyahatleri ve yük taşımacılığı amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Su ve hava aracılığıyla yapılan ulaşım için sırasıyla su ve hava

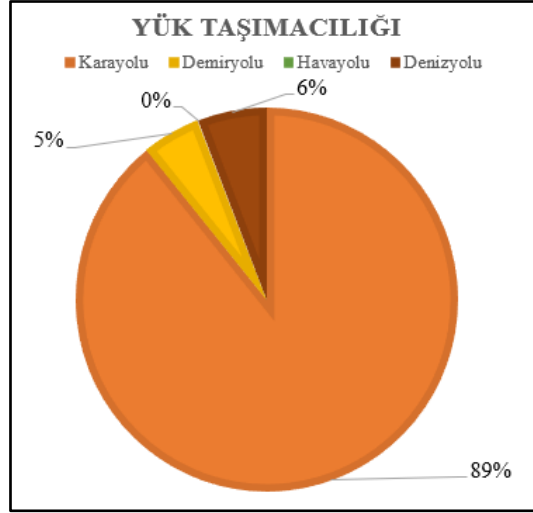
yolları geliştirilmiştir. Tüm bu ulaşım türlerinin yanı sıra su, sıvı ve katı parçaların taşınmasını sağlayan boru hatları da bir ulaşım türü olarak sınıflandırılabilir (Khanna ve Justo 2011).

Diğer ulaşım türleri ile karşılaştırıldığında hava yolları, en hızlı ulaşımı sunarken su yollarının sağladığı ulaşım en yavaş olanıdır. Hava yolları, insan ve yük taşımacılığında nakliye süresinden tasarruf etmeyi sağlarken aynı zamanda konfor da sağlamaktadır. Bununla birlikte su yollarının, birim yükü birim mesafede taşımak için minimum enerjiye ihtiyaç duyması önemli bir avantajdır. Demiryolu, yolcu ve yüklerin taşınmasında iç kesimlerdeki istasyonlara erişebilmesi açısından önemli olup karayolu ile desteklendiğinde daha uzun mesafeler için de yarar sağlamaktadır. Ayrıca demiryolu ile yapılan taşımacılıkta birim mesafe boyunca birim yükü taşımak için gereken enerji, karayolu ile yapılan taşımacılıkta gerekli olanın 1/4 ~ 1/6'sı oranındadır. Demiryolu bulunan arazilerde bu durum, karayollarından daha uygun bir ulaşım alternatifi sunmaktadır (Khanna ve Justo 2011).

Ülkemizde en yaygın kullanılan ulaşım türü olan karayolu ulaşımı, yolcu ve yük taşımacılığında diğer ulaşım türlerine göre oldukça büyük bir paya sahiptir. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın 2019 verilerine göre Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de Türkiye'deki yolcu ve yük taşıma oranları verilmiştir.



Şekil 2.1 Türkiye'de ulaşım türlerine göre yurtiçi yolcu taşıma oranı (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.2 Türkiye’de ulaşım türlerine göre yurtiçi yük taşıma oranı (İnt.Kyn.1).

2.3 Karayolu

2.3.1 Karayolu Tanımı

Karayolu; her çeşit kara taşıtının ve yayanın ulaşım talebini karşılamak amacıyla inşa edilmiş ve trafik akışına imkân sağlamak üzere kamunun yararlanmasına açık olan arazi şeritleri, tüneller, her türlü sanat yapıları, koruma yapıları ve diğer alanlar olarak tanımlanabilir (Yayla 2011, Karayolu Teknik Şartnamesi 2013).

2.3.2 Karayolu Yapısı

Karayolu, genel anlamda ‘altyapı’ ve ‘üstyapı’ olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir.

2.3.2.1 Karayolu Altyapısı

Karayolu altyapısı, yol yapımı aşamasında inşaat için en elverişli tesviye düzlemine ulaşmak amacıyla yapılan yarma ve dolgular sonucunda oluşan yapıdır. Yol gövdesinin kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan üst yapısının oturduğu kısımdır (Sağlık ve Güngör 2008, Karayolu Teknik Şartnamesi 2013).

Karayolunu kullanan taşıtların hızlarında, dingil yüklerinde ve trafik miktarında meydana gelen artış yolun geometrik özelliklerinde değişiklikler yapılmasını gerektirmiştir. 1920’li yıllara kadar karayolu üstyapısı, altyapıdan daha fazla önemsenirken, bu önemli değişiklikler, daha dayanıklı bir altyapı yapımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu süreçte yapılan araştırmalar sonucunda, yolun proje ömrünü beklenen kriterlere uygun şekilde tamamlayabilmesi için sadece üstyapıdaki çalışmaların yeterli olmadığı, aynı zamanda üstyapının oturduğu taban zemini ve altyapının durumunun da yolun yapım, bakım ve onarım masrafi gibi konularda da büyük önem arz ettiği düşünülmektedir (Yayla 2011).

2.3.2.2 Karayolu Üstyapısı

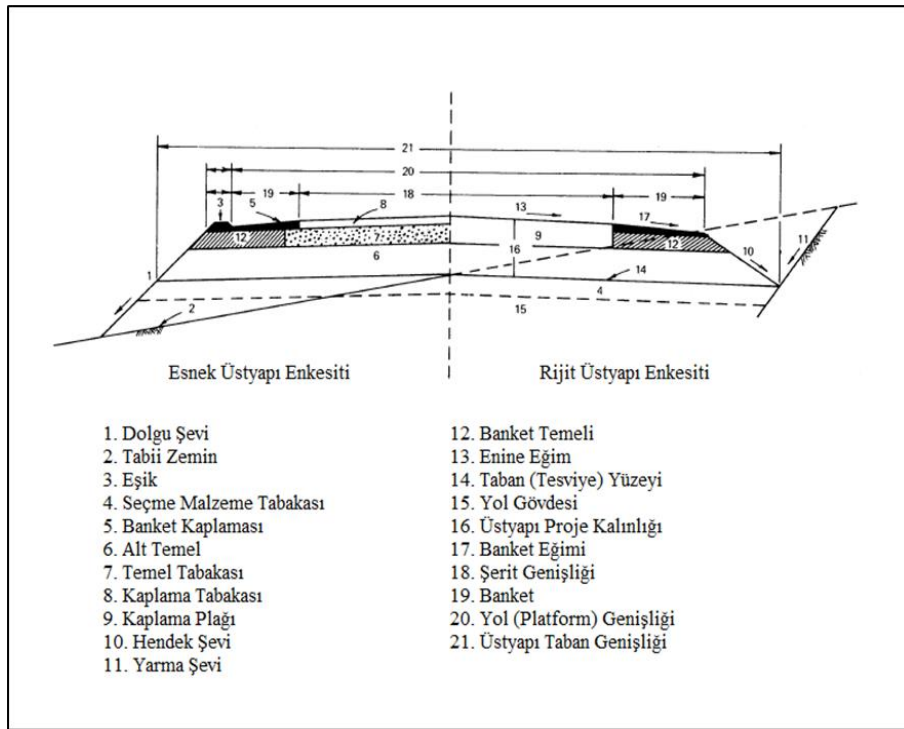
Karayolu üstyapısı; trafikten gelen ve taşıt hareketi sırasında radyal çekme, radyal ve düşey basınç oluşturan yükleri karayolunun taban zeminine dağıtan, kaplama, temel, alttemel gibi tabakalardan oluşan, çevresel koşullara ve trafik dolayısıyla tekrarlı dingil yüküne maruz kalan yapı olarak tanımlanabilir (Sağlık ve Güngör 2008). Şekil 2.3’te bir üstyapı enkesit şeması verilmiştir.

Kaplamalardan beklenen iki önemli işlevden biri, kaplamanın sürüş konforunun yanında emniyeti de kapsayan ‘*performans*’; bir diğeri, kaplamanın deformasyona karşı göstermiş olduğu direnci tanımlayan ‘*stabilite*’dir. Bu bağlamda, kaplamaların sahip olması gereken özellikler aşağıda verilmiştir:

- Karayolu taşıtları için pürüzsüz ve aynı zamanda düzgün bir yüzey sağlamak üzere sürüş konforunu artırarak taşıtların işletme giderlerinin azalmasını sağlamalıdır.
- Sürüş emniyeti sağlaması amacıyla yeterli kayma direnci sağlamalıdır.
- Trafik kaynaklı yüklerin neden olacağı aşınma ve deformasyonlara karşı yeterli direnci sağlamalıdır.
- Trafik kaynaklı yükleri yayılı bir yüke dönüştürüp zemine iletmeli ve aynı zamanda bu yüklere karşı mukavemet sağlamalıdır.
- Bozulmalar sonucu oluşan bakım-onarım ve yeniden yapım gibi maliyetlerin azaltılması için yeterli bir yorulma mukavemeti sağlamalıdır.
- Zeminde beklenen gerilmeyi oluşturabilecek ve yük tekrür sayısına direnebilecek

kalınlığı sağlamalıdır.

- Zeminde don kabarması, şişme gibi nedenlerden kaynaklanan ve zemin taşıma gücünü etkileyen her türlü gerilmeye karşı koyabilecek bir davranış sağlamalıdır. Zemin taşıma gücünün azalmasında yeteri kadar rijit bir davranış gösterirken, zeminde oluşabilecek uzun dönem oturmalarda çökmelere karşı yeteri kadar esnek bir davranış sağlamalıdır.
- Yağmur suyunun alt tabakalara sızmasını önlemek için yeterli geçirimsizliği sağlamalıdır.



Şekil 2.3 Karayolu üstyapı enkesiti (AASHTO 1993).

Tüm bu özellikler dikkate alındığında, kaplamanın;

- ✓ Karayolu taşıtları için konfor ve emniyet sağlaması,
- ✓ Trafik kaynaklı yükleri emniyetli bir şekilde zemine iletebilmesi,
- ✓ Trafikten, çevreden ya da iklimden kaynaklanan etkilere karşı dayanıklı olması ve direnç göstermesi gerekmektedir (Tunç 2007).

Karayolu kaplamaları, kullanılan malzemeye bağlı olarak rijit ya da esnek olarak inşa edilebilirler.

Kaplama türünün seçimi için şu parametreler göz önünde bulundurulmaktadır:

- Taban zemininin durumu
- Proje maliyeti ve uzunluğu
- Sanat yapılarının varlığı
- Trafik türü ve yoğunluğu
- Çevresel koşullar
- Ekonomik etkenler (Sağlık ve Güngör 2008, Hallin 2011).

Rijit Kaplama

Rijit kaplama, trafik hacmi yüksek olan yollarda granüler bir alttemel tabakasının üzerine yapılmış beton plaklardan oluşur. Rijit kaplamanın aşınma yüzeyi, genelde alt tabakalarda yer alan malzemelerdeki düzensizlikler karşısında bir kiriş gibi davranış gösterecek şekilde Portland çimento betonundan yapılır. Taban zemini ile rijit (beton) kaplama arasında bir tabaka ihtiyaç halinde kullanılabilir. Rijit kaplamalar, alt tabakadaki malzemede oluşan düzensizlik durumunda buna karşı koyabilecek bir eğilme mukavemetine sahiptir. Böylece minimal düzensizliklerin beton kaplamaya yansımaması sağlanabilir. Eğer doğru şekilde tasarlanır ve inşa edilirse rijit kaplamalar, uzun hizmet ömrüne sahiptir. Bu kaplama türleri genelde kent içi yollarda kullanılmasına rağmen, yoğun trafik yüklerini taşımak için inşa edilir (Tunç 2007, Garber ve Hoel 2009).

Esnek Kaplama

Maruz kaldığı tekerlek yükünden gelen gerilmeleri, granüler yapıdaki temas noktaları boyunca taneden taneye aktararak tabakalara ileterek, yükü daha geniş bir alana dağıtarak gerilmeyi derinliğe bağlı olarak dağıtabilen ve yükleri bu şekilde dağıtma kabiliyeti nedeniyle “esnek kaplama” olarak da adlandırılan asfalt betonu, 1920'lerden beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcının viskoz yapısı asfalt betonunun plastik deformasyonu sürdürmesine önemli ölçüde izin verir, ancak zaman içinde tekrarlanan yüklemekten kaynaklanan yorulma en yaygın bozulma mekanizmasıdır (Mathew ve Rao 2006, Sağlık ve Güngör 2008). Esnek kaplama, birden fazla tabakanın bulunduğu bir yapı olup suyu bünyesinden uzaklaştırma kabiliyeti olan yüksek granüler malzemelere sahip

alt tabakalardan ve sürüş konforu ve stabilite sağlama özelliğine sahip bitümlü karışımlardan meydana gelmiş üst tabakalardan oluşur (Mathew ve Rao 2006, Tunç 2007). Esnek kaplamanın aşınma yüzeyi, genelde küçük düzensizlikler olsa bile alt tabakalarda yer alan malzeme ile temas halinde kalacak şekilde bitümlü malzemelerden yapılır. Bu aşınma yüzeyi, trafik yüklerini, agrega kenetlenmesi, granüler malzemelerin sürtünme etkisi ve ince malzemelerin kohezyonu aracılığıyla alttaki destek tabakalarına aktarır (İnt. Kyn.2).

Esnek kaplamanın bileşenleri; taban zemini ya da tesviye düzlemi, alt temel, temel, binder ve aşınma tabakalarıdır. Üstyapının performansı, her tabakanın özelliklerinin ayrı ayrı değerlendirilmesine bağlıdır.

Taban zemini, kaplamaya yatay hizalanmış olarak bulunan doğal malzeme olup üstündeki tabakaların maruz kaldığı gerilmeleri karşılamak amacıyla üstyapının temeli olarak görev yapmaktadır. İnşa edilen kaplama türü için gereken belirli mukavemet özelliklerini elde etmek için bu malzemenin işlenmesi gerekebilir. Hiçbir zaman toprak alt tabakasının aşırı gerilmemesi esastır. Optimum nem içeriğine yakın, istenen yoğunluk değerine göre sıkıştırılmalıdır.

Alttemel tabakası, taban zemininin hemen üstünde bulunan alt taban bileşeni genellikle alt kat yapımı için kullanılan üstün kalitede malzemedir. Taban zemini malzemelerinin kalitesi alttemel malzemesinin gereksinimlerini karşıladığında, alttemel bileşeni ihmal edilebilir. Uygun alttemel malzemesinin hazır olmadığı durumlarda, mevcut malzeme gerekli özellikleri elde etmek için diğer malzemelerle iyileştirilebilir. Zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için bu işlem stabilizasyon olarak tanımlanmaktadır.

Temel tabakası, alt temelin hemen üzerinde yer alır. Alttemel tabakasının kullanılmadığı durumda taban zemininin hemen üzerinde yer alabilir. Bu tabaka genelde, kırılmış taş, kırılmış ya da kırılmamış cüruf, kırılmış ya da kırılmamış çakıl ve kum gibi granül malzemelerden oluşur. Gerekli özelliklere sahip olmayan malzemeler, Portland çimentosu, asfalt ve kireç gibi malzemeler kullanılarak özellikleri geliştirilebilir.

Yüzey tabakası, yol kaplamasının en üstünde bulunur ve temel tabakasının hemen üzerine inşa edilir. Bu tabaka, genellikle mineral agregalar ve asfalt karışımından oluşur. Yüksek lastik basınçlarına dayanabilen, trafik nedeniyle aşındırıcı kuvvetlere direnebilen, kaymaya dayanıklı bir sürüş yüzeyi sağlayabilen ve yüzey üzerinde biriken suyun alttaki tabakalara nüfuz etmesini önleyebilen tabakadır. Kaplamada beklenen trafik yoğunluğuna bağlı olarak kalınlığı değişkenlik gösterebilir. Binder ve aşınma olmak üzere iki tabakadan meydana geldiğinde binder tabakasının üzerine aşınma tabakası serilerek oluşturulur. Binder tabakası genellikle daha az asfalta sahip agregalardan oluşur ve yüzey tabakası kadar yüksek kalite gerektirmez, bu nedenle yüzey tabakasının bir kısmının bağlayıcı tabakası ile değiştirilmesi daha ekonomik tasarım ile sonuçlanır (Mathew ve Rao 2006, Garber ve Hoel 2009).

2.4 Esnek Üstyapıda Bozulma

Yol üstyapılarının hizmet ömürleri boyunca maruz kaldıkları tüm etkiler sonucunda yapısal ve fonksiyonel açıdan beklentileri karşılayamadıkları durumlarda, üstyapıların bütünlüğünde, sürekliliğinde ve direncinde meydana gelen kayıpların tamamı “bozulma” olarak tanımlanabilir. Esnek üstyapıda meydana gelen bozulmaların önüne geçilebilmesi için bozulmaya neden olan etkenlerin de bilinmesi gerekmektedir.

2.4.1 Esnek Üstyapı Bozulmalarının Nedenleri

Esnek üstyapılarda meydana gelen bozulmaların genel nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Üstyapıyı oluşturan tabakaların taşıma gücünde herhangi bir nedenle azalma meydana gelmesi
- Trafik yükünün tahribat yaratan etkisi
- İklimsel şartlar
- Asfalt karışımının özellikleri
- Taban zemininin kalitesi ve durumu
- Yapım tekniğindeki hata ve yetersizlikler

Asfalt karışımın özelliklerinden kaynaklanan bozulma nedenleri:

- Uygun olmayan malzeme kullanımı
 - ✓ Kontrolsüz ve hatalı granülometri
 - ✓ Yuvarlak şekilli agrega (dere agregası) kullanımı
 - ✓ Çürümüş, kirlenmiş ya da kolay cilalanabilen agrega kullanımı

- Karışımın hazırlanmasında yapılan hatalar
 - ✓ Kullanılan asfalt miktarının hatalı olması
 - ✓ Kullanılan mineral filler oranının hatalı olması
 - ✓ Granülometrinin bozulması
 - ✓ Karıştırmadaki yetersizlikler
 - ✓ Sıcaklık kontrolündeki yetersizlikler

- Asfalt kaplama yapımındaki hatalar
 - ✓ Sıkıştırmadaki yetersizlikler
 - ✓ Aşırı sıkıştırma
 - ✓ Serim ve sıkıştırma sıcaklığının düşük olması
 - ✓ İnşa sırasında oluşan segregasyon
 - ✓ Astar tabakasında gerekli özenin gösterilmemesi (Umar ve Ağar 1985, Tamrakar 2019).

2.4.2 Esnek Üstyapı Bozulma Değerlendirmesi ve Performans

Bozulma tespitinde; görsel tanımlama sürecinin öznelliğini en aza indirmek, yöntemin tekrar edilebilirliğini sağlamak, konuyla ilgili uzmanlar arasındaki iletişimi kolaylaştırabilmek ve bozulmaların şiddetini belirlemek, tanımlamak ve değerlendirmek amacıyla ortak bir dil oluşturabilmek adına birtakım kriterler bulunmaktadır. Bu kriterler; değerlendirme indeksleri, tekerlek izi bozulmasının derinliği, çatlak oluşumları ve defleksiyon olarak sıralanabilir (Ilıcalı vd. 2001, Ragnoli vd. 2018).

Kaplama performansını değerlendirmede kullanılan indeksler ve özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir:

Çizelge 2.1 Kaplama performansı değerlendirme indeksleri.

İndis	Veri	Ölçüm	Araştırma Yöntemi
PCI	Kaplama Yüzeyi	Bozulmanın Türü, Şiddeti ve Miktarı	Görsel İnceleme
IRI	Sürüş Kalitesi	Düzgünsüzlük	Yol Profili
RD	Deformasyon	Boyuna Kaplama Defleksiyonu	Yol Profili
PSI	Sürüş Kalitesi	Fonksiyonel Performans	Görsel İnceleme

Kaplama Durum İndeksi (PCI): PCI, tamamen bozulmuş bir kaplama için 0 değeri ile başlayıp, mükemmel durumda bir kaplama için 100'e kadar değişen sayısal bir indekstir. PCI hesabı, bozulma tipi, şiddeti ve miktarının tanımlandığı görsel durum araştırmalarının sonuçlarına dayanmaktadır. PCI, kaplamanın yapısal bütünlüğünün ve yüzeyin operasyonel durumunun bir indeksini sağlamak için geliştirilmiştir. PCI koşul araştırmasının bir parçası olarak elde edilen bozulma bilgisi, bozulmaların nedenleri ve bunun yük veya iklim ile ilgili olup olmadığı hakkında fikir vermektedir (Shahin 2005).

Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI): Dünya Bankası tarafından 1980 yılında geliştirilen ve kullanılan tekerlek yolunun boyuna profil açısından sürüş kalitesini sınıflandırmayı sağlayan standartlaştırılmış bir ölçümdür (Ragnoli vd. 2018).

Tekerlek İzi Derinliği (RD): Yol platformunu kullanan araçların tekerleklerinin oluşturduğu boyuna eğilme miktarı, belirlenen değerin (1~2.5 cm) üzerine çıkmasıyla beraber yolun bozulmaya başladığı söylenebilmektedir (İlıcılı vd. 2001).

Mevcut Hizmet Verilebilirlik İndeksi (PSI): Sürüş kalitesine göre kaplamanın fonksiyonel durumunu açıklamak için kullanılan yaygın bir değerlendirme parametresidir (Shoukry vd. 1997).

2.4.3 Esnek Üstyapı Bozulma Çeşitleri

Esnek üstyapılarda oluşan bozulma çeşitleri 5 ana grupta sınıflandırılabilir. Bu bozulmalar; çatlaklar, yama ve çukurlar, yüzey bozulmaları, yüzey kusurları ve diğer bozulmalardır.

✓ **Çatlaklar**

- **Yorulma Çatlakları:** Tekrarlanan trafik yüklerine (tekerlek yolları) maruz kalan alanlarda görülür. Gelişimin erken aşamalarında birbirine bağlı çatlaklar halindeyken, daha sonraki aşamalarda bir timsah deseni ile karakteristik olarak, genellikle en uzun tarafta 0,3 m'den az, çok taraflı, keskin köşeli parçalar halinde gelişir.
- **Blok Çatlaklar:** Döşemeyi yaklaşık dikdörtgen parçalara bölen bir çatlak deseninde oluşur. Dikdörtgen blokların boyutları yaklaşık 0.1 ila 10 m² arasındadır.
- **Kenar Çatlakları:** Sadece asfaltsız banketleri olan kaplamalar için geçerlidir. Kaplama kenarıyla kesişen ve bankete bitişik kaplama kenarının yaklaşık 0.6 m yakınında bulunan hilal şeklinde çatlaklar halinde görülebilirler. Tekerlek yolu dışında ve kaplama kenarının yaklaşık 0.6 m yakınında uzunlamasına çatlaklardır.
- **Boyuna Çatlaklar:** Çoğunlukla kaplamanın eksenine paralel şekilde oluşan çatlaklardır. Şerit içindeki konumu (tekerlek yolu ile tekerlek yolu dışında kalan bölge arasındaki mesafe) önemlidir.
- **Yansıma Çatlakları:** Asfalt kaplamanın beton kaplama üzerinde uygulandığı durumlarda, altta yer alan beton kaplamalardaki derzlerin üzerinde meydana gelen asfalt kaplama yüzeylerinde oluşan çatlaklardır.

Çatlaklara ilişkin daha detaylı bilgi 2.4.3.1 numaralı başlık altında açıklanacaktır.

✓ **Yama ve Çukurlar**

- **Yama / Yama Kusurları:** Kaplama yüzeyinin sökülen ve değiştirilen kaplama yüzeyinin 0.1 m²'ye eşit veya daha büyük olması veya yol yapımından sonra kaplamaya ek malzeme uygulanması durumunda oluşan bozulmalardır.
- **Çukurlar:** Kaplama yüzeyinde çeşitli ebatlarda dairesel oyuklardır. Planda minimum boyutu 150 mm'dir. Dairesel çukurların çapı minimum 150 mm olmalıdır. 150 mm çapında bir daire, düzensiz şekilli çukurların içine sığmalıdır.

✓ **Yüzey Bozulmaları**

- **Tekerlek İzi Bozulmaları:** Araçların tekerleklerinin tekabül ettiği yol

bölümlerinde yüzeysel bir çökmedir. Enine yer değiştirmeyeyle ilişkilendirilebilir.

- **Yüzeyde Toplanma:** Kaplama yüzeyinin bölgesel bir alanının uzunlamasına yer değiştirmesi sonucu oluşan bozulmadır. Genellikle araçların frenlenmesi veya hızlanması sonucuyla oluşur. Boyuna yer değiştirmeyeyle ilişkilendirilebilir.

✓ **Yüzey Kusurları**

- **Kusma:** Genellikle tekerlek yollarında bulunan kaplama yüzeyinde aşırı bitümlü bağlayıcı ile karşılaşılan bozulma türüdür. Aşırı asfalt nedeniyle oluşan bozulmanın olduğu yüzey, mevcut dokusunu kaybeder. Agregaya; parlak, cam gibi yansıtıcı bir yüzeye sahip aşırı asfalt tarafından gizlenir.
- **Agrega Cilalanması:** Yüzeydeki bağlayıcı malzeme, iri agregayı ortaya çıkarmış ve agregaya aşınmıştır.
- **Sökülme:** Agregada danelerinin yerinden çıkması ve asfalt bağlayıcısının kaybından kaynaklanan kaplama yüzeyinin aşınması. Sökülme; ince agregaya aşınmasına, bir miktar iri agregaya aşınmasına ve tüm bunlarla birlikte agregaya kaybıyla sonuçlanan pürüzlü ve oyuk bir yüzeye sonuçlanır.

✓ **Diğer Bozulmalar**

- **Alçak Banket:** Araç trafiğinin devam ettiği yüzey ile dış banket arasında oluşan yükseklik farkının oluşturduğu bozulma türüdür. Genelde, dış banket kaplama tabakasındaki malzeme farkının bir sonucu olarak oturduğunda bu bozulma meydana gelir.
- **Terleme ve Kaplamadan Su Çıkışı:** Kaplamanın altından, kaplama yüzeyindeki çatlaklardan su sızması veya atılması sonucu oluşan bozulma türüdür. Bazı durumlarda, kaplama yüzeyinde, temel tabakasından yüzeye çıkarak yüzeyi lekelemiş ince malzeme birikintileri ile tespit edilebilir (Miller ve Bellinger 2003).

2.4.3.1 Esnek Üstyapıda Meydana Gelen Çatlaklar

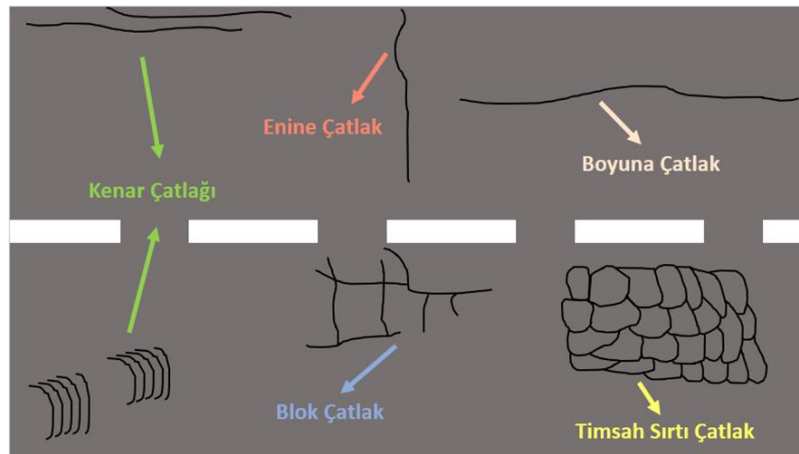
Kaplamalarda çatlak mekanizması, kaplamanın çekme veya kesme mukavemetini aşan bir yüzey tabakasında bir kırılma veya yarılmaya neden olan bir gerilimle oluşmaktadır (Caltrans 2003).

Asfalt kaplama yüzeyinde ve altyapılarında çeşitli nedenlerle meydana gelmiş çatlaklar, nemin yol yüzeyine nüfuz etmesine neden olarak kaplamanın bozulmasına neden olduğundan tehlike arz etmektedir (İnt.Kyn.3).

Kaplamaların yüzeyinde çatlakların oluşma nedenleri;

- *Donma-çözünme döngüsü sonucu oluşan hacim değişiklikleri (şişme ve büzülme),*
- *Daha önce başka nedenlerle oluşmuş bozulmalar,*
- *Aşırı trafik yükünün, iklimin ve çevresel faktörlerin olumsuz etkisi,*
- *Hatalı veya özensiz yapım ve onarım teknikleri,*
- *Asfaltın zaman içerisinde okside olarak yaşlanması,*
- *Tabakaların sıkıştırılmasının, uygulanan drenajın ve taşıma gücünün yetersiz olması,*
- *Üstyapının boyutlandırılmasına ilişkin hatalar şeklinde sıralanabilir (Sağlık ve Güngör 2008).*

Kaplama yapısında çatlakların ortaya çıkması, kaplamanın sürekliliğini yitirmesine ve suyun kaplamaya sızmak için yollar bulmasına neden olur. Su, kaplamanın yapısal kapasitesini düşürmekte, hizmet ömrünü kısaltmakta, tabakalar arasındaki bağlanma gücünü azaltmakta ve daha sonra trafik yüklerinin etkisi altında başka hasarlara neden olmaktadır. Enine çatlaklar ve boyuna çatlaklar kesiştiğinde, asfalt kaplamanın sürekliliği, düzensiz ve sınırlı boyutlu plakalara dönüşerek bozulmaları hızlandırmaktadır (Sha ve Tu 2012).



Şekil 2.4 Esnek üstyapıdaki çatlakların sembolik gösterimi (Raya 1992)

Esnek üstyapıda oluşabilecek çatlaklar, Şekil 2.4'te sembolik olarak gösterilmektedir.

Boyuna Çatlaklar, yapım aşamasının yetersizliği, asfaltın sıcaklık döngüsü veya yaşlanarak sertleşmesi nedeniyle yüzey tabakasının büzülmesi sonucu oluşan çatlaklardır. Çatlağın, şerit içerisindeki konumuna bağlı olarak yüke bağlı veya yükten bağımsız olabilir. Tekerlek yolunda oluşmuş bir boyuna çatlak, yorulma çatlağının ilk aşamasını da ifade eder (Shatnawi 2008).

Yorulma Çatlakları (Timsah Sırtı Çatlaklar), tekerlek yüküne bağlı olarak tekrarlanan gerilmelere maruz kalan kaplamanın yapısında çatlağın başlaması ve bu çatlağın zaman içerisinde yayılma yaparak ilerlemesi sonucu oluşan çatlaklardır. Yorulma çatlakları, yüzeyden kaynaklanıp tabana doğru ya da tabandan başlayıp -tam tersi- yüzeye doğru şekilde ilerleyerek meydana gelebilmektedir. Yüzey kaynaklı bir yorulma çatlağı doğrudan bir lastiğin altındaki gerilme durumuyla ilişkilidir ve genellikle daha ince sıcak karışım asfalt (HMA) tabakalarında tabandan kaynaklanıp yüzeye doğru belirginleşen çatlaklardan çok daha uzun sürer (Shatnawi 2008).

Timsah sırtı çatlak veya yorulma çatlamaşı, asfalt yüzeyi tabakasında, tekrarlanan trafik yükü altında yorulma etkisinden kaynaklanan birbirine bağlı şekilde görünen çatlaklar grubudur. Çatlak, asfalt yüzeyinin veya temel tabanın dip noktasında başlayabilir. Gerilme ve şekil değıştirme değeri, tekerlek yükü altında en yüksek değeri almaktadır.

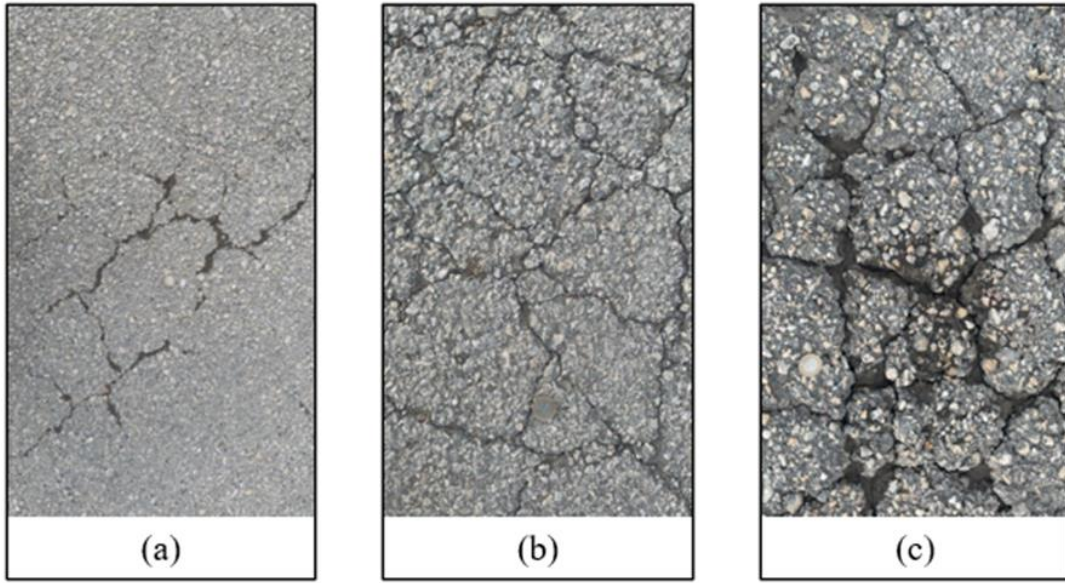
Çatlaklar, başlangıçta boyuna çatlak olarak yüzeye yayılır. Tekrarlanan trafik yüküne maruz kaldıktan sonra, çatlaklar birleşerek, timsah derisine benzeyen bir desen geliştiren birçok kenarlı parçalar oluşturur. Oluşan bu parçalar genellikle en uzun kenarda 0,5 m'den daha azdır.

Diğer bozulmalar gibi timsah sırtı çatlaklar da değerlendirilirken şiddet ve yoğunluk değeri kullanılmaktadır. Şiddet seviyeleri Resim 2.1'de de gösterildiği gibi düşük, orta ve yüksek olarak derecelendirilmektedir.

Düşük Şiddetli Timsah Sırtı Çatlak: Çatlaklar birbirine paralel ve ince şekilde görünmektedir. Birbirine bağlı halde yayılma gösteren çatlaklar hiç yoktur ya da oldukça az sayıdadır.

Orta Şiddetli Timsah Sırtı Çatlak: Çatlaklar, düşük şiddetli bir timsah sırtı çatlağın gelişmesi ile dikkatli bakıldığında fark edilebilen parçalardan oluşan bir desene dönüşmüştür.

Yüksek Şiddetli Timsah Sırtı Çatlak: Çatlaklar, kolayca tanımlanabilecek parçalara bölünmüşlerdir. Ağ şeklinde yayılan bir desen oluşturan bu çatlakların kenarlarında kopmalar ve parçalanmalar meydana gelmiştir.



Resim 2.1 Düşük (a), orta (b) ve yüksek (c) şiddetli timsah sırtı çatlak örneği.

Timsah sırtı çatlaklar, yüzey alanında metrekare olarak ölçülmektedir. Bu tür bir bozulmanın değerlendirilmesinde karşılaşılabilecek en büyük zorluk, genellikle bozulmaların yoğunlaştığı bir alanda, farklı şiddet seviyelerinin mevcut olmasıdır. Bu bölümler birbirinden kolaylıkla ayırt edilebiliyorsa, ayrı ayrı ölçülerek kaydedilmelidir. Ancak, farklı şiddet seviyeleri kolayca bölünemiyorsa, tüm alan mevcut en yüksek şiddette derecelendirilmelidir (ASTM 2009).

Enine Çatlaklar, yapım aşamasındaki kullanılan hatalı inşaat teknikleri, düşük sıcaklıklar veya asfalt malzemenin sertleşmesi nedeniyle asfalt yüzeyinin büzülmesi veya yüzeyin altındaki çatlakların neden olduğu yansıma çatlakları nedeniyle kaplamaların şeritleri arasında oluşan bağlanma kuvvetinin azalması sonucu oluşan çatlaklardır. Düşük sıcaklıktan kaynaklanan enine çatlaklar, kaplama yüzeyinin altındaki sürtünme ve asfalt tabakasının sürekliliği ile oluşan çekme ve basınç kuvvetlerinden kaynaklanan termal çatlaklar olarak adlandırılır (Shatnawi 2008).

Yansıma Çatlakları, alttaki kaplamadaki bir çatlak veya derzdeki hareketlerin bir sonucu olarak kaplamada görünür. Özellikle uzun açıklıklı plakalara sahip rijit kaplamaların üzerine serilmiş asfalt tabakalarında rastlanmaktadır (Shatnawi 2008).

Blok Çatlaklar, asfalt malzemenin yaşlanmasına ya da özellikle sıcaklıkla ilişkili çevresel faktörlere bağlı olarak asfaltın büzülmesi ve sertleşmesi sonucu oluşan çatlaklardır (Shatnawi 2008).

Kenar Çatlakları, kaplamaların kenarlarında araçların aşırı yüklerinin etkisiyle oluşan gerilme kuvvetlerinin etkileri sonucu oluşan çatlaklardır. Genellikle yol geometrisiyle ilgili hatalar, banketlerin ve kaplama kenarlarındaki drenaj uygulamasının yetersizliği ile ilgilidir (Shatnawi 2008).

2.5 Üstyapı Yönetimi

1966'da Amerikan Devlet Karayolu Görevlileri Derneği tarafından Ulusal İş birliği Karayolu Araştırma Programı aracılığıyla, yol testinin sonuçlarını genişletmek için teorik bir temel sağlamak ve kaplama alanında yeni atılımlar yapmak için başlatılan bir çalışmanın ardından, pek çok kurum, kuruluş ve üniversite konuyla ilgili çalışmalarla ilgilenmiştir. 1960'ların sonları ve 1970'lerin başlarında, "üstyapı yönetim sistemi" terimi tüm bu araştırmacı grupları tarafından kaplamalarla ilgili tüm faaliyetleri tanımlamak için kullanılmaya başlamıştır (Haas ve Hudson 1978, Hudson vd. 1979).

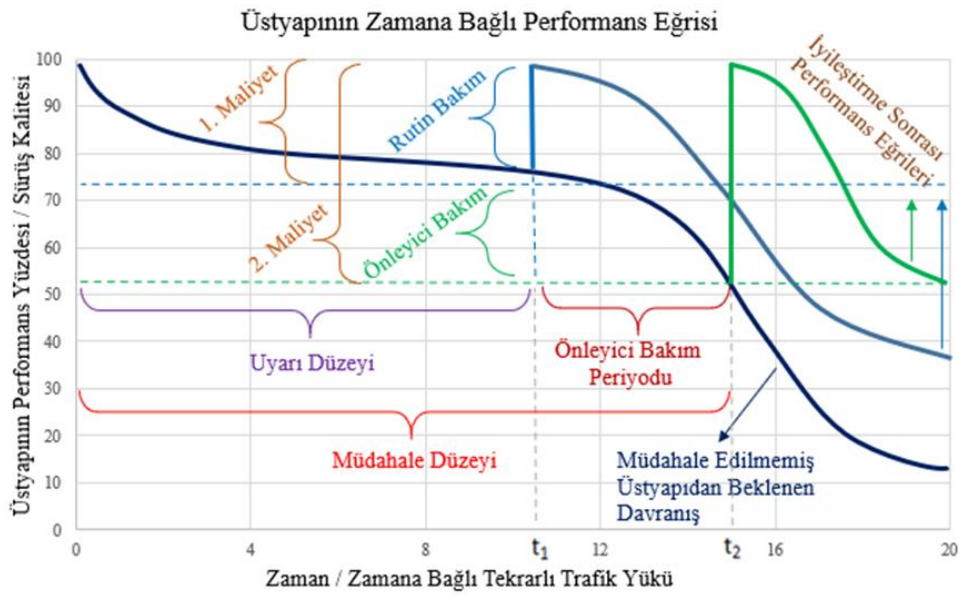
Kaplamalar geçmiş yıllarda sadece korunmakla kalmış ve verimli bir yönetim sağlanamamıştır. Üstyapı ile ilgilenen uzmanlar, geçtiğimiz dönemlerde, bakım ve onarım yöntemlerinin seçimini yaparken, üstyapının hizmet ömrü maliyet analizi veya aynı yol ağındaki diğer kaplama gereksinimleri ile karşılaştırıldığında önceliği göz ardı ederek bu yöntemleri dayatma eğilimindeyken günümüzdeki ekonomik koşullarda, kaplama altyapısı yaşlandıkça, bakım ve onarım ihtiyaçlarının ve önceliklerinin belirlenmesi için daha sistematik bir yaklaşım gerekliliği ortaya çıkmıştır. Teknolojinin gelişim göstermesiyle, üstyapının ekonomik bir şekilde yönetilebilmesi için birçok araç da geliştirilmiştir.

Üstyapı yönetimi, çeşitli yönetim seviyelerinde optimum stratejilerin belirlenmesini ve bu stratejilerin uygulanmasını ve yeterli bir hizmet seviyesine ulaşmış bir üstyapı sağlanması ve bakımı ile ilgili tüm faaliyetleri kapsayan bir mekanizmadır. Bunlar, ilk bilgi edinmeden bakım, rehabilitasyon ve yeni inşaatın planlanması ve programlanmasına, bireysel proje tasarımı ve inşaatının detaylarına ve hizmetteki üstyapıların periyodik olarak izlenmesine kadar uzanır. Tüm yönetim seviyelerindeki karar mercilerine açıkça belirlenmiş rasyonel prosedürler yoluyla elde edilen optimum stratejiler sağlayan ve önceden belirlenmiş kriterlere ve kısıtlamalara tabi olarak, ölçülebilir üstyapı özelliklerinin tahmin edilen değerleri temelinde belirli bir analiz dönemi boyunca alternatif stratejileri değerlendiren ve optimizasyon prosedüründe yer alan çeşitli nitelikler, kriterler ve kısıtlamalar ile ilgili geri bildirimleri içeren dinamik bir süreçtir.

Üstyapı Yönetim Sistemi, bakım ve onarım ihtiyaçlarını belirleyerek doğru yöntemi seçmek ve gelecekteki kaplama koşullarını tahmin ederek öncelikleri ve optimum onarım süresini belirlemek için sistematik ve tutarlı bir yöntem sağlamayı amaçlayan araç veya yöntemler bütünüdür (Hudson vd. 1979).

Üstyapının zaman içerisinde göstereceği performans yüzdesinin tahminine dayalı bir görsel Şekil 2.5'te sunulmuştur.

Kaplamanın bozulmasının erken dönemlerinde, doğru zamanlama ile yapılmış bir müdahale sonucu, onarıma ayrılan maliyetlerde %50'ye varan bir düşüş gözlemlenebilmekte ve bu ekonomik getirinin yanı sıra trafiğin uzun süreli kapanması ve kapamaya bağlı servis yollarına yapılan yönlendirmeler de önlenmektedir. Dolayısıyla kaplamanın yaşam döngüsündeki kritik noktaya gelmeden uyarı sağlayan bir sistem olan Üstyapı Yönetimi, güvenli, ekonomik ve pratik analizler sunması açısından oldukça önemli bir noktadadır (Shahin 2005).



Şekil 2.5 Üstyapı performansı tahmin eğrisi (Hergüner ve Açar 2011).

2.5.1 Esnek Üstyapıda Bozulma Tespit Yöntemleri

Bir üstyapının kaplama kesiminin sürüş kalitesi veya güvenlik yönleriyle ilgili olan fonksiyonel koşulları ve tabaka kalınlığı, malzeme özelliği gibi değişkenlerle ölçülen yapısal koşullarını rutin olarak izlemek veya planlı olarak ıslah edici bir eylem amacıyla belirlemek için üstyapıya ilişkin pek çok değerlendirme yapılır. Ağ düzeyinde düzenli olarak yapılan değerlendirmeler, performans modelleri geliştirmek ve bakım-onarım uygulamalarına ve finansmanına öncelik vermek amacıyla kullanılmaktadır. Proje düzeyinde yapılan değerlendirmeler daha çok, en iyi rehabilitasyon stratejilerini belirlemek için mevcut bozulmanın temel nedenlerini ve yerinde malzeme özelliklerini belirlemeye odaklanmıştır (TxDOT 2019).

2.5.1.1 Gözleme Dayalı Tespit Yöntemleri

Kaplamanın fonksiyonel ve yapısal durumlarının özelliklerini nitelik açısından belirlemeye yarayan bir göstergedir. Gözleme dayalı araştırmalar, hareket halindeki bir aracın ön camından yürütölen bir araştırmadan, konuya ilişkin eğitimi bulunan insanların bütöün proje uzunluğu boyunca ya da sadece seğilen örnekte yürüyerek kaplama yüzeyinde, banketlerde ve drenaj sistemlerinde tespit edilen bozulmaları haritalandırarak detaylandıran bir ölçöme varana kadar çeşitlilik göstermektedir. Ancak bu araştırmalar, kaplama değerlendirmesinde bulunan insanların yorumlarına bağlı olduğundan, ortaya çıkan öznellik, son dönemde yüzeysel bozulmaların haritalandırılmasının dijital hale getirilmesine dair çalışmalarla birlikte ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır (NCHRP 2004, TxDOT 2019).

2.5.1.2 Tahribatsız Deney Yöntemleri

Tahribatsız deney yöntemleri, mevcut bir kaplama yapısı üzerinde yapılan ve kaplamayı deney öncesi durumuna döndürmek için sonrasında onarım çalışması gerektirmeyen değerlendirmeler için kullanılan bir terimdir. Tahribatsız deney yöntemlerinin, tahribatlı yöntemlere göre iki önemli avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlardan ilki, malzemede herhangi bir bozulma yaratmadan ve modifikasyona neden olmadan kaplama yerinde değerlendirilmektedir. Oysa tahribatlı deney yöntemleri ile yapılan uygulamalar sonucunda kaplamanın alt tabakalarında bozulmalar oluşmakta ve elde edilen malzemelerin laboratuvar koşullarına götürölmesi gerekmektedir. Diğer bir avantaj ise, tahribatsız yöntemlerin deney sürecinin çok daha hızlı ve düşük maliyetli olması ve aynı zamanda trafik hizmetinde daha az kesinti yarattığından daha fazla deneyin tamamlanmasına izin vermesidir.

Bu yöntemler, genellikle trafik kesintisini en aza indirmek için tercih edilmekte ve laboratuvardaki diğer malzeme özelliklerini değerlendirmek amacıyla seğilen malzeme numunelerinin alınması gereken yerleri belirlemek için bir tarama aracı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu deney türünün odaklandığı nokta, daha fazla tahribatlı

deney (karot, sondaj, hendek açma) ihtiyacının olup olmadığı, bu tahribatlı deneyin yeri ve kaplamanın mevcut yapısal kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir tabaka rijitliği ve dayanımı gibi yerinde özellikleri değerlendirmektedir. Bu yöntemler, fonksiyonel veya yapısal durumu değerlendirebilir.

Tahribatsız deney yöntemleri, sahada toplanan verilerin doğası gereği genellikle nesnel, ancak gözlemcinin veri analizi ve yorumu öznel (Shahin 2005, TxDOT 2019).

- Düşen Ağırlıklı Deflektometre (FWD)
- Dinamik Koni Penetrometresi (DCP)
- Zemin Penetrasyon Radarı (GPR)
- Sismik Yöntemler Kullanan Cihazlar

Düşen Ağırlıklı Deflektometre (FWD)

Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD), her deney konumunda 300 mm çapında bir yük plakasını kaplamayla temas edecek şekilde yerleştiren römorka monte edilmiş bir geçici şekilde yükleme yapan bir cihazdır. Örnek bir Düşen Ağırlıklı Deflektometre, Resim 2.2'de sunulmuştur.

Kaplamaya uygulanan yük nedeniyle oluşan zaman bağlı defleksiyon değerlerini ölçen bu deney yönteminde, deney aralığı yaklaşık 160 metre veya proje başına minimum 30 adet olarak ayarlanmaktadır. Deney düzeneğindeki yük plakasının üzerindeki bir yük sütunu, geçen bir kamyonun çift lastiğinin uyguladığı yüke benzer şekilde bir yükü, kaplamaya aktarmak için düşen bir ağırlık yığını taşımaktadır. 6.7 kN ~ 156 kN arası büyüklüklerde uygulanan yüklemenin yapıldığı dairesel bir plaka ile kaplamanın yüzeyi arasında yüklemenin ani etkisini azaltmak amacıyla lastik bir conta yerleştirilmiştir. Yük plakasından 30 cm'lik artışlarla aralıklı olarak yerleştirilmiş yedi jeofon serisi, yüzeydeki defleksiyonu belirli bir frekansta ve zaman aralığında ölçerek bir "defleksiyon çanağı" oluşturmaktadır.

Düşen Ağırlık Deflektometresi yöntemi ile, kaplamanın birçok bölgesinde, ölçülen defleksiyon değerleri, geri-hesaplama yöntemleriyle, üst yapının tabakalarının mekanik özelliklerinin (Poisson oranı, Elastisite Modülü vb.) belirlenmesinde kullanılmaktadır (Goktepe vd. 2005, TxDOT 2019) .



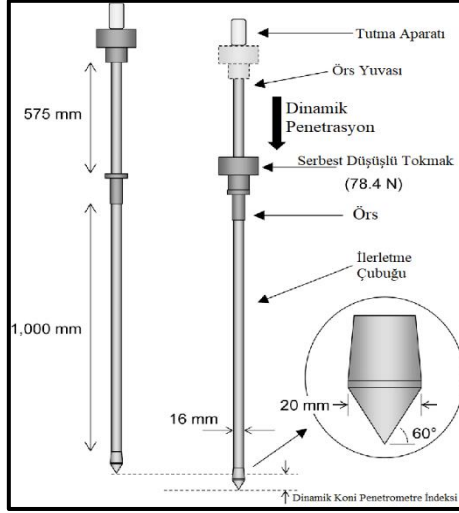
Resim 2.2 Dynatest model düşen ağırlıklı deflektometre cihazı (İnt.Kyn.4)

Dinamik Koni Penetrometresi (DCP)

Genel kullanımda Dinamik Koni Penetrometresi (DCP) zemin mukavemetini ölçmek amacıyla kullanılsa da kaplama tabakasında oluşan ani mukavemet değişimini belirleme aracılığıyla kaplamanın tabaka kalınlığını belirlemek için de kullanılmaktadır (Hong vd. 2016).

Deney cihazı üstüne 8 kg'lık bir ağırlık düşürülerek uygulanan bu yöntemde, sıkıştırılmış temel ve alttemel tabakalarının penetrasyon oranı ölçülür. Penetrasyon oranı, bu tabakaların dayanımıyla ilgili olduğundan bu yüzden yola çıkılarak zemin tabakasının CBR (Kaliforniya Taşıma Oranları) değeri ve kaplamanın yapısal sayıları (SN) hakkında tahminde bulunulabilir (Gurer ve Karasahin 2019).

Şekil 2.6'da bir dinamik koni penetrometresi cihazının örneği gösterilmiştir.

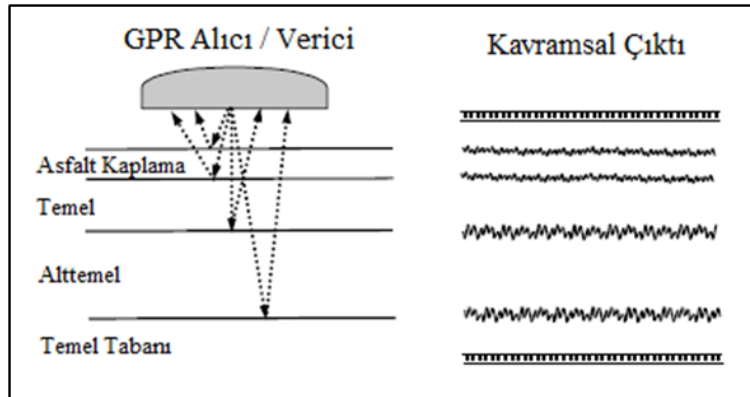


Şekil 2.6 Dinamik Koni Penetrometresi cihazının gösterimi (Hong vd. 2016).

Zemin Radarı (GPR)

Zemin Radarı (GPR); kaya, çakıl gibi doğal oluşumların ve beton, tuğla ve asfalt gibi malzemelerin içeriğini araştırmak amacıyla kullanılan sağlam ve tahribatsız bir yöntemdir. Aynı zamanda, farklı kaplamaların tabaka kalınlığını ve yapısını araştırmak, mevcut yol koşullarının sürekli bir profilini sağlamak ve genelde kazı yapılmadan önce arazi alanlarını araştırmak için kullanılır. 80 km/s'e kadar hızlarda yüksek hızlı veri toplamayı kullanabilir, böylece daha az trafik kontrolü gerektirir ve daha fazla güvenlik sağlar.

Şekil 2.7'de GPR deneyi altındaki bir üstyapının durumu gösterilmiştir.

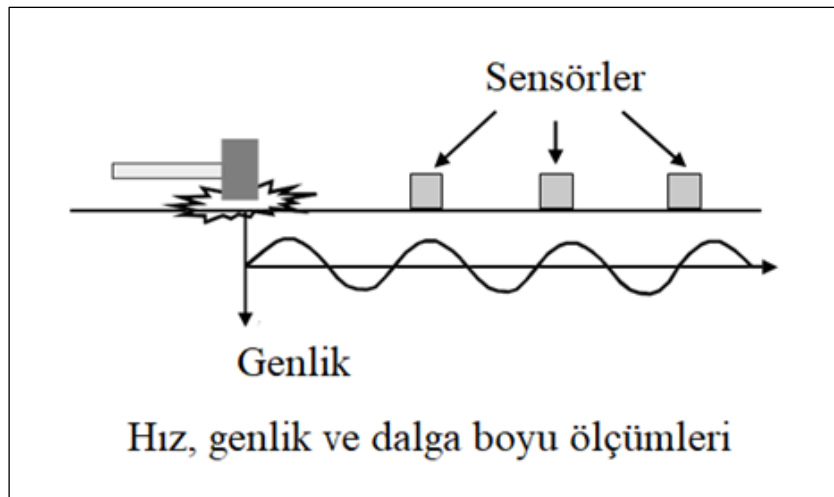


Şekil 2.7 GPR testi altında kaplama yapısını gösteren bir şema (NCHRP 2004).

Radar sistemi, elektromanyetik (EM) enerji dalgaları gönderir ve dalgaların, takip ettiği bölümlerde oluşan süreksizliklerle karşılaştığında ortaya çıkan elektriksel yansımayı tespit ederek çalışır (İnt.Kyn.5). Radarı bir kaplamanın yüzeyi boyunca hareket ettirerek oluşan dalgalar, kaplama tabakalarının profilinin bir görselini oluşturmak için kullanılır. Ölçülen çıktı, elektromanyetik dalganın kaplama sistemine girmesinin ve radar alıcısına geri dönmesinin ne kadar sürdüğünü belirten ve İki Yönlü Seyahat Süresi (TWTT) adı verilen bir zaman ifadesidir. Bu zaman ifadesi, daha sonra gerçek bir derinliğe dönüştürülebilmektedir (NCHRP 2004).

Sismik Yöntemler Kullanan Cihazlar

Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP) kapsamında geliştirilen Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (SASW) kullanılarak kaplama sistemlerinin sismik açıdan değerlendirilmesi, Rayleigh dalgalarının test edilen ortam boyunca seyahat süresinin belirlenmesini ve gözlemlenen tepkinin malzeme özelliklerine dönüştürülmesini içermektedir. Sismik test genellikle küçük bir gerilme altında (%0.01) gerçekleştirilir. Modül değerlerinin ve üst yapı tabakalarının kalınlığının belirlenmesinde de yarar sağlamaktadır (NCHRP 2004). Şekil 2.8'de hız, genlik ve dalga boyu ölçümlerine dair örnek bir gösterim sunulmuştur.



Şekil 2.8 Sismik testleri ifade eden şema (NCHRP 2004).

2.5.1.3 Tahribatlı Deney Yöntemleri

Kanal açma, karotlama ve sondaj yöntemleri, sorunlu tabakanın veya tabakaların kaynağını belirlemek ve daha fazla laboratuvar testi için malzeme elde etmek için probleme dair incelemelerde ve rutin kaplama değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Kaplamanın yapısal olarak bir değerlendirmesini sağlayan tahribatlı deneyler, tahribatsız deneylerle incelenip değerlendirilmede sonuç alınamayan bozulmaların, hangi tabaka nedeniyle oluştuğu gibi araştırmalarda da yarar sağlamaktadır (TxDOT 2019).

Kanal Açma Yöntemi

Temel tabakasındaki malzemeye verilen hasarı en aza indirirken deneyleri gerçekleştirmek ve numune toplamak amacıyla kanal açma yöntemi geliştirilmiştir. Açılan her bir çukurun boyutu 90 cm eninde ve 360 cm boyundadır. Kesici makine üstyapının asfalt tabakasının tamamından geçebilecek derinlikte bir kazı işlemi gerçekleştirmektedir. Ekskavatörün, kesilecek asfalt bloğa erişmesi ve bloğu rahatlıkla çıkarabilmesi için bir yuva oluşturması amacıyla yaklaşık 15 cm genişliğinde bir şerit, kanal açılacak alanın bir ucundan el aletleri yardımıyla kesilerek çıkarılır. Asfalt tabaka çıkarıldıktan ve numuneler toplandıktan sonra, deneyler uygulanabilmektedir.

Ekskavatör, daha sonra temel tabakasını ve birkaç cm kalınlığında alttemeli kazar. Zemin malzemeleri de gerekirse daha fazla laboratuvar değerlendirmesi için alınır. Temel ve alttemel seviyesinde kazılmış alanın enine duvarlarından biri el aletleri kullanılarak daha düzleştirilir. Temiz bir duvar elde edildiğinde, kaplamanın tabakaları tebeşirle görünür hale getirilir ve küçük çivilerle tutturulmuş ipler gerilerek vurgulanır. Her tabakanın kalınlığı, tekerlek izi bozulmasına olan katkısını belirlemek için düzenli aralıklarla ölçülür (TxDOT 2019).

Karot Yöntemi

Kaplamadan 10 ~ 15 cm arasında değişkenlik gösteren çaplara sahip olan karot numunesi çıkarmak için, karot makinesi istenen konuma yerleştirilir ve varil soğutma suyu açılır.

Yaklaşık 20 litrelik bir kovaya yerleştirilen modifiye edilmiş kuru buz, arazideki nem içeriğine sahip numuneler istenirse, karotiyerin soğutulması için kullanılabilir. Numune alınacak tabakalarda bulunan malzemelerin herhangi birinin soyulmaya duyarlı olduğundan şüpheleniliyorsa bu özellikle tavsiye edilmektedir.

Tambur, yaklaşık 500 rpm'de döndürülür ve kademeli olarak asfalt tabakası boyunca indirilir. Temel stabilize edilmişse, operatör sağlam bir numune elde etmek için onu da kesmek isteyebilir. Tambur, istenilen derinliğe erişip kesildikten sonra, dönme durdurulmaksızın geri çekilir. Daha sonra karotiyer durdurulur ve karotun yeri gözlemlenir. Karot numunesi, tambura yerleşip içinde kalabilmişse tambura hafifçe bir çekiç yardımıyla vurulur. Karot hala çıkarılmak istenen bölgedeyse bulunduğu yerden ayrılana kadar ileri geri hareketlerle torna vida gibi gereçler kullanılarak çıkması sağlanır (TxDOT 2019).

Burgu Aleti ile Numune Alma Yöntemi

20-30 cm'lik burgu aleti kullanılarak numunelerin alınması, mevcut tabaka kalınlıklarının belirlenmesi ve kanal açma yöntemine geçmeden önce tüm tabakalara ait malzemelerin örselenmiş örneklerini elde etmek için oldukça yararlıdır. Bu numune alım tekniği, tam derinlikli ıslah projeleri için stabilizatörlerin tipini ve miktarını belirlemek amacıyla malzeme alımı özellikle uygulanabilir (TxDOT 2019).

Shelby Tüpü

Shelby tüp numuneleri; arazideki yoğunluk, nem içeriği, plastisite indisi (PI), şişme potansiyeli, sülfat içeriği, optimum zemin stabilizatörü ve temel tabanı modülünü belirlemek için kullanılır. Bu yöntem ile alınan örnekler genellikle "örselenmemiş" olarak adlandırılır.

Shelby tüpü, kamyon monteli bir vinç kolu üzerindeki hidrolik bir şahmerdan tokmağı tarafından toprağa itilen keskinleştirilmiş bir borudur. Bu borular, bağlayıcı içermeyen ince daneli topraklar dışında herhangi bir tabaka boyunca ilerletmek için çok kırılığandır.

Asfalt ve temel tabakalarını çıkarmak için bir burgu kullanılabilir ve bu işlemde su eklemeyen Shelby tüpü örneklerinin toplanmasına izin verir (TxDOT 2019).

2.5.2 Esnek Üstyapıda Bakım ve Onarım Yöntemleri

Mevcut esnek üstyapıların güvenlik ve konfor özelliklerine ve hizmet ömürlerine büyük ölçüde katkı sağlamak ve böylece kurum ve kuruluşların asfalt maliyetlerini düşürmek amacıyla müdahale edilmesi önemlidir. Ancak bu müdahaleyi doğru zamanda ve doğru uygulamalar kullanarak yapmak da bu işlemin oldukça kritik iki değişkenidir. Bu bağlamda bakım ve onarım yöntemleri şu şekilde açıklanabilir:

2.5.2.1 Onarım Yöntemleri

- Asfalt Kaplamaların Geri Dönüştürülerek Yeniden Kullanımı
- Geosentetik Malzeme Kullanımı ile Uygulanan Yöntem
- Yeniden Yapım Yöntemi

Geri Dönüştürülerek Yeniden Kullanılan Asfalt Kaplama ile Onarım Yöntemi

Kaplama malzemelerinin geri dönüşümü veya yeniden kullanımı önemli ölçüde malzeme, para ve enerji tasarrufu sağlarken, aynı zamanda kaplamada bozulma oluşumunun da giderilmesini sağlamaktadır. Mevcut malzemenin yeniden kullanılması nedeniyle, inşaat sırasında kaplama geometrisi ve kalınlığı da korunabilmektedir. Bazı durumlarda, diğer onarım yöntemlerinden trafik aksaklığı açısından avantaj sağlamaktadır. Geri dönüşümün faydaları şu şekilde özetlenebilir:

- İnşaat maliyetlerinin düşürülmesi,
- Agregası ve bitümün muhafaza edilmesi.
- Mevcut kaplama geometrisinin korunması.
- Doğaya verilen hasarın azaltılması.
- Harcanan enerjinin minimum düzeyde tutulması.
- Trafik kullanıcılarının daha az gecikmeye maruz bırakılması.

Sürüş kalitesinin ve yüzey sürtünmesinin azalması, kaplamada görülen bozulmalar, bakım gereksiniminin oluşması, kullanıcı maliyetlerindeki artış ve trafik açısından yetersiz yapısal kapasite gibi gerekçelerle performans kaybı olan bir kaplamanın onarımı için alternatif yöntemlerden biri olan asfalt kaplamaların geri dönüştürülerek yeniden kullanımı, 4 farklı şekilde uygulanabilmektedir:

1. *Sıcak Karışım Asfaltın Geri Dönüşümü:* Geri kazanılan asfalt kaplama (RAP) malzemelerinin, sıcak karışım asfalt (HMA) karışımları üretmek için bazen bir geri dönüşüm maddesiyle birlikte yeni malzemelerle birleştirildiği süreçtir. Geri dönüştürülmüş karışım üretmek için hem harman hem de tambur tipi sıcak karışım tesisleri kullanılmaktadır. Karışım yerleştirme ve sıkıştırma ekipmanı ve prosedürleri normal sıcak karışım asfalt (HMA) ile aynıdır.

2. *Yerinde Sıcak Karışım Asfaltın Geri Dönüşümü:* Mevcut kaplamanın ısıtıldığı ve yumuşatıldığı ve ardından belirli bir derinliğe kadar kazındığı / öğütüldüğü bir yöntemden oluşmaktadır. Geri dönüşüm işlemi sırasında kazınmış geri kazanılan asfalt kaplama (RAP) malzemesine sıcak karışım asfalt (HMA) ve/veya geri dönüşüm katkı malzemesi eklenebilir. Tek geçişli veya çok geçişli olarak gerçekleştirilebilen bu yöntemde, tek geçişte kazıma yapılan yerden elde edilen malzeme, gerekirse veya istenirse yeni malzeme ile birleştirilebilir.

3. *Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm:* Mevcut kaplama malzemesinin ısı uygulanmadan yeniden kullanılmasını içermektedir. Herhangi bir geri dönüşüm katkı malzemesi hariç, genellikle malzeme nakliyesi gerekmediğinden nakliye maliyeti oldukça düşüktür ve agrega eklenebilmektedir. Genelde, bir geri dönüşüm katkı malzemesi veya bağlayıcı olarak bir asfalt emülsiyonu eklenmektedir. Emülsiyon, geri kazanılan asfalt kaplama (RAP) ağırlık yüzdesi olarak orantılıdır. Uçucu kül veya çimento veya sönmemiş kireç de ekleme sırasında kullanılabilir. Bu katkı malzemesi, asfalt oranı yüksek ve düşük stabiliteye sahip karışımlar için etkilidir. Geri dönüşüm süreci, mevcut kaplamanın toz haline getirilmesini, geri kazanılan asfalt kaplamanın (RAP) boyutlandırılmasını, geri dönüşüm maddesinin uygulanmasını, yerleştirmeyi ve sıkıştırmayı içermektedir. Toz

haline getirme, eleme, kırma ve karıştırma birimlerinden oluşan bir geri dönüşüm düzeneğinin kullanımı oldukça yaygındır. İşlenen malzeme, karıştırma cihazından bir yığın içine yerleştirilir, burada alınır, yerleştirilir ve geleneksel sıcak karışım asfalt serme ve haddeme ekipmanı ile sıkıştırılır. İşlem derinliği 75 ila 100 mm arasında uygulanmaktadır.

4. *Tam Derinlikli İyileştirme:* Tüm asfalt kaplama bölümünün ve önceden belirlenmiş miktarda altta yatan temel malzemesinin stabilize bir taban tabakası oluşturmak için işlendiği bir geri dönüşüm yöntemidir. Bu işlemdeki dört ana adım, toz haline getirme, katkı maddesinin eklenmesi, sıkıştırma ve bir yüzeyin veya bir aşınma tabakasının uygulanmasıdır. Yerinde elde edilmiş malzeme, işlem görmüş temel istenen derinliğini sağlamak için yeterli değilse, yeni malzemeler işleme dahil edilebilmektedir. Belirli bir malzeme gradasyonu elde etmek için bu malzemeye yeni agregalar da eklenebilmektedir. Bu geri dönüşüm yöntemi, normalde, 100 mm ila 300 mm derinliğe kadar gerçekleştirilir. Bu yöntemin avantajları, çoğu kaplama bozulmasının onarılması, taşıma maliyetlerinin en aza indirilmesi, önemli yapısal iyileştirmelerin yapılabilmesi ve sürüş kalitesinin iyileştirilmesidir (Kandhal ve Mallick 1997).

Geosentetik Malzeme Kullanımı ile Uygulanan Yöntem

Kaplama tasarımında geosentetik malzemelerin dahil edilmesinin en önemli amacı, asfalt kaplamalardaki yansıma çatlağının oluşumunu engellemek ve alttaki tabakalara nem girişini önlemektir. Bu malzemeler, asgari olarak yeni bir asfalt kaplamanın yüzey tabakasına yerleştirilerek genel bir onarım stratejisinin parçası olabilmektedir.

Geogrid Malzemeler: Yansıma çatlağını önlemek amacıyla kullanılan geotekstil malzemedir. Kullanım uygunluğunun değerlendirilirken, yapıdaki mevcut çatlaklar, çatlak dağılımının trafik yüküne ve çatlak genişliğinin sıcaklık farklarına bağlı olmadığı durumlarla sınırlandırılmalıdır. Kaplamadaki mevcut çatlakların genişliği 9.5 mm'yi geçmemelidir. Bu nedenle, düşük ila orta seviyelerde timsah sırtı veya rastgele çatlaklar, asfalt kaplamada işe yararken, geniş aralıklı termal çatlaklarda fayda sağlamamaktadır. Geogrid uygulamadan önce yoğun bozulmaların bölgesel onarımı ve bir kat asfalt tabaka

uygulaması gerekmektedir. 13 mm'yi aşan tekerlek izi bozulmalarının mevcut olduğu durumlarda yeni bir tabaka oluşturmak yerine frezelemek düşünmelidir. Geogrid malzemeler, en az 50 mm yüzey kaplama tabakası ile örtülmelidir.

Örtü, Kompozit ve Membran Malzemeler: Bu malzemeler, yansıma çatlaklarına karşı farklı seviyelerde sağladıkları direncin yanında neme karşı da bir bariyer etkisi sağlamaktadır. Sızdırmazlık özellikleri, kaplama yapısı içerisinde sıkışan nemin dışarı çıkmasını önlediklerinden bazı durumlarda olumsuz şekilde sonuçlanabilmektedir. Alt tabakalarda kullanılan malzemeler suya karşı duyarlıysa, asfalt tabakalarında sökülme ya da bu malzemelerin altında bulunan asfalt tabakaların soyulmasına neden olabilmektedir. Geogrid malzemeler ile uygulanma teknikleri benzerlik göstermektedir. Ayrıca, yüzey kaplamasının geçirgenliği yüksekse ve yüzeydeki nem, kesitten yanal olarak kolayca sızamıyorsa, yüzey karışımında da soyulma meydana gelebilir. Bu nedenle, mevcut karışımların asfalt tabakasının soyulma duyarlılığına ilişkin laboratuvar testlerinin yapılması gereklidir (İnt.Kyn.6).

Yeniden Yapım Yöntemi

Asfalt kaplamada oluşan bozulmalar, doğru zamanda uygulanmayan teknikler sonucunda daha yüksek düzeyde bir bozulma profili sergilemeye eğilimli olmaktadır. Bozulmaların meydana geldiği kaplamaya yeni bir tabakanın takviye edilmesi, kaplamadan beklenen taşıma gücünün önemli ölçüde kaybolduğu bu durumda mevcut bozulmaların bu yeni tabakalara da yansıtacağı gerekçesi ile önerilmemektedir. Dolayısıyla, mevcut kaplama yüzeyinin üzerinde hem yastık tabakasına benzer şekilde çalışması, hem de kaplamanın taşıma gücüne katkı sağlaması amacıyla inşa edilmiş bir temel tabakasına gerek duyulacaktır. Bozulmuş kaplamanın üstüne granüler malzeme ve granüler malzemenin de üstüne CBR (Kalifornia Taşıma Oranı), M_R (Elastisite Modülü), standart dingil tekerrür sayısı gibi değişkenlere bağlı şekilde hesaplanmış kalınlıklara sahip üstyapı tabakaları serilerek mevcut bozulmuş kaplamanın temel tabanı olarak değerlendirilmesinin sağlandığı bir yöntemdir (Sağlık ve Güngör 2008).

2.5.2.2 Bakım Yöntemleri

Yama

Throw-and-Go Uygulaması: Throw-and-go, yama uygulaması için en yaygın kullanılan yöntemdir, çünkü malzeme hızlı bir şekilde uygulanabilir ve maliyeti düşüktür. Throw-and-go yöntemini kullanarak, malzeme, su ve kalıntı içeren veya içermeyen ve hazırlık gerektirmeyen bir çukura, çukur dolduruluncaya kadar kürekle doldurulur. Bazı durumlarda, sıkıştırma işlemi trafiğe bırakılırken bazı durumlarda, malzeme bir kürek kullanılarak hafifçe sıkıştırılır.

Throw-and-Roll Uygulaması: Throw-and-go tekniğine mükemmel bir alternatif, throw-and-roll yöntemidir. Bu yöntemde de malzeme hazırlık gerektirmeyen bir çukura kürekle doldurulur ve bakım kamyonu lastikleri kullanılarak sıkıştırılır. Bu yöntemle uygulanan sıkıştırma işlemi ile, daha sıkı ve daha uzun ömürlü bir yamanın elde edilmesi sağlanır. Yamayı sıkıştırmak için gereken süre genellikle sadece bir ila iki dakikadır ve bu nedenle kısa vadede de üretkenlik sağlanmaktadır. Uzun vadede, daha az yama gerektiren kaplama ile üretkenlikte ve maliyet tasarrufunda bir artış sağlanacaktır.

Yarı Kalıcı Yöntem: Bu yöntem, etkilenen bölgenin tam derinlemesine değiştirilmesinin yanı sıra en iyi prosedür olarak kabul edilmektedir. Yarı kalıcı yöntemi kullanarak, çukur ilk önce su ve kalıntılardan arındırılmakta ve çukurun kenarları kaplamanın sağlam olduğu bir derinliğe kadar kare haline getirilmektedir. Daha sonra, malzeme yama alanına yerleştirilir ve titreşimli plaka kompaktörleri veya tek tamburlu titreşimli silindirler gibi yama alanından daha küçük ekipmanlarla sıkıştırılmaktadır. Yarı kalıcı onarım yöntemi kullanılarak, yama güçlü bir şekilde sıkıştırılmakta ve yamaya oldukça uzun bir ömür sağlanmaktadır. Bu yöntemde, yama işlemi için soğuk bir karışım hazırlanırken, yaklaşmakta olan trafiğin çukurdan sıçrayan taşlara çarpmamasına dikkat edilmelidir. Soğuk karışımda bulunan serbest çakıl, işlem tamamlandıktan sonra yama bölgesinden, akan trafiğe zarar vermemesi ve bağlayıcının arabalara yapışmaması gerekçesi ile süpürülmelidir.

Sprey Enjeksiyonu: Sprey enjeksiyonu, enine çatlakları ve çukurları onarmak için oldukça kullanışlı bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Çukurun kenarlarına ve alt kısmına bağlayıcı malzemedan oluşan bir kat püskürtülmeden önce, içindeki tüm su ve kalıntılar çıkararak, çukur işleme hazırlanmaktadır. Daha sonra, asfalt ve agrega, başka bir agrega tabakası ile kaplanmadan önce çukura püskürtülmektedir. Sprey enjeksiyonu tekniğinde sıkıştırma aşamasına gerek kalmamaktadır. Artan ekipman maliyetleri ile daha yüksek verimlilik elde edilebilmektedir (Sainz 2016).

Çatlak Dolgusu ve Yalıtımı Uygulamaları

Çatlakların dolgusu ve yalıtımı, su ve katı malzemelerin çatlaklara girmesini engellemek amacıyla yapılan bakım yöntemleridir. Bu yöntemler, çatlağın doldurulması gereken malzemenin miktarına ve kullanılan dolgu malzemesinin türüne göre değişiklik göstermektedir.

Çatlak Yalıtımı: Çatlak yalıtımı, genellikle su ve malzemelerin girmesini önlemek için aktif çatlakların içine veya üstüne yerleştirilen özel yüksek kaliteli ve kapsamlı yalıtım malzemelerin kullanılmasını gerektirir. Çatlak yalıtımının genellikle çatlak dolgusuna göre daha uzun süreli bir işlem olduğu düşünülmektedir. Çatlakların hareketli doğası nedeniyle, uygun bir çatlak yalıtım malzemesi:

- Çatlağın duvarlarına tutunmuş halde kalabilen,
- Çatlağın maksimum açıklığa ulaştığı noktaya kadar uzayarak kopmadan orijinal ölçülere erişebilen,
- Çatlak duvarlarında yırtılma veya ayrılma olmadan çeşitli hizmet sıcaklıklarında genişip daralabilen,
- Trafikten kaynaklanan aşınma ve hasara karşı direnç geliştirebilen bir yapıda olmalıdır.

Çatlak Dolgusu: Suyun ve katı malzemelerin çatlağa sızmasını azaltmak için malzemelerin pasif veya düşük hareketli çatlaklara yerleştirilmesidir. Çatlak dolgusu,

genellikle çatlak yalıtımından daha az dolgu malzemesi ve dolgu malzemeleri için daha düşük performans gereksinimleri yeterli olmaktadır. Çatlak dolgusu, büyük ölçülü bakım işlemlerine veya planlı bir onarım faaliyetine kadar kaplamanın bir arada tutulmasına yardımcı olmak için genellikle kısa dönem bir onarım uygulaması olarak kabul edilmektedir. Uygun bir dolgu malzemesi:

- Çatlağın duvarlarına tutunmuş halde kalabilen,
- Belirli bir miktar elastisite değerine sahip olan,
- Trafikten kaynaklanan aşınma ve hasara karşı direnç geliştirebilen bir yapıda olmalıdır (Caltrans 2003).

Bitümlü Koruyucu Sathi Kaplama

Bitümlü Koruyucu Sathi Kaplama, yüzeysel olarak asfalt kaplamaya uygulanabilen bir bakım şeklidir. İnce bir iri agrega tabakasının önceden püskürtülmüş bir asfalt bağlayıcı, emülsiyon veya kesme uygulaması üzerine yayılması dışında sızdırmaz bir tabaka uygulamasıdır. Kaplamaya suyun yıkıcı etkilerinin neden olduğu hasara karşı direnç sağlamak ve kaplamanın yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla uygulanmakta, ancak kaplamaya herhangi bir yapısal güç sağlamamaktadır. Ayrıca kaplama tabakasına, yüzey özelliklerinden dolayı, kayma direnci sağlayan bir makro doku da oluşturmaktadır. Bir bakım faaliyeti ya da çakıl veya toprak bir yolu iyileştirme çalışması olarak kabul edilen bu yöntem ile küçük ve ince çatlaklar doldurulması mümkün olmaktadır. Çatlak genişliği 3 mm'den büyük olan bozulmaların, sathi kaplama uygulamasından önce onarılması ya da yamalanması önerilmektedir. Sathi kaplamaların en yaygın kullanımları, kırsal bölgelerde ve düşük hacimli yollarda görülmektedir. Bir çakıl veya toprak yolun tüm hava koşullarına direnimini sağlamak için nispeten ucuz bir seçenek olduğu söylenebilmektedir. Yol bakımında da maliyet açısından uygun bir uygulamadır (Lavin 2003).

Harç Tipi Kaplama (Slurry Seal)

Harç tipi kaplama; asfalt emülsiyonu, sürekli granülometrilik ince agrega, su ve mineral dolgu maddesinin özel olarak hazırlanmış bir karışımıdır. Bu bakım yöntemi, kaplamaya

yapısal olarak sağlam bir yüzey geçirimsizliği sağlamak veya kaymaya dirençli bir yüzey oluşturmak için kullanılmaktadır.

Harç tipi kaplama, 3 mm'den daha küçük genişliğe sahip çatlakları doldurmaktadır. Daha büyük çatlaklar kaplama yüzeyinde oluşmaya başladıysa, bu uygulanmadan önce ayrı ayrı işlenmesi gerekir (Shahin 2005).

İnce Yüzey Kaplaması (Micro-Surfacing)

Asfalt kaplama tabakalarının hava ile temas etmesi, bitümlü malzemelerin okside olarak sertleşmesine, yapışkanlığın azalmasına neden olur. Hava koşulları gibi faktörlere bağlı olarak yüzey çatlamasına yol açar; bunlar başlangıçta şiddetli görünmese de hasar, ilerleyici ve zamanla kötüleşen bir eğilimdedir. Mevcut yüzeyin geçirgenliğini azaltmak, hava etkisiyle aşınmanın gelişmesini geciktirmek ve yaşlanma ile hızlanmış yüzey çatlaklarının gelecekteki bozulmaları azaltmak amacıyla uygulanan koruyucu bir yüzey kaplama tabakası olan ince yüzey kaplaması, asfalt emülsiyonunun polimer modifiyeli bir asfalt emülsiyonu ile değiştirildiği bir harç tipi kaplama olup kaplamalardan önce enine yüzey tesviyesi sağlamak amacıyla uygulanmaktadır (Smith ve Beatty 1999).

2.6 Konuya İlişkin Yapılmış Çalışmalar

Akarsu vd. (2016), trafik kazalarını etkileyen en önemli faktörlerden biri olan yol bozulmalarının bir an önce düzeltilmesi gerektiği fikrinden yola çıkarak ve literatürde karşılaştıkları bozulma tespitlerine ilişkin çalışmaların, genellikle tek türde bir yol için uygulandığı ve farklı yol türlerinde doğruluk oranlarının düşük olduğu gerekçesiyle, kaplama bozulmalarının tespitinin farklı yollar için de uyarlanabilir hale getirildiği bir çalışma yapmışlardır. Bir araç üzerindeki kameradan alınan görüntülerin kullanıldığı bu çalışmada, isteğe göre uyarlama yöntemi ile farklı yol türlerinde yüksek doğruluk oranlarına sahip olması sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada medyan filtre kullanılarak görüntü bulanıklaştırılmış ve işlenmemiş görüntüler toplanarak görüntünün en karanlık kısımları ön plana çıkarılmıştır. Görüntü ikili (binary) görüntüye dönüştürülmüş ve matematiksel morfolojik işlemlerle geliştirilmiştir. Tüm bu işlemler sonucunda, üzerinde

çatlak bulunmayan yollar, yüzeysel çatlaklar, timsah sırtı çatlaklar, çizgisel çatlaklar ve enine çatlaklar olmak üzere beş adet kategori oluşturulmuş ve incelenen yollardan toplanan görsellerin hangi kategoriye ait olduğunun belirlenmesi sağlanmıştır. Böylece yapılan çalışmanın hızlı ve doğruluk oranlarının yüksek olması ile gerçek hayatta kullanılabileceğini kanıtlamışlardır.

Al-Suleiman vd. (2017), yaptıkları çalışmada, bakım ve rehabilitasyon sürecini kontrol etmek, öncelikleri tanımlamak ve kaynakların optimum tahsisini sağlamak için sistematik bir yöntem gerektiren kaplama ağları için tüm bu gereklilikleri sağlaması amaçlanan bir araç olan Üstyapı Bakım Yönetim Sistemi (PMMS) geliştirmişlerdir. Kaplama bozulmalarından biri olan timsah sırtı çatlakları belirlemek için görüntü işleme teknolojisini kullanan bir Kablosuz Sensör Ağı (WSN) oluşturmuşlardır. Görüntü işleme için kullandıkları veri setleri, kaplama ağındaki karakteristik alanlardan toplanmış ve kaplamanın yüzey durumunu değerlendiren sayısal bir ölçü olan üstyapı durumu indeksini (PCI) oluşturmak için analiz edilmiştir. Çalışmada verilerin gerçek zamanlı toplanması ve bir mobil ağ kullanılarak uzaktaki bir merkezi işlem yönetim sistemine aktarılması için bir mimari oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan bu WSN mimarisinde, verilerin birleştirilmesi ile birlikte timsah çatlakları algılama algoritmasına ilişkin görüntü işleme yöntemi sunulmuştur.

Staniek (2017), asfalt kaplama çatlaklarının tespitinde görüntü işleme teknolojisi kullanarak farklı çatlak türlerinin tanımlanmasını sağlanmasını amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Algılama işlemi, önceden tanımlanmış görüntünün analiz yönü için (test aracının çalışma yönünde ve tersinde de dahil olmak üzere) istatistiksel farklılık tanımlama gibi çeşitli yöntemlerin uygulanmasına dayanmaktadır. Konuya ilişkin ele alınan çalışmalar, bir kez uygulandıktan sonra, söz konusu yöntemin, manuel görsel muayene ile tanımlanan mevcut tüm çatlakların %92'sinde (yol denetimlerini yürüten bir uzman tarafından) çatlak tespitine izin verdiği varsayımına zemin oluşturmaktadır. Görüntü gürültü seviyesini azaltmak amacıyla uygulanan morfolojik ve filtrelemeye dayalı işlemlerle birlikte önerilen çözüm, test aracı kullanılarak kaydedilen bir dizi görüntü biçiminde video materyali kullanılarak doğrulanmıştır.

Cubero-Fernandez vd. (2017), küresel boyutta yol bakım ve onarımı için yapılan yatırımların maliyetini en aza indirebilmenin en önemli yollarından birinin kaplama bozulmalarının erken dönem tespiti olduğunu belirtmişler ve farklı çatlak tipleri farklı onarım türleri gerektirdiğinden sadece çatlağın tespitinin yeterli olmadığını, aynı zamanda çatlak tiplerinin sınıflandırılması da gerekliliğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında, toplanan görsel verilerin temel özelliklerini (logaritmik dönüşüm, bilateral filtre, Canny algoritması ve morfolojik bir filtre) çıkarmak için çeşitli işlemler uygulamış olan araştırmacılar, görüntü ön işlemeden sonra, görüntüyü son olarak sınıflandırmak için bir karar ağacı sezgisel algoritması uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, %88 oranında bir başarıyla çatlağın tespiti ve %80 oranında bir başarıyla çatlağın türünün tespiti sağlanmıştır. Çalışmanın yürütücüleri, 130 km/s'e kadar hızlanabilen bir araç ile uygulamanın kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir.

Wang ve Shi (2017) , yaptıkları çalışmada termal farklılık kullanarak yapılan tahribatsız bir deney yöntemini, sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamalar için permeabilite katsayısının hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için önermiş oldukları metodolojide kullanmışlardır. Sıcak karışım asfalt (HMA) numunesinin permeabilite katsayısı ile hava boşlukları arasındaki ilişki belirlenmiş, yağıştan sonra farklı maruz kalma süreleri ile yüzey sıcaklığı farkını hesaplamak için sonlu eleman yöntemi modelleri oluşturulmuştur. Laboratuvarda hazırladıkları düzenekte, güneş radyasyonu kaynağını ve tamamen suya doymun plaka numunelerini kullanan araştırmacılar, farklı maruz kalma sürelerinde numunede oluşan yüzeysel sıcaklık farkını doğruladıklarını savunmuşlardır. Hazırlanan düzenekle donanım ve bir yazılım geliştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları deney sonuçlarına dayanarak geçirgenlik katsayısı değerlendirme indeksi ve kriterleri oluşturmuşlardır. Çalışma sonuçları, hava boşlukları ile sıcak karışım asfalt (HMA) numunesinin geçirgenlik katsayısı arasında bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamaların geçirgenlik katsayısı, farklı maruz kalma sürelerindeki farklı yüzey sıcaklıkları ile belirlenebildiği kanısına varılan çalışmada, bu yöntem ile geçirgenlik katsayısını tespit etmek için en iyi zaman 09:00-14:00 arası olarak saptandığı ifade edilmiştir.

Khalesi ve Bagheri (2018), dünya çapında hükümetlerin en büyük endişelerinden biri olan yol kalitesini değerlendirmede kullanılan manuel yöntemlerin maliyetlerinin yüksek ve doğruluk oranlarının düşük olması nedeniyle yaptıkları çalışmada otomatik bir değerlendirme yöntemi önermişlerdir. Bu çalışmada, çatlak tespiti için sezgisel bir görüntü segmentasyon tekniği içeren entegre bir model önermişlerdir. Ayrıca, KNN (K-Nearest Neighbors – k-en yakın komşuluk), karar ağaçları ve SVM (support-vector networks – Destek Vektör Makineleri) gibi çeşitli sınıflandırma modellerinin doğruluğu karşılaştırılmıştır. 5 katlı-çapraz doğrulama, “Subspace KNN” yönteminin bu çalışmada kullanılan diğer sınıflandırma modellerine göre daha doğru olacağını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, yoğunluk matris değerlerini kullanarak farklı çatlak bölümlerinin derinliğini ve yoğunluğunun da simülasyonu yapılmıştır.

Li vd. (2019) tarafından kaplamanın bozulması ve yetersizliğinin önemli bir belirtisi olan kaplama çatlaklarının tespiti için, kaplama çatlağını bölümlere ayırmak ve iyileştirmek için dört ana prosedürden oluşan tam otomatik bir algoritma önerilmiştir. İlk olarak, sahte gürültüyü gidermek ve orijinal üç boyutlu kaplama verilerini düzeltmek için bir ön işleme prosedürü uygulanmış; ikinci olarak, yönlendirilebilir uyumlu filtre setleri kullanılarak üç boyutlu kaplama verilerinden çatlak modelleme haritaları, bölümlere ayrılmış; üçüncü olarak 2 boyutlu gerilme, çatlak yapısının daha iyi eğri sürekliliğinin sağlanması ve daha yüksek doğruluk elde edilmesi amacıyla çatlak yükselti haritalarına uygulanmıştır. Son olarak, gürültüleri giderme prosedürleri kullanılmıştır. Bu çalışmalar, çeşitli çatlaklara sahip 200'ün üzerinde asfalt kaplama görüntüsü üzerinde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin yüksek bir performans gösterdiğini ve sırasıyla ortalama %88.38 oranında hassasiyet, % 93.15 oranında geri çağırma değeri ve % 90.68 oranında F doğruluk skoru elde edebileceğini göstermiştir. Buna göre, araştırmacılar, önerdikleri yaklaşımın otomatik kaplama durum değerlendirmesinde yardımcı olabileceğini savunmuşlardır.

Piryonesi ve El-Diraby (2018) tarafından yürütülen çalışmada üstyapı yönetim sürecinde ulaştırma kuruluşlarının ve belediyelerin yol koşul tespitlerine ilişkin veri toplamalarındaki zorluklara değinilerek, veri analitiğinin, düşük bütçeli ve kolay toplanabilir verilerin Kaplama Durum İndeksi (PCI) değerinin gelecekteki değerini

tahmin etmek için kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Araştırmacılar, kullanmış oldukları Uzun Dönemlik Kaplama Performansı (Long-Term Pavement Performance - LTPP) veri tabanı karayolu kısımlarının Kaplama Durum İndeksi (PCI) değerlerini içermediğinden, çalışmanın ilk adımı olarak Kaplama Durum İndeksi (PCI) değerini, bu veri tabanındaki bozulma değerlerini hesaplamak için bazı kaplama özelliklerinin seçildiği bir program geliştirmişlerdir. 7 adet sıralama algoritması ve sezgisel özellik seçme algoritması kullanılarak bu özelliklerin Kaplama Durum İndeksi (PCI) tahmin etmedeki potansiyel önemi test edilmiş, 942 asfalt yol örneğine dayalı olarak iki tür karar ağacı eğitilmiş. 14 özelliğin kombinasyonlarını kullanılarak, Kaplama Durum İndeksi (PCI) bozulma düzeyini yüzde 70'in üzerinde bir doğrulukla tahmin etmek için bir dizi karar ağacı geliştirilmiş ve son olarak, her bir özelliğin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisini test etmek için farklı karar ağaçlarının doğruluk ve karmaşıklık matrisleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, bu yöntemin karayolu performans göstergelerini doğru bir şekilde tahmin etmek için belediyelere ve ulaştırma kuruluşlarına en önemli özellikleri belirlemeleri konusunda yardımcı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Lu vd. (2017), termal görüntülemeyi etkili bir tahribatsız deney yöntemi olarak tanımlamışlardır. Bu teknik ile, araştırmacılar, köprü tabliyelerindeki beton kaplamada tabakaların ayrışma derinliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın modellenmesi için beton silindirin yüzeyine yakın farklı derinlikte iki strafor küpü yerleştirilmiştir. Numunenin ısıtılmasından sonra, yüzeyin altındaki bozulmaların tespit hassasiyeti ve doğruluğu üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir kızılötesi termal kamera kullanılarak yüzeyden termal görüntüler alınmış ve görüntü işleme tekniği ile ayrışmanın boyutunu doğru bir şekilde hesaplamak için analizler yapılmıştır. Ayrıca, beton yüzeyin altındaki bozulmanın varlığını tespit etmek için sıcaklık/mesafe grafiğini kullanılmış ve ısı transfer modellemesi benimsenmiştir. Sonuçlar, laboratuvar bulguları ile karşılaştırılmış ve alternatif bir beton muayene yöntemi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

En yaygın bozulma türlerinden olan ve bozulma başlangıcını temsil eden çatlaklar çalışmaya dahil edilmiştir. Bu bağlamda, asfalt kaplamalı yol kesimlerinden toplanan verilerden görüntü işleme tekniğinden yararlanılarak elde edilen değerler, kaplamanın timsah sırtı çatlaklar açısından üstyapı performansının değerlendirildiği bir indeks haline getirilmiş ve görsel veri toplama ile tahribatsız bir deney yöntemi oluşturma açısından değerlendirilmiştir.

Üstyapı durumunu araştıran uzman görüşlerinin öznelliğini ortadan kaldırmak ve literatüre daha pratik destekleyici bir yöntem kazandırmak amacıyla yapılan çalışma sonucunda geliştirilen formül, ASTM tarafından 2009 yılında yayımlanan kılavuzda yer alan ve Üstyapı Durumu İndeksi (PCI) hesaplarken kullanılan bozulma yoğunluğu açısından timsah sırtı çatlak tipi bozulma için belirtilmiş olan grafiğin eğiliminden yola çıkılarak belirlenmiştir.

Üstyapının mevcut durumunun incelemesinde termal sıcaklık farklarından yararlanıldığından indekse “PTAI (Pavement Thermal Area Index)” adı verilmiştir.

3.1 Materyal

Tez çalışması kapsamında değerlendirilmek üzere toplanan kaplama verilerinin görüntüleri:

- iOS işletim sistemli cep telefonuna ait 12 megapiksel çözünürlüğünde, f/1.8 diyafram değerine sahip dijital kamera,
- telefona monte edilebilen termal kamera,
- termal el kamerası,
- sabit yüksekliği tayin edebilmek için tripod, monopod ve standlar,
- genişlik ve uzunluk kontrolleri için kumpas ve çelik şerit metre kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.1 Veri toplamak amacıyla geliştirilen aparat.



Şekil 3.2 Veri toplamada kullanılan termal el kamerası.

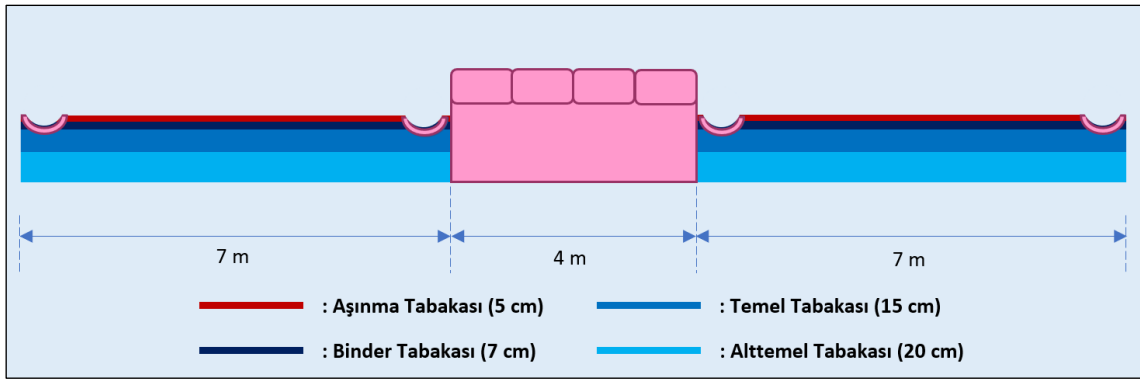


Şekil 3.3 Veri toplamada kullanılan ve telefona monte edilebilen termal el kamerası.

Kaplama verilerinin değerlendirilebilmesi için görüntü işleme ve kullanıcı arayüzü oluşturma aşamalarında MATLAB (2016b) programından yararlanılmıştır.

3.1.1 Veri Toplanan Saha Hakkında Bilgiler

Afyonkarahisar ilinde bulunan Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer (ANS) Yerleşkesindeki kampüs yollarındaki asfalt kaplamalar 2015 yılında inşa edilmiştir. Kampüs yollarındaki asfalt kaplamaların enkesit gösterimine ait şema Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Veri toplanan asfalt kaplamaların şematik enkesit gösterimi.

Kampüste veri toplanan kaplama alanları 3 gruba ayrılmıştır. Afyon Kocatepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörlük Binası arasında kırmızı renkle işaretlenmiş olan krokisi Şekil 3.5'te verilmiş yaklaşık 8000 m²'lik alan "A-Alanı" olarak adlandırılmıştır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörlük Binası ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Atatürk Kültür Merkezi Binası arasında yeşil renkle işaretlenmiş olan krokisi Şekil 3.6'da verilmiş yaklaşık 7200 m²'lik alan "B-Alanı" olarak adlandırılmıştır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Atatürk Kültür Merkezi Binası ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otoparkı arasında mavi renkle işaretlenmiş olan krokisi Şekil 3.7'de verilmiş yaklaşık 8500 m²'lik alan "C-Alanı" olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.5 Veri toplanan ilk alan olan A alanı.



Şekil 3.6 Veri toplanan ikinci alan olan B alanı.



Şekil 3.7 Veri toplanan üçüncü alan olan C alanı.

A alanından 16, B alanında 19 ve C alanından 15 olmak üzere toplam 50 adet timsah sırtı çatlağına ait standart şekilde toplanmış 50 adet görüntü elde edilmiştir.

3.1.2 Telefona Monte Edilebilir Termal Kamera

Tez çalışmasında kullanılan termal görüntüleme cihazlarından biri, cep telefonuna monte edilebilir özelliktedir. Termal kameranın kendine ait bir ekranı bulunmamakta, monte edilen cihazın ekranını kullanmaktadır. Bu özelliği, oldukça pratik bir kullanım sağlamaktadır. Çizelge 3.1’de bu termal kameranın özelliklerine dair bilgi verilmiştir. (İnt.Kyn.7)

Bu kamerada kullanılan MSX® (Multi-Spectral Dynamic Imaging - Çoklu Spektral Dinamik Görüntüleme) teknolojisi, termal görüntülere daha fazla netlik için görünür ışık ayrıntılarını gerçek zamanlı olarak ekleyerek termal okumalara kenar ve ana hat detaylarını katmaktadır. Termal ve gerçek görüntülerin bir birleşimi olmasının aksine, yazılım, daha sonra termal resmin üzerine doğrudan bindirilen çizgiler ve kenarlar gibi yararlı görünür ayrıntıları yakalamak için tasarlanmıştır (İnt.Kyn.8).

Çizelge 3.1 Telefona monte edilebilir termal kameranın teknik özellikleri

Telefona Monte Edilebilir (FLIR ONE Pro) Termal Kameranın Özellikleri	
Boyut	68 mm x 3,4 mm x 14 mm
Ağırlık	36.5 g
Çalışma sıcaklığı	0 °C – 35 °C
Çalışma dışı sıcaklık	-20 °C – 60 °C
Termal sensör	Piksel boyutu 12µm, 8 – 14µm spektral aralık
Termal çözünürlük	160 x 120
Görsel çözünürlük	1440 x 1080

3.1.3 Termal El Kamerası

Tez çalışmasında kullanılan termal görüntüleme cihazlarından bir diğeri, herhangi bir cihaza ihtiyaç duyulmaksızın görüntüleri kaydedip saklayabilen 500 resimlik bir hafızaya

sahiptir. Çizelge 3.2’de bu termal kameranın özelliklerine dair bilgi verilmiştir (İnt.Kyn.9).

Çizelge 3.2 El termal kamerasının teknik özellikleri

Termal El Kamerasının (BOSCH GTC 400 C) Teknik Özellikleri	
Ekran boyutu	3.5 inç
Ağırlık	540 g
İşletme sıcaklığı	-10 °C – 45 °C
Saklama sıcaklığı	-20 °C – 70 °C
Minimum hedef uzaklığı	0.3 m
Termal çözünürlük	160 x 120

3.1.4 Dijital Görüntü İşleme Teknikleri

Dijital görüntü işleme teknikleri; görsel veriyi edinme, kodlama, depolama ve iletme gibi bir dizi işi tamamlamak için bilgisayarların ve diğer elektronik cihazların kullanımı şeklinde tanımlanabilir. Bunların yanında bu görsel verilerin görüntülenmesi, işlenmesi ve çıktılarının elde edilmesi; görüntünün dönüştürülmesi, iyileştirilmesi, kurtarılması ve yeniden yapılandırılması; görüntünün sınıflandırılması, sunumu ve tanınması gibi işlevler ile bunları gerçekleştirmek için gereken donanım, sistem tasarımı ve üretimi de görüntü işleme teknolojisinin kapsamı altında incelenmektedir.

Görüntü olgusu, insan ediniminin ve bilgi alışverişinin ana kaynağı olduğundan görüntü işleme uygulamaları, günümüzde insan yaşamının tüm yönlerini kapsayacak durumdadır. Gelişen bu uygulamalar, ulaşım konusunda da önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Dijital görüntü işleme teknikleri daha detaylı şekilde açıklanabilmekle birlikte;

- *Görüntüyü bazı dönüşümler yapmak amacıyla gri skalaya dönüştürerek yararlı verileri geliştirmek, işe yaramayan verileri engellemek ve böylece görüntü kalitesinin iyileştirilmesini sağlamak,*
- *Görüntüde yer alan bazı özellikleri ayıklamak, tanımlamak ve analiz etmek için genellikle görüntü tanıma, bilgisayarlı kullanarak, görüntülerin daha iyi anlaşılabilmesine fırsat vermek,*

- *Görüntülerin depolanmasını ve iletilmesini kolaylaştırmak için görüntü verilerini sıkıştırmak* amaçlarıyla kullanılabilir (Ji ve Zhang 2017).

Kenar Tespiti: Dijital görüntüde kenar olarak tanımlanan kavram, görüntünün gri değerinde değişiklikler olan pikseller topluluğu olup aynı zamanda görüntünün bölgesel alanındaki parlaklığın önemli ölçüde değiştiği alana tekabül eder. Kenar algılama, temelde, bu görüntünün gri değerindeki değişikliklerin konumunun belirlenmesi ve ölçülmesi ile ilişkilendirilebilir. Kenar algılama, kenarın, görüntünün en temel özelliklerinden biri ve nesnelerin ilk olarak görülen en net bölümü olması açısından oldukça önemlidir.

Kenar algılamanın prosedürü şöyle tanımlanabilir: Öncelikle, görüntünün bölgesel kenarını vurgulamak için kenar geliştirme operatörü kullanılır. Ardından, piksel "kenar gücü" tanımlanır ve kenar nokta kümesini çıkarmak için eşik ayarlanır. Ancak gürültü ve bulanık görüntü nedeniyle algılanan kenar sürekli olmayabilir. Bu nedenle, kenar algılama iki kapsamda değerlendirilir. Birincisi, kenar nokta kümesini çıkarmak için kenar operatörünü kullanmaktır. İkincisi, kenar nokta kümesinden bazı kenar noktalarını çıkarmak, onu bir başkasıyla doldurmak ve elde edilen kenar nokta kümesini çizgilere bağlamaktır (Gao vd. 2010).

3.2 Metot

Kaplamanın performansının belirlenmesine katkı sağlayan bir parametre olan çatlak oluşumlarının manuel şekilde değerlendirilmesi konusunda uzman görüşlerine bağlı öznellik gibi problemlerin önüne geçilebilmesi ve pratik, hızlı ve kolay bir tespit yöntemi geliştirilebilmesi için bu çalışmada termal görüntüleme yöntemi ile timsah sırtı çatlak görüntü verilerinin toplanması, bu verilerin değerlendirilmesi ve yine bu veriler ışığında kaplama performansına dair bir izlenim sunabilen indeks oluşturulması amaçlanmıştır.

Afyonkarahisar ilinde bulunan Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer (ANS) Yerleşkesindeki kampüs yollarındaki asfalt kaplamalardan toplanan görsel türde verilerin

kullanıldığı bu tez çalışmasında yaygın şekilde görülen bir bozulma türü olan “timsah sırtı çatlak (yorulma çatlakları)” hakkında bir araştırma yürütülmüştür.

3.2.1 Verilerin Toplanması

Kampüs yollarındaki asfalt kaplamalarda gözlemlenen timsah sırtı çatlaklar, termal görüntüleme cihazlarından yararlanılarak kayıt altına alınmıştır. Görseller toplanırken, standart bir yöntem belirlenmesi açısından sabit bir yükseklik kullanılması için tasarlanmış bir aparattan yararlanılmıştır. Görüntüler, yol yüzeyinden yaklaşık 1 m yukarıda, görüntüleme cihazlarının yüzeye 90° açıyla konumlandırılmasıyla ve gölge oluşmamasına dikkat edilerek elde edilmiştir (Akarsu vd. 2016). Ayrıca veri toplanırken suyun yüzey altına sızıp sızmadığını anlamak için, ilgili kaplamanın belirli bir miktar suya maruz bırakılıp ardından yüzeyin tamamen kuruluğunu elde etmek önem arz ettiğinden çalışmanın ilk aşamalarında kaplamaya dışardan homojen bir şekilde su ilave edilip ardından kuruması beklenmiştir. Daha sonraki aşamalarda veri toplanması esnasında da yağmurlu bir günün ardından ıslak yüzeyin (Resim 3.1, Resim 3.2 ve Resim 3.3) kuruması için gereken hava sıcaklığının uygun olduğu koşul beklenmiştir.



Resim 3.1 Veri toplanan A alanının yağmur sonrası görüntüleri.

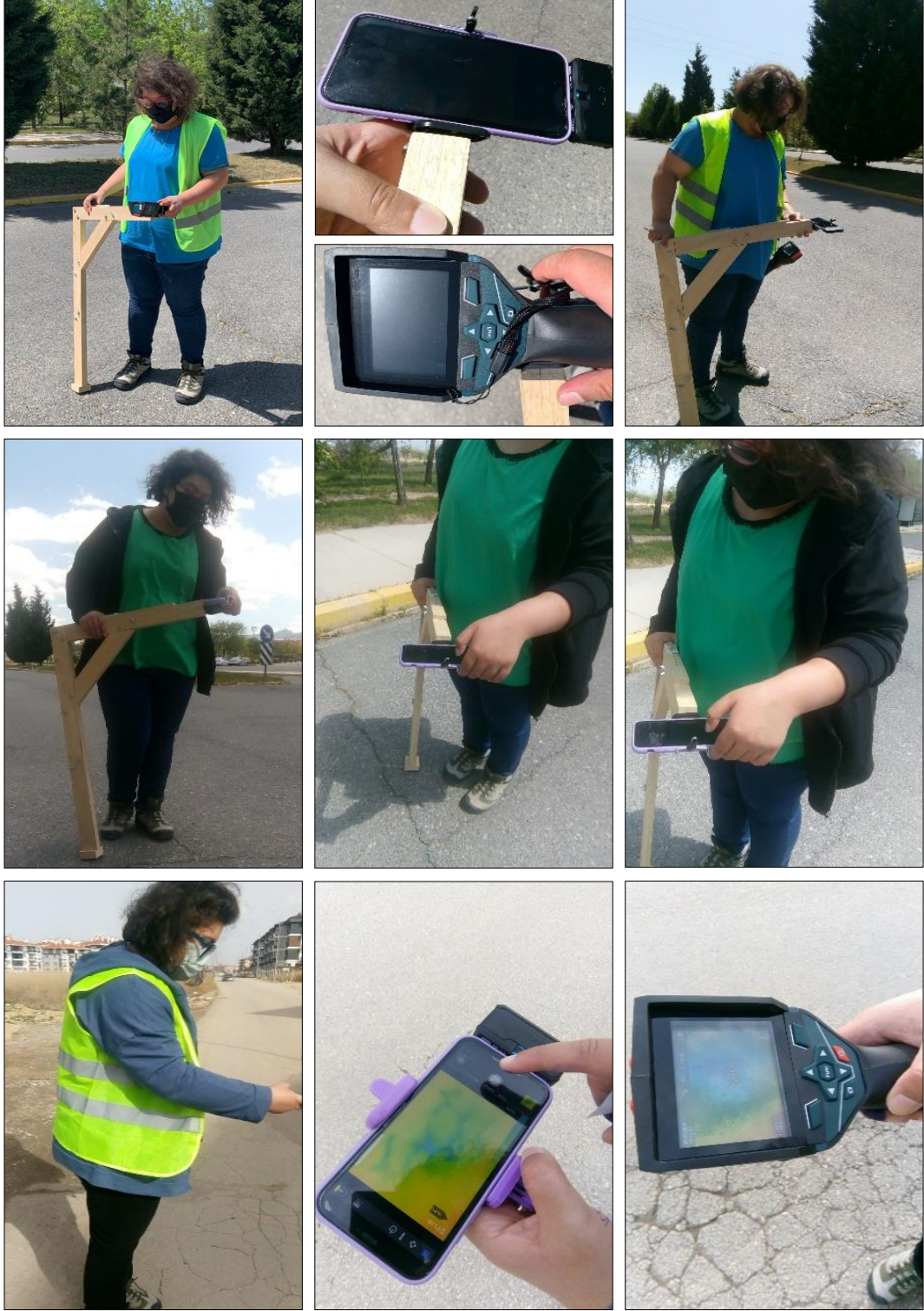


Resim 3.2 Veri toplanan B alanının yağmur sonrası görüntüleri.

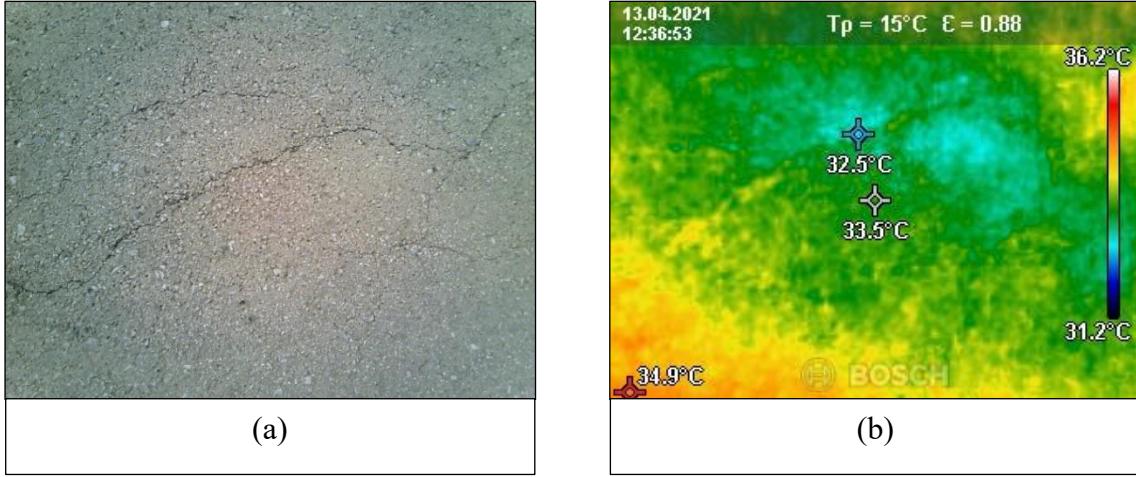


Resim 3.3 Veri toplanan C alanının yağmur sonrası görüntüleri.

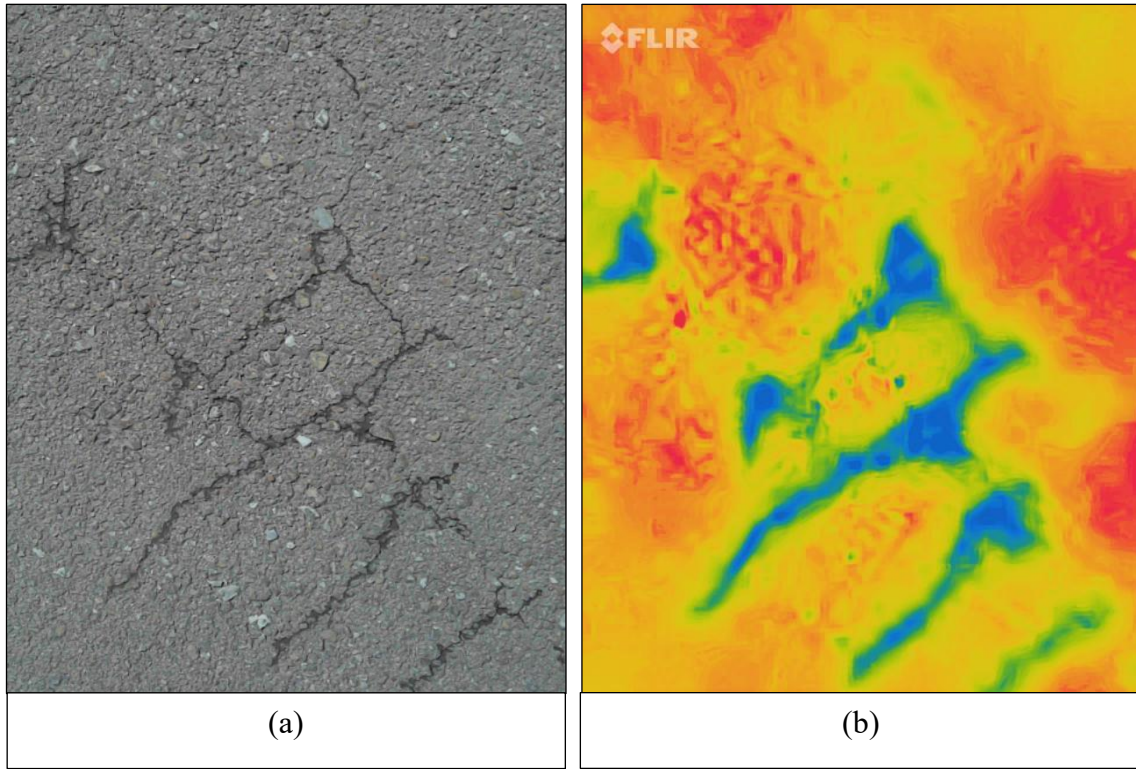
Veri toplama süreci boyunca farklı tarih ve saatlerde yapılan deneme çekimlerine ait örnek görseller Resim 3.4’te verilmiştir.



Resim 3.4 Veri toplama sürecinden örnek görüntüler.



Resim 3.5 Termal el kamerası ile toplanan normal (a) ve termal (b) görüntü örneği.



Resim 3.6 Mobil termal kamera ile toplanan normal (a) ve termal (b) görüntü örneği.

3.2.2 Verilerin İşlenmesinde Kullanılan Görüntü İşleme Teknikleri

Tez çalışmasında iki tür görsel analiz yapılmıştır. Analizlerin ilkinde (termal özellik içermeyen) normal görüntüde çeşitli işlemler uygulanarak timsah sırtı çatlağın etki

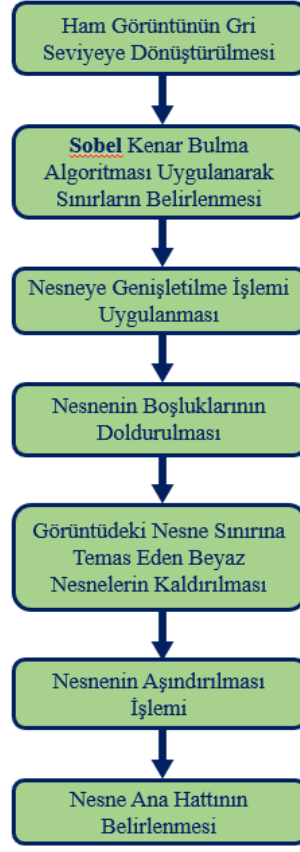
alanına; ikinci analizde ise, termal özellikli görsellerin termal skalada mavi ile temsil edilmiş soğuk bölgelerin alanına dair bir değer elde edilmesi hedeflenmiştir.

3.2.2.1 Görüntü Analizi

Tez çalışmasında, normal görüntüdeki çatlak alanları tespit edilirken, temel amaç, görüntüde yer alan timsah sırtı çatlakların kenar belirleme algoritmaları yardımıyla tanınmasını sağlamak olmuştur. Bu süreçte, öncelikle ham görüntüler morfolojik işlemlerin uygulanabilmesi amacıyla gri seviyeye dönüştürülmüştür. Gri seviyeye dönüştürülen görüntünün Sobel Yöntemi kullanılarak kenarları belirlenmiştir. Ardından morfolojik bir işlem olan genişletme yöntemi ile kenarları belirlenen nesnelere kalınlığı artırılıp bu esnada oluşan boşlukların doldurulması sağlanmıştır. Boşlukların doldurulduğu görüntüde, çevresinden daha soluk ve görüntünün sınırına bağlı olan yapılar ortadan kaldırılmıştır. Ardından, görüntünün daha doğal görünmesini sağlayan ve genişletme yönteminin tersi olan aşındırma yöntemi ile nesnelere boyut açısından küçültülmüştür. Bir sonraki aşamada, yapılan işlemlerin istenilen renkle maskelenerek daha net görüntülenmesi sağlanmıştır. Bu işlemin ardından da görüntüde saptanan nesnelere çevresinin vurgulanması sağlanarak normal görüntünün analizi tamamlanmıştır. Normal görüntünün işlenmesine ilişkin akış diyagramı Şekil 3.8’de verilmiştir.

Çalışmada, termal görüntüler için kullanılan yöntemde, öncelikle bir RGB görüntüsü olan termal görüntünün Red (Kırmızı), Blue (Mavi) ve Green (Yeşil) bölümlerini çıkararak 3 adet 2 Boyutlu R-G-B renk bileşenlerini tanımlayan matris oluşturulması sağlanmıştır. Ardından, görüntüden sıcaklık paletinde en soğuk bölgenin temsil edildiği mavi renk çıkarılmış ve görüntü ikili (binary) görüntüye dönüştürülmüştür. Çıkarılması ve ardından ikili (binary) görüntüye dönüştürülmesi uygulanmıştır. Kapatma ve boşluk doldurma morfolojik işlemleri uygulandıktan sonra termal görüntü analizi tamamlanmıştır. Termal görüntünün işlenmesine ilişkin akış diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir.

Normal Görüntü Akış Diyagramı



Şekil 3.8 Normal görüntü akış diyagramı.

Termal Görüntü Akış Diyagramı



Şekil 3.9 Termal görüntü akış diyagramı.

3.2.3 Verilerden Elde Edilen Değerlerle İndeks Geliştirilmesi

Toplanan görüntüler üzerinde uygulanan görüntü işleme teknikleri sonucunda, normal görüntünün (termal görüntü olmayan görseller bu şekilde adlandırılmıştır) çatlakların etki ettiği alanın görselin toplam alanına oranı, termal alanın soğuk bölgelerinin (termal skalada mavi ile temsil edilen bölgeler) görselin toplam alanına oranı ve termal görüntüde bulunan minimum ve maksimum sıcaklık bilgilerine ulaşılabilmektedir. Bu bilgiler değerlendirilerek ve asfalt kaplamanın fotoğraflanan alanında bulunan timsah sırtı (yorulma) çatlakların yarattığı tahribata bağlı bir performans fikrine ulaşmak suretiyle bir bakım-onarım yönteminin otomatik olarak sunulması amaçlanarak PTAI (Pavement Thermal Area Index) geliştirilmiştir.

Çeşitli malzeme, sistemler ve hizmetler için gönüllü fikir birliğine dayalı teknik standartlar geliştirip yayınlayan uluslararası bir standartlar kuruluşu olan ASTM International (Amerikan Deney ve Malzeme Derneği - American Society for Testing and Materials) tarafından yayınlanmış D 6433 - 07 tanım kodlu, “Yollar ve Otoparklar için Kaplama Durum İndeksi Araştırmaları Standart Uygulaması” başlıklı kılavuzda timsah sırtı çatlakların kaplamada yayıldıkları ve etkiledikleri alan (m^2) açısından değerlendirilmesi önerildiğinden hesaplamalarda birincil olarak çatlakların bulunduğu alanın normal görüntüsünde kapladığı alanın, toplam alana oranı kullanılmıştır (ASTM 2009)

PTAI geliştirilirken ikincil olarak termal görüntüleme yöntemlerinin kullanılmasındaki temel motivasyon, sıcak karışım asfalt (HMA) kaplamada meydana gelmiş olan çatlaklardan yüzeysel olarak kaplama altına sızarak uzun vadede stabilite ve mukavemet kaybına yol açan ve daha ileri boyutlarda da farklı bozulma türlerine neden olan suyun, kaplama altında sıcaklık farkı yaratarak soğuk bir bölge oluşturacağı ile ilgili olmuştur. Suyun drenajının yetersizliğinin yarattığı olumsuz etkiler, kaplamanın yapısal bütünlüğünde süreksizliklere neden oldukça kaplamanın da suyun varlığına karşı duyarlılığı arttığından, kaplamanın performansını doğrudan etkileyen bir faktör olarak kaplamanın termal görüntülerindeki soğuk bölgeler, hesaplamalara dahil edilmiştir. Böylece hem çatlakların asfalt kaplama üzerinde kapladığı etki alanının hem de yaklaşık

belirli bir süre önce suya maruz kalan bozulmuş kaplamanın çatlaklarından kaplama altına sızıp kaplamadan tahliye olamayan suyun, asfalt kaplamaya göre daha düşük sıcaklıkta olmasından kaynaklanan soğumuş bölgelerin de dikkate alındığı bir hesap yöntemi drenajın önemini vurgulamak amacıyla kullanılmıştır.

Hesaplamalarda, termal görüntü toplanırken görsel alan içinde kaydedilmiş en düşük ve en yüksek yüzey sıcaklıkları da veri toplanan hava sıcaklığının mevsimsel etkilerini genelleştirmesi açısından göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 3.3'te, denklemlerde kullanılan değerler ve bu değerleri temsil eden ifadeler verilmiştir.

Çizelge 3.3 İndeks geliştirilmesinde kullanılan değerler.

İndeks Geliştirilmede Kullanılan Değerlerin Tanımı	Değerlerin Temsili Gösterimi
Normal Görüntüdeki Timsah Sırtı Çatlakların Etki Alanının Görüntü Toplam Alanına Oranı	A_N (Normal Alan)
Termal Görüntüde Oluşan Soğuk Bölgelerin Alanları Toplamının Görüntü Toplam Alanına Oranı	A_{SB} (Soğuk Bölge Alanı)
Sıcaklığa Dair İklim Etki Katsayısı	k (İklim Etki Katsayısı)
Soğuk Bölge Alanı (SBA) ile İklim Etki Katsayısı (k) Göz Önünde Bulundurulmuş Oluşturulmuş Termal Etki Alanı	A_{TE} (Termal Etki Alanı)

Termal görüntüden elde edilen alan oranları ile iklim etkileri değerlendirildiğinde, iklim etki katsayısının (k) termal görüntüden elde edilen soğuk bölgeyi üstel (exponansiyel) olarak etkilediği sonucuna varılarak oluşturulan değer termal etki alanının bulunması için oluşturulan denklem aşağıda verilmiştir.

$$A_{TE} = A_{SB}^{(1-k)} \quad (3.1)$$

Burada;

A_{TE} = Termal Etki Alanı (Yüzde),

A_{SB} = Soğuk Bölge Alanı (Yüzde),

k = İklim Etki Katsayısı.

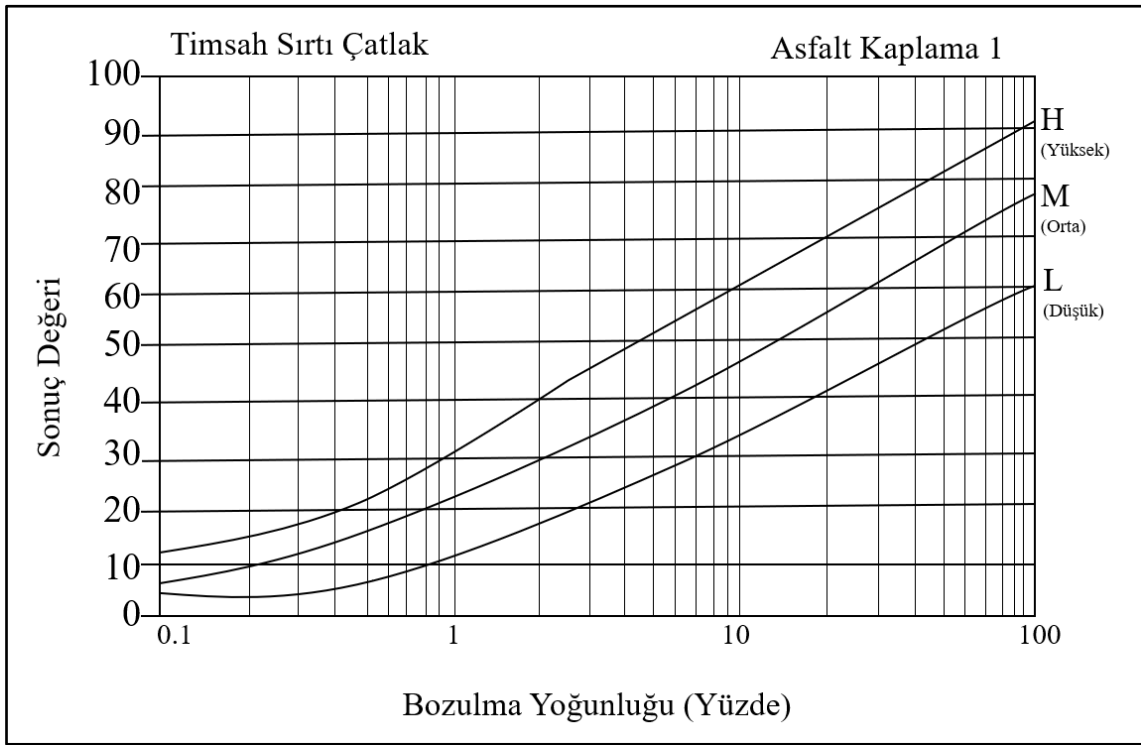
$$k = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} \quad (3.2)$$

Burada;

T_{min} = Termal Görüntüden Elde Edilen Minimum Sıcaklık Değeri (°C)

T_{max} = Termal Görüntüden Elde Edilen Maksimum Sıcaklık Değeri (°C)

k = İklim Etki Katsayısı.

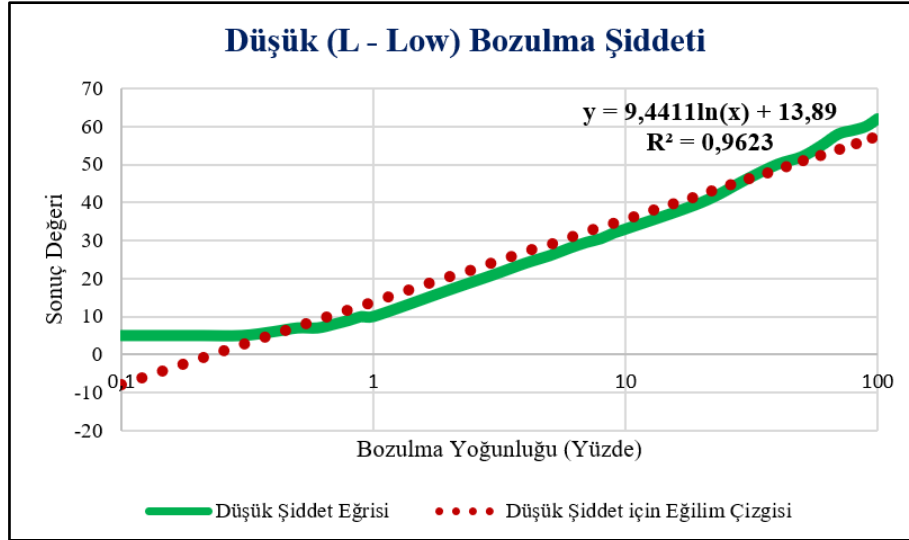


Şekil 3.10 Timsah sırtı çatlak için sonuç değeri - bozulma yoğunluğu (ASTM 2009).

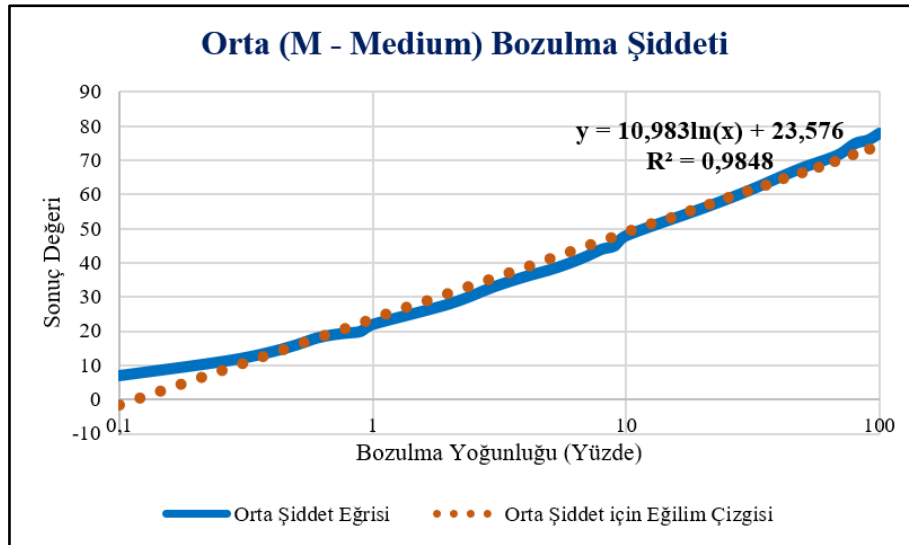
Şekil 3.10'da, ASTM D 6433 – 07 kılavuzunda yer alan Sonuç Değeri – Bozulma Yoğunluğu grafiklerinden Timsah Sırtı Çatlaklara özgü oluşturulmuş grafik verilmiştir (ASTM 2009).

Grafikte asfalt kaplamalar için, L (low – düşük), M (medium – orta) ve H (high – yüksek) bozulma şiddet düzeylerine sahip eğriler yer almaktadır. Bu grafikten yola çıkarak her bir bozulma şiddet düzeyine sahip eğrilere ait denklemler analiz edilmiştir.

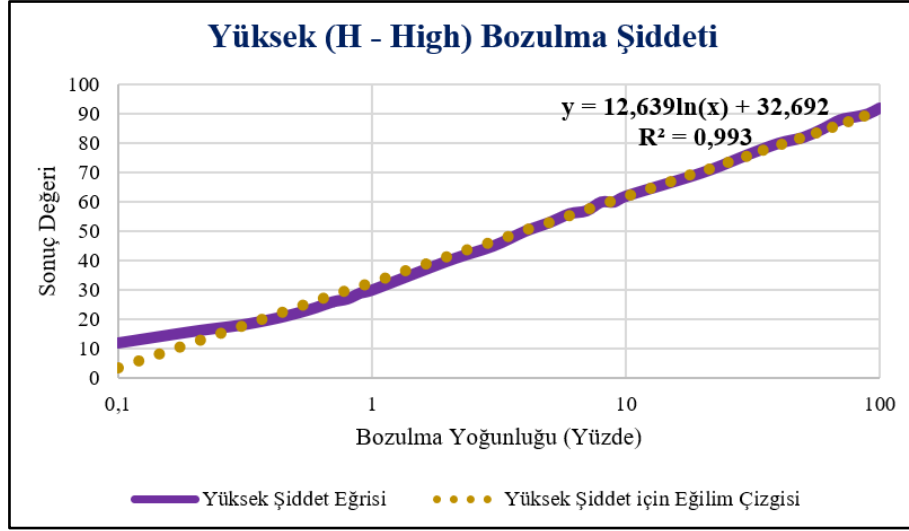
Şekil 3.10’da verilen eğrilerin denklem ve eğilim çizgileri düşük seviyeli şiddet için Şekil 3.11’de, orta seviyeli şiddet için Şekil 3.12’de ve yüksek seviyeli şiddet için Şekil 3.13’te sunulmuştur. Üç farklı şiddet düzeyi için çizilmiş bu grafiklerden hareketle Çizelge 3.4’te Düşük, Orta ve Yüksek Şiddet Seviyeli Bozulma Eğrileri için ilgili değerler girilerek bulunan denklem ve R^2 değerleri özetlenmiştir.



Şekil 3.11 ASTM D 6433-07’deki timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki düşük seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R^2 değeri.



Şekil 3.12 ASTM D’deki 6433-07 timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki orta seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R^2 değeri.



Şekil 3.13 ASTM D 6433-07'deki timsah sırtı çatlak için sonuç değeri – bozulma yoğunluğu grafiğindeki yüksek seviyeli bozulma şiddet eğrisi, eğilim denklemi ve R² değeri.

Çizelge 3.4 ASTM D 6433-07'de yer alan grafik eğrilerinin denklem ve R² değerleri.

Bozulma Şiddet Düzeyi	Denklem	R ²
Düşük (Low - L)	$y = 9,4411\ln(x) + 13,89$	0,9623
Orta (Medium - M)	$y = 10,983\ln(x) + 23,576$	0,9848
Yüksek (High - H)	$y = 12,639\ln(x) + 32,692$	0,993

Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve son olarak da Çizelge 3.4'te de yer alan bilgiler ışığında geliştirilen indeks için oluşturulan genel denklem aşağıda verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$y = a * \ln(x) + b \quad (3.3)$$

Burada;

$y = \text{PTAI (Yüzde)}$,

$x = \text{Termal Etki Alanı (Yüzde)}$,

$a = \ln(x)$ değerinin min. ve maks. değerlerini karşılamak için kullanılan değer.

$b = \ln(x)$ değerinin min. ve maks. değerlerini karşılamak için kullanılan değer.

Denklemden yer alan $\ln(x)$ ifadesinin alabileceği maksimum değer, x ifadesinin alabileceği maksimum değer 100 olduğundan $\ln(100) = 4,60$ olabilmekte; $\ln(x)$ ifadesinin alabileceği minimum değer, x ifadesinin alabileceği minimum değer 1 olduğundan $\ln(1) = 0$

olabilmektedir. Normal görüntüden elde edilen etki alanı oranları için düşük, orta ve yüksek düzeyli bozulma sınıflarını temsil etmesi için 3 grupta sınıflandırılmıştır. Her bir bozulma sınıfına ait alan oranı aralıkları Çizelge 3.5’de ve genel denklemde y ifadesinin yerine yazılmak üzere belirlenen PTAI (Pavement Thermal Area Index) değer aralıkları Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.5 PTAI için bozulma sınıfları için normal görüntü alan oranları

Bozulma Sınıfı	Alan Oranları
Düşük (Low - L)	0 – 35
Orta (Medium - M)	36 – 75
Yüksek (High - H)	76 – 100

Çizelge 3.6 PTAI için genel denklemde y yerine yazılacak değer aralıkları

Bozulma Sınıfı	Alan Oranları
Düşük (Low - L)	10 – 55
Orta (Medium - M)	20 – 75
Yüksek (High - H)	30 – 100

Düşük (Low - L) Bozulma Sınıfına Ait Denklemin Oluşturulması:

Normal görüntüden elde edilen değer Çizelge 3.6’da yer alan bozulma sınıflarından düşük sınıfa girmesi durumunda kullanılacak olan değer aralığı %10 – %55 olacaktır. Bu durumda genel denklemde minimum değer için, y yerine 10, ln(x) yerine (ln(1) ifadesinden dolayı) 0; maksimum değer için, y yerine 55, ln(x) yerine (ln(100) ifadesinden dolayı) 4,60 yazılarak a değeri 9,78 ve b değeri 10 olarak bulunmuştur. Tüm bu ifadelerden hareketle düşük düzeyli bozulma sınıfına ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$y = 9,78 * \ln(x) + 10 \quad (3.4)$$

Orta (Medium - M) Bozulma Sınıfına Ait Denklemin Oluşturulması:

Normal görüntüden elde edilen değer Çizelge 3.6’da yer alan bozulma sınıflarından orta sınıfa girmesi durumunda kullanılacak olan değer aralığı %20 – %75 olacaktır. Bu

durumda genel denklemde minimum değer için, y yerine 20, ln(x) yerine (ln(1) ifadesinden dolayı) 0; maksimum değer için, y yerine 75, ln(x) yerine (ln(100) ifadesinden dolayı) 4,60 yazılarak a değeri 11,95 ve b değeri 20 olarak bulunmuştur. Tüm bu ifadelerden hareketle orta düzeyli bozulma sınıfına ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$y = 11,95 * \ln(x) + 20 \quad (3.5)$$

Yüksek (High - H) Bozulma Sınıfına Ait Denklemin Oluşturulması:

Normal görüntüden elde edilen değerler Çizelge 3.6'da yer alan bozulma sınıflarından yüksek sınıfa girmesi durumunda kullanılacak olan değer aralığı %30 - %100 olacaktır. Bu durumda genel denklemde minimum değer için, y yerine 30, ln(x) yerine (ln(1) ifadesinden dolayı) 0; maksimum değer için, y yerine 100, ln(x) yerine (ln(100) ifadesinden dolayı) 4,60 yazılarak a değeri 15,2 ve b değeri 30 olarak bulunmuştur. Tüm bu ifadelerden hareketle yüksek düzeyli bozulma sınıfına ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$y = 15,2 * \ln(x) + 30 \quad (3.6)$$

Bu üç bozulma sınıfına ait denklemler Çizelge 3.7'de toplu halde verilmiştir.

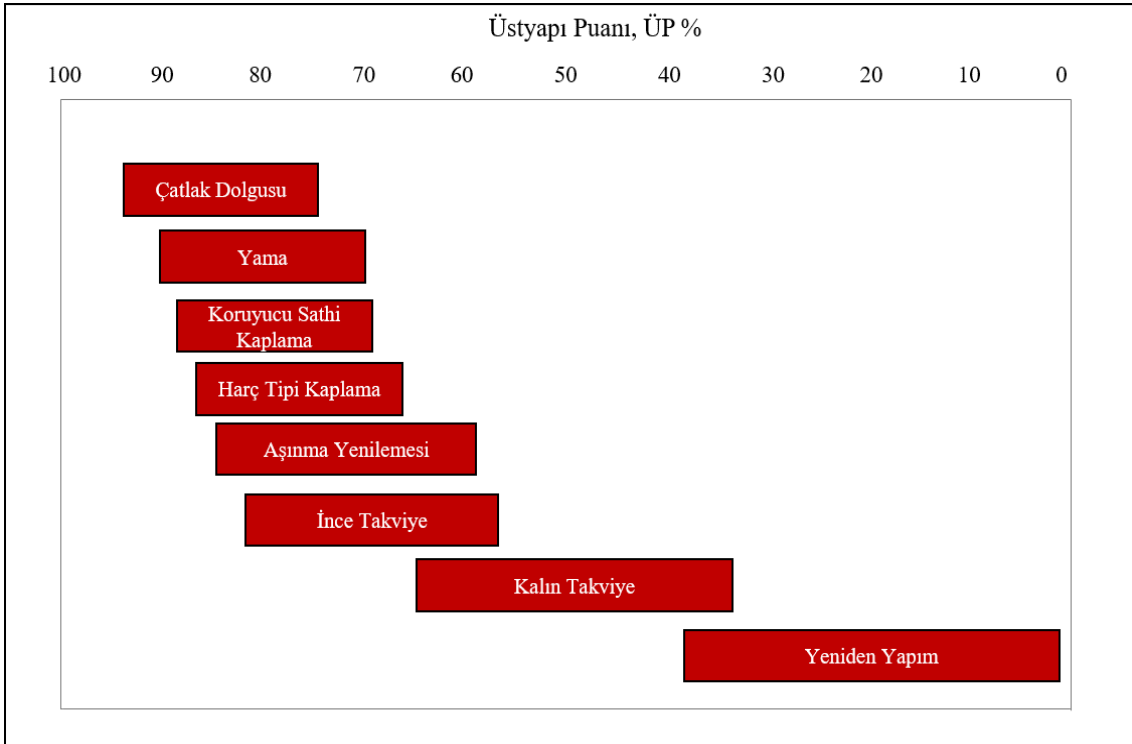
Çizelge 3.7 PTAI için bozulma sınıflarına ait denklemler

Bozulma Sınıfı	Alan Oranları
Düşük (Low - L)	$y = 9,78 * \ln(x) + 10$
Orta (Medium - M)	$y = 11,95 * \ln(x) + 20$
Yüksek (High - H)	$y = 15,2 * \ln(x) + 30$

Denklemlerde x ifadesi yerine yazıldığında elde edilen y değeri, asfalt kaplamanın bozulma düzeyine ilişkin bir bozulma fikri veren indeks değerini temsil etmektedir. İndeks değeri elde edildikten sonra belirlenen seviyede bozulmuş kaplama için uygun bir bakım-onarım yöntemi önerisinde bulunulacaktır. Konuya ilişkin olarak Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde yer alan Esnek Üstyapı Bakım ve Onarım Metodunun Seçimi grafiği Şekil 3.14'te verilmiştir (Sağlık ve Güngör 2008).

Grafikte 0 (sıfır) puan, en kötü durumdaki; 100 puan, yeni inşa edilmiş kaplamayı temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında % değer olarak tanımlanan PTAI, bozulma oranını ifade ettiğinden 100 puan, kullanılmaz haldeki bir kaplama değerlendirmesini ifade etmektedir. Dolayısıyla bu değişkenler, tez çalışmasına göre güncellenmiştir. Ayrıca grafikte yer alan tek eksen, bakım – onarım yöntemi seçiminde çok keskin ayrımlar yapmamakta, daha genel bir izlenim sunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, bu grafiğin daha detaylı bir bilgi sunabilmesi için termal etki alanının yüzde değeri de göz önünde bulundurularak Çizelge 3.8’de yer verilen tablo oluşturulmuştur. Şekil 3.14’te sunulan grafikten farklı olarak, en düşük seviye için “çatlağın belirli aralıklarla gözlenmesi” ifadesi de eklenmiştir. Zira çatlağın sık sık gözlemlenmesi, daha ileri boyutlara geçmeden erken dönemde müdahaleye imkan sunmaktadır.

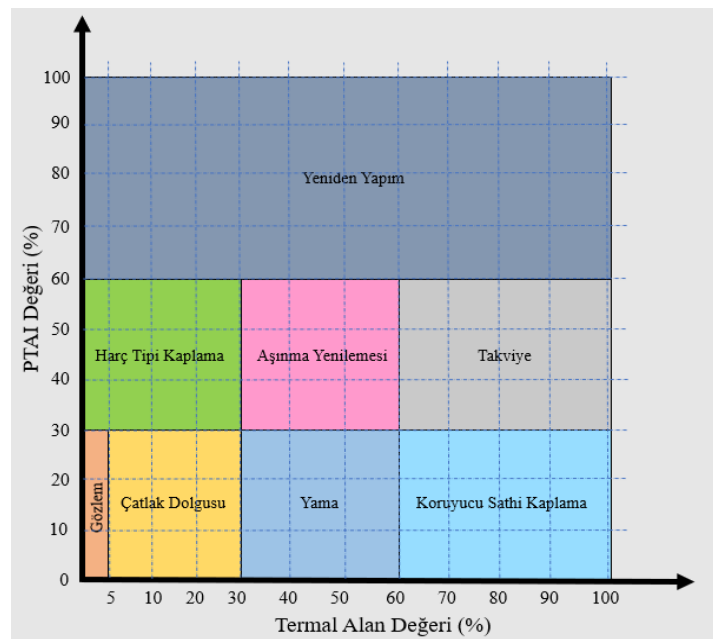


Şekil 3.14 Esnek üstyapı bakım ve onarım metodu seçimi (Sağlık ve Güngör 2008)

Çizelge 3.8 PTAI ve A_{TEA} değerine göre önerilen bakım-onarım yöntemleri.

Bozulma Sınıfı	PTAI Değeri (%)	Termal Etki Alanı (A_{TEA}) (%)	Önerilen Bakım-Onarım Yöntemi
Düşük (Low - L)	0 – 30	0 – 5	Çatlağın Belirli Aralıklarla Gözlemlenmesi
		5 – 30	Çatlak Dolgusu
		30 – 60	Yama
		> 60	Koruyucu Sathi Kaplama
Orta (Medium - M)	30 – 70	0 – 30	Harç Tipi Kaplama
		30 – 60	Aşınma Yenilemesi
		> 60	Takviye
Yüksek (High - H)	70 – 100	> 60	Yeniden Yapım

Şekil 3.15’de verilen grafik, Çizelge 3.8’de verilen aralıkların, PTAI değeri ve termal alanın kesiştiği alanın karşılık geldiği bakım-onarım yöntemi önerisine kolaylıkla ulaşılabilecek bir özetini sunmaktadır. Örneğin, PTAI değeri 12, termal alanı 35 olan bir çatlak için bakım onarım yöntemi “yama”, aynı indeks değerine sahip ve termal alanı 80 olan bir çatlak için “koruyucu sathi kaplama” önerisi sunulacaktır.

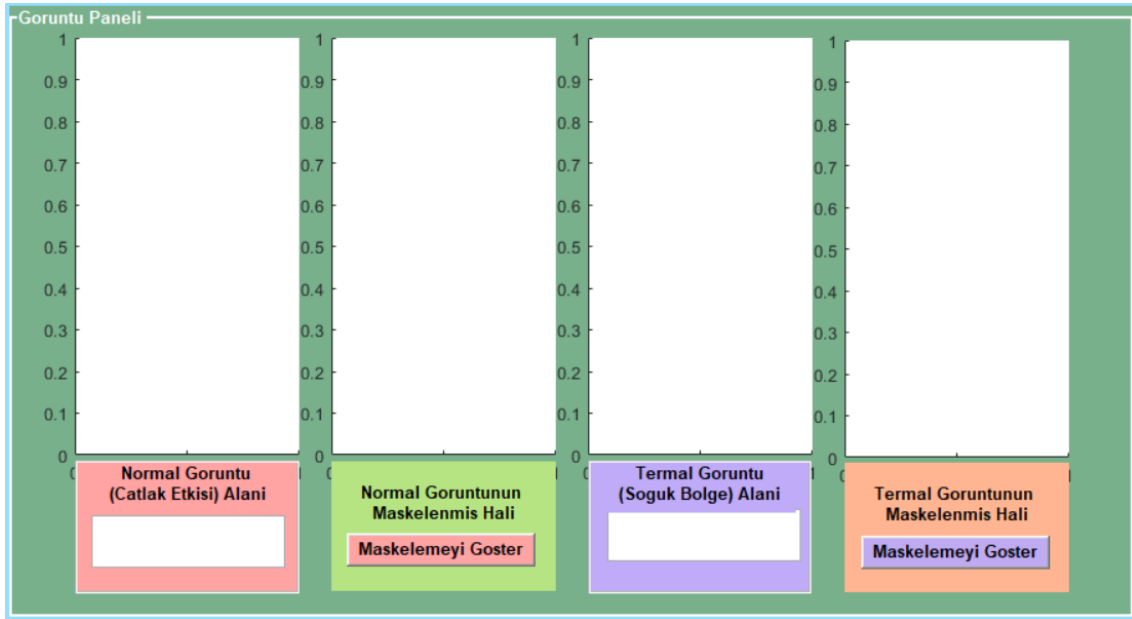


Şekil 3.15 Bakım-onarım yöntemi önerisinin alansal grafiği.

3.2.4 İndeks Hesabı için Geliştirilen Grafikselle Kullanıcı Arayüzü

MATLAB GUI (Graphical User Interface) aracılığı ile geliştirilen grafikselle kullanıcı arayüzünde toplam 4 adet panel bulunmaktadır:

- **Görüntü Paneli:** Bir timsah sırtı çatlağının normal görüntüsü ve aynı çatlağa ait termal görüntüsünün yüklendiği ve yüklendiği anda her bir görüntünün altında o görüntüye ait alan oranlarının ve normal ve termal görüntüdeki çatlak alanlarının maskelendiği görüntünün belirttiği paneldir. Şekil 3.16’da verilmiştir.
- **İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli:** Timsah sırtı çatlağının termal görüntüsünde yer alan minimum ve maksimum sıcaklık değerlerinin kullanıcı tarafından girilerek iklim etki katsayısını hesaplattığı paneldir. Şekil 3.17’de gösterilmiştir.
- **Görüntü Yükleme Paneli:** Görüntülerin yüklenmesi için butonların bulunduğu paneldir. Şekil 3.18’de verilmiştir.
- **Sonuç Paneli:** Arka planda normal ve termal görüntülerden elde edilen tüm verilerle hesaplanıp sonuç değerinin ve ilgili bakım-onarım yöntemi önerisinin otomatik şekilde sunulduğu paneldir. Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 PTAI -kullanıcı arayüzü görüntü paneli.

Şekil 3.17 PTAI -kullanıcı arayüzü iklim etki katsayısı (k) hesaplama paneli.

Şekil 3.18 PTAI -kullanıcı arayüzü görüntü yükleme paneli.

Şekil 3.19 PTAI -kullanıcı arayüzü sonuç paneli.

Geliştirilen indeksin belirlenmesine ilişkin adımlar bu bilgiler ışığında şu şekilde özetlenebilir:

Adım 1: Termal görüntüden elde edilen soğuk bölge alanı (A_{SBA}) ile iklim etki sayısının (k) etkileşimi sonucunda termal etki alanı (A_{TEA}) belirlenir.

Adım 2: Normal görüntüden elde edilen alan oranı görüntü işleme tekniği ile hesaplandıktan sonra, Çizelge 3.5'ten, ait olduğu bozulma sınıfı belirlenir.

Adım 3: Çizelge 3.5'te bulunan normal görüntüden elde edilen alan oranının ait olduğu bozulma sınıfına göre Çizelge 3.7'deki o sınıfa karşılık gelen denklemde x yerine Adım 1'de bulunan termal etki alanı yazılarak indeks bulunur.

Adım 4: Bulunan indeks Çizelge 3.8'den kontrol edilerek, ilgili değere sahip kaplamanın bozulma seviyesi ve bakım-onarım yöntemi elde edilmiş olacaktır.

4. BULGULAR

4.1 Toplanan Görüntülerin Analizi

İşlenmek üzere Afyonkarahisar ilinde bulunan Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer (ANS) Yerleşkesindeki kampüs yollarında 3 farklı bölüme ayrılmış esnek kaplamalardan elde edilen görüntüler, biri telefona monte edilebilen özellikte ve bir diğeri el kamerası olmak üzere iki farklı termal kamera kullanılarak toplanmıştır. Tüm çatlaklar, her iki termal kamera ile görüntülenmesine rağmen kargaşaya yol açacağı düşünüldüğünden sadece telefona monte edilen kamera ile toplanan görüntüler yapılan işlemlerde kullanılmıştır. Konuya ilişkin bulgular ilerideki bölümlerde açıklanmaktadır.

4.1.1 A Alanından Toplanan Veriler

Afyon Kocatepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörlük Binası arasındaki asfalt kaplamalı 8000 m²'lik alandan toplanan 16 adet çatlak verisine ait normal ve termal görüntüler ile bu termal görüntülerden elde edilen uç (maksimum ve minimum) değerler bazı işlemlerde kullanılarak ve MATLAB yazılımı yardımıyla analiz edilerek belirli aşamalardan geçirilmiştir. Farklı bozulma düzeylerine ya da sonuç değerlerine sahip verilerden örnek bulgular aşağıda verilmiştir.

A alanındaki çatlak verilerine ilişkin olarak, iklim etki sayısı (k) hesaplamak amacıyla termal kameradan alınan uç sıcaklık bilgileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

A alanından alınan 8 numaralı çatlak için FAN8 olarak isimlendirilmiş normal görüntü analiz sonuçları Şekil 4.1'de; FAT8 olarak isimlendirilmiş termal görüntü analiz sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.

A alanındaki 8 numaralı çatlak üzerinde görüntü işleme kullanılarak yapılan analizde, normal görüntüdeki maskelenmiş alandan çatlağın yayılımının %72, termal görüntüden soğuk bölge dağılım alanının %15 olduğu bulunmuştur. Kullanıcı tarafından termal görüntü üzerinden okunarak girilen uç değerlerle hesaplanan iklim etki sayısı olan k

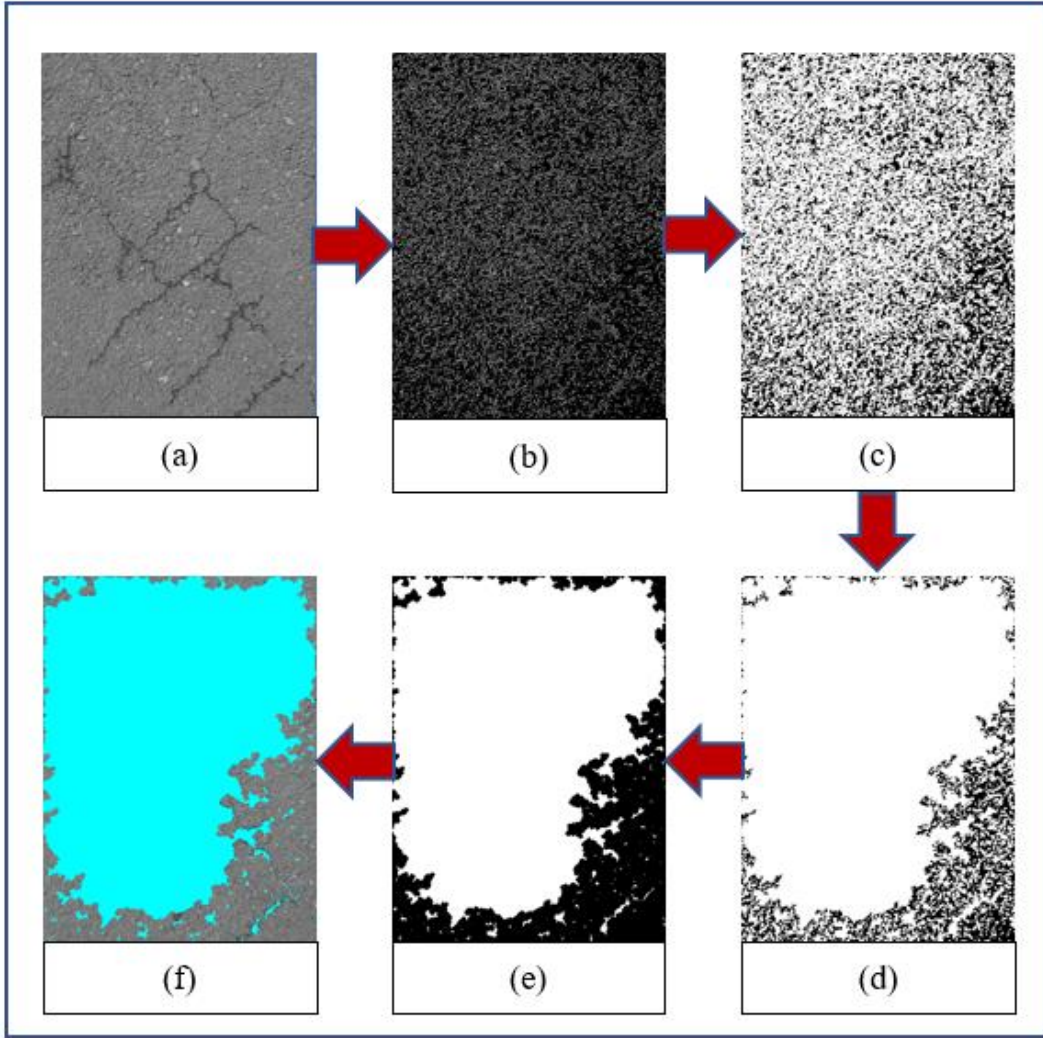
değeri de hesaba katılarak ilgili işlemler yazılım arka planında gerçekleştirilip 55 indeks değerine ulaşılmıştır. Bu ifade ile mevcut görüntüdeki çatlakların bozulma düzeyinin derecelendirilmesinin 100 üzerinden 55 olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Normal görüntüden elde edilen %72 değerinin %55 değerine düşmesi, kaplama üzerindeki soğuk suyun, yetersiz drenaj, yanlış inşa, tekrarlı yük vb. nedenlerle kaplama altına sızarak yüzeyi %15 oranında soğutması ile açıklanabilmektedir. Bu sonuçtan hareketle, kaplamadaki çatlakların etkisinin gözle görüldüğünden daha az oranda su sızdırdığı ve bu nedenle çatlak alanının etki oranının düştüğü (bozulma oranının azaldığı) ifade edilebilir. Elde edilen indeks değerine ilişkin bozulma seviyeleri ve önerilen bakım – onarım yönteminin koşul ifadelerinin açıklandığı Çizelge 3.8’de de ifade edildiği gibi 55 indeks değerine karşılık harç tipi kaplama yapılması önerilmiştir.

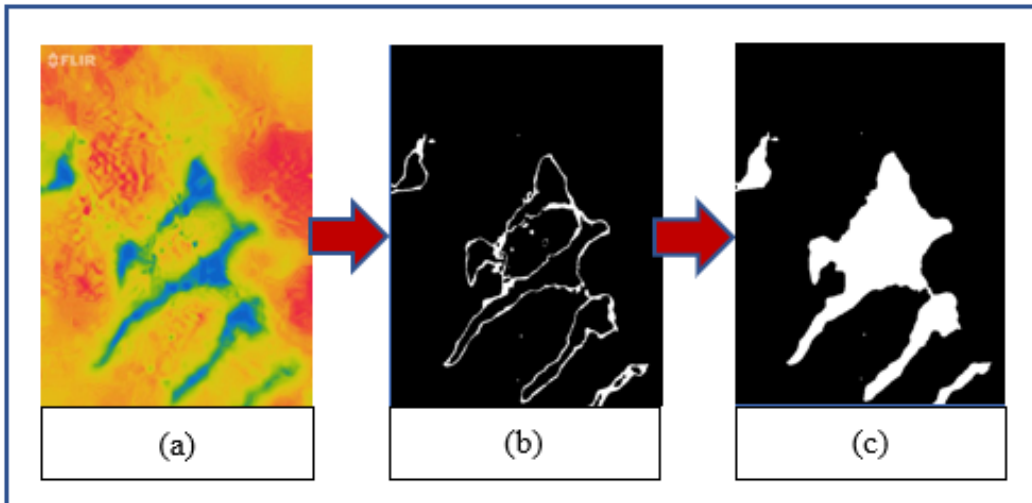
A alanından alınan 8 numaralı çatlak için MATLAB aracılığıyla oluşturulmuş kullanıcı arayüzünde hesaplanan değer ve önerilen bakım-onarım yöntemine ilişkin görsel Şekil 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.1 A alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).

Görsel No.	Minimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)
1 Numaralı Çatlak	34	35,9
2 Numaralı Çatlak	31,8	34,9
3 Numaralı Çatlak	30,8	33,6
4 Numaralı Çatlak	35,3	37,1
5 Numaralı Çatlak	29,7	31,7
6 Numaralı Çatlak	33,0	34,7
7 Numaralı Çatlak	33,7	35,9
8 Numaralı Çatlak	30	33,5
9 Numaralı Çatlak	32,1	33,6
10 Numaralı Çatlak	30,3	33,1
11 Numaralı Çatlak	29,8	32,3
12 Numaralı Çatlak	31,8	34,5
13 Numaralı Çatlak	27,2	30,2
14 Numaralı Çatlak	31,3	34,5
15 Numaralı Çatlak	30,9	33,5
16 Numaralı Çatlak	31,2	34,8


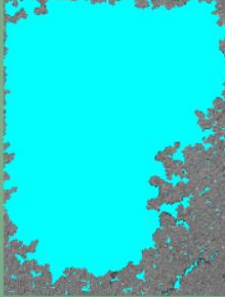
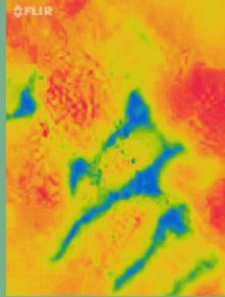



Şekil 4.1 A alanındaki 8 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.2 A alanındaki 8 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları

Goruntu Paneli

Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı

0.72268

Normal Goruntunun
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Termal Goruntu
(Soğuk Bölge) Alanı

0.15333

Termal Goruntunun
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık degerini giriniz: 30

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık degerini giriniz: 33.5

İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.10448

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Degeri: 54.9647

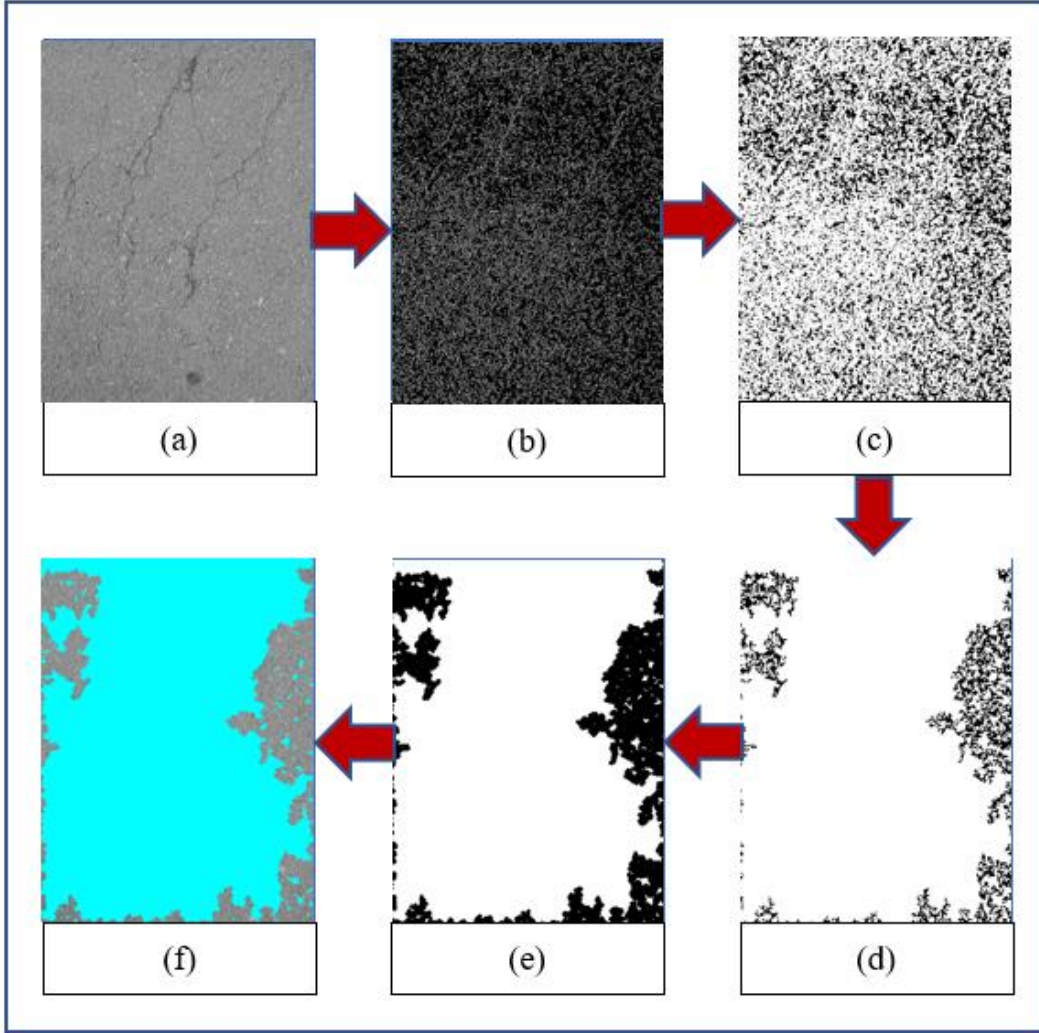
Onerilen Bakım & Onarım Yontemi: harc tipi kaplama yapılmalıdır

AFYON KOCATEPE UNIVERSITESI
FEN BILIMLERI ENSTITUSU
INSAAT MUHENDISLIGI ANABILIM DALI
YUKSEK LISANS TEZI

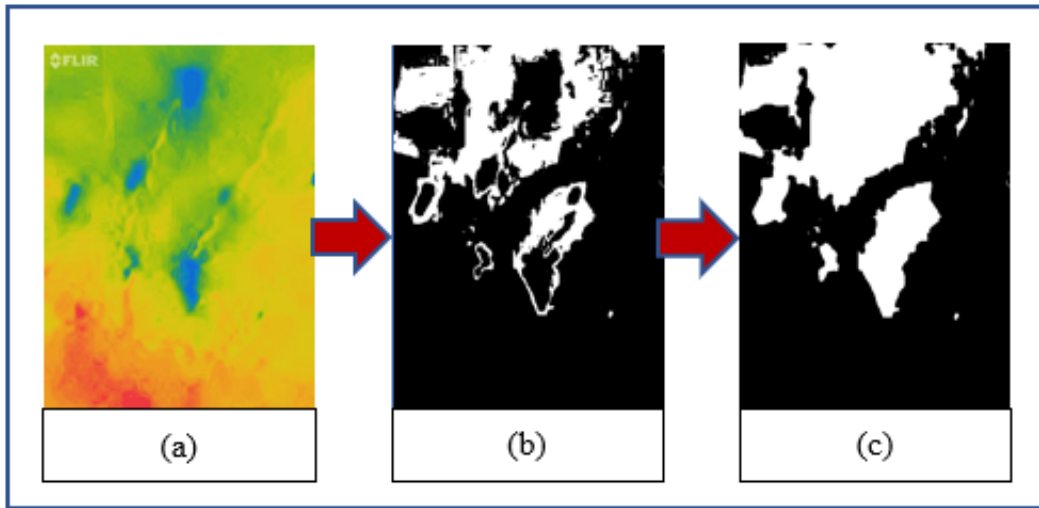
Sule YARCI - 180735018

Danisman: Prof. Dr. Huseyin AKBULUT
İkinci Danisman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

Şekil 4.3 A alanındaki 8 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.



Şekil 4.4 A alanındaki 14 numaralı çatlak - normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.5 A alanındaki 14 numaralı çatlak - termal görüntü işleme aşamaları.


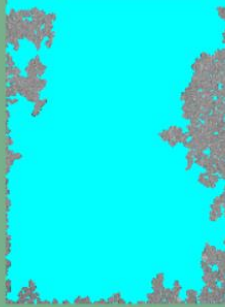
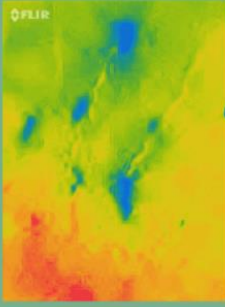

A alanındaki 14 numaralı çatlak üzerinde görüntü işleme kullanılarak yapılan analizde ise, yine normal görüntüden %81'lik bir çatlak yayılım alanı elde edilirken, termal görüntüden %30'luk bir soğuk bölge alanı olduğu bulunmuştur. Gözle görülen çatlak yayılım alanı %81'den daha küçük olarak yorumlanabilse de kılcal çatlaklar da görüntü işleme esnasında algılanabildiğinden bu değere ulaşılmıştır. Bu çatlak alanına sahip bir bozulma %30 düzeyinde bir soğuk bölge alanına maruz kalmasıyla kaplama bozulma indeksinin %83 değerine çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç da normal görüntüden elde edilen toplam çatlak alanından daha fazladır. Böylece termal etkinin normal çatlak alanını olumsuz yönde tetiklediği söylenebilir.

Yağmur suyunun kaplamadan uzaklaşmaması, 8 numaralı çatlakta, termal görüntüdeki 33,5°C'luk bir sıcaklığı, 30°C'luk minimum sıcaklığa düşürerek kaplamada 3,2°C'luk bir sıcaklık farkı yaratmışken; 14 numaralı çatlakta 34,5°C'tan 31,3°C değerine inen yüzey sıcaklığına neden olmuştur.

Şekil 4.3'te analiz sonuçları verilen 8 numaralı çatlak ile 14 numaralı çatlak karşılaştırıldığında, her ikisinin de dışarıdan bakıldığında çok büyük risk oluşturmadığı düşünülebilir. Ancak 8 numaralı çatlağın %15'lik ve 14 numaralı çatlağın %29'luk termal etki alanı kaplama altında tahliye edilemeyen suyun varlığını yansıtmaktadır.

Kaplamadaki suyun yarattığı nem hasarı, kaplamanın hem dayanımını hem de dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Kaplama yapısında bulunan iri ve ince agregalar arasındaki bağ kaybından kaynaklanan bu sorun, daha fazla suyun nüfuz etmesiyle hızlanmakta ve tabaka bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Döngüsel yüke maruz kalan üstyapı da zamanla neme daha duyarlı hale gelmektedir (Yilmaz ve Sargin 2012). Bu bağlamda, suyun alttaki tabakalara sızabilecek bir yol bulması kaplamanın bozulmasına zemin hazırlamaktadır.

Goruntu Paneli

Normal Görüntü
(Çatlak Etkisi) Alanı

0.80611

Normal Görüntünün
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Termal Görüntü
(Soguk Bolge) Alanı

0.29219

Termal Görüntünün
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Görüntü Yukle

Termal Görüntü Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık degerini giriniz: 31.3

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık degerini giriniz: 34.5

İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.092754

AFYON KOCATEPE UNIVERSITESI
FEN BILIMLERI ENSTITUSU
INSAAT MUHENDISLIGI ANABILIM DALI
YUKSEK LISANS TEZI

Sule YARCI - 180735018

Danisman: Prof. Dr. Huseyin AKBULUT
İkinci Danisman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Degeri: 83.0319

Onerilen Bakim & Onarım Yontemi: yeniden yapim uygulanmalidir

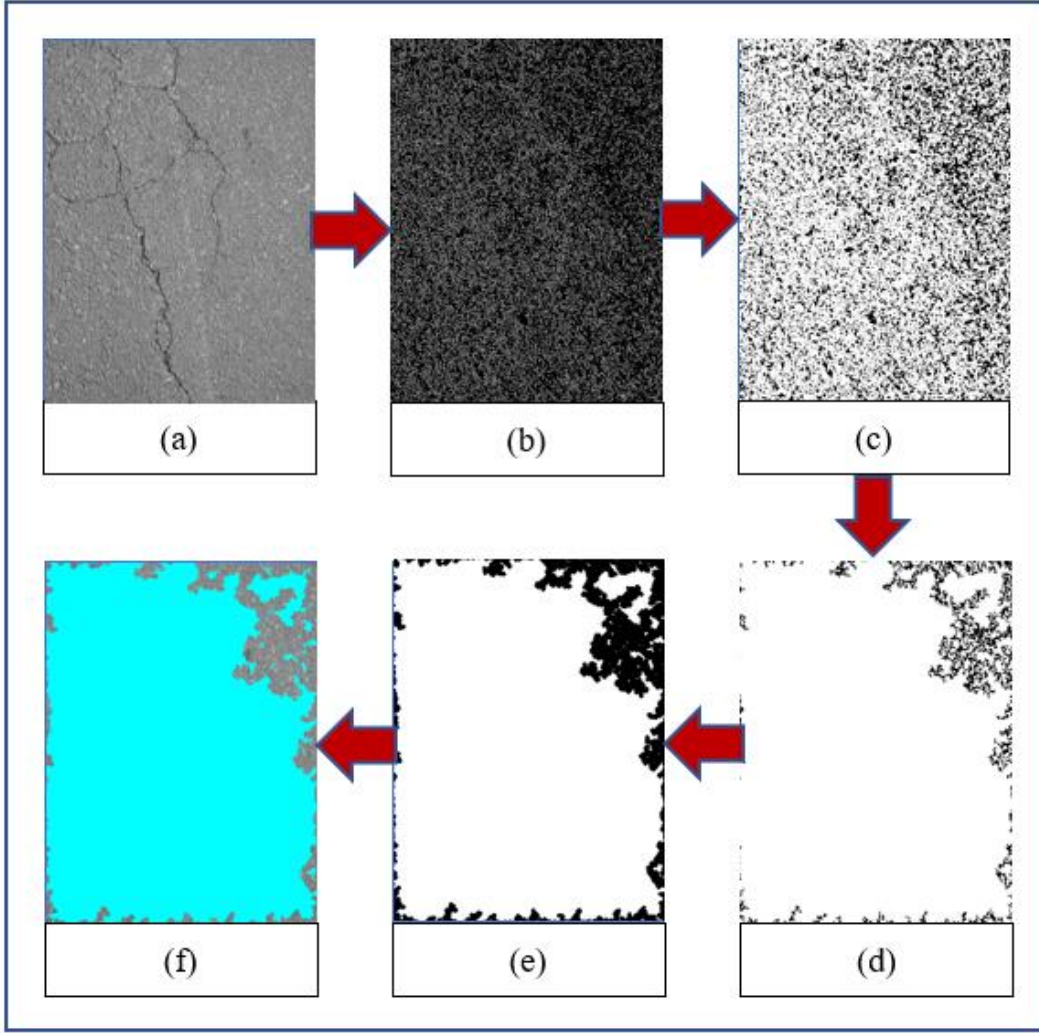
Şekil 4.6 A alanındaki 14 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı

4.1.2 B Alanından Toplanan Veriler

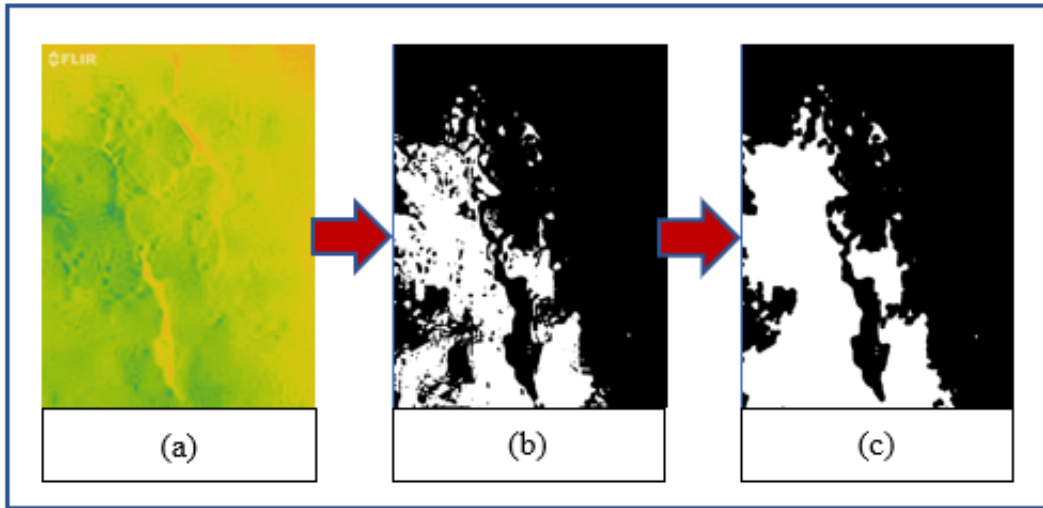
Afyon Kocatepe Üniversitesi Rektörlük Binası ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Atatürk Kültür Merkezi Binası arasındaki asfalt kaplamalı 7200 m²'lik alandan toplanan 19 adet çatlak verisine ait normal ve termal görüntüler ile bu termal görüntülerden elde edilen uç (maksimum ve minimum) değerler bazı işlemlerde kullanılarak ve MATLAB yazılımı yardımıyla analiz edilerek belirli aşamalardan geçirilmiştir. Farklı bozulma düzeylerine ya da sonuç değerlerine sahip verilerden örnek bulgular aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2 B alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).

Görsel No.	Minimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)
1 Numaralı Çatlak	29,1	30,7
2 Numaralı Çatlak	34	35,7
3 Numaralı Çatlak	28,5	30,1
4 Numaralı Çatlak	29,2	31,3
5 Numaralı Çatlak	22,9	25,7
6 Numaralı Çatlak	27,6	30
7 Numaralı Çatlak	33,7	36,2
8 Numaralı Çatlak	29,4	34,2
9 Numaralı Çatlak	25,7	29,2
10 Numaralı Çatlak	35,2	37,2
11 Numaralı Çatlak	34,9	39,2
12 Numaralı Çatlak	26	32,3
13 Numaralı Çatlak	34,6	37,6
14 Numaralı Çatlak	31,7	34,8
15 Numaralı Çatlak	28	30,6
16 Numaralı Çatlak	30,6	35,2
17 Numaralı Çatlak	25,8	30,5
18 Numaralı Çatlak	30,8	33,2
19 Numaralı Çatlak	29,4	31,7


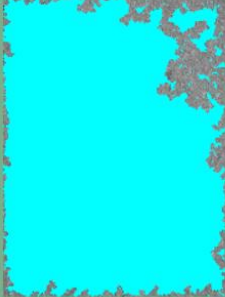
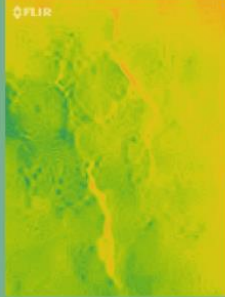



Şekil 4.7 B alanındaki 1 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.8 B alanındaki 1 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları

Goruntu Paneli

**Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı**

0.85451

**Normal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

**Termal Goruntu
(Soguk Bolge) Alanı**

0.32401

**Termal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık degerini giriniz:

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık degerini giriniz:

İklim etki katsayısını (k) hesapla:

AFYON KOCATEPE UNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU
İNSAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sule YARCI - 180735018

Danışman: Prof. Dr. Huseyin AKBULUT
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

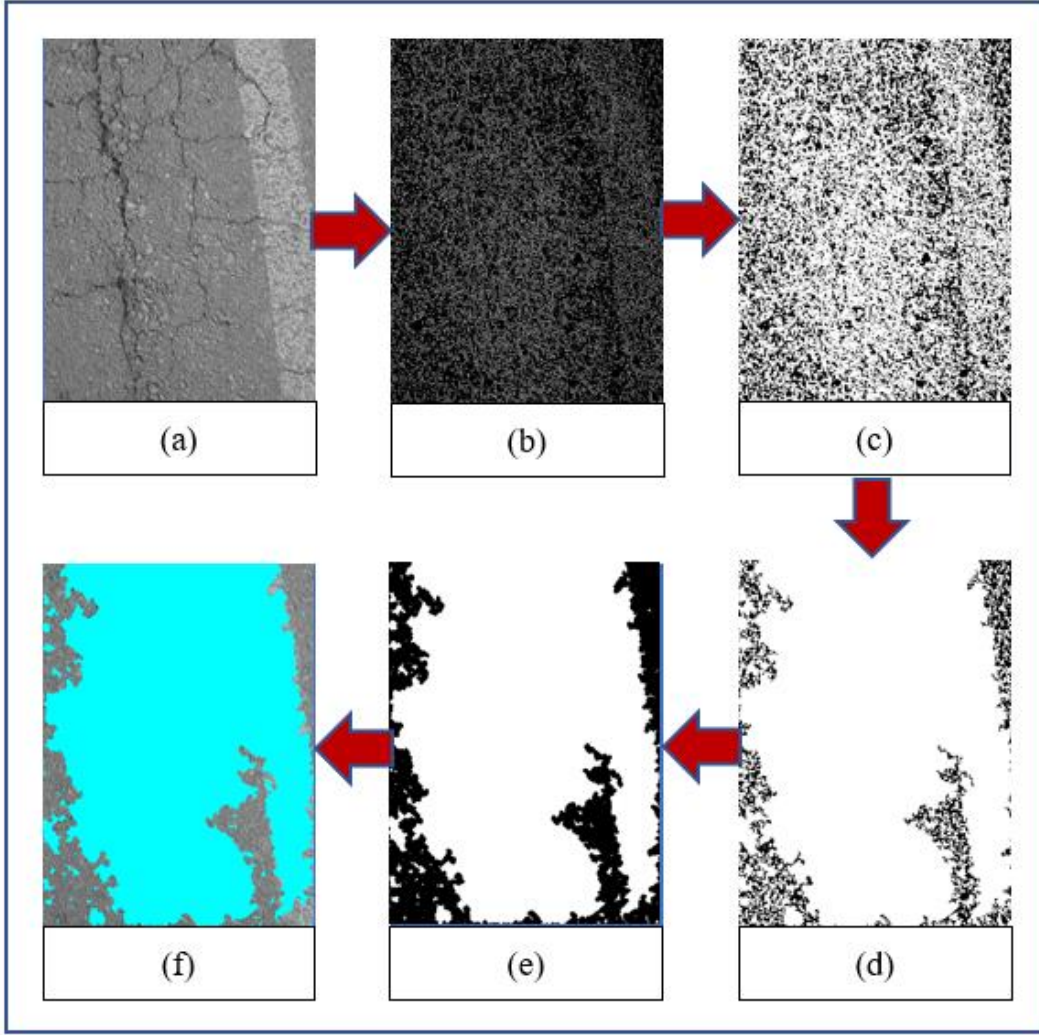
Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

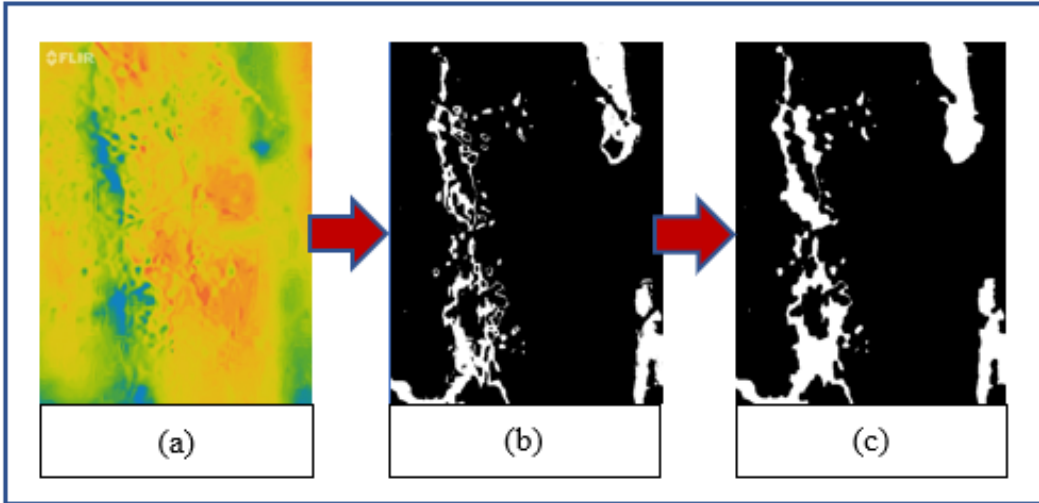
Hesaplanan İndeks Değeri:

Onerilen Bakım & Onarım Yöntemi:

Şekil 4.9 B alanındaki 1 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı

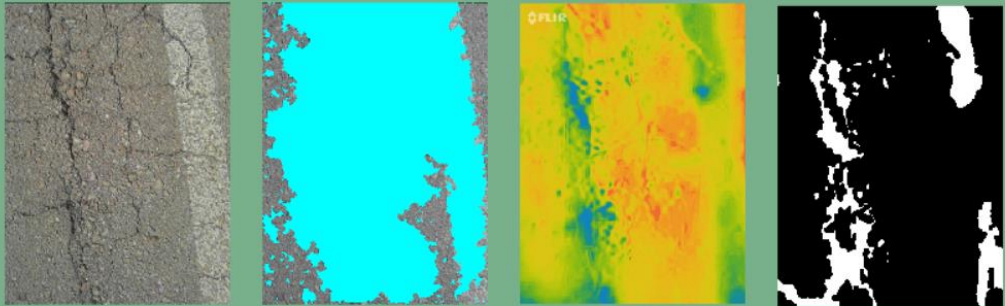


Şekil 4.10 B alanındaki 15 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.11 B alanındaki 15 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.

Goruntu Paneli



Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı

0.76769

Normal Goruntunun
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Termal Goruntu
(Soğuk Bölge) Alanı

0.14471

Termal Goruntunun
Maskelenmiş Hali

Maskelemeyi Göster

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Değeri: 73.1131

Onerilen Bakım & Onarım Yöntemi: yeniden yapım uygulanmalıdır

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık değerini giriniz: 28

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık değerini giriniz: 30.6

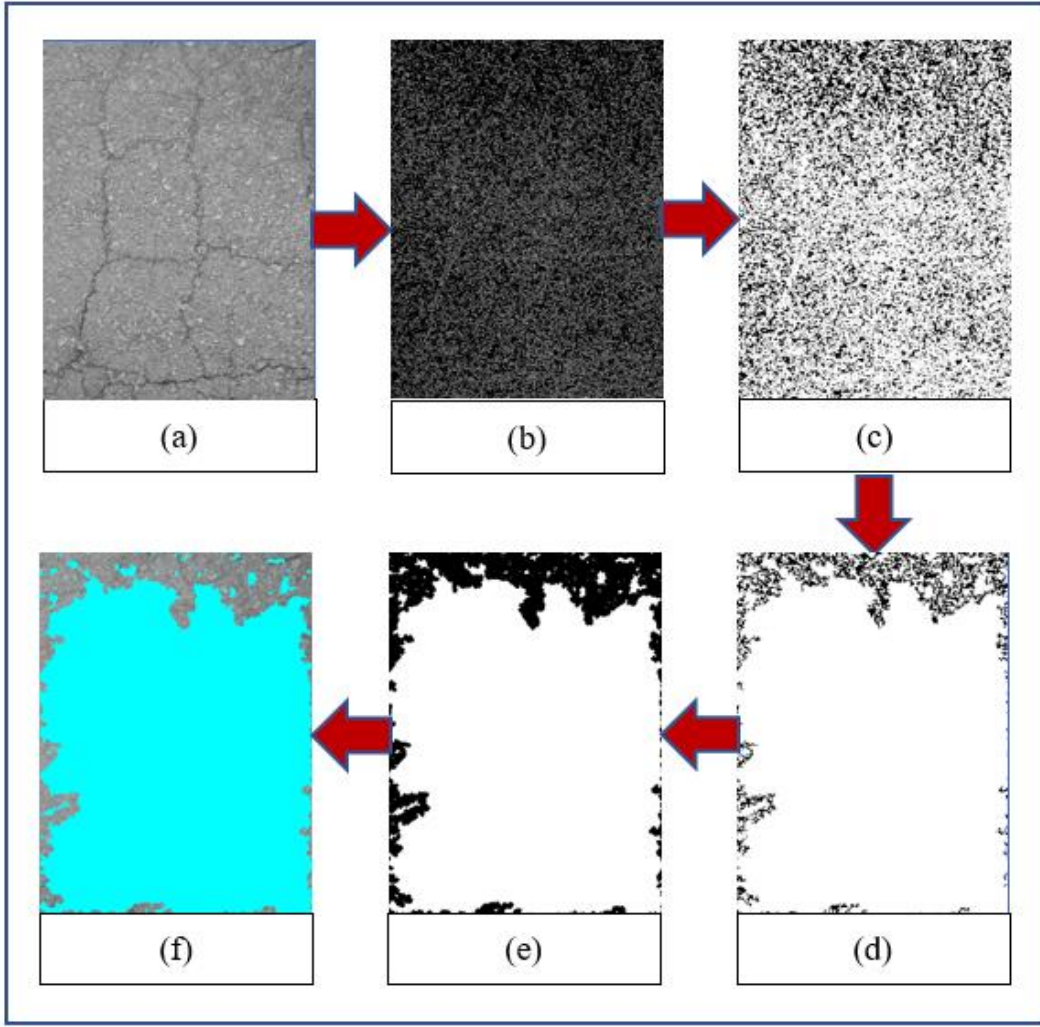
İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.084967

AFYON KOCATEPE UNIVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU
İNSAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

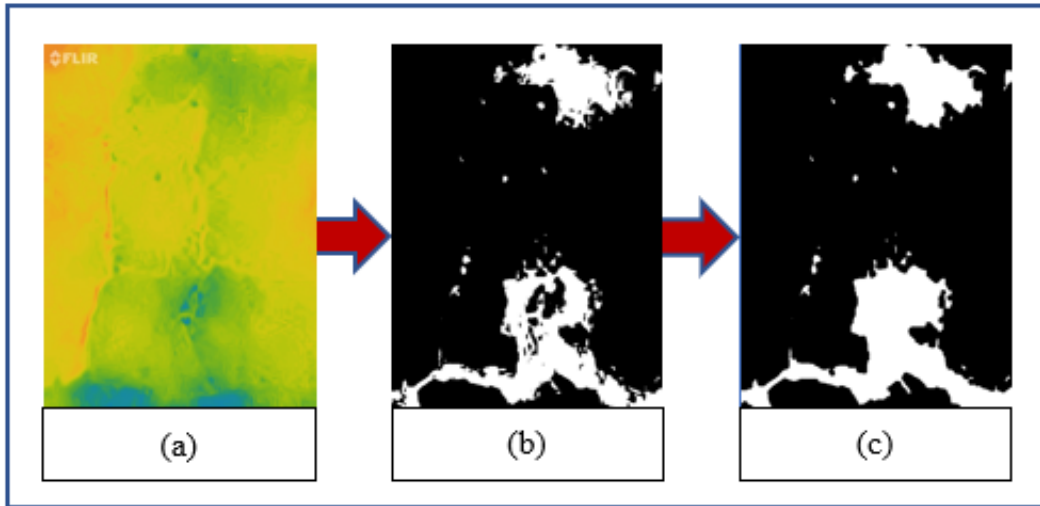
Sule YARCI - 180735018

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

Şekil 4.12 B alanındaki 15 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.







Şekil 4.13 B alanındaki 19 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.14 B alanındaki 19 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.

Goruntu Paneli

**Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı**

0.81568

**Normal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

**Termal Goruntu
(Soguk Bolge) Alanı**

0.1846

**Termal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık degerini giriniz:

29.4

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık degerini giriniz:

31.7

İklim etki katsayısını (k) hesapla:

0.072555

AFYON KOCATEPE UNIVERSITESI
FEN BILIMLERI ENSTITUSU
INSAAT MUHENDISLIGI ANABILIM DALI
YUKSEK LISANS TEZI

Sule YARCI - 180735018

Danisman: Prof. Dr. Huseyin AKBULUT
İkinci Danisman: Dr. Öğr. Uyesi Gur Emre GURAKSIN

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Degeri: 76.1805

Onerilen Bakim & Onarım Yontemi: yeniden yapım uygulanmalıdır

Şekil 4.15 B alanındaki 19 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.

%32 oranında bir termal etki alanı elde edilen B alanındaki 1 numaralı çatlak için normal görüntüden alınan %85 değerine görüntüdeki timsah sırtı çatlağın yanı sıra yine kılcal çatlaklar da dahil olduğundan bu sonuç elde edilmiştir. Henüz bloklanmış parçalara dahi sahip olmayan bu timsah sırtı çatlaktan %85'lik bir soğuk bölge değeri edilmiş olması şu açıdan dikkat çekicidir: Aynı alandaki 15 ve 19 numaralı çatlakta bloklar halinde yer alan çok sayıda parça (yüzeydeki suyun, kaplama tabakasının altına doğru ilerlemek için daha fazla yolu) olmasına karşın %14 ve %18 seviyesinde bir soğuma, dolayısıyla bu değerle orantılı bir su sızma miktarı ile sonuçlandığı ifade edilebilir ve bu bağlamda çatlağa bakılarak yapılan değerlendirmede, çok parçalı bir timsah sırtı çatlağın hiç bloklara ayrılmamış bir çatlağa kıyasla daha yüksek düzeyde bozulduğu tahmin edilse bile, bu görselden alınan sonuç tam tersi yönde bir sonuç vermiştir. Dolayısıyla suyun sızma miktarındaki farkın bu iki farklı görselin sonuçlarına yansımaları, uzman gözlemi ile yapılan kontrole göre daha fazla ayrıntının hesaba katılması gerektiğine işaret etmektedir.

B alanından alınan 1, 15 ve 19 numaralı çatlaklardan elde edilen sıcaklık farkı değerleri de 1.6, 1.4 ve 2.8°C olarak bulunmuştur. Buradan çatlak genişliği ile oluşan sıcaklık farkı arasında bir korelasyon olduğu ifade edilebilir. Yine aynı 3 timsah sırtı çatlak verisinde sırasıyla %32, %14 ve %18 termal etki alanı, %85, %77 ve %82 normal görüntü çatlak alanı ve sonucunda %83, %73 ve %59 indeks puanı bulunmasından hareketle normal termal etki alanı ile normal alan değerlerinin de benzer eğilimde olduğu söylenebilir. Ancak bu üç timsah sırtı çatlağa bağlı değişkenin birbirinden ayrı değerlendirilmemesi gerektiği, normal alandan indeks değerine en büyük azalma eğilimini gösteren çatlağın 19 numaralı çatlak olması ile açıklanabilir.

4.1.3 C Alanından Toplanan Veriler

Afyon Kocatepe Üniversitesi Atatürk Kültür Merkezi Binası ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otoparkı arasındaki asfalt kaplamalı yaklaşık 8500 m²'lik alan toplanan 15 adet çatlak verisine ait normal ve termal görüntüler ile bu termal görüntülerden elde edilen uç (maksimum ve minimum) değerler bazı işlemlerde kullanılarak ve MATLAB yazılımı yardımıyla analiz edilerek belirli aşamalardan

geçirilmiştir. Farklı bozulma düzeylerine ya da sonuç değerlerine sahip verilerden örnek bulgular aşağıda verilmiştir.

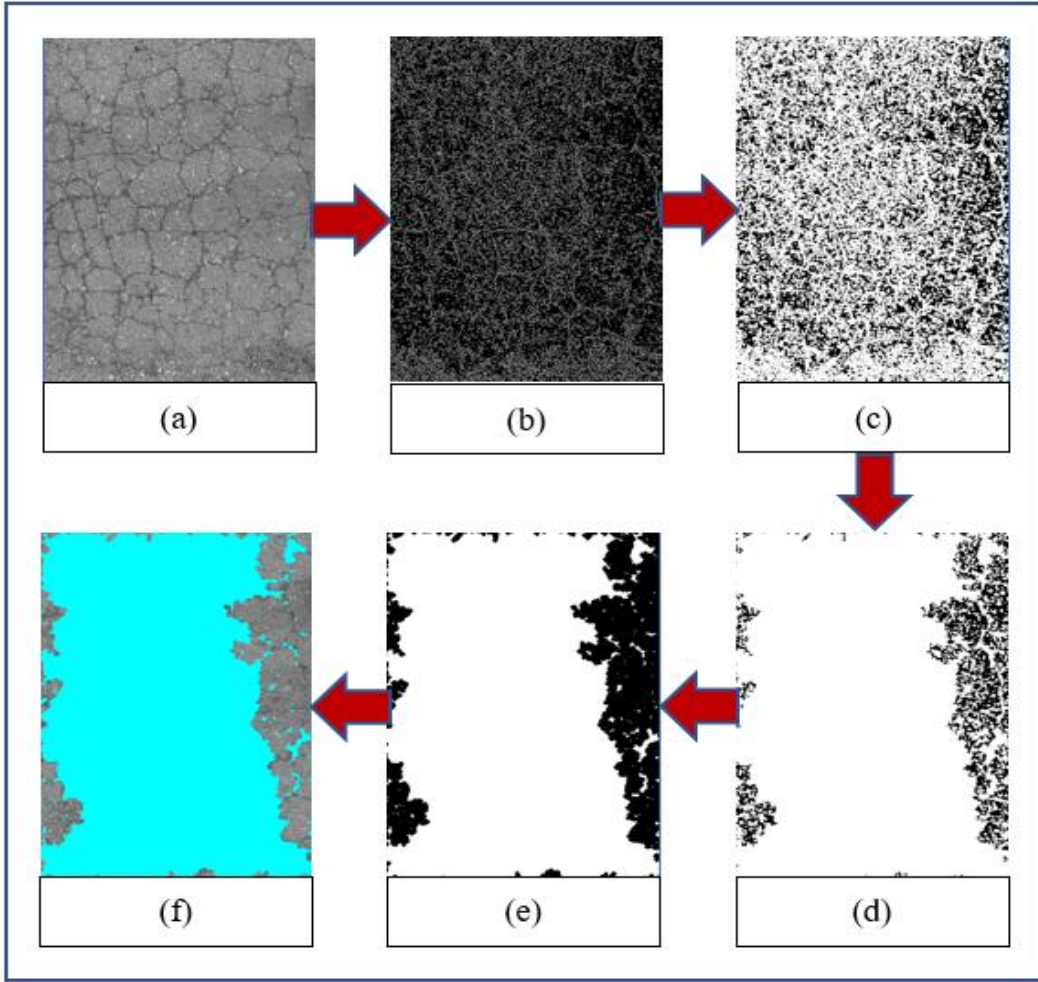
Çizelge 4.3 C alanındaki termal görüntülerden alınan uç sıcaklık değerleri (°C).

Görsel No.	Minimum Sıcaklık (°C)	Maksimum Sıcaklık (°C)
1 Numaralı Çatlak	23,4	25,1
2 Numaralı Çatlak	22,9	24,3
3 Numaralı Çatlak	23,7	24,9
4 Numaralı Çatlak	15,7	22,9
5 Numaralı Çatlak	20,7	25,1
6 Numaralı Çatlak	23,1	25
7 Numaralı Çatlak	23,1	24,7
8 Numaralı Çatlak	21	22,6
9 Numaralı Çatlak	23,7	25
10 Numaralı Çatlak	24,3	26
11 Numaralı Çatlak	23,8	25,4
12 Numaralı Çatlak	22,4	27,4
13 Numaralı Çatlak	24,7	27,2
14 Numaralı Çatlak	29,3	31,1
15 Numaralı Çatlak	34,1	35,9

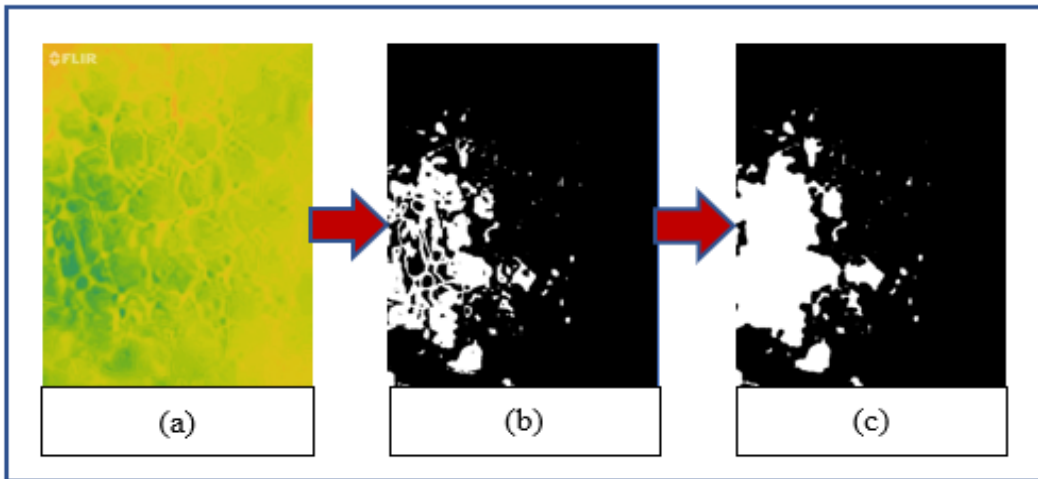
C alanındaki 1,2 ve 10 numaralı çatlaklar bir değerlendirme yapıldığında, sırasıyla %78, %83 ve %64 oranında normal alan elde edilmiştir.

1 numaralı çatlağın, çok sayıda parçaya ayrılmış ve gözlem yapıldığında orta ya da yüksek şiddette değerlendirilebilecek bir durumda görülmüştür. Bulunan indeks sonucunda da bakım ve onarım yöntemi olarak “yeniden yapım” önerildiğinden, bu çatlak için gözlem ve otomatik çatlak verisi paralellik göstermiştir. Ancak %17 değerinde termal etki alanı sonucu, %78’lik bozulma alanını %75 değerindeki indeks ifadesine düşürerek çatlak boyutunun tahminden az su sızdırdığı kanısı oluşturmuştur. 2 numaralı çatlak için, görüntü toplanırken kadrajda yer alan boya izinin normal ve termal etki alanı ifadelerini etkilemediği saptanmıştır. 1 numaralı çatlak kadar belirgin olmamasına ve neredeyse eşit sıcaklık farkı elde edilmesine rağmen daha büyük termal etki alanı sonucuna ulaşıldığından “yeniden yapım” önerisi alınmıştır. Bu alandan alınmış 10 numaralı çatlağın da genişliğinin gözle fark edilebilir düzeyde fazla olmasına rağmen sadece

%15'lik bir oranda soğuma saptandığından verilen bakım – onarım önerisi “harç tipi kaplama” ile sınırlı kalmıştır.

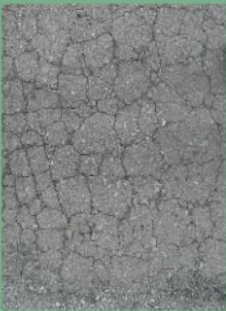
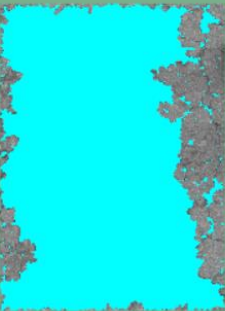
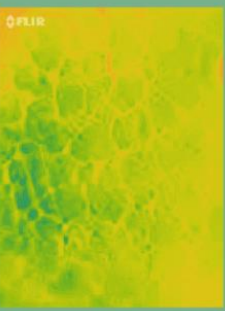



Şekil 4.16 C alanındaki 1 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.17 C alanındaki 1 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.

Goruntu Paneli

Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı

0.77841

Normal Goruntunun
Maskelenmis Hali

Maskelemeyi Göster

Termal Goruntu
(Soğuk Bölge) Alanı

0.17393

Termal Goruntunun
Maskelenmis Hali

Maskelemeyi Göster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Değeri: 75.2129

Onerilen Bakım & Onarım Yöntemi: yeniden yapım uygulanmalıdır

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık değerini giriniz: 23.4

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık değerini giriniz: 25.1

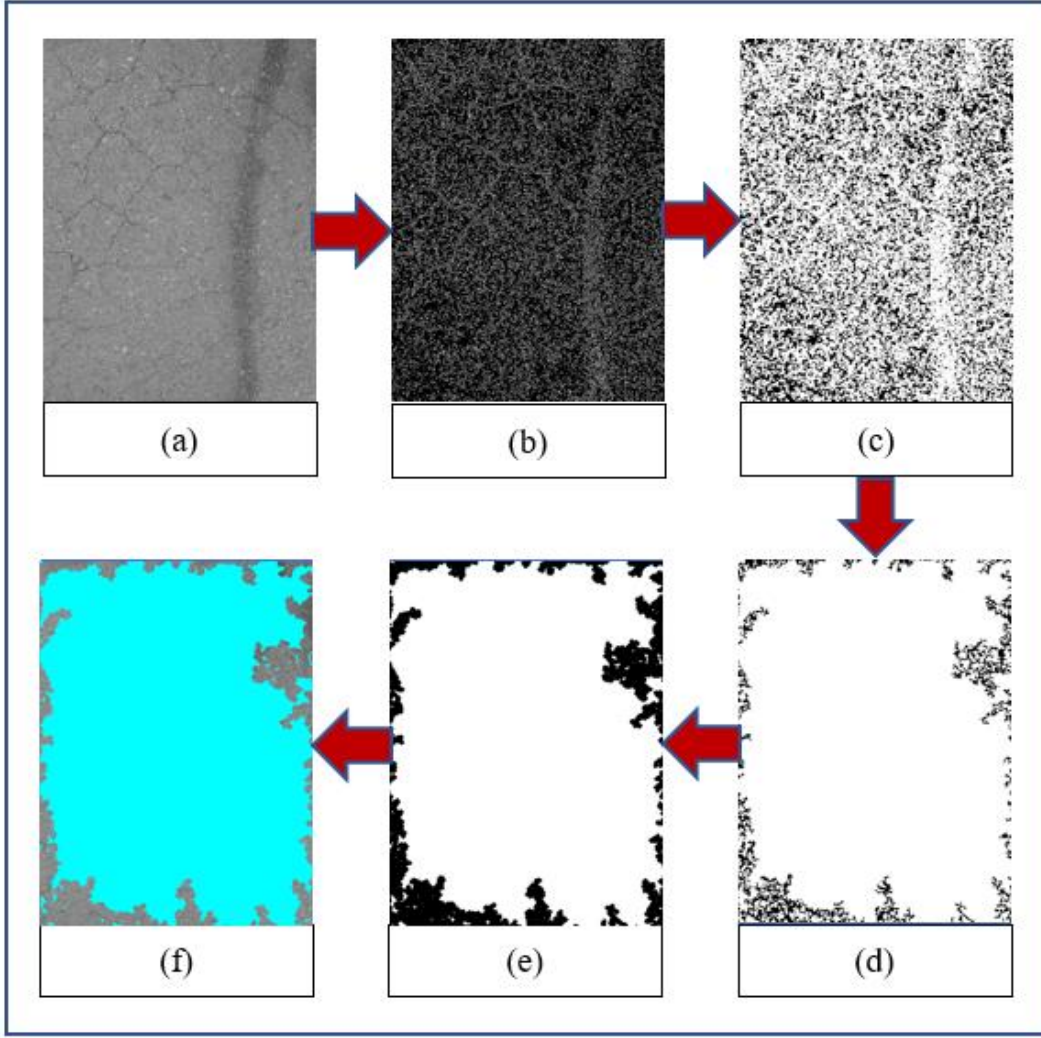
İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.067729

AFYON KOCATEPE UNIVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU
İNSAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

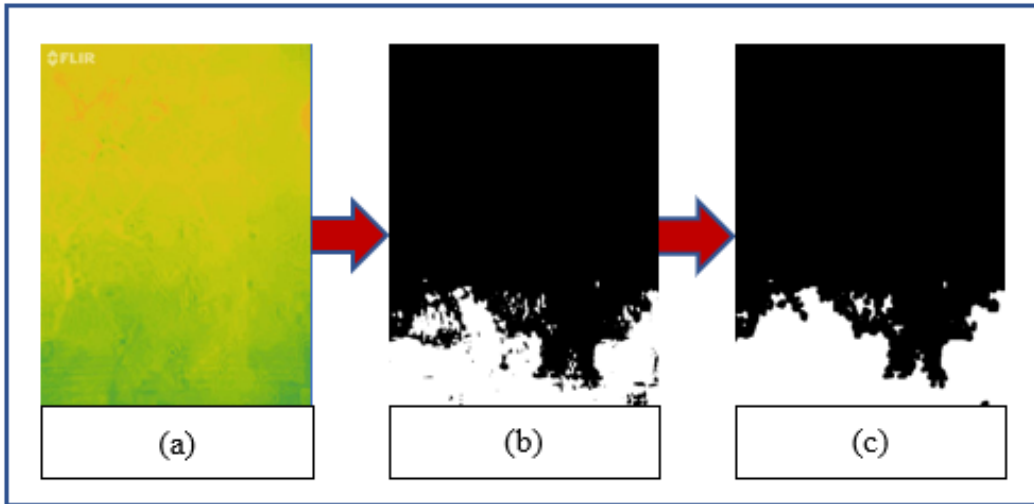
Sule YARCI - 180735018

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

Şekil 4.18 C alanındaki 1 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.







Şekil 4.19 C alanındaki 2 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.20 C alanındaki 2 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.

Goruntu Paneli

**Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı**

0.83226

**Normal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

**Termal Goruntu
(Soguk Bolge) Alanı**

0.21823

**Termal Goruntunun
Maskelenmis Hali**

Maskelemeyi Goster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık degerini giriniz: 22.9

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık degerini giriniz: 24.3

İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.057613

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Degeri: **78.1941**

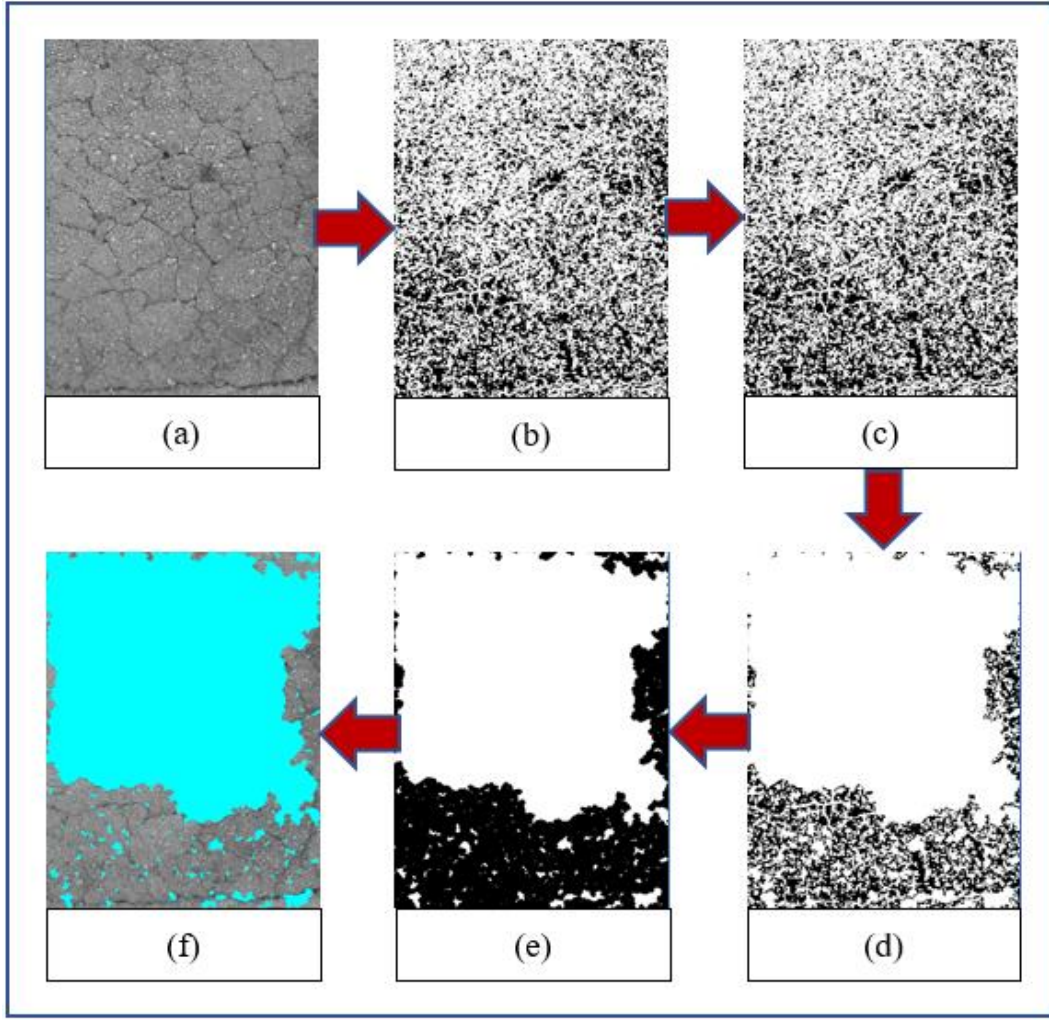
Onerilen Bakim & Onarım Yontemi: **yeniden yapım uygulanmalıdır**

AFYON KOCATEPE UNIVERSITESI
FEN BILIMLERI ENSTITUSU
INSAAT MUHENDISLIGI ANABILIM DALI
YUKSEK LISANS TEZI

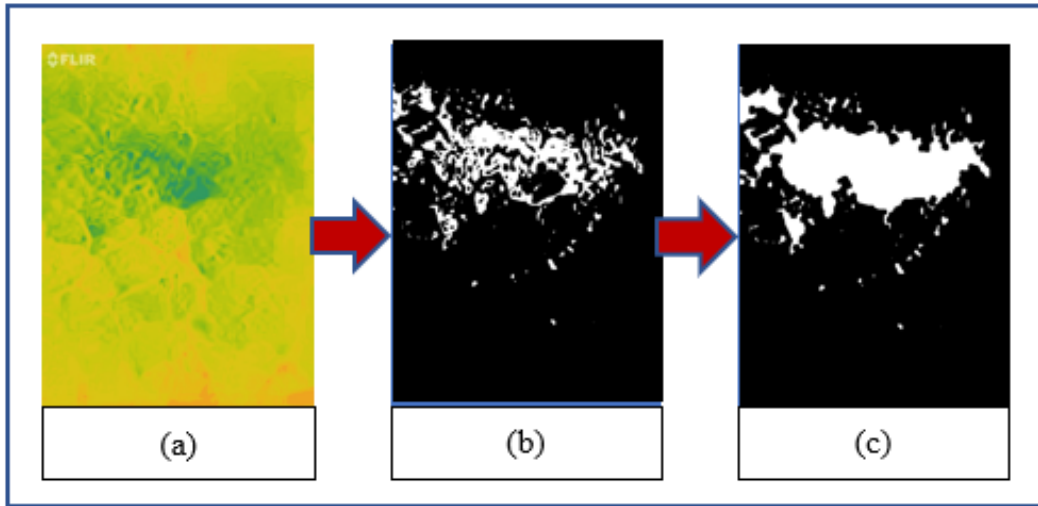
Sule YARCI - 180735018

Danisman: Prof. Dr. Huseyin AKBULUT
İkinci Danisman: Dr. Öğr. Uyesi Gur Emre GURAKSIN

Şekil 4.21 C alanındaki 2 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.


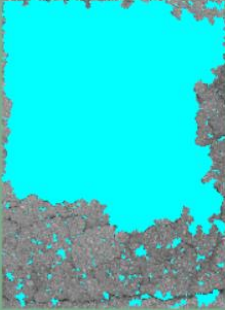
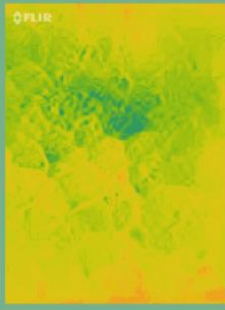



Şekil 4.22 C alanındaki 10 numaralı çatlak -normal görüntü işleme aşamaları.



Şekil 4.23 C alanındaki 10 numaralı çatlak -termal görüntü işleme aşamaları.

Goruntu Paneli

Normal Goruntu
(Çatlak Etkisi) Alanı

0.63586

Normal Goruntunun
Maskelenmis Hali

Maskelemeyi Göster

Termal Goruntu
(Soğuk Bölge) Alanı

0.14686

Termal Goruntunun
Maskelenmis Hali

Maskelemeyi Göster

Goruntu Yukleme Paneli

Normal Goruntu Yukle

Termal Goruntu Yukle

İklim Etki Katsayısı (k) Hesaplama Paneli

Termal gorselde yer alan minimum sıcaklık değerini giriniz: 24.3

Termal gorselde yer alan maksimum sıcaklık değerini giriniz: 26

İklim etki katsayısını (k) hesapla: 0.065385

AFYON KOCATEPE UNIVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU
İNSAAT MUHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sule YARCI - 180735018

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gur Emre GURAKSIN

Sonuc Paneli

İndeks Hesapla

Hesaplanan İndeks Değeri: 53.6072

Onerilen Bakım & Onarım Yöntemi: harc tipi kaplama yapılmalıdır

Şekil 4.24 C alanındaki 10 numaralı çatlak -oluşturulmuş kullanıcı arayüzü ekranı.

Çizelge 4.4 Görsellerin PTAI değerleri ve önerilen bakım – onarım yöntemleri.

A Alanı	İndeks	B Alanı	İndeks	C Alanı	İndeks
Görsel No.	(%)	Görsel No.	(%)	Görsel No.	(%)
1	65.4199 (aşınma yenilemesi)	1	83.7613 (yeniden yapım)	1	75.2129 (yeniden yapım)
2	52.5565 (harç tipi kaplama)	2	80.5426 (yeniden yapım)	2	78.1941 (yeniden yapım)
3	72.6833 (yeniden yapım)	3	79.0236 (yeniden yapım)	3	66.4922 (harç tipi kaplama)
4	67.9775 (aşınma yenilemesi)	4	82.2508 (yeniden yapım)	4	58.7929 (harç tipi kaplama)
5	81.6772 (yeniden yapım)	5	59.0171 (harç tipi kaplama)	5	53.0613 (harç tipi kaplama)
6	60.9925 (aşınma yenilemesi)	6	58.8665 (harç tipi kaplama)	6	87.1817 (yeniden yapım)
7	79.8646 (yeniden yapım)	7	59.263 (harç tipi kaplama)	7	89.9868 (yeniden yapım)
8	54.9647 (harç tipi kaplama)	8	48.9989 (harç tipi kaplama)	8	64.7938 (aşınma yenilemesi)
9	47.5356 (harç tipi kaplama)	9	35.6984 (harç tipi kaplama)	9	85.4746 (yeniden yapım)
10	51.6272 (harç tipi kaplama)	10	63.6016 (aşınma yenilemesi)	10	53.6072 (harç tipi kaplama)
11	66.6538 (aşınma yenilemesi)	11	53.5851 (harç tipi kaplama)	11	69.2972 (takviye)
12	43.8462 (harç tipi kaplama)	12	68.2116 (harç tipi kaplama)	12	69.6791 (harç tipi kaplama)
13	65.7553 (aşınma yenilemesi)	13	58.5989 (harç tipi kaplama)	13	59.3844 (harç tipi kaplama)
14	83.0319 (yeniden yapım)	14	60.159 (harç tipi kaplama)	14	92.0336 (yeniden yapım)
15	66.9117 (aşınma yenilemesi)	15	73.1131 (yeniden yapım)	15	70.9116 (yeniden yapım)
16	84.5117 (yeniden yapım)	16	60.1789 (harç tipi kaplama)		
		17	51.6924 (harç tipi kaplama)		
		18	77.8478 (yeniden yapım)		
		19	76.1805 (yeniden yapım)		

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Karayollarında belirli bir ömür tahmini ile üstyapı tasarımı yapılmaktadır. Karayolu üstyapısı sürekli olarak atmosfer koşullarına maruz kalması nedeniyle önceden belirlenen hizmet ömrünü tamamlamadan bozulmakta ve bozulan kaplamalar büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında;

- Belirlenen proje ömrü boyunca üstyapının gözlemlenip doğru zamanda uygun müdahalenin yapılması için bir model önerisi yapılmış, bozulma durumunun önceden tahmin edilmesi, doğru teknikle müdahale yapılması açısından üstyapı yönetim sistemine önemli ölçüde destek sağlayacak bir çalışma başarıyla sunulmuştur.
- Performans tahmin modellerinin kurulmasında verilerin üstyapıya zarar vermeden toplanması problemine bir çözüm yaklaşımı sunulmuş, önerilen veri toplama yöntemi ile hem hızlı hem de üstyapıya zarar vermeden veri toplanmasına alternatif bir çözüm önerilmiştir.
- PTAI (Pavement Thermal Area Index) olarak isimlendirilen ve sadece gözleme dayalı yüzeysel veri toplamadan ziyade kayma tabakasının, temel ve alttemel tabakalarındaki suya bağlı bozulma durumunun belirlemesine katkı sağlayan bir indeks önerilmiştir. PTAI, yüzey ve yeraltı sularının drenajının yetersizliğine bağlı bozulmaların da gözlenmesine olanak tanıyan, cep telefonuna yüklenecek bir uygulama ile büyük maliyetlere ve cihaza ihtiyaç duymadan belirlenen bölgenin mevcut durumu ile ilgili bir değerlendirme yapmayı sağlayan, ayrıca ileriki çalışmalarda araca monte edilerek kullanılacak bir sistem olarak da tasarlanmış ve çok uzun yol kesimlerinde araç içinden ayrılmadan veriler toplayabilecek bir yapıda oluşturulmuştur.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında önerilen PTAI indeksinin;

- Mevcut üstyapı performans değerlendirme sistemine bir alternatif değil destekleyici bir sistem olarak kullanılacağı,

- Üstyapıda meydana gelen sıcaklık farkı göz önünde bulundurularak oluşmuş çatlakların şiddetinin ve su sızması nedeniyle granüler malzemede meydana gelen termal alanların, performans indeksi belirlemeye dair çalışmaları destekleyeceği,
- Bozulmaların tetiklenmesindeki en önemli faktörün yetersiz drenaj olması, esnek kaplama altına çatlaklar vasıtasıyla sızan suyun, donma-çözünme açısından tehlike arz etmesi ve daha büyük çatlaklara ve hatta kaplamayı parçalayıp çukurlara yol açması gibi nedenlerle oluşacak ve güvenlik ve ekonomi için tehdit oluşturacak hasarlara karşı alınacak önlemler için yol gösterici olacağı,
- Çalışmanın sonucunda toplanan görüntülerden, görüntü işleme teknikleri ile elde edilen verilerin ışığında kaplama performansı değerlendirilmesinde önerilen modelin kullanılabilmesi ve hızlı bir şekilde performans değerlendirmesi yapılmasına imkan vereceği değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında karşılaşılan problemler, ortamın seçimi, şartların doğal olarak oluşmasını bekleme, ölçüm cihazı tasarımı ve en önemlisi de bunları bütünleşik bir yapıda toplayan resim işleme tabanlı yazılım platformunun geliştirilmesi olmuştur.

Gelecek çalışmalarda;

- PTAI yönteminin kilometre bazında bir ölçüm prosedürüne dönüştürerek ülkemiz yollarında da test edilmesi,
- KGM'ye performans değerlendirmesinde kullanılması amacıyla sunulması,
- PTAI temelli tahmin modelleri oluştururken yapay zekadan yararlanılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- AASHTO, 1993, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Akarsu B, Karakose M, Parlak K, Erhan A, Sarimaden A, 2016, A Fast and Adaptive Road Defect Detection Approach Using Computer Vision with Real Time Implementation, International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers, 290-295.
- Al-Suleiman T I, Hamici Z M, Bazlamit S M, Ahmad H S, 2017, Assessment of the Effect of Alligator Cracking on Pavement Condition Using WSN-Image Processing. International Conference on Engineering, Project, and Product Management. Cham, Switzerland, Springer: 265-274.
- ASTM D, 2009, D6433 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Caltrans, 2003, Maintenance Technical Advisory Guide (TAG) State of California Department of Transportation, California.
- Cubero-Fernandez A, Rodriguez-Lozano F J, Villatoro R, Olivares J, Palomares J M, 2017, Efficient Pavement Crack Detection and Classification, EURASIP Journal on Image and Video Processing.
- Gao W, Zhang X, Yang L, Liu H, 2010, An Improved Sobel Edge Detection, 3rd International conference on computer science and information technology, 9-11 July 2010, Chengdu, China, 67-71.
- Garber N J, Hoel L A, 2009, Traffic and Highway Engineering (1230), Stamford, USA.
- Goktepe A B, Agar E, Lav A H, 2005, Esnek Üstyapılarda Mekanik Özelliklerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Geri Hesaplanması, İTÜ Dergisi Seri D: Mühendislik, 4, 31-42.
- Gurer C, Karasahin M, 2019, Dinamik Koni Penetrasyon (DCP) Deneyi ile Sathi Kaplamalı Güzergahlarda Zemin Özelliklerinin Değişiminin Belirlenmesi, Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology, 1, 11-20.
- Haas R, Hudson W R, 1978, Pavement Management Systems, 461, USA.
- Hallin J, 2011, Guide for pavement-type selection, Transportation Research Board, USA.

- Hergüner A T, Açar E, 2011, Türkiye Otoyol Ağı için Üstyapı Performans Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi, İTÜDERGİSİ/d, 9.
- Hong W-T, Kang S, Park K, Lee J-S, 2016, Evaluation of Active Layer Depth using Dynamic Cone Penetrometer, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 17, 49-54.
- Hudson W R, Haas R, Pedigo R D, 1979, NCHRP Report: Pavement Management System Development, 0077-5614.
- Ilıcalı M, Tayfur S, Özen H, Sönmez İ, Eren K, 2001, Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, 280, İstanbul, Türkiye.
- Ji W, Zhang X, 2017, Research on the Application of Digital Image Processing Technology in Intelligent Transportation. 2nd International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA 2016). Qingdao, China, Atlantis Press.
- Kandhal P, Mallick R, 1997, Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments-Participant's Handbook.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2013, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Khalesi S, Bagheri M, 2018, Automatic Road Crack Detection and Classification using Image Processing Techniques, Machine Learning and Integrated Models in Urban Areas: A Novel Image Binarization Technique, Journal of Industrial and Systems Engineering, 11, 85-97.
- Khanna S, Justo C, 2011, Highway engineering (301), Nem Chand and Bros., India.
- Lavin P, 2003, Asphalt Pavements: A Practical Guide to Design, Production and Maintenance for Engineers and Architects, CRC Press.
- Li B, Wang K C, Zhang A, Fei Y, Sollazzo G, 2019, Automatic Segmentation and Enhancement of Pavement Cracks Based on 3D Pavement Images, Journal of Advanced Transportation.
- Lu Y, Golrokh A J, Islam M, 2017, Concrete Pavement Service Condition Assessment Using Infrared Thermography, Advances in Materials Science and Engineering, 2017.
- Mathew T V, Rao K K, 2006, Introduction to Transportation Engineering, Civil Engineering–Transportation Engineering. IIT Bombay, NPTEL ONLINE.

- Miller J S, Bellinger W Y, 2003, Distress Identification Manual for the Long-term Pavement Performance Program, FHWA-RD-03-031.
- NCHRP, 2004, Guide for Mechanistic Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.
- Piryonesi S M, El-Diraby T, 2018, Using Data Analytics for Cost-Effective Prediction of Road Conditions: Case of The Pavement Condition Index:[Summary Report].
- Ragnoli A, De Blasiis M R, Di Benedetto A, 2018, Pavement Distress Detection Methods: A review, Infrastructures, 3, 58.
- Raya J K, 1992, A Guide to Visual Assessment of Flexible Pavement Surface Conditions, Institut Kerja Raya Malaysia.
- Sağlık A, Güngör A, 2008, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (159), Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- Sainz M, 2016, Pothole Patching: A Review on Materials and Methods Bradley University.
- Schiller P L, Kenworthy J R, 2010, An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation, Routledge, 368, London, UK.
- Sha A-m, Tu S, 2012, Cracks Characteristics and Damage Mechanism of Asphalt Pavement with Semi-rigid Base. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Delft, The Netherlands, Springer: 985-995.
- Shahin M, 2005, Pavement Preservation for Airports, Roads, and Parking Lots, Springer, New York, NY, United States.
- Shatnawi S, 2008, Maintenance Technical Advisory Guide Volume I, Flexible Pavement Preservation, California Department of Transportation, Sacramento (CA), 1.
- Shoukry S N, Martinelli D R, Reigle J A, 1997, Universal Pavement Distress Evaluator Based on Fuzzy Sets, Transportation research record, 1592, 180-186.
- Smith R E, Beatty C K, 1999, Microsurfacing Usage Guidelines, Transportation research record, 1680, 13-17.
- Staniek M, 2017, Detection of Cracks in Asphalt Pavement During Road Inspection Processes, Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska.
- Tamrakar N K, 2019, Overview on causes of flexible pavement distresses, Bulletin of Nepal Geological Society, 36.

Tunç A, 2007, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, Türkiye.

TxDOT, 2019, Pavement Manual, Texas Department of Transportation, Texas, USA.

Umar F, Açar E, 1985, Yol Üstyapısı, İTÜ, 150, İstanbul, Türkiye.

Wang D, Shi J, 2017, Study on Infrared Differential Thermal Non-destructive Testing Technology of the Permeability of Hot Mix Asphalt Pavements. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Chengdu, China, IOP Publishing. 69: 012109.

Yayla N, 2011, Karayolu Mühendisliği (285), Birsen Yayınevi, Ankara.

Yılmaz A, Sargin S, 2012, Water Effect on Deteriorations of Asphalt Pavements, TOJSAT.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/revize-ulasan-ve-erisen-turkiye-2020-20210319-100631.pdf>
https://en.wikipedia.org/wiki/Road_surface#cite_note-5, 7.02.2020
- 2- <http://www.lgam.info/cracking>, 16.03.2021
- 3- <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/07040/003.cfm>, 04.12.2020
- 4- <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/dynamic-cone-penetration-test/>, 05.12.2020
- 5- <https://pavementinteractive.org/reference-desk/construction/site-preparation/geosynthetics/>, 03.02.2021
- 6- <https://www.flir.eu/products/flir-one-pro-1t/>, 03.02.2021
- 7- <https://www.flir.eu/discover/professional-tools/what-is-msx/>, 03.02.2021
- 8- <https://www.bosch-professional.com/tr/tr/products/gtc-400-c-0601083101>, 03.02.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şule YARCI
Doğum Yeri ve Tarihi : KAYSERİ / 1992
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 538 068 80 57 / yarcisule@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : 75. Yıl Cumhuriyet Anadolu Lisesi, (2006-2010)
Lisans : Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, (2011-2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2018-2021)

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

Yayımları (SCI ve diğer) :

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

Gürer C, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019, Investigation the Effect of Gradation Change on Electrically Conductivity in Conductive Asphalt Mixtures, Third Mediterranean International Congress on Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.

Gürer C, Akbulut H, Elmacı A, Korkmaz B E, Yarcı Ş, 2019, Anti-Icing Methods for Highways and Airfield's Pavements, Third Mediterranean International Congress On Natural Sciences, June 18-20, Podgorica.