

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARAZİ KOŞULLARINDA HAZIRLANAN FARKLI KALINLIKLARDAKİ ASFALT
KAPLAMALARIN LABORATUVAR PERORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper SEYMEN

**EYLÜL 2020
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARAZİ KOŞULLARINDA HAZIRLANAN FARKLI KALINLIKLARDAKİ ASFALT
KAPLAMALARIN LABORATUVAR PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Alper SEYMEN

ORCID : 0000 -0003 - 2242 - 603X

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 08 /2020

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 09 /2020

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erol İSKENDER
ORCID : 0000 -0001 - 7934 - 839X

Trabzon 2020

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “Arazi Koşullarında Hazırlanan Farklı Kalınlıklardaki Asfalt Kaplamaların Laboratuvar Performanslarının Değerlendirilmesi” adlı bu tezin araştırma konusu ve yenilikçi test yöntemleriyle bu alandaki boşluğu dolduracağını, araştırmacı ve uygulayıcılara katkı sağlayacağını ummaktayım. Ülkemizde ve dünyada sıklıkla kullanılan asfalt kaplamalarda belirli bir dizayn kalınlığı belirlense de uygulama sırasında çeşitli nedenlerle kaplama kalınlığında değişiklik meydana gelebilmektedir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasının farklı kalınlıklardaki asfalt kaplamalara yapılan performans testleriyle literatüre katkı yapması hedeflenmiştir.

Tez çalışmam boyunca bana zamanını ayırıp laboratuvar deneyleri dahil tüm süreçlerde yardımını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Erol İSKENDER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Atakan AKSOY'a ve üzerimde emeği bulunun tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmamı, hayatım boyunca bana güvenen, aldığım her kararda yanımda olup desteklerini esirgemeyen, bundan sonra da yanımda olacaklarını bildiğim değerli aileme ithaf ediyorum.

Alper SEYMEN
Trabzon 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Arazi Koşullarında Hazırlanan Farklı Kalınlıklardaki Asfalt Kaplamaların Laboratuvar Performanslarının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Erol İSKENDER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/09/2020

Alper SEYMEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Problemin Tanımı.....	1
1.3. Amaç.....	4
1.4. Çalışmanın Özgeçmişi.....	4
1.5. Karayolu.....	14
1.5.1. Karayolu Altyapısı.....	14
1.5.2. Karayolu Üstyapısı.....	14
1.6. Karayolu Esnek Üstyapısı.....	15
1.7. Asfalt Kaplamalarda Bozulma Mekanizmaları.....	17
1.7.1. Kalıcı Deformasyon.....	17
1.7.2. Yorulma Çatlaması.....	19
1.7.3. Düşük Sıcaklık Çatlaması.....	20
1.7.4. Sürtünme Özellikleri.....	21
1.7.5. Nem Hassasiyeti.....	21
1.7.5.1. Su ile İlişkili Bozulma Türleri.....	22
1.7.5.2. Asfalt Karışımların Nem Hassasiyetini Etkileyen Faktörler.....	22
1.8. Asfalt Kaplamalara Uygulanan Deneyler.....	23
1.8.1. Kalıcı Deformasyonu Değerlendirmek İçin Deneyler.....	23
1.8.2. Yorulma Çatlamasını Değerlendirmek İçin Deneyler.....	24

1.8.3.	Düşük Sıcaklık Çatlamasını Değerlendirmek İçin Deneyleer.....	25
1.8.4.	Nem Hassasiyetini Değerlendirmek İçin Deneyleer.....	25
1.8.5.	Sürtünme Özelliklerini Değerlendirmek İçin Deneyleer.....	26
1.9.	Yol Yapım Süreci ve Karşılaşılan Problemler.....	27
1.9.1.	Sıkıştırmanın Önemi.....	29
1.9.2.	Segregasyon.....	30
1.9.2.1.	Termal Segregasyon.....	30
1.9.2.2	Agrega Segregasyonu.....	31
1.10.	Arazi Performansını Değerlendirmeye İlişkin Yöntemler.....	31
1.10.1.	Geometrik Düzgünsüzlük Ölçüm Sistemleri.....	32
1.10.2.	Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI).....	33
1.10.3.	Sürüş Sayısı (RN).....	33
1.10.4.	Düzgünsüzlük Ölçme Araçları.....	33
1.10.5.	Defleksiyon Ölçüm Sistemleri.....	34
1.10.6.	Üstyapı Yüzey Bozulması Ölçüm Sistemleri.....	35
1.10.7	Kayma Direnci Ölçüm Sistemleri.....	35
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	37
2.1.	Giriş.....	37
2.2.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	37
2.3.	Elek Analizi ve Marshall Tasarım Deneyi.....	38
2.4.	Yöntem.....	42
2.4.1.	Hamburg Tekerlek İzi Testi.....	42
2.4.2.	Deformasyon Kontrollü Kiriş Eğilme Testi.....	47
2.4.3.	Tekrarlı Yük Kiriş Eğilme Testi.....	49
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	52
3.1.	Giriş.....	52
3.2.	Hamburg Tekerlek İzi Testine Ait Bulgular ve İrdeleme	52
3.3.	Kiriş Eğilme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	61
3.4.	Tekrarlı Yük Kiriş Eğilme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme.....	63
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	68
5.	KAYNAKLAR.....	70

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

ARAZİ KOŞULLARINDA HAZIRLANAN FARKLI KALINLIKLARDAKİ ASFALT
KAPLAMALARIN LABORATUVAR PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Alper SEYMEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Erol İSKENDER
2020, 76 Sayfa

Ülkemizde ve dünyada karayolları büyük oranda asfalt kaplama olarak inşa edilmektedir. Kaplama dizaynında belirli bir tasarım kalınlığı seçilmiş olsa dahi inşaat sürecinden kaynaklanan çeşitli nedenlerle kaplama kalınlığında değişiklikler olmaktadır. Kaplama performansı kalınlıktaki değişikliklerden önemli oranda etkilenmektedir. Bu çalışmada, asfalt tabaka kalınlığının kaplama performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan asfalt kaplama örnekleri, belirli bir süre taşıt trafiğine ve çevresel etkilere maruz kalmış karayolundan alınmıştır. Örnekler laboratuvarında 4cm'den 9cm'ye kadar 0.5cm farklarla değişen kalınlıklarda hazırlanmıştır. Farklı kalınlıklarda hazırlanan örnekler Hamburg tekerlek izi testi (HWTT), kiriş eğilme testi ve tekrarlı yükleme kiriş eğilme testleri ile kalıcı deformasyon, su hasarı ve çatlama direnci yönünden değerlendirilmiştir. Kaplama kalınlığı ile eğilmede çatlama direnci arasında yüksek bir korelasyon olduğu, tabaka kalınlığının artması eğilmede çatlama direncinde artış oluşturduğu, tabaka kalınlığı arttıkça örnekler arasındaki eğilme miktarı farkının azaldığı, Hamburg test cihazının kaplamaların su hassasiyetlerini değerlendirmede başarılı olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt kaplama, Hamburg tekerlek izi testi, Kiriş eğilme testi, Tekrarlı yük kiriş eğilme testi, Kalıcı deformasyon, Su hasarı.

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF LABORATORY PERFORMANCES OF DIFFERENT THICKNESS OF
ASPHALT PAVEMENTS PREPARED IN FIELD CONDITIONS

Alper SEYMEN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Erol ISKENDER
2020, 76 Pages

In our country and in the world, highways are mostly built as asphalt pavements. Even if a certain design thickness is chosen in the pavement design, there are changes in the pavement thickness due to various reasons arising from the construction process. Pavement performance is significantly affected by changes in thickness. In this study, the effect of asphalt layer thickness on pavement performance was investigated. The asphalt pavement samples used in the study were taken from the highway, which has been exposed to vehicle traffic and environmental impacts for a certain period of time. Samples were prepared in the laboratory in varying thicknesses ranging from 4 cm to 9 cm with 0.5 cm differences. Samples prepared in different thicknesses were evaluated in terms of permanent deformation, water damage and crack resistance with Hamburg wheel tracking test (HWTT), bending beam test and repeated load bending beam tests. It is understood that there is a high correlation between pavement thickness and crack resistance in bending, increase in layer thickness causes an increase in crack resistance in bending, as the layer thickness increases the difference in bending amount of the samples decreases, and the Hamburg test device is successful in evaluating the water sensitivity of the pavement.

Key Words: Asphalt pavement, Hamburg wheel tracking test, Bending beam test, Repeated load bending beam test, Permanent deformation, Water damage.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Temel tabaka kalınlığı ve düşey deformasyon ilişkisi.....	7
Şekil 2.	Bir yol kesitinde asfalt kaplama ve alttemel katmanı kalınlığı değişimi....	8
Şekil 3.	Esnek üstyapı kesiti	16
Şekil 4.	Esnek üstyapı tabakaları.....	16
Şekil 5.	Tekerlek izi.....	17
Şekil 6.	Yorulma çatlakları.....	19
Şekil 7.	Çukurlar.....	20
Şekil 8.	Termal çatlaklar.....	21
Şekil 9.	KGM profilometre ölçüm cihazı.....	34
Şekil 10.	KGM deflektometre ölçüm cihazı.....	35
Şekil 11.	KGM sürtünme ölçüm cihazı.....	36
Şekil 12.	Agrega karışımının tane boyutu dağılımı eğrisi ve şartname limitleri.....	39
Şekil 13.	Marshall deneyinden elde edilen grafikler.....	41
Şekil 14.	Hamburg tekerlek izi test eğrisi.....	43
Şekil 15.	Farklı kalınlıklarda kesilerek hazırlanan örnek çiftleri.....	45
Şekil 16.	HWT cihazına yerleştirilen 10x36 cm boyutunda örnek.....	45
Şekil 17.	Hamburhg tekerlek izi deney cihazı.....	46
Şekil 18.	Şematik marshall stabilite deney düzeneği.....	48
Şekil 19.	Kiriş numunelerin yükleme mekanizması.....	48
Şekil 20.	Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı.....	50
Şekil 21.	Tekrarlı yük sünme testi.....	51
Şekil 22.	40mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	56
Şekil 23.	45mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	56
Şekil 24.	50mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	57
Şekil 25.	55mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	57
Şekil 26.	60mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	57

Şekil 27.	65mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	58
Şekil 28.	70mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	58
Şekil 29.	75mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	58
Şekil 30.	80mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	59
Şekil 31.	85mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	59
Şekil 32.	90mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi.....	59
Şekil 33.	Ortalama tekerlek izi eğrilerinin değerlendirilmesi.....	60
Şekil 34.	Kiriş numunelerinin kırılma yükü değerleri.....	62
Şekil 35.	Kiriş numune ve kırılma yükünün ortalama değerleri.....	62
Şekil 36.	Ortalama deformasyon eğrileri.....	63
Şekil 37.	32 yükleme döngüsüne karşılık gelen deformasyon eğrileri.....	64
Şekil 38.	2mm deformasyona denk gelen yük tekerrür sayıları.....	65

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Asfalt betonu karışımında tekerlek izine etki eden faktörler	18
Tablo 2.	Binder ve aşınma tabakalarında kullanılacak asfalt ve agreganın karıştırmadan önceki ısıtılma sıcaklıkları.....	27
Tablo 3.	Binder ve aşınma tabakaları için plentten çıkan karışım sıcaklığı.....	28
Tablo 4.	Binder ve aşınma tabakaları için asfalt betonu serim sıcaklığı	29
Tablo 5.	Düzgünsüzlük ölçüm yöntemleri ve kullanılan araçlar.....	33
Tablo 6.	Çalışmada kullanılan agregaların özellikleri.....	37
Tablo 7.	Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları.....	38
Tablo 8.	Karışımın tane boyutu dağılımı, tolerans sınırları ve şartname limitleri.....	38
Tablo 9.	Marshall deney formu.....	40
Tablo 10.	Kullanılan agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları.....	40
Tablo 11.	Optimum bitüm içeriğindeki deney sonuçları.....	42
Tablo 12.	Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler.....	44
Tablo 13.	Hazırlanan örneklerin ortalama tekerlek izi derinlikleri.....	47
Tablo 14.	Kiriş numunelerin kırılmasına sebep olan ortalama yükler	49
Tablo 15.	Tekrarlı yük kırış eğilme testi eğilme miktarları.....	51
Tablo 16.	Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri.....	53
Tablo 17.	Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri	54
Tablo 18.	Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri	55
Tablo 19.	Kiriş numunelerinin kırılma yükleri.....	61

SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AC	Asfalt çimentosu
b	Deney numunesi genişliği
BSK	Bitümlü sıcak karışım
CDOT	Colorado Ulaştırma Bakanlığı
D_p	Biriketin hacim özgül ağırlığı
D_t	Biriketinin maksimum teorik özgül ağırlığı
F	Kırılmaya neden olan yük
h	Deney numunesinin kalınlığı
HWTD	Hamburg tekerlek izi test cihazı
HWTT	Hamburg tekerlek izi testi
IRI	Uluslararası Düzgünlük İndeksi
l	Deney numunesinin mesnetler arası mesafesi
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolu Teknik Şartnamesi
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
RN	Sürüş sayısı
SCRIM	British Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine
VMA	Agregalar arası boşluk
V_h	Hava boşluğu
V_f	Asfaltla dolu boşluk
W_a	Bitüm içeriği
σ	Kirişin eğilme dayanımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Nüfusun sürekli artması, yapılaşmanın kent merkezlerinde ve kırsalda gelişmesi yol ağının da sürekli artmasına neden olmaktadır. Araçların dingil yüklerinin artması, kaplamaların yüklenme periyotlarının azalması gibi sebeplerle asfalt kaplamalarda daha çok bozucu gerilmeler oluşmaktadır. Kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık çatlama, yorulma çatlama ve su hasarı asfalt kaplamalarda oluşan başlıca problemlerdir.

Yenilenen veya yeni yapılan yollar potansiyel bozulmalara karşı daha dirençli olarak tasarlanmaktadır. Bu anlamda yenilikçi karışım türü ve katkı uygulamaları yapılabilmektedir. Malzeme seçimi ve karışım tasarımı kaplamadan beklenen performansın oluşmasında anahtar rol oynamaktadır. Ancak kaliteyi garanti altına alan süreçlerden birisi de inşaa aşamasıdır. Laboratuvarda üretilen karışımdan elde edilen özellikler ile arazi performansı arasında yüksek ilişki olmalıdır. Bu da eksiksiz bir inşaa yöntemi ve kalite-kontrol mekanizması ile mümkün olabilecek bir süreçtir.

1.2. Problemin Tanımı

Kaplama malzemelerinin, ortamın, yüklenme ve yapım sürecinin kaplama performansını etkilediği bilinmektedir. Bu parametrelerin herbirinde gözlemlenen değişkenlik belirli bir risk seviyesi getirmektedir. Tasarım sürecindeki bu değişkenlikleri hesaba katmanın gereği dünyadaki birçok karayolu otoritesini tek bir girdi çıktı değerine dayanan geleneksel bir deterministik yaklaşımdan, ortalama varyans ve olasılık dağılımı içeren olasılıkçı bir tasarıma yönelmeye zorlamaktadır. Yapım süreci boyunca bu değişkenliklerin etkisini ve bunların kaplama ömrü üzerindeki etkilerini olasılık dağılımı üzerinden ele alan bir çalışmada öngörülen yorulma performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin asfalt sertlik modülü ve kalınlığı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca tahmini deformasyon performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin granül alt temel kalınlığı ve asfalt kaplama kalınlığı olduğu gözlenmiştir (Valle ve Thom, 2016).

Kaplama performansı; inşaat süreci ve yürürlükteki kalite kontrol prosedürlerinden kaynaklanan kaplama tabakası kalınlığındaki değişkenlik nedeniyle önemli ölçüde değişebilir. Yapılan bir çalışmada tipik bir otoyol kaplaması inşaatı için diğer tüm değişkenler sabit tutulurken kaplama kalınlığındaki değişkenliğin bir fonksiyonu olarak kaplamanın yorulma ömrü ve deformasyon potansiyeli değerlendirilmiştir. Kaplama kalınlığı yönetmelikte izin verilen tolerans değerleri arasında kalsa bile kalınlıktaki değişimlerin kaplama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Tahmini yorulma performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip parametrelerin asfaltın sertlik modülü ve kalınlığı olduğu, tahmini deformasyon performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin ise granüler alt temel kalınlığı, asfalt kaplama kalınlığı ve alt tabaka rijitliğidir (Valle ve Thom, 2020).

Karayolu inşaatında bir yol bölümü için belirli bir tasarım kalınlığı seçilmiş olsa dahi uygulamada kalınlık sabit değildir. Kaplama tabakası kalınlığının hedeflenen kalınlığa yüksek oranda yakın belirli bir olasılık dağılımına sahip olması beklenmektedir. Bir karayolunun 1 km'lik bir bölümünde yeraltı radarıyla yapılan bir çalışmada kaplama kalınlığında değişikliklerin olduğu ifade edilmektedir (Valle ve Thom, 2016).

Asfalt karışımında agreganın çatlaması yüksek mukavemetleri nedeniyle asfalt mastiğin çatlamasına göre daha zordur. Çatlak yeri çatlama davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Asfalt karışımında çatlak yerinin ve kaba agrega dağılımının çatlama davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için asfalt kiriş numuneler üzerinde eğilme deneyi yapılmıştır. Asfalt numuneler 29 cm uzunluğunda ve 5 cm kalınlığında hazırlanmıştır. Kirişin alt kısmında, biri kiriş ortasında diğer ikisi ortanın 20 mm ve 40 mm dışında olacak şekilde 3 farklı çatlak oluşturulmuştur. Deneyler 5°C de ve yükleme hızı 2mm/dk olan yer değiştirme kontrollü bir yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda meydana gelen tüm çatlakların sadece asfalt mastik içinde veya agrega mastik arayüzeyinde yayıldığı ancak agrega üzerlerinden geçmediği gözlemlenmiştir (Yin vd., 2014).

Polonya da yapılan bir çalışma asfalt numuneler üzerinde yapılan kiriş eğilme testinin asfalt kaplamanın performansını değerlendirmede önemli sonuçlar verdiğini göstermiştir. Asfalt numunelerle yapılan kiriş eğilme testi bitüm kaynağının ve üretim sürecinin, asfalt karışımlarının düşük sıcaklık performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve bu etkinin bağlayıcı modifikasyonunun ve karışımında kullanılan agrega iskeletinin etkisiyle karşılaştırılabilir derecede önemli olduğunu göstermektedir. Yapılan

çalışmadaki analizler aynı asfalt bağlayıcısının uygulandığı farklı asfalt karışımlarının farklı düşük sıcaklık performanslarını sağlayabileceğini göstermiştir. Yalnızca bitüm testine dayanan analizin düşük sıcaklık performansını uygun şekilde değerlendirmeyeceğini göstermiştir (Pszczola vd., 2018).

Hamburg tekerlek izi test sonuçlarının hizmetteki bir karayolunun sahadaki tekerlek izi performansı ile ilişkisini değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Teksas'ta saha performans verileri rutin bir şekilde toplanan 5 farklı karayolu bölümünün karışım dizaynı laboratuvar ortamında hazırlanarak Hamburg tekerlek izi cihazında test yapılmıştır. Genel olarak Hamburg tekerlek izi testi (HWTT) laboratuvar verileri ilgili bitümlü sıcak karışım (BSK) katmanlarının saha performansları ile iyi bir korelasyon göstermiştir. Çalışma 10000 tekerlek izi geçişinde Hamburg tekerlek izi test cihazının (HWTD) bitümlü sıcak karışımların değerlendirilmesinde saha performanslarının iyi bir simülasyonunu sağladığını doğrulamıştır (Walubita vd., 2020).

Asfalt kaplamaların tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için sıklıkla kullanılan laboratuvar tekerlek izi test cihazının yerine tekrarlı yük sünme testinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Üç farklı karışım türünde hazırlanan numuneler, tekerlek izi test cihazında dakikada 20, 40, 60 geçiş hızlarında ve 420, 560, 690 kPa basınç altında farklı sıcaklıklarda test edilmiştir. Tekrarlı yük sünme cihazında ise yükleme frekansı, tekerlek izi testinde tekerleğin numunenin orta noktasına gelene kadar aldığı süreden elde edilerek deney şartları tekerlek izi cihazıyla benzer şekilde düzenlenmiştir. Test sonucunda her karışımda gözlenen tekerlek izi derinliğinde, test sıcaklığı ve uygulanan yükün artması ve yükleme hızının azalmasıyla artma gözlemlenmiştir. Kümülatif gerilmeler değerlendirildiğinde tekrarlı yük sünme testi sonuçları da benzer eğilim göstermiştir. Tekerek geçiş – deformasyon ve tekrarlı yük – deformasyon grafiklerinin iki test için de birbirine çok yakın çıktığı gözlemlenmiştir (Zhu ve Fwa, 2006).

Asfalt kaplamaların performansını değerlendiren laboratuvar testlerinin gerçek arazi performansıyla ne ölçüde tutarlılık gösterdiği araştırılmıştır. Bu amaçla Teksas'ta saha performansı bilinen bir karayolundan test örnekleri alınmıştır. Tekerek izi derinlikleri ölçülerek ve yerinde gözlemlere dayanılarak bu karayolu bölümlerinin tekerlek izi performansları sıralanmıştır. Karayolundan alınan arazi örneklerine laboratuvarda tekrarlı yük sünme testi, tekrarlı basit kesme testi, Hamburg tekerlek izi testi, asfalt kaplama analiz testi ve dinamik modül testi uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme testinin belirlenen karayolu bölümleri arasındaki performans farkını ayırt edebildiği açıkça görülmüştür. Toplam kalıcı

deformasyon değerinin arazideki tekerlek izi performansının kabul edilebilir bir göstergesi olduğu bulunmuştur (Zhou vd., 2003).

1.3. Amaç

Tezin ana amacı, asfalt kaplamalarda tabaka kalınlığının kaplamanın performansı üzerindeki etkisinin kiriş eğilme yöntemi, tekrarlı yük sünme deneyi ve Hamburg tekerlek izi deneyi ile değerlendirilmesidir. Arazi koşullarında sıkıştırılmış asfalt kaplama örnekleri kullanılarak, kiriş örnekler üzerinde deformasyon kontrollü eğilme deneyi ve tekrarlı yük sünme deneyi ile çatlama direnci, Hamburg tekerlek izi yöntemi ile de asfalt kaplamanın deformasyon ve su hasarı yönünden değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

1.4. Çalışmanın Özgeçmişi

Hamburg tekerlek izi test cihazı asfalt kaplamaların su hasarına karşı hassasiyetini ölçmede sıklıkla kullanılan bir cihaz haline gelmiştir. Bu bağlamda soyulma önleyici katkı kullanımının asfalt kaplamanın soyulma performansına etkisini araştırmak için Teksas'ta bir çalışma yapılmıştır. Sönmüş kireç ve sıvı soyulma önleyici katkıları kullanılarak maddeleri kullanılarak altı farklı asfalt karışım türü hazırlanmıştır. 40°C'de AC 20 sınıfı asfalt kullanılarak yapılan çalışma sonucunda soyulma önleyici katkı kullanımının asfalt karışım performansını arttırdığı görülmüştür. Sönmüş kireç içeren karışımlar sıvı soyulma önleyici katkı kullanılarak hazırlanan karışımlardan daha iyi performans göstermiştir. Hiçbir katkı maddesi içermeyen karışımlar ise en kötü performansı göstermiştir. Test sonuçları Hamburg test cihazının soyulma önleyici katkı kullanımını değerlendirebildiğini ve soyulma performansını belirlemede kullanılabilir olduğunu göstermiştir (İzzo ve Tahmoressi, 1998).

Hamburg tekerlek izi test cihazının dünya çapında kullanımıyla ilgili yapılan kapsamlı bir araştırmada, bu test cihazının çeşitli asfalt karışımların tekerlek izi direncini ve su hasarına karşı hassasiyetini ölçmede kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan laboratuvar testleri Hamburg tekerlek izi test cihazının çeşitli asfalt karışımların plastik deformasyon ve nem hassasiyetinin birleşik etkisini belirleyebileceğini kanıtlamıştır. Çalışma ayrıca deneydeki su sıcaklığı ve numunelerdeki hava boşluğu farklılıklarının, test

sırasında ortaya çıkan tekerlek izi derinlikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir (Beecroft ve Petho, 2015).

Asfalt karışımların arazide sıkıştırma sıcaklıkları yükseldikçe Hamburg tekerlek izi test sonuçlarında iyileşme görülmektedir. Arazide daha yüksek sıkıştırma sıcaklığı sağlanması kaplama performansını arttırmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların sıkıştırma sıcaklığının Hamburg tekerlek izi test sonuçları üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada 4 farklı asfalt karışım 4 farklı sıcaklıkta sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan karışımlar 45°C'de Hamburg tekerlek izi test cihazında test edilmiştir. 20000 tekerlek geçişinden sonra test edilen eş karışımların ortalama deformasyonları ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda sıkıştırma sıcaklığının artması numunelerde oluşan deformasyon miktarını azaltmaktadır. Yüksek sıkıştırma sıcaklığı daha iyi test sonuçları vermektedir (Aschenbrener ve Far, 1994).

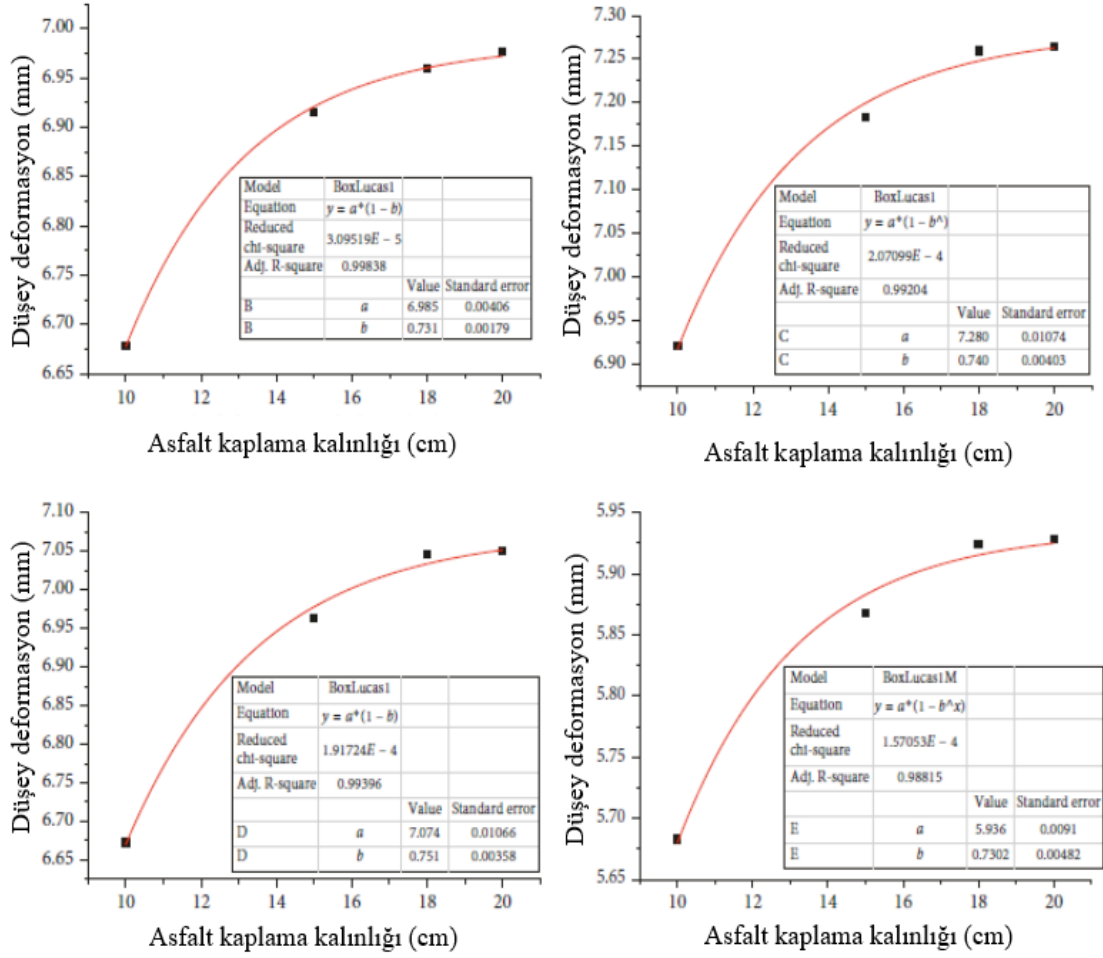
Asfalt çimentosunun rijitliği ve test sıcaklığı Hamburg tekerlek izi test sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu etkiyi araştırmak için 4 farklı asfalt sınıfının 3 farklı sıcaklıkta test edildiği bir çalışma yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda ilk olarak sabit sıcaklıkta asfalt çimento rijitliğinin artmasıyla soyulma büküm noktası daha yüksek tekerlek geçişlerinde meydana gelmiştir. Asfalt çimento rijitliği arttıkça kaplamanın nem direnci artmaktadır. Daha sonra belirli bir sınıf asfalt çimentosu kullanılıp test sıcaklığı düşürüldükçe aynı şekilde soyulma büküm noktası daha yüksek tekerlek geçişlerinde meydana gelmiştir. Test sonuçlarının asfalt çimento rijitliğine ve test sıcaklığına duyarlı olduğu görülmüştür. Kaplamanın maruz kalacağı çevresel şartlar baz alınarak asfalt çimentosu seçiminin yapılması önemli görülmüştür (Aschenbrener ve Currier, 1993).

Kısa süreli yaşlanma ve kireç ilavesinin Hamburg tekerlek izi test sonuçları üzerindeki etkisini araştırmak için yapılan çalışmada her bir test için 4 farklı asfalt karışım kullanılmıştır. Yaşlandırma süresi farklı karışımlarla yapılan test sonucuna göre kısa süreli yaşlanmanın Hamburg tekerlek izi test sonuçları üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Yaşlandırma ile birlikte asfalt karışımın sertliği artmıştır. Karışımlara farklı su içeriklerinde %1 oranında hidratlı kireç ilave edilmesiyle de tüm karışımların soyulma önleme performansları artmıştır. Sadece kuru kireç ilavesi bile karışım performansını arttırmıştır (Aschenbrener ve Currier, 1993).

Hamburg test cihazının kaplamaların saha performansını değerlendirmede ne ölçüde tutarlılık gösterdiğini araştırılmıştır. Bunun için soyulma performansları bilinen farklı 3 grup numune karayolundan deneme kesimleri alınarak test edilmiştir. Hamburg test

cihazında 50°C’de 20000 tekerlek geçişi olacak şekilde yapılan test sonucunda iyi performans gösterdiği bilinen numunelerin soyulma büküm noktalarının genellikle 10000 geçişten yüksek çıktığı görülmüştür. Yüksek bakım gerektiren numunelerde soyulma büküm noktasının 5000 ile 10000 arasında olduğu gözlemlenirken daha düşük performanslı 3. grup numunelerin 3000’den düşük soyulma büküm noktasına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak saha performansları bilinen asfalt kaplamalar üzerinde yapılan alışma Hamburg test cihazının gerçek saha performansını yansıtma da başarılı olduğunu göstermiştir (Aschenbrener, 1995).

Asfalt kaplama ve temel tabakası kalınlığının yol yüzeyinde oluşan düşey deformatsyonlar üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Bunun için bir karayolu üzerinden farklı kalınlıklarda deneme kesitleri elde etmişlerdir. Temel tabakası kalınlığının etkisini araştırmak için, kaplama kalınlığı sabit tutulup temel tabakası kalınlığı 20, 40, 60 cm olacak şekilde 3 bölüme ayrılarak yapılan yükleme testi sonucunda temel tabaka kalınlığındaki artışın asfalt kaplamadaki düşey deformatsyonu azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca asfalt kaplama kalınlığının etkisini araştırmak için, temel tabakası kalınlığı sabit tutulup asfalt kaplama kalınlığı 10, 15, 18, 20 cm olacak şekilde arttırılmıştır. Yapılan yükleme testi sonucunda kaplama kalınlığındaki artışın düşey deformatsyonun etkisini azalttığı gözlenmiştir (He ve Yang, 2018).



Şekil 1. Temel tabaka kalınlığı ve düşey deformasyon ilişkisi (He ve Yang, 2018).

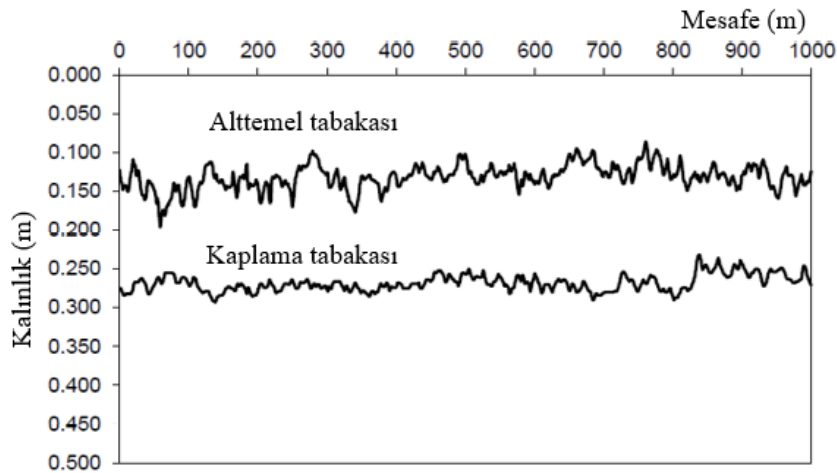
Bitümlü karışımlarda görülen yaşlanmanın asfalt kaplamanın çatlama direncine etkisini inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Araziden aynı koşullar altında fakat farklı hizmet süreleri olan 3 farklı karot örnekleri alınarak hazırlanan numuneler üzerinde kırılma parametrelerini incelemek için numunelere yarı dairesel eğilme (semi circular bending) deneyi yapılmıştır. Deney sonucu asfaltın düşük sıcaklıktaki kırılma davranışının doğrusal olduğunu göstermiştir. Kaplama hizmet ömrünün artması, numunelerin çatlama direncini azalttığı gözlemlenmiştir. Asfalt bağlayıcının yaşlanması sertliğinin artmasına sebep olmakta ve kırılma enerjisini arttırmaktadır. Ayrıca genel olarak numunelerde çatlak uzunluğunun artmasıyla kırılma enerjisi azalmıştır (Saeidi ve Aghayan, 2016).

Asfalt kaplamanın çatlama direncini artırmak için asfalt karışımının hasar gelişimini ve kırılma mekanizmasını araştırmak önemlidir. Genel olarak bir çatlak veya çentik ucunun yakınındaki yüksek yoğunluktaki gerilmeler hasara neden olmaktadır. Asfalt karışım

örneklerinin hasar gelişimini ve çatlak büyümesini değerlendirmek için yapılan bir çalışmada yarı silindirik asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere 0° , 15° , 30° , 45° ve 60° açılarla çentik atılıp çentik yönü ve agrega dağılımının kırık davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan numunelere yarı dairesel eğilme (semi circular bending) deneyi uygulanmıştır. Yapılan eğilme deneyi sonucuna göre asfalt karışım örneğinde oluşan çatlak ilerlemesinin örnekte açılan çentik yönelim açısına önemli ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. Çentik yönelme açısının artmasıyla çatlak yolunun çentikten daha belirgin şekilde saptığı gözlenmiştir (Zeng vd., 2016).

Asfalt karışımların homojenitesinde kaplama kalınlığının etkisinin araştırıldığı çalışmada ağır taşıtların park alanı olarak kullanılan bir yoldan farklı kalınlıklarda karot örnekleri alınmıştır. Bu örnekler üzerinde yoğunluk, agrega gradasyonu ve bitüm içerikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda kaplama kalınlığının artmasıyla karot örneklerinin yoğunluk değerlerinde azalma gözlenmiştir. Asfalt kaplamalarda çok düşük yoğunluk permabilitenin yüksekliğiyle ilişkilidir. Bu da soyulma ve donma çözülme problemlerini beraberinde getirmektedir. Ayrıca farklı kalınlıklardaki numunelerin agrega gradasyonlarının birbirlerine benzer çıktığı gözlenmiştir (İskender, 2019).

Karayolu inşaatında bir yol bölümü için belirli bir tasarım kalınlığı seçilmiş olsa dahi uygulamada kalınlık sabit değildir. Kaplama tabakası kalınlığının hedeflenen kalınlığa yüksek oranda yakın belirli bir olasılık dağılımına sahip olması beklenmektedir. Bir karayolunun 1 km'lik bir bölümünde yeraltı radarıyla yapılan bir çalışmada kaplama kalınlığındaki değişimler görülmektedir (Valle ve Thom, 2016).



Şekil 2. Bir yol kesitinde asfalt kaplama ve alttemel katmanı kalınlığı değişimi (Valle ve Thom, 2016).

Hamburg test cihazı; tekerlek izi ve soyulma parametrelerini ve bu parametrelerin asfalt karışımlar üzerindeki etkilerini 45-50 derece sıcaklık aralığında ölçmede dünya genelinde pek çok kurum ve kuruluş tarafından giderek daha fazla kullanılmaktadır. Hamburg test cihazında yapılan bir çalışmada test sıcaklığının artması tekerlek izi derinliğini artırmış ve soyulma büküm noktasını düşürmüştür. Maximum agrega boyutu farklı örneklerde yapılan çalışmada agrega boyutunun örneklerde oluşan tekerlek izi derinliği üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Nominal maksimum agrega boyutu büyük olan numunelerde tekerlek izi derinliği, küçük olan numunelere göre daha az çıkmıştır (Shen vd., 2017).

Asfalt karışımların arazi ve laboratuvar performanslarını kıyaslamak için Karadeniz Bölgesi sahil kesiminde inşa edilen ve silindire sıkıştırılması yapılan yol test bölümünden alınan örneklerle, laboratuvar ortamında Marshall yöntemiyle hazırlanan örneklere bir takım performans testleri yapılmıştır. Laboratuvar ve arazide sıkıştırılmış özdeş örneklerin kalıcı deformasyonlarını değerlendirmek için tekrarlı sünme testi uygulanmıştır. Testin sonunda araziden alınan örneklerde daha fazla sünme deformasyonu görülmüştür. Test sona ermeden tüm arazi örneklerinin yapısal bütünlüğünü kaybettiği gözlemlenmiştir. Arazide silindire sıkıştırılmış örnekler laboratuvar ortamında sıkıştırılmış olanlara göre daha yüksek kalıcı deformasyon göstermiştir. Laboratuvar ve arazi örneklerinde gözlemlenen performans farkında, Marshall yöntemi ile yapılan sıkıştırma önemli bir etkiye sahiptir (İskender ve Aksoy, 2012).

Tekerlek izi derinliği asfalt karışımların kalıcı deformasyona karşı hassasiyetini karşılaştırmada dikkate alınan bir göstergedir. SBS (styrene-butadiene-styrene) polimer ve kireç-SBS ile modifiye edilmiş asfalt karışımların tekerlek izi performansları Fransız tekerlek izi testi ve tekrarlı sünme testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Fransız tekerlek izi testi, orijinal test sıkıştırıcısı ve arazi silindiri ile iki farklı sıkıştırma modeli kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda iki farklı sıkıştırma modeli birbiriyle iyi bir korelasyon göstermiştir. Arazi silindiri ile sıkıştırılan numunelerde daha yüksek kalıcı deformasyon görülmüştür. Ayrıca SBS polimer modifikasyonuna kireç ilavesi karışımın tekerlek izine karşı gösterdiği direnci arttırmıştır (Özen, 2011).

Asfalt karışımları değerlendirmede fonksiyonel ölçüm yöntemlerini geliştirmek için ilk adım gerçek arazi koşullarına en yakın örnekler üretebilmektir. İsveç'te yapılan bir araştırma, Marshall metodunun bu konuda uygun olmadığını göstermiştir. Yapılan çalışma, laboratuvar ortamında sıkıştırılmış numunelerin arazide sıkıştırılmış ve aynı sıkıştırma

derecesine sahip numunelere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir (Ulmgren, 1996).

Asfalt karışımların arazi performansı ve laboratuvar performansı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla Hamburg test cihazının kullanıldığı bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada sıcak asfalt uygulaması yapılan sahanın belirli bölümlerinde, finişerden gevşek asfalt karışım örnekleri alınmıştır. Alınan asfalt karışımlar laboratuvar ortamında sıkıştırılıp Hamburg test cihazı ile test edilmiştir. Arazide ve laboratuvarında sıkıştırılıp hazırlanan bu numunelerle yapılan Hamburg tekerlek izi testinden elde edilen sonuçlarda, arazide sıkıştırılmış numunelerde soyulma olduğu ve laboratuvarında hazırlanan numunelerin her birinden daha düşük soyulma büküm noktalarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Laboratuvarında sıkıştırılmış numunelerin daha iyi performans göstermesi araştırıldığında düşünülen ilk hipotez; laboratuvarında asfalt karışımı sıkıştırma sıcaklığına getirmek için 4 saatlik ilave ısıtma (yaşlanma) nedeniyle asfalt numunelerin daha iyi performans göstermesidir. Diğer bir hipotez ise laboratuvarında sıkıştırılmış numunelerin sahada sıkıştırılmış numunelere kıyasla daha yüksek bir sıcaklıkta sıkıştırılmasıdır (Aschenbrener, 1994).

Sıkıştırma metodunun, agrega gradasyonunun ve bağlayıcı içeriğinin asfalt karışımların tekerlek izi direncine etkisini araştırmak için karayolu üzerinde farklı karışımlara sahip 15 kaplama bölümü inşa edilmiştir. Bu kaplamalardan asfalt serim işlemi sırasında, laboratuvarında tekerlek izi testi yapmak için asfalt karışım örnekleri alınmıştır. Alınan örneklerin bir kısmı %7 hava boşluğuna diğer kısmı serim yapıldıktan 1 gün sonra sahada ölçülen hava boşluğuna göre sıkıştırılmıştır. Arazideki tekerlek izi derinlikleri ise 1 yıl boyunca periyodik olarak ölçülmüştür. Bu şekilde karışımların saha ve laboratuvarında gözlemlenen tekerlek izi performansları arasındaki ilişki de değerlendirilmiştir. Laboratuvarında hazırlanan numuneler 20000 tekerlek geçişinde 60°C'de test edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda arazide 1 gün sonra gözlenen hava içeriğine göre hazırlanan laboratuvar numuneleri, arazide ölçülen tekerlek iziyle iyi bir korelasyon göstermiştir. Daha yumuşak bağlayıcılarla hazırlanan karışımlarda hem laboratuvarında hem de arazide daha yüksek tekerlek izi derinliği gözlenmiştir. Hava boşluğu içeriği daha yüksek olan numunelerde hem laboratuvarında hem de arazide daha yüksek tekerlek izi derinliği gözlemlenmiştir. 125 Marshall darbesi ile sıkıştırılan numuneler, 75 Marshall darbesi ile hazırlanan numunelerden ve sahada sıkıştırılan numunelerden daha düşük tekerlek izi

derinliğine sahip olmuştur. Benzer şekilde 75 Marshall darbesi ile hazırlanan numunelerde en yüksek tekerlek izi derinliği gözlemlenmiştir (Radhakrishnan vd., 2019).

Hamburg tekerlek izi testi, tekrarlı yükleme testi ve dolaylı çekme dayanımı testi yapılmak üzere beş farklı karayolundan asfalt karışım numuneleri alınmıştır. Araçların tekerlek yolu üzerinden alınan numuneler her karışım için 3 numune olacak şekilde kesilmiştir. Testten önce tüm numunelerin hava içeriğinin %3.5 ile %4.4 arasında olduğu ölçülmüştür. Hamburg tekerlek izinde yapılan test 0.7 kN'luk tekerlek yükünde 60°C'de gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı yükleme testinde ise deney şartlarının birbirine yakın olması için tekerlek izi testindeki tekerlek boyutuna çok yakın ölçüde bir yükleme ucu kullanılmıştır. Hem Hamburg tekerlek izi testi hem de tekrarlı yükleme testi sonuçları kullanılan asfalt sınıfının yüksek sıcaklıkta asfalt karışımların kalıcı deformasyonunda önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Karışımların tekerlek izi performanslarını değerlendirmede bu iki testin sonuçları arasında tutarlılık görülmektedir. Ayrıca Hamburg tekerlek izi test sonuçlarına göre geleneksel karışımlar tekerlek izine superpave karışımlardan daha az direnç göstermiştir (Dong vd., 2019).

Benzer test koşulları altında, tekerlek izi performansını ölçen farklı test aletlerinin özdeş asfalt karışımları nasıl değerlendirdiği kıyaslanmıştır. Tekerek izi test cihazı, asfalt kaplama analiz cihazı ve tekrarlı yükleme test cihazıyla yapılan performans testleri için 30 aşınma tabakası ve 8 temel tabakası karışımı test edilmiştir. Marshall karışım tasarımına göre hazırlanan numunelerde üç farklı bitüm içeriği kullanılmıştır. Yapılan testler 50°C'de gerçekleştirilmiştir. Performans testlerini birbiriyle kıyaslamak için numunelerde 1 mm tekerlek izi oluşana kadar geçen süre baz alınmıştır. Test sonucunda 1 mm'lik tekerlek izi seviyesine en geç ulaşan test asfalt kaplama analiz testidir. En kısa sürede ulaşan ise tekrarlı yükleme testidir. Testlerin sonuç verileri arasında yapılan korelasyona göre birbiriyle en çok uyum gösteren testlerin tekerlek izi ve tekrarlı yükleme testi olduğu görülmüştür (Hussan vd., 2019).

Test sıcaklığının Hamburg tekerlek izi test cihazı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üç farklı bitüm sınıfı kullanılarak hazırlanmış test örneklerine 40°C ve 50°C'de Hamburg tekerlek izi testi yapılmıştır. Test sonuçları analiz edildiğinde 40°C'de numunelerin %90'ı testi tamamlarken 50°C'de numunelerin sadece %60'ı testi tamamlayabilmiştir. Test sıcaklığı arttıkça ortalama deformasyon miktarı da artmıştır. Ayrıca her iki test sıcaklığında da bitüm performans sınıfı ne kadar yüksek olursa testi o kadar fazla numunenin geçtiği görülmektedir. Bu durum test sıcaklığı ve bağlayıcı tipinin Hamburg tekerlek izi test

sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca numunelere kireç ve sıvı katkı kullanarak ve katkı kullanmadan yapılan testlerde kireç ilavesinin sıvı katkıdan daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Katkı maddesi kullanımının performans üzerindeki etkisini değerlendirmede 50°C test sıcaklığı, karışımların performans farkını 40°C test sıcaklığına göre daha iyi yansıtmaktadır (Sel vd., 2014).

Tekerlek izi performansını laboratuvar da değerlendirilmede kullanılan test metodlarının araziden alınmış örnekler üzerindeki tutarlılığı ve bu test metodlarının birbirleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Kullanımdaki bir karayolu üzerinden alınan test örnekleri Hamburg tekerlek izi testi, basit kesme testi, akış sayısı testi, dinamik modül testi ve tekrarlı yükleme testinde değerlendirilmiştir. Dört farklı karışım üzerinden yapılan testlerin iklim ve trafik durumunu içeren laboratuvar ve arazi verileri ilgili veri tabanından elde edilmiştir. Her bir karışımı test etmek için Hamburg tekerlek izi testi için ikişer, diğer testler için üçer özdeş örnek hazırlanmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan dinamik modül testi hariç diğer testler 50°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerin sonucuna göre tüm laboratuvar test metodları asfalt karışımların tekerlek izini tahmin etmede, arazide ölçülmüş sonuçlarla iyi korelasyon göstermiştir. Hamburg tekerlek izi testi; pratiklik, basitlik ve tekrarlanabilirlik açısından diğer test metodlarına karşı üstünlük sağlamıştır. Laboratuvar test sonuçlarına göre, farklı asfalt karışımların performans tahminleri ve sıralaması teorik olarak beklendiği gibi çıkmıştır. Aynı zamanda sahada ölçülen performans ile eşleşmiştir (Walubita vd., 2019).

Trafiğe açık bir karayolundan alınan arazi numunelerinin Hamburg tekerlek izi testi, dinamik modül testi ve tekrarlı yük kalıcı deformasyon testinde performans değerlendirmesi yapılmıştır. Numunelerin sahada ölçülen performanslarıyla laboratuvar performansları arasındaki ilişki incelenmiş ve uygulanan test metodları karşılaştırılmıştır. Test edilen kaplama numuneleri Hamburg tekerlek izi testinde sadece 50°C'de, diğer testlerde ise birçok farklı sıcaklıkta test edilmiştir. Test sonuçlarını arazi performansı ile değerlendirmek için arazi performans verilerinde hem geleneksel trafik yüklemesi hem de hızlandırılmış kaplama testi sonuçları dikkate alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda üç test metodu da birbirleriyle iyi bir korelasyon göstermiştir. Testlerdeki yüksek dinamik modül değerleri ve düşük tekrarlı yük kümülatif gerilme değerleri numunelerin tekerlek izine olan dirençlerini göstermiştir. Bu da Hamburg tekerlek izi test sonuçlarıyla tutarlıdır. Ayrıca üç laboratuvar testi de saha performansı ile yüksek korelasyon sağlamıştır (Walubita vd. 2012).

Asfalt kaplama performansında karışım gradasyonunun etkisi incelenmiştir. Çalışmada, asfalt bağlayıcı içeriği, 4.75 mm elek geçişi, kaba agrega gradasyon değişkeni (>4.75 mm), ince agrega gradasyon değişkeni (<4.75 mm) olmak üzere dört farklı karışım tasarım değişkeninin tekerlek izi direncine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan 26 asfalt karışım 50°C’de Hamburg tekerlek izi test cihazında test edilmiştir. Çalışma sonucunda hem aşırı hem de yetersiz asfalt bağlayıcı içeriklerinin karışımın tekerlek izi performansını kötü etkilediği görülmüştür. AC 13 sınıfında %5.5 asfalt içeriği optimum tekerlek izi performansı sağlamıştır. Karışımında 4.75mm’yi geçen agrega oranının %20’den %35’e arttırılması tekerlek izi derinliğinde artışa sebep olmuştur. Bu oran %41’i aşınca karışımın tekerlek izi direncinde önemli bir azalma ve karışımında soyulma davranışı gözlenmiştir. 13.2mm – 9.5mm’lik agregalardan oluşan iskelet, 9.5mm – 4.75mm’lik agregalardan oluşan iskeletten daha iyi performans göstermiştir. Her durumda üniform gradasyonlu bir iskelet en düşük tekerlek izi performansını göstermiştir (Lv vd., 2020).

Asfalt kaplamaların tekerlek izi performanslarını iyileştirmek için asfalt karışımlara ilave edilen katkı maddelerinin kaplama performansları üzerindeki etkisi Hamburg tekerlek izi test sonuçları üzerinden incelenmiştir. Testler Hamburg tekerlek izi test cihazında 50°C’deki su içerisinde maksimum 20000 tekerlek geçişinde yapılmıştır. Modifiye edilmiş her bir asfalt karışımı için üç çift numune test edilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Yapılan testler sonucunda genel olarak katkı maddeleri; katkı maddesinin tipine ve içeriğine bağlı olarak asfalt karışımların tekerlek izi performanslarını önemli ölçüde etkilemiştir. Hamburg tekerlek izi test sonuçlarına dayanılarak katkı maddelerinin kendi aralarındaki performans farklılıkları analiz edilmiştir (Lv vd., 2019).

Tekrarlı yük sünme testinde kullanılan akış sayısı, asfalt kaplamaların kalıcı deformasyon potansiyelini tahmin etmek için kullanılan bir ölçüttür. Karışımların akış sayısını değerlendirmek için numune boyutu, geometrisi ve yükleme modelinin farklılık gösterdiği çeşitli prosedürler geliştirilmiştir. Numune boyutu ve yükleme modelindeki bu farklılıkların karışımın sünme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hazırlanan numuneler ile Hamburg tekerlek izi testi yapılarak sünme testi ve tekerlek izi testi arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Çalışma kapsamında maksimum agrega boyutları 12.5mm, 19mm ve 25mm olan üç farklı asfalt karışım kullanılmıştır. Sünme testi sonucunda maksimum agrega boyutu 25mm olan numunelerin akış sayısı 19mm olanlara göre yaklaşık %31, 19mm olan numunelerin akış sayısı 12.5mm olan numunelere göre ise yaklaşık %20 daha yüksek çıkmıştır. Bu değerler Hamburg tekerlek izi test sonuçlarıyla

karşılaştırıldığında akış sayısı ve tekerlek izi derinliği arasında makul bir korelasyon olduğu görülmüştür. Geleneksel asfalt karışımların kalıcı deformasyonunu karakterize etmede hem numune boyutu hem de yükleme modelinin eşit öneme sahip olduğu görülmüştür (Mohmoodinia vd., 2016).

1.5. Karayolu

Karayolu; taşıtların belirli hızlarda konforlu ve güvenli bir şekilde ulaşımını sağlayan ve geometrik standartları belli bir güzergah üzerinde inşa edilen arazi şerididir. Karayolu, altyapı ve üstü yapısı olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır.

1.5.1. Karayolu Altyapısı

Yol güzergahında doğal zeminin belirli bir enkesit haline getirilmesi için kazı ve dolgu işleri yapılmaktadır. Yapılan bu toprak işleri sonucunda tesviye yüzeyi oluşmaktadır. Tesviye yüzeyiyle arazinin doğal zemini arasındaki bu kısma altyapı denilmektedir. Köprü, tünel, viyadük, menfez, drenaj sistemleri ve istinat duvarları da altyapıya dahildir.

Altyapı önceden belirlenen kotta düzgün bir yüzey sağlamak ve üstü yapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yaymaktadır. Altyapıda bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkışmaya elverişli olmayan zeminlerin kullanımından kaçınılarak bu tabakanın trafik yükleri, don ve su etkisine karşı dayanıklı hale gelmesi sağlanmalıdır (İlıcılı vd., 2001).

1.5.2. Karayolu Üstyapısı

Karayolu üstü yapısı, altyapı üzerine inşaa edilmektedir. Alt temel, temel, kaplama tabakalarından oluşmaktadır. Görevi, üzerine gelen trafik yüklerini taşıyarak bu yükleri taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde yüzeye dağıtmaktır. Kaplama tabakasında kullanılan bağlayıcı özelliklerine göre esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar.

1.6. Karayolu Esnek Üstyapısı

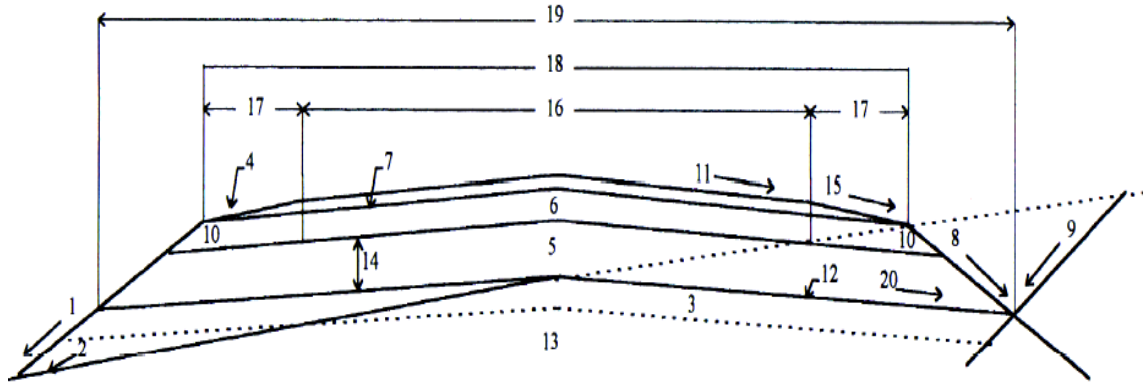
Esnek üstyapılarda bağlayıcı olarak bitümlü malzeme kullanılmaktadır. Esnek üstyapı tabakalı bir yapıdan oluşmaktadır ve bu yapının yük taşıma kapasitesi her bir tabakanın özelliklerine bağlıdır. Kaplamaya gelen tekerlek yükleri her bir tabakada biraz daha fazla yayılarak tabana iletilir. Böylece yükten dolayı tabana ulaşan gerilme değerleri azalarak taban zemininin deformasyona uğramadan yükleri taşıması sağlanmaktadır. Esnek üstyapı, altyapının üzerine inşa edilen alttemel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır.

Esnek üstyapının davranışında taban zemininin taşıma gücü etkili bir faktördür. Bu yüzden taban zemininin şartnamelere göre hazırlanması üstyapı performansı açısından önemlidir. Taban zemininde yeraltı su seviyesi tesviye yüzeyinin en az 150cm altında tutulmalıdır. Yol gövdesini sudan korumak için gerekli drenaj sistemi uygulanmalıdır (Ilıcalı vd., 2001).

Taban zemininin üstünde alttemel tabakası bulunmaktadır. Genellikle belli bir granülometriye sahip çakıl, taş kırığı, yüksek fırın cürufu gibi granüler malzemeden oluşmaktadır. Bu tabaka trafik yüklerinin tabana yayılmasında temel tabakasına yardım ederek su ve don tesirlerine karşı tampon görevi görmektedir. Ayrıca bu tabakanın yapımı ile daha kaliteli malzemelerden oluşan temel tabakasının kalınlığı azaltılarak ekonomi sağlanmış olmaktadır (Yayla, 2006).

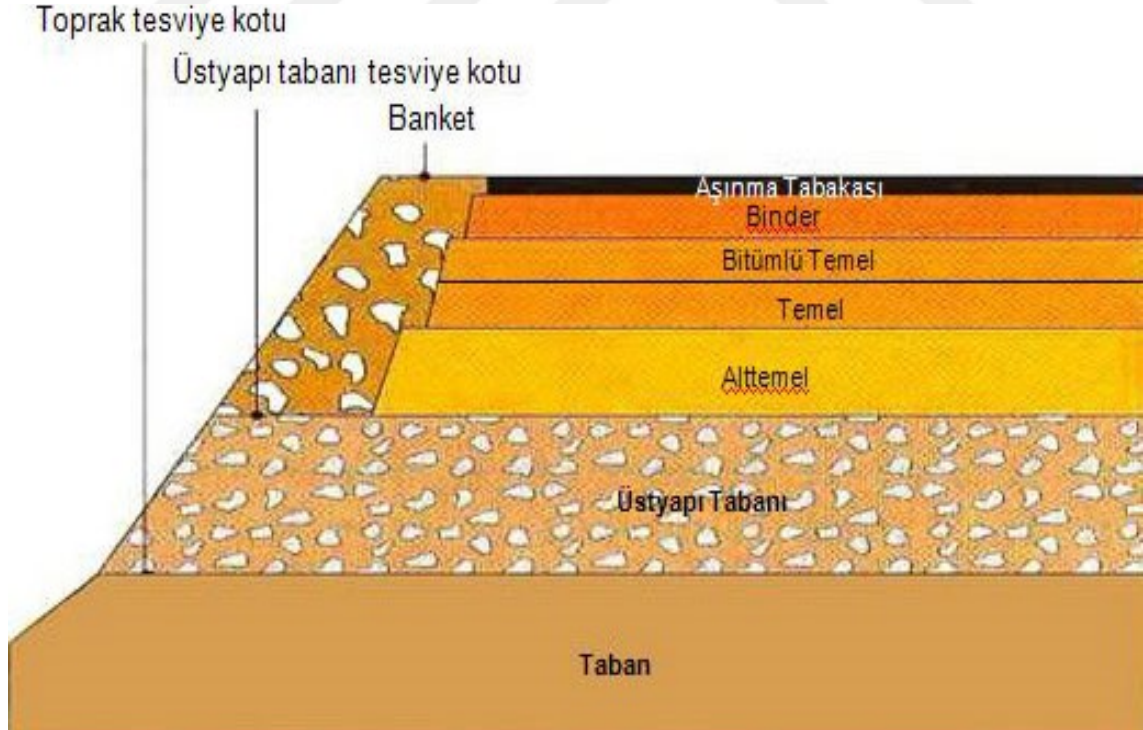
Alttemel tabakası ve kaplama tabakası arasında temel tabakası bulunmaktadır. Granülometri ve malzeme özellikleri alttemel tabakasına göre daha iyi olan doğal kum, kırmataş ve bir miktar bağlayıcı malzemeden oluşmaktadır. Bu tabaka kaplamadan gelen trafik yüklerini alttemel tabakası ile birlikte taban zeminine yaymakta ve trafiğin darbe etkisini azaltmaktadır (Yayla, 2006).

Temel tabakası üzerinde, trafik yüklerinin doğrudan temas ettiği kaplama tabakası bulunmaktadır. Genellikle bitüm ve agrega karışımından oluşmaktadır. Bu tabaka taşıtlara düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak ve trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı koymaktadır. Aşınma ve binder tabakası olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Trafik ve iklim koşullarının bozucu etkilerine maruz kalan en üst tabaka aşınma tabakasıdır ve bu tabakanın altında binder tabakası bulunmaktadır (Yayla, 2006).



- | | |
|---|--|
| 1. DOLGU ŞEVİ | 11. YOLUN ENİNE EĞİMİ |
| 2. TABİİ ZEMİN | 12. TABAN YÜZEYİ (TESVİYE YÜZEYİ) |
| 3. SEÇME MALZEME TABAKASI (GEREKLİ OLDUĞU DURUMDA) | 13. YOL GÖVDESİ (TABAN ZEMİNİ) |
| 4. BANKET KAPLAMASI | 14. ÜST YAPI PROJE KALINLIĞI |
| 5. ALTTEMEL | 15. BANKET EĞİMİ |
| 6. TEMEL TABAKASI | 16. TRAFİK ŞERİTLERİ GENİŞLİĞİ |
| 7. KAPLAMA TABAKASI | 17. BANKET GENİŞLİĞİ |
| 8. HENDEK ŞEVİ | 18. YOL GENİŞLİĞİ (PLATFORM GENİŞLİĞİ) |
| 9. YARMA ŞEVİ | 19. ÜST YAPI TABAN GENİŞLİĞİ |
| 10. BANKET TEMELİ | 20. TABAN YÜZEYİNİN ENİNE EĞİMİ |

Şekil 3. Esnek üstyapı kesiti



Şekil 4. Esnek üstyapı tabakaları

1.7. Asfalt Kaplamalarda Bozulma Mekanizmaları

1.7.1. Kalıcı Deformasyon

Kalıcı deformasyonlar asfalt kaplamaya uygulanan tekrarlı yüklerin bir sonucu olarak kaplamadaki geri dönemeyen gerilmelerin birikmesinden kaynaklanmaktadır. Yol yüzeyinde tekerlek izi olarak açığa çıkan bu bozulmalar kaplama ömrünü etkileyen en önemli bozulma mekanizmalarından biridir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda tekrarlanan trafik yükleri sonucu tekerlek yolu boyunca meydana gelmektedir (Muraya, 2007).



Şekil 5. Tekerlek izi (İncegöl, 2010).

Tekerlek izi problemleri alttemel, temel tabası ve asfalt karışımından kaynaklı problemlerin bir sonucudur. Asfalt kaplamada görülen tekerlek izi problemlerine trafik yükü altında kaplamanın oturması ve yanıl hareketleri sebep olmaktadır. Bu oturma ve hareketler, tipik olarak bitümlü sıcak kaplama katmanlarının herhangi birinde veya birkaçında meydana gelecek yoğunluk artışından ve kesme deformasyonundan kaynaklı olabileceği gibi BSK altındaki bağlayıcısız malzemeden kaynaklı da olabilmektedir (Brown vd., 2001).

Tablo 1. Asfalt betonu karışımında tekerlek izine etki eden faktörler (Sousa vd., 1991).

	Faktör	Faktördeki değişim	Faktördeki değişimin tekerlek izi direncine etkisi
Agrega	Yüzey dokusu	Düzgünden pürüzlüye	Artma
	Gradasyon	Açıktan yoğunla	Artma
	Tane şekli	Yuvarlaktan köşeliye	Artma
	Tane boyutu	Maksimum boyutta artma	Artma
Bağlayıcı	Rijitlik ^a	Artma	Artma
Karışım	Bağlayıcı oranı	Artma	Azalma
	Boşluk oranı ^b	Artma	Azalma
	VMA	Artma	Azalma ^c
	Sıkıştırma yöntemi	^d -	^d -
Deney koşulları	Sıcaklık	Artma	Azalma
	Gerilme şekil değişirme	Lastik değme basıncında artma	Azalma
	Yük tekrarı	Artma	Azalma
	Su	Kurudan suya	Karışım suya duyarlı ise azalma

^a Tekerlek izi oluşumunun belirlendiği sıcaklıktaki rijitlik

^b Boşluk oranı % 3'den küçük olduğunda karışımın tekerlek izi potansiyeli artar.

^c Çok düşük VMA değerlerinden kaçınılmalıdır.

^d Sıkıştırma yöntemi hem arazi hem de laboratuvarında tekerlek izi potansiyelini etkiler.

Tekerlek izi problemlerini azaltacak öneriler şunlardır: (Kutluhan ve Ağar, 2009).

- Ticari taşıtların yasal sınırın üzerinde yüklenmesinin önüne geçilmelidir.
- Sert, dayanıklı, köşeli agregalar kullanılmalıdır.
- Sıcak iklim bölgelerinde düşük penetrasyonlu veya modifiye edilmiş bağlayıcı kullanılmalıdır.
- Optimum bitüm içeriğine dikkat edilmeli ve sıkıştırmayı kolaylaştırmak için bitüm içeriği arttırılmamalıdır.
- Gereğinden fazla kalın kaplama tabakasından kaçınılmalıdır.

- Maksimum agrega boyutu yüksek ve iri agrega dağılım oranı yüksek karışımlar tercih edilmelidir.

1.7.2. Yorulma Çatlaması

Bu çatlaklar şekil olarak timsah sırtına benzediğinden genel olarak timsah sırtı çatlak olarak adlandırılmaktadır. Bu tür bozulmalar tekrarlanan trafik yükünün sonucunda kaplamanın yorulma ömrünün sonuna gelmesiyle meydana gelmektedir. Yorulma çatlakları genellikle kaplama yapısı için fazla ağır olan yüklerle veya belirlenen yükün dizayn için hesap edilenden daha fazla tekrarlamasıyla ilgilidir. Bitümlü sıcak karışım tabakaları, alt katmanların aşırı nem ve yorulmada erken bozulmaları sonucunda zayıflamasıyla yüksek gerilmelere maruz kalmaktadır. Problem genellikle kaplama tabakasının doygun hale gelmesini ve mukavemetini kaybetmesini sağlayan yetersiz drenaj sonucunda kötüleşmektedir. Yorulma çatlamasına ayrıca aşırı yüklü kamyonlarla tekrarlanan geçişler ve inşaat sırasındaki kötü kalite kontrolünün sebep olduğu yetersiz kaplama kalınlığı sebep olmaktadır (Brown vd., 2001).



Şekil 6. Yorulma çatlakları (Ahmad ve Khawaja, 2018).

Yorulma çatlaması, BSK malzemesinin birbirinden ayrılmasıyla ve trafik etkisi sonucunda kaplama yüzeyinden çıkmasıyla çukurların oluşmasına sebep olmaktadır.

Çukurlar genellikle yorulma çatlaklarının ilerlemiş aşamalarında ve nispeten ince BSK katmanları kullanıldığında meydana gelmektedir (Brown vd., 2001).



Şekil 7. Çukurlar (Central Massachusetts Regional Planning Comission, 2006).

1.7.3. Düşük Sıcaklık Çatlaması

Asfalt kaplamada düşük sıcaklık çatlaması, kritik seviyelere gelen sıcaklık düşüşlerinden dolayı asfalt karışımında oluşan çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Termal çatlaklar yol yüzeyindeki aralıklı enine çatlak olarak nitelendirilmektedir. Soğuk havalarda kaplamada büzülme meydana gelmektedir. Büzülme devam ettikçe kaplama içinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kaplama boyunca bir noktada çekme gerilmeleri kaplamanın çekme dayanımını aşar ve çatlaklar oluşur. Sıcaklık düşüşünün büyüklüğü, sıklığı ve yüzeydeki asfalt karışımının sertliği; düşük sıcaklıktaki enine çatlakların oluşmasının ve yoğunluğunun ana nedenidir. Çatlak yüzeyde başlamakta ve aşağıya doğru ilerlemektedir. Asfalt bağlayıcın özellikleriyle en çok ilişkili olan karışım sertliği, düşük sıcaklık çatlamlarında büyük paya sahip olmaktadır (Brown vd., 2001).



Şekil 8. Termal çatlaklar (California Department of Transportation, 2001).

1.7.4. Sürtünme Özellikleri

Sürtünme, bir tekerin kaplama yüzeyinde kayarken gerçekleşen dikey kuvvet ile yatay kuvvet arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Kaplama yüzeyinin sürtünmesi, mikrodoku ve makrodoku olarak iki bileşene ayrılmış yüzey dokusunun bir işlevidir. Mikrodoku, lastik ile yol arasında iyi bir sürtünme direnci oluşturmak için pütürlü bir yüzey sağlamaktadır. Makrodoku, lastik ile yol arasındaki suyun dışarı atılması için drenaj kanalları sağlamaktadır. Böylece kaplamayla daha iyi lastik teması sağlanmakta ve sürtünme direnci artmaktadır (Brown vd., 2001).

1.7.5. Nem Hassasiyeti

Bitümlü sıcak karışımlarda suya karşı hassasiyet genel bir problemdir. Su hasarı problemleri; agrega yüzeyindeki asfalt film tabakasının soyulmasından ya da karışımın rijitlik kaybından dolayı BSK'nin dayanımının düşmesi sonucu meydana gelmektedir. Adezyon ve kohezyon kaybı su hasarına sebep olan iki mekanizmadır. Adezyon kaybı, agrega ve asfalt bağlayıcı arasındaki bağ kuvvetinin zayıflamasıdır. Kohezyon kaybı ise

mukavemet veya rijitlik kaybı nedeniyle karışımın genel bir problemdir. Asfalt karışımlardaki bu mekanizma agregaya, asfalt bağlayıcı ve ikisi arasındaki etkileşimle ilişkilidir (Cross vd., 2013).

1.7.5.1. Su ile İlişkili Bozulma Türleri

Su hasarı problemleri kaplamadaki malzeme, dizayn, yapım gibi diğer faktörlerden kaynaklanan bozulmalara bir çok yönden benzerdir. Diğer bozulma tiplerinin oluşumunu hızlandırıcı etki göstermektedir. Suya bağlı bozulma türleri arasında sökülme, terleme, tekerlek izi ve çatlama sayılabilir.

Terleme, tekerlek izi, çatlama; agregaya ile asfalt bağlayıcı arasındaki yapışma kaybıdır. Bu yapışma kaybına zayıf sıkıştırma, zayıf drenaj, kirli agregaya ve zayıf agregaya-asfalt bağlayıcı etkileşimi nedeniyle karışıma suyun nüfuz etmesi neden olmaktadır.

Sökülme; hava koşullarına ve trafik etkisine bağlı aşınma sonucunda gelişen yüzey malzemesi kaybıdır. Kötü sıkıştırma, kalitesiz agregaya, düşük asfalt içeriği, karışımdaki ince agregaya miktarı yada suya bağlı hasar nedeniyle meydana gelmektedir (Hicks vd., 2003).

1.7.5.2. Asfalt Karışımların Nem Hassasiyetini Etkileyen Faktörler

Asfalt kaplamanın neme karşı duyarlılığını etkileyen bir çok faktör vardır. Genel olarak neme karşı hassasiyetini; sıcak karışım asfaltın nem içeriğini artıran, asfalt bağlayıcı maddenin agregaya yüzeyine yapışmasını azaltan veya fiziksel olarak asfalt bağlayıcıyı aşındıran herhangi bir faktör arttırabilir. Hangi faktörün daha fazla etkiye sahip olduğunu bilmek zordur. Aşağıda bazı faktörler sıralanmıştır (URL-1 2020,).

Asfalt bağlayıcı özellikleri: Asfalt bağlayıcı maddenin viskozitesi, asfalt karışımının soyulmaya hassasiyetini etkiler. Asfalt bağlayıcı ne kadar viskoz olursa karışımdaki moleküllerin yoğunluğu o kadar yüksek olur ve karışımın soyulmaya karşı direnci artar.

Agregaya özellikleri: Agregalar minerallerden oluşur. Her bir mineral de karakteristik bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahiptir. Soyulma problemlerinde belirleyici olan özellik agreganın suya karşı ilgisidir. Hidrofilik agregaların suya ilgisi asfalt çimentosuna kıyasla daha fazladır. Hidrofobik agregalar için ise tersi bir durum söz konusudur. Bu sebeple hidrofobik agregaların soyulmaya karşı gösterdiği direnç hidrofilik agregalara göre

daha fazladır. Agreganın hidrofilik yada hidrofobik özelliğini yüzey kimyası, gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü belirler.

Yüzey kimyası, asfalt ile agrega arasındaki bağ oluşumunu etkiler. Asfalt bağlayıcı ile agrega arasındaki bağ sayısının artması soyulmaya karşı hassasiyeti azaltır. Asitli yüzeyler asfalt bağlayıcı ile iyi bir şekilde yapışmaz ve karışımın soyulma eğilimini artırır.

Gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü ise asfalt ve agrega arasındaki emilimi etkiler. Gözenekliliği yüksek agregalar daha fazla asfalt bağlayıcıya ihtiyaç duyar. Eklenen asfalt bağlayıcı miktarı gerekli miktardan daha az ise daha fazla emilecek ve agrega yüzeyini kaplamak için yeterli bağlayıcı kalmayacak ve soyulma yaşanacaktır (Hicks, 1991).

İklim ve trafik etkisi: Hava durumu, iklim ve trafik de asfalt kaplamalarda soyulmaya sebep olan faktörlerdendir. Soğuk ve yağışlı havalarda asfalt kaplamaları soyulmaya karşı daha hassas hale getirir. Hava serin olduğunda yetersiz sıkışmaya yol açabilir. Böylece kaplamada oluşacak aşırı boşluklar kaplamanın soyulmaya karşı savunmasız olmasına yol açar. Hava nemli olduğunda karışımın nem içeriği artar. Donma erime döngüleri ve sıcaklık dalgalanmaları da kaplamaya giren su miktarını artırır. Su miktarındaki artışla beraber trafik yüklerindeki artış kaplamadaki su hasarını 2 farklı yolla arttırabilir. Bunlardan ilki su ile dolu gözenekler trafik yüklemesinden dolayı sıkışır. Bunun sonucunda gözeneklerin içinde oluşan su basıncı asfalt bağlayıcıyı agregadan uzaklaştırır. İkincisi, tekerlek asfalt kaplamadan geçerken kaplamadaki suyu hareket ettirir. Bu hareket asfalt bağlayıcıyı agrega yüzeyinden çıkarabilecek bir aşındırma etkisine neden olur (Cross vd., 2013).

1.8. Asfalt Kaplamalara Uygulanan Deneyler

1.8.1. Kalıcı Deformasyonu Değerlendirmek İçin Deneyler

Asfalt karışımının deformasyonu karmaşık bir süreçten oluşmaktadır. Asfalt betonu kompozit bir yapıda olup asfalt bağlayıcı yük, yükleme zamanı ve sıcaklığa duyarlı bir malzemedir. Asfalt betonunun bu kompozit yapısı ona doğrusal olmayan ve gerilmeye duyarlı bir karakter kazandırır. Bu sebeple kaplamada gözlenen deformasyon; sıcaklık, yükleme hızı ve gerilim durumuna bağlı olarak değişmektedir. Malzemeyi saha koşullarını en iyi simüle eden gerilme, yükleme hızı ve sıcaklık koşulları altında test etmek gerekir.

Deformasyon; elastik, viskoelastik, plastik ve viskoplastik olmak üzere dört farklı bileşenden oluşmaktadır. Asfalt betonunda kalıcı deformasyonu değerlendirebilmek için bu bileşenleri ayırt etmek ve bu bileşenleri ayırt edecek test metodları kullanmak gerekmektedir (Garba, 2002). Asfalt kaplamalarda kalıcı deformasyonu değerlendirmek için kullanılan yöntemler genel olarak aşağıda sıralanmıştır (URL-2 2020):

Statik sünme testleri: Bu test asfalt karışım numunesine statik yük uygulanarak ve yükü boşaltma işleminden sonra numunenin kalıcı deformasyonu ölçülerek yapılmaktadır. Gözlenen bu kalıcı deformasyon daha sonra tekerlek izi oluşma potansiyeliyle ilişkilendirilmektedir.

Tekrarlı yükleme testleri: Bu test silindirik bir test örneğine belirli bir döngüde tekrarlı olarak sabit bir yükün uygulanmasını içermektedir. Numunenin yatay deformasyonu ve varsayılan poisson oranı kullanılarak elastisite modülü hesaplanabilir. Kümülatif kalıcı deformasyonu kaydedilerek tekerlek izi potansiyeliyle ilişkilendirilebilir. Testler farklı sıcaklıklarda ve değişen yüklerde gerçekleştirilebilir. Yük kısa bir darbe ve ardından dinlenme periyodu ile uygulanır.

Dinamik modül testleri: Test numunesine nispeten kısa bir sürede değişen frekanslarda tekrarlanan bir yük uygulanarak numunenin kalıcı deformasyonu ölçülmektedir. Dinamik modül testleri belli bir döngü ve frekanstaki tekrarlı yükleme testlerinden farklıdır. Tekrarlı yükleme testleri aynı yükü aynı frekansta birkaç bin kez yüklerken dinamik modül testleri 30 ila 45 saniye boyunca çeşitli frekanslarda bir yük uygulamaktadır.

Ampirik testler: Geleneksel Hveem ve Marshall testleridir.

Simülatif testler: Laboratuvardaki tekerlek izi ölçüm cihazları asfalt karışım örneği üzerinde belirli bir yüke sahip bir tekerleği tekrarlı bir şekilde yuvarlayarak tekerlek izini ölçmektedirler. Ayrıca bu testlerle ıslak ve kuru haldeki test sonuçları karşılaştırılarak neme karşı duyarlılık ve soyulma tahminleri yapılabilmektedir. Hamburg tekerlek izi test cihazı, Fransız tekerlek izi test cihazı ve Asphalt Pavement Analyzer (asfalt kaplama test cihazı) bu kategoride bilinen test cihazlarındandır.

1.8.2. Yorulma Çatlamasını Değerlendirmek İçin Deneyler

Yorulma çatlaması yapısal bir problem olarak düşünülmekte ve karışım özelliklerinden büyük oranda etkilenmemektedir. Fakat karışım özellikleri yorulma

çatlamasında rol oynayabilmektedir. Asfalt kaplamanın yorulmaya verdiği tepkiyi tanımlamak için çeşitli teknik, ekipman, yükleme tipi ve modelleri kullanılmıştır. Genellikle basit eğilme, eksenel yükleme ve kırılma gibi laboratuvar testleri kullanılmıştır. Eğilme testi asfalt karışımının yorulma özelliklerini tahmin etmede sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu test kiriş numunesinin yorulma ömrünü, numuneyi kırılma gerçekleşene kadar tekrarlı eğilmeye maruz bırakarak belirlemektedir. Kiriş numuneler laboratuvarda hazırlanabilmekte veya araziden kesilmektedir (Brown vd., 2001).

1.8.3. Düşük Sıcaklık Çatlamasını Değerlendirmek İçin Deneyler

Bitüm ve agreganın bir birleşimi olarak görülen asfalt karışımların düşük sıcaklık özellikleri çoğunlukla bitüm tipine bağlıdır. Bu sebeple asfalt karışım düşük sıcaklık çatlamlarında bitümlü bağlayıcı kritik öneme sahiptir.

Asfalt bağlayıcının düşük sıcaklık davranışını değerlendirmede kiriş eğilme reometresi (BBR) ve doğrudan çekme testi (DDT) sıklıkla kullanılmaktadır. Standart BBR testi, istenen sıcaklıkta bir saat koşullandırılmış kiriş numuneler üzerinde düşük sıcaklık sünme testi yapmak için kullanılır. Nihai sonuç; rijitlik ve m değerlerinden belirlenen limit sıcaklıktır. DDT ise bitüm numunesine dakikada %3'lük sabit bir hızda tek eksenli basınç uygulamak için kullanılmaktadır. Test sonucunda ortalama gerilme ve kopma gerilmesi elde edilmektedir (Pszczola vd., 2018).

Ayrıca geçmişte yüksek ve ortalama sıcaklıklarda asfalt bağlayıcının performansını değerlendiren dinamik kesme reometresi (DSR) testi son yıllarda düşük sıcaklık performansını ölçmede de kullanılmaktadır (Oshone vd., 2018).

1.8.4. Nem Hassasiyetini Değerlendirmek İçin Deneyler

Asfalt karışımların nem hassasiyetini değerlendiren testler; gevşek karışım testleri ve sıkıştırılmış karışım testleri olarak iki kategoriye ayrılmaktadır.

Geçmişte gevşek karışımları test etmek için kaynar su testi, statik daldırma testi, şişe yuvarlama testi gibi görsel derecelendirmeye dayalı bazı test yöntemleri kullanılmıştır. Gevşek karışım testleri iki nedenden ötürü eleştirilmiştir. İlk olarak bu yöntemlerde öznel görsel değerlendirmenin kullanılması genellikle değişkenliği arttırmakta ve çok operatörlü

ortamlarda tutarlılığı azaltmaktadır. İkinci olarak bu testler nem hassasiyetini bileşikteki malzemeler açısından ayırt edebilse de sıkıştırılmış asfalt karışımlarda neme bağlı hasarı değerlendirememektedir. Bu durum da bu testlerin kaplama performansı etkilerini güvenilir bir şekilde tahmin etme yeteneğini sınırlamaktadır. Ayrıca karışım tasarımları ile hava boşluğu dağılımı arasındaki farklılıkları hesaba katmamaktadır (Dave vd., 2018).

Sıkıştırılmış asfalt numuneler üzerinde laboratuvarda yapılan nem hassasiyeti testleri iki kategoriye ayrılmaktadır.

İlk yaklaşım numunelerin kontrol ve nem koşullandırılmış gruplara ayrıldığı, her ikisinin de test edildiği ve sonuçların karşılaştırıldığı yöntemdir. Bu yönetime örnek olarak modifiye Lottman prosedürü, nem kaynaklı gerilme test cihazı koşullandırmasının ardından asfalt karışım performans test cihazı kullanılarak dinamik modül ve periyodik yorulma testi, artan tekrarlı kalıcı deformasyon testi ve tekrarlı donma çözülme koşullandırmasının ardından sünme, dayanım ve kırılma enerjisi testi gösterilmektedir. İkinci yaklaşım ise nem koşullandırması ve testin eş zamanlı yapıldığı yöntemdir. Bu kategoride yaygın olarak kabul edilen test Hamburg tekerlek izi testidir (Dave vd., 2018).

Asfalt karışımlarda nem hassasiyetini belirlemede tahribatsız deney yöntemleri de kullanılmaktadır. Ultrases geçiş hızı testi ve taşınabilir sismik özellik analizörü bu kategoride kullanılan test yöntemleridir (Dave vd., 2018).

1.8.5. Sürtünme Özelliklerini Değerlendirmek İçin Deneyler

Sıcak karışım asfalt kaplamaların sürtünme özelliklerini tahmin etmek ve belirlemek için bazı modeller, arazi ölçümleri ve laboratuvar metodları kullanılmaktadır. Islak kaplamada hız artışıyla beraber sürtünme azalmaktadır. Asfalt kaplamanın sürtünmesini belirlemek için çeşitli indeks ve modeller geliştirilmiştir. Skid Number (sürtünme sayısı), Penn State modeli, Rado modeli, PIARC modeli ve uluslararası kayma indeksi bu bağlamda ortaya çıkan modellerdir (Brown vd., 2001).

Asfalt kaplamalarda sürtünme direncini ölçmek için kullanılan deney aletleri yüksek hızda ve düşük hızda ölçüm yapan aletler olmak üzere iki kategoride incelenmiştir. Kilitlenmiş tekerlek testi, yanal kuvvetölçer, değişken kayma yöntemi yüksek hızda ölçüm yapan aletlerdir. Duruş mesafesi ölçer, yavaşlama ivmesi ölçer, İngiliz sarkıcı, dinamik sürtünme ölçer ise yavaş hızda ölçüm yapmaktadır (Kaçmaz vd., 2015).

1.9. Yol Yapım Süreci ve Karşılaşılan Problemler

İnşaat kalitesi uzun vadeli kaplama performansı açısından önemlidir. Asfalt karışım serilecek yüzeyin hazırlığı, BSK serimi ve yerleştirmesi, derz yapımı, sıkıştırma gibi faktörler kaplama performansı üzerinde, karışım ve yapısal tasarımda göz ardı edilemeyecek kadar büyük öneme sahiptir. Ayrıca asfalt plentinde karışımın hazırlanması, karışımın taşınması ve kalite kontrol prosedürleri de kaplama performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (URL-3 2020).

Asfalt kaplamanın genel mukavemeti ve performansında alt temel tabakasının yük taşıma kapasitesi önemli bir yer tutmaktadır. Alt temel tabakası kaplama için sabit bir yüzey sağlamaktadır. Kış mevsiminde donma çözülmeden dolayı oluşacak zararı önlemek için bir bariyer görevi görmektedir. Ayrıca bu tabakanın stabilitesi ve yeterli sıkıştırılması da kaplama ömrü açısından önemlidir. Yeterli sıkıştırılmayan alt tabaka inşaattan sonra sıkışmaya, deforme olmaya ve aşınmaya devam ederek kaplamada çatlaklara ve deformasyona neden olmaktadır.

BSK, gradasyonu belirlenmiş agrega ve miktarı belirlenmiş bağlayıcının bir asfalt plentinde sıcak olarak karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Karıştırma işleminden önce agrega ve bitüm belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Isıtılan agrega ve bitüm sıcaklığı arasındaki fark 15°C'den fazla olmamalıdır.

Tablo 2. Binder ve aşınma tabakalarında kullanılacak asfalt ve agreganın karıştırmadan önceki ısıtılma sıcaklıkları (KTS, 2013)

Bitümlü bağlayıcı	Bitüm		Agrega	
	Min. °C	Maks. °C	Min. °C	Maks. °C
40/60, 50/70 pen bitüm ile hazırlanan karışımlarda	145	160	150	165
70/100 pen bitüm ile hazırlanan karışımlarda	140	155	145	160

Tablo 3. Binder ve aşınma tabakaları için plentten çıkan karışım sıcaklığı (KTŞ, 2013).

Hava sıcaklığı (gölgede) °C	Karışım sıcaklığı min. °C
5 – 15 arası için	155
15.1 – 30 arası için	145
30'dan yukarısı için	140

Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre agrega ve bitüm, asfalt plentinde homojen bir karışım haline gelene kadar kontrol mühendisinin belirleyeceği karıştırma süresi boyunca karıştırılmalıdır. Hazırlanan karışım fiziksel özellikler yönünden KTŞ'de belirtilen dizayn kriterini sağlamalıdır. Bunun için karışımdan günde en az iki kez numune alınarak ve alınan numunelerle en az 3'er adet Marshall briketi hazırlanarak testler yapılmalıdır. Ayrıca agrega ve bitümün aşırı ısıtılması ve yola serilmesine müsaade edilmemelidir.

Gerekli kontrollerin yapıp istenilen ölçütlerde hazırlanan asfalt karışımın bir sonraki aşaması asfalt plentinden inşaat yapılacak araziye taşınmasıdır. Üretilen asfalt karışımın taşınması sırasında dikkat edilecek husus taşıma sürecinde karışımın özelliklerini korumaktır. Bu sebeple BSK'nin boşaltılacağı kamyon kasası temiz olmalı ve petrol dışı ürünlerle yağlanmalıdır. Segregasyonu önlemek için BSK kamyon kasasına tercihen 3 farklı küçük yığın halinde yerleştirilmelidir. Çünkü tek ve büyük BSK yığnında büyük boyutlu agregalar yuvarlanıp tabanda toplanabilmektedir.

BSK kamyonu belirlenen karışım sıcaklığında homojen bir şekilde yüklenmelidir. Nakliye sırasında hava sıcaklığı, rüzgâr, yağmur, yol uzunluğu asfalt karışımın sıcaklığını etkilemektedir. Ayrıca karışımın soğumasını en aza indirmek için asfaltlama alanına gelen BSK kısa süre sonra boşaltılmalıdır.

Asfalt karışımın serilme işleminde dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır. Bunların birçoğu malzemeye, hava durumuna, personel bilgisi ve eğitimine ve bireysel deneyime bağlıdır. Aşırı kalın serilen katman sıkıştırma sırasında kıpırdanma ve yer değiştirme eğilimi göstermektedir. Bu da pürüzsüz bir yüzey elde etmeyi zorlaştırmaktadır. KTŞ'ye göre tek seferde serilip sıkıştırılan asfalt tabakanın kalınlığı, karışımdaki en büyük tane boyutunun 1,5 katından az ve 3 katından fazla olmamalıdır. Hatalı yapılmış boyuna derzler çatlaklara ve bozulmalara sebep olmaktadır.

Tablo 4. Binder ve aşınma tabakaları için asfalt betonu serim sıcaklığı (KTŞ, 2013).

Sıkıştırılmış tabaka kalınlığı	<50 mm	50-75 mm	>75 mm
Yol yüzeyi sıcaklığı (°C)	Minimum serim sıcaklığı (°C)		
<5	Serim yapılmayacak	Serim yapılmayacak	Serim yapılmayacak
5-9,9	Serim yapılmayacak	141	135
10-14,9	146	138	132
≥15	141	135	130

Asfalt karışım finişerden serildikten sonra sıkıştırma ekipmanlarıyla karışım içindeki hava hacminin azaltılması sağlanmaktadır. Hava hacmindeki azalmayla BSK yoğunluğunda artış meydana gelmektedir. Karışım sıcaklığı 135°C'nin altına düşmeden silindirle sıkıştırma işlemine başlanmalıdır. Sıcaklık 80°C'nin altına düşmeden de tamamlanmalıdır (KTŞ, 2013).

1.9.1. Sıkıştırmanın Önemi

Sıkıştırma, bir malzemenin yoğunlaştırılması yada hacminin azaltılması işlemidir. Bu işlem asfalt kaplama performansında kritik bir öneme sahiptir. Asfalt karışımlarda sıkıştırma ile asfalt ve agreganın birbiriyle kenetlenmesi sağlanarak kaplamanın stabilitesinin artması ve deformasyonlara karşı direnç kazanması sağlanmaktadır. Aynı zamanda karışımın geçirgenliği azalmakta ve durabilitesi artmaktadır (Scherocman ve Walker, 2008).

BSK yol yüzeyine serilmeden önce finişerde genel olarak %15-20 arasında bir boşluk oranına sahiptir. Boşluk oranının belirlenen düzeye indirilmesi BSK'nin sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Sıkıştırma sırasında BSK'nin boşluk hacmi miktarındaki değişim kaplama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Yetersiz sıkıştırma ile boşluk hacminin istenenden fazla olması sonucunda kaplamanın aşınmaya karşı direnci düşmektedir. Havanın etkisiyle bitümde sertleşmenin artmasına sebep olmaktadır. Trafik yükleri altında oluşacak sıkışmanın artması ile

ondülasyona sebep olmaktadır. Ayrıca geçirgenliğin artması sonucunda kaplama içine su girerek agrega yüzeyinden bitümün ayrılmasına, dolayısıyla soyulmaya neden olur.

Boşluk hacminin az olması durumunda ise bitüm, sıcak havalarda genişleme etkisiyle terleme ve kuma ile kaplama yüzeyine çıkmaktadır. Bu durum yol yüzeyini kaygan hale getirmektedir. Ayrıca trafiğin mekanik etkisinden dolayı agregalar bitüm içine gömülerek kaplama yüzeyinde tekerlek izi oluşumuna sebep olmaktadır. Projelendirmede belirlenen minimum boşluk oranı ile kaplama yüzeyinde kusmanın oluşumu önlenmeye çalışılır. Kaplamanın iskelet yapısının yük transferindeki işlevini yitirerek stabilitenin bozulmasının önüne geçilir. Termal genişleme sağlanır ve oluşabilecek termal çatlaklar engellenebilmektedir (Uluçaylı ve Yavuz, 2002).

Sıkıştırma işleminde havanın durumu, uygulanan sıkıştırma enerjisi, bitüm ve agreganın özellikleri, uygulamayı yapacak operatörün seçimi gibi birçok faktör sıkıştırmanın kalitesini etkilemektedir. Kaliteli bir sıkıştırma için üstyapının her bir tabakasında bu faktörler dikkate alınıp uygun sıkıştırma aletiyle yeterli süre ve doğru yöntemle bu işlemin yapılması gerekmektedir (Yumrutaş, 2009).

1.9.2. Segregasyon

Segregasyon asfalt kaplamada karışım bileşenlerinin homojen bir şekilde dağılmamasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak agrega segregasyonu ve termal segregasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Her iki segregasyon çeşidi de asfalt kaplamaların saha performansı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kaplamada erken bozulmalara sebep olarak kaplamanın hizmet ömrünün kısalmasına sebep olmaktadır (Rahman vd., 2013).

1.9.2.1. Termal Segregasyon

Termal segregasyonun farkedilmesi zordur. Çünkü insan gözüyle görülememektedir. Yol inşası sırasında BSK'de yaşanan sıcaklık farklarının bitümlü karışımın segregasyona uğramasında önemli bir etkisi vardır. Sıcaklık farklılıkları nakliye kamyonunda, kamyon kasasının kenarı boyunca ve finişerin kanatlarında yaşanan, karışımın yüzeyindeki bazı bölümlerin farklı soğumasından kaynaklanmaktadır. BSK'nın serimi sırasında oluşabilecek bu tür sıcaklık farklılıkları kaplamanın ömrünü etkileyecek yoğunluk farkları üretebilmektedir (Huerne vd., 2009).

Yapılan araştırmalar BSK katmanındaki sıcaklık farkının 10°C'den yüksek olan kısımlarının segregasyona uğrama potansiyelinde olan bölgeler olduğunu, sıcaklık farkının 20°C'den yüksek olan kısımlarının ise yüksek oranda segregasyona uğradığını göstermiştir (Gardiner vd., 2004).

Yeni kızılötesi kameraların, çizgi tarayıcıların ve sensörlerin geliştirilmesiyle son dönemlerde sıcaklık ölçümleri daha kolaylaşmıştır. Hollanda'da Twente Üniversitesi tarafından yapılan bir çalışmada bu teknolojiler, inşa edilen test bölümlerinde asfalt sıcaklık özelliklerini incelemek için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda termal görüntüleme, asfaltlama işlemi sırasında karışım homojenliğinin görüntüsünü ve kaydını iyi bir şekilde göstermiştir. Bu yöntemlerle asfalt kaplamanın ve sıkıştırma işleminin kalite kontrolüne önemli oranda katkı sağlandığı saptanmıştır (Huerne vd., 2009).

1.9.2.2. Agrega Segregasyonu

Agrega segregasyonunun iki tipi vardır (URL-4 2020):

Kaba segregasyon: Agrega gradasyonu yeterli miktarda ince agrega içermeyip çok miktarda kalın agrega içerdiğinde meydana gelmektedir. Kaba agrega segregasyonu düşük asfalt içeriği, düşük yoğunluk, yüksek hava içeriği, pürüzlü yüzey dokusu, erken görülen tekerlek izi ve yorulma problemlerini beraberinde getirmektedir. Bu segregasyon tipi en yaygın ve zarar veren segregasyon tipi olarak görüldüğü için araştırmalar genellikle bu tip üzerinde yoğunlaşmıştır.

İnce segregasyon: agrega gradasyonu daha çok ince agrega içerdiğinde meydana gelmektedir. Yüksek asfalt içeriği, düşük yoğunluk, pürüzsüz yüzey dokusu, erken görülen tekerlek izi hasarı ve daha iyi yorulma performansı göstermektedir.

Segregasyonun kaplama performansı üzerindeki başlıca zararları; düşük yorulma ömrü, tekerlek izi oluşumu, sökölme ve su hasarıdır.

1.10. Arazi Performansını Değerlendirmeye İlişkin Yöntemler

Bir kaplamanın ömrünü ve karşılaşacağı problemleri doğru bir şekilde tasarlamak ve tahmin etmek zordur. Çünkü trafik, malzeme özellikleri, katman kalınlığı gibi ilgili değişkenlerin tümü doğada belirsizdir. Mekan ve zamana göre değişkenlik göstermektedir. Kaplama performansını etkileyen parametreler listelenmiştir (Valle ve Thom, 2015):

- Taban zemini özellikleri. Alt tabaka sertliği olarak ifade edilir.
- Tabaka kalınlığı ve sertliği olarak ifade edilen tabaka özellikleri.
- Kaplamanın maruz kalacağı trafik özellikleri.
- İklim koşulları.
- İnşaat yöntemleri ve işçilik kalitesi.
- Bakım planlaması ve zamanı.

Bir kaplama tasarımında tüm bu girdi parametrelerinin değişkenliğini ve oluşabilecek bozulmaları doğru bir şekilde tahmin edebilmek için uygun yöntemler geliştirilmelidir (Valle ve Thom, 2015).

Karayolu üstyapı projelendirilmesinin ve hizmet ömrü boyunca bakımları yapılmasının temel amacı kullanıcılara gerekli sürüş konforunu ve güvenliği sağlamaktır. Bu sebeple tasarımı yapılan üstyapının performansı sürekli incelenmelidir. Karayolunda üstyapı performansı yolun gerekli fonksiyonel ve yapısal hizmetini ne ölçüde sağladığını gösteren bir değerlendirmedir. Üstyapının fonksiyonel ve yapısal hizmetinin değerlendirilmesinde bazı göstergeler vardır. Boyuna geometrik düzgünlük, yüzey bozulmaları ve yüzey kayma direnci üstyapıdaki fonksiyonel bozulmaların bir göstergesidir. Defleksiyon ve enine geometrik düzgünlük ise yapısal bozulmalardır. Üstyapıda karşılaşılan bu sorunlar sürücü konforunu, güvenliği, çevreyi, yol ömrünü ve dolayısıyla ekonomiyi etkilemektedir. Bu sebeple üstyapının mevcut performansının ölçülmesi ve gelecek performansının tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir (İyınam vd., 2001).

1.10.1. Geometrik Düzgünlük Ölçüm Sistemleri

Yol yüzeyinin, sürüş kalitesini etkileyecek biçimde, tasarımı yapıldığı mevcut boyutlarından sapması durumuna geometrik düzgünlük denilmektedir. Geometrik düzgünlük tabakaların herhangi birinde gerçekleşen deformasyondan dolayı üstyapıdan tabana doğru ilerleyen boyuna geometrik düzgünlük ve tekerlek izine neden olan enine geometrik düzgünlük olarak ikiye ayrılmakta ve ayrı ayrı ölçülmektedir. Üstyapının hizmet kabiliyeti hakkında elde edilen bilgilerin %95'i yüzeyin geometrik düzgünlük ölçümüyle belirlenir (İyınam vd., 2001).

1.10.2. Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI)

IRI matematiksel bir çeyrek araç modelinin bir yol profiline verdiği tepkiye dayanan bilgisayar tabanlı sanal tepki sistemidir. IRI, 80 km/s hızla giden bir aracın pürüzlülük tepkisinin simülasyonuna dayanır. Araca yerleştirilen sistemdeki süspansiyonun toplam dikey hareketinin kat edilen mesafeye bölünmesiyle elde edilen mm/m birimindeki değerdir (Múčka, 2017). IRI, 0 ile 2.13 arasında değer alır. Alınan değer 0'a yaklaştıkça iyi olan, 2.13'e yaklaştıkça kötüleşen bir yolu ifade etmektedir. Yeni yapılan yollarda bu değer 0 ile 11 arasında olması beklenir.

1.10.3. Sürüş Sayısı (RN)

RN değeri yol hizmet kabiliyetine karşılık gelen bir değerdir. Bu değer 0 ile 5 arasında olup, 0'a yaklaştıkça kötü, 5'e yaklaştıkça iyi bir yolu ifade etmektedir.

1.10.4. Düzgünsüzlük Ölçme Araçları

Düzgünsüzlük ölçümleri için kullanılan yöntem ve araçlar en basitten en gelişmiş doğru aşağıdaki gibi gruplandırılmaktadır (Usluoğulları vd., 2013).

Tablo 5. Düzgünsüzlük ölçüm yöntemleri ve kullanılan araçlar

Seviye ölçer ile yapılan etütler	En basit
Ölçme çubuklu profil kaydediciler Profilograflar	Basit
Tepki tipinde yol düzgünsüzlüğü ölçüm cihazları	Gelişmiş
Lazer sistemli profil dedektörler	En gelişmiş

Tepki tipinde yol düzgünsüzlüğü ölçüm cihazlarından profilometre cihazı KGM tarafından yol yüzeyinin profilini belirlemek için kullanılmaktadır. Belirli hızda giden araca sensörler, lazer sistemleri ve akselometre yerleştirilerek ölçümler yapılmaktadır. Bu

araç; boyuna-enine profil, yüzey dokusu çıkarabilmekte, IRI değerini ve tekerlek izi oturmasını hesaplayabilmektedir (Usluoğulları vd., 2013)



Şekil 9. KGM profilometre ölçüm cihazı (KGM faaliyet raporu, 2019)

1.10.5. Defleksiyon Ölçüm Sistemleri

Defleksiyon ölçümleri üstyapının yapısal değerlendirmesini yapmak için kullanılmaktadır. Defleksiyon eğrisinin geometrisi ve ölçülen değerlerin büyüklüğü üstyapı hakkında bilgi vermektedir. Bu sistemler 4 grupta incelenmektedir.

Statik sistemler: Benkelman kirişi, tabaka yükleme deneyleri, eğrilik sayacı, otomatik defleksiyon kirişleri

Titreşimli sistemler: Dynaflect, yol değerlendirici

İtici sistemler: Düşen ağırlıklı deflektometre

Çok modlu sistemler: Thumber

KGM, defleksiyon ölçümlerinde düşen ağırlıklı deflektometre cihazını kullanmaktadır. Cihazla yapılan ölçümlerde yol yüzeyine yük uygulanır ve oluşan defleksiyonlar sensörler aracılığıyla kayıt edilir. Bu sayede kaplamanın mekanik özellikleri belirlenebilmekte ve ihtiyaç duyulan takviye tabakası kalınlığı hesaplanabilmektedir (Hergüner, 2009).



Şekil 10. KGM deflektometre ölçüm cihazı (KGM faaliyet raporu, 2019)

1.10.6. Üstyapı Yüzey Bozulması Ölçüm Sistemleri

Bozulma etütleri uzman kişilerin yol üzerinde yürüyerek ya da taşıtla giderek üstyapının durumunu, oluşan bozulma türlerini gözlem veya fotoğraf ile değerlendirmesinden oluşmaktadır. Bozulma etüdünde kullanılacak verinin nasıl elde edileceği belirlendikten sonra üstyapının kullanım amacına göre etütle alınan veriler değerlendirilerek üstyapıdaki bozulma tiplerine karar verilmektedir. Bozulma etütlerinde en yaygın olarak PAVER ve MTCO (Ministry of Transportation and Communications of Ontario) bozulma etütleri kullanılmaktadır (İyınam vd., 2001).

1.10.7. Kayma Direnci Ölçüm Sistemleri

Bu sistemde 65 km/s hızla giden bir araçta test için dizayn edilmiş bir tekerleğin önüne su püskürtülür ve fren yapılarak tekerlek kilitletir. Aracın yol yüzeyinde kayması sağlanarak test gerçekleştirilir. İşlem sonunda kayma sayısı (skid number) değeri belirlenir. Kayma sayısı değeri 0 ile 100 arasındadır ve 100'e yaklaştıkça kayma direnci yüksek bir yolu ifade etmektedir. KGM kaplamanın kayma direncini belirlemek için sürtünme ölçüm cihazını kullanmaktadır.



Şekil 11. KGM sürtünme ölçüm cihazı (KGM faaliyet raporu, 2019).

Ayrıca SCRIM, MU sayacı, Belçika odoliografı ve British pandül testi de dünyada kullanılan diğer kayma direnci ölçüm sistemlerindedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır.

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışmada arazi koşullarından elde edilen asfalt kaplama örnekleri kullanılmıştır. Asfalt kaplama üretiminde kullanılan materyallerin kaplama üretiminden önceki tasarıma esas alınan özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

Kaplama imalatında, 60 penetrasyon dereceli ve 1.035 gr/cm^3 özgül ağırlıklı bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

Agrega üretiminde kullanılan kayalar, Araklı-Dağbaşı İl Yolu 32+550km'deki Sularbaşı taş ocağından alınmış olup (12-19), (5-12), (0-5) grubu agregaları ile aşınma tabakası dizaynı yapılmıştır. Agreganın numunelerine yapılan deneyler ve agreganın özellikleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Çalışmada kullanılan agregaların özellikleri

Agrega özelliği	Değer
Aşınma kaybı (%)	18.1
Hava etkilerine dayanıklılık (%)	1.43
Su Absorbsiyon % (kaba agregası)	0.64
Su Absorbsiyon % (ince agregası)	1.07
Yassılık indeksi	19.2
Likit limit	N.P.
Soyulmaya karşı mukavemet	
Katkısız B, 50-70 ile	40-45
Katkılı B, 50-70	70-75

2.3. Elek Analizi ve Marshall Tasarım Deneyi

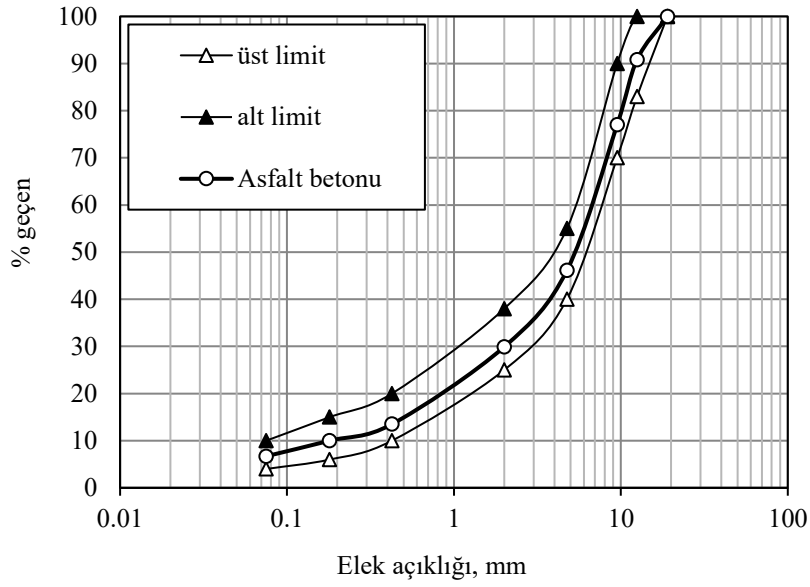
(12-19), (5-12) ve (0-5) tane boyutunda üretilen agregalardan alınan numunelere elek analizi deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda 24 elek analizi ortalamaları değerlendirilmiştir. Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları, tolerans sınırları ve şartname limitleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 7. Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları

Elek açıklığı		(12-19) mm	(5-12) mm	(0-5) mm
mm	inch	% geçen	% geçen	% geçen
19.1	¾	100	100	100
12.5	½	16.1	100	100
9.52	3/8	1.1	74.2	100
4.76	No:4	0.5	8.5	100
2.00	No:10		1.0	70
0.42	No:40		0.4	31.7
0.177	No:80			23.7
0.075	No:200			16

Tablo 8. Karışımın tane boyutu dağılımı, tolerans sınırları ve şartname limitleri

Elek açıklığı		Karışım	Tolerans limitine	Şartname limiti
mm	İnch	% geçen	göre % geçen	% geçen
19	¾	100	100	100
12.5	½	90.8	86.8-94.8	83-100
9.5	3/8	77.0	73.0-81.0	70-90
4.75	No:4	46.1	42.1-50.1	40-55
2.00	No:10	29.9	26.9-32.9	25-38
0.425	No:40	13.5	10.5-16.5	10-20
0.180	No:80	10.0	7.0-13.0	6-15
0.075	No:200	6.7	4.7-8.7	4-10



Şekil 12. Agrega karışımının tane boyutu dağılımı eğrisi ve şartname limitleri

Üç grup agreganın dane boyutu dağılımlarına göre belirlenen aşınma tabakası karışım oranları aşağıdaki gibi tespit edilmiştir.

(12-19) grubu agrega ağırlıkça, %11

(5-12) grubu agrega ağırlıkça, %47

(0-5) grubu agrega ağırlıkça, %42

Karışım gradasyonu baz alınarak Marshall yöntemine göre optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi için;

Kaba agrega yüzdesi (N0:4 üzeri): 53.9

İnce agrega yüzdesi (No:4-No:200 arası): 39.4

Filler yüzdesi (No:200'den geçen): 6.7 olarak alınmıştır.

Marshall briketleri %4, %4.5, %5, %5.5, %6 ve %6.5 bitüm içeriklerinde ve her bitüm içeriğinde üç örnek olacak şekilde altı grup olarak hazırlanmıştır. Briketlerin Marshall stabilite ve akma değerleri Tablo 9'da gösterildi.

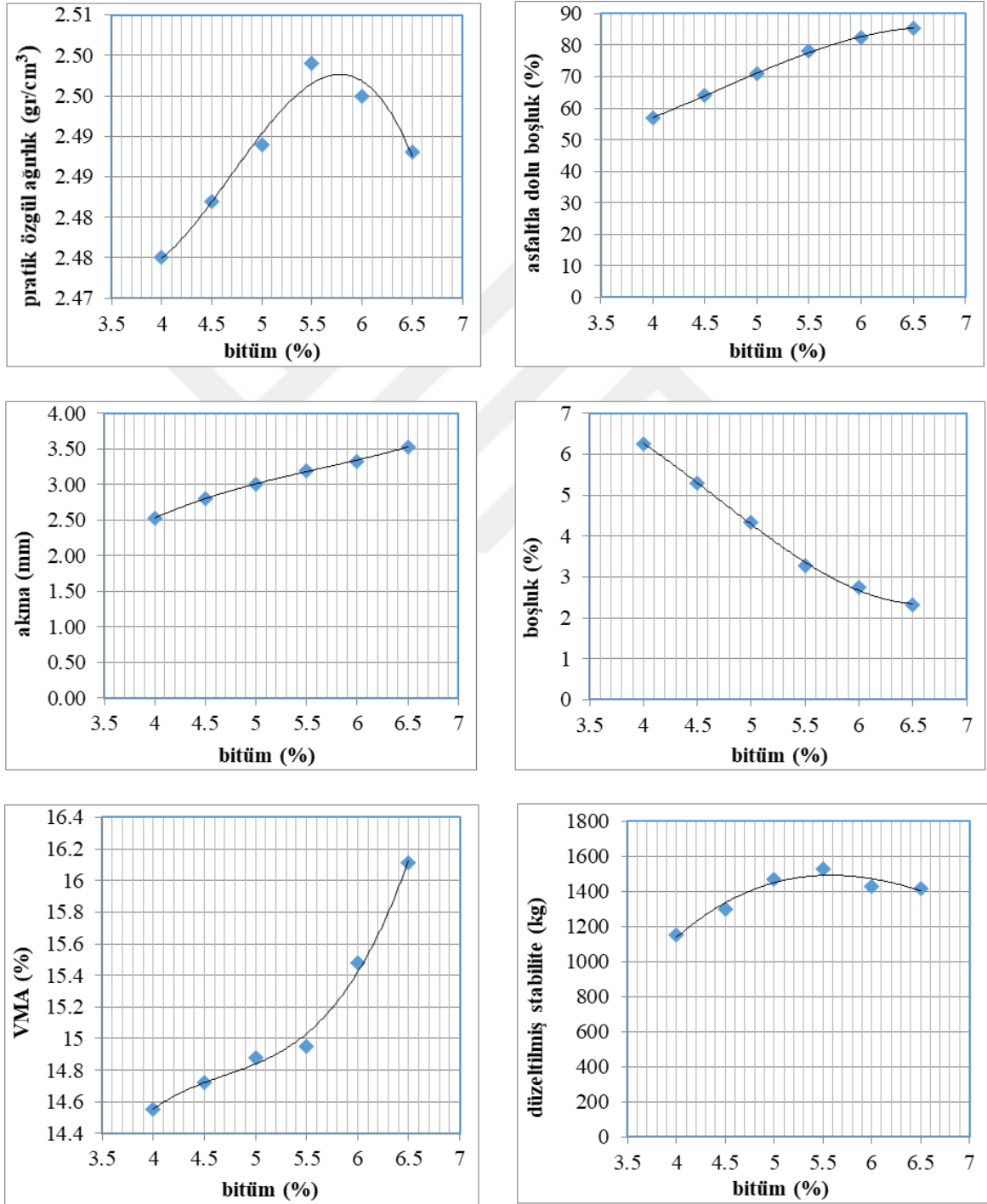
Tablo 9. Marshall deney formu

Briket no	Bitüm		Sıcaklık (°C)	D _p (gr/cm ³)	D _t (gr/cm ³)	V _h (%)	VMA (%)	V _f (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
	W _a (%)	W _b (gr)								
1	4.0	46.0	142.0	2.481					2.50	1069
2	4.0	46.0	144.0	2.470					2.50	1106
3	4.0	46.0	143.0	2.474					2.60	1085
Ortalama				2.475	2.640	6.25	14.55	57.0	2.27	1087
4	4.5	51.8	145	2.480					2.80	1213
5	4.5	51.8	144	2.486					2.70	1220
6	4.5	51.8	144	2.481					2.90	1205
Ortalama				2.482	2.621	5.30	14.72	64.0	2.80	1213
7	5.0	57.5	143	2.486					3.00	1364
8	5.0	57.5	142	2.492					2.90	1314
9	5.0	57.5	144	2.490					3.10	1356
Ortalama				2.489	2.602	4.34	14.88	70.8	3.03	1345
10	5.5	63.3	145	2.504					3.20	1377
11	5.5	63.3	144	2.496					3.10	1385
12	5.5	63.3	144	2.498					3.30	1366
Ortalama				2.499	2.583	3.25	14.95	78.3	3.20	1376
13	6.0	69.0	142	2.495					3.30	1330
14	6.0	69.0	144	2.499					3.30	1313
15	6.0	69.0	143	2.492					3.40	1299
Ortalama				2.495	2.565	2.73	15.48	82.4	3.33	1314
16	6.5	74.8	143	2.489					3.60	1300
17	6.5	74.8	142	2.484					3.50	1320
18	6.5	74.8	141	2.491					3.50	1285
Ortalama				2.488	2.548	2.35	16.12	85.4	3.53	1302

Tablo 10. Kullanılan agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları

Agrega ve bitüm özelliği	Değer (gr/cm ³)
Kaba agrega	2.785
Kaba agrega (zahiri)	2.835
İnce agrega	2.770
İnce agrega (zahiri)	2.855
Filler (zahiri)	2.871
Bitüm özgül ağırlığı	1,035

Marshall stabilite deneyi ve yoğunluk ölçümleri sonucu elde edilen ortalama değerler kullanılarak hazırlanan grafikler Şekil 13'te verilmiştir. Optimum bitüm içeriği %5.20 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriğindeki karışım özellikleri Tablo 11'de özetlenmektedir.



Şekil 13. Marshall deneyinden elde edilen grafikler

Tablo 11. Optimum bitüm içeriğindeki deney sonuçları

Karışım özelliği	Değer
Optimum bitüm, %	5.20
Boşluk, %	4.00
Pratik yoğunluk, gr/cm ³	2.493
Asfaltla dolu boşluk, %	73
Akma, mm	3.0
VMA, %	14.85
Stabilite, kg	1465

2.4. Yöntem

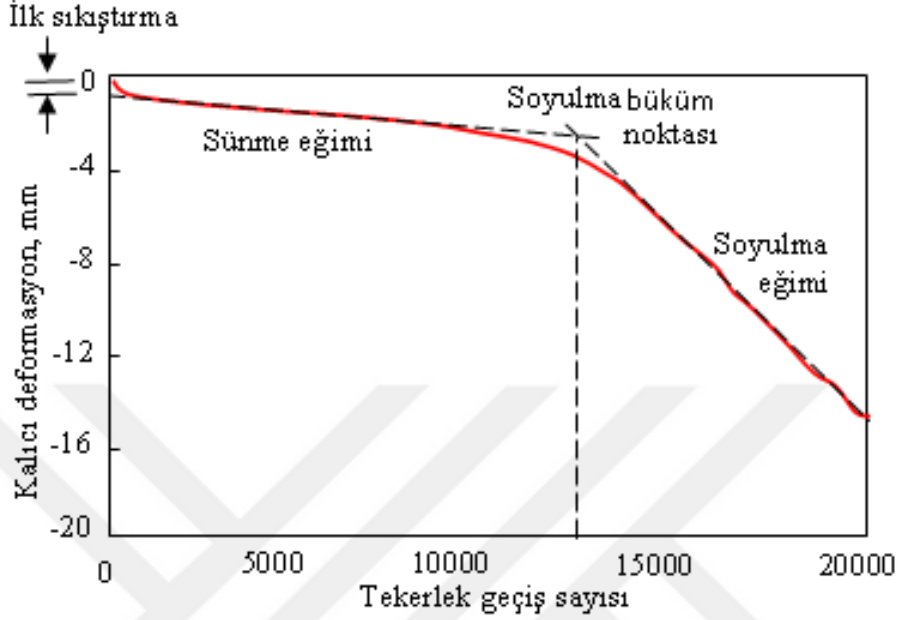
2.4.1. Hamburg Tekerlek İzi Testi

Bitümlü sıcak karışımların performansında karışım parametrelerinin etkisini belirlemek için karayolu şirketleri tarafından tahribatlı ve tahribatsız birçok farklı test kullanılmıştır. Hamburg tekerlek izi testi, araziden kesilerek alınmış veya laboratuvar ortamında hazırlanmış asfalt kaplamaların tekerlek izine direncini ve su hasarını belirleyen tahribatlı bir test yöntemidir. Test sırasında Hamburg tekerlek izi test aletinin haznesi su ile doldurulur. İstenen sıcaklığa ayarlanan suyun içine hazırlanmış asfalt numuneler yerleştirilerek deney aletinin çelik tekerleklerinin bu numuneler üzerinden belirlenen periyottaki geçişiyle deney yapılmaktadır. Bu sayede test metodu hem tekerlek izi etkisinin hem de su hasarının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Hamburg tekerlek izi test cihazı ilk olarak 1970 yılında Hamburg'da geliştirilmiştir. Burada ağır ve yavaş hareket eden liman araçları tarafından şiddetli basınca maruz kalan kaplamalar için bir şartname gereksinimi olarak kullanıldı. Test cihazı başlangıçta tekerlek izi duyarlılığını ölçmek için planlansa da daha sonra su hasarını ölçebilme olanağı sağladığı da anlaşıldı. Cihaz, Avrupa turuna giden mühendisler tarafından görülüp teknoloji transferi için 1990'ların başında ABD'de tanıtıldı (Lu ve Harvey, 2006).

Deney aynı anda iki numune üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Başlangıçta sadece kübik numuneler test edilebilirken daha sonra silindirik numuneler de test edilmeye başlanmıştır. Kübik numuneler yaklaşık 36 cm uzunluğunda, 30 cm genişliğindedir. Silindirik numuneler ise 15 ila 30 cm çapındadır. Test sıcaklığı 25 ile 75°C arasında çeşitlilik göstermesine rağmen geleneksel olarak 50°C de gerçekleştirilmektedir. Cihazda

47 mm genişliğindeki çelik tekerlekler numunelere dakikada 50 geçiş yaparak 705 N'luk yük uygulamaktadır.



Şekil 14. Hamburg tekerlek izi test eğrisi (İskender, 2017)

Şekil 14'te Hamburg tekerlek izi testine ait şematik eğri gösterilmiştir. Hamburg tekerlek izi test cihazına ait test sonuçları; ilk sıkışma, sünme eğimi, soyulma büküm noktası ve soyulma eğimini içeren bir eğri vermektedir. Tekerleğin ilk 1000 geçiş yaptıktan sonra karışımı yoğunlaştırdığı varsayılmaktadır. Bu yüzden ilk sıkışma, tekerlek 1000 geçiş yaptıktan sonra oluşan deformasyondur (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Sünme eğimi, ilk sıkışma sonrası ve soyulma büküm noktası arasındaki deformasyon eğrisinin lineer aralığındaki deformasyon oranının tersidir. Numunede su hasarı haricindeki mekanizmalar sebebiyle oluşan kalıcı deformasyon birikimi ölçülebilmektedir. Nem hasarının performansı etkilemeye başladığı tekerlek geçişlerinin sayısı karışımdan karışıma farklılık göstermektedir. Bu sebeple sünme eğimleri karışımda tekerlek izi derinliği yerine karışımın tekerlek izine karşı duyarlılığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Ayrıca tekerlek izi derinlikleri, numunede su hasarı olmasa bile genellikle ölçülebilir maksimum tekerlek izi derinliğini geçmektedir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Soyulma eğimi, deformasyon eğrisinin soyulma başlamasından testin sonlanmasına kadar olan kısmının lineer bölgesindeki deformasyon oranının tersidir. Bu eğim su hasarı nedeniyle oluşan kalıcı deformasyon birikimini ölçmektedir. Soyulma eğimi soyulma

başlamasıyla 1 mm'lik iz oluşturmak için gerekli tekerlek geçiş sayısını temsil etmektedir. Bu eğim su hasarının şiddeti ile ilişkilidir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Soyulma büküm noktası; sünme eğimi ve soyulma eğiminin kesişimindeki tekerlek geçiş sayısını ifade etmektedir. Sıcak asfalt karışımının su hasarına direnci ile ilişkilidir. Bu noktadan sonra su hasarı performansı etkilemeye başlamaktadır. Colorado Ulaştırma Bakanlığı (CDOT) 10000 tekerlek geçişinin altındaki soyulma büküm noktasının numunenin su kaynaklı bozulmalara karşı yatkınlığının bir göstergesi olduğunu bildirmiştir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

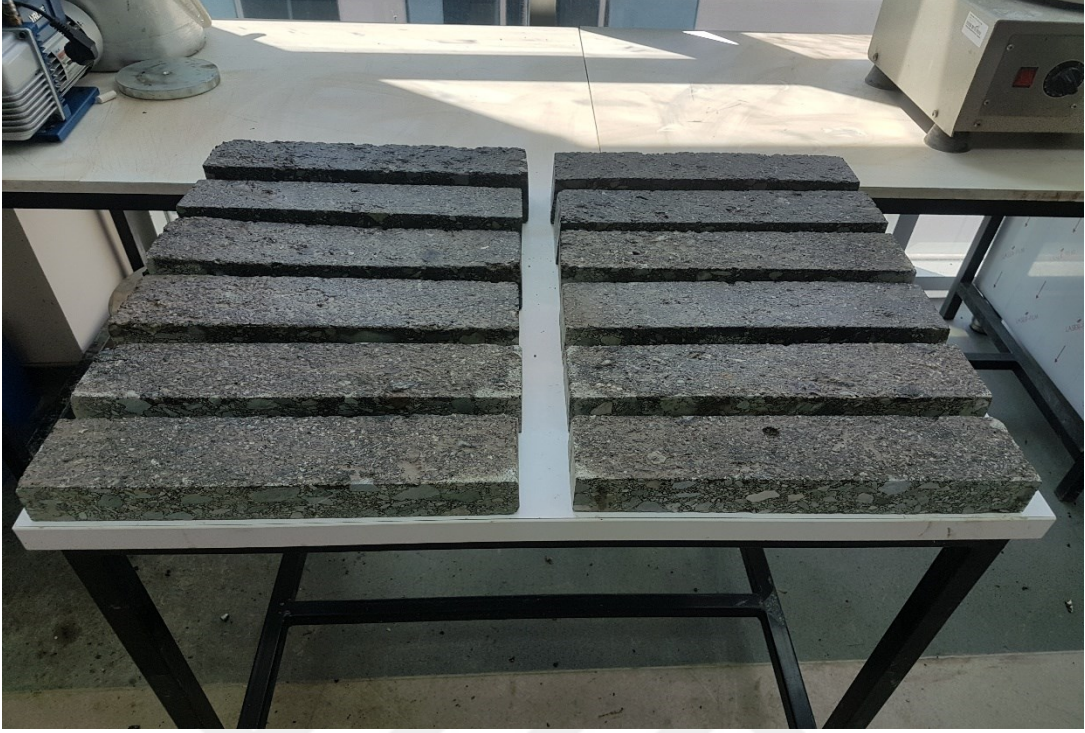
Sünme eğimi, soyulma büküm noktası ve soyulma eğiminin yüksek olması hasarın düşük olduğunun bir göstergesidir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Bu çalışmada, Hamburg tekerlek izi testi AASHTO T 324 prosedürüne göre yapıldı. Araziden kesilmiş numuneler asfalt kesme makinasında 36 cm uzunlukta, 10 cm genişlikte, 4 cm ve 9 cm aralığında 0.5 cm farklarla değişen kübik asfalt numuneler şeklinde hazırlandı. Deney, test parametreleri belirlenip test aletinin kabini su doldurularak gerçekleştirildi.

Tablo 12. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler

Deney ölçütü	Değer
Deney sıcaklığı (°C)	50
Deneyi sonlandıran tekerlek izi derinliği (mm)	15
Tekerlek geçiş hızı (döngü/dakika)	26
Maksimum geçiş sayısı	10000
Suda bekletme süresi (dak.)	30
Koşullama tekerlek geçiş sayısı	5

Hamburg test cihazı için hazırlanan örnekler Şekil 15 ve Şekil 16'da, test cihazı Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 15. Farklı kalınlıklarda kesilerek hazırlanan örnek çiftleri



Şekil 16. HWT cihazına yerleştirilen 10x36 cm boyutunda örnek



Şekil 17. Hamburg tekerlek izi deney cihazı

Hamburg tekerlek izine ait test sonuçları Tablo 13'te özetlenmiştir.

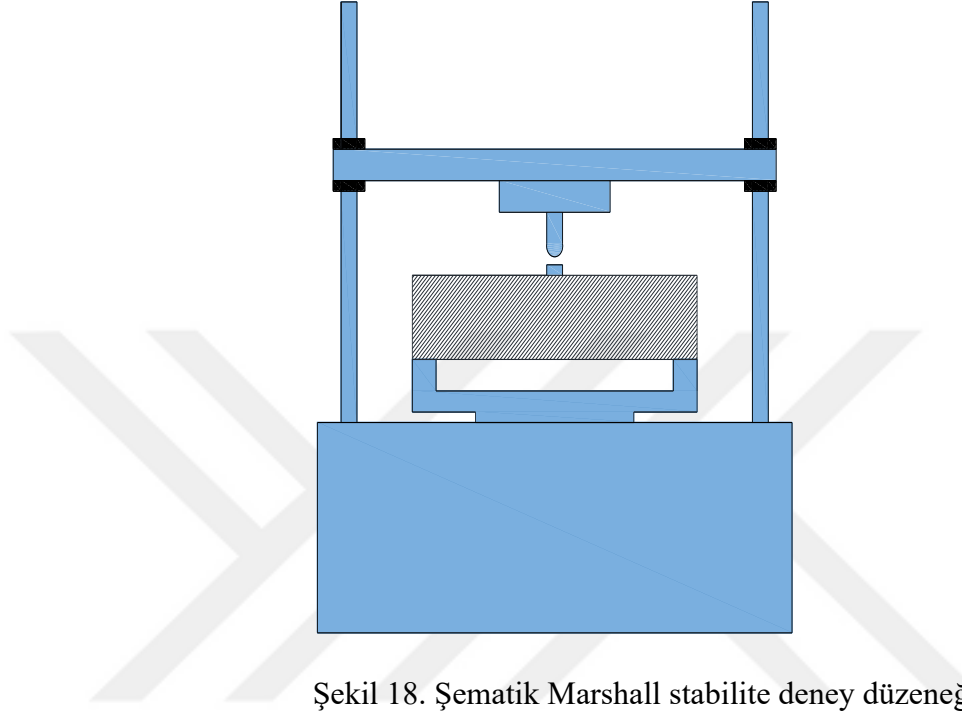
Tablo 13. Hazırlanan örneklerin ortalama tekerlek izi derinlikleri (mm)

Tekerlek geçiş döngüsü	40mm	45mm	50mm	55mm	60mm	65mm	70mm	75mm	80mm	85mm	90mm
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.040	0.067	0.056	0.295	0.161	0.128	0.097	0.106	0.030	0.079	0.146
5	0.064	0.185	0.125	0.321	0.260	0.314	0.133	0.168	0.121	0.115	0.201
10	0.153	0.280	0.263	0.493	0.320	0.404	0.330	0.342	0.261	0.241	0.303
20	0.265	0.407	0.482	0.696	0.740	0.586	0.570	0.583	0.474	0.526	0.622
50	0.448	0.664	0.831	0.921	0.836	0.870	0.901	0.981	0.763	0.777	1.037
100	0.659	0.866	1.115	1.227	1.205	1.171	1.228	1.402	1.057	1.135	1.581
200	0.887	1.143	1.543	1.848	1.735	1.524	1.699	1.920	1.527	1.549	2.024
300	1.090	1.367	1.802	2.408	1.999	1.690	1.905	2.275	1.802	1.782	2.214
400	1.192	1.604	2.000	2.665	2.243	1.893	2.064	2.578	1.972	1.889	2.460
500	1.339	1.619	2.162	3.152	2.290	2.085	2.273	2.950	2.145	2.039	2.553
600	1.415	1.922	2.297	3.611	2.384	2.218	2.426	3.049	2.322	2.078	2.758
700	1.506	2.098	2.427	3.883	2.636	2.346	2.678	3.117	2.366	2.242	2.874
800	1.593	2.206	2.568	4.006	2.570	2.422	2.792	3.419	2.597	2.427	2.898
900	1.693	2.314	2.692	4.299	2.751	2.577	2.771	3.627	2.652	2.546	2.983
1000	1.788	2.414	2.857	4.402	2.850	2.648	2.912	3.812	2.838	2.648	3.137
1171	1.945	2.620	3.070	4.692	3.243	2.856	3.235	3.886	3.000	2.759	3.201
1561	2.119	2.943	3.561	5.069	3.618	3.211	3.864	4.377	3.358	3.088	3.574
2000	2.546	3.319	4.158	5.419	3.994	3.560	4.584	4.943	3.708	3.376	3.764
3000	3.136	4.399	5.423	5.930	4.845	4.471	6.684	5.872	4.657	4.067	4.296
4000	3.560	5.245	7.200	6.439	5.248	5.540	9.241	7.084	6.815	4.680	4.846
5000	3.880	5.773	9.259	6.742	5.610	6.462	12.493	8.320		5.329	5.123
6000	4.218	6.455		6.874	5.888	7.380		9.407		5.823	5.620
7000	4.382	6.925		7.034	5.960	8.700				6.443	6.516
8000	4.663	7.460		7.185	6.039	9.984				6.983	7.994
9000	4.799	7.933		7.498	6.057					7.725	11.126
10000	4.883	8.430		7.839	6.109					8.232	13.414

2.4.2. Deformasyon Kontrollü Kiriş Eğilme Testi

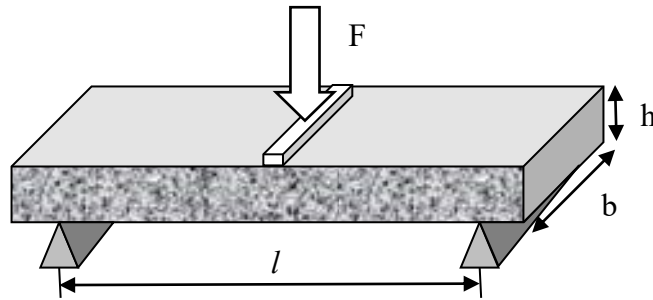
Asfalt kaplama örneklerinden elde edilen kiriş örnekler kullanılarak kiriş eğilme deneyi yapıldı. Deney Marshall stabilite test aleti gerçekleştirildi. Marshall stabilite cihazı bitümlü karışımların akma ve stabilite değerlerini belirlemek için kullanılmaktadır. 50kN kapasiteli Marshall Test Aletinin alt gövdesi motor, hareket mekanizması ve elektrik donanımdan oluşmaktadır. Üst gövdede ise iki kolona bağlı yüksekliği ayarlanabilen bir kiriş bulunmaktadır. Test esnasında bu kiriş sabit kalmakta ve cihazın hareket mekanizması yükleme plakasını yukarıya doğru hareket ettirmektedir. Bu hareket dakikada 50.8 mm'lik bir hızla gerçekleşmekte ve numune kırılıncaya kadar devam etmektedir. Kırılma sonucunda test cihazı durarak o ana kadar kaydedilen en yüksek stabilite değerini

kaydetmekte ve dijital ekranda göstermektedir. Cihazı sabit hızda hareketi deformasyon kontrolü sağlamaktadır. Çalışmada kiriş örnekler için kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 18’de sunulmuştur.



Şekil 18. Şematik Marshall stabilite deney düzeneği

Çalışma kapsamında 36cm uzunluğunda, 8cm genişliğinde ve kalınlığı 4cm’den 9cm’ye kadar 0.5cm aralıklarla artan kiriş örnekler kullanılmıştır. Numunelerin kenarları asfalt kesme makinesi ile belirlenen ölçülerde kesilip hazırlanmıştır. Deney sonucunda numunelerin kırılma mekanizması, kullanılan hesap denklemi ve eğilme anında kırılmaya neden olan en büyük yükler Tablo 14’te gösterilmiştir.



Şekil 19. Kiriş numunelerin yükleme mekanizması

$$\sigma = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2} \quad (1)$$

F: Kırılmaya neden olan yük (KN)

σ : Kirişin eğilme dayanımı (KN/mm²)

l: Deney numunesinin mesnetler arası mesafesi (mm)

b: Deney numunesinin genişliği (mm)

h: Deney numunesinin kalınlığı (mm)

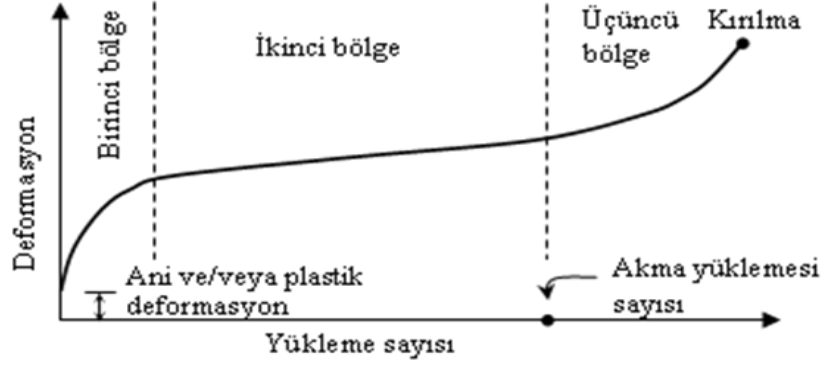
Tablo 14. Kiriş numunelerinin ortalama kırılma yükleri

Kiriş numune kalınlığı	Kırılma yükü (KN)
40mm	1.475
45mm	1.725
50mm	2.085
55mm	2.470
60mm	3.120
65mm	4.360
70mm	4.395
75mm	4.740
80mm	5.590
85mm	5.785
90mm	7.145

2.4.3. Tekrarlı Yük Kiriş Eğilme Deneyi

Tekrarlı yük altında kiriş eğilme deneyi universal asfalt test cihazında tekrarlı yük sünme testi yazılımı ile yapıldı. Tekrarlı yük deneyi bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona (tekerlek izi) karşı direncini değerlendirmede kullanılmaktadır. Asfalt kaplama üzerine belirlenen periyotta tekrarlı yükleme uygulanmaktadır. Test sonucunda kalıcı deformasyonlar kümülatif bir şekilde kaydedilerek yükleme sayısı deformasyon grafiği oluşturulmaktadır. Farklı sıcaklık ve yüklerde yapılabilen test gerçek arazi

koşullarındaki tekerlek izini yansıtmada statik sünme testine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (İskender, 2008).



Şekil 20. Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı (İskender, 2017)

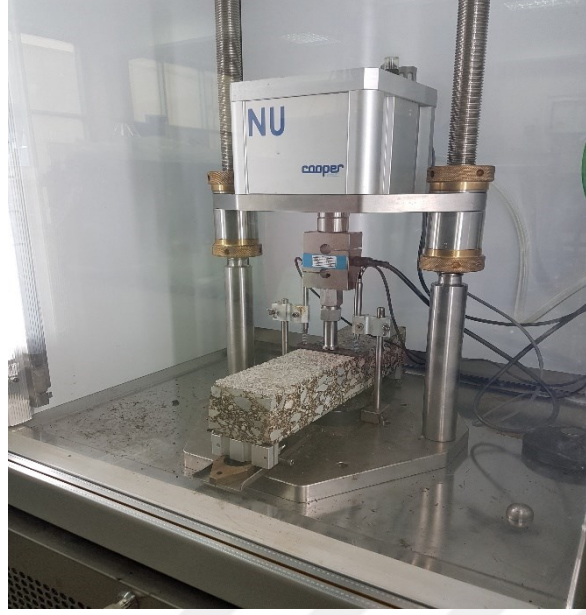
Sünme eğrisi genel olarak üç bölgeden oluşmaktadır. Ancak birinci aşamadan hemen önce gözlemlenen ve ani deformasyon olarak adlandırılan bir sünme bileşeni daha vardır.

Başlangıçta nispeten küçük bir yük altında malzeme elastik davranış göstermektedir. İlk yük uygulandığında ani bir deformasyon meydana gelmektedir. Uygulanan tüm gerilmeler geri dönerek yükleme boşaltma döngüsü boyunca kalıcı şekil değiştirme olmamaktadır (Öztürk, 2007).

Yük sürekli uygulandığında malzeme azalan bir hızda deforme olmaya devam etmektedir. Birinci bölgede gözlenen fiziksel hasar pekleşmedir. Bu hasara tekrarlı trafik yükleri altında asfalt betonundaki dislokasyon hareketleri neden olmaktadır. Bunun sonucunda plastik deformasyon artmaktadır (Öztürk, 2007).

Sünme grafiğinin ikinci bölgesi mikroçatlakların başladığı kısımdır. Bu kısımda deformasyon eğimi neredeyse doğrusaldır (Öztürk, 2007).

Üçüncü bölgede mikroçatlaklar yüklemenin devam etmesiyle yayılır ve birleşerek makroçatlak haline gelmektedir. Kalıcı deformasyon hızı artmaktadır. Tekrarlı yüklemenin devam etmesiyle kırılma gerçekleşmektedir. Böylece genel yorulma çatlama göz önüne alındığında, üçüncül noktaya karşılık gelen yük tekrarlarının sayısı, yüksek sıcaklıkta sıkıştırma yükü altında yorulma ömrü olarak alınabilmektedir (Zhou ve Scullion, 2002).



Şekil 21. Tekrarlı yük sünme testi

Çalışma kapsamında 36cm uzunluğunda, 8cm genişliğinde ve farklı kalınlıklardaki kaplama örneklerine şekilde görülen tekrarlı yük kiriş eğilme testi yapılmıştır ve sonuçlar Tablo 15’te özetlenmiştir.

Tablo 15. Tekrarlı yük kiriş eğilme testi eğilme miktarları (mm)

yükleme döngüsü	52mm	57.5mm	62mm	67mm	70.8mm	72.5mm	77.1mm	80.3mm
4	2.243	1.613	1.090	0.901	0.699	0.761	0.483	0.341
8	2.855	1.904	1.232	1.004	0.775	0.811	0.518	0.385
12	3.181	2.036	1.300	1.050	0.811	0.836	0.527	0.413
16	3.548	2.180	1.379	1.107	0.857	0.870	0.550	0.440
20	3.971	2.324	1.456	1.165	0.902	0.903	0.575	0.465
32	5.773	2.750	1.673	1.324	1.024	0.994	0.645	0.532
52		3.524	2.003	1.556	1.197	1.119	0.748	0.622
76		5.660	2.401	1.801	1.367	1.247	0.858	0.712
100			2.930	2.022	1.516	1.359	0.957	0.789
128			5.623	2.256	1.673	1.477	1.061	0.867
200				2.787	2.026	1.738	1.294	1.041
300				3.472	2.452	2.041	1.563	1.266
400				4.289	2.828	2.310	1.792	1.464
500					3.173	2.566	1.993	1.637
600					3.502	2.816	2.174	1.798
700					3.828	3.068	2.341	1.951
800					4.164	3.333	2.496	2.062
900					4.520	3.633	2.655	2.215
1000					4.828	4.019	2.806	2.348

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Giriş

Bu bölümde; Hamburg tekerlek izi testi, kiriş eğilme testi ve tekrarlı yük sünme testine ait bulgular tablo ve grafiklerde gösterilmiştir. Deney sonuçlarının tekerlek izi, soyulma ve çatlama açısından yorumlaması yapıp kalınlık farkının performans üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

3.2. Hamburg Tekerlek İzi Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

Hamburg tekerlek izi testi, bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon (tekerlek izi) ve soyulma etkisine karşı gösterdikleri direnci değerlendirmek için kullanıldı. Hamburg tekerlek izi cihazında 10000 tekerlek döngüsünde yapılan çalışmada, cihazdaki tekerlek döngüleriyle kalıcı deformasyon direnci, cihaz kabinindeki suyla da asfalt karışımların soyulma potansiyelleri değerlendirildi.

Araziden temin edilen asfalt kaplamalar, her bir kalınlık için iki örnek olacak şekilde kesildi ve hazırlanan asfalt kaplama örneklerine tekerlek izi testi yapıldı. Test sonucunda örneklerde gözlenen tekerlek izi derinlikleri Tablo 16 – Tablo 18’de sunulmuştur.

Tablo 16. Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri

Tekerlek geçiş döngüsü	40mm	40mm	45mm	45mm	50mm	50mm	55mm	55mm
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.019	0.061	0.129	0.005	0.110	0.002	0.125	0.466
5	0.028	0.100	0.285	0.084	0.215	0.035	0.247	0.396
10	0.082	0.224	0.362	0.198	0.381	0.144	0.403	0.582
20	0.138	0.391	0.477	0.338	0.606	0.358	0.460	0.932
50	0.274	0.622	0.708	0.620	1.019	0.642	0.468	1.374
100	0.412	0.906	0.835	0.897	1.372	0.858	0.637	1.817
200	0.620	1.155	1.052	1.235	1.749	1.337	1.273	2.423
300	0.779	1.402	1.188	1.547	1.952	1.651	1.741	3.075
400	0.839	1.544	1.445	1.763	2.144	1.856	1.975	3.354
500	0.959	1.719	1.454	1.784	2.296	2.028	2.507	3.797
600	0.977	1.852	1.590	2.255	2.432	2.163	3.076	4.146
700	1.078	1.933	1.613	2.583	2.570	2.284	3.410	4.356
800	1.141	2.045	1.690	2.722	2.703	2.433	3.609	4.403
900	1.218	2.169	1.770	2.858	2.838	2.547	3.986	4.612
1000	1.279	2.297	1.819	3.010	2.974	2.740	4.168	4.635
1171	1.396	2.495	2.001	3.239	3.177	2.963	4.376	5.008
1561	1.588	2.651	2.195	3.690	3.725	3.398	4.710	5.427
2000	1.716	3.375	2.490	4.149	4.515	3.801	5.014	5.823
3000	1.987	4.284	3.032	5.765	6.289	4.556	5.244	6.615
4000	2.261	4.859	3.528	6.962	8.967	5.434	5.444	7.434
5000	2.509	5.250	3.921	7.624	12.212	6.305	5.611	7.873
6000	2.785	5.651	4.368	8.542		7.743	5.708	8.039
7000	2.944	5.821	4.718	9.132		8.777	5.845	8.223
8000	3.007	6.320	5.296	9.624		10.200	6.011	8.360
9000	3.004	6.594	5.642	10.224		13.142	6.285	8.712
10000	3.002	6.765	6.119	10.741		14.423	6.547	9.131

Tablo 17. Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri

Tekerlek geçiş döngüsü	60mm	60mm	65mm	65mm	70mm	70mm	75mm	75mm
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.168	0.154	0.188	0.067	0.082	0.112	0.098	0.114
5	0.330	0.191	0.384	0.244	0.140	0.126	0.178	0.158
10	0.620	0.021	0.639	0.169	0.231	0.428	0.351	0.333
20	1.047	0.433	0.828	0.344	0.386	0.753	0.629	0.537
50	1.253	0.419	1.028	0.713	0.662	1.140	1.101	0.860
100	1.534	0.876	1.242	1.100	0.940	1.516	1.634	1.170
200	1.866	1.605	1.423	1.625	1.288	2.109	2.275	1.565
300	2.104	1.894	1.658	1.722	1.552	2.258	2.703	1.847
400	2.319	2.166	1.818	1.968	1.730	2.398	3.079	2.077
500	2.481	2.099	1.844	2.326	1.908	2.637	3.512	2.388
600	2.621	2.148	2.041	2.396	2.065	2.788	3.713	2.386
700	2.738	2.534	2.053	2.639	2.233	3.123	3.818	2.416
800	2.859	2.280	2.188	2.656	2.352	3.233	4.017	2.821
900	2.939	2.562	2.316	2.839	2.460	3.081	4.279	2.974
1000	3.124	2.576	2.399	2.897	2.607	3.216	4.501	3.123
1171	3.264	3.222	2.499	3.213	2.904	3.565	4.601	3.170
1561	3.608	3.629	2.813	3.610	3.498	4.231	5.212	3.542
2000	4.145	3.843	2.985	4.134	4.110	5.058	6.149	3.737
3000	4.793	4.896	3.643	5.299	6.383	6.984	7.274	4.470
4000	5.172	5.325	4.206	6.873	8.943	9.540	8.653	5.514
5000	5.670	5.551	4.824	8.099	10.898	14.089	10.989	5.651
6000	5.855	5.921	5.183	9.577	12.654		12.745	6.070
7000	5.838	6.082	6.068	11.331	14.094			7.122
8000	5.885	6.194	6.822	13.147				7.388
9000	5.869	6.245	7.873					8.014
10000	5.911	6.308	9.167					8.462

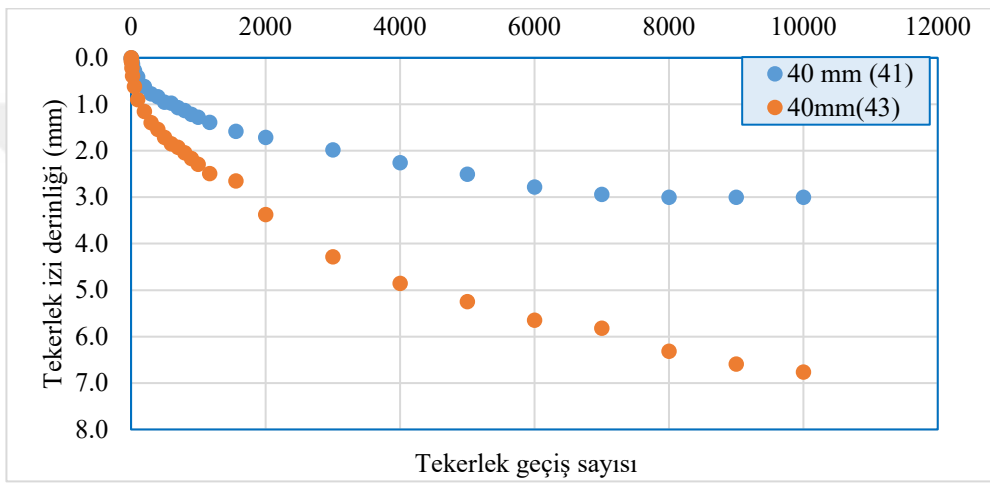
Tablo 18. Asfalt kaplama örneklerin tekerlek izi derinlikleri

Tekerlek geçiş döngüsü	80mm	80mm	85mm	85mm	90mm	90mm
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.021	0.039	0.053	0.105	0.143	0.149
5	0.063	0.179	0.019	0.212	0.264	0.137
10	0.156	0.367	0.042	0.439	0.500	0.105
20	0.332	0.615	0.369	0.684	0.800	0.444
50	0.595	0.931	0.474	1.081	1.330	0.744
100	0.867	1.247	0.847	1.423	1.751	1.412
200	1.135	1.919	1.284	1.814	2.165	1.884
300	1.342	2.263	1.520	2.044	2.446	1.981
400	1.486	2.458	1.623	2.155	2.593	2.328
500	1.621	2.670	1.790	2.288	2.789	2.316
600	1.728	2.916	1.704	2.453	2.895	2.621
700	1.814	2.919	1.894	2.590	3.025	2.723
800	1.900	3.295	2.073	2.781	3.135	2.660
900	1.967	3.337	2.187	2.906	3.234	2.733
1000	2.053	3.623	2.249	3.046	3.355	2.919
1171	2.172	3.828	2.240	3.278	3.430	2.972
1561	2.365	4.351	2.630	3.546	3.732	3.416
2000	2.576	4.839	2.744	4.008	3.991	3.537
3000	3.090	6.223	3.268	4.866	4.463	4.129
4000	3.714	9.916	3.765	5.594	5.060	4.632
5000	4.156		4.065	6.594	5.665	4.581
6000	4.640		4.413	7.233	6.166	5.075
7000	5.110		4.798	8.089	6.780	6.251
8000	5.482		5.214	8.751	7.725	8.264
9000	5.875		5.717	9.733	10.238	12.014
10000	6.429		6.252	10.213	12.233	14.595

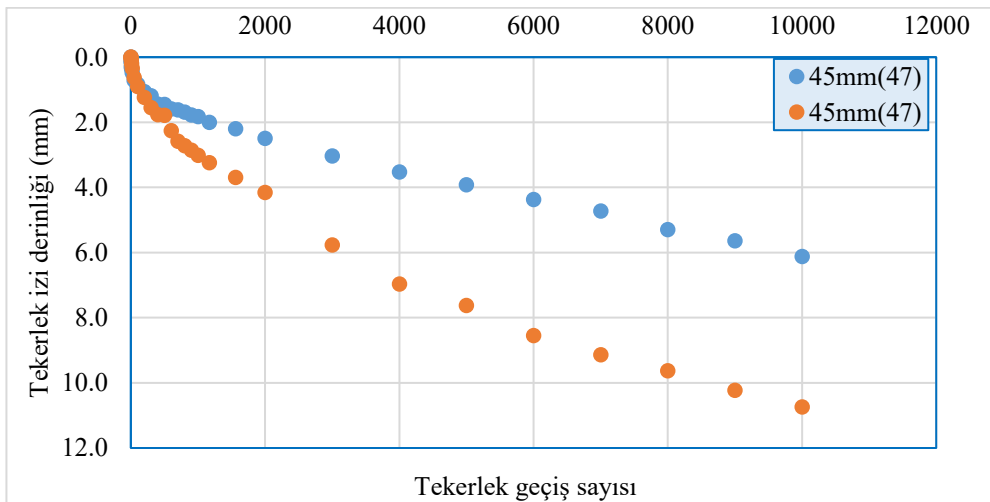
Test sonucunda tekerlek geçiş döngülerine göre tekerlek izi derinlikleri belirlenen kaplama örneklerinin deformasyon grafikleri çizilmektedir. Üç bölgeden oluşan bu grafikte 1000 tekerlek geçişine kadar olan kısım ilk sıkışma evresidir ve birinci bölgedir. İkinci bölge sünme eğiminin görüldüğü bölgedir. Sünme eğimi, tekerlek yükünden dolayı kaplamada oluşan kalıcı deformasyonların değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu bölgede su hasarından çok yükün neden olduğu hasar görülmektedir. Kaplamada su hasarının görülmeye başladığı nokta, sünme ve soyulma eğiminin kesiştiği soyulma büküm noktasıdır. Bu nokta kaplada su hasarının başladığı tekerlek geçiş sayısını vermektedir. CDOT'ye göre soyulma büküm noktasının 10000 tekerlek geçişinden erken görülmesi

kaplamanın suya karşı hassasiyetinin olduğunu göstermektedir. Üçüncü bölge soyulma eğiminin olduğu bölgedir. Kaplama örnekleri bu bölgede hızlı bir şekilde bozulmaya uğramaktadır. Görülen bu bozulmada etkili olan mekanizma, ikinci bölgede görülenin aksine yük etkisinden daha çok su etkisi ile ilgilidir. Suyu karşı hassas karışımlar soyulma büküm noktası çevresinde ince malzemesini kaybetmeye başlamaktadır. Bunun sonucunda zamanla iri malzemeleri de yerlerinden çıkmaktadır (Kutluhan, 2008).

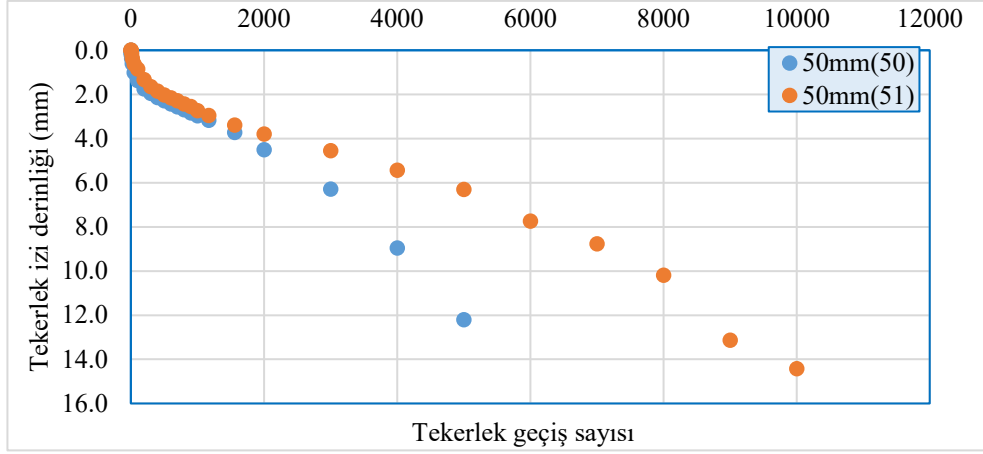
Şekil 22 – Şekil 32’de her bir kalınlık için tekerlek izi eğrileri gösterilmiştir.



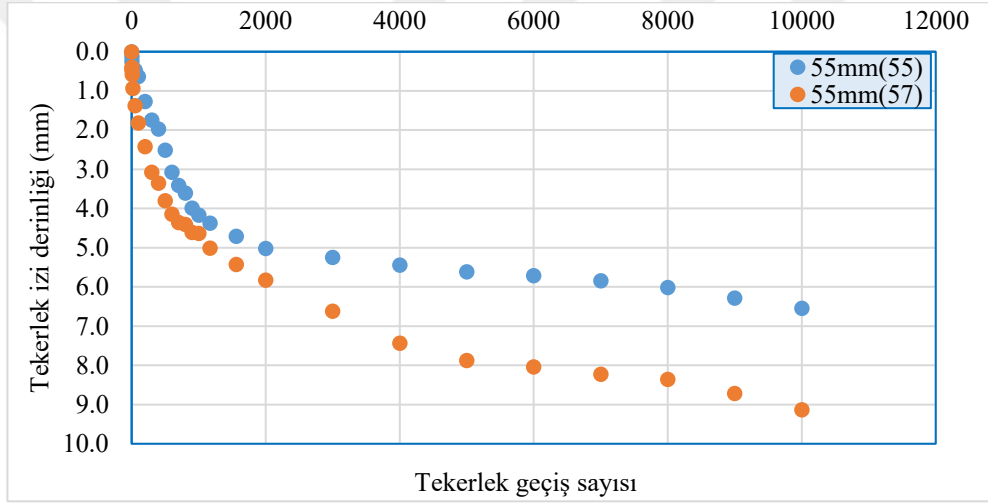
Şekil 22. 40mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



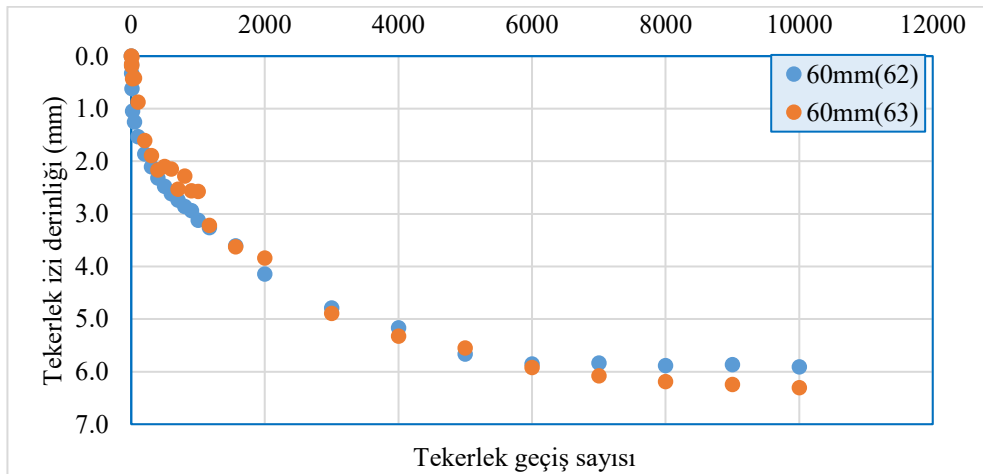
Şekil 23. 45mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



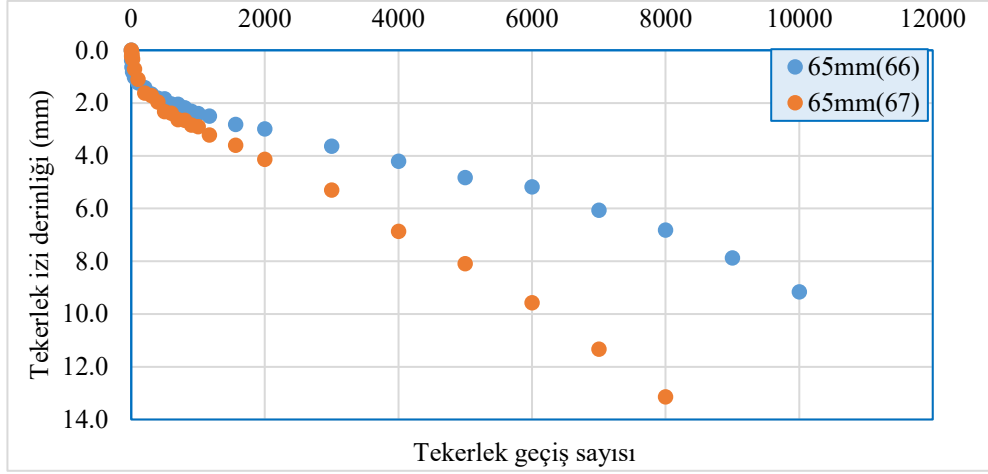
Şekil 24. 50mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



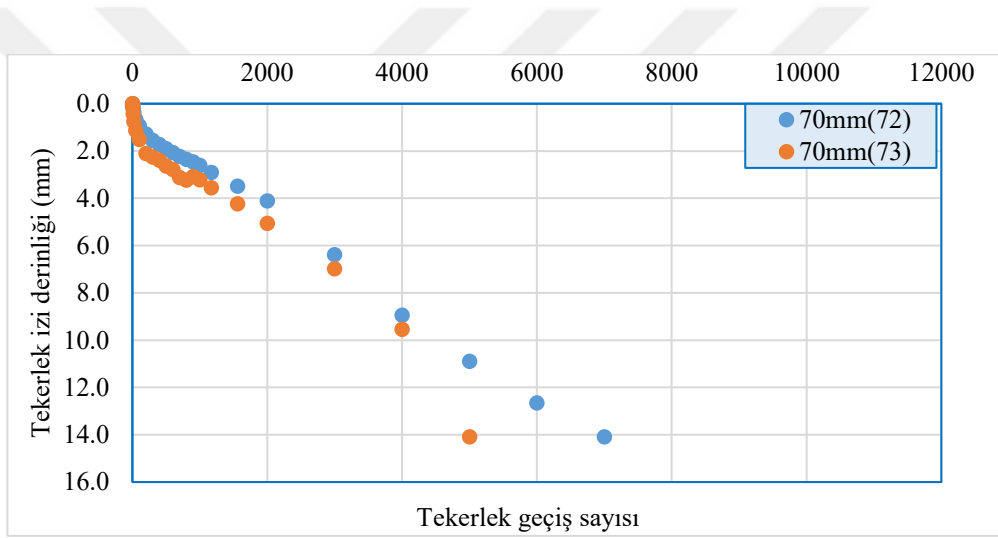
Şekil 25. 55mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



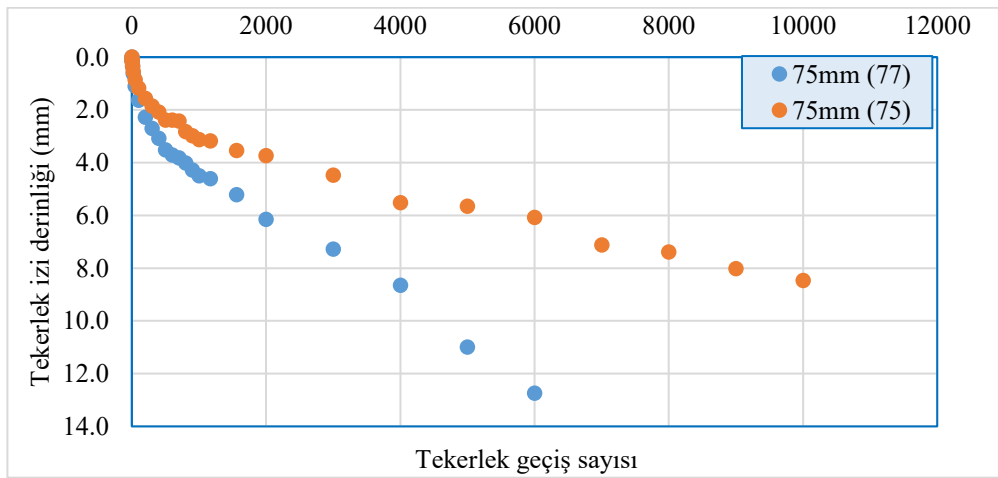
Şekil 26. 60mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



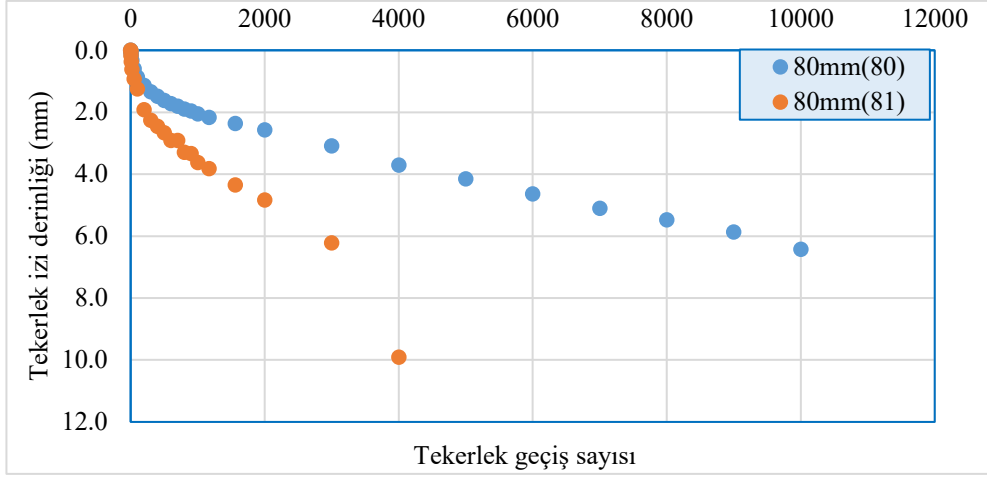
Şekil 27. 65mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



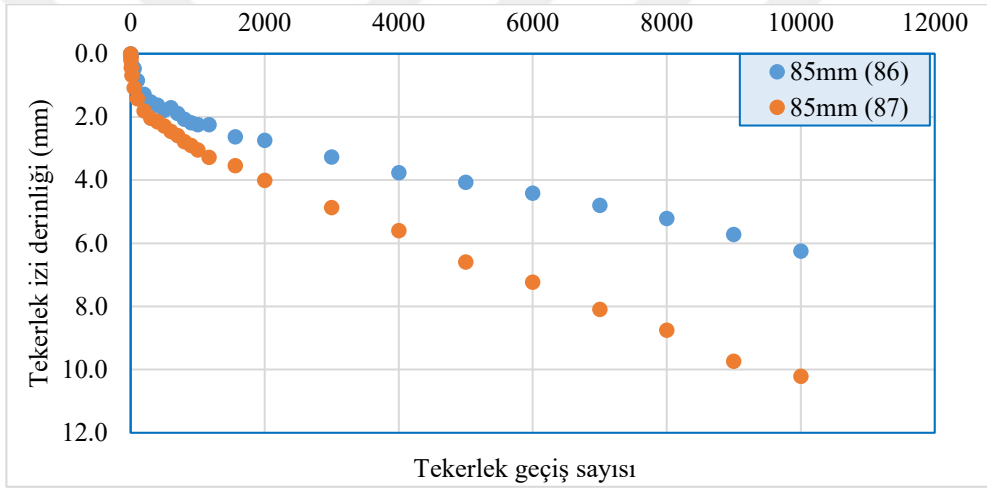
Şekil 28. 70mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



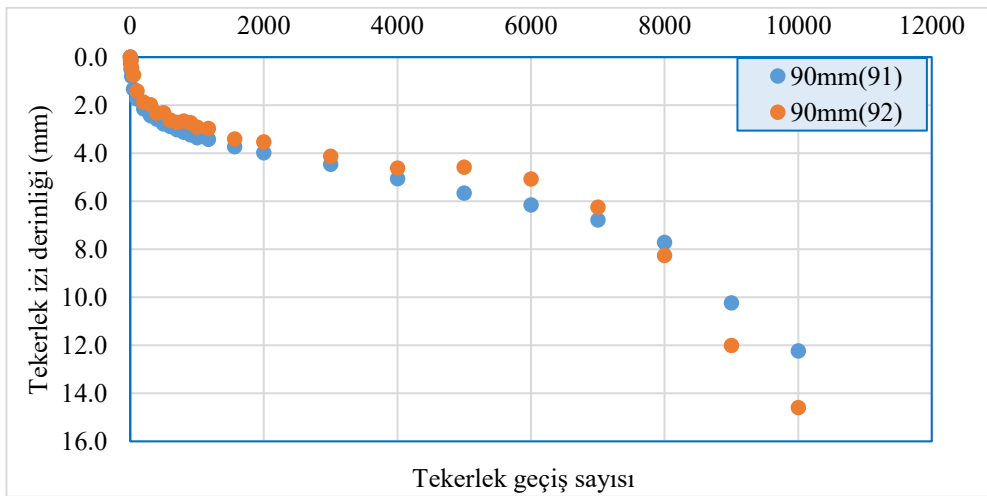
Şekil 29. 75mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



Şekil 30. 80mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi



Şekil 31. 85mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi

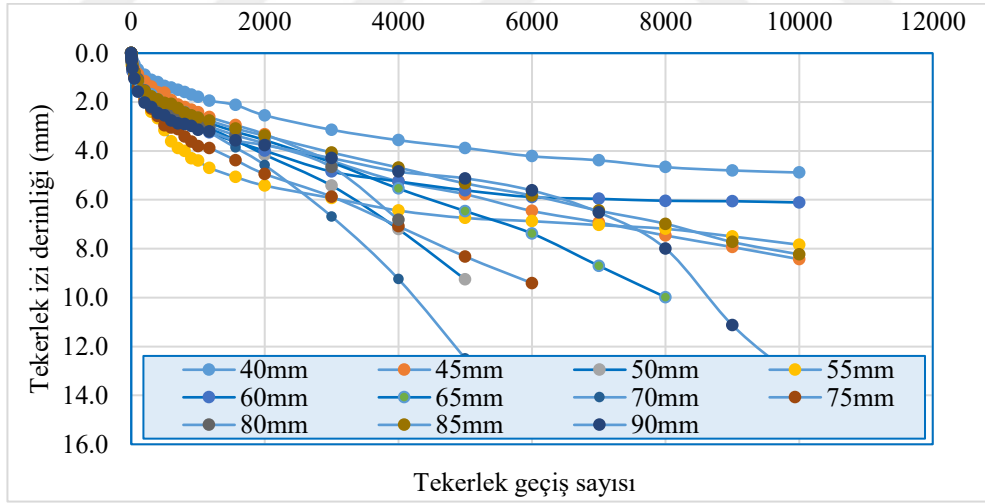


Şekil 32. 90mm kaplama kalınlığında tekerlek izi eğrisi

Hamburg deney cihazının haznesi su ile doldurularak yapılan deney sonucunda kaplama numunelerinin su hasarı potansiyelleri değerlendirilmiştir. Su hassasiyeti genellikle soyulma olarak adlandırılmaktadır. Bu olay agrega yüzeyi ile asfalt çimentosu arasındaki bağ bozulduğunda meydana gelmektedir. Bozulan bağ yapısı asfalt kaplamanın zayıflamasına ve bunun sonucunda daha düşük stabilite ve yük taşıma kapasitesine sebep olmaktadır. Su hasarının mekanik etkisi adezyon ve kohezyon kuvvetindeki zayıflamadır. Su hasarından kaynaklı adezyon ve kohezyon kuvvetindeki zayıflama sonucunda kaplamada sökülme, tekerlek izi ve çatlama problemleri meydana gelmektedir.

Soyulma büküm noktası dikkate alınarak yapılan değerlendirme sonucunda, Şekil 22 ve Şekil 32 arasındaki eğriler incelendiğinde 70mm'den daha büyük kalınlıktaki örneklerde soyulma gerçekleşmiştir. CODT'ye göre soyulma büküm noktasının 10000 tekerlek geçişinden erken görülmesi karışımda su hassasiyetinin bir göstergesi olduğu için bu örnekler suya karşı hassas olarak değerlendirilmektedir.

Hamburg tekerlek izi testi her kalınlıktan iki örnek hazırlanarak yapıldı. Örneklerin ortalaması alınarak her bir kalınlık için Şekil 33'teki tekerlek izi grafiği oluşturuldu.



Şekil 33. Ortalama tekerlek izi eğrilerinin değerlendirilmesi

Tekerlek izi grafiğinde kalıcı deformasyonların değerlendirilmesi eğrilerin ikinci bölgesindeki sünme eğimine göre yapılmaktadır. Şekil 33'te verilen eğrilere göre 40 mm kalınlığındaki örnek en yüksek deformasyon direncini göstermiştir. Kaplama kalınlığı ile deformasyon miktarı arasında yüksek bir korelasyon görülmemiştir. 200 tekerlek geçişindeki deformasyon miktarları dikkate alındığında $R^2=0.59$ değerinde bir korelasyon

oluşmuştur. Bu geçişten daha yüksek ve düşük geçişlerde korelasyon değeri azalmaktadır. Hamburg tekerlek izi deneyinde deformasyon miktarı ile kalınlık arasında iyi bir ilişki elde edilememiştir. Fakat genel eğilim kalınlık arttıkça deformasyon miktarının arttığı yönündedir.

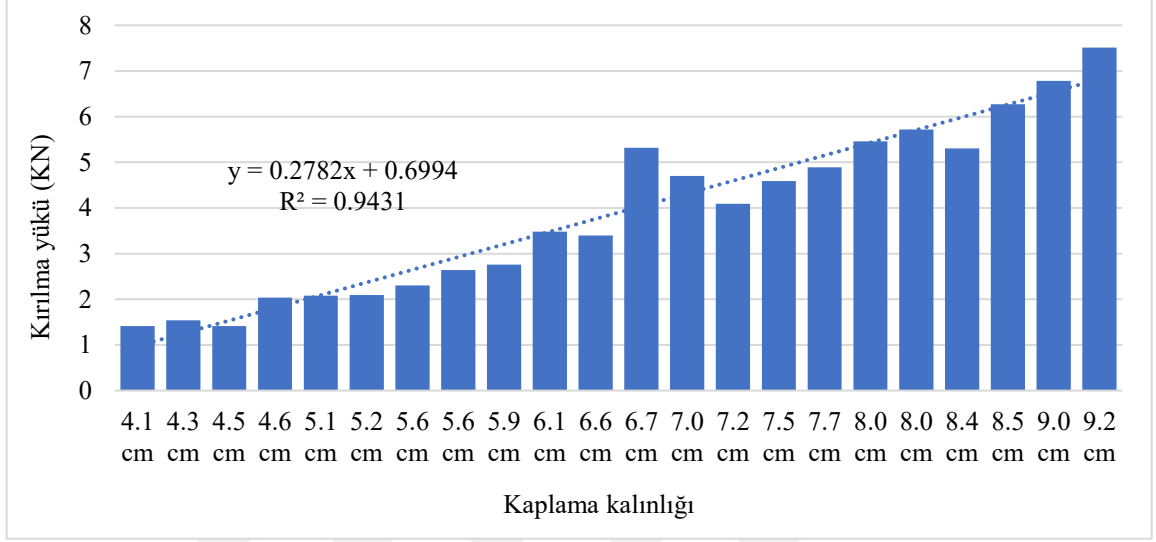
3.3. Kiriş Eğilme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

Kiriş eğilme testi, eğilmeye maruz kalan asfalt kaplama örneklerinin kırılmasına sebep olan maksimum yükü belirlemek için kullanıldı. Kalınlık farkının kırılma yükü üzerindeki etkisi incelendi. Bu sebeple farklı kalınlıklarda kesilip hazırlanan arazi örneklerine Marshal stabilite test cihazı üzerinde kiriş eğilme testi yapıldı. Test sonucunda farklı kalınlıktaki asfalt kaplama örneklerinin kırılmasına sebep olan yük değerleri Tablo 19'da verilmiştir.

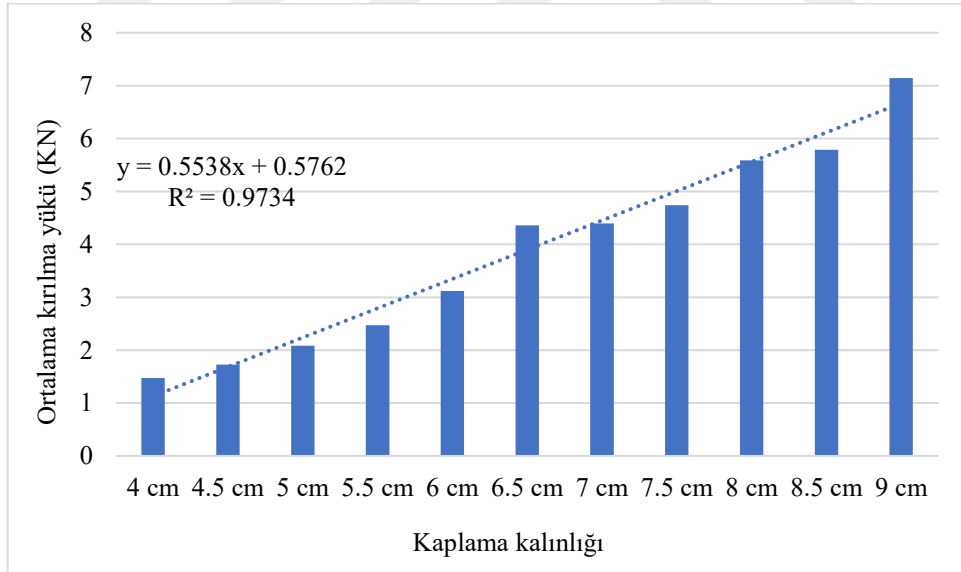
Tablo 19. Kiriş numunelerinin kırılma yükleri

Kiriş numune kalınlığı	Kırılma Yüğü (KN)
4.1 cm	1.41
4.3 cm	1.54
4.5 cm	1.41
4.6 cm	2.04
5.1 cm	2.08
5.2 cm	2.09
5.6 cm	2.3
5.6 cm	2.64
5.9 cm	2.76
6.1 cm	3.48
6.6 cm	3.4
6.7 cm	5.32
7.0 cm	4.7
7.2 cm	4.09
7.5 cm	4.59
7.7 cm	4.89
8.0 cm	5.46
8.0 cm	5.72
8.4 cm	5.3
8.5 cm	6.27
9.0 cm	6.78
9.2 cm	7.51

Belirlenen yükleme değerlerinin kalınlık üzerindeki değişiminin irdelenmesi için Şekil 34 ve Şekil 35'te grafik haline getirildi.



Şekil 34. Kiriş numunelerinin kırılma yükü değerleri



Şekil 35. Kiriş numune ve kırılma yükünün ortalama değerleri

Şekil 34'te farklı kalınlıktaki tüm örneklerin eğilme anındaki kırılma yükleri grafik haline getirildi. Ardından alınan ortalama değerlerle Şekil 35'te ortalama kırılma grafiği oluşturuldu. Grafiklere regresyon analizi yapılarak kaplama kalınlığı ve eğilme anındaki kırılma yükü değerleri arasındaki ilişkinin matematiksel model denklemi belirlendi.

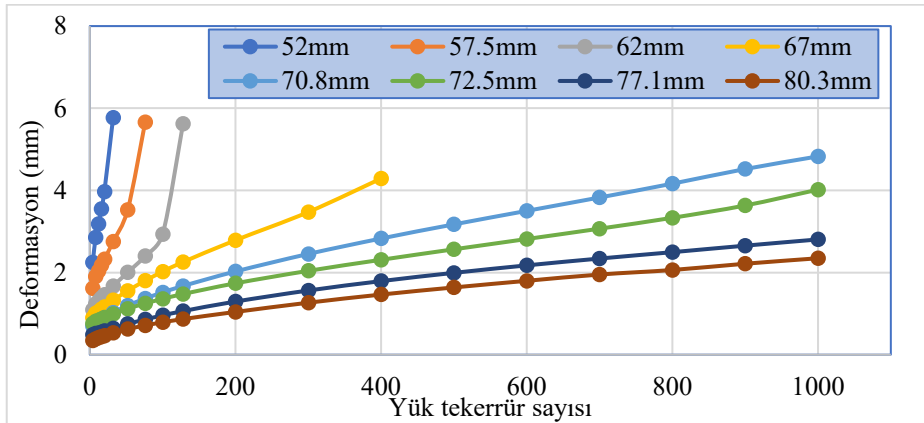
Belirlenen model denkleminde x bağımsız değişkeni kaplama kalınlığını, y bağımlı değişkeni ise kırılmaya sebep olan yük değerlerini göstermektedir.

Grafikler incelendiğinde, kalınlık ve kırılma yükleri arasındaki ilişkinin doğrusal bir denklem olduğu ve yüksek korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Bu da sonuçların güvenli olduğunu göstermektedir.

Şekil 34 incelendiğinde 6.7 cm kalınlığındaki örneğin genel eğilimden farklı olarak daha yüksek dayanıma sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca aynı kalınlıklarda olup farklı dayanıma sahip olan örnekler de gözlenmiştir. Gözlemlenen bu farklılıklar, numune alınan kaplamanın maruz kaldığı farklı yüklemelerden veya karışım homojenitesinden kaynaklı olabilir. Bilindiği gibi asfalt kaplamalar, inşa edilmesinden sonra trafik yüklerinin etkisiyle sıkışmaya devam etmektedir. Bu durum kaplamada yoğunluk farkına sebep olmakta ve dayanım üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca karışımın homojenliğindeki farklılık da dayanım üzerinde etkili bir parametredir. Asfalt serim aşamasında yapılan hatalar ve yetersiz sıkıştırma agrega gradasyonunda farklılıklara sebep olmaktadır. Kaplamanın iskelet sisteminde yaşanacak değişiklikler kaplamada farklı dayanımlara yol açmaktadır.

3.4. Tekrarlı Yük Kiriş Eğilme Testine Ait Bulgular ve İrdeleme

Tekrarlı yük eğilme testi araziden kesilip hazırlanan asfalt kaplama numunelerinin kalıcı deformasyon (tekerlek izi) potansiyellerini değerlendirmek için kullanıldı. Farklı kalınlıklarda hazırlanan numunelerin belirlenen yükleme döngüsündeki ortalama deformasyon eğrileri Şekil 36'da görülmektedir.

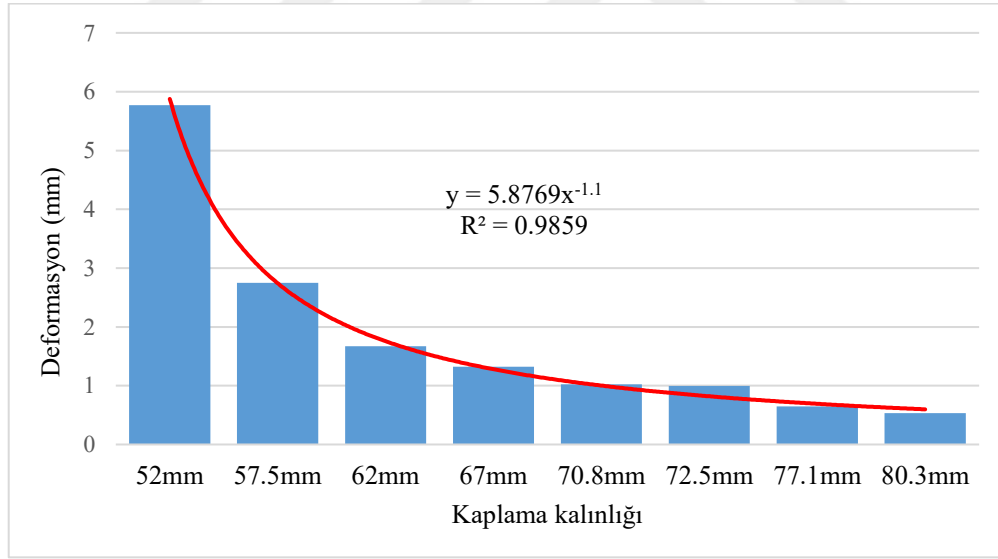


Şekil 36. Ortalama deformasyon eğrileri

Şekil 36’da verilen ortalama deformasyon eğrilerine göre 52, 57.5, 62mm kalınlığındaki örneklerde sünme eğrileri hızlı bir yükselme göstermiş ve maksimum deformasyona ulaşarak örneklerde kırılma gerçekleşmiştir. Bu örneklerde ikinci sünme bölgesi oluşmamıştır. Yük tekrür sayısına göre en erken kırılma, test edilenler arasında kalınlığı en düşük olan 52 mm’lik örnekte gerçekleşmiştir.

Test sonuçlarına göre 32 yükleme döngüsüne karşılık gelen deformasyon miktarları Şekil 37’de gösterilmektedir. Çizilen grafiğe regresyon analizi yapıldı ve kaplama kalınlığı ve deformasyon arasındaki ilişkinin matematiksel model denklemi belirlendi. Belirlenen denklemde x bağımsız değişkeni kaplama kalınlığını, y bağımlı değişkeni ise deformasyon miktarını ifade etmektedir.

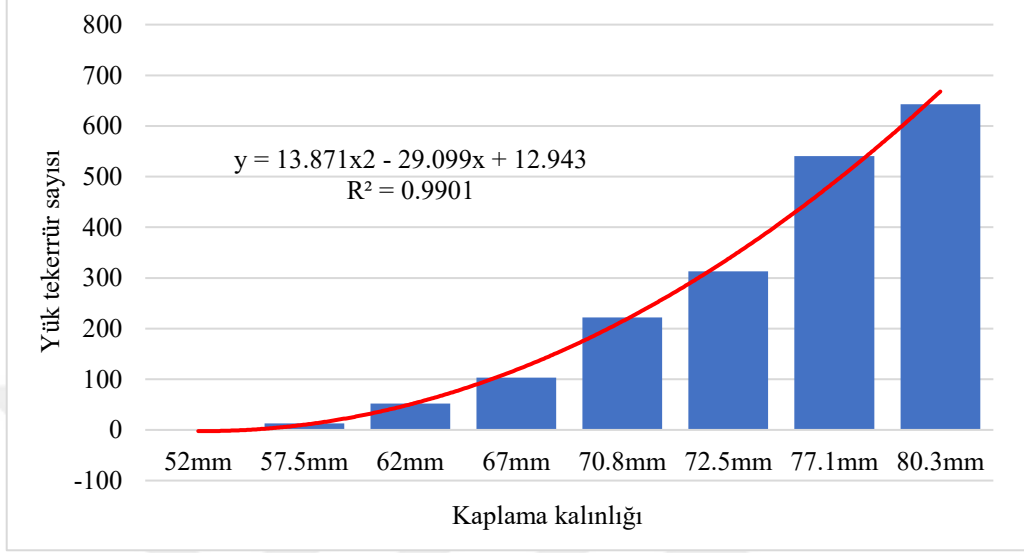
Grafik incelendiğinde kaplama kalınlığıyla deformasyon arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. 67 mm kalınlığındaki örnekten itibaren kaplama kalınlığının artmasıyla çizilen eğrinin eğiminde önemli oranda azalma gerçekleşmiştir. Kaplama kalınlığının artmasıyla deformasyon oranında azalma gözlenmiştir.



Şekil 37. 32 yükleme döngüsüne karşılık gelen deformasyon miktarları

Test sonuçları üzerinden kaplama kalınlığıyla yük tekrür sayısı arasındaki ilişkinin değerlendirmesini yapmak için Şekil 38 oluşturuldu ve regresyon analizi yapıldı. Oluşan eğrinin denkleminde x bağımsız değişkeni kaplama kalınlığını, y bağımlı değişkeni ise tekrür sayısını ifade etmektedir. Analiz sonucuna göre kaplama kalınlığı ile 2 mm

deformasyona denk gelen yük tekrür sayısı arasında oldukça yüksek bir korelasyon görülmüştür. Kaplama kalınlığının artmasıyla deformasyon direncinde artma gözlenmiştir.



Şekil 38. 2mm deformasyona denk gelen yük tekrür sayıları

Hamburg tekerlek izi cihazı asfalt kaplamaların arazi performansını laboratuvar ortamında simüle ederek hem tekerlek izi hem de su hasarının etkisini beraber değerlendirebildiği için performans testlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Hamburg test cihazının arazi koşullarını yansıtmadaki tutarlılığını değerlendirmek için yapılan çalışmada araziden kesilip alınan asfalt kaplama örnekleri Hamburg test cihazında test edilmiştir. Örnek alınan karayolu da tahribatsız test metodlarıyla 5 yıl boyunca test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda arazi üzerinde toplanan performans verileriyle Hamburg test sonuçları arasında iyi bir korelasyon gözlemlenmiştir. Hamburg testinde örneklerde soyulma problemi görülmemiştir. Bu gözleme paralel olarak arazi testinde de soyulma problemi görülmemiştir (Yıldırım ve Stokoe, 2006).

Asfalt kaplamayı oluşturan bileşenlerin kaplama performansı üzerindeki etkilerini değerlendiren bir çalışma yapılmıştır. Farklı içeriklerde hazırlanan karışımların performanslarını değerlendirmek için Hamburg tekerlek izi test cihazı kullanılmıştır. Test sonuçları ile bir veritabanı oluşturularak kaplama örneklerinin tekerlek izi performansları karşılaştırılmıştır. Yapılan analiz sonucuna göre karışım içeriği, bağlayıcı derecesi, agrega tipi ve asfalt kaynağının karışımlara uygulanan Hamburg testindeki toplam tekerlek geçiş sayısı, sünme eğimi ve soyulma eğimi üzerinde önemli derecede etkisinin olduğunu

kanıtlamıştır. Bağlayıcı derecesinin artması karışımların tekerlek izi performansını arttırmıştır. Asfalt kaynağının etkisi değerlendirildiğinde karışımlar aynı içeriğe ve bağlayıcı derecesine sahip olsalar bile farklı rafinelere elde edilen bağlayıcının Hamburg testi sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca kırılmış çakıl içeren karışımların kırma taş karışımlara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Rahman ve Hossain, 2014).

Asfalt karışımının dayanımı kaplama performansı üzerinde önemli bir etkidir. Yol üst yapısının yeterli dayanıma sahip olmaması durumunda kaplama performansı düşerek asfalt kaplamada tekerlek izi, çatlama ve su hasarı problemleri meydana gelmektedir. Kaplamanın dayanımını düşüren ve beraberinde bu tür problemlere sebep olan en önemli etkenlerden biri yaşlanmadır. Yaşlanma asfalt karışımının depolanması, taşınması ve serilmesi sırasında bağlayıcının oksidasyonu olarak başlamakta ve servis ömrü boyunca devam etmektedir. Asfalt film kalınlığının yaşlanma üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada asfalt karışıma yaşlandırma deneylerinin yanında dinamik kesme ve asfalt kiriş eğilme deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda optimum asfalt film kalınlığı 9-10 μ olarak belirlenmiş ve bu değerden düşük film kalınlıklarında yaşlanmanın etkisinin arttığı, 9-10 μ dan yüksek değerlerde ise yaşlanmanın etkisinin değişmediği gözlemlenmiştir (Şengöz ve Açar, 2005).

Kiriş eğilme deneyi; çekme, basınç ve kayma tepkisinin kombinasyonunu içerdiği için kompozit malzemelerin test edilmesinde çok yönlü bir yöntemdir. Eğilme mukavemeti ile numunenin açıklık-kalınlık oranı arasında teorik olarak doğrudan bir ilişki vardır. Klasik kiriş teorisine göre eğilmede numunenin dış katmanlarında maksimum seviyeye ulaşan çekme ve basınç gerilmeleri oluşmakta, kirişin merkezinde ise maksimuma ulaşan kesme gerilmesi oluşmaktadır. Eğilmeye maruz kalan bir kirişin kırılma biçimi açıklık-kalınlık oranına bağlıdır. Sabit bir yükte yüklenen kiriş elemanların eğilme davranışları üzerinde açıklık, genişlik ve kalınlık gibi kiriş geometri parametrelerinin etkisinin incelendiği bir çalışma yapılmıştır. Kiriş açıklığı ve genişliği sabit tutulup farklı kalınlıklarda yapılan testler sonucunda açıklık-kalınlık (l/h) oranının artması sehimi arttırmış fakat numunenin kırılmasına sebep olan maksimum yükü azalttığı gözlemlenmiştir (Racz ve Vas, 2005).

Yorulma çatlakları asfalt kaplamada görülen en önemli bozulma tiplerinden biridir. Asfalt kaplamalarda yorulma testleri kontrollü gerilme ve şekil değiştirme altında asfalt kaplama örneğine uygulanan tekrarlı yüklerle yapılmaktadır. Yorulma direnci tekrarlı yük

altında eğilmeye maruz bırakılan kaplama örneklerinde değerlendirildiği gibi tekerlek testinin de yorulma direncini değerlendirmede etkisinin olduğu araştırılmıştır. Farklı tiplerdeki asfalt karışımlar ile hazırlanan asfalt kiriş örnekleri üzerinde yapılan tekerlek geçiş testi ve yorulma testleri sonucunda tekerlek geçiş testinin tekerlek izi ve su hasarını değerlendirmenin yanında yorulma direnci açısından iyi ve kötü karışım performanslarını ayırt edici bir test olduğunu göstermiştir (Wu vd., 2014).

Eğilmeye maruz kalan asfalt kaplamada çatlaklar görülmeye başladıktan sonra su bu çatlaklardan içeriye girerek kaplamanın bozulmasını hızlandırmaktadır. Bu sebeple asfalt karışımların eğilmede çatlama davranışlarını etkileyen faktörleri incelemek önemlidir. Asfalt karışımların eğilmede kırılma dirençleri üzerinde agrega dayanımının önemli bir etkisi vardır. Farklı dayanımlara sahip agregalarla hazırlanan asfalt kiriş numuneler üzerinde yapılan kiriş eğilme deneyi sonucunda yüksek mukavemetli agrega içeren karışımların en yüksek eğilme çatlama direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek mukavemetli agregaların kullanılması agrega kırılma alanında azalmaya sebep olarak karışımın eğilmede çatlama direncini arttırmıştır. Ayrıca agrega dayanımı çatlakların yayılma davranışı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir (Xu vd., 2020).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada asfalt tabaka kalınlığının kaplama performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan asfalt kaplama örnekleri arazi koşullarında inşaa edilmiş ve taşıt trafiğine maruz kalmış karayolundan alınmıştır. Asfalt kaplama örnekleri laboratuvarında asfalt kesme makinası ile düzeltilerek 4cm ve 9cm aralığında değişen kalınlıklarda kiriş numuneler hazırlanmıştır. Kaplama kalınlığının değişiminin kaplama performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için hazırlanan örnekler üzerinde Hamburg tekerlek izi testi, deformasyon kontrollü kiriş eğilme testi ve tekrarlı yükleme altında kiriş eğilme testleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar kalıcı deformasyon, su hasarı ve çatlama direnci yönünden değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Numunelerin deformasyon direnci Hamburg tekerlek izi eğrilerinin sünme eğimleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Hamburg tekerlek izi testi sonuçlarına göre 40mm kalınlığındaki örnekler en yüksek deformasyon direncini göstermiştir. Kalınlıkla deformasyon miktarı arasında yüksek bir korelasyon görülmemiştir. 200 tekerlek geçişindeki deformasyon miktarları dikkate alındığında $R^2=0.59$ değerinde bir korelasyon oluşmakta, daha yüksek ve düşük geçişlerde korelasyon da azalmaktadır. Hamburg tekerlek izi deneyinde deformasyon miktarı ile kalınlık arasında iyi bir ilişki elde edilememiştir. Fakat genel eğilim kalınlık arttıkça deformasyon miktarının arttığı yönündedir. Soyulma değerlendirmesi yönünden 70mm'den daha büyük kalınlıklarda soyulma gözlemlenmiştir.

Numunelerin eğilme anındaki çatlama direncini değerlendirmek için kiriş eğilme testleri yapılmıştır. Marshall stabilite test cihazı üzerinde yapılan kiriş eğilme deneyi sonucunda numune kalınlığı arttıkça numunelerin kırılması için gerekli olan yükün de doğrusal bir şekilde arttığı ve kalınlık artışıyla çatlama direncinde de artma olduğu gözlemlenmiştir. Kalınlık ve eğilmede kırılma direnci arasında yüksek bir korelasyon ($R^2=0.9734$) olduğu gözlemlenmiştir.

Tekrarlı yükleme altında yapılan kiriş eğilme deneyi sonucunda da benzer şekilde kalınlığın artmasıyla deformasyon direncinde artma gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlığı ile yük tekerrür sayısı arasındaki ilişkinin değerlendirmesini yapmak için 2mm deformasyona denk gelen yük tekerrür sayısı dikkate alınmıştır. Analiz sonucuna göre kaplama

kalınlığının artması ile numunelerde 2mm deformasyon için gerekli tekerür sayısı artmıştır. Hem kalınlık-deformasyon ilişkisi ($R^2=0.9859$) hem de kalınlık-yük tekerrür sayısı ilişkisi ($R^2=0.9901$) yüksek korelasyon göstererek anlamlı sonuçlara ulaşılmıştır.

Sonraki çalışmalarda arazi koşullarında hazırlanan farklı kalınlıklardaki kaplamaların gerçek trafik ve iklim koşulları altında değişik hizmet periyotlarında arazi performansları değerlendirilerek, kaplama kalınlığı, maliyet, bakım, ömür-döngü maliyetleri arasında bir ilişki araştırılabilir.



5. KAYNAKLAR

- Aschenbrener, T., ve Currier, G., 1993. Influence of Testing Variables on the Results from the Hamburg Wheel-Tracking Device, Final Report No. CDOT-DTD-R-93-22, Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado
- Aschenbrener, T., ve Far, N., 1994. Influence of Compaction Temperature and Anti-stripping Treatment on the Results From the Hamburg Wheel-Tracking Device, Final Report, No. CDOT-DTD-R-94-9, Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado.
- Aschenbrener, T., 1995. Evaluation of Hamburg wheel-tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt, Transportation Research Record, 1492, 193.
- Beecroft, A., ve Petho, L., 2015. P3 Commissioning of Hamburg Wheel Tracking Device (HWDT), National Asset Centre of Excellence, Final Rep. Project, 007180, Australia.
- Brown, E.R., Kandhal, P.S. ve Zhang, J., 2001. Performance Testing for Hot Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology Report No. 01-05, Auburn University, Alabama.
- California Department of Transportation, 2001. Flexible Pavement Rehabilitation Manual, California.
- Central Massachusetts Regional Planning Commission, 2006. Pavement Management Field Guide to Road Surface Distresses, Central Massachusetts Metropolitan Planning Organization (CMMPO), Massachusetts.
- Cross, S. A., Shitta, H., ve Workie, A., 2013. Evaluation of the Hamburg Rut Tester And Moisture Induced Stress Test (MIST) for Field Control of Hot Mix Asphalt (HMA) in Oklahoma, No. FHWA-OK-13-01), Oklahoma State University. School of Civil & Environmental Engineering.
- Dave, E. V., Daniel J. S., Mallick, R. B., DeCarlo, C., Veeraragavan, R. K. ve Kottayi N. M., 2018. Moisture Susceptibility Testing for Hot Mix Asphalt Pavements in New England, New England Transportation Consortium, Report No. NETCR 109.
- Dong, N., Ni, F., Zhou, L., ve Ma, X., 2019. Comparison of the Hamburg, Indirect Tensile, And Multi-Sequenced Repeated Load Tests for Evaluation of HMA Rutting Resistance, Construction and Building Materials, 216, 588-598.
- Garba, R., 2002. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Thesis of PhD, Norwegian University of Science and Technology, NTNU.

- He, D., ve Yang, W., 2018. Effect of Thickness of Gravel Base and Asphalt Pavement on Road Deformation, Advances in Civil Engineering, 2018, 1-7.
- Hergüner, A. T., 2009. Türkiye Otoyol Ağı İçin Üstyapı Yönetim Sistemi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hicks, R. G., 1991. Moisture damage in asphalt concrete, NCHRP Synthesis of Highway Practice, 175
- Hicks, R. G., Santucci, L., ve Aschenbrenner, T., 2003. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements-A National Seminar, February 4-6, San Diego, California.
- Huerne, H. L., Dorée, A. G., ve Miller, S. R., 2009. Monitoring Hot Mix Asphalt Temperature to Improve Homogeneity And Pavement Quality, In the Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 8-10 July, Torino, Italy.
- Hussan, S., Kamal, M. A., Hafeez, I., ve Ahmad, N., 2019. Comparing and Correlating Various Laboratory Rutting Performance Tests, International Journal of Pavement Engineering, 20, 10, 1239-1249.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., ve Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, 1, 280.
- Izzo, R. P. ve Tahmoressi, M., 1998. Evaluation of the Use of the Hamburg Wheel-Tracking Device for Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt, Report No. DHT-45, Texas Department of Transportation, Construction Division/Bituminous Branch.
- İncegöl, M., 2010. Türkiye’de Esnek Üstyapı Bozulmalarının Çevre Etkileri Göz Önüne Alınarak Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İskender, C., 2017. Cam Agrega Boyutu ve Agrega Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İskender, E., ve Aksoy, A., 2012. Field and Laboratory Performance Comparison for Asphalt mixtures with different moisture conditioning systems, Construction and Building Materials, 27, 1, 45-53.
- İskender, E., 2019. Asfalt Kaplama Kalınlığının Karışım Homojenitesi Üzerindeki Etkisi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9, 4, 681-690.

- İyınam vd., 2001. Karayolu Üstyapı Bakım Çalışmalarında Uygulanan Gelişmiş Ölçüm Sistemleri, 5. Ulaştırma Kongresi Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 325-336
- Kaçmaz, B., Topal, A., Şengöz, B., ve Tanyel, S., 2015. Farklı Tip Esnek Kaplamaların Yol Yüzey Özelliklerinin Arazi Ölçümleriyle Değerlendirilmesi, İMO Teknik Dergi, 436, 7115-7137.
- KGM, 2019. Faaliyet Raporu
- KTŞ, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Khawaja, H., ve Tanveer, A., 2018. Review Of Low-Temperature Crack (LTC) Developments in Asphalt Pavements, The International Journal of Multiphysics, 2, 12, 169-187.
- Kutluhan, S., 2008. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kutluhan, S., ve Ağar, E., 2009. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Faktörler ve Azaltmaya Yönelik Öneriler, İtüdergisi/d, 8, 6, 179-191.
- Lu, Q., ve Harvey, J. T., 2006. Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device Test With Laboratory and Field Performance Data, Transportation Research Record, 1970, 1, 25-44.
- Lv, Q., Huang, W., Sadek, H., Xiao, F., ve Yan, C., 2019. Investigation of the Rutting Performance of Various Modified Asphalt Mixtures Using the Hamburg Wheel-Tracking Device Test and Multiple Stress Creep Recovery Test. Construction and Building Materials, 206, 62-70.
- Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Sadek, H., Zhang, Y., ve Yan, C., 2020. Influence of Gradation on Asphalt Mix Rutting Resistance Measured by Hamburg Wheel Tracking Test, Construction and Building Materials, 238, 117674.
- Mahmoodinia, N., Molayem, M., ve Fardealirezaei, A., 2016. Investigating the Permanent Deformation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures in Repeated Load Creep Tests, In International Conference on Transportation and Development 2016, 981-992.
- Múčka, P., 2017. International Roughness Index Specifications Around the World. Road Materials and Pavement Design, 18, 4, 929-965.
- Muraya, P. M., 2007. Permanent Deformation of Asphalt Mixes, Master of Science in Road Engineering, Delft University of Technology, Netherlands.

- Oshone, M., E.V. Dave, J.S. Daniel, and G.M. Rowe., 2018. Assessment of Various Approaches to Determining Binder Bending Beam Rheometer Low Temperature Specification Parameters from Dynamic Shear Rheometer Test, Asphalt Paving Technology, 87, 345-374.
- Özen, H., 2011. Rutting Evaluation of Hydrated Lime and SBS Modified Asphalt Mixtures for Laboratory and Field Compacted Samples, Construction and Building Materials, 25, 2, 756-765.
- Öztürk, H. I., 2007. Parametric study on selected mathematical models for dynamic creep behavior of asphalt concrete, Master of Science, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Pszczola, M., Jaczewski, M., Rys, D., Jaskula, P., ve Szydłowski, C., 2018. Evaluation of Asphalt Mixture Low-temperature Performance in Bending Beam Creep Test, Materials, 11, 1, 100.
- Racz, Z. S., ve Vas, L. M., 2005. Relationship Between the Flexural Properties and Specimen Aspect Ratio in Unidirectional Composites, Composite Interfaces, 12, 3-4, 325-339.
- Radhakrishnan, V., Chowdari, G. S., Reddy, K. S., ve Chattaraj, R., 2019. Evaluation of Wheel Tracking and Field Rutting Susceptibility of Dense Bituminous Mixes, Road Materials and Pavement Design, 20, 1, 90-109.
- Rahman, F., ve Hossain, M., 2014. Review and analysis of Hamburg Wheel Tracking Device Test Data, No. KS-14-1, Kansas Department of Transportation, Bureau of Materials & Research.
- Rahman, M. M., Grenfell, J. R. A., Arulanandam, S. J., ve Ianakiev, A., 2013. Influence of Thermal Segregation on Asphalt Pavement Compaction, Transportation Research Record, 2347, 1, 71-78.
- Saeidi, H., ve Aghayan, I., 2016. Investigating the Effects of Aging and Loading Rate on Low-Temperature Cracking Resistance of Core-based Asphalt Samples Using Semi-circular Bending Test, Construction and Building Materials, 126, 682-690.
- Scherocman, J. A., ve Walker, D. 2008. Factors Affecting Asphalt Compaction. Asphalt Institute, 23, 1, 19-21.
- Sel, I., Yildirim, Y., ve Ozhan, H. B., 2014. Effect of Test Temperature on Hamburg Wheel-Tracking Device Testing, Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 8, 04014037.
- Shen, J., Kim, S., ve Jeong, M. M., 2017. Evaluation of Georgia Asphalt Mixture Properties Using a Hamburg Wheel-tracking Device, No. GDOT Research Project No. 15-03, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia.

- Sousa, J. B., Craus, J., ve Monismith, C. L., 1991. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete, Strategic Highway Research Program, No. SHRP-A-318, Washington, D.C.
- Stevenson, J. D., ve Aschenbrener, T., 1994. Comparison of Test Results From Laboratory and Field Compacted Samples, Report No. CDOT -DTD-R-94-3, Colorado Department of Transportation, Denver, Colorado
- Stroup-Gardiner, M., Nixon, J., ve Das, P., 2004. Automated Temperature Profiling During Hot-Mix Asphalt Construction, Transportation Research Record, 1900, 1, 41-49.
- Şengöz, B., ve Ağar, E., 2005. Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına Etkisi, İtüdergisi/d, 4, 1, 71-82.
- Ulmgren, N., 1996. Functional Testing of Asphalt Mixes for Permanent Deformation by Dynamic Creep Test Modification Of Method And Round Robin Test. In Eurasphalt & Eurobitume Congress, 7-10 May, Strasbourg.
- Uluçaylı, M. ve Yavuz, A., 2002. Asfalt El Kitabı, İSFALT Bilimsel Yayın No:2, İstanbul, 573s.
- URL-1, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/moisture-susceptibility/> Moisture Susceptibility. 12 Ocak 2020
- URL-2, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/hma-performance-tests/> HMA Performans Test. 18 Ocak 2020.
- URL-3, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/construction/> Construction. 25 Şubat 2020.
- URL-4, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/construction/placement/aggregate-segregation/> Aggregate Segregation. 10 Mart 2020.
- Usluoğulları vd., 2013. Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI) Değerleri Kullanılarak Asfalt Betonlu Yolların Performansının Değerlendirilmesi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, 27-28 Kasım, Ankara.
- Valle, P.D., ve Thom, N., 2015. Variability in pavement design, International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology, 16, 2, 50-67.
- Valle, P.D. ve Thom, N., 2016. Reliability in Pavement Design, In 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague.
- Valle, P. D., ve Thom, N., 2020. Pavement Layer Thickness Variability Evaluation and Effect on Performance life, International Journal of Pavement Engineering, 21, 7, 930-938.

- Walubita, L. F., Zhang, J., Das, G., Hu, X., Mushota, C., Alvarez, A. E., ve Scullion, T., 2012. Hot-Mix Asphalt Permanent Deformation Evaluated by Hamburg Wheel Tracking, Dynamic Modulus, And Repeated Load Tests, Transportation Research Record, 2296, 1, 46-56.
- Walubita, L. F., Fuentes, L., Lee, S. I., Dawd, I., ve Mahmoud, E., 2019. Comparative Evaluation of Five HMA Rutting-Related Laboratory Test Methods Relative to Field Performance Data: DM, FN, RLPD, SPST, and HWTT, Construction and Building Materials, 215, 737-753.
- Walubita, L. F., Fuentes, L., Prakoso, A., Pianeta, L. M. R., Komba, J. J., ve Naik, B., 2020. Correlating the HWTT laboratory test data to field rutting performance of in-service highway sections, Construction and Building Materials, 236, 117552.
- Wu, H., Huang, B., ve Shu, X., 2014. Characterizing Fatigue Behavior of Asphalt Mixtures Utilizing Loaded Wheel Tester, Journal of Materials In Civil Engineering, 26, 1, 152-159.
- Xu, W., Wei, X., Wei, J., ve Chen, Z., 2020. Experimental Evaluation of the Influence of Aggregate Strength on the Flexural Cracking Behavior of Epoxy Asphalt Mixtures, Materials, 13, 8, 1876.
- Yayla, N., 2006. Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 285s.
- Yildirim, Y., ve Kennedy, T. W., 2001. Correlation of Field Performance to Hamburg Wheel Tracking Device Results, No. FHWA/TX-04/0-4185-1, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin.
- Yildirim, Y., and Stokoe, K., 2006. Analysis Of Hamburg Wheel Tracking Device Results in Relation to Field Performance, Report No. FHWA/TX-06/0-4185-5, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin.
- Yin, A., Yang, X., Zeng, G., ve Gao, H., 2014. Fracture Simulation of Pre-cracked Heterogeneous Asphalt Mixture Beam with Movable Three-point Bending Load, Construction and Building Materials, 65, 232-242.
- Yumrutaş, H. İ., 2009. Karayollarında Sıkıştırma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zeng, G., Yang, X., Chen, L., ve Bai, F., 2016. Damage Evolution and Crack Propagation in Semicircular Bending Asphalt Mixture Specimens, Acta Mechanica Solida Sinica, 29, 6, 596-609.
- Zhou, F., ve Scullion, T., 2002. Discussion: Three stages of permanent deformation curve and rutting model, International Journal of Pavement Engineering, 3, 4, 251-260.

Zhou, F., Chen, D. H., Scullion, T., ve Bilyeu, J., 2003. Case study: Evaluation of laboratory test methods to characterize permanent deformation properties of asphalt mixes, International Journal of Pavement Engineering, 4, 3, 155-164.

Zhu, L. Y., ve Fwa, T. F., 2006. Rutting potential evaluation of asphalt mixtures by repeated-load creep test, International Journal of Highway Engineering, 8, 3, 21-28.



ÖZGEÇMİŞ

Alper SEYMEN, 1991 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğretimini 24 Şubat İlköğretim Okulu'nda, ortaöğretimini Trabzon Lisesi'nde tamamladıktan sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Yabancı dil olarak iyi derecede İngilizce bilmektedir.

