



ASFALT KAPLAMALARDA TABAKA KALINLIĞININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Erol İSKENDER¹, Alper SEYMEN², Atakan AKSOY³

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Asfalt Kaplama,
Arazi Performansı,
Kiriş Örnek,
Kiriş Eğilme Deneyi,
Tekerlek İzi Deneyi.*

Öz

Bu çalışmada, arazi koşullarında gerçek silindir sıkıştırması ile üretilerek yaşlanmış kaplamaların kalınlıklarının deformasyon, çatlama direnci ve su hasarı direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan örnekler, 40mm ile 90mm arasında değişen kalınlıklarda, yol kaplamasından kesilerek alınmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi ve tekrarlı-yük kontrollü kiriş eğilme deneyi kaplama örneklerine yapılmıştır. Kaplama özelliklerinin kalınlık değişiminden önemli oranda etkilendiği görülmüştür. Kaplama kalınlığının artması ile deformasyon miktarı da artmış ancak Hamburg tekerlek izi deneyinden elde edilen deformasyon ve su hasarı direnci ile kaplama kalınlığı arasında yüksek korelasyon oluşmamıştır. Hamburg tekerlek izi deneyinde 70mm'den daha kalın örneklerde soyulma büküm noktaları oluşmuştur. Deformasyon kontrollü ve tekrarlı yük kontrollü kiriş eğilme deneylerinde, kaplama kalınlığının artması ile kırılmaya neden olan yük ve aynı miktarda deformasyonun oluşması için gereken yük te artmıştır. Regresyon analizlerinde, kırılma yükü-kaplama kalınlığı ve deformasyon-kaplama kalınlığı arasındaki ilişimde sırasıyla $R^2=0.9734$ ve $R^2=0.9859$ korelasyon katsayıları oluşmuştur.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COURSE THICKNESS IN ASPHALT PAVEMENT

Keywords

*Asphalt Pavement,
In-situ Performance,
Beam Sample,
Beam Bending Test,
Wheel Tracking Test.*

Abstract

In this study, the effect of asphalt pavement thickness on deformation, cracking and water damage resistances was investigated on aged pavement produced by real roller compaction under field conditions. The samples used were cut from the pavement in thicknesses ranging from 40mm to 90mm. Hamburg wheel tracking test (HWTT), deformation-controlled beam bending test and repeated-load controlled beam bending test were performed on pavement samples. It has been observed that the pavement properties are significantly affected by the thickness change. With the increasing thickness of the pavement, the amount of deformation also increased, but there was no high correlation between the deformation and water damage resistance obtained from the HWTT and the pavement thickness. In the HWTT, stripping behaviors were observed in samples thicker than 70mm. In deformation-controlled and repeated load-controlled beam bending tests, the load causing the fracture and the load required for the formation of the same amount of deformation increased with the increase of the pavement thickness. $R^2=0.9734$ and $R^2=0.9859$ correlation coefficients, respectively, were formed in the correlation between fracture load-pavement thickness and deformation-pavement thickness.

Alıntı / Cite

İskender, E., Seymen, A., Aksoy, A., (2022). Asfalt Kaplamalarda Tabaka Kalınlığının Etkisinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 61-73.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. İskender, 0000-0001-7934-839X	Başvuru Tarihi / Submission Date	30.04.2021
A. Seymen, 0000-0003-2242-603X	Revizyon Tarihi / Revision Date	20.08.2021
A. Aksoy, 0000-0001-5232-6465	Kabul Tarihi / Accepted Date	22.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Nüfusun, araç sayısının ve hareketliliğin artması, üretim - tüketimin ve teknolojinin artmasıyla araç dingil yüklerinin yükselmesi, kent merkezlerinde yapılaşmanın ve yoğunluğun artması, büyük oranda asfalt kaplamalardan oluşan yol ağında daha yüksek gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilmeler, kaplamalarda çatlama, yorulma, deformasyon ve su hasarı gibi bozulmalara yol açmaktadır.

Yeni yapılan veya yenilenen kaplamalar bozulmalara karşı daha dirençli tasarlanmaktadır. Bu amaçla, güncel kaplama teknikleri kullanılabilir veya gelişmiş katkı maddeleri tercih edilebilmektedir (Katanalp vd., 2019). Malzeme seçimi ve karışım tasarımı kaplamadan beklenen performansın oluşmasında anahtar rol oynamaktadır. Örneğin, literatürde (Karahancer vd., 2018), karışım tasarımında kullanılan karıştırma ve sıkıştırma gibi aşamaların uygulama koşullarına benzerlik göstermesi gerektiğine vurgu yapılmaktadır. Ancak kaliteyi garanti altına alan süreçlerden birisi de inşaat aşamasıdır. Tasarlanan asfalt karışımının laboratuvar ile arazi performansı arasında yüksek ilişki olmalıdır. Yüksek dereceli ilişki, laboratuvar ve arazi donanımlarının benzer özelliklere sahip olması, eksiksiz bir inşaat yöntemi ve kalite - kontrol mekanizması ile mümkündür.

Kaplama malzemelerinin, ortamın, yapım ve yükleme sürecinin kaplama performansını etkilediği bilinmektedir. Bu parametrelerin her birinde 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 yönelmektedir. Literatürde yer alan bir çalışmada, yapım süreci boyunca bu değişkenliklerin etkisi ve bunların kaplama ömrü üzerindeki etkileri olasılık dağılımı üzerinden ele alınmış, öngörülen yorulma ve deformasyon performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin asfalt kaplamanın rijitlik modülü, granül alt temel kalınlığı ve asfalt kaplama kalınlığı olduğu görülmüştür (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, bir otoyol kaplaması inşaatı için diğer tüm değişkenler sabit tutulurken kaplama kalınlığındaki değişkenliğin bir fonksiyonu olarak kaplamanın yorulma ömrü ve deformasyon potansiyeli değerlendirilmiş; kaplama kalınlığı yönetmelikte izin verilen tolerans değerleri arasında kalsa bile kalınlıktaki değişimlerin kaplama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (Valle ve Thom, 2020).

Karayolu inşaatında bir yol bölümü için belirli bir tasarım kalınlığı seçilmiş olsa bile uygulamada kalınlık inşaat sürecine bağlı nedenlerden genellikle sabit tutulamamaktadır. Kaplama tabakası kalınlığının hedeflenen kalınlığa yüksek oranda yakın bir dağılım göstermesi beklenir. Literatürde yer alan bir çalışmada, bir karayolunun 1000 m'lik bir bölümünde kaplama kalınlıkları yeraltı radarıyla ölçülmüş, asfalt kaplama kalınlığının yol boyunca değiştiği görülmüştür (Valle ve Thom, 2016).

Diğer bir çalışmada, farklı kalınlıklarda temel ve kaplama tabakaları ile deneme kesimleri inşa edilmiş, asfalt kaplama ve temel tabakası kalınlığının yol yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneme kesiminde, temel tabakası kalınlığı 20, 40 ve 60cm olarak, kaplama tabakası kalınlığı da 10, 15, 18 ve 20cm olarak uygulanmıştır. Kaplama tabakası kalınlığı sabit tutulduğunda temel tabakası kalınlığının artmasıyla düşey deformasyonun azaldığı ancak temel tabakası kalınlığı sabit tutulup asfalt kaplama kalınlığı arttığında deformasyon miktarının da arttığı görülmüştür (He ve Yang, 2018).

Asfalt karışımların mekanik özelliklerini değerlendirmede, örnek boyutu ve yükleme modeli yüksek öneme sahiptir (Mohmoodinia vd., 2016). Polonya da yapılan bir çalışma, asfalt karışım örnekleri üzerinde yapılan kırış eğilme testinin asfalt kaplamanın performansını değerlendirmede önemli sonuçlar verdiğini göstermiştir (Pszczola vd., 2018). Aynı çalışmada, bitüm kaynağının ve üretim sürecinin, asfalt karışımların düşük sıcaklık performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve bu etkinin bağlayıcı modifikasyonunun ve karışımında kullanılan agrega iskeletinin etkisiyle karşılaştırılabilir derecede önemli olduğu; aynı asfalt bağlayıcı ile üretilen farklı asfalt karışımların farklı düşük sıcaklık performansları sağlayabileceği ve yalnızca bitüm testine dayanan analizlerle düşük sıcaklık performansının sağlıklı bir şekilde değerlendirilemeyeceği ifade edilmiştir (Pszczola vd., 2018). Asfalt kaplamalarda, agreganın yüksek mukavemeti nedeniyle çatlama ihtimali asfalt mastiğin çatlama ihtimaline göre oldukça düşüktür. Çatlak oluşma biçiminin, kaplamanın çatlama davranışı üzerinde önemli bir

etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Asfalt kaplamaların çatlama davranışlarının araştırıldığı bir çalışmada, 29 cm uzunluğunda ve 5cm kalınlığında kiriş geometrilili asfalt kaplama örnekleri kullanılmış, 5°C sıcaklıkta ve 2 mm/dk yükleme hızında kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kaplama örneklerinde önceden gelişen çatlak yerinin ve şeklinin ve kaba agregada dağılımının örneklerin çatlama davranışını etkilediği, oluşan tüm çatlakların asfalt mastik içinde veya agregada mastik ara yüzeyinde geliştiği ancak agregaların üzerinden geçmediği görülmüştür (Yin vd., 2014).

Asfalt karışımların arazi ve laboratuvar performansları arasındaki ilişkinin kullanılan testlerle ortaya konulabilmesi asfalt kaplamaların arazi performansını garanti alan süreçlerden birisidir. Tekerlek izi testleri, sünme deneyleri, düşük sıcaklık çatlama deneyleri ve su hasarı deneyleri karışım özelliklerinin laboratuvarında değerlendirilmesinde kullanılabilir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, hizmet vermekte olan bir karayolunun farklı bölümlerinde oluşan gerçek deformasyonlar ile aynı asfalt karışımın Hamburg tekerlek izi deneyi ile laboratuvarında bulunan değerleri karşılaştırılmıştır. Asfalt karışımların saha performansları ile Hamburg deney sonuçlarının uyumlu olduğu, Hamburg tekerlek izi deneyinin bitümlü sıcak karışımların saha performanslarının değerlendirilmesi için iyi bir simülasyon olduğu ifade edilmiştir (Walubita vd., 2020; Radhakrishnan vd., 2019).

Literatürde, karışım türü, tekerlek geçiş hızı, yükleme gerilmesi ve sıcaklık değişkenleri ile araştırmalar yapılmış; tekrarlı yük sünme testi sonuçlarının tekerlek izi deneyi ile benzerlik gösterdiği, her iki deneyden elde edilen grafiklerinin benzer olduğu, iki deneyden elde edilen sonuçlar arasında yüksek korelasyon olduğu görülmüştür (Zhu ve Fwa, 2006; Hussan vd., 2019). Tekrarlı yük sünme ve Hamburg tekerlek izi deneylerinin araziden alınan örneklerin performans seviyelerini ayırt edebildiği ve bu deneylerden elde edilen deformasyon değerlerinin, arazideki tekerlek izi performansının kabul edilebilir bir göstergesi olduğu ifade edilmektedir (Zhou vd., 2003).

Bu çalışmanın amacı, asfalt kaplama kalınlığının, kaplamanın performansı üzerindeki etkisinin kiriş örnekler kullanılarak, deformasyon kontrollü eğilme, tekrarlı-yük kontrollü eğilme ve Hamburg tekerlek izi deneyi ile değerlendirilmesidir. Arazi koşullarında gerçek silindir ile sıkıştırılmış asfalt karışım örnekleri kullanılarak, asfalt kaplamanın çatlama direnci, deformasyon ve su hasarı direnci yönünden değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzeme (Material)

Araştırmada, arazi koşullarında finişer ile serilip gerçek silindir ile sıkıştırılmış asfalt kaplama örnekleri kullanılmıştır. Kaplama örnekleri Trabzon ili, Of ilçesinden alınmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre, Trabzon ilinin ortalama yıllık sıcaklığı 14.7°C, ortalama yağışlı gün sayısı 149.8 gün, aylık ortalama yağış miktarı 830mm ve ortalama günlük güneş alma süresi ise 4.5 saat olarak verilmektedir (MGM, 2021). Kaplama örneklerinin alındığı yolda trafik sayım bilgisi bulunmamaktadır. Toplayıcı yol niteliğindeki yol kesiminden, yolun araçların kullanmadığı bölgesinden örnekler alınmıştır.

Tablo 1. Bazalt agregasının özellikleri (Properties of basalt aggregate)

AGREGA ÖZELLİĞİ	DEĞER
Aşınma Kaybı (%)	18.1
Hava Etkilerine Dayanıklılık (%)	1.43
Su Absorbsiyon % (Kaba Agregada)	0.64
Su Absorbsiyon % (İnce Agregada)	1.07
Yassılık İndeksi	19.2
Kaba Agregada Özgül Ağırlığı	2.785
Kaba Agregada Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.835
İnce Agregada Özgül Ağırlığı	2.770
İnce Agregada Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.855
Filler Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.871
Soyulmaya Karşı Mukavemet	
Katkısız Bitüm İle	40-45
Katkılı Bitüm İle	70-75

Kaplama tasarım bilgilerine üretici firma kayıtlarından ulaşılmıştır. Asfalt karışım üretiminde, 50/70 penetrasyon dereceli ve 1.035 özgül ağırlıklı asfalt çimentosu ile bazalt agregası kullanılmıştır. Bazalt agregasının özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bazalt agregası (12-19mm), (5-12mm) ve (0-5mm) olarak üç grupta üretilmiştir. Aşınma tabakası için asfalt betonu tasarımında kullanılacak agrega gradasyonu Karayolları Teknik Şartnamesine (KGM, 2006) uygun olarak belirlenmiş, agrega tane boyutu dağılımı Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımı (Grain size distribution based on design)

ELEK AÇIKLIĞI MM	(12-19) MM GEÇEN %	(5-12) MM GEÇEN %	(0-5) MM GEÇEN %	KARIŞIM GEÇEN %	ŞARTNAME LİMİTİNE GÖRE (KGM, 2006) GEÇEN %
19.1	100	100	100	100	100
12.5	16.1	100	100	90.8	83-100
9.52	1.1	74.2	100	77.0	70-90
4.76	0.5	8.5	100	46.1	40-55
2.00		1.0	70	29.9	25-38
0.42		0.4	31.7	13.5	10-20
0.177			23.7	10.0	6-15
0.075			16	6.7	4-10

Asfalt karışım üretiminde, 50/70 penetrasyon dereceli ve 1.035 özgül ağırlıklı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Karışım tasarımı ASTM D 1559 standardına göre Marshall metodu ile yapılmış ve optimum bitüm içeriği %5.20 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriğindeki karışım özellikleri Tablo 3’te özetlenmiştir.

Tablo 3. Asfalt karışımın optimum bitüm içeriğindeki mühendislik özellikleri (Engineering properties of the asphalt mix in optimum bitumen content)

KARIŞIM ÖZELLİĞİ	DEĞER
Optimum Bitüm Oranı, %	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

Tasarımı yapılan asfalt karışımlar, arazi koşullarında serilip sıkıştırıldıktan sonra 8 yıl hizmet etmiştir. Asfalt kaplama örnekleri laboratuvarında değerlendirilmek üzere yol yüzeyinden, araçların az kullandığı yol kenarından, örselenmeden kesilerek alınmıştır. Örnekler, standart boyutlarda kesilmeden önce ve kesildikten sonra dikkatlice incelenmiş, hasarlı oldukları düşünülenler elenerek sonraki deneylerde kullanılmamıştır. Literatürde (Batioja-Alvarez, 2020), özellikle Hamburg tekerlek izi deneyi için sahadan alınan örneklerin tıraşlanması önerilmektedir. Bu nedenle, tıraşlama işlemi kaplama örneğinin alt yüzeyine yapılmıştır. Örnekler, uzunluğu 36cm, genişliği 10cm olacak şekilde asfalt testeresi ile ıslak kesim yapılarak hazırlanmıştır. Kaplama kalınlıkları 4cm’den 9cm’ye kadar 0.5cm aralıklarla artış olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan giriş örneklerden bir görüntü Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı kalınlıklarda hazırlanan asfalt kaplama örnekleri (Asphalt mixture samples prepared in different thicknesses)

2.2. Yöntem (Method)

Çalışmada farklı kalınlıklardaki asfalt kaplama kiriş örnekleri kullanılarak Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi ve tekrarlı yük kontrollü eğilme deneyi uygulanmıştır.

2.2.1. Hamburg Tekerlek İzi Testi (Hamburg Wheel Tracking Test)

Hamburg tekerlek izi testi, araziden alınmış veya laboratuvar ortamında üretilmiş asfalt kaplama örneklerinin tekerlek izi ve su hasarı direncini belirleyen tahribatlı bir yöntemdir. Örnekler kuru ortamda veya su dolu hazne içerisinde test edilebilmektedir. Deney kabini veya su haznesi istenilen sıcaklığa ayarlanabilmektedir. Deneylerde, sahadan alınmış ya da laboratuvar ortamında üretilmiş silindirik veya dikdörtgen geometrili örnekler kullanılabilir. Deney aleti için özel tasarlanmış kalıpların içerisine yerleştirilen kaplama örneklerinin üzerinden deney aletinin çelik tekerleklerinin belirlenen periyottaki geçişiyle deney yapılmaktadır. Literatürde, deneyin su içerisinde yapılması durumunda, deneyin hem tekerlek izi hem de su hasarı değerlendirmesine olanak sağladığı ifade edilmektedir (Lu ve Harvey, 2006). Deney yöntemi, çeşitli asfalt karışımların su hasarı ve tekerlek izinin birleştirilmiş etkisini ölçebildiği ve hızlı ve güvenilir sonuçlar sunduğu için popülerlik kazanmıştır (Yıldırım vd., 2007).

Hamburg tekerlek izi deneyi sonucunda oluşturulan deformasyon eğrisi grafiğinden dört değer elde edilebilmektedir: ilk sıkışma, sünme eğimi, soyulma büküm noktası ve soyulma eğimi (Yıldırım ve Kennedy, 2001). Tekerlek, örnek üzerinde ilk 1000 geçiş ile karışımı yoğunlaştırır, bu süre içerisinde oluşan deformasyon ilk sıkışma olarak kabul edilir. İlk sıkışmadan sonra başlayan, deformasyon eğrisinin lineer olduğu bölge sünme eğimi olarak adlandırılır. Sünme eğiminden sonra oluşan ikinci lineer bölge soyulma eğimi olarak adlandırılır. 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. Eğimin büyük olması soyulmanın şiddetli olduğu anlamına gelmektedir. Sünme eğimi ve soyulma eğimine çizilen teğetlerin kesişme noktasına denk gelen tekerlek geçiş sayısı da soyulma büküm noktası olarak ifade edilir. Bu nokta soyulmanın başladığı geçiş sayısını vermektedir. Soyulma büküm noktası değerinin yüksek olması soyulma direncinin fazla olduğunu göstermektedir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Deney aynı anda iki numune üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Deneyde 15 ila 30cm çaplarında silindirik örnekler kullanılabildiği gibi 30 cm X 36 cm boyutlarında plak örnekler de kullanılabilir. Test sıcaklığı 25°C ile 75°C arasında çeşitlilik göstermesine rağmen geleneksel olarak 50°C'de gerçekleştirilmektedir. Cihazda 47mm genişliğindeki çelik tekerlekler numunelere 705N'luk yük uygulamaktadır.

Bu çalışmada, Hamburg tekerlek izi testi AASHTO T 324 prosedürüne göre, 4cm ile 9cm aralığında 0.5cm artışla hazırlanan 11 farklı kalınlıktaki kiriş örneklere (genişlik: 10cm, uzunluk: 36cm) yapılmıştır. Asfalt kiriş örneğinin deney sırasında kalıp içerisinde hareket etmesini önlemek için Şekil 2'de görüldüğü gibi asfalt kirişin her iki tarafına ahşap destek kirişleri konulmuş ve kalıbın sıkıştırma sistemi ile sıkıştırılmış ve sabitlenmiştir. Deneyde, Tablo 4'te verilen parametreler seçilmiştir.



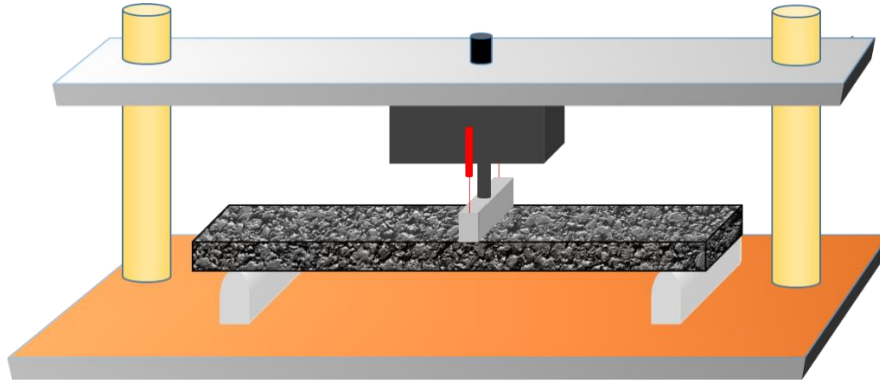
Şekil 2. Hamburg tekerlek izi deney düzeneği (Hamburg wheel tracking test device)

Tablo 4. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler (Parameters applied in the HWTT)

DENEY ÖLÇÜTÜ	DEĞER
Deney Sıcaklığı (°C)	50
Deneyi Sonlandıran Tekerlek İzi Derinliği (mm)	15
Tekerlek Geçiş Hızı (Döngü/Dakika)	26
Maksimum Geçiş Sayısı	10000
Suda Bekletme Süresi (dak.)	30
Koşullandırma Tekerlek Geçiş Sayısı	5

2.2.2. Deformasyon Kontrollü Üç Nokta Kiriş Eğilme Testi (Deformation Controlled Three Point Beam Bending Test)

Düşük sıcaklıkların etkisi altında kaplamada karmaşık bir gerilme durumu oluşur ve düşük sıcaklıktaki çatlaklar esas olarak asfalt tabakalarındaki bu çekme gerilmelerinden kaynaklanır. Kiriş eğilme deneyi, asfalt kaplamalarda oluşan gerilme durumunun doğrudan temsili anlamına gelmez ancak çoğunlukla test edilen asfalt karışımlarının düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Sistemin önemli bir avantajı karmaşık bir düzeneğin olmayışı ve deneyin çoğu ulaştırma laboratuvarında yapılabilecek olmasıdır (Pszczola vd., 2018). Deney düzeneğinin şematik bir gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kiriş numunelerin yükleme mekanizması (Loading mechanism of beam samples)

Bir karışımın kırılma dayanımı, çatlak yayılmasına dayanma kabiliyetini karakterize eder ve karışımın kırılma performansının bir göstergesidir. Kırılma dayanımının yüksek olması karışımın çatlama karşı direncinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Behbahani vd., 2013; Marasteanu vd., 2002).

Asfalt karışımların değerlendirilmesi için kiriş eğilme deneyi ilk olarak Jucycki (Judycki 1990) tarafından kullanılmış daha sonra yöntemin geliştirilmiş versiyonları (Judcycki vd., 2001; Jaczewski vd., 2016) literatüre sunulmuştur. Bu çalışmada deney parametreleri modifiye edilmiş yöntemlere göre, literatürde yer alan çalışmalar da (Pszczola ve Szydowski, 2018; Abdelsalam vd., 2020) göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kalınlığı 4cm ile 9cm arasında değişen asfalt kaplama kiriş örneklerine kiriş eğilme deneyi yapılmıştır. Mesnetler arası mesafe 30cm

olarak ayarlanmıştır. Deney Marshall stabilite cihazında 25°C sıcaklıkta, 50.8mm/dak. yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Cihazın sabit hızda hareketi deformasyon kontrolü sağlamaktadır.

Kiriş örneklerin eğilme dayanımları Formül (1) ile hesaplanmaktadır. Burada; σ : kirişin eğilme dayanımı (kN/mm²), F: kırılmaya neden olan yük (kN), l: kirişin mesnetler arası mesafesi (mm), b: kirişin genişliği (mm), h: kirişin kalınlığı (mm)'dir.

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

2.2.3. Tekrarlı-Yük Kontrollü Üç Nokta Kiriş Eğilme Testi (Repeated-Load Controlled Three Point Beam Bending Test)

Tekrarlı yük deneyi bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı direncini değerlendirmede kullanılmaktadır. Asfalt karışım örneği üzerine belirlenen periyotta tekrarlı yükleme uygulanmaktadır. Test sonucunda kalıcı deformasyonlar kümülatif bir şekilde kaydedilerek yükleme sayısı deformasyon grafiği oluşturulmaktadır. Farklı sıcaklık, gerilme, yükleme periyodu ve test süresinde yapılabilen test gerçek arazi koşullarındaki tekerlek izini yansıtmada arazi koşulları ile uyumlu sonuçlar vermektedir (İskender, 2008).

Gerilme kontrollü kiriş eğilme deneyi, üniversal asfalt test cihazında, tekrarlı yük sünme testi yazılımı ile 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde 36cm uzunluğunda, 10cm genişliğindeki kiriş örnekler 4cm ile 9cm aralığında farklı kalınlıklarda hazırlanarak kullanılmıştır. Mesnetler arası mesafe 30cm ayarlanmıştır. 0.3kN koşullama yükü, 2 dakika koşullama süresi, 5kN yük, yüklü ve yüksüz süre 500ms ve 20mm deneyi sonlandıran deformasyon seçeneği uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



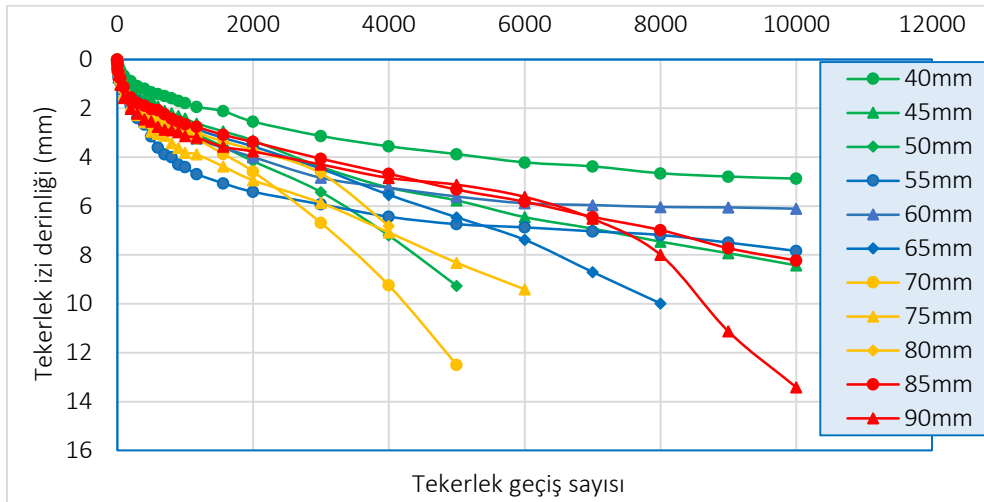
Şekil 4. Tekrarlı-yük kontrollü kiriş eğilme deneyi düzeneği (Repeated-load controlled beam bending test setup)

3. Bulgular ve İrdeleme (Findings And Discussion)

3.1. Hamburg Tekerlek İzi Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation Of HWTT Results)

Hamburg tekerlek izi testi, bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon ve soyulma etkisine karşı gösterdikleri direnci değerlendirmek için kullanılmıştır. Deney, su içerisinde, 50°C sıcaklıkta, 10000 tekerlek geçişi döngüsünde, kiriş örnek çiftlerine AASHTO T324 standardına göre yapılmıştır. Deney sonuçları, iki örnekten (sol-sağ tekerlek) elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Şekil 5'de gösterilmiştir.

Şekil 5 irdelendiğinde, istisnalar olmakla birlikte, genel olarak kaplama kalınlığının atması ile birlikte deformasyon miktarlarının da arttığı görülmüştür. Düşük kaplama kalınlıklarında, deformasyon eğrisinin ikinci bölgesindeki eğimin daha düşük olduğu, yani ince kaplama örneklerinin deformasyon miktarlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum ince örneklerde toplam sıkışma miktarının daha düşük olması, kaplama kalınlığı arttıkça kaba agregaların karışım içerisinde daha kolay yer değiştirebilmesi ile tekerlek altındaki sıkışmanın daha kolay gerçekleşebilmesi ile açıklanabilir.



Şekil 5. Kaplama kalınlığı - tekerlek izi derinliği ilişkisi (Pavement thickness & rutting interaction)

İnce kaplamalarda, deformasyon eğrilerinde soyulma büküm noktaları gözlemlenmemiş, kaplama kalınlığı arttıkça soyulma büküm noktaları da belirginleşmiştir. 65mm ve daha kalın kaplama örneklerinde soyulma büküm noktaları oluşmuştur. Buna rağmen, 65mm ve 80mm kalınlığındaki örneklerde soyulma büküm noktası daha düşük çıkmıştır. 90mm kalınlıklı örneklerde tipik Hamburg tekerlek izi deney eğrisi görülmüştür. Su hasarının kaplamanın permeabilitesi ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Kaplamadaki boşluk oranının atması geçirgenliği artırmaktadır. Literatürde yapılan bir çalışmada, saha koşullarında, kaplama kalınlığı arttıkça kaplama yoğunluğunun tasarım yoğunluğunun üzerinde olmasına rağmen azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür (İskender, 2019). Bu nedenle, daha kalın kaplamalarda soyulma büküm noktalarının daha düşük çıkmış olabileceği değerlendirilmektedir. Örneklerin gerçek yol yüzeyinden alınmış olması görsel değerlendirmelerde görülememiş olsa bile örneklerde içsel çatlakların olma riskini beraberinde getirmektedir. Karışımın serilip sıkıştırma aşamasındaki agrega segregasyonu veya termal segregasyon gibi olası farklılıklar örnek alınması sırasında değerlendirilememektedir. Bu nedenle deney sonuçlarında farklılıklar görülebilmektedir. Genel eğilimi bozan, 65mm kalınlıktaki sonuçlar bu anlamda yorumlanabilir.

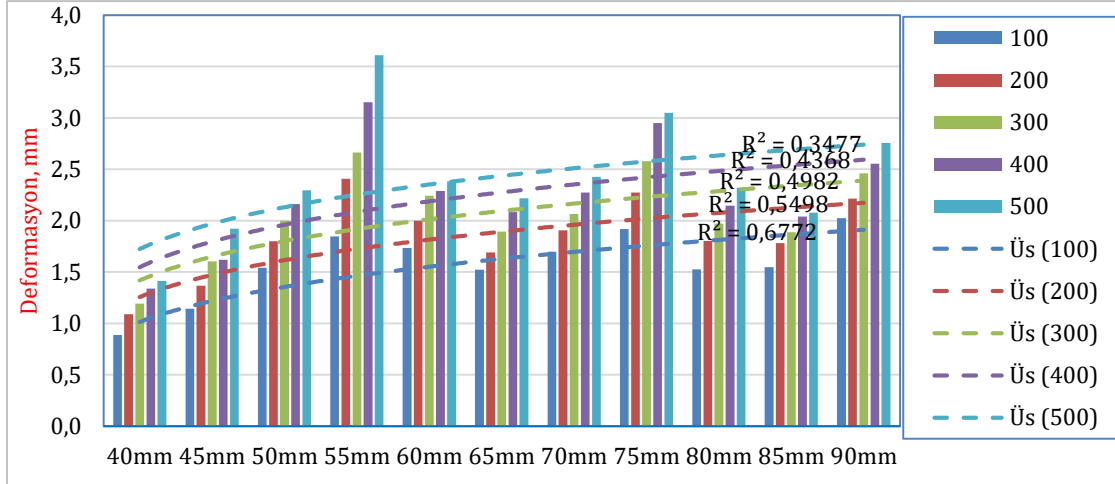
Colorado Ulaştırma Departmanı (CDOT), asfalt karışımın tekerlek izine karşı dirençli olarak nitelendirilebilmesi için 20000 tekerlek geçişinde 10mm'den daha az tekerlek izi oluşması gerektiğini öngörmektedir. CDOT'a göre, aynı zamanda 10000 tekerlek geçişinde deformasyon miktarının 4mm'den daha küçük olması gerekmektedir (Beecroft ve Petho 2015). Bu çalışmada kullanılan örnekler tekerlek izine karşı düşük dirençli olarak değerlendirilmektedir. Hamburg tekerlek izi deneyi sonuçları üzerinde etkili olan faktörlerin değerlendirildiği çalışmada, deney sonuçlarının agrega kalitesi, asfalt çimentosu rijitliği, yaşlanma süresi, rafinerizasyon süreci, sıvı soyulma önleyici katkıları, sönmüş kireç katkısı ve sıkıştırma sıcaklığına hassas olduğu görülmüştür (Aschenbrener, 1995). Kullanılan asfalt karışım örneklerinin doğal yaşlanma sürecinden dolayı düşük performans sergilediği değerlendirilmektedir.

Hamburg tekerlek izi deneyinde, metal tekerleğin asfalt kaplama örneği üzerinde ileri-geri hareket etmesi kaplama örneğinde deformasyona yol açmaktadır. Bu deformasyon, tekerlek altındaki kısımda yoğunluk artışı, kaba agregaların karışım içerisinde yeniden yerleşmesi/yer değiştirmesi, karışım içerisindeki malzemenin yanıl hareketi gibi sebeplerden gerçekleşmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça deformasyon miktarı da sıralanan nedenlerden dolayı artmaktadır.

Kullanılan deney parametreleri altında, farklı karışımları değerlendirirken, belirli tekerlek geçiş sayılarına ulaşılabilmesi ve karışımların birbirinden deformasyon ve su hasarı direnci açısından daha hassas olarak değerlendirilebilmesi açısından 65mm'den daha ince örneklerin kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Daha kalın örnekler kısa sürede sınır deformasyon değerine ulaştığından deney sonlanmaktadır. Örnek kalınlığı çok azaltıldığında ise karışımlarda oldukça düşük deformasyonlar gerçekleştiğinden farklı karışımlar arasında performans gözlemlerinin ayırtılmasında zorluklar oluşabilir.

Hamburg tekerlek izi deneyinde, deney sonuçlarının örnek kalınlıklarına hassasiyetinin irdelendiği bir çalışmada daha ince kaplamalardan ziyade 60mm kalınlığındaki örneklerin kullanılması önerilmektedir (Dai vd., 2020). Deney sonuçlarında 65mm'den daha kalın örneklerde soyulma davranışı daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu açıdan çalışma literatürle uyumlu görülmektedir. Şekil 6'da, 100, 200, 300, 400 ve 500 tekerlek geçiş döngülerinde oluşan deformasyonlar kaplama kalınlığına bağlı olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda kaplama kalınlığı ile deformasyon arasındaki ilişki regresyon analizi ile 100, 200, 300, 400 ve 500 tekerlek geçiş döngüsünde ayrı ayrı

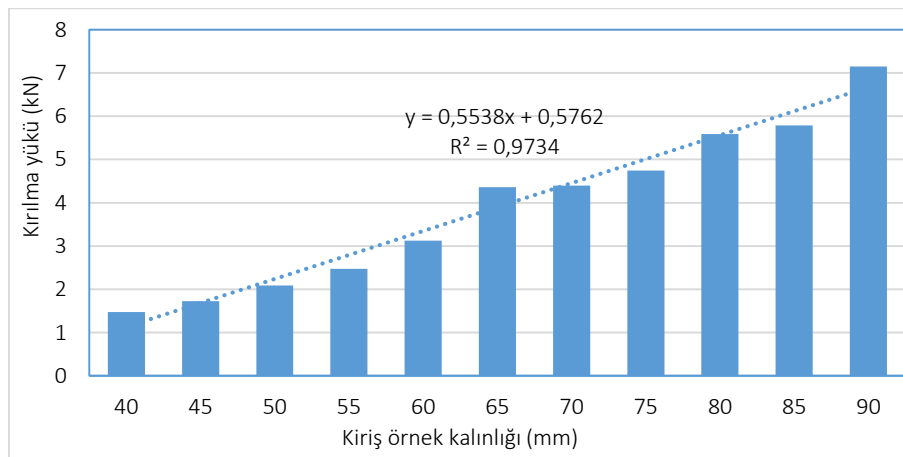
hesaplanmıştır. Kaplama kalınlığı ile deformasyon arasındaki en kuvvetli ilişki üstel fonksiyonda ve 100 tekerlek geçişi döngüsünde ($R^2=0.6772$) oluşmuştur. Tekerlek geçiş sayısı arttıkça ilişkinin kuvveti de azalmaktadır. Bu genelleme daha yüksek tekerlek geçiş sayılarında da geçerlidir. Ancak grafiğin anlaşılabilirliğinin azalmaması için yalnızca en yüksek uyumun olduğu düşük geçiş sayıları gösterilmiştir. Bazı örneklerde soyulma büküm noktaları daha erken görülmektedir. Soyulma büküm noktasından sonra, kaplama örneklerinde oluşan toplam deformasyon daha hızlı artmaktadır. Bazı örneklerde, soyulma davranışına bağlı olarak hızlı deformasyon artışının yüksek tekerlek geçişlerinde deformasyon ile kaplama kalınlığı arasındaki ilişkinin kuvvetini azalttığı düşünülmektedir.



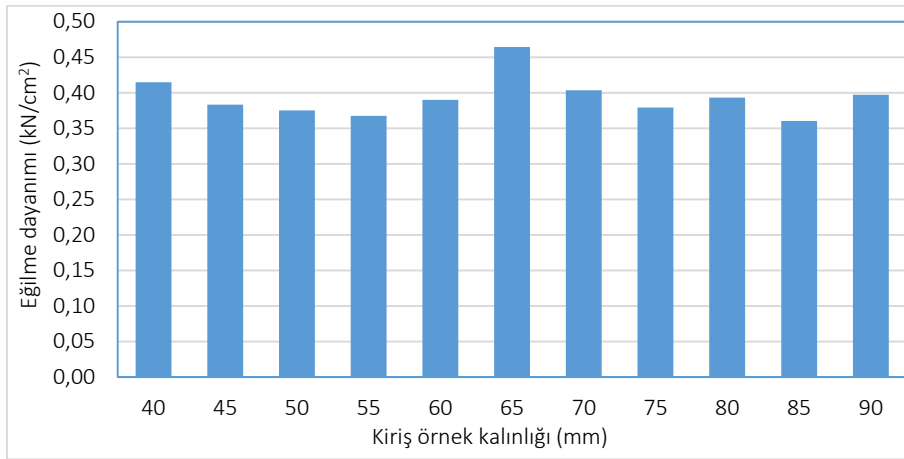
Şekil 6. Kaplama kalınlığı - deformasyon arasındaki korelasyon (Correlation between pavement thickness and rutting)

3.2. Deformasyon Kontrollü Kiriş Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation Of Deformation-Controlled Beam Bending Test Results)

Üç nokta-deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi Marshall stabilite cihazında 40mm ile 90mm kalınlığındaki asfalt kaplama örneklerine yapılmıştır. Her bir kalınlık için üç asfalt kaplama örneği test edilmiştir. Deney sonuçları, üç örneğin ortalaması alınarak Şekil 7'de ve hesaplanan eğilme dayanımları da Şekil 8'de, gösterilmiştir. Kiriş örneklerin kırılma sürecinde kaydedilen maksimum yükün kalınlıkla birlikte arttığı görülmüştür. Kaplama kalınlığı ile kırılma yükü arasındaki ilişki regresyon analizi ile araştırılmış, yüksek regresyon katsayısı ($R^2=0.9734$) elde edilmiştir. Sonuçlar kaplama kalınlığı ile eğilme deneyinde kırılmaya yol açan yük arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

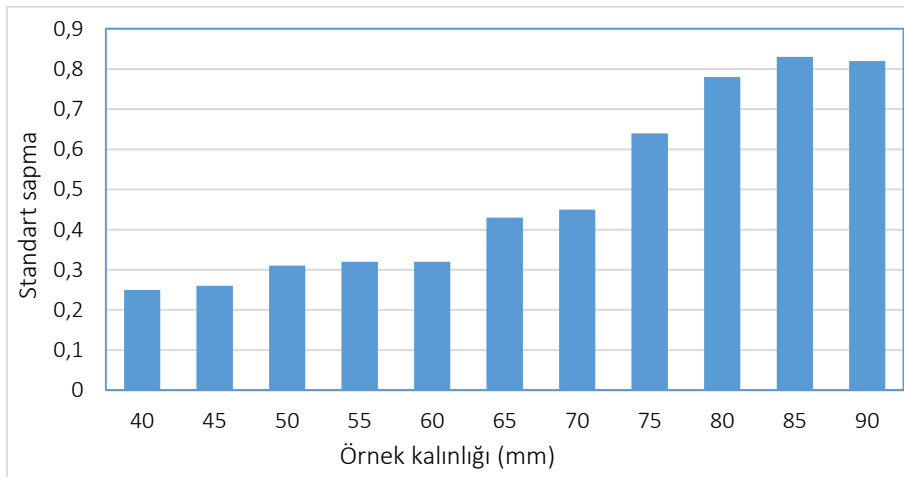


Şekil 7. Kaplama kalınlığı- kırılma dayanımı ilişkisi (Pavement thickness - fracture strength relationship)



Şekil 8. Eğilme dayanımı – kaplama kalınlığı ilişkisi (Bending strength-pavement thickness relationship)

Deney sonuçlarının standart sapmaları hesaplanarak Şekil 9'da verilmiştir. Örnek kalınlığının artması kırılma yüklerinin standart sapmalarını artırmıştır. 60mm'nin altındaki kalınlıklarda standart sapmalar arasında önemli farklılıklar oluşmamıştır. 65mm kalınlıktan itibaren standart sapmalar da hızlı artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 9. Kırılma yüklerinin standart sapma dağılımı (Standard deviation of fracture load of samples)

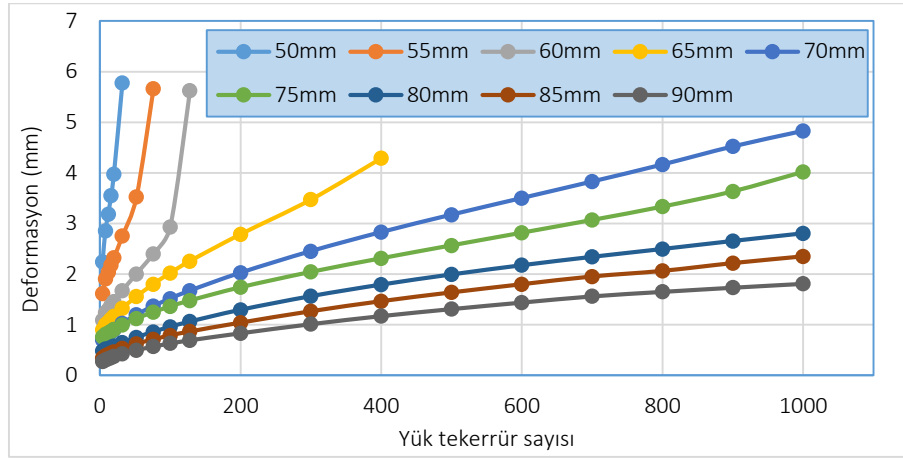
Çatlama direncinin göstergesi olan eğilme dayanımının 0.36-0.46kN/cm² aralığında değiştiği görülmektedir. Kaplama örneklerinin eğilme dayanımları 55 mm'den 65mm kalınlığa kadar artmış, 65mm kalınlıkta en yüksek değere ulaşmıştır. 65mm ile 75mm arasında eğilme dayanımı azalış göstermiştir. Kaplamanın eski olması, trafik altında ilave sıkışmalarla birlikte kaplama yoğunluğunun farklı noktalarda artması, her ne kadar örnek hazırlama aşamasında dikkatli seçim yapılsa bile örneklerde gözle görülmeyecek kılcal çatlakların olma ihtimali eğilme dayanımlarının değişim eğilimindeki farklılıkların nedeni olabileceği değerlendirilmektedir.

3.4. Tekrarlı-Yük Kontrollü Kiriş Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Repeated-Load Controlled Beam Bending Test Results)

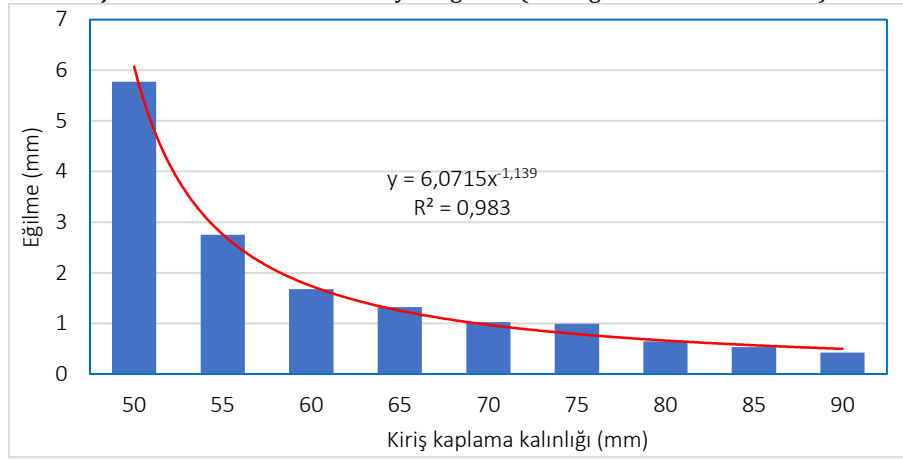
Tekrarlı - yük kontrollü kiriş eğilme deneyi asfalt kaplama kiriş örneklerine uygulanmıştır. Farklı kalınlıklarda ikişer örnek üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deformasyon eğrileri Şekil 10'da gösterilmiştir. 40mm ve 45mm kalınlıktaki örnekler çok düşük yük tekrerrür sayılarında kırıldıklarından Şekil 11'de gösterilmemiştir. Kalınlık arttıkça eğilme deformasyonu azalmakta ve kırılma için gereken yükleme sayısı artmaktadır. 60mm'den daha düşük kalınlıktaki örnekler 100 yükleme döngüsüne ulaşmadan kırılmıştır. Aynı yükleme sayılarında (50mm kalınlıktaki örneğin kırıldığı yükleme sayısı olan 32 yükleme döngüsü), eğilme deformasyonu – kalınlık ilişkisi Şekil 13'te verilmiştir. Örnek kalınlığı-eğilme deformasyonu eğrisinin eğimi başlangıçta çok yüksek iken 60mm kalınlıktan sonra eğimin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, 60mm'den daha düşük kalınlıklarda eğilme davranışının örnek kalınlığına son derece hassas olduğunu ancak kalınlık arttıkça bu hassasiyetin azaldığını göstermektedir.

Kalınlık arttıkça kaplamada çatlama neden olan çekme gerilmelerinin azaldığı, düşük kalınlıklarda kaplamanın aşağıdan yukarıya çatlamalara daha hassas iken kalınlık arttıkça yukarıdan aşağıya çatlamalara daha hassas hale

geldiği literatürden bilinmektedir (Mackiewicz, 2018). Eğilme davranışının kaplamanın çekme direncinin de göstergesi olduğu düşünüldüğünde, özellikle 60mm'den daha kalın tabakalarda çekme direncinin yüksek olduğu, 60mm'nin altındaki kalınlıklarda da çekme direncinin buna bağlı olarak ta çatlama direncinin hızla azaldığı söylenebilir.



Şekil 10. Ortalama deformasyon eğrileri (Average deformation curves)



Şekil 11. 32 yüklem döngüsünde eğilme deformasyonu - kaplama kalınlığı ilişkisi (Bending deformation at 32 loading cycles - pavement thickness relationship)

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. Asfalt kiriş örneklerinin eğilme davranışları üzerinde açıklık, genişlik ve kalınlık parametreleri anahtar rol oynamaktadır. Kiriş açıklığı ve genişliği sabit tutulup kalınlık değiştirildiğinde açıklık/kalınlık (l/h) oranının artması eğilme deformasyonunu arttırmakta fakat numunenin kırılmasına neden olan maksimum yükü azaltmaktadır (Racz ve Vas, 2005).

Eğilmeye maruz kalan asfalt kaplamada çatlaklar görülmeye başladıktan sonra su bu çatlaklardan içeriye girerek kaplamanın bozulmasını hızlandırmaktadır. Bu sebeple asfalt karışımların eğilmede çatlama davranışlarını incelemek önemlidir (Xu vd., 2020).

Asfalt kaplamanın hem kaplama yüzeyinden alta doğru hem de alttan kaplama yüzeyine doğru çatlama davranışı, karışım aynı olsa bile yoğunluk ve kaplama kalınlığından önemli derecede etkilenmektedir (Ghos, 2020). Daha kalın kaplamalar genellikle çatlama ve yorulmalara karşı daha yüksek direnç göstermektedirler (Wagoner et al., 2005; Zhang 2015). Kalınlığın artmasıyla düktilite azalmakta ve çatlama neden olan kırılma için gereken enerji artmaktadır. Bu çalışmada bulunan sonuçlar literatürle uyumlu olarak değerlendirilmektedir. Örnek kalınlıkları arttıkça, deformasyon kontrollü eğilme deneyinde kırılma yükünün arttığı ve tekrarlı yük kontrollü eğilme deneyinde de deformasyonu azalmıştır.

Hamburg Tekerlek izi deneyi için çoğunlukla 60mm kalınlığında örnekler tercih edilmektedir. Literatürde yapılan bir çalışmada (Dai vd., 2020), laboratuvarında hazırlanan aynı asfalt karışım Hamburg tekerlek izi deneyi ile farklı kalınlıklarda test edilmiş, HWTT için 60 mm örnek kalınlığının daha uygun olduğu önerilmiştir. 40 mm kalınlıktaki örnekler üzerinde tekerlek izi derinliğinin kesintili bir şekilde dağıldığı (tekerlek izinde süreklilik oluşmadığı) ifade edilmiştir. Üstelik sıkıştırma derecesinin (yoğunluk) kalite kontrol ve tekerlek izi derinliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada da (Zhu vd., 2017), sıcak karışım asfaltlarda oluşan deformasyonların yük ve kaplama kalınlığına boşluk içeriğinden daha hassas olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, 40 mm ile 90mm arasındaki kalınlıklarda örnekler kullanılmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyinde düşük kalınlıklarda daha az deformasyonların oluştuğu, kalınlık arttıkça deformasyonların da arttığı görülmüştür. İnce kaplamalarda, deney sırasında tekerlek geçişleri ile birlikte örnekler sıkışmaya devam etmekte ve sıkışmadan dolayı toplam deformasyon miktarı artmaktadır. Kalın örneklerde toplam sıkışma arttığından deformasyon miktarı da daha fazla oluşmaktadır. Deneyde uygulanan sıcaklığın etkisiyle bir süre sonra karışımın esnekliğinin artması deformasyon oluşum hızını artırmaktadır. Bu nedenle kalın örneklerde soyulma davranışlarının daha açık görülebildiği değerlendirilmektedir.

Hamburg deneyinde asfalt karışımların tekerlek izi direnci değerlendirilirken, deformasyon eğrisinde ilk sıkışmadan sonra oluşan lineer bölgenin eğiminden yararlanılmaktadır. Eğim ne kadar düşük olursa karışımın tekerlek izi direnci o kadar yüksek olarak değerlendirilmektedir. Ancak karışımların sağlıklı bir karşılaştırmaya tabi tutulabilmesi için Hamburg tekerlek izi deneyinde örnek kalınlıklarının sabit tutulması son derece önemli görülmektedir. Bununla birlikte yapılan deneylerde ince örnekler kullanıldığında (40 mm -50mm) hem toplam deformasyon miktarı çok düşük çıkmakta hem de örnek üzerindeki tekerlek izi derinliği süreklilik göstermemektedir. Kalınlığın yüksek olması da standart sapmanın artmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, sabit örnek kalınlığı seçmek koşulu ile 55 - 65mm kalınlığındaki örneklerin kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada arazi koşullarında üretilmiş asfalt kaplamadan alınan karışım örnekleri Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü giriş eğilme deneyi ve tekrarlı-yük kontrollü giriş eğilme deneyleri ile test edilmiştir. Araştırmada 40-90mm kalınlığındaki giriş örnekler kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar deformasyon, su hasarı ve çatlama direnci yönünden değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Hamburg tekerlek izi deneyi sonuçlarından, örnek kalınlığının artması ile deformasyon miktarının da arttığı, 40-50mm gibi düşük kalınlıklarda soyulma noktasının oluşmadığı, yüksek kalınlıklarda soyulma davranışının daha net olduğu görülmüştür. Ancak ince kaplama örneklerinde tekerlek izi derinliğinin düzgün dağılmadığı belirlenmiştir.

Eğilme deneylerinde, kaplama kalınlıklarının artması ile kırılmaya neden yükün buna bağlı olarak ta çatlama direncinin de arttığı görülmüştür. Kaplama kalınlığı ile kırılma yükü arasında yüksek ilişki elde edilmiştir. Fakat kaplama kalınlığının artması deney sonuçlarının standart sapmasını artırmıştır.

Karışımların daha sağlıklı olarak değerlendirilebilmesi için, sabit bir kalınlık seçilmesi koşulu ile 55-65mm arasındaki kalınlıkların kullanılmasının daha ince ve daha kalın örneklerle göre daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Sonraki çalışmalarda, daha geniş örnek grubu ile 55-65mm arasındaki kalınlıklarda, karışım yoğunluğunu kontrol altına alarak araştırmalar yapılabilir. Karışımın agregata iskeleti yapısının etkisinin de ortaya koyulması açısından farklı karışım türleri üzerinde araştırma yapılabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abdelsalam, M., Yue, Y., Khater, A., Luo, D., Musanyufu, J., Qin, X., 2020. Laboratory study on the performance of asphalt mixes modified with a novel composite of diatomite powder and lignin fiber. *Applied Sciences*, 10, 16, 5517.
- Aschenbrenner, T. 1995. Evaluation of Hamburg wheel tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record* 1492, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 193-201.

- Batioja-Alvarez, D., Lee, J., Rahbar-Rastegar, R., Haddock, J. E., 2020. Asphalt mixture quality acceptance using the Hamburg wheel-tracking test. *Transportation Research Record*, 2674, 8, 338-349.
- Beecroft, A., Petho, L., 2015. Commissioning of Hamburg wheel tracking device (HWTd), Final Report. Proje, 007180.
- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M.R., Fazaeli, H., Aghajani, S. Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures. *Adv. Mater. Res.* 2013, 723, 337-344.
- Dai, X., Jia, Y., Wang, S., Gao, Y., 2020. Evaluation of the rutting performance of the field specimen using the Hamburg wheel-tracking test and dynamic modulus test. *Advances in Civil Engineering*.
- Ghos, S., 2020. Evaluation of causes of transverse and fatigue cracking in flexible pavements using laboratory and field testing and PMED simulation. Master of Science, University of Oklahoma Norman, Oklahoma.
- He, D., Yang, W., 2018. Effect of thickness of gravel base and asphalt pavement on road deformation, *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-7.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma sistemlerinin geleneksel ve modifiye asfalt karışımlar üzerindeki etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Jaczewski, M., Judycki, J., Jaskuła, P., 2016. Low-temperature properties of high modulus asphalt concrete (ACWMS) in three-point bending test. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 33, 217-224.
- Judycki, J., 1990. Bending test of asphaltic mixtures under static loading. In *Proceedings of the 4th International Symposium on the Role of Mechanical Tests for the Characterization*, Budapest, Hungary, 23-25 October 1990, 207-227.
- Judycki, J., Cyske, W., Pszczola, M., 2001. Strength and stiffness at low temperature of asphalt concrete of increased resistance to rutting. In *Proceedings of the VII International Conference, Durable and Safe Pavement Structures*, Kielce, Poland, 8-9 May 2001, 83-90.
- Karahançer, Ş., Erişkin, E., Çapalı, B., Saltan, M., Terzi, S., 2018. Superpave volumetric mix design of hot mix asphalt: case study of İsparta. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 1, 108-117.
- Katanalp, B. Y., Yıldırım, Z. B., Karacasu, M., İbrikçi, T., 2019. Atık kömür katkılı asfalt betonu performans karakteristiklerinin yapay sinir ağları ve merkezi kompozit tasarım yöntemleri kullanılarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7, 3, 680-688.
- KGM, 2006. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Yayın No: 267, KGM Yayınları, Ankara.
- Mackiewicz, P., 2018. Fatigue cracking in road pavement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 356, 1.
- Mahmoodinia, N., Molayem, M., Fardealirezaei, A., 2016. Investigating the permanent deformation behavior of asphalt concrete mixtures in repeated load creep tests, In *International Conference on Transportation and Development*, 981-992.
- Marasteanu, M.O., Dai, S., Labuz, J.F., Li, X., 2002. Determining the low-temperature fracture toughness of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1789, 191-199.
- MGM, 2021. Meteoroloji Genel Müdürlüğü resmi web sitesi, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=TRABZON> (erişim tarihi: 10.08.2021)
- Pszczola, M., Jaczewski, M., Rys, D., Jaskuła, P., Szydłowski, C., 2018. Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test. *Materials (Basel)*. 11(1):100.
- Pszczola, M., Szydłowski, C., 2018. Influence of bitumen type and asphalt mixture composition on low-temperature strength properties according to various test methods. *Materials*, 11, 11, 2118.
- Racz, Z. S., 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., Chattaraj, R., 2019. Evaluation of wheel tracking and field rutting susceptibility of dense bituminous mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 20, 1, 90-109.
- Şengöz, B., Açar, E., 2005. Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi, *İTÜ Dergisi/d*, 4, 1, 71-82.
- Valle, P.D., Thom, N., 2016. Reliability in pavement design, In *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague.
- Valle, P.D., Thom, N., 2020. Pavement layer thickness variability evaluation and effect on performance life, *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 7, 930-938.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Blankenship, P., 2005. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test. *Transportation Research Record*, 1929, 1, 183-192.
- Walubita, L. F., Fuentes, L., Prakoso, A., Pianeta, L. M. R., Komba, J. J., Naik, B., 2020. Correlating the HWTT laboratory test data to field rutting performance of in-service highway sections, *Construction and Building Materials*, 236, 117552.
- Xu, W., Wei, X., Wei, J., Chen, Z., 2020. Experimental evaluation of the influence of aggregate strength on the flexural cracking behavior of epoxy asphalt mixtures, *Materials*, 13, 8, 1876.
- Yıldırım, Y., Jayawickrama, P.W., Hossain, M.S., Alhabshi, A., Yıldırım, C., Smit, A.F., Little, D., 2007. Hamburg wheel tracking database analysis. Report No. FHWA/TX-05/0-1707-7. Texas Department of Transportation, Austin, Texas.
- Yıldırım, Y., 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.
- Yin, A., Yang, X., Zeng, G., 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.
- Zhang, W., 2015. Evaluation of Field Transverse Cracking of Asphalt Pavements. Doctoral Dissertation, Washington State University.
- Zhou, F., Chen, D. H., Scullion, T., 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, Y., Ni, F., Li, H., 2017. Calibration and sensitivity analysis of rut prediction model for semi-rigid pavement using AASHTOWare ME design, *Road Materials and Pavement Design*, 18, 23-32.