

Araştırma Makalesi

AASHTO-93 ile AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Ülkemiz Koşullarında Karşılaştırılması ve Ekonomik Analizi: Adana İli Örneği

¹Ebru AVAR, ^{*2}Orhan KAYA

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, ebruavar1@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-3875-4504>

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, okaya@atu.edu.tr, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6072-3882>

Geliş: 15.10.2025;

Kabul: 27.12.2025

Öz

Ülkemizde halihazırda AASHTO-93 tasarım yöntemine dayanan Karayolu Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi kullanılarak esnek üstyapı tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada öncelikle, 3 farklı yol sınıfı, trafik ve zemin (toplam 3x3x3=27 farklı senaryo) için Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi kullanılarak aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Daha sonra ise bu 27 farklı tasarım senaryosu için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Adana ili saatlik iklim verileri temin edilmiş, bu iklim verileri ve diğer tasarım parametreleri kullanılarak AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi ile performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucu AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak en uygun ve ekonomik kaplama kalınlıkları belirlenmiş ve değişen kalınlıkların yol maliyetine etkisi irdelenmiştir. Yapılan bu analizler doğrultusunda AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu bazı tasarım senaryoları için bazı performans parametrelerinin yol tasarım ömrü sonunda ilgili sınır değeri sağlayamadığı, dolayısıyla da Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan tabaka kalınlıklarının bu senaryolar için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, karayolu üstyapıları tasarımında yeni bir yöntem olan AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yönteminin ülkemiz koşullarında uygulanabilirliği test edilmiş ve bu yöntemin kullanımına yönelik atılabilecek adımlarla ilgili pratik öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Üstyapı Tasarımı, AASHTO 93, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi, Ekonomik Analiz

^{*2}Sorumlu yazar

Bu makaleye atıf yapmak için

Avar, E., & Kaya, O. (2025). AASHTO-93 ile AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Ülkemiz Koşullarında Karşılaştırılması ve Ekonomik Analizi: Adana İli Örneği. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 7(2), 225-249. <https://doi.org/10.60093/jiciviltech.1804178>

Comparison of AASHTO-93 and AASHTOWare Pavement ME Design Methods for the Pavement Design in Türkiye and the Economic Analysis: Adana Province Example

Abstract

Flexible pavement design is currently being carried out Türkiye using the Flexible Highway Pavement Design Guide based on the AASHTO-93 design method. In this study, firstly, the wearing, binder and bituminous base layer thicknesses were determined using the Highway Flexible Pavement Design Guide for three different road classes, traffic levels and soil strength conditions (total $3 \times 3 \times 3 = 27$ different scenarios). Then, hourly climate data for Adana province were obtained from the General Directorate of Meteorology for these 27 different design scenarios. Performance analyses were conducted using these climate data and other design parameters using the AASHTOWare Mechanistic-Empirical Pavement Design Method. Based on these analyses, the most appropriate and economical pavement thicknesses were determined using the AASHTOWare Mechanistic-Empirical Pavement Design Method, and the impact of varying thicknesses on the pavement material costs was examined. Based on these analyses, it was observed that for some design scenarios, certain performance parameters of the AASHTOWare Mechanistic-Empirical Pavement Design Method failed to meet the relevant limit values at the end of the pavement's design life. Consequently, the layer thicknesses calculated based on the Highway Flexible Pavement Design Guide were insufficient for these scenarios. This study also evaluated the applicability of the AASHTOWare Mechanistic-Empirical Pavement Design Method, a new method for highway pavement design, to Türkiye's conditions. Practical recommendations were presented regarding the steps to be taken for using this method.

Keywords: *Pavement Design, AASHTO 93, AASHTOWare Pavement ME Design, Economic Analysis*

1. Giriş

Bir ülkenin sosyoekonomik yapısının en önemli bileşenlerinden biri ulaşımıdır. Karayolları, ülkemizin en yoğun ulaşım sistemidir. Türkiye'deki karayollarının çoğu esnek üstyapıya sahip sathi ve asfalt betonu kaplamalar kullanılarak inşa edilmiştir. Uzun süredir esnek üstyapılar, karayolu inşaatlarında kullanılan bir kaplama türüdür. Türkiye'deki halihazırda mevcut yatırımlar, bu konuda uzmanlaşmış ekipler, tesisler ve makine sayısının yeterli olması gibi nedenlerle esnek üstyapı kaplamalarını tercih etmektedir (Bağdatlı, 2010).

Modern ulaşım sisteminin önemli bir parçası olan karayolları, insanların güvenli ve hızlı bir şekilde seyahat etmelerini sağlar. Üstyapı, karayolu inşaatının karmaşık bir parçasıdır. Karayolu üstyapısı, yolun taşıma kapasitesini artırmak, dayanıklılığını sağlamak ve yolcu konforunu artırmak için tasarlanmıştır (Deniz, 2016).

Karayolu üstyapıları birçok parçadan oluşur. Yol tabanı, alt yapı, üst yapı ve yol yüzeyi bu grupta yer alır. Yol tabanı, zeminleri stabilize etmek ve yükleri taşımak için kullanılır. Yolun altındaki herhangi bir yapı, drenaj sistemini, köprüleri ve tünelleri içerir. Yolun üst yapısı ise çeşitli katmanlardan oluşur ve yük taşıma kapasitesini ve kullanıcıların rahatlığını sağlamak için tasarlanmıştır. Araçların hareket ettiği yol, güvenli ve pürüzsüz bir sürüş için dikkatle tasarlanmıştır (Ecevit, 2007).

Karayolu üstyapıları, tasarım ve yapım sürecinde dikkate alınan çok sayıda faktörden oluşur. Trafik miktarı, hız limitleri, araç türleri, iklim ve yerel çevresel faktörler bunlardan bazılarıdır. Sürdürülebilirlik, güvenlik ve maliyet gibi faktörler de önemlidir. Düşük bakım maliyetleri, uzun ömürlülük ve verimli ulaşım, yüksek kaliteli karayolu üstyapısının bir sonucudur (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

Esnek üstyapıların matematiksel modellenmesi zor olduğu için farklı tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tasarım yöntemlerinden birisi olan ampirik yöntem, deney koşulları ile sınırlı kalan ve deneysel sonuçlara dayanan geleneksel tasarım yöntemidir. Bir diğer bir tasarım yöntemi olan mekanistik-ampirik yöntem ise, üstyapıda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, tahmini trafik yükü ve çevre koşulları dikkate alınarak tabaka kalınlıklarını hesaplamak için bilgisayar programlarını da kullanan bir yöntemdir.

AASHTO-93 (American Association of State Highway Transportation Officials) (Amerikan Devlet Karayolları ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği) karayolu üstyapı tasarım yöntemi (AASHTO, 1993) ampirik yöntemlerden biri olup bu yöntem yıllar içinde incelenmiş, araştırılmış, kullanılmış ve güncellenmiş olup ülkemiz tarafından Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Karayolu Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde (KGM, 2008) AASHTO-93 projelendirme kriterleri esas alınmıştır. AASHTO-93 karayolu üstyapı tasarım yönteminin çıkış yeri Amerika Birleşik Devletleri,

Illinois eyaletinin Ottawa şehrinde 1956 ve 1958 yılları arasında gerçekleştirilen yol üstyapı testleri olup, bu testler kapsamında farklı kalınlık ve tasarım parametrelerine sahip yol kesimleri inşa edilmiş, yol kesimlerinin davranışı ve hizmet seviyesi iki yıl boyunca gözlemlenmiş ve veriler sonunda elde edilen ölçümler bilgisayar kullanılarak değerlendirilmiştir. 1961 yılında AASHTO tarafından yayınlanan karayolu üstyapısı tasarım yöntemi, 1972, 1986, 1993 ve 2002 yıllarında revize edilmiştir (Armağan, 2019), fakat esnek üstyapı tasarım yöntemi 1993 yılından sonra değişmemiş ve AASHTO-93 karayolu esnek üstyapı tasarım yöntemi olarak isimlendirilmiştir. AASHTO-93 tasarım yöntemi, karayolu esnek üstyapıların yük etkilerini değerlendirmek ve bu üstyapıların güvenliğini sağlamak için kullanılan önemli bir mühendislik standardıdır. Bu yöntem, üstyapı tasarımında ve yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılır. AASHTO-93 tasarım yöntemi, çeşitli parametreleri göz önünde bulundurarak üstyapıların tasarımı için detaylı bir hesaplama ve analiz sürecini içerir (Kök, 2007). AASHTO'nun 1993'e kadar yol tasarım rehberinde ampirik yöntemler yer almış fakat 1993'ten sonra AASHTO mekanistik-ampirik yöntemlere yönelik çalışmalar yapıp yine bu yönde araştırmaları desteklemiştir. Bu destek sonucunda 2004 yılında Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement (Yeni ve Yenilenmiş Yol Kaplamalarının Mekanik-Ampirik Tasarımına Yönelik Kılavuz) (NCHRP, 2004) ve bu kılavuzun yanında da bir bilgisayar

programı yayınlandı. Bu bilgisayar programı Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Mekanik-Deneysel Yol Tasarım Kılavuzu) ((MEPDG) version 1.1) olarak isimlendirildi. AASHTO tarafından geliştirilen bir yol tasarım yazılımı, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi, mekanistik ve ampirik prensiplerini birleştirerek yol malzemelerinin davranışını daha gerçekçi bir şekilde modellemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemlere göre bu yöntem daha hassas ve güvenilir tasarımlar sağlamaktadır. AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yönteminin temel prensipleri; mekanistik bir yaklaşıma sahip olması, deneysel verilere dayalı tasarım yapabiliyor olması ve çoklu faktörlerin entegrasyonunu dikkate alması olarak sıralanabilir (Avar, 2024).

Mekanistik-Ampirik tasarım yönteminin üstyapı tasarımında kullanımıyla ilgili yapılan akademik ve teknik çalışmalar çoğunlukla Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada merkezli olagelmıştır (Baus ve Stires, 2010; Darter vd. 2014; Haider vd., 2011; Kaya, 2015; Kim vd., 2014; Li vd. 2009; Li vd., 2011; Muthadi ve Kim, 2008; Swan vd., 2008). Bunun sebebi ise bu tasarım yönteminin çıkış yerinin ABD olmasından kaynaklı olduğu açıktır. Bununla birlikte bazı diğer ülkelerde de bu tasarım yönteminin kullanımı ve adaptasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Aguib, 2021; Caliendo 2012).

Ülkemizde halihazırda AASHTO-93 tasarım yöntemine dayanan Karayolları Esnek Üstyapı tasarım yöntemi

kullanılarak üstyapı tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte az sayıda da olsa mekanistik-ampirik tasarım yönteminin ülkemizde kullanımıyla ilgili son zamanlarda bazı akademik çalışmalar yapılmaktadır. Fakat bu çalışmalar incelendiğinde bu çalışmalar sadece bir deneme yol kesiminin incelendiği (Şengün vd., 2020) ve tek bir rijit üstyapı tipinin incelendiği (Öztürk vd., 2019; Shakhan vd., 2021a) sınırlı çalışmalardır. Bununla birlikte AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'nin Ege bölgesindeki bir şehir (İzmir) (Shakhan vd., 2021b) için ve ülkemizdeki üç farklı iklim bölgesinde (İzmir, Erzurum ve Rize) olası kullanımıyla ilgili karşılaşılan zorluklar ve eksikliklerin irdelendiği bir çalışma (Ipekyuz, vd., 2022) bulunmaktadır. Fakat, literatürde AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi ve Adana ili iklim verileri kullanarak yapılan esnek üstyapı performans analizlerinin yer aldığı herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada öncelikle, 3 farklı yol sınıfı (il yolu, devlet yolu, otoyol), 3 farklı yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) ve 3 farklı zemin dayanım durumu (toplam $3 \times 3 \times 3 = 27$ farklı senaryo) için Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi kullanılarak aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Daha sonra ise bu 27 farklı tasarım senaryosu için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Adana ili saatlik iklim verileri temin edilmiş, bu iklim verileri ve diğer tasarım parametreleri kullanılarak AASHTOWare Mekanistik-

Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi ile performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucu AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak en uygun ve ekonomik kaplama kalınlıkları belirlenmiş ve değişen kalınlıkların yol maliyetine etkisi irdelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında esnek üstyapı tasarımında kullanılacak tasarım parametreleri ve bu parametrelerle ilgili verilerin nasıl elde edildiği aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

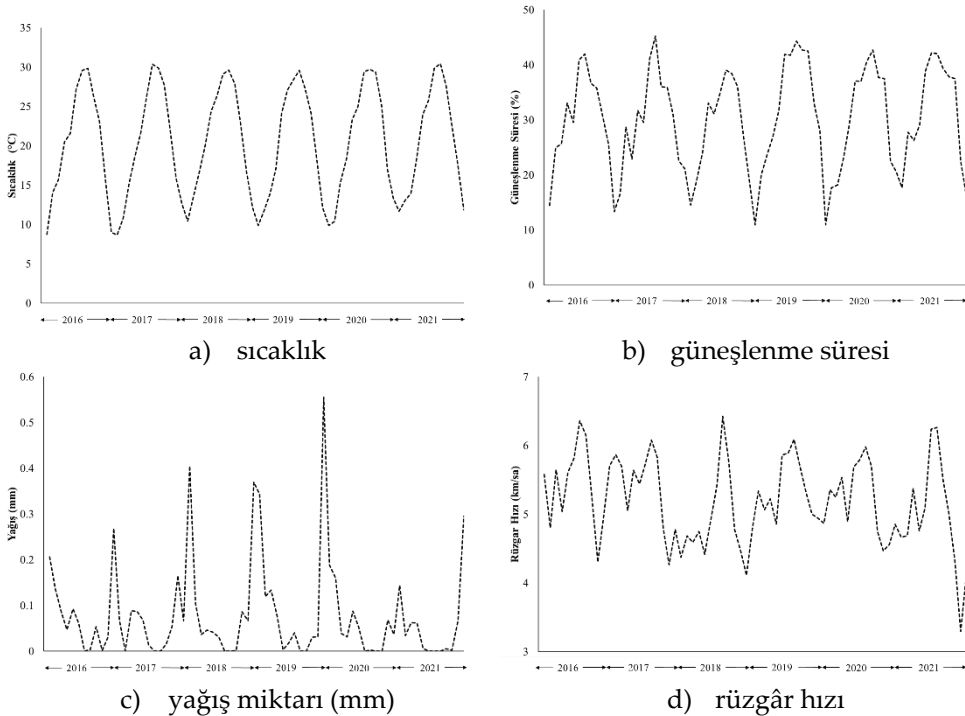
2.1 İklim verileri

AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi, öncelikle Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Bundan dolayı, bu ülkelere ait iklim verileri AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından otomatik olarak temin edilmektedir. Böylelikle Amerika ve Kanada kendi iklimsel verileri ile kullanabilir haldedir (AASHTO, 2024). AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ni kullanabilmek için ülkemiz iklim verileri gerekli olmuştur. Gerekli olan bu iklim verileri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden son 5 yıla ait saatlik hava sıcaklığı, saatlik yağış, saatlik rüzgâr hızı, saatlik nispi nem, saatlik güneş alma yüzdesi verileri talep edilmiştir. İstenilen verilerde bazı saatlerde ya da bazı aylarda ölçüm

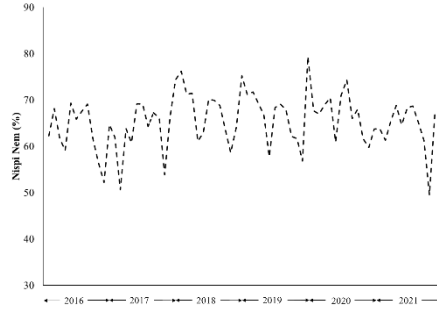
değerlerinde eksiklikler belirlenmiştir. Belirlenen bu eksikliklerin hangi saat aralığında olduğuna bakılarak çeşitli şekillerde veriler tamamlanmıştır. Örneğin eksik olan veri sadece belirli saatler arasında ise; o saatten öncesi ve sonrasının ortalaması alınıp eksik saat değerleri tamamlanmıştır. Eğer eksik veriler sadece saat aralığında değil de komple ölçüm yapılan ayda eksik ise; bir önceki yıl içerisinde aynı ayda bulunan saatlik değerler kullanılarak eksikler tamamlanmıştır. Eksikler tamamlandıktan sonra Adana ilinin 5 yıllık verilerini (2016-2021 yılları arası) içeren saatlik verileri tek tek tablo haline getirilerek düzenlenmiştir. Daha sonra

bu tablonun AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programında kullanılabilmesi için, verilerin programa nasıl aktarılacağı AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanım kılavuzundan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir (AASHTO, 2024).

Tasarım programına eklenen Adana ili saatlik iklim verileri (sıcaklık, güneşlenme süresi, yağış miktarı, rüzgâr hızı ve nispi nem) (elde edilen grafiklerde saatlik veriler aylık ortalama değerlere çevrilmiştir) Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Tasarım programına eklenen iklim verileri (sıcaklık, güneşlenme süresi, yağış miktarı, rüzgâr hızı ve nispi nem).



e) nispi nem

Şekil 1 (devamı). Tasarım programına eklenen iklim verileri (sıcaklık, güneşlenme süresi, yağış miktarı, rüzgâr hızı ve nispi nem).

2.2 YOGT (Yıllık ortalama günlük trafik)

Yol projelerinin ana parametresi proje trafiği olup, karayolu planlama, projelendirme, yapım, üstyapı tasarımı, trafik güvenliği, çevresel değerlendirmeler vb. için gereklidir. Herhangi bir karayolu projesi başlamadan önce, proje yapılan kesime ait tahmini YOGT değerleri bilinmelidir.

Bu çalışma kapsamında AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programında trafik yoğunluklarındaki etkileri görebilmek için 3 farklı değer seçilmiştir. Değerler 1000, 2500 ve 4000 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu veriler trafiğin az, orta ve yüksek yoğunluğunu temsil etmektedir.

2.3 Güvenilirlik

Üstyapı projesinin kriterlerinin, proje süresi boyunca trafik ve çevre koşulları altında projenin beklenen şartlarını karşılama olasılığı, gelecekteki trafik tahminlerinin ve servis kabiliyetindeki sapmaların belirli bir sınır içinde tutulabilmesi için güvenilirliğinin

belirlenmesi gerekmektedir. (KGM, 2008)

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yayınlamış olduğu Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ndeki güvenilirlik değerleri esas alınarak AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programına aktarılmıştır. Projelendirme rehberinde bulunan güvenlik değerleri Tablo 1'de belirtilmektedir.

Tablo 1. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri (KGM, 2008).

Yolun Sınıfı	Güvenilirlik Değeri, R %
Otoyollar	95
Devlet Yolu	85
İl Yolu	70

2.4 Operasyonel hız (km/sa)

Yollarda hız sınırları, Karayolları Trafik Kanunu'na göre trafik güvenliğini sağlamak ve can ve mal kayıplarını önlemek için önemlidir. Bu yüzden bu çalışmada Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yayınlamış olduğu 2022 yılı için Türkiye'de araçların

uyması gereken yasal hız sınırları kullanılmıştır. Bu hız sınırları il yolları için 90 km/sa, devlet yolları için 110 km/sa ve otoyollar için 120 km/sa kullanılmıştır.

2.5 Kaliforniya taşıma oranı (CBR, %)

Tabanın CBR değeri üstyapı tabakalarının kalınlıklarını belirleyen önemli faktörlerden birisidir. Bu yüzden programda zeminin taşıma gücü kapasitesini değerlendirebilmek için 3 farklı CBR değeri seçilmiştir. Değerler 20, 40 ve 60 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu veriler az, orta ve yüksek dayanım sınıflarına sahip zeminleri kapsayacak şekilde temsil etmektedir (Bowles, 1992).

2.6 Tasarım ömrü

Esnek üstyapıların proje süresi, yolun kullanım biçimi ve finansal olanaklar tarafından belirlenir. Projenin başlangıç servis kapasitesinden son servis kapasitesine düşene kadar geçen yıl sayısı proje süresi olarak adlandırılır (KGM, 2008).

Esnek Üstyapı Tasarım Rehberi esas alınarak tasarım ömrü bitümlü sıcak karışımli yollarda 20 yıl olarak seçilmiştir.

2.7 AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerinde kullanılan bozulma türleri ve sınır değerler

AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri esnek üstyapılar için aşağıdaki

bozulma (distress) türleri için gerçekleştirilmektedir: International Roughness Index (Uluslararası düzensizlik katsayısı) (IRI), kalıcı deformasyon (tüm tabaka toplamı için), a.y. (aşağıdan yukarıya) yorulma çatlaması, termal çatlama, y.a. (yukarıdan aşağıya) yorulma çatlaması ve asfalt tabakası (bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarındaki toplam) kalıcı deformasyon).

Ülkemizde halihazırda AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programı kullanılarak esnek üstyapı tasarımı gerçekleştirilmemektedir. Bu yüzden programda yüklü bozulma tipleri için nihai izin verilebilir değerler belirlenememiştir. Belirlenemeyen bu değerler program tarafından önceden tanımlanmış (default) olup, bu "Target" değerleri hedef/sınır değer olarak alınmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Bozulma türleri ve hedef/sınır değer tablosu.

Bozulma Türü	Birim	Sınır Değer
IRI	m/km	2.7
Kalıcı Deformasyon (Tüm tabaka kalınlıkları toplamı için)	mm	19
A.Y Yorulma Çatlaması	%	25
Termal Çatlama	m/km	189.4
Y.A Yorulma Çatlaması	m/km	378.8
Kalıcı Deformasyon (Asfalt tabakası kalınlığı için)	mm	6

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında öncelikle 27 farklı tasarım senaryosu için Türkiye’de kullanılan Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi’ne göre tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Daha sonra ise bu 27 farklı tasarım senaryosu ve Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi’ne göre belirlenen tabaka kalınlıkları baz alınarak AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programı tarafından Adana ili için iklim verileri de kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucu AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak en uygun ve ekonomik kaplama kalınlıkları belirlenmiş ve değişen kalınlıkların yol maliyetine etkisi irdelenmiştir.

3.1. Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi’ne göre tabaka kalınlık değerleri

Öncelikle 3 farklı yol sınıfı (il yolu, devlet yolu, otoyol), 3 farklı YOGT ve 3 farklı zemin dayanım durumu (toplam 27 farklı senaryo) (Tablo 3) için Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi (KGM, 2008) kullanılarak aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, tüm yol sınıfları ve tasarım senaryoları için aşınma tabaka kalınlığının 50 mm çıktığı, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıklarının ise yol sınıfı ve trafik yoğunluğuna göre değişik sonuçlar aldığı gözlemlenmektedir. Örneğin, YOGT değeri 1000 olan bir tasarım senaryosu için il yolu sınıfına sahip bir yolda binder ve bitümlü temel kalınlıkları sırasıyla 60 ve 80 mm olarak tespit edilmişken bu değerler devlet yolu için 70 ve 90 mm olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3. Trafik yüküne göre belirlenen tabaka kalınlıkları.

Yol Tipi	İl Yolu	Devlet Yolu	Otoyol
Trafik (YOGT)		1000; 2500; 4000	
Güvenilirlik (%)	70	85	95
Trafik Kategorileri (M: Milyon)		21.7M; 54.2M; 86.7M	
Aşınma Tabakası (mm)		50; 50; 50	
Binder Tabakası (mm)	60; 70; 80	70; 80; 100	80; 100;100
Bitümlü Temel (mm)	80; 90; 100	90; 100; 110	100; 120; 140
PMT, Kırmataş (mm)		200	
Taban Zemini			

3.2. AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizi sonuçları

27 farklı tasarım senaryosu ve Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ne göre belirlenen tabaka kalınlıkları baz alınarak AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programı tarafından Adana ili için iklim verileri de kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ne göre belirlenen tabaka kalınlıklarının AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yapılan performans analizleri sonucu Tablo 2'de sunulan bozulma türleri ve her bir bozulma türü için sınır değerlere göre yapılan hesaplamalar sonucunda ilgili kriteri sağlayanlar yeşil renkle, sayılamayanlar ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Tablo 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 Adana ili için 3 farklı yol sınıfı (%70 (il yolu), %85 (devlet yolu) ve %95 (otoyol) güvenilirlik değerleri), 3 farklı trafik yoğunluğu (1000, 2000 ve 3000 YOGT değerleri) ve üç farklı zemin dayanım değeri (CBR 20, 40 ve 60 değerleri) kullanılarak elde edilen 27 farklı tasarım senaryosu için AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programı tarafından 20 yıllık tasarım ömrü sonunda hesaplanan sırasıyla IRI, tüm tabaka kalınlıkları toplamı için kalıcı deformasyon, aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması, termal çatlama, yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması, asfalt tabakası (bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarındaki toplam) kalıcı

deformasyon değerlerini göstermektedir.

Tablo 4'teki IRI sonuçlarına göre trafik yükünün 1000 olduğu durumda güvenilirlik değerleri %70 ve %85 iken düzgünsüzlüğün sınırı aşmadığı fakat güvenilirliğin %95 olduğu durumda sınır değeri aştığı, trafik yükünün 2500 olduğu durumda ise güvenilirlik 70 iken düzgünsüzlüğün sınırı aşmadığı fakat güvenilirliğin %85 ve %95 olduğu durumda sınır değeri aştığı saptanmıştır. Son olarak trafik yükünün 4000 olduğu durumda sadece güvenilirliğin %70 ve CBR değerinin 20 ve 60 olduğu durumda sınır değeri aşmadığı diğer durumlarda ise sınır değerleri aştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5'teki tüm tabaka kalınlıkları toplamı için kalıcı deformasyon sonuçlarına göre tüm güvenilirlik katsayıları, trafik yükü ve CBR değerleri senaryolarında hesaplanan tüm tabaka kalınlıkları toplamı için kalıcı deformasyon değerlerinin ilgili kriteri aştığı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı CBR değerlerinde güvenilirlik değerinin artması ile birlikte tüm tabaka kalınlıklarında oluşan toplam kalıcı deformasyonun da doğru orantılı bir şekilde arttığı ve izin verilebilir değerleri aştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 6'daki aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması sonuçları incelendiğinde, tüm güvenilirlik katsayıları, trafik yükü ve CBR değerleri senaryolarında hesaplanan aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması değerlerinin ilgili kriteri aşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı CBR değerlerinde ve aynı trafik yükü

olan sütunlarda, güvenilirlik değerleri arttıkça doğru orantılı olarak tablo aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdece değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Tablo 7'deki termal çatlama sonuçları incelendiğinde, tüm güvenilirlik katsayıları, trafik yükü ve CBR değerleri senaryolarında hesaplanan termal çatlak değerlerinin ilgili kriteri aşmadığı tespit edilmiştir. Tüm güvenilirlik değerlerinde trafik yükü artmış olsa bile termal çatlak değerlerinin sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu veriler ışığında, Adana ili için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan iklim verileri kullanılarak yapılan AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizlerinde tüm incelenen tasarım senaryoları için tabaka kalınlıklarının yeterli olduğu ve termal çatlak değerlerinin kabul edilebilir bir seviyede oluşacağı yorumu yapılabilir.

Tablo 8 ve 9'da tüm tasarım senaryolarında tasarım ömrü sonunda hesaplanan sırasıyla yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması ve asfalt tabakasındaki (BSK tabakalarındaki toplam) kalıcı deformasyon değerlerinin ilgili kriterleri aştığı tespit edilmiştir.

Özetle, yukarıdaki tablolar incelendiğinde; AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu hesaplanan IRI (düzgünsüzlük)

değerleri açısından bazı tasarım senaryolarında ilgili sınır değer sağlandığı bazıları için ise sağlanmadığı gözlemlenmiştir. Ipekyuz vd., (2022) de benzer şekilde özellikle yüksek trafik ve düşük zemin dayanımı tasarım senaryoları için ülkemiz koşullarında AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu elde edilen BSK kalınlıklarının Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan değerlere göre daha yüksek çıktığını, daha düşük trafik seviyelerine sahip tasarım senaryolarında ise AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu elde edilen BSK kalınlıklarının Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan değerlere göre daha yüksek çıktığını değerlendirmiştir. Kalıcı deformasyon sonuçları incelendiğinde tüm tasarım senaryolarında hem tüm tabakalar hem de asfalt tabakaları için hesaplanan kalıcı deformasyon değerlerinin ilgili sınır değeri aştığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında, tüm tasarım senaryoları için tasarım ömrü sonunda hesaplanan aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması ve termal çatlama değerlerinin ilgili sınır değerleri aşmadığı belirlenmiştir. Yukarıdan aşağıya çatlama sonuçları incelendiğinde ise tüm tasarım senaryoları için ilgili sınır değerlerin aşıldığı tespit edilmiştir.

Tablo 4. IRI sonuç tablosu (m/km).

Güvenilirlik	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	2.23	2.29	2.23	2.60	2.65	2.60	2.64	2.74	2.69
% 85	2.48	2.54	2.48	2.77	2.83	2.77	2.97	3.02	2.96
% 95	2.79	2.86	2.78	3.11	3.17	3.10	3.32	3.37	3.31

Tablo 5. Tüm tabaka kalınlıkları toplamı için kalıcı deformasyon tablosu (mm).

Güvenilirlik	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	28.67	27.8	27.13	41.04	39.99	39.32	44.14	44.54	44.25
% 85	30.17	29.18	28.78	40.63	39.62	38.97	48.17	46.94	46.66
% 95	32.76	31.73	31.34	43.85	42.65	42.36	52.16	50.86	50.62

Tablo 6. Aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması (%).

Güvenilirlik	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	2.91	3.10	2.78	11.5	11.65	11.38	6.46	8.55	6.72
% 85	4.47	5.07	3.65	11.19	12.01	10.55	11.19	13.22	9.78
% 95	5.84	6.69	4.71	17.93	19.72	14.63	16.86	18.81	13.4

Tablo 7. Termal Çatlama (m/km).

Güvenilirlik	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
% 85	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
% 95	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55

Tablo 8. Yukarıdan Aşağıya Yorulma Çatlama (m/km).

Güvenili rlık	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	607	578	726	1209	1161	1379	898	975	1125
% 85	935	913	941	1140	1077	1319	1255	1171	1326
% 95	1198	1175	1206	1542	1489	1584	1517	1427	1590

Tablo 9. Asfalt tabakasındaki (BSK tabakalarındaki toplam) kalıcı deformasyon (mm).

Güvenili rlık	Trafik / CBR								
	1000			2500			4000		
	20	40	60	20	40	60	20	40	60
% 70	22.04	21.69	21.86	33.83	33.28	33.55	37.55	38.35	38.94
% 85	23.48	23.04	23.45	33.81	33.29	33.54	41.49	40.73	41.34
% 95	25.29	25.48	25.92	36.94	36.28	36.86	45.4	44.59	45.24

3.3. Farklı tabaka kalınlıkları için AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizi sonuçları

Bu çalışmanın bir önceki bölümünde (Bölüm 3.2) yapılan AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri farklı tasarım senaryoları için Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan tabaka kalınlıkları kullanılarak yapıldı. Fakat AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu bazı tasarım senaryoları için bazı performans parametrelerinin yol tasarım ömrü sonunda ilgili sınır değeri sağlayamadığı, dolayısıyla da Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan tabaka kalınlıklarının (Tablo 3) bu senaryolar için yeterli olmadığı

gözlemlenmiştir. Her bir bitümlü sıcak karışım tabakasının (aşınma, binder ve bitümlü temel) kalınlıkları daha önce Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan değerlere ilave olarak hesaplanan değerlerden 1,5 ve 3 cm daha da arttırılarak tüm tasarım kombinasyonları için tekrar AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde daha önce tek bir güvenilirlik, trafik yükü, CBR değeri ve tabaka kalınlığına sahip bir tasarım senaryosu ve AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizi için bu sefer (her bir tabaka kalınlığı için üç farklı değer kullanıldığından (orijinal kalınlık, (1,5 ve 3 cm arttırılmış kalınlık)), her bir tasarım senaryosu için 3x3x3=27 farklı analiz yapılmıştır. Bunun yanında, bir önceki bölümde Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz

alınarak hesaplanan tabaka kalınlıkları kullanıldığında AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak her bir tasarım senaryosu için (üç farklı güvenilirlik (yol sınıfı), trafik yükü ve CBR değeri için) 27 farklı tasarım senaryosu analiz edilmişken, bu sefer toplamda $27 \times 27 = 729$ farklı tasarım senaryosu analiz edilmiştir (Avar 2024). Tüm bu detaylı analizlerin sonuçları Avar (2024) çalışmasında bulunabilir. Yapılan analizlerde çok fazla veri olduğundan ve bu kadar yüksek miktarda verinin sunumunun bu çalışmada gerçekleştirilemeyeceğinden, bu çalışma kapsamında sadece AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılan 81 farklı tasarım senaryosunun (devlet yolları (Güvenilirlik = %85), 3 farklı trafik yoğunluğu, 27 farklı tabaka kalınlığı kombinasyonu ve CBR=40 için) performans analizleri detaylı şekilde sunulacaktır. Değiştirilen kalınlıklara göre tasarlanan devlet yolları için IRI sonuçları, (tüm tabaka kalınlıkları toplamı için) kalıcı deformasyon sonuçları, aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması sonuçları, termal çatlama sonuçları, yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları ve BSK tabakası için kalıcı deformasyon sonuçları aşağıda detaylıca sunulacak ve her bir performans parametresi için Tablo 2’de yer alan sınır değer de grafiklerde ayrıca gösterilecek ve bu şekilde bir analiz gerçekleştirilecektir. Bu 81 tasarım senaryosu içinden, aynı trafik yoğunluğu değerine sahip tasarım senaryolarından bazılarında her ne kadar aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıkları ayrı ayrı farklı

değerlere sahip olsa da aynı toplam BSK kalınlığı değerine sahip bazı tasarım senaryoları olduğu gözlemlenmiştir. Performans sonuç grafikleri toplam BSK kalınlığına göre sunulacağından, aynı trafik yoğunluğu ve toplam BSK değerine sahip tasarım senaryolarının performans sonuçlarının ortalama değerleri alınmış ve bu şekilde toplamda 21 farklı trafik yoğunluğu-toplam BSK kalınlığı kombinasyonu için performans analiz sonuçları sunulmuştur.

Şekil 2, 3, 4, 5, 6 ve 7, Adana ili iklim verileri ve AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılan performans analizleri sonucu 20 yıllık tasarım ömrü sonunda hesaplanan sırasıyla IRI, tüm tabaka kalınlıkları toplamı için kalıcı deformasyon, aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması, termal çatlama, yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması, asfalt tabakası (bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarındaki toplam) kalıcı deformasyon sonuçlarını göstermektedir.

Şekil 2’deki IRI sonuçlarına göre her bir trafik yoğunluğu kategorisi için BSK kalınlıkları arttıkça hesaplanan IRI değerleri azalmış, trafik yoğunlukları arttıkça ise hesaplanan IRI değerleri artmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi, trafik yoğunluğu 1000 olan tüm BSK kalınlık senaryolarında, trafik yoğunluğu 2500 olan tasarım senaryoları için toplam BSK kalınlığı 255 mm ve üzerindeyken ve trafik yoğunluğu 4000 olan tasarım senaryoları için toplam BSK kalınlığı 290 mm ve üzerindeyken IRI kriteri sağlanmıştır. Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi’ne göre

YOGT değeri 1000, 2500 ve 4000 olan devlet yolları için toplam BSK kalınlığı sırasıyla 210, 230 mm ve 260 mm olmalıdır (Tablo 3). Bu bakımdan IRI sonuçları incelendiğinde, devlet yollarının üstyapı tasarımında YOGT değeri 2500 olan ve Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlanarlardan yaklaşık 2,5 cm daha ince bir BSK tabakasına sahip olmuş; YOGT değeri 4000 olan yollar için ise Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlanarlardan yaklaşık 3 cm daha ince bir BSK tabakasına sahip olmuş; YOGT değeri 1000 olan il yolları için ise Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlanarlara göre daha fazla kalınlığa sahip olmuştur.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, her bir trafik yoğunluğu kategorisi için BSK kalınlıkları arttıkça hesaplanan kalıcı deformasyon değerleri azalmış, trafik yoğunlukları arttıkça ise hesaplanan kalıcı deformasyon değerleri artmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan tüm tabaka kalınlıkları toplamında oluşan kalıcı deformasyon değerleri analiz edilen tüm devlet yolu tasarım senaryoları için ilgili sınır değeri aşmıştır. Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre YOGT

değeri 1000, 2500 ve 4000 olan devlet yolları için toplam BSK kalınlığı sırasıyla 210, 230 mm ve 260 mm olmalıdır (Tablo 3). Şekil 3'te görüldüğü gibi, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre devlet yolları için hesaplanan toplam BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerine göre kalıcı deformasyon kriteri açısından yetersiz kalmıştır.

Şekil 4'te görüldüğü gibi, her bir trafik yoğunluğu kategorisi için BSK kalınlıkları arttıkça hesaplanan aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdesi değerleri azalmıştır. AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdesi değerleri analiz edilen tüm devlet yolu tasarım senaryoları için ilgili sınır değerin altında kalmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre devlet yolları için hesaplanan toplam BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerine göre aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdesi kriteri açısından yeterlidir.

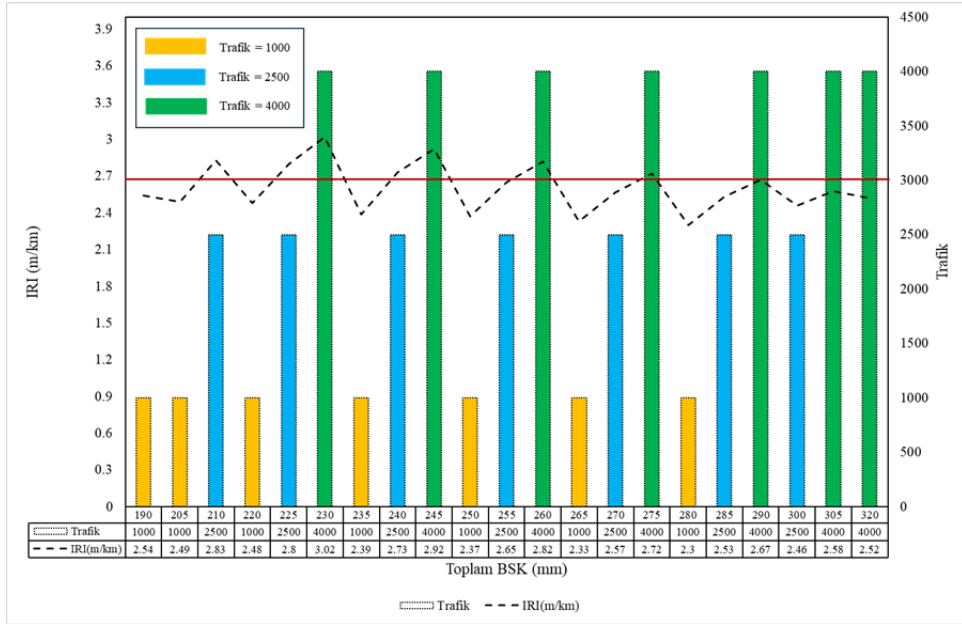
Şekil 5'te görüldüğü gibi, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan termal çatlama değerleri analiz edilen tüm devlet yolu tasarım senaryoları için ilgili sınır değerin altında kalmış, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre devlet yolları için hesaplanan toplam

BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerine göre termal çatlama kriteri açısından yeterli bulunmuştur.

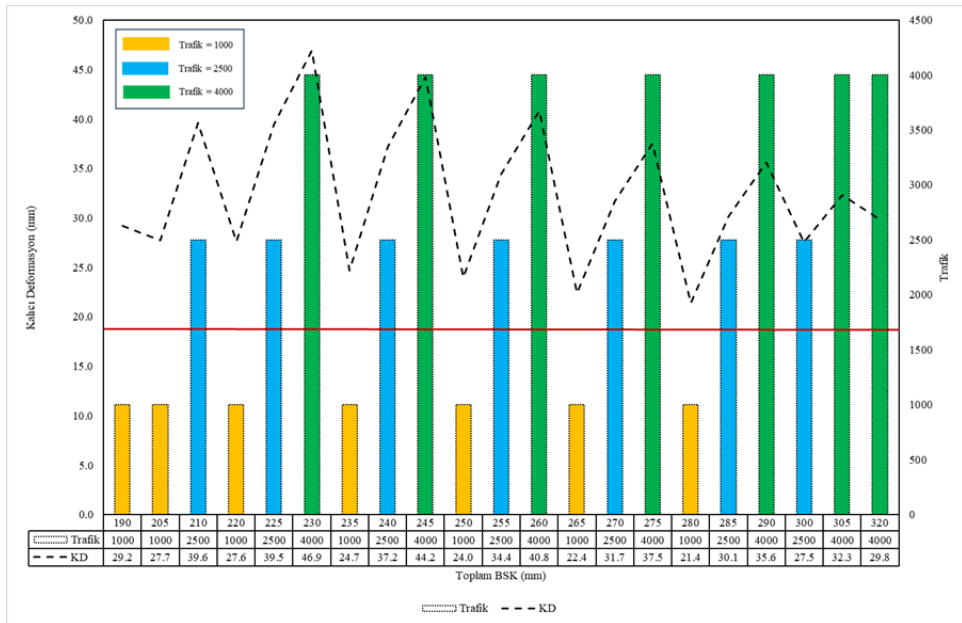
Şekil 6'da görüldüğü gibi, her bir trafik yoğunluğu kategorisi için BSK kalınlıkları arttıkça hesaplanan yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması değerleri azalmış, trafik yoğunlukları arttıkça ise hesaplanan yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması değerleri artmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması değerleri trafik yoğunluğu 1000 ve toplam BSK kalınlığı 265 mm ve üzerinde olan devlet yolları senaryolarında 378.8 m/km olan sınır değerinin altında kalmış, trafik yoğunluğu 2500 ve 4000 olan tüm devlet yolu tasarım senaryolarında ise ilgili sınır değeri aşmıştır. Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre YOGT değeri 1000, 2500 ve 4000 olan devlet yolları için toplam BSK kalınlığı

sırasıyla 210, 230 mm ve 260 mm olmalıdır (Tablo 3). Bu bakımdan yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları incelendiğinde, Adana için AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması kriteri dikkate alınarak tasarlanan devlet yolları, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak tasarlanana göre daha yüksek kalınlıklara sahip olmuştur.

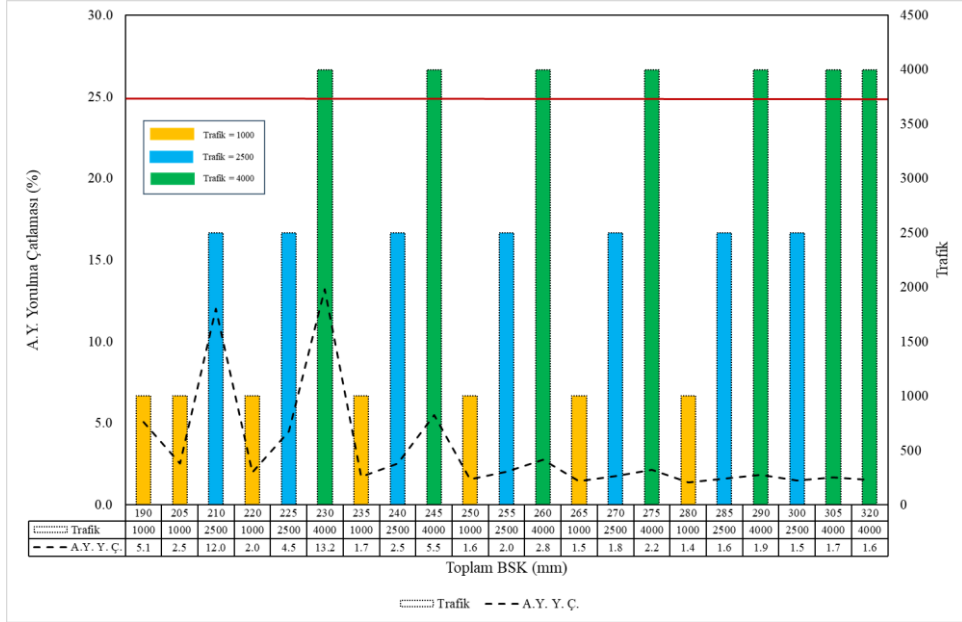
Şekil 7'de görüldüğü gibi, her bir trafik yoğunluğu kategorisi için BSK kalınlıkları arttıkça hesaplanan asfalt tabakası (bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarındaki toplam) kalıcı deformasyon değerleri azalmış, trafik yoğunlukları arttıkça ise hesaplanan kalıcı deformasyon değerleri artmıştır. AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan asfalt tabakası için kalıcı deformasyon değerleri analiz edilen tüm devlet yolu tasarım senaryoları için ilgili sınır değeri aşmıştır.



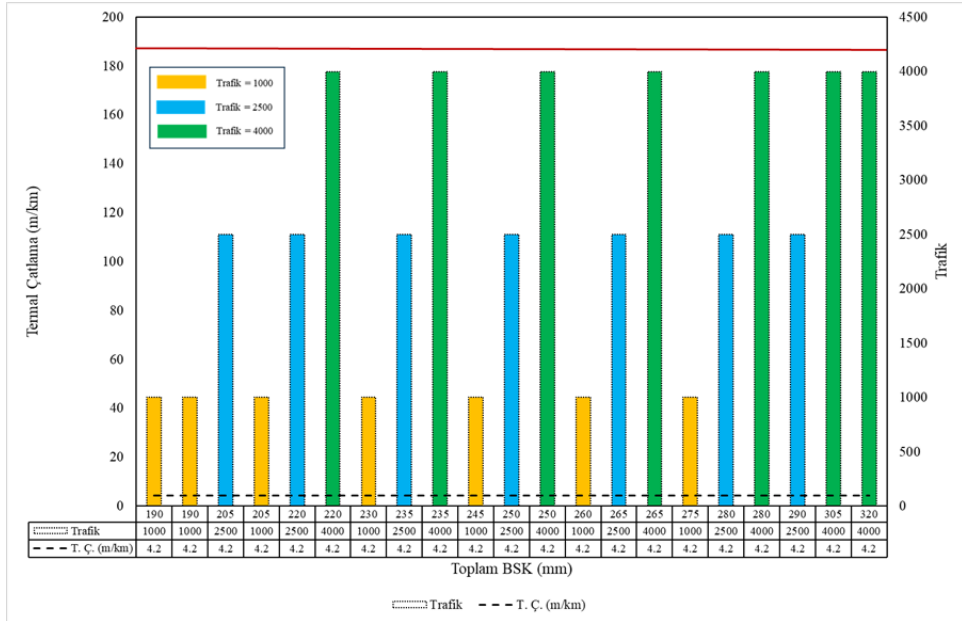
Şekil 2. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre IRI sonuçları.



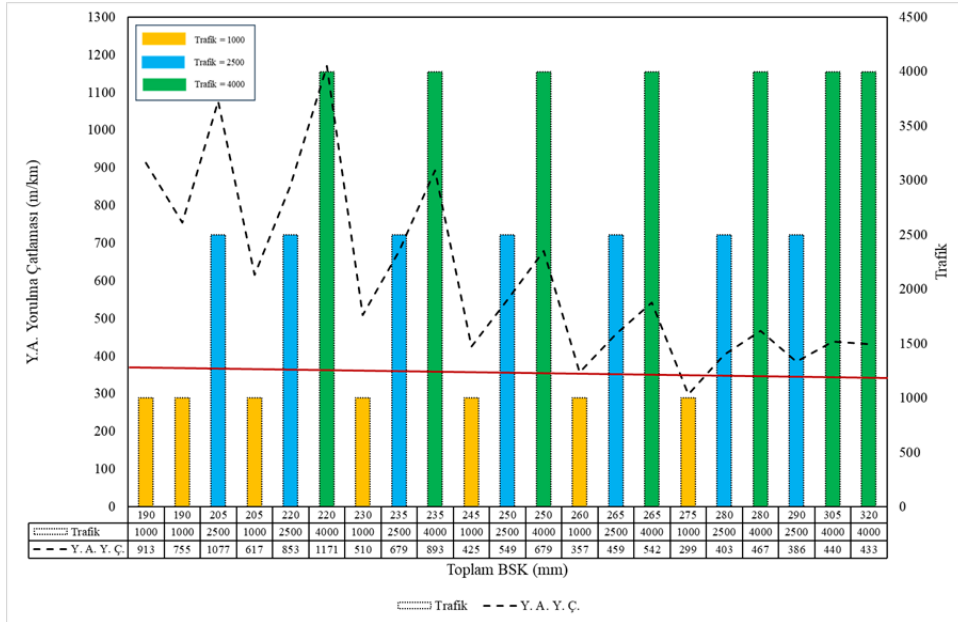
Şekil 3. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre tüm tabaka kalınlıkları toplamında oluşan kalıcı deformasyon.



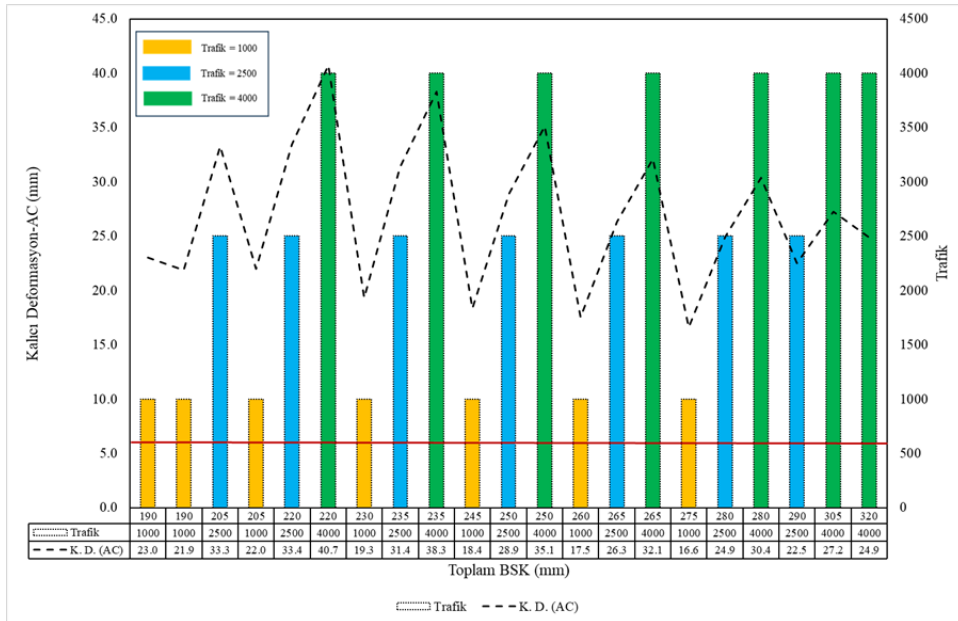
Şekil 4. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre aşağıdan yukarıya yorulma çatlama sonuçları.



Şekil 5. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre termal çatlama sonuçları.



Şekil 6. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları.



Şekil 7. Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre BSK tabakası için kalıcı deformasyon sonuçları.

3.4. Ekonomik analiz

Bu çalışma kapsamında üstyapı tasarımında mevcut Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan BSK tabaka kalınlıkları yerine AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu elde edilen BSK tabaka kalınlıkları kullanılırsa bunun yol malzeme maliyetine etkisi Karayolları 2024 birim fiyatları (KGM, 2024) kullanılarak değerlendirilecektir.

Bu çalışmanın önceki bölümünde (Bölüm 3.2) Adana ili için AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılan 81 farklı tasarım senaryosunun (devlet yolları (Güvenilirlik = %85), 3 farklı trafik yoğunluğu, 27 farklı tabaka kalınlığı kombinasyonu ve CBR=40 için) performans analizleri detaylı şekilde sunulmuş, değiştirilen kalınlıklara göre tasarlanan devlet yolları için IRI sonuçları, (tüm tabaka kalınlıkları toplamı için) kalıcı deformasyon sonuçları, aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması sonuçları, termal çatlama sonuçları, yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları ve asfalt tabakası için kalıcı deformasyon sonuçları sunulmuştur. Bu analizler sonucu bazı performans kriterleri sonuçlarına göre Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarım yapıldığında elde edilen toplam BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi sonucu elde edilen kalınlıklardan farklılık göstermiştir. Dolayısıyla, eğer Karayolları Esnek Üstyapı

Projelendirme Rehberi'ne göre değil de AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi sonuçlarına göre kalınlık tasarımı yapılırsa, yol yapım ve malzeme maliyetlerinde de farklılık oluşacaktır. Avar (2024) çalışmasında yol malzeme maliyetleri ve bu maliyetlere karşılık gelen poz numaraları Karayolları 2024 birim fiyatları (KGM, 2024) kullanılarak detaylıca anlatılmıştır. Bu kısımda Karayolları 2024 birim fiyatları birim fiyatlar kullanılarak bu yol malzeme maliyetlerindeki (sadece yolda kullanılan malzeme maliyetleri (aşınma, binder ve bitümlü temel tabakası ile PMT tabakası maliyetleri) dikkate alınacak olup işçilik, kar ve yol yapım maliyetleri dikkate alınmayacaktır) farklılıklar irdelenecektir:

- Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre Adana ili için IRI sonuçları incelendiğinde: devlet yollarının üstyapı tasarımında YOGT değeri 2500 olan ve Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlananlardan yaklaşık 2,5 cm daha ince bir BSK tabakasına sahip olmuş; YOGT değeri 4000 olan yollar için ise Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlananlardan yaklaşık 3 cm daha ince bir BSK tabakasına sahip olmuş; YOGT değeri 1000 olan yollar için ise Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yollar, AASHTOWare

Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlananlara göre daha fazla kalınlığa sahip olmuştur. Bu bakımdan devlet yollarının üstyapı tasarımında YOGT değeri 2500 ve 4000 olan ve Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanan yolların malzeme maliyetleri, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre tasarlanarlardan yaklaşık %11 az çıkmıştır.

- Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre Adana ili için tüm tabaka kalınlıkları toplamında oluşan kalıcı deformasyon ve asfalt tabakası için kalıcı deformasyon sonuçları değerlendirildiğinde, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan tüm tabaka kalınlıkları toplamında oluşan kalıcı deformasyon ve asfalt tabakası için kalıcı deformasyon değerleri, analiz edilen tüm tasarım senaryolarında ilgili sınır değeri aşmıştır. Bir başka deyişle, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre hesaplanan toplam BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerine göre kalıcı deformasyon kriteri açısından yetersiz kalmıştır. Dolayısıyla yol malzeme maliyetlerinde ciddi farklar gözlemlenmiştir. Bu durumda, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından kullanılan sınır değerler kalibre edilerek yolun tasarım ömrü

sonunda hesaplanan kalıcı deformasyon değerleri değişmemekle birlikte hesaplanan değer in ilgili sınır değeri aşp aşmama durumu değişebilmekte dolayısıyla tasarımda kullanılacak minimum BSK kalınlıkları değişebilmektedir.

- Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre Adana ili aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdesi ve termal çatlama sonuçlarına ait grafikler toplu olarak değerlendirildiğinde, AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan aşağıdan yukarıya yorulma çatlaması yüzdesi ve termal çatlama değerleri, analiz edilen tüm yol sınıflarında ve tasarım senaryolarında ilgili sınır değerin altında kalmıştır. Bir başka deyişle, Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre hesaplanan toplam BSK kalınlıkları AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi analizlerine göre bu iki performans kriteri açısından yeterlidir.
- Değiştirilen tabaka kalınlıklarına göre Adana ili için yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları incelendiğinde: Adana için AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması kriteri dikkate alınarak tasarlanan devlet yolları trafik yoğunluğu 1000 ve toplam BSK kalınlığı 265 mm ve üzerinde olan

devlet yolları senaryolarında 378.8 m/km olan sınır değerin altına inmiş, trafik yoğunluğu 2500 ve 4000 olan tüm devlet yolu tasarım senaryolarında ise ilgili sınır değeri aşmıştır. Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre YOGT değeri 1000, 2500 ve 4000 olan devlet yolları için toplam BSK kalınlığı sırasıyla 210, 230 mm ve 260 mm olmalıdır (Tablo 3). Bu durumda AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi sonucu elde edilen yukarıdan aşağıya yorulma çatlaması sonuçları incelendiğinde trafik yoğunluğu 1000 olan tasarım senaryosunda Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'ne göre elde edilen BSK kalınlığında 265-210=55 mm'lik bir kalınlık farkı oluşmakta bu da yol malzeme maliyetinde yaklaşık %25'lik bir artış oluşturmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada öncelikle, 3 farklı yol sınıfı (il yolu, devlet yolu, otoyol), 3 farklı yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) ve 3 farklı zemin dayanım durumu (toplam $3 \times 3 \times 3 = 27$ farklı senaryo) için Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi kullanılarak aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Daha sonra ise bu 27 farklı tasarım senaryosu için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Adana ili saatlik iklim verileri temin edilmiş, bu iklim verileri ve diğer tasarım parametreleri

kullanılarak AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi ile performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizler doğrultusunda AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu bazı tasarım senaryoları için bazı performans parametrelerinin yol tasarım ömrü sonunda ilgili sınır değeri sağlayamadığı, dolayısıyla da Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan tabaka kalınlıklarının bu senaryolar için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden tabaka kalınlıkları artırılarak farklı senaryolar oluşturulmuş ve AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu en uygun ve ekonomik kaplama kalınlıkları belirlenmiştir. En son olarak da üstyapı tasarımında mevcut Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan BSK tabaka kalınlıkları yerine AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi performans analizleri sonucu elde edilen BSK tabaka kalınlıkları kullanılırsa bunun yol malzeme maliyetine etkisi Karayolları 2024 birim fiyatları kullanılarak değerlendirilmiş; bazı tasarım senaryolarında Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan BSK tabaka kalınlıklarının yeterli, bazı tasarım senaryolarında Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi baz alınarak hesaplanan BSK tabakalarının

dolayısıyla da yol malzeme maliyetlerinin AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi sonucu elde edilen kalınlıklardan ve dolayısıyla da yol malzeme maliyetlerinden az olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın temel amaçlarından biri AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi ülkemizde tam anlamıyla uygulanabilmesi için eksik olan veriler belirlenmesi ve bu yöntemin kullanımına yönelik atılacak adımlar ve eksik verilerin nasıl temin edilmesi gerektiğiyle ilgili pratik önerilerin sunulmasıydı.

Bu çalışma sonucu iklim verilerinin yol üstyapı tasarımına etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ülkemiz iklim verilerinin AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi programında direk olarak kullanılabilmesi için bu verilerin eksiksiz ve programın gerektirdiği formatta hazırlanması ve kullanıcılara sunulması gerekmektedir.

AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi'ne göre daha detaylı ve gerçekçi tasarım yapılabilmesi için ülkemiz karayollarında kullanılan malzemelere ait verilerin, detaylı trafik sayım verilerinin ve diğer verilerin üstyapı tasarımcılarıyla paylaşılması gerekmektedir.

Ülkemizde KGM'nin sorumluluğundaki tüm yolların düzenli olarak performans verileri toplanmalı ve bu verilerin talep

eden üstyapı mühendisleri ve araştırmacılarla paylaşılması büyük önem arz etmektedir.

AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi farklı performans parametreleri için otomatik (default) atanan sınır değerler kullanıyor olup bu değerlerin yol tasarımcısı tarafından değiştirilmesi mümkündür. Bu değerlerin değiştirilmesi durumunda AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi tarafından yolun tasarım ömrü sonunda hesaplanan performans değerleri değişmemekle birlikte hesaplanan değerlerin ilgili sınır değeri aşıp aşmama durumu değişebilmektedir. Ülkemizde yol üstyapı tasarımı için ileriki dönemlerde AASHTOWare Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Yöntemi kullanılacaksa her bir performans parametresi için ilgili sınır değerler mutlaka belirlenmelidir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Uygulama, makale yazımı, analiz ve yorumlama

Yazar 2: Kurgu, kavramsallaştırma, analiz ve yorumlama, makale yazımı, ve revizyon

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne iklim verilerini sağladıklarından dolayı teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- AASHTO (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.
- AASHTO (2024). AASHTOWare Pavement ME Design - Climatic Data. (n.d.). Retrieved March 28, 2024, from <https://medesign.com/MEDesign/ClimaticData.html?AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- Aguib, A. A. (2021). Flexible pavement design AASHTO 1993 versus mechanistic-empirical pavement design.
- Armağan, K. (2019). Karayolunun AASHTO metoduna göre tasarımı ve Türkiye kalibrasyonu.
- Avar, E. (2024). AASHTO-93 ile AASHTOWare mekanistik-ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinin ülkemiz koşullarında karşılaştırılması ve ekonomik analizi (Master's thesis, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi).
- Bağdatlı, M. (2010). *Esnek üst yapı kaplamalarındaki hasar özelliklerinin bakım maliyetleri üzerine etkisi* (Master's thesis, Namık Kemal Üniversitesi).
- Bağdatlı, M. E. C., & Yıldırım, M. Ş. (2017). Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 102-111. <https://doi.org/10.17100/nevbittek.304473>
- Baus, R. L., & Stires, N. R. (2010). *Mechanistic-empirical pavement design guide implementation* (No. FHWA-SC-10-01). University of South Carolina. Dept. of Civil & Environmental Engineering.
- Bowles, J. E. (1992). *Engineering properties of soils and their measurement* (pp. x+-241).
- Caliendo, C. (2012). Local calibration and implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide for flexible pavement design. *Journal of Transportation Engineering*, 138(3), 348-360. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000328](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000328)
- Darter, M. I., Von Quintus, H., Bhattacharya, B. B., & Mallela, J. (2014). *Calibration and implementation of the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide in Arizona* (No. FHWA-AZ-14-606). Arizona. Dept. of Transportation. Research Center.
- Deniz, T. (2016). Türkiye'de Ulaşım Sektöründe Yaşanan Değişimler Ve Mevcut Durum. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 21(36), 135-156. <https://doi.org/10.17295/dcd.79471>
- Ecevit, O. (2007). Karayollarında rijit üstyapı uygulamaları ve tasarımı.
- Haider, S. W., Buch, N., Chatti, K., & Brown, J. (2011). Development of traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design guide in Michigan. *Transportation Research Record*, 2256(1), 179-190. <https://doi.org/10.3141/2256-21>
- Ipekyuz, B., Yaman, H. T., & Öztürk, H. I. (2022). Challenges and benefits of the use of AASHTOWare for 3 climatic regions in Turkey. *Teknik Dergi*, 33(5), 12473-12500. <https://doi.org/10.18400/tekderg.793889>
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (2008). *Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi*, KGM Yayını, Ankara.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) (2024). *Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi*. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/MerkezBirimler/ProgramIzlemeDairesiBaskanligi/2024YiliBirimFiyatListesi.pdf>

- Kaya, O. (2015). *Investigation of AASHTOWare Pavement ME Design/Darwin-ME TM performance prediction models for Iowa pavement analysis and design* (Master's dissertation, Iowa State University).
- Kim, S., Ceylan, H., Ma, D., & Gopalakrishnan, K. (2014). Calibration of pavement ME design and mechanistic-empirical pavement design guide performance prediction models for Iowa pavement systems. *Journal of Transportation Engineering*, 140(10), 04014052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000704)
- Kök, E. (2008). Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları.
- Li, J., Pierce, L. M., & Uhlmeier, J. (2009). Calibration of flexible pavement in mechanistic-empirical pavement design guide for Washington state. *Transportation Research Record*, 2095(1), 73-83. <https://doi.org/10.3141/2095-08>
- Li, Q., Xiao, D. X., Wang, K. C., Hall, K. D., & Qiu, Y. (2011). Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. *Journal of Modern Transportation*, 19, 114-133. <https://doi.org/10.1007/BF03325749>
- Muthadi, N. R., & Kim, Y. R. (2008). Local calibration of mechanistic-empirical pavement design guide for flexible pavement design. *Transportation Research Record*, 2087(1), 131-141. <https://doi.org/10.3141/2087-14>
- NCHRP (2004). Guide for mechanistic empirical design of new and rehabilitated pavement structures. NCHRP Rep. 1-37A, Final Rep.
- Öztürk, H. I., Tan, E. B., Şengün, E., & Yaman, İ. Ö. (2019). Farklı trafik, zemin, malzeme ve iklim koşulları için mekanistik-ampirik (ME) yöntemle tasarlanan derzli donatısız rijit üstyapı sistemlerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 771-784. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416536>
- Shakhan, M. R., Topal, A., & Şengöz, B. (2021). A methodology for implementation of the mechanistic-empirical rigid pavement design in Turkey. *Turkish Journal of Science and Technology*, 16(1), 1-10.
- Shakhan, M. R., Topal, A., & Şengöz, B. (2021). Data collection for implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) in Izmir, Turkey. *Teknik Dergi*, 32(6), 11361-11380. <https://doi.org/10.18400/tekderg.651399>
- Swan, D. J., Tardif, R., Hajek, J. J., & Hein, D. K. (2008). Development of regional traffic data for the mechanistic-empirical pavement design guide. *Transportation research record*, 2049(1), 54-62. <https://doi.org/10.3141/2049-07>
- Şengün, E., Öztürk, H. İ., & Yaman, İ. Ö. (2020). Mekanistik-ampirik ve geleneksel beton yol tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ deneme kesimi. *Teknik Dergi*, 31(5), 10251-10274. <https://doi.org/10.18400/tekderg.565709>