



Comparison of jointed plain concrete pavement systems designed by mechanistic-empirical (M-E) method for different traffic, subgrade, material and climatic conditions

Hande Işık Öztürk^{1*}, Emine Bilge Tan¹, Emin Şengün², İsmail Özgür Yaman¹

¹Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey,

²Department of Civil Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, 06010, Turkey

Highlights:

- The differences between Mechanistic-Empirical design and AASHTO 1993
- The effects of climate on the concrete slab thickness and joint spacing of JPCP
- The effects of concrete material properties on the pavement design

Keywords:

- Jointed plain concrete pavement design (JPCP)
- Mechanistic-Empirical design (M-E)
- Climate
- Slab thickness
- Joint spacing

Article Info:

Research Article
Received: 29.11.2017
Accepted: 12.01.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416536

Acknowledgement:

The authors acknowledge the financial support of TCMB in purchasing the AASHTOWare 2.0 software

Correspondence:

Author: Hande Işık Öztürk
e-mail:
ozturkha@metu.edu.tr
phone: +90 312 210 24 01

Graphical/Tabular Abstract

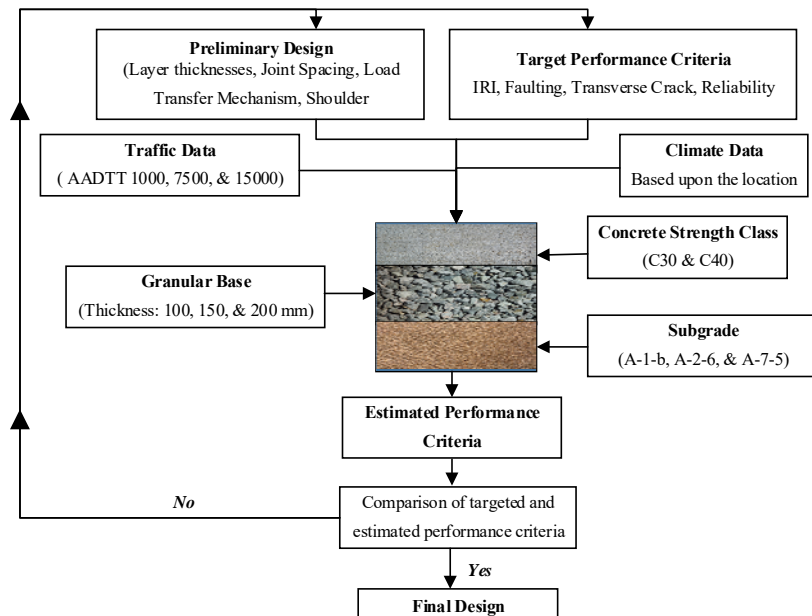


Figure A. M-E jointed plain rigid pavement design flow diagram

Purpose: The purpose of this study is to identify the effects of subgrade type, traffic volume and concrete strength class on slab thickness and joint spacing for Turkey's different climatic conditions.

Theory and Methods: The effects of different traffic, subgrade and concrete strength classes for 20 and 40 year's service periods on the thickness and joint spacing of jointed plain concrete pavements are determined by M-E design method for ten different regions that reflect different climatic classes in Turkey. A total of 360 rigid pavement designs are made for three traffic volumes, three subgrade types and two concrete strength classes for each region

Results: It is concluded that for jointed plain concrete pavement (JPCP) design, the most effective parameters are found to be traffic and climate with subgrade type having limited effect. Moreover, regions having a high temperature differences and pavement carrying higher traffic volume created the worst possible combination for JPCP design.

Conclusion: Although the effects of climate and joint spacing are not considered in AASHTO 93, these parameters are significantly important for rigid pavement design, as presented.



Farklı trafik, zemin, malzeme ve iklim koşulları için mekanistik-ampirik (M-E) yöntemle tasarlanan derzli donatısız rijit üstyapı sistemlerinin karşılaştırılması

Hande Işık Öztürk^{1*}, Emine Bilge Tan¹, Emin Şengün², İsmail Özgür Yaman¹

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06800, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06010, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Mekanistik-ampirik üstyapı tasarımının AASHTO 1993'den farkları
- İklim özelliklerinin beton plak kalınlığı ve derz aralığına etkisi
- Beton plaka malzeme özelliklerinin üstyapı tasarımına etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.11.2017

Kabul: 12.01.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416536

Anahtar Kelimeler:

Derzli donatısız rijit üstyapı,
mekanistik-ampirik tasarım,
iklim, plaka kalınlığı,
derz aralığı

ÖZET

Artan bilgi birikimine bağlı olarak yol üstyapı tasarımlarında kullanılmakta olan geleneksel ampirik katalog yöntemler, yerini çatlak, faylanma ve yüzey düzgünlüğü gibi üstyapı performansını etkileyen bozulmaları değerlendiren mekanistik-ampirik (M-E) tasarım yöntemlerine bırakmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye'deki farklı iklim sınıflarını yansıtan on farklı il için 20 ve 40 yıllık servis sürelerinde farklı trafik, zemin ve beton dayanım sınıfının derzli donatısız üstyapı tasarım kalınlığına ve derz aralıklarına etkileri M-E tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Her bölge için, üç farklı trafik hacmi, üç farklı zemin tipi, iki farklı beton dayanım sınıfı için toplam 360 tasarım yapılmıştır. Analizler sonucunda, M-E tasarım yönteminin geleneksel AASHTO 93 ampirik yönteminden en önemli farklarından birisi olan iklim etkisinin, üstyapı tasarımlarında oldukça etkili olduğu görülmüştür. Dolayısıyla farklı iklim koşullarında; zemin tipinin, trafik hacminin ve beton dayanım sınıfının; plaka kalınlığına ve derz aralığına etkisi açıkça bu çalışma kapsamında ortaya konmuştur. Buna ek olarak, AASHTO 93 ampirik yönteminde derz aralıkları tecrübe ve gözlemlere dayalı olarak öngörülebilmektedir. Fakat M-E tasarım yöntemiyle derz aralıklarının tespit edilebilmesi ülkemiz gibi beton yol deneyimi olmayan ülkeler için büyük avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmanın bir başka çıktısı da beton plakasının malzeme özelliklerinin tasarımı üzerinde çok büyük etkisi olması sebebiyle M-E yöntemiyle daha yenilikçi malzemelerin beton yol inşaatında kullanılmasını mümkün kılmasıdır.

Comparison of jointed plain concrete pavement systems designed by mechanistic-empirical (M-E) method for different traffic, subgrade, material and climatic conditions

H I G H L I G H T S

- The differences between Mechanistic-Empirical Design and AASHTO 1993
- The effects of climate on the concrete slab thickness and joint spacing of JPCP
- The effects of concrete material properties on the pavement design

Article Info

Research Article

Received: 29.11.2017

Accepted: 12.01.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416536

Keywords:

Jointed plain concrete
pavement design,
Mechanistic-Empirical
design, climate, slab
thickness, joint spacing

ABSTRACT

In pavement design, traditional empirical catalog methods leave their place to next generation mechanistic-empirical (M-E) design methods that utilize cracking, faulting and roughness as pavement performance parameters. Within the scope of this study, the effects of different traffic, subgrade and concrete strength classes for 20 and 40 year's service periods on the thickness and joint spacing of JPCP are determined by M-E design method for ten regions representing different climatic classes. A total of 360 rigid pavement designs are made for three traffic volumes, three subgrade types and two concrete strength classes for each region. As a result, the effects of subgrade type, traffic volume and concrete strength class on slab thickness and joint spacing is clearly identified for different climatic conditions. In addition, the joint spacing, which is predicted based on experience and observations in the in AASHTO 93 empirical method, can be successfully determined by M-E design method. This is especially advantageous for countries without rigid pavement experience like our country. Another output of this study is that M-E method makes it possible to use more innovative materials in the construction of rigid pavements since the material properties of the concrete slab have significant effects on the design.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozturkha@metu.edu.tr, eminebilgetan95@gmail.com, esengun@ybu.edu.tr, ioyaman@metu.edu.tr / Tel: +90 312 210 2437

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Servis ömrü boyunca kullanıcılar tarafından güvenli ve konforlu bir hizmet verebilmesi için yol üstyapı tasarımlarına; trafik, iklim, çevresel etkiler, zemin ve üstyapı malzeme özellikleri gibi birçok parametre etkisinin yansıtılması büyük önem arz etmektedir. Bu parametrelerin tasarıma dahil edilmesi için günümüzde yol üstyapı tasarım yaklaşımları deney ve gözlemlere dayalı ampirik katalog yöntemlerinden, Mekanistik-ampirik (M-E) yöntemlere doğru kaymaktadır. İçerisinde birçok kısıtlamalar barındırmasına rağmen sınırlı sayıda parametre ile tasarım yapılmasına imkân sağlaması nedeniyle dünyada ve özellikle ülkemizde halen hem rijit hem de esnek üstyapı tasarımı için Amerikan Ulaştırma ve Karayolları Birliği (AASHTO) tarafından geliştirilen tasarım rehberi kullanılmaktadır. Bu rehberin temelleri 1958 yılında gerçekleştirilen Amerikan Karayolları Birliği (AASHTO) yol testi verileri ve gözlemlerine dayanmaktadır [1]. Tasarım kataloğunun ilk versiyonu yalnızca kaplama kalınlıkları ile dingil yükleri tekerrür sayıları arasındaki bağlantılar üzerine kurulmuştur [2]. Fakat yıllar içerisinde gelişen farklı teori ve gözlemlerle bağlı olarak, üstyapı ve zemin malzeme karakteristiğini gösteren modüller ile kaplama inşası ve hizmet ömrü boyunca oluşacak risk faktörlerini de göz önüne alan güvenilirlik derecesi (reliability) gibi yeni parametreler de eklenerek günümüzde kullanılan AASHTO 1993 tasarım rehberi haline almıştır [2].

Ampirik tasarım yöntemlerinin içerdiği kısıtlamalardan ötürü (malzeme, trafik yükü ve iklim gibi parametrelerin doğrudan kullanılmaması), yol üstyapılarının maruz kaldığı etkilerin daha gerçekçi olarak öngörülmesi adına M-E üstyapı tasarımına geçme çalışmaları başlatılmıştır. 1996 yılından itibaren AASHTO Çalışma Grubu (Joint Task Force on Pavement) öncülüğünde başlatılan ve daha sonra farklı sektörlerin ve üniversitelerin desteğiyle devam eden çalışmalar neticesinde 2004 yılında yarı mekanik yöntem olan M-E üstyapı tasarım rehberi (MEPDG) yayınlanmıştır [3]. Yayınlanan bu yeni yaklaşıma ait geliştirilen sonlu elemanlar yöntemine dayalı yazılım programı, kullanıcılara üstyapı tasarımında ampirik yöntemden, yarı mekanik üstyapı tasarımına geçişte önemli bir basamak oluşturmuştur. Bu program yıllar içinde çeşitli güncellemeler geçirmiştir ve son versiyonu ise AASHTOWARE 2.0'dır. Yeni tasarım yönteminin mekanik kısmını belirtilen trafik yüklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak üstyapıda meydana gelecek gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonların hesaplanmasıdır. Diğer taraftan bu mekanik büyüklüklerin güvenilirlik katsayıları da göz önüne alınarak ampirik bozulma transfer fonksiyonlarına (distress transfer function) bağlı olarak çatlak, faylanma ve düzgünlük gibi üstyapı performansını etkileyen parametrelere dönüştürülmesi ve zamana göre tahmin edilebilmesi de tasarımın ampirik kısmıdır. Bundan dolayı tasarımın ampirik kısmını oluşturan üstyapıda meydana gelecek bozulmaların tahmin edilebilmesi için mevcut daha önceki üstyapı tecrübe ve gözlemlerine de

dayanarak programın yerel kalibrasyonun yapılması, tasarımın daha gerçekçi sonuç vermesi ve bozulma tahminlerinin daha doğru yapabildiği adına oldukça önemlidir.

MEPDG'yi diğer ampirik yöntemlerden ayıran en önemli özelliklerden birisi de tasarım girdilerinin daha gerçekçi ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanması ihtiyacıdır. Trafik yüklerinin belirlenmesi için diğer yöntemlerden farklı olarak eşdeğer tek dingil yükü (ESAL) yaklaşımı yerine daha gerçekçi, her araca özel tam spektrumlu dingil yüklerinin ayrı ayrı girilmesi öngörülmüştür. Malzeme karakteristik özelliklerinin kaplama kalınlığı üzerindeki etkilerinin hesaba katılması için AASHTO 86/93'den farklı olarak kaplama için beton elastisite ve kopma modülü dışında daha farklı parametrelere de ihtiyaç duymaktadır. Bunlar; çekme dayanımı, basınç dayanımı, poisson oranı, termal genişleme katsayısı, birim hacim ağırlığı ve rötre birim şekil değiştirmesi gibi betonun karakteristik özellikleridir. Ayrıca çevresel etkilerin performans etkisinin hesaplanabilmesi için detaylı bir iklim verisinin kullanılması öngörülmüştür.

Çalışmanın önemi ve mevcut veri detayına bağlı olarak program girdileri üç seviyede (Seviye 1-2-3) tanımlanmıştır. Seviye 1'deki tasarım girdilerini zemine ilişkin saha deneyleri sonucunda elde edilen veriler, üstyapı beton malzemesi için ise laboratuvar testleri sonuçlarından elde edilen veriler oluşturmaktadır. Seviye 1 girdileri daha gerçekçi sonuçlar vermesine rağmen elde edilmesi uzun zaman almaktadırlar ve yüksek maliyetlidirler. Seviye 2'deki tasarım girdileri lokal olarak kalibre edilmiş korelasyon denklemleri yardımıyla elde edilen verilerdir. Bu veriler Seviye 1'deki verilere göre görece daha kolay elde edilen verilerdir. Seviye 3'deki tasarım girdileri ise ME tasarım kataloğunda önerilen standart tasarım verileridir. Seviye 3'deki veriler daha yoğunlukla ABD ve Kanada'da dışında lokal kalibrasyonun henüz tamamlanmadığı ülkelerde genel olarak tercih edilmektedir. Fakat başta İtalya [4], Mısır [5] ve Katar [6] gibi ülkeler olmak üzere birçok ülkede kalibrasyon çalışmaları başlamıştır. Yerel kalibrasyon verilerinin mevcut olması halinde başka bir deyişle en azından Seviye 2 girdilerinin mevcut olması, hem performans hem de ekonomik açıdan en ideal tasarımların elde edilmesini mümkün kılacaktır. Ülkemizde henüz kalibrasyon çalışması olmadığı için çalışma kapsamında Seviye 3 tasarım verileri kullanılmıştır.

Ülkemizde özellikle kalıcı deformasyonlar ve çatlak oluşumları açısından riskli ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yol kesimlerinde servis süresini arttırabilmek ve bakım oranını maliyetlerini düşürebilmek açısından beton yolların uygulanmaları yakın zamanda öne çıkacaktır. Halihazırda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi 2016 yılında yayınlanmıştır [7]. Bu çalışmada ülkemizde gerçekleştirilecek beton yol üstyapı tasarımlarında farklı iklim, trafik, zemin ve üstyapı malzeme özelliklerinin; plak kalınlığı ve derz aralığı tasarımı üzerine etkilerinin görülmesi adına katkı sağlayacaktır.

2. TASARIM PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ (SELECTION OF DESIGN PARAMETERS)

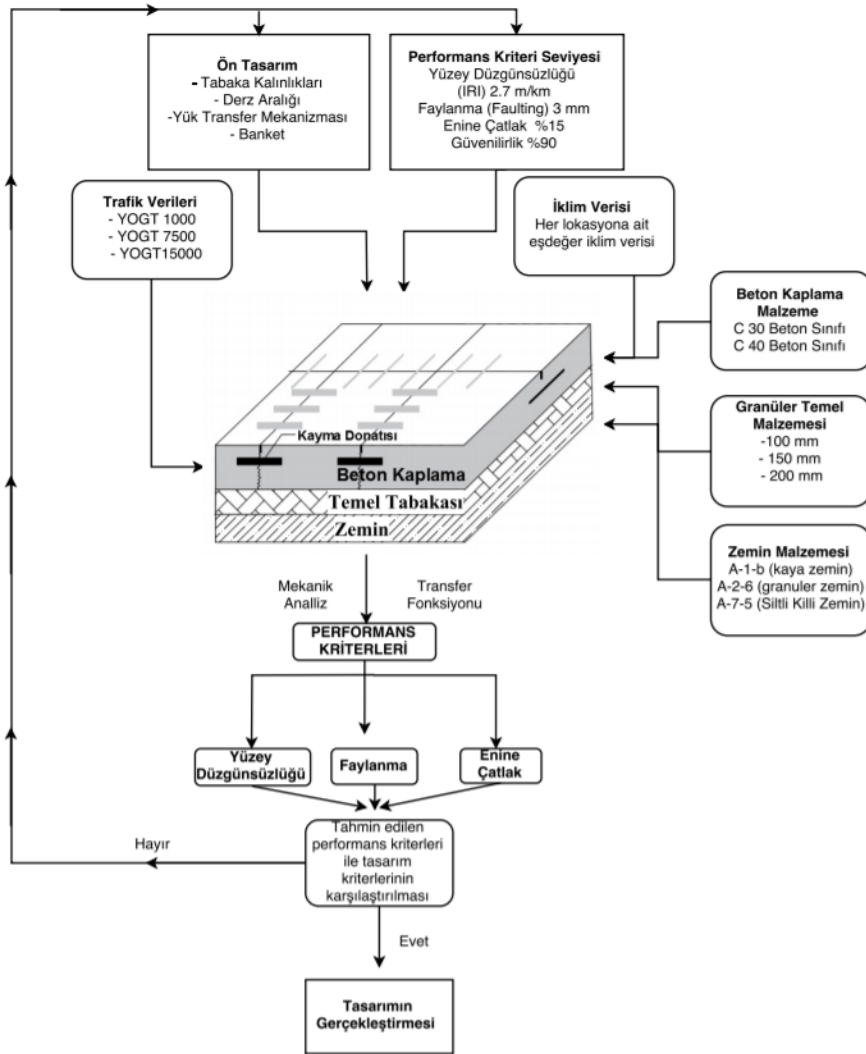
Çalışma kapsamında, ülkemizde M-E tasarım yöntemi (MEPDG-AASHTOWare 2.0) kullanılarak rijit (beton) üstyapı tasarımına etki eden faktörleri belirleyebilmek için farklı iklim koşullarını temsil eden on farklı il seçilmiştir. Her il için normal ve uzun ömürlü servis süresini temsil etmesi için iki farklı servis süresi (20 ve 40 yıl), farklı zemin koşullarını temsil etmesi için yatak katsayılarına bağlı olarak üç farklı zemin tipi (yumuşak-orta sertlik-sert/sıkı), farklı trafik hacmini (düşük-orta-yüksek) temsil etmesi adına üç farklı yıllık ortalama günlük kamyon trafiği (YOGKT) ve farklı üstyapı malzeme özelliklerini temsil etmek adına iki farklı beton basınç sınıfı seçilerek toplamda 360 adet ideal tasarım verisi elde edilmiştir. Çalışma boyunca güvenilirlik katsayısı %90 olarak sabit tutulmuştur. İdeal tasarım verisi seçimi için literatürde mevcut bir yöntem yoktur ve deneyime dayanmaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında ideal tasarım seçimleri en azından bir performans kriterinin servis süresi sonunda maksimum

değere ulaşması için gerekli en ince tasarım olarak, Şekil 1'deki akış diyagramına göre belirlenmiştir.

2.1. Çalışma Bölgelerinin Belirlenmesi (Determination of Provincial Regions)

Türkiye genelinin farklı iklim koşulları, zemin özellikleri, çevresel etkileri ve taşıt kompozisyonu ile temsil edilmesi adına çalışma bölgeleri belirlenirken, birçok faktör dikkate alınarak il seçim matrisi oluşturulmuştur. Ancak seçim matrisinin ana faktörünü farklı iklim koşulları oluşturmaktadır. Bunun nedeni; M-E tasarımda iklim tasarım verilerinin çalışma bölgeleri ile temsil edilmesidir.

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM) bütün illerimiz için yaptığı bir iklim sınıflandırılması çalışması mevcuttur. M-E tarafından da iklim verisi alt yapısını oluşturan Uzun Dönem Üstyapı Performans Programı (LTPP) iklim sınıflandırma tanımlarına benzer olan MGM'nin kullandığı Köppen İklim Sınıflandırma sistemi şehirlerimizin iklim



Şekil 1. Belirlenen çalışma bölgeleri için M-E derzli donatısız rijit üstyapı tasarımı akış diyagramı
(M-E jointed plain rigid pavement design flow diagram for specified provincial regions)

sınıflandırılmasında kullanılmıştır [8]. Her iklim sınıfının ortalamasını yansıtan şehirlerin seçilmesine özen gösterilmiştir. Ayrıca kamyon trafiği mevcut durumda fazla olmadığı halde uluslararası karayolu ağı veya demiryolu yük taşımacılığı üzerinde yer alan, doğal limanlara, sınır kapılarına veya lojistik yerlere yakın şehirlerde kamyon trafiği hacminin gelecekte büyümesi beklendiğinden bu şehirler de analize dâhil edilmiştir.

Bu bağlamda tüm bu faktörler göz önüne alınarak Türkiye genelinde on farklı il çalışma bölgesi olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Çalışma bölgelerine ait iklim verileri Tablo 1’de verilmiştir. Bu verilerin çalışma kapsamında kullanımı “2.3 İklim ve çevresel etki verilerin belirlenmesi” kısmında detaylıca ele alınmıştır.

2.2. Trafik Verilerinin Belirlenmesi

(Determination of Traffic Data)

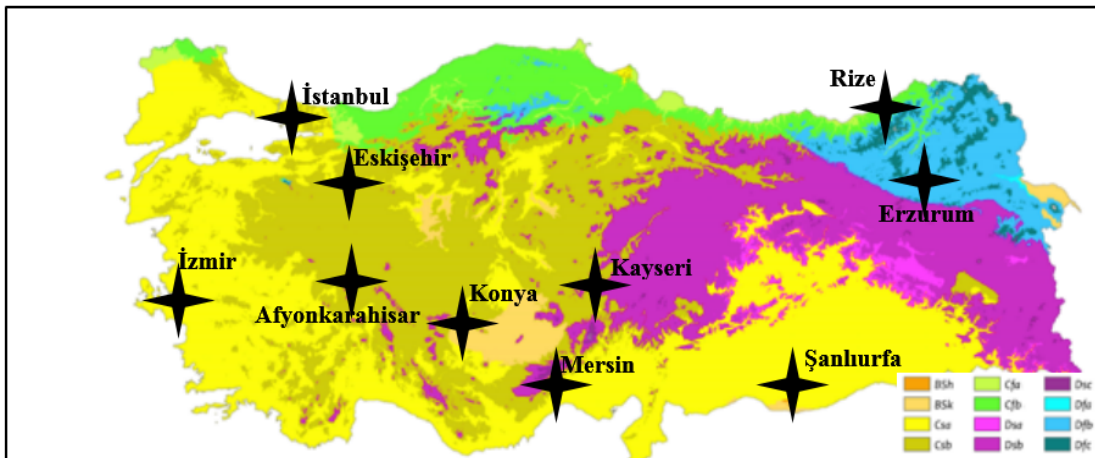
M-E tasarım metodunda kaplamanın maruz kaldığı trafik yükü, gerçek dingil yükü dağılımı ve servis ömrü boyunca gözlenen toplam ağır taşıt trafiği tekrar sayısına bağlı olarak ele alınmaktadır. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için taşıt sınıfı dağılımı, taşıt sınıflarının aylık ve saatlik değişim faktörleri, dingil konfigürasyonu, dingil yükü dağılımı ve yatay sapma verileri gibi kapsamlı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu verilerin büyük çoğunluğu Karayolları Genel Müdürlüğünden temin edilebilmektedir. Fakat bu çalışma kapsamındaki parametreleri sınırlandırmak için M-E yazılımındaki standart olarak kullanılan günlük, aylık ve yıllık taşıt sınıf dağılımı değerleri kullanılmıştır.

Her bölge için M-E rijit üstyapı tasarımında trafik hacminin etkisinin görülmesi için düşük, orta ve ağır taşıt trafiği hacimlerini temsil eden üç farklı YOGKT değerleri seçilmiştir. Düşük, orta ve yüksek trafik hacimleri sırası ile 1000, 7500 ve 15000 YOGKT olarak belirlenmiştir. Günden güne trafik hacmindeki artış nedeniyle çalışmada %2 trafik büyüme oranı kullanılmıştır ve ayrıca taşıt sınıfı dağılımları da yıllar içinde sabit kabul edilmiştir.

2.3. İklim ve Çevresel Etki Verilerinin Belirlenmesi (Determination of Climate and Environmental Effect Data)

İklim etkisi, MEPDG’yi diğer yöntemlerden ayıran en önemli tasarım parametresidir. Tek bir zemin ve iklim koşulu altında gerçekleştirilen AASHTO yol testine dayalı ampirik denklemlere göre tasarım gerçekleştirilen AASHTO 73/86/93 yöntemlerinden farklı olarak, MEPDG de çok ayrıntılı iklim girdileri istenilmektedir. Performans açısından önemli etkiler gösteren sıcaklık ve nem değişimi profilleri, M-E tasarım metodunda kullanılmaktadır. Sıcaklık ve nem değişimi profillerini üretebilmek için saatlik sıcaklık, yağış, bağıl nem, güneş ışığı yüzdesi ve rüzgâr hızı verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler ABD ve Kanada’da yer alan Uzun Dönem Üstyapı Performans Programı (LTPP) tarafından incelenen üstyapı kesitleri ve büyük havalimanlarındaki hava gözlem istasyonları için en az on senelik veriyi içerecek şekilde mevcuttur. Ancak iklim modeli henüz ülkemiz için kalibre edilmemiş ve iklim veri dosyaları EICM (Enhanced Integrated Climatic Model) formatında ülkemiz için oluşturulmamıştır. Bu çalışmada iklim verilerinin bulunması için İtalya [4], Peru [10] ve Katar [6] gibi Amerika ve Kanada dışındaki ülkelerde ilk defa M-E tasarım metodu kullanılırken uygulanan eşdeğer iklim verisi belirleme yöntemi benimsenmiştir.

Bu yöntem, Türkiye’deki proje bölgesine iklim yönünden benzeyen ABD’de yer alan başka hava gözlem istasyonlarının saptanması ve M-E analizinde ABD’deki seçilen istasyonlar için oluşturulan iklim veri dosyalarının kullanılması şeklindedir. Yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle benzerliğin aranacağı coğrafya alanı daraltılarak, Türkiye’de Köppen grupları için seçilen çalışma bölgesi ile arasında yıllık ortalama minimum kış ayı sıcaklığı, yıllık ortalama maksimum yaz ayı sıcaklığı, yıllık ortalama ilkbahar ve sonbahar sıcaklık, yıllık ortalama sıcaklık ve yıllık ortalama yağış verileri ve yükseklik açısından benzerlik saptanan istasyonlar ön eşleşmeye tabi tutulmuştur [12-15]. Son eşleştirmede de yıllık ortalama günlük güneşlenme şiddeti, ortalama rüzgâr hızı ve ortalama bağıl



Şekil 2. Türkiye Köppen İklim Sınıflandırma Haritası ve seçilen bölgeler [8]
(Turkey Köppen Climate Classification Map and Specified Regions)

Tablo 1. Çalışma bölgelerine ait iklim verileri (Climate data for the provincial regions) [11]

Çalışma Bölgeleri	Yıllık Ortalama	Yıllık Ortalama	Yıllık Ortalama	Yıllık Ortalama	Yıllık Ortalama
	Min. Kış Sıcaklığı (°C)	Mak. Yaz Sıcaklığı (°C)	İlkbahar Sıcaklığı (°C)	Sonbahar Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)
Afyonkarahisar	-2,4	28,1	10,3	12,2	11,3
Erzurum	-12,0	29,0	11,1	12,9	12,0
Eskişehir	-2,5	26,7	10,2	11,8	11,0
İstanbul	3,9	26,0	11,3	15,6	13,9
İzmir	6,6	32,3	16,3	18,8	17,9
Kayseri	-5,6	29,4	10,3	11,4	10,7
Konya	-3,1	29,0	10,8	12,3	11,6
Mersin	7,0	30,1	17,5	20,8	19,1
Rize	4,2	25,4	11,9	15,9	14,3
Şanlıurfa	3,0	37,2	16,4	19,9	18,4

Çalışma Bölgeleri	Yıllık Yağış	Rakım	Rüzgâr Hızı	Nem (%)	Günlük Ortalama
	Miktarı (mm)	(m)	(m/s)		Güneş Radyasyonu (kWh/m ²)
Afyonkarahisar	427,3	1021	4,5	65	4,6
Erzurum	402,2	1853	5,0	65	4,0
Eskişehir	369,5	792	5,0	65	4,0
İstanbul	813,2	40	6,0	80	4,1
İzmir	690,3	30	6,0	70	4,3
Kayseri	388,6	1054	4,5	65	4,5
Konya	318,7	1016	5,0	60	5,0
Mersin	588,4	100	6,0	70	4,9
Rize	2245,3	6	4,0	75	4,0
Şanlıurfa	458,4	547	4,8	55	4,7

nem dikkate alınmıştır. Tablo 1’de listelenen illerin iklim verileri ile Amerika’da seçilen istasyonda gözlemlenen değerler belli tolerans limitleri içerisinde eşleştirilmiştir [16, 17]. Bu sayede, M-E yazılım girdisi için gerekli olan eşdeğer iklim istasyonları bulunmuştur (Tablo 2).

Tablo 2. M-E girdisi için çalışma bölgelerine ait eşdeğer iklim istasyonları (Similar climate stations belong to provincial regions for M-E inputs)

Çalışma Bölgeleri	Eşdeğer İklim İstasyonları
Afyonkarahisar	Spokane, WA (24157)
Erzurum	Idaho Falls, ID (24145)
Eskişehir	Pullman/Moscow, WA (94129)
İstanbul	Sacramento, CA
İzmir	Marysville, CA (93205)
Kayseri	Price, UT. (93141)
Konya	Ogden, UT (24126)
Mersin	Burbank, CA (23152)
Rize	Crescent City, CA
Şanlıurfa	Safford, AZ (93084)

2.4. Taban Zemini ve Üstyapı Temel Etkisinin Belirlenmesi (Determination of Effect of Base and Subgrade on Pavement Design)

Rijit üstyapı tasarımında, esnek (asfalt) üstyapı tasarımdan farklı olarak temel ve/veya alt temeller yük taşıma mekanizmasına katılımdan ziyade daha çok drenaj sistemine katkı sağlamak için kullanılır ve taban zemini yatak

katsayısı esnek üstyapılar için oldukça önemli iken rijit üstyapıların sahip olduğu yüksek elastisite modülleri ve eğilme dayanımlarından dolayı taban zemini ve temellerin önemi üstyapıda üniform bir yüzey kazandırması açısından ön plana çıkmaktadır [18]. Ancak malzemelerin mühendislik özellikleri (esneklik modülü, Poisson oranı vb.), gradasyonu, kıvam limitleri, bu özelliklerin sıcaklık ve neme bağlı değişimleri tasarım açısından önemlidir.

Çalışmada M-E rijit üstyapı tasarımına taban zeminin ve granüler temel tabaka kalınlığının etkisinin belirlenmesi için AASHTO tarafından yol üstyapı uygulamaları için geliştirilen zemin sınıflandırılma sistemi esas alınmıştır. Çalışma kapsamında seçilen her bölge için M-E rijit üstyapı tasarımında taban zeminin etkisini görmek üzere yüksek plastisiteli killi-siltli zeminleri temsil etmesi adına A-7-5, normal dayanım gösteren kumlu çakıllı granüler zeminleri temsil etmesi adına A-2-6 ve yüksek taşıma kapasitesine sahip kayalık zeminleri temsil etmesi adına A-1-b zemin sınıfı seçilerek, üç farklı taban zemin sınıfı için tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Temel tabakası için de A-1-a malzeme sınıfı seçilmiştir. Temel tabakası kalınlığı YOGKT 1000 için 100 mm, YOGKT 7500 için 150 mm ve YOGKT 15000 için 200 mm olarak kullanılmıştır.

2.5. Beton Üstyapı Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Concrete Pavement Material Properties)

Rijit üstyapı tasarımlarında üstyapı malzeme özellikleri belirlenirken en önemli beton karakteristik özellikleri olarak elastisite modülü (young modülü) ve kopma modülü

(modulus of rupture) öne çıkmakta ve bu değerler betonun basınç dayanımına göre tahmin edilebilmektedir. Ancak M-E tasarımında betonunun karakterizasyonuna sadece mekanik özellikleri bakımından yaklaşılmasına son verilmiştir. Çimento, agrega ve bunların karışımından elde edilen beton özelliklerinden başlayarak betonun yapım aşamasına kadar performansı etkileyen pek çok özelliği, tasarım aşamasında dikkate alınabilmektedir. Rijit üstyapı tasarımında beton üstyapı malzemesinin etkisinin görülebilmesi adına 28 günlük orta ve yüksek basınç mukavemetini temsil eden C30 ve C40 olarak iki farklı beton sınıfı seçilerek M-E tasarım için gerekli olan malzeme özellikleri gerek standart tasarım verilerine [3] dayanılarak gerekse daha önceki çalışmalardan [19] elde edilen veriler kullanılarak Tablo 3'de belirlenmiştir.

Shwartz vd. [20]'da yaptığı çalışmada derzli donatısız rijit üstyapılar için hassaslık analizi yapmıştır (Tablo 4). Bu bağlamda betonun özelliklerini değiştirerek istenen kalınlıklarda tasarım yapılması mümkündür. Bu çalışma

kapsamında da malzeme özellikleri tasarım matrisini yapılabılır kılmak için benzer şekilde sınırlandırılmıştır.

2.6. Performans Kriterleri (Performance Criteria)

Bu çalışma kapsamında MEPDG tarafından derzli donatısız üstyapı tasarımlar için önerilen performans kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterlerin eşik değerleri; yüzey düzgünsüzlüğü için en fazla 2,7 m/km, faylanma için en fazla 3 mm ve çatlaklar için ise plağın en fazla %15 olarak kabul edilmiştir. Tasarım aşamasında herhangi bir veya birden fazla performans kriterinin eşik değerine servis süresinden önce ulaşılması halinde tasarım bütün değerleri sağlayacak şekilde yinelenmiştir. Örneğin Şekil 3a'daki tasarımda yüzey düzgünsüzlüğü ve faylanma değerleri servis ömürleri sonunda belirlenen değerlerin altında olmasına rağmen bu süreçte çatlaklar ile ilgili bir problem yaşanacağı tahmin edilmektedir. Benzer olarak Şekil 3b'de çatlak yüzdesi hedeflenen miktarın çok altında olmasına rağmen hem yüzey düzgünsüzlüğü hem de faylanma miktarı servis ömrü

Tablo 3. M-E metodunda kullanılan beton özellikleri (Concrete Properties used in M-E method) [19]

Özellikler	Karışım I:	Karışım II:
Beton Basınç Dayanım Sınıfı	C30/37	C40/50
Elastisite Modülü (MPa)	27520	33590
Kopma Modülü (MPa)	4,32	4,98
Çimento Tipi	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R
Agrega Tipi	Kireçtaşı	Kireçtaşı
Su /Çimento Oranı	0,45	0,42
Minimum Çimento İçeriği	360 kg/m ³	400 kg/m ³
Özgül Ağırlık(kgf/m ³)	2350	2350
Poisson Oranı	0,2	0,2
PCC Isıl Genleşme Katsayısı	8,8	8,8
PCC Isıl Kondüktivite (watt/m)	2,16	2,16
PCC Isı Sığası (Joule/kg-kelvin)	1172,3	1172,3
Limit Rötme Değeri (microstrain)	709,2	707,9

Tablo 4. Derzli Donatısız Rijit Üstyapılar İçin Hassaslık Analizi Sonuçları [20]

(Sensitivity analysis results for jointed plain concrete pavement)

Kritiklik Derecesi	Derzlerde Meydana Gelen Faylanma (Faulting)	Çatlak Oluşumu
Çok Hassas	Yüzey Soğurma Katsayısı	Yüzey Soğurma Katsayısı,
	Isıl Genleşme Katsayısı	Isıl Genleşme Katsayısı,
Hassas	Plak Kalınlığı,	Isıl İletkenlik,
	Isıl İletkenlik,	28 Günlük Kopma Modülü,
	Çimento Miktarı,	28 Günlük Basınç Dayanımı
Hassas Değil	Su/Çimento Oranı,	Plak Kalınlığı,
	Beton Sıfır Gerilme Sıcaklığı,	Özgül Ağırlık,
	28 Günlük Kopma Modülü	Poisson Oranı
	Isı Kapasitesi,	Isı Kapasitesi,
	Çimento Tipi,	Çimento Tipi,
Hassas Değil	Agrega Cinsi,	Agrega Cinsi,
	Geri-Çevrilebilir Büzülme,	Geri-Çevrilebilir Büzülme,
	Kür Yöntemi,	Kürleme Metodu
	28 Günlük Basınç Dayanımı	

sonunda belirlenen değerlerin üstünde olması nedeniyle tasarımın yenilenmesi gerekir.

Tasarım sırasında maliyette göz önünde tutularak, en ince plak kalınlığı ve en uzun derz aralığı olan tasarımların yapılmasına çalışılmıştır. Bu sebeple herhangi bir veya birden fazla performans kriterini servis ömrü sonunda maksimize eden tasarımlar Şekil 4'deki gibi seçilmiştir. Bir tasarımın ideal olarak kabul edilebilmesi için hem plak kalınlığı hem de derz aralığı iteratif olarak azaltılarak denenmiş ve performans kriterlerini servis ömrünün sonunda maksimize eden tasarım ideal olarak kabul edilmiştir.

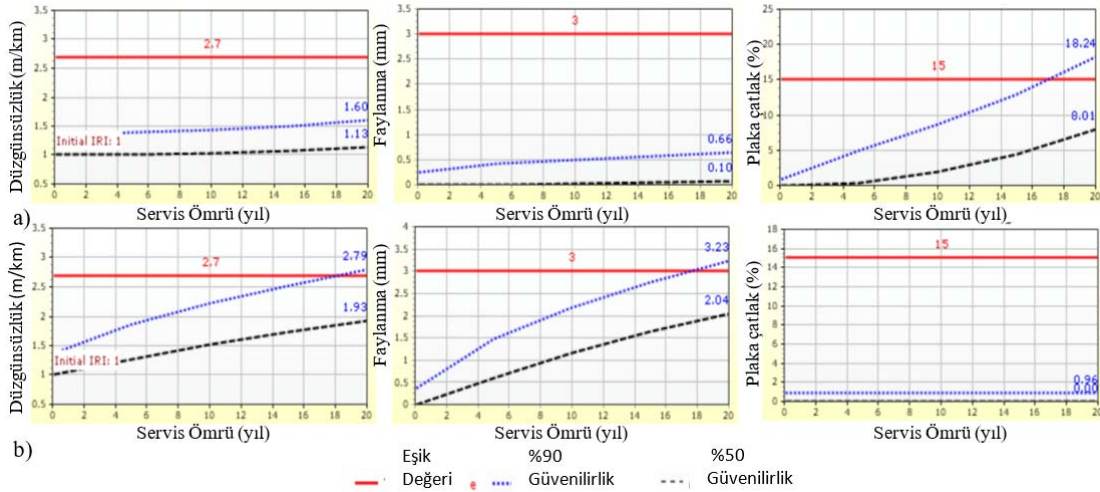
3. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (ANALYSIS RESULTS AND DISCUSSIONS)

Seçilen her il için o bölgeye ait iklim verileri kullanılarak 20 ve 40 yıllık servis süresi için farklı trafik, zemin ve beton dayanım sınıfının derzli donatısız beton üstyapı tasarım

Ayrıca zemin sınıfının, trafik hacminin ve beton sınıfının üstyapı kalınlık ve derz aralıklarına etkisinin daha iyi analiz edilmesi için M-E tasarım çıktıları diğer değişkenler sabit tutularak bölge bazında incelenmiştir. Zemin sınıfının M-E üstyapı tasarımına etkisi; orta trafik hacmi (YOGKT- 7500) ve normal dayanımlı beton dayanım sınıfı (C30) sabit

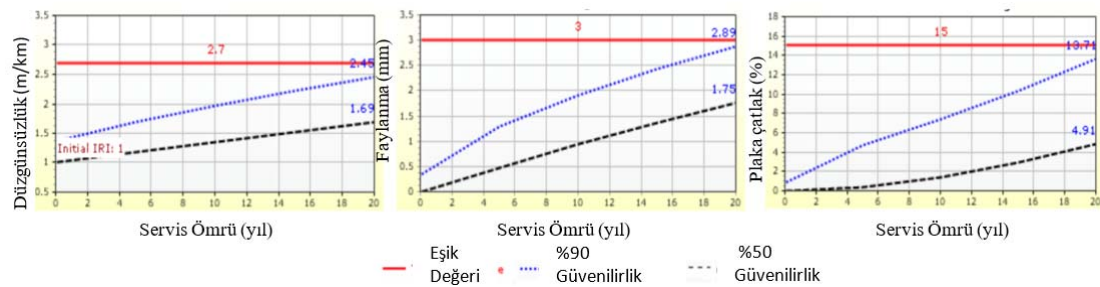
kalınlığına ve derz aralıklarına etkileri mekanik ampirik tasarım yönteminin temelini oluşturduğu AASHTOWare 2.0 sonlu elemanlar yöntemi ile belirlemiştir. Tasarım gerçekleştirilirken performans kriteri (Yüzey düzgünlüğü, faylanma ve enine çatlak) aşılmadan en yakın seviyeye ulaşılarak tasarımın gerçekleştirilmesi amaçlanmış, emniyetli tasarımın yanında ekonomik tasarım da göz önüne alınmıştır. M-E tasarım yapılırken tüm bölgeler için %90 güvenilirlik düzeyi kullanılmıştır. Komşu plaklar arası yük transferi için 50 cm uzunluğunda kayma donatıları kullanılmıştır. Kayma donatı çapları üstyapı tasarım kalınlığına bağlı olarak 25 cm'den az üstyapı kalınlıkları için 32 mm, 25 cm'den büyük üstyapı kalınlıkları için 38 mm olarak seçilmiştir. M-E üstyapı tasarım yöntemiyle on farklı il için gerçekleştirilen 20 ve 40 yıllık servis süresince farklı trafik, zemin ve beton dayanım sınıfının derzli donatısız beton üstyapı tasarım kalınlığına ve derz aralıklarına etkileri C30 beton dayanım sınıfı için Tablo 5'de, C40 beton dayanım sınıfı içinse Tablo 6'da verilmiştir. tutularak iller bazında 20 yıllık servis süresi için Şekil 5'de sunulmaktadır.

Şekil 5'de de görüldüğü üzere İstanbul, Mersin, İzmir, Şanlıurfa, Rize ve Eskişehir bölgeleri için zemin sınıfının değişimi üstyapı tasarımında herhangi önemli bir değişikliğe neden olmamış gibi gözükse de hem Tablo 5 hem de Tablo



Şekil 3. Tasarım örnekleri a) Çatlak yüzdesi eşik değerinin üstünde b) Hem düzensüzlük hem de faylanma değerleri eşik değerlerinin üzerinde.

(Design examples a) Percentage of cracks above the threshold b) Both roughness and failure are above the thresholds.)



Şekil 4. İdeal tasarım örneği (Ideal design example)

Tablo 5. M-E tasarımı ile seçili bölgelere ait farklı trafik, zemin ve servis süreleri için C30 beton sınıfı plak kalınlıkları ve derz aralıklarının değişimi

(Change in C30 concrete pavement slab thickness and joint spacing under different traffic , subgrade and design life conditions at specified provisional regions by using M-E design)

Beton Plaka Kalınlığı (mm) / Derz Aralıkları (m)																		
Servis Süresi	20 yıl									40 yıl								
Trafik Hacmi	YOGKT-1000			YOGKT-7500			YOGKT-15000			YOGKT-1000			YOGKT-7500			YOGKT-15000		
Zemin Sınıfı	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b
İstanbul	240	240	240	250	250	250	260	260	260	250	250	250	270	270	270	290	290	290
	4,7	4,7	4,7	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,7	4,7	4,7	4,4	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2
Mersin	230	230	230	260	260	260	270	270	270	240	240	240	280	280	280	300	300	300
	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6
Rize	210	210	210	240	240	240	240	240	240	230	230	220	260	260	250	270	270	270
	5,0	5,3	5,6	5,0	5,0	5,0	4,6	4,8	4,8	5,2	5,2	5,2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
İzmir	240	240	240	260	260	260	270	270	270	260	260	260	280	280	280	300	300	300
	4,6	4,6	4,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6	4,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Şanlıurfa	230	230	230	250	250	250	260	260	260	250	250	250	270	270	270	290	290	290
	4,5	4,5	4,5	4,3	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,3	4,3	4,3	3,8	3,9	3,9
Afyonkarahisar	210	210	210	270	270	270	310	300	300	240	210	210	360	290	260	-	-	350
	5,0	5,0	5,0	4,2	4,8	5,0	3,7	4,1	4,5	4,3	4,5	4,5	3,7	3,7	3,7	-	-	3,7
Eskişehir	230	230	230	260	260	260	290	260	260	250	250	250	300	270	270	-	350	340
	5,0	5,0	5,0	4,7	4,7	4,7	4,0	4,3	4,4	5,0	5,0	5,0	3,8	4,0	4,3	-	3,7	3,7
Konya	230	220	220	280	280	250	350	300	260	250	240	240	-	320	300	-	-	-
	4,5	4,5	4,5	4,0	4,4	4,4	3,7	3,7	3,7	4,5	4,5	4,5	-	3,7	3,7	-	-	-
Kayseri	230	230	230	300	290	280	390	300	290	270	270	270	-	350	310	-	-	-
	4,7	4,7	4,6	4,0	4,3	4,5	3,7	3,7	3,8	4,8	4,8	4,8	-	3,7	3,7	-	-	-
Erzurum	220	220	220	340	250	250	-	290	290	390	250	240	-	380	350	-	-	-
	4,5	4,5	4,6	3,7	4,0	4,3	-	3,8	3,8	4,4	4,7	4,7	-	3,7	4,0	-	-	-

Tablo 6. M-E tasarımı ile seçili bölgelere ait farklı trafik, zemin ve servis süreleri için C40 beton sınıfı plak kalınlıkları ve derz aralıklarının değişimi

(Change in C40 concrete pavement slab thickness and joint spacing under different traffic , subgrade and design life conditions at specified provisional regions by using M-E design)

Beton Plaka Kalınlığı (mm) / Derz Aralıkları (m)																		
Servis Süresi	20 yıl									40 yıl								
Trafik Hacmi	YOGKT-1000			YOGKT-7500			YOGKT-15000			YOGKT-1000			YOGKT-7500			YOGKT-15000		
Zemin Sınıfı	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b	A-7-5	A-2-6	A-1-b
İstanbul	220	220	220	240	240	240	250	250	250	240	240	240	260	260	260	270	270	270
	4,7	4,7	4,7	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,7	4,7	4,7	4,4	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2
Mersin	220	220	220	250	250	250	260	260	260	230	230	230	270	270	270	290	290	290
	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6
Rize	200	200	200	230	230	230	240	230	230	220	210	210	250	240	240	250	250	250
	5,2	5,4	5,6	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,2	5,2	5,2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
İzmir	220	220	220	240	240	240	250	250	250	240	240	240	260	260	260	280	280	280
	4,6	4,6	4,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6	4,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Şanlıurfa	220	220	220	240	240	240	250	250	250	230	230	230	250	250	250	280	280	280
	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Afyon karahisar	200	200	200	260	260	260	300	290	290	240	200	200	330	280	250	-	370	330
	5,0	5,0	5,0	4,2	4,9	5,0	3,9	4,2	4,5	4,5	4,5	4,5	3,7	3,7	3,7	-	3,5	3,7
Eskişehir	220	220	220	250	250	250	280	250	250	240	240	240	290	260	260	-	330	320
	5,0	5,0	5,0	4,7	4,7	4,7	4,0	4,3	4,4	5,0	5,0	5,0	3,8	4,0	4,3	-	3,7	3,8
Konya	210	210	210	270	250	250	320	290	250	240	230	230	-	300	280	-	-	-
	4,5	4,5	4,5	4,2	4,5	4,5	3,7	3,9	3,9	4,5	4,5	4,5	-	3,7	3,7	-	-	-
Kayseri	220	220	220	280	260	260	360	290	280	260	260	260	-	320	300	-	-	-
	4,7	4,7	4,7	4,0	4,3	4,5	3,7	3,7	3,8	4,8	4,8	4,8	-	3,7	3,8	-	-	-
Erzurum	210	210	210	320	250	250	440	280	270	360	240	230	-	350	330	-	-	400
	4,6	4,7	4,7	3,7	4,1	4,4	3,5	3,8	3,8	4,4	4,7	4,7	-	3,7	4,0	-	-	3,8

6 incelendiğinde zeminin etkisi farklı trafik yükleri altında daha açık görülmektedir. Örneğin Şekil 5’de İstanbul için yapılan tasarımda üç farklı zemin tip için yapılan tasarımlarda plak kalınlığı 250 mm ve derz aralığı 4,4 m olarak belirlenmiştir. Fakat zemin tipinin etkisinin anlaşılabilmesi için performans kriterlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin İstanbul için bu kriterleri incelediğimizde Tablo 7’ de verildiği gibi zemin sınıfının dayanımı arttıkça yüzey düzgünlüğü, faylanma ve çatlak yüzdesinde azalma açıkça görülmektedir.

Bunun yanı sıra Tablo 5’deki Rize iline baktığımızda düşük trafik hacmi (YOGKT 1000) için yapılan tasarımda plaka kalınlığı 210 mm sabitlenmiştir ve sırasıyla ideal tasarımlar

için düşük zemin dayanımı için 5 mm, orta dayanımlı zemin için 5,3 mm ve yüksek dayanımlı zemin için 5,6 mm derz aralığı kullanılmıştır. Tablo 1’de verildiği gibi seçilen iller arasında Rize en çok yağış alan ildir. Bu nedenle zemin koşulları daha da önem kazanmıştır.

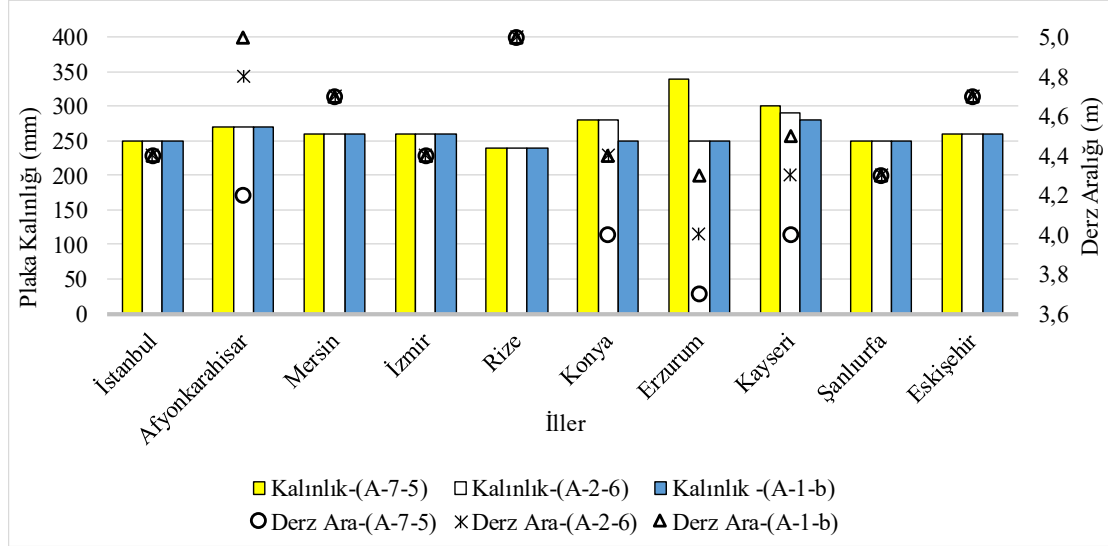
Erzurum, Konya, Kayseri ve Afyonkarahisar gibi yıllık sıcaklık farkının diğer illere göre görece yüksek olduğu bölgelerde zemin etkisi açıkça Şekil 5’de de görülmektedir. Zemin dayanımı arttıkça hem plaka kalınlığının incelenmesi hem de derz aralığının artırılması yol maliyeti üzerinde önemli bir avantaj sağlayacaktır. M-E tasarım yönteminde diğer ampirik yöntemlerden farklı olarak kullanılması gereken derz aralıklarını hesaplayabilmektedir. Fakat

AASHTO 93 gibi yöntemler kullanıldığında ise derz aralığının belirlenmesi ancak tecrübe ve gözlemlere bağlıdır. Bu açıdan M-E yöntemi rijit üstyapı tasarımında yeterince tecrübesi olmayan ülkeler için üstünlük sağlamaktadır.

İklim etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için granüler zemin (A-2-6) ve orta trafik hacmi (YOGKT-7500) sabit tutularak,

C-40 beton dayanım sınıfı için 40 yıllık servis süresinde iklim etkisinin beton plaka kalınlıklarına ve derz aralıklarına etkileri iller bazında Şekil 6'da incelenmiştir.

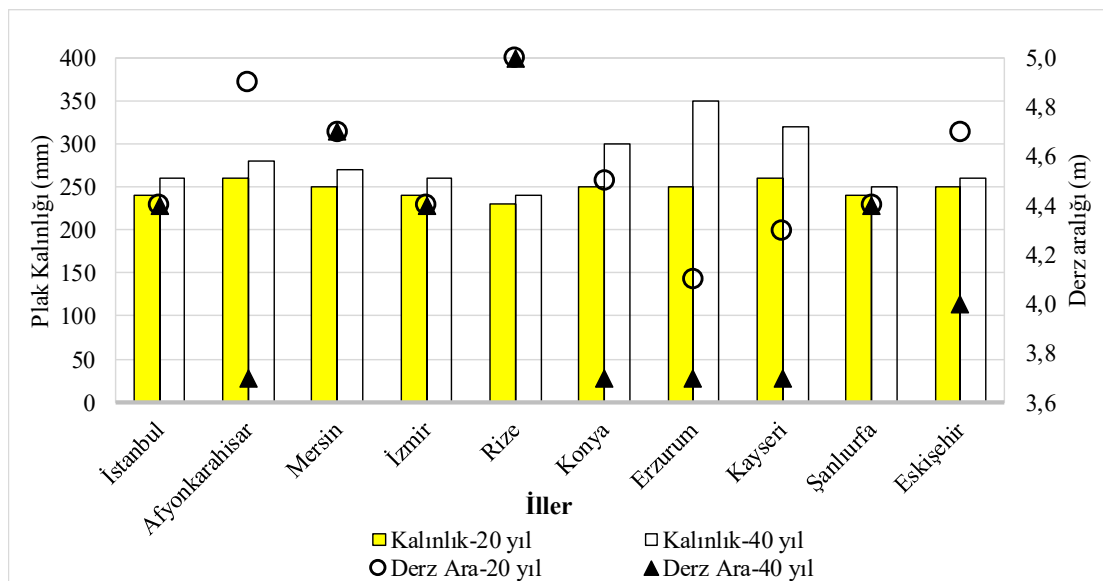
Şekil 6'deki grafikler incelendiğinde iklimin plaka kalınlığına ve derz aralıklarına etkisi net olarak gözükmemektedir. Rize'de 40 yıl servis süresi için 26 cm



Şekil 5. Üç farklı zemin sınıfının (A-1-b A-2-6 A-7-5) derzli donatısız beton üstyapı tasarımına etkisi (Effect of three different subgrade types (A-1-b A-2-6 A-7-5) on the design of jointed plain concrete pavement)

Tablo 7. İstanbul bölgesine ait üç farklı zemin sınıfı için orta trafik hacim yükü altında C30 beton dayanımı sınıfı ile yapılan tasarımların 20 yıllık servis ömürleri sonunda ulaşacağı performans değerleri (The performance values of C30 concrete pavement design at the end of 20 years under medium traffic volume for three different subgrade type in İstanbul)

Zemin Sınıfı	Düzensüzlük (m/km)	Faylanma (mm)	Plaka Çatlak (%)
A-7-5	1,73	1,13	14,56
A-2-6	1,67	0,96	14,52
A-1-b	1,58	0,88	9,63



Şekil 6. Farklı iklim koşullarının derzli donatısız üstyapı tasarımına etkisi (Effect of different climatic conditions on jointed plain concrete pavement design)

tasarım kalınlığı ve 5,0 m derz aralığı ile aynı trafik hacmi, zemin koşulları ve beton sınıfındaki Erzurum ilindeki 38 cm'lik beton plaka kalınlığı ve 3,7 m derz aralığı iklimin üstyapı tasarımı üzerine etkisini açıkça göstermektedir. Sadece iklim özelliklerinin değişimi ile üstyapı tasarım kalınlıklarının bu derecede etkilenebilecek olması sadece M-E tasarımına özgüdür. Diğer ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinde ise iklimin etkisi çok daha düşüktür. Bu karşılaştırma için özellikle belirtilmesi gerekir ki Rize bölgesi Türkiye genelinde en fazla yağış alan bölge olmasına rağmen, tasarımlarda drenaj koşulları tüm bölgeler için en iyi koşul seçilmesinden dolayı drenaj etkisinin üstyapı tasarımına etkisi olmamıştır. M-E üstyapı tasarımında trafik hacminin etkisi; 20 yıllık servis ömrü granüler zemin (A-2-6) ve normal beton sınıfı (C30) sabit tutularak, düşük (YOGKT-1000), orta (YOGKT-7500) ve yüksek trafik hacimleri (YOGKT-15000) için iller bazında üstyapı tasarımı Şekil 7'de verilmiştir.

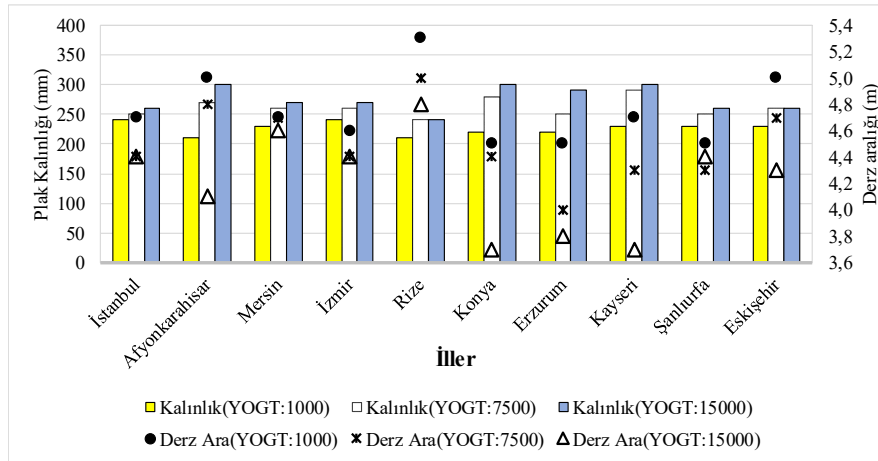
Şekil 7'den de görüldüğü üzere trafik hacminin üstyapı tasarımına etkisi oldukça fazladır. Trafik hacmindeki artış

tüm bölgeler için üstyapı kalınlığını artırmış, bu artış iklim koşullarına da bağlı olarak görece birbirinden farklılık göstermiştir. Afyonkarahisar, Konya, Erzurum ve Kayseri gibi sıcaklık farkının yüksek olduğu illerde bu etkilenme daha fazla olmuştur.

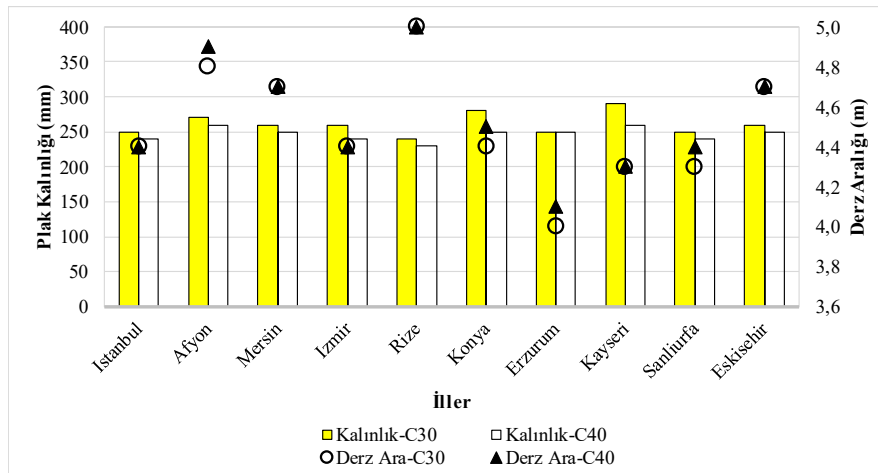
Beton plaka basınç sınıfı da üstyapı tasarımını etkileyen unsurlardan birisidir. Granüler zemin (A-2-6) koşulları ve orta trafik hacmi (YOGKT-7500) sabit tutularak üstyapı tasarımına normal (C30) ve yüksek beton sınıfının (C40) etkisi, 20 yıllık servis süresi için Şekil 8'de görülmektedir.

Beton basınç sınıfının artması tüm bölgelerde tasarım kalınlıklarının 10 ile 30 mm arasında düşüş göstermesine sebep olmuştur. Düşüşler daha çok Konya, Erzurum ve Kayseri gibi sıcaklık farkının yüksek olduğu yerlerde ön plana çıkmaktadır. Diğer illerde ise düşüşler 10 ve 20 mm mertebesinde kalmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan tasarımlarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin (beton dayanım sınıfı ve



Şekil 7. Üç farklı trafik hacminin (YOGKT-1000,7500,10000) derzli donatısız beton yol tasarıma etkisi (Effect of three different traffic volumes on jointed plain concrete pavement design)



Şekil 8. İki farklı beton sınıfının (C30, C40) derzli donatısız beton yol tasarıma etkisi (Effect of two different concrete grades, C30 and C40, on jointed plain concrete pavement design)

özellikleri gibi) etkilerini sınırlandırmak amacıyla malzeme özellikleri sabit tutulmuştur. Bu sebeple 40 yıl servis ömrü ve yüksek trafik hacmi (YOGKT-15000) için yıllık ortalama minimum kış ve maksimum yaz sıcaklıkları arasında yüksek farklar olan Afyonkarahisar, Eskişehir, Erzurum, Kayseri ve Konya için bazı tasarımlarda kalınlıkların çok artarak uygulanabilir mühendislik sınırları dışına çıkması nedeniyle yer verilmemiştir. Bu çalışma kapsamında maksimum 400 mm plaka kalınlığı ve minimum 3,7 m derz aralığı uygulamada kabul edildiği gibi aşılmamıştır. Bu bağlamda sorunlu iklim ve trafik yükü bölgeleri için beton plakanın özelliklerinin değiştirilmesi önerilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı iklim özelliklerine ve/veya önemli yol kesişimlerine sahip olan on il (İstanbul, Afyonkarahisar, Mersin, İzmir, Rize, Konya, Erzurum, Şanlıurfa, Eskişehir, Kayseri) için yeni nesil M-E üstyapı tasarım yöntemi ile derzli donatısız beton yol üstyapı tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarıma etki eden beton sınıfı, trafik ve zemin koşullarıyla, üstyapı malzemeleri özelliklerinin tasarıma etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla üç farklı yıllık ortalama günlük kamyon trafiği (YOGKT-1000-7500-15000), üç farklı zemin sınıfı (A-7-5, A-2-6, A-1-b) ile iki farklı beton sınıfı (C30, C40) tüm bölgeleri için 20 yıllık ve 40 yıllık servis sürelerinde ele alınarak ideal tasarımlar yapılmaya çalışılmıştır. Tasarım gerçekleştirilirken performans kriteri (Yüzey düzgünlüğü, faylanma ve enine çatlak) için belirlenen eşik değerleri aşılmadan en yakın seviyeye ulaşılması amaçlanarak emniyetli tasarımın yanında ekonomik tasarım da göz önüne alınmıştır. Kayma donatısı çapı 25 cm'den az tasarım kalınlıkları için 32 mm, 25 cm'den fazla tasarım kalınlıkları için 38 mm seçilmiştir. Ayrıca iklim özelliklerine bağlı olarak ön tasarımın sağlanmadığı (malzeme özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda) ve uygulanabilir beton plaka kalınlıklarına ulaşamadığı durumlarda tasarım gerçekleştirilmemiştir. Bu bölge koşulları için beton plaka malzeme özelliklerinin değiştirilmesi veya diğer beton yol tipleri olan donatılı ya da sürekli donatılı beton yol seçenekleri düşünülmesi daha ergonomik tasarımlar sunacaktır.

Türkiye'nin on farklı ili için M-E derzli donatısız beton yol üstyapı tasarımı için yapılan toplam 360 tasarım sonucunda başlıca aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Trafik hacminin üstyapı tasarımına etkisi oldukça fazladır. Tüm çalışma bölgeleri için trafik hacmi arttıkça üstyapı kalınlığı artmıştır. Bu artış iklim koşullarına da bağlı olarak görece birbirinden farklılık göstermiştir. AASHTO 93 yönteminde de rijit kaplamalar için benzer sonuçlara ulaşıldığı öngörülmektedir.

M-E tasarımının, geleneksel AASHTO 93 yöntemine göre en önemli farklarından birisi olan iklim etkisi, üstyapı tasarımlarında oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek tasarım kalınlığı Erzurum Bölgesi için elde

edilmiştir. En yüksek trafik hacminde (YOGKT 15000) 20 yıllık servis ömrü için C40 beton sınıfında 40 cm elde edilmiştir. Ayrıca derz aralığı 3,8 m olarak tasarlanmıştır. 40 yıllık servis ömrü elde edilen kalınlık standart uygulanabilirlik sınırlarını aştığı için tasarım gerçekleştirilememiştir. Aynı koşullarda en düşük tasarım kalınlığı ise Rize Bölgesinde elde edilmiştir. Rize'de 40 yıl servis süresi için 25 cm tasarım kalınlığı ve 5,0 m derz aralığı ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım kalınlıklarının yansız derz aralıklarındaki büyük farklılıkta M-E tasarıma özgü olarak iklim etkisini göz önüne alarak derz aralık tasarımının gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Bu durum sadece M-E tasarım yöntemine has olup, AASHTO 93 ampirik yöntemde derz aralıkları tecrübe ve gözlemlere dayalı olarak öngörülmektedir.

İklim özelliklerine bağlı olarak yıl içerisindeki sıcaklık farklarının yüksek olduğu Afyonkarahisar, Konya, Erzurum, Eskişehir ve Kayseri illeri için özellikle yüksek trafik hacmi ve kötü zemin koşullarında C40 beton sınıfı üstyapı tasarımında kalınlık değerleri standart uygulanabilir sonuçlar vermediği için derzli donatısız üstyapı tasarımı gerçekleştirilememiştir (Tablo 5-6).

Zemin sınıfının etkisi beton yol üstyapı tasarıma etkisi diğer parametrelere göre oldukça sınırlı kalmıştır.

Aynı trafik hacmi ve zemin koşulları için beton sınıfının değişimi tasarım kalınlığına etkisi 10 mm ile 30 mm seviyesinde olmuştur. Değişimler daha çok Konya, Erzurum ve Kayseri gibi sıcaklık farkının yüksek olduğu yerlerde ön plana çıkmaktadır.

Yüksek trafik hacimlerinde ve kötü zemin koşullarında tasarım kalınlıklarının 35 cm'yi geçtiği Afyonkarahisar, Konya, Erzurum ve Kayseri illeri için bu şartlar altında derzli donatısız beton yol üstyapı uygulamasının ekonomik olmamasından dolayı, beton karışımının özelliklerinin değiştirilmesi ya da sürekli donatılı beton üstyapı tasarım seçenekleri gibi daha farklı alternatifler düşünülmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, M-E üstyapı tasarımı sonlu elemanlar yazılım programı AASHTOWare 2.0 lisans alım sürecinde desteklerinden dolayı Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TCMB) teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Huang Y.H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, A.B.D., 1993.
2. Shook J.F., Fang H.Y., Cooperative Materials Testing Programs at the AASHTO Road Test, Highway Research Board Spec. Rep., 1961.
3. NCHRP Project 1-37A Report, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, 2004.

4. Ciro C., Local Calibration and Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Flexible Pavement Design, *Journal of Transportation Engineering*, 138, 348–60, doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000328, 2012.
5. Elshaeb M.A., El-Badawy S.M., Shawaly E.A., Development and Impact of the Egyptian Climatic Conditions on Flexible Pavement Performance, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2, 115–21, doi:10.12691/ajcea-2-3-4, 2014.
6. Sadek H.A., Masad E.A., Sirin O., Al-Khalid H., Sadeq M.A., Little D., Implementation of mechanistic-empirical pavement analysis in the State of Qatar, *International Journal of Pavement Engineering*, 15, 495–511, doi:10.1080/10298436.2013.837164, 2014.
7. Karayolları Genel Müdürlüğü, Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, 2016.
8. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İklim Sınıflandırmaları, Türkiye, 2014. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari.pdf.
9. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated, *Meteorol Zeitschrift*, 15, 259–63, 2006.
10. Martínez-Echevarría Romero M.J., Tafur Garro N.M., Gallardo Zevallos G., Implementation of the Mechanistic–Empirical Pavement Design in Northern Peru Using a Calibration Coefficient for the International Roughness Index, *Construction Building Materials*, 102:270–80, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat., 2015. 10.167, 2016.
11. Turkish State Meteorological Service, Weather Statistic for 1950-2015 Period in City: Normal and Extreme Recordings, <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme>, 2016.
12. Tuydes-Yaman H., Ozen M., Indicators of Concrete Road Potential in Turkey, *Cement and Concrete World*, 19 (108), 74-91, 2014.
13. Turkish State Railways, Logistic Hub Locations of Turkey, 2016.
14. Turkish General Directorate of Highways, International Highway Network Map of Turkey, 2016.
15. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) NCDC, Annual, Seasonal and Monthly Normals in 1980-2010, 2016.
16. Rui L., W. S.C., Barton F., Sensitivity of Predicted Pavement Performance to Climate Characteristics. Airfield Highway Pavement, doi:10.1061/9780784413005.062, 2013.
17. Dzotepe G.A., Ksaibati K., The effect of environmental factors on the implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG), Mountain-Plains Consortium, 2011.
18. Papagiannakis A., Masad E., Pavement Design and Materials, JohnWiley&Sons, Inc NewJersey, 2008.
19. Yeğinboğalı A., Türkiye'nin İlk Beton Karayolları, TÇMB / AR-GE ENSTITÜSÜ, Ankara, 2010.
20. Schwartz C.W., Li R., Kim S., Ceylan H., Gopalakrishnan K., Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, 2011.

