

Şehirlerarası yol ağlarında bitümlü sıcak karışım kaplamalar için üstyapı performans tahmin modeli geliştirilmesi

Development of pavement performance prediction model for bituminous hot mix asphalt on interurban road networks

Ufuk KIRBAŞ^{1*}, Mustafa KARAŞAHİN², Emine Nazan ÜNAL³, Muhammet KOMUT³, Birol DEMİR³, Kıvılcım ÖCAL³

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
ufuk.kirbas@omu.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
mkarasahin@gelisim.edu.tr

³Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
nunal@kgm.gov.tr, mkomut@kgm.gov.tr, bdemir@kgm.gov.tr, kocal2@kgm.gov.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 26.07.2016

doi: 10.5505/pajes.2016.63497

* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Önemli bir altyapı yatırımı olan bitümlü sıcak karışım (BSK) üstyapıların bozulmalarının doğru tahmin edilmesi, bakım ve onarım için ayrılan bütçenin doğru olarak belirlenmesinde vazgeçilmez bir unsurdur. Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) sorumluluğunda bulunan devlet yolu ve il yolu statüsündeki BSK kaplamalı yollarda, gelecek yıllara ait performans tahmini yapabilen bir üstyapı performans tahmin modeli geliştirilmiştir. Üstyapıların performans göstergesi olarak uluslararası düzgünlük indeksi (IRI) kullanılmıştır. KGM tarafından yapım yılı bilinen yollarda mevcut üstyapı bozulma bilgileri kullanılarak PAVER sistemi yardımıyla kesimlerin üstyapı durum indeksi (PCI) bilgileri elde edilmiştir. Kesimlerin PCI ve yaşlarına bağlı olarak deterministik regresyon modeli tekniği kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Sonrasında, aynı yol kesimlerinde PCI ve IRI arasındaki matematiksel ilişki ortaya konmuştur. Elde edilen bu matematiksel ilişki oluşturulan gelecek tahmin modeline entegre edilerek, ölçülen IRI değeri ve performans tahmin edilecek yıl bağımsız değişkenlerine bağlı olarak üstyapıların gelecek yıllara ait IRI değerlerini belirleyen bir tahmin modeli elde edilmiştir. IRI bozulma tahmin modelinin doğruluğu, modelleme çalışmalarında hiçbir şekilde kullanılmayan veri setleri ile kontrol edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Esnek üstyapı, Bozulma modeli, Performans tahmini, PCI, IRI

Abstract

The correct prediction of the deterioration of bituminous hot mix asphalt (HMA), which is a significant substructure investment for roads, is an indispensable element in the correct sorting of the budget allocated for maintenance and repair. This study has developed a pavement performance prediction model for state roads and intercity roads hot mix asphalt (HMA) coated under the responsibility of General Directorate of Highways (KGM) for capable of performance forecast for next year. International roughness index (IRI) were used as a performance indicator of pavements. Pavement condition index (PCI) of the road sections (year of construction of the road known by KGM), using existing pavement distresses data by PAVER system, were obtained. The prediction performance model was developed depending on the age and PCI of the road sections using deterministic regression model technique. Then, mathematical relationship was determined between PCI and IRI on the same road section. The obtained mathematical relationship is integrated into the prediction performance model. A prediction model determines the pavements IRI values for the coming years, based on independent variables of measured IRI value and year's estimated performance, were obtained. The accuracy of the IRI deterioration prediction model was controlled by the data sets not used in the modeling studies.

Keywords: Flexible pavement, Deterioration model, Performance prediction, PCI, IRI

1 Giriş

Üstyapı yönetimi, en geniş anlamda planlama, programlama, tasarım, yapım, bakım, onarım ve yenileme işlemlerinin tamamını içeren çalışma programının genel adıdır [1]. Üstyapı yönetim sistemi (ÜYS) kavramı, 1950'li yıllardan itibaren üzerinde çalışılan, teknolojinin gelişmesi ile yeniliklere kavuşarak günümüze gelmiş bir konudur. Bu bağlamda özellikle 1990'lı yıllarda ÜYS kavramını, düzeylerini, veri toplama ve değerlendirme tekniklerini teorik olarak anlatan kitaplar ve araştırma raporları yazılmıştır. Hatta bu süreçte, American Society Testing and Materials (ASTM) E1889-97(2009) koduyla ÜYS standardı da yayınlanmıştır. ÜYS kavramı ve bileşenlerini teorik olarak detayları ile açıklayan yayınlarda, genel olarak kurum/kuruluşların tabii olduğu kanunlar, yol ağı değerlendirme bölümlerine ayırmada kullanılan prensipler, ÜYS altlığında bulunması gerekli veriler, veri saklama/işleme yöntemleri, veri toplama

yöntemleri, veri toplama sıklıkları, bozulma modelleri, gelecek tahminleri, iyileştirme stratejileri ve karar verme teknikleri kavramsal olarak açıklanmıştır [2]. Üstyapıların bakım, onarım ve iyileştirme projeleri için ayrılan bütçelerin kısıtlı olmasından dolayı, üstyapıların yönetiminden sorumlu otoriteler çoğunlukla birinci öncelikli üstyapı iyileştirme alternatiflerini uygulamak zorunda kalmaktadırlar [3]. Bu nedenle otoritelerin, sorumluluklarında bulunan üstyapıların iyileştirilmesinde doğru kararları alması ve sınırlı bütçeyi doğru şekilde kullanabilmesi için üstyapı performans tahmin modelleri hayati bir önem arz etmektedir [4].

Üstyapı yönetiminden sorumlu kurum/kuruluşlar için iyi çalışan bir ÜYS kurulmasında en zor adım sorumluluklarında bulunan üstyapıların karakteristiğine göre kalibre edilmiş performans tahmin modellerinin oluşturulması olduğu bilinmektedir. Üstyapıların işletiminde, mevcut performans göstergesi olarak düzgünlük, kayma direnimi,

yapısal kapasite, üstyapı bozulmaları gibi üstyapıların karakteristik bileşenleri tek başlarına ya da birleştirilmiş olarak kullanılmaktadır [5].

Çalışmada, KGM tarafından yapıyı yılı bilinen yollarda mevcut üstyapı bozulma bilgileri kullanılarak kesimlerin PCI değerleri bulunmuştur. PCI ve üstyapı yaşlarına bağlı olarak deterministik regresyon modeli tekniği yardımıyla üstyapı bozulmaları modellenmiştir. Ayrıca, PCI değerleri belirlenen yol kesimlerinde PCI ve IRI arasındaki matematiksel ilişki elde edilmiştir. Elde edilen bu matematiksel ilişki oluşturulan gelecek tahmin modeline entegre edilerek, ölçülen IRI değeri ve performansı tahmin edilecek yıl bağımsız değişkenlerine bağlı olarak üstyapıların gelecek yıllara ait IRI değerlerini belirleyen bir tahmin modeli oluşturulmuştur.

2 Üstyapı performans tahmin modelleri

Performans tahmin modellerinin doğruluğu kullanılan modelleme tekniğinin uygunluğuna, anlamlı bağımsız değişkenlerin sayısına, veri elde etmek için kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluğuna ve modellemede kullanılan veri sayısına bağlı olarak değişmektedir. Üstyapıların performansını tahmin etmek için çeşitli modelleme yaklaşımları ve istatistik yöntemler kullanılmaktadır [6].

Üstyapıların performansında diğer bir deyişle hizmet seviyelerinde kötüleşmeyi etkileyen en önemli faktörlerin ağır taşıt dingil yükleri, üstyapının yaşı ile sıcaklık ve yağışı ifade eden iklim etkileri olduğu bilinmektedir [1]. Bir yol kesiminde üstyapının yaşı, maruz kaldığı tüm trafik ve iklim etkilerini de kapsayarak üstyapının performans kaybını kendi başına açıklayabilen en önemli değişkendir. Bu sebeple literatürde, üstyapıların performansının zamanla değişimini deterministik ve stokastik yöntemlerle modelleyen birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Bahsedilen bu çalışmalarında, doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon yöntemleri [7]-[10], otoregresyon ve zaman serisi yöntemleri [11],[12], MARS yöntemi [13], yapay zeka modelleme tekniklerinden özellikle yapay sinir ağları (YSA) yöntemi [14] ve stokastik yöntemlerden markov zinciri [15]-[17] ve bayesian teorisi [14],[18] yöntemlerinin başlıca tercih edilen yöntemler olduğu dikkat çekmektedir [19]. Araştırmacılar genel olarak, üstyapının mevcut performansını tasvir eden PCI, uluslararası düzgünlük indeksi (IRI), üstyapı servis indeksi (PSI) vb. herhangi bir indeksin zamanla kötüleşmesini tahmin edebilen modeller geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmışlardır. Yapılan çalışmalarda çoğunlukla, Amerikan ulusal karayolları idaresi (Federal Highway Administration, FHWA) tarafından yürütülen 20 yılı aşkın bir süredir devam eden uzun dönemli üstyapı performansı testi (Long-Term Pavement Performance, LTPP) kapsamında çoğunluğu ABD’de olmak üzere yaklaşık 2000 farklı üstyapı kesiminde toplanan ve araştırmacılarla paylaşılan verilerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu konuda yapılan araştırmalar arasında deterministik ve/veya stokastik modelleme yaklaşımlarının sonuçlarını karşılaştıran çalışmaların da olduğu görülmektedir [6],[20].

Literatürde araştırmacıların, herhangi bir üstyapı performans indeksinin gelecek yıllardaki durumunu tahmin edebilmek amacıyla geliştirilmiş, birden çok bağımsız değişkeni girdi olarak kullanan tahmin modelleri üzerine oldukça fazla yoğunlaştığı görülmektedir. Bahsedilen bağımsız değişkenler arasında üstyapının yaşı, çevresel faktörler, farklı şiddette ve türde üstyapı çatlakları, yamalar, deformasyonlar, trafik yükleri, üstyapı tasarım bilgileri, tabaka kalınlıkları, tekerlek izi derinliği vb. bileşenlerinin kullanıldığı dikkat çekmektedir.

Tahmin modellerinin geliştirilmesinde, üstyapıların performansını etkileyen çok sayıda değişken olması ve bazı değişkenlerin sayısal değerlerle ifade edilememesi gibi sebeplerle en çok yapay zekâ tekniklerinin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Araştırmacılar tarafından, sayısal ve sözel verilerin bir arada değerlendirilmesinde oldukça kolaylıklar sağlayan bulanık mantık [3],[21],[22] ve YSA [4],[23],[24] yaklaşımları ile her iki yöntemin bir arada kullanıldığı ANFIS yaklaşımının [25] oldukça sık tercih edildiği görülmektedir. Bu bağlamda, yapılan çalışmalar arasında çok sayıda bağımsız değişken arasındaki ilişkinin modellenmesinde kolaylık sağlayan MARS tekniğinin de kullanıldığı dikkat çekmektedir [26]. Öte yandan, üstyapı performans indeksinin tahmin edilmesinde doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon yaklaşımlarının kullanıldığı da yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır [27]-[29].

Dünya Bankası tarafından desteklenen üstyapı tasarım ve bakım modeli (HDM) üstyapıların bakım ve iyileştirilmesinin planlanmasında oldukça yeterli ve geniş kapsamlı olduğu kabul edilmektedir. HDM modeli üstyapıların toplam yaşam ömür durumunu ve maliyetini belirlemekle birlikte çok fazla bakım, onarım ve iyileştirme projesi arasında ekonomik karar kriterlerinin belirlenmesini sağlayabilmektedir [30]. Her ülke, iklimsel, teknolojik, trafik durumu ve işletimi, teknik standartlar vb. yerel ve kendine özgü koşullara sahip olduğundan dolayı, üstyapı bozulma tahmin modellerinin adaptasyonu ve kalibrasyonu söz konusu bu koşullar dikkate alınarak yapılmak zorundadır [31],[32]. Araştırmacıların yerel imalat malzemesi ve çevresel koşullara göre HDM modellerini kalibre eden çalışmalar yaptığı yapılan yayınlardan anlaşılmaktadır [33]-[35].

Üstyapıların gelecek yıllardaki performansını öğrenmek, sınırlı bütçenin kullanımı için çok sayıda fayda sağlayacağı bilinen bir gerçektir. Fakat bütçenin mutlak doğru şekilde kullanılabilmesi, yol ağında bulunan üstyapıların performanslarına göre en uygun matematiksel çözümün bulunması ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla, her bir yol kesiminin üstyapılarının performanslarını tanımlayan parametrelerin optimizasyonu konusunda çalışmaların yapıldığı dikkat çekmektedir. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından geliştirilmiş bilgisayar yazılımları, bulanık karar ağaçları, lojistik regresyon yöntemleri, veri madenciliği, çok kriterli karar yöntemleri, genetik algoritmalar ve hibrit teknikler gibi deterministik ve stokastik yaklaşımların kullanıldığı yapılan çalışmalarda görülmektedir [36]-[38]. Önceliklendirme bir karar verme işlemi olduğundan dolayı istatistik yöntemlerin bu amaçla kullanılması önemli zorlukları da içerisinde barındırmaktadır. Bu nedenle gelecek yıllarda, üstyapı işletiminden sorumlu kurumlar, sorumluluklarında bulunan üstyapıların işletim maliyetlerini azaltabilmek için mutlaka yeni karar destek araçlarına ihtiyaç duyacaklardır [39],[40].

2.1 PAVER üstyapı performans değerlendirilmesi

PAVER sistemi, rastgele dağılım prensiplerine göre seçilen üstyapı yüzeyinde 225 ± 90 m² büyüklüğünde örnek alanlarda, ASTM D 6433-11 kodlu bozulma tanımlama kılavuzuna göre toplanan yüzey bozulma verilerinin değerlendirilerek, üstyapının mevcut performansını ortaya koyan bir değerlendirme yöntemidir. Değerlendirme düşük (L), orta (M) ve yüksek (H) şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, örnek alan büyüklüğüne oranlanarak elde edilen değerlerin bozukluk türüne göre hazırlanmış sonuç değer tablolarından azaltma

değerleri okunarak yapılır. Elde edilen sonuç değerleri 100'den çıkarılarak üstyapının performansını 0-100 arasında bir değerle tanımlayan PCI değeri elde edilir. Bir üstyapı için hesaplanan PCI değeri olarak 100 hiç bozukluk bulunmayan en iyi derecedeki üstyapıyı, 0 ise tamamen bozulmuş kullanılamayacak derecedeki üstyapıyı ifade etmektedir. PCI, üstyapıya ait bozulma türü, bozulma miktarı ve bozulma şiddeti bileşenlerinin ortak değerlendirilmesi sonucunda üstyapının mevcut performansını gösteren bir indekstir [5]. PAVER sisteminin tanımlandığı ASTM D 6433-11 kodlu standartla açıklanan bozulma sınıfları Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1: ASTM D 6433-11 bozulma sınıfları [5].

Kod	Bozulma	Ölçüm	Şiddet	Bozulma
		Birimi	Düzeyi	Nedeni
1	Timsah Sırtı Çatlak	m ²	Evet	Yük
2	Kusma	m ²	Evet	Diğer
3	Blok Çatlak	m ²	Evet	İklim
4	Kabarma ve Oturma	m	Evet	Diğer
5	Ondülasyon	m ²	Evet	Diğer
6	Çökme	m ²	Evet	Diğer
7	Kenar Çatlağı	m	Evet	Yük
8	Yansıma Çatlağı	m	Evet	İklim
9	Kenar/Banket Düşük.	m	Evet	Diğer
10	Boyuna ve Enine Çat.	m	Evet	İklim
11	Yama	m ²	Evet	Diğer
12	Cilalanma	m ²	Hayır	Diğer
13	Oyulma	sayı	Evet	Yük
14	Demiryolu Geçişi	m ²	Evet	Diğer
15	Tekerlek izi	m ²	Evet	Yük
16	Toplanma	m ²	Evet	Diğer
17	Tabaka Kayması Çat.	m ²	Evet	Diğer
18	Şişme	m ²	Evet	Diğer
19	Soyulma ve Sökülme	m ²	Evet	İklim
20	Ayrışma	m ²	Evet	İklim

2.2 Uluslararası düzgünlük indeksi (IRI)

Bu çalışmada yer alan IRI ölçüm verileri, KGM, Teknik Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şube Müdürlüğü tarafından 2009 model Dynatest Mark-III Profilometre Cihazı ile yapılmıştır. ÜYS çalışmamızda kullanılan profilometre cihazı ASTM E 950 standartına uygun IRI, sürüş sayısı (RN), tekerlek izinde oturma (TİO), makro yüzey dokusu (MDP) ve yol geometrik özellikleri (IMS) ile küresel konum (DGPS) verileri toplanabilmektedir. Ayrıca, araca yerleştirilmiş olan üç adet yüksek çözünürlüklü (High Definition-HD) kamera ile üstyapıların yüzey görüntü ve çevre envanter bilgileri ölçümler boyunca kayıt ve analiz edilmektedir. KGM tarafından satın alınan Dynatest Mark-III profilometre cihazı Şekil 1'de görülmektedir [41].



Şekil 1: Dynatest Mark-III profilometre cihazı.

3 Performans tahmin modeli geliştirilmesi

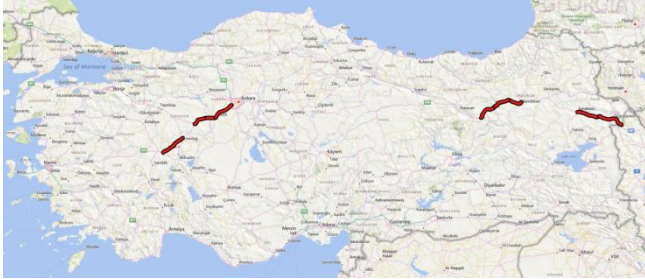
PAVER sistemi ile tanımlanan PCI bileşeni, BSK kaplamalı üstyapılarda görülen 20 çeşit bozulma türünün analizi ile elde edilmektedir. Bu durum PCI bileşenine, üstyapının hizmet yeteneği kadar mekanik dayanımı hakkında da fikir verebilmesi imkânını sağlamaktadır. Bu sebeple, PCI bileşenini kullanan PAVER sisteminde, üstyapıların bozulmasında en önemli etkenler olarak kabul edilen yük ve iklim etkilerini birlikte temsil ettiği kabul edilen 'yaş' bağımsız değişkeni kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmaktadır [5]. Öte yandan IRI bileşeni, yol üstyapısının sürüş konforu ile ilişkili olarak yalnızca hizmet düzeyini gösteren önemli bir göstergedir. IRI, üstyapının mevcut stabilitesi hakkında belirleyici sonuçlar içermemektedir. Öte yandan, üstyapının mevcut performansını belirlemek amacıyla PCI bileşeni kullanılmak istendiğinde önemli bir arazi çalışması yapılması zorunlu iken, IRI bileşeni kullanılmak istendiğinde motorize bir ölçüm cihazı ile veriler oldukça hızlı bir şekilde toplanabilmektedir. Literatür incelendiğinde, üstyapı performans indekslerinin herhangi birinin diğerine nazaran üstün olmadığı görülmektedir. Ayrıca, araştırmacılar tarafından birden çok performans indeksinin bir arada kullanıldığı çalışmalar da göze çarpmaktadır.

Öte yandan, literatürde, performans tahmin modellerinde bağımsız değişken olarak kullanılan girdi sayısının çok çeşitlilik gösterdiği dikkat çekmektedir. Bağımsız değişken sayısı arttıkça verilerin güvenilirliğinin azalabileceği bazı çalışmalarda vurgulanmaktadır [2],[5],[19],[27]. Bilindiği üzere üstyapının bozulmasında etkili olan iki temel faktör yük ve iklim etkileridir [1]. Üstyapının tasarımı yapılırken bölge iklim koşullarına uygun doğru bitüm sınıfı seçilmişse ve trafik yüklerine karşı koyabilecek yeterli tabaka kalınlıkları belirlenmiş ve imal edilmişse, ülkenin coğrafi koşulları altında performans değişimini ifade edebilen yegâne bağımsız değişkenin üstyapının yaşı olduğunu söylemek mümkündür. Aksi takdirde, iklimle ilgili herhangi bir parametre bağımsız değişken olarak kullanılmışsa mutlaka yük ile ilgili parametrelerin de bağımsız değişken olarak modele dâhil edilmesi gerektiği akıllara gelmektedir.

Bu bakış açısıyla, performans tahmin modelinin geliştirilmesinde bağımsız değişken olarak 'yaş' parametresi kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle, üstyapının mekanik durumunu da gösterdiği kabul edilen PCI bileşeni, birçok bozulma etkenini ifade edebilen 'yaş' bağımsız değişkeni ile ilişkilendirilmiş sonrasında, modelin bağımlı değişkeni ölçüm ve analiz kolaylığı bakımından avantajlı olan IRI bileşenine dönüştürülmüştür. Aynı zamanda, üstyapıların performans göstergesi olarak doğrudan IRI bileşeni kullanılmayarak, IRI ölçümünde ortaya çıkabilen lokal beklenmeyen değerlerin modeli olumsuz yönde etkilemesinin önüne geçilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, 2009 ve 2010 yıllarında yüzey bozulma ve IRI ölçümleri yapılan 200-10, 200-11, 200-12, 100-26, 100-27, 200-28, 100-28, 100-32, 100-33 ve 260-01 Kontrol Kesim No.lu (KKNO) yollarda BSK kaplamalı yol kesimlerinde kayıt edilen üstyapı yüzey bozulma verileri PAVER sistemi esaslarına göre değerlendirilmiştir. Çalışılan yol kesimleri Şekil 2'de görülmektedir. Değerlendirilen üstyapı kesimlerinde yüzey bozulma verileri kullanılarak elde edilen PCI değerleri ile IRI ölçüm değerleri arasındaki matematiksel ilişkiler araştırılmıştır. Yaklaşık olarak 333 km BSK kaplamalı yol kesimi diğer bir deyişle, PAVER sistemine göre tanımlanmış 335 adet farklı üstyapı kesiminde 3323 adet

farklı örnek alanda (sample unit) üstyapı değerlendirmeleri yapılmıştır. Tanımlanan yol bölümleri ölçüm başlangıç noktalarında itibaren 1 km uzunluğunda kesimlere ayrılmıştır. Bölümlerin son kilometresinde tam 1 km olarak tamamlanmadığı kesimler uzunlukları 1 km'den az olacak şekilde tanzim edilmiştir.



Şekil 2: Değerlendirilen yol kesimleri.

Değerlendirilmede incelenen yol uzunluğu sınırlı miktarda olmakla birlikte, değerlendirme birimi olarak her bir örnek alan verisi yani her 100 m için analizin yapıldığı dikkate alındığında çalışmada oldukça yüksek duyarlılıkta veri kullanıldığı rahatlıkla söylenebilmektedir.

Yüzey bozulma ve IRI ölçümleri yolun genelini temsil ettiği kabul edilen sağ şeritte 3 m şerit genişliği kabul edilerek yapılmıştır. Bu kabul ışığında, bozulma verileri 3 m şerit genişliğinde 100 m uzunlukta yol parçaları örnek alan kabul edilerek 300 m² yüzey alanlarında PAVER sisteminin en küçük birimi olan örnek alanlar teşkil edilmiştir. KGM tarafından toplanan yüzey bozulma verileri, her bir örnek alan sınırında PAVER sisteminin standart olarak kabul ettiği bozulma tanımlamalarına karşılık gelecek şekilde düzenlenerek PAVER paket programına girilmiş, her bir örnek alanın ve 1 km uzunluğundaki kesimlerin PCI değerleri elde edilmiştir.

Değerlendirilen tüm yol kesimlerinde üstyapı bozulma verileri proje düzeyi hassasiyetinde toplanmıştır.

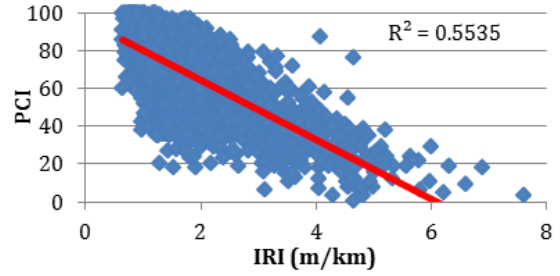
3.1 PCI-IRI arasındaki benzerlikler

Değerlendirme aşamasında öncelikle her bir örnek alan için PCI değerleri ile IRI değerleri arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Bu kapsamda örnek alanların PCI değerleri ile IRI değerleri arasındaki korelasyon değeri $R=-0.744$ olarak bulunmuştur. Bu durum PCI değerleri azalırken IRI değerlerinin artması sonucu beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu aşamada ayrıca, örnek alan PCI değerleri ile IRI arasında çeşitli matematiksel ifadeler kullanılarak ilişkiler araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar grafik olarak Şekil 3'te görülmektedir.

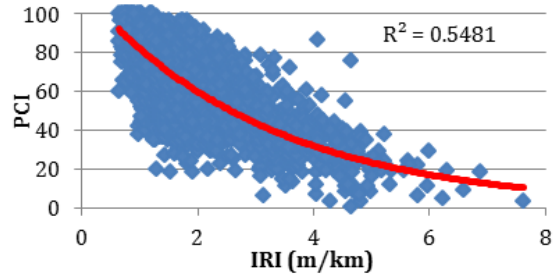
Değerlendirmede her bir örnek alanın PCI değerinin karşılığı olacak şekilde IRI değerleri karşılaştırılması sonucunda en yüksek regresyon ilişkisinin polinom ifade ile ($R^2=0.571$) yakalanabildiği tespit edilmiştir. Bir başka değerlendirme, çoğunlukla 1 km uzunluğunda kabul edilerek tasarlanan yol kesimlerinin PCI değerleri ile ortalama IRI arasındaki matematiksel ilişkilerin araştırılması ile yapılmıştır. Değerlendirilen tüm kesimlerin PCI değerleri ile IRI arasındaki doğrusal korelasyon ilişkisi değeri $R=-0.763$ olarak belirlenmiştir. Bu analizde örnek alanlarla yapılan değerlendirmeye göre korelasyon değerinde artış olduğu saptanmıştır.

Veriler sırasıyla sayısal olarak incelendiğinde, birbirini takip eden kısmen küçük boyutlardaki örnek alanlarda yüzey

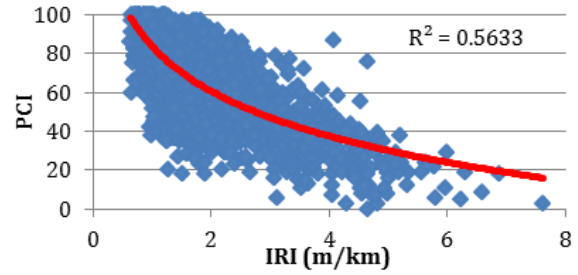
bozulma değerlerinde ani değişiklikler olmasına rağmen IRI değerlerinde çok fazla ani değişikliklerin olmadığı saptanmıştır.



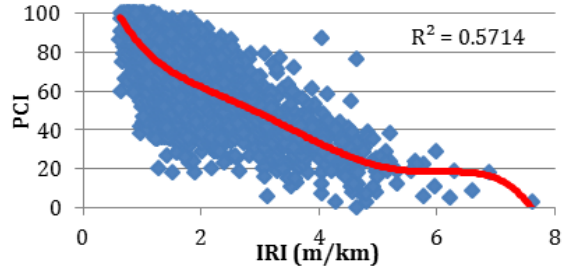
(a): Doğrusal ilişki.



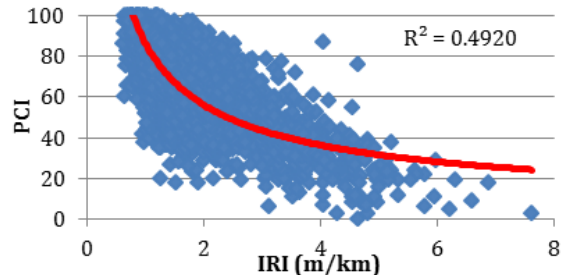
(b): Üstel ilişki.



(c): Logaritmik ilişki.



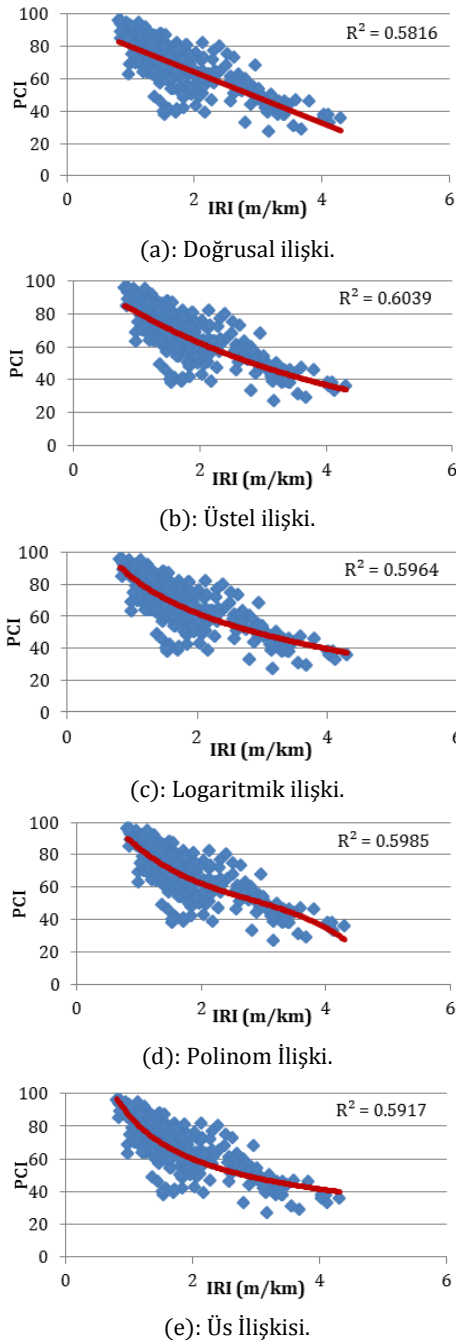
(d): Polinom İlişkisi.



(e): Üs ilişkisi.

Şekil 3: Üstyapı örnek alanları PCI-IRI arasındaki matematiksel ilişkiler.

Bu sebeple, PCI-IRI arasındaki ilişkilerin araştırılmasında, örnek alanların 1 km uzunluklarda birleştirilerek oluşturulan kesimlerde ani değişimlerin ortaya çıkardığı farkların önüne geçilebildiği saptanmıştır. Bu saptamayla yol ağında PCI değerleri ile IRI değerlerinin karşılaştırılmasında kesimler ölçeğinde verilerin kullanılmasının verilerin keskinliğinin azaltılması ve benzerliklerin artırılması açısından oldukça verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bu durumun, uzun yol uzunluklarına sahip ağlarda yolların 1 km'lik kesimler halinde değerlendirilmesi açısından kabul edilebilir olduğu varsayılmıştır. 1 km'lik üstyapı kesimlerinin PCI değerleri ile IRI arasında çeşitli matematiksel ifadeler kullanılarak ilişkiler araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar grafik olarak Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4: Üstyapı kesimleri PCI-IRI arasındaki matematiksel ilişkiler.

Değerlendirmede her bir kesimin PCI değerinin karşılığı olacak şekilde IRI değerleri karşılaştırılması sonucunda en yüksek regresyon ilişkisinin üstel ifade ile ($R^2=0.604$) yakalanabildiği tespit edilmiştir. Bu regresyon değerinin, yapılan benzer çalışmalarda yakalanan regresyon değerlerine yakın olduğu tespit edilmiştir [42]. PCI ve IRI değerleri ile benzerliklerin karşılaştırıldığı farklı matematiksel ifadeler ve regresyon değerleri Tablo 2'de özet olarak görülmektedir.

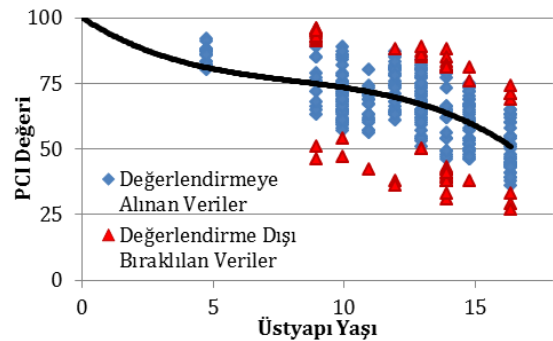
Tablo 2: PCI-IRI arasındaki benzerlik ilişkilerinin matematiksel ifadesi ve regresyon değerleri.

Regresyon (R^2)		Örnek Alanlar
Doğrusal	0.5535	PCI=-15.734 IRI+95.617
Üstel	0.5481	PCI=112.72 $e^{-0.316 \text{ IRI}}$
Logaritmik	0.5633	PCI=-33.26 ln(IRI)+83.666
Polinom	0.5714	PCI=-0.12 IRI ⁵ +2.23 IRI ⁴ - 16.47 IRI ³ +56.56 IRI ² - 105.01 IRI+145.63
Üs	0.4920	PCI=86.834 IRI ^{-0.627}
Regresyon (R^2)		Kesimler
Doğrusal	0.5816	PCI=-15.628 IRI+95.483
Üstel	0.6039	PCI = 105.42 $e^{-0.263 \text{ IRI}}$
Logaritmik	0.5964	PCI=-32.18 ln(IRI)+84.251
Polinom	0.5985	PCI=-2.08 IRI ³ +17.25 IRI ² - 59.01 IRI+127.83
Üs	0.5917	PCI=86.657 IRI ^{-0.53}

Bu değerlendirmeler ışığında, PCI değeri ile IRI arasındaki ilişkiyi en iyi tanımlayabilen üstel matematiksel ifade şu şekildedir.

$$PCI = 105.42 * e^{-0.263 * IRI} \quad (1)$$

Çalışmada, IRI ölçümlerinin yapıldığı üstyapı kesimlerinde eş zamanlı olarak kaydedilen görüntülerden elde edilen yüzey bozulma verileri, PAVER sistemine göre değerlendirilmiştir. İncelenen tüm yol kesimlerinde yapılan yüzey bozulma değerlendirme çalışmalarına ilaveten yolların ilk yapım tarihleri ve bugünkü durumları arasındaki farklar değerlendirilerek üstyapı bozulma tahmin modeli geliştirilmiştir. Söz konusu bozulma tahmin modelinin mevcut bakım & onarım stratejisini değiştirmeksizin üstyapıların gelecek durumlarının tahmin edilmesinde kullanılabilirliği düşünülmektedir. Şekil 5 ve Tablo 3'te KGM yol ağında BSK kaplamalı yollar için oluşturulan üstyapı bozulma tahmin modeli görülmektedir. Bağımsız değişkenin anlamlılığı analiz sonuçları Tablo 4'te görülmektedir. Modelin oluşturulması sırasında korelasyonun yükseltilmesi amacıyla verilerin %85'ini kapsama kriteri (85% boundary) öngörülmesi için model tahmin hassasiyetini düşüren 53 adet PCI verisi değerlendirme dışı bırakılmıştır.



Şekil 5: Üstyapı bozulma tahmin modeli grafik gösterimi.

$$PCI=100+(-6.45440*(Yaş)+0.64233*(Yaş)^2 -0.02633*(Yaş)^3) \quad (2)$$

Tablo 3: Üstyapı bozulma tahmin modeli ve parametreleri.

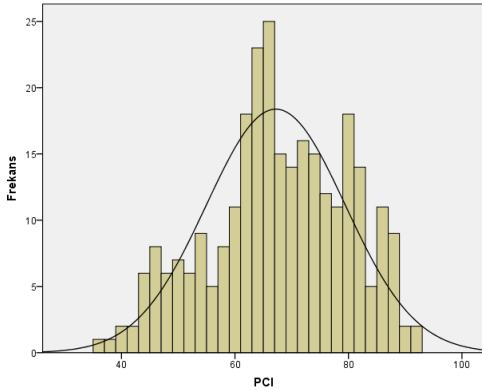
Korelasyon	: 0.712
Regresyon (R ²)	: 0.506
Hataların Standart Sapması	: 8.711
Hataların Mutlak Ortalaması	: 7.190
Hataların Aritmetik Ortalaması	: 0.004

Tablo 4: Bağımsız değişkenin anlamlılığı analiz sonuçları.

	Sabitler			Anlamlılık
	Katsayı	Std. Hata	t	
Yaş	-6.454	0.887	-4.304	0.000
Yaş ²	0.642	0.141	4.000	0.000
Yaş ³	0.026	0.006	-4.444	0.000

3.2 Bağımlı değişkenin uygunluğu

Bilindiği üzere, bir regresyon modelinin kurulmasında olmazsa olmaz koşulun modellenecek bağımlı değişkenin normal dağılıma uygun olması gerektiğidir. Bu amaçla, ürettiğimiz PCI tahmin modelinde bağımlı değişken PCI değerlerinin normal dağılıma uygunluğunu test etmek amacıyla Tek Örneklem Kolmogorov Smirnov Testi uygulanmıştır. Değerlendirme sonucunda, çift kuyruklu anlamlılık değeri 0.069>0.05 bulunarak PCI değerlerinin %95 güven aralığında normal dağılıma uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca, bağımlı değişken olan PCI değerlerinin önemli miktarda çarpıklık arz etmediği saptanmıştır. PCI bağımlı değişkeninin frekans histogramı ve istatistik test sonuçları Şekil 6'da ve Tablo 5'te görülmektedir.



Şekil 6: PCI değerlerinin normal dağılım histogramı.

Tablo 5: PCI Değerlerinin tek örneklem Kolmogorov-Smirnov istatistik testi sonuçları.

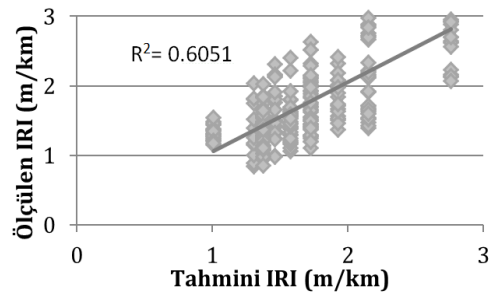
	PCI	
N (Adet)	282	
Normal Ortalama	67.195	
Parametereler Standart Sapma	12.241	
Ekstrem Farklar Mutlak	0.051	
	Pozitif	0.038
	Negatif	-0.051
Test İstatistiği	0.051	
Çift Kuyruklu Anlamlılık	0.069	

3.3 IRI bozulma tahmin modeli

Oluşturulan bu tahmin modelinin 1 km uzunluğunda oluşturulacak yol kesimleri için IRI değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılmasının oldukça faydalar sağlayacağı çok

açıkır. Bu maksatla, yukarıda gösterilen PCI-IRI dönüşümünü sağlayabilen (1) nolu matematiksel ifade ile (2) No.lu tahmin modeli eşitlenmiş ve IRI bileşeni bağımsız değişken olarak çekilerek (3) No.lu tahmin modeli elde edilmiştir. Söz konusu bu modelin tahmin yeteneğini karşılaştırmak amacıyla tahmin edilen ve gerçekte ölçülen IRI değerleri karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve tahmin edilen IRI değerlerinin karşılaştırması sonucunda modelin regresyon değeri 0.6051 olarak bulunmuştur. Bahsi geçen bu değerlendirme Şekil 7'de görülmektedir.

$$IRI = 17.710846 - 3.80228 * \ln(100 + (-6.45440 * (Yaş) + 0.64233 * (Yaş)^2 - 0.02633 * (Yaş)^3)) \quad (3)$$



Şekil 7: Ölçülen ve tahmin edilen IRI değerlerinin karşılaştırılması.

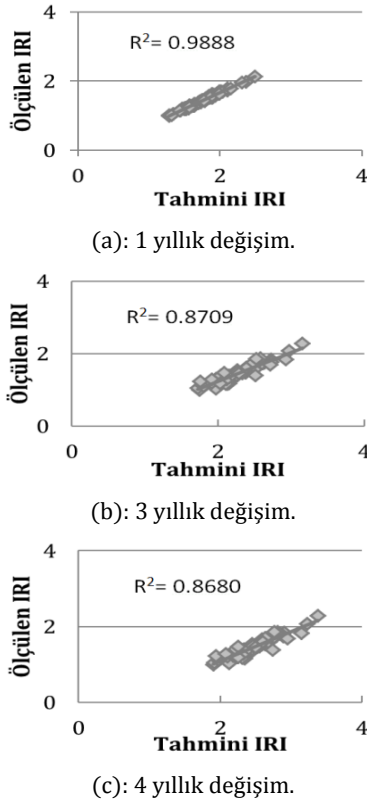
ÜYS çalışmalarında mevcut IRI performansı yardımıyla gelecek yıllara ilişkin değişimlerin değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, IRI ve PCI değerleri arasındaki matematiksel ilişkiyi açıklayabilen (1) No.lu matematiksel ifade (3) Nolu eşitlikteki PCI başlangıç değerine (PCI=100) yerleştirilerek istenen sonuçları verebilecek IRI tahmin modeli elde edilmiştir. (4) No.lu matematiksel ifadede görülen tahmin modelinde girdi olarak $IRI_{ölç}$ bileşeni, güncel olarak ölçümü yapılan ve homojenleştirilerek değerlendirilen kesimin mevcut performansını ifade ettiği kabul edilen IRI değerini, Yıl bileşeni ise kesimin gelecek performansı merak edilen yaş sayısını göstermektedir.

$$IRI = 17.710846 - 3.80228 * \ln((105.42 * e^{-0.263 * IRI_{ölç}} + (-6.45440 * (Yıl) + 0.64233 * (Yıl^2) - 0.02633 * (Yıl^3))) \quad (4)$$

Elde edilen bu IRI tahmin modeli bilinen matematik eşitlik kuralları kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle, doğruluğunun gerçek ölçüm verileri ile mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir. Modelin tahmin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla KGM 10. Bölge yol ağında bulunan 010-21 kontrol kesim numaralı Giresun-Trabzon arası 2x2 bölünmüş yolda 2010, 2011 ve 2014 yıllarına ait tekrerrür IRI verileri 1 km'lik kesimlere ayrılarak değişim oranları incelenmiştir.

Bu amaçla, aynı yolda ölçülen yol kesimlerine ilişkin olarak 2010 ve 2011 yılı 1 yıllık, 2011 ve 2014 yılı verileri 3 yıllık, 2010 ve 2014 yılı verileri 4 yıllık olmak üzere IRI artışları model aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplamada $IRI_{ölç}$ bileşenine girdi olarak ilk ölçüm yılındaki IRI değerleri, Yıl bileşenine girdi olarak iki değerlendirme arasındaki yıl farkı kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ölçülen 1 yıllık, 2

yıllık ve 4 yıllık değişimler dikkate alınarak model aracılığıyla tahmin edilen ve ölçülen IRI değerleri karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonuçları Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8: 1, 3 ve 4 yıllık ölçülen ve tahmin edilen IRI değerlerinin karşılaştırılması.

1 yıllık değişim sonucu model aracılığıyla tahmin edilen ve ölçülen IRI değerleri arasında 0.9888 mertebesinde bir regresyon değeri olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, 3 yıllık ve 4 yıllık değişim sonucu model aracılığıyla tahmin edilen ve ölçülen IRI değerleri arasında sırasıyla 0.8709 ve 0.8680 mertebelerinde regresyon değerleri olduğu tespit edilmiştir. IRI değeri tahmin edilmek istenen yıl değeri büyüdükçe regresyon değerinin diğer bir deyişle modelin tahmin doğruluğunun göreceli olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum, tüm olasılık durum tahminlerinde (hava durumu vb.) modellerin tahmin sonuçlarında veri çözünürlüğünün azalması kavramı ile rahatlıkla açıklanabilmektedir.

4 Sonuçlar

Çalışmada, KGM sorumluluğunda bulunan devlet yolu ve il yolu statüsündeki BSK kaplamalı yollarda, gelecek yıllara ait performans tahmini yapabilen bir üstyapı performans tahmin modeli geliştirilmiştir. Yapım yılı bilinen üstyapılarda ölçülen üstyapı bozulma bilgileri kullanılarak PAVER sistemi yardımıyla kesimlerin üstyapı durum indeksi (PCI) bilgileri elde edilmiştir. PAVER sisteminin bir başka çıktısı olarak, değerlendirilen üstyapı kesimlerinin ilk yapım yıllarındaki PCI değerleri 100 kabul edilerek performans tahmin modeli geliştirilmiştir. Sonrasında, aynı yol kesimlerinde PCI ve IRI arasındaki matematiksel ilişki ortaya konmuştur. Elde edilen bu matematiksel ilişki oluşturulan gelecek tahmin modeline entegre edilerek, ölçülen IRI değeri ve performansı tahmin edilecek yıl bağımsız değişkenlerine bağlı olarak üstyapıların gelecek yıllara ait IRI değerlerini belirleyen bir tahmin modeli

elde edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki basamağı; modelin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini kontrol etmek için, periyodik ölçümlerin yapılarak ölçülen IRI değerleri ile söz konusu geliştirilen modelle tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması gerektiği hususudur.

Geliştirilen model ile bulunan değerlerle, ölçülen değerlerin yakınlığı izlenerek yapılacak değerlendirmeler sonucu, elde edilen verilerin uygunluğu halinde, geliştirilen modelin coğrafi olarak benzer iklim ve trafik özelliklerine sahip BSK kaplamalı yollar için kullanılabilirliği değerlendirilecektir.

Geleceğe yönelik toplanan performans ölçüm verileri arttıkça üstyapı bozulmalarını etkileyen diğer parametrelerle birlikte tahmin yeteneği çok daha fazla olan modeller geliştirilebilecektir. Bu bağlamda, günümüz imkânlarını yansıtan bu çalışma sonuçlarının ileriye dönük olarak bütün BSK' lı kesimler için kullanılması anlamlı olmayacaktır. Ancak, dikkate alınan veya inceleme konusu olan yol kesimi için, benzer modeller üretilebilir. Çalışma, esas itibarıyla, üstyapının yaşına bağlı olarak PCI ve IRI değerlerinin tahmin edilebileceğini gösteren bir araştırmanın sonucunu yansıtmaktadır.

5 Teşekkür

İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve KGM Ar-Ge Dairesi Başkanlığınca ortak yürütülen bu çalışma, KGM Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ar-Ge Projeleri birimince (Proje No: KGM-ARGE/2012-12) desteklenmiştir. Yazarlar, çalışmada emeği geçen tüm teknik birimlere teşekkür ederler.

6 Kaynaklar

- [1] AASHTO. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, USA, AASHTO, 1993.
- [2] Haas R, Hudson WR, Zaniewski JP. *Modern Pavement Management*, Florida, USA, Krieger Pub. Co.,1994.
- [3] Moazami D, Behbahani H, Muniandy R. "Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic". *Expert Systems with Applications*. 38(10), 12869-12879, 2011.
- [4] Yang J, Lu J. "Gunaratne M, Xiang Q. Overall Pavement Condition Forecasting Using Neural Networks-an Application to Florida Highway Network". *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, USA, 12-16 January 2003*.
- [5] Shahin MY. *Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots*, New York, USA, Springer, 2005.
- [6] Ziari H, Sobhani J, Ayoubinejad J, Hartmann T. "Prediction of IRI in short and long terms for flexible pavements: ANN and GMDH methods". *International Journal of Pavement Engineering*, 17(9), 776-788, 2016.
- [7] Salem O, El-Assaly A, Abou-Rizk S. "Performance prediction models of pavement highway network in alberta". *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, USA, 12-16 January 2003*.
- [8] Khattak MJ, Landry C, Veazey J, Zhang Z. "Rigid and composite pavement index-based performance models for network pavement management system in the state of louisiana". *International Journal of Pavement Engineering*, 14(7), 612-628, 2013.
- [9] Chou E, Pulugurta H, Datta D. "Pavement Forecasting Models". Ohio Department of Transportation Columbus, OH, Scientific Report, 2008.

- [10] Chen C, Zhang J. "Comparisons of IRI-Based pavement deterioration prediction models using new mexico pavement data". *Geo-Frontiers Congress*, Dallas, Texas, USA, 13-16 March 2011.
- [11] Luo Z. "Pavement performance modelling with an auto-regression approach". *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 85-94, 2013.
- [12] Ahmed K, Abu-Lebdeh G, Lyles RW. "Prediction of pavement distress index with limited data on causal factors: An auto-regression approach". *International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 23-35, 2006.
- [13] Attoh-Okine NO, Cooger K, Mensah S. "Multivariate adaptive regression (MARS) and hinged hyperplanes (hhp) for doweled pavement performance modeling". *Construction and Building Materials*, 23(9), 3020-3023, 2009.
- [14] Parvini M. "Artificial neural network modeling of pavement performance using expert judgement". *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 373-384, 2002.
- [15] Khan MU, Williams DJ, Ferreira L, Mesbah M. "Developing a new road deterioration model incorporating flooding". *Proceedings of the ICE-Transport*, 167(5), 322-333, 2014.
- [16] Pulugurta H, Shao Q, Chou YJ. "Pavement condition prediction using markov process". *Journal of Statistics and Management Systems*, 12(5), 853-871, 2009.
- [17] Lethanh N, Adey BT. "Use of exponential hidden markov models for modelling pavement deterioration". *International Journal of Pavement Engineering*, 14(7), 645-654, 2013.
- [18] Park ES, Smith RE, Freeman TJ, Spiegelman CH. "A bayesian approach for improved pavement performance prediction". *Journal of Applied Statistics*, 35(11), 1219-1238, 2008.
- [19] Hong HP, Wang SS. "Stochastic modeling of pavement performance". *International Journal of Pavement Engineering*, 4(4), 235-243, 2003.
- [20] Hassan R, Lin O, Thananjeyan A. "A comparison between three approaches for modelling deterioration of five pavement surfaces". *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), 26-35, 2015.
- [21] Pan NF, Ko CH, Yang MD, Hsu KC. "Pavement performance prediction through fuzzy regression". *Expert Systems with Applications*. 38(8), 10010-10017, 2011.
- [22] Karaşahin M, Terzi S. "Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach". *Transport*, 29(1), 18-27, 2014.
- [23] Attoh-Okine NO. "Analysis of Learning Rate and Momentum Term in Backpropagation Neural Network Algorithm Trained to Predict Pavement Performance". *Advances in Engineering Software*, 30(4), 291-302, 1999.
- [24] Terzi S. "Modeling the pavement serviceability ratio of flexible highway pavements by artificial neural networks". *Construction and Building Materials*, 21(3), 590-593, 2007.
- [25] Terzi S. "Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach". *Advances in Engineering Software*, 57, 59-64, 2013.
- [26] Attoh-Okine NO, Mensah S, Nawaiseh M. "A new technique for using multivariate adaptive regression splines (MARS) in pavement roughness prediction". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 156(1), 51-55, 2003.
- [27] Ahmed A, Labi S, Li Z, Shields T. "Aggregate and disaggregate statistical evaluation of the performance-based effectiveness of long-term pavement performance specific pavement study-5 (LTPP SPS-5) flexible pavement rehabilitation treatments". *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(2), 172-187, 2013.
- [28] Mubaraki M. "Predicting Pavement Condition Deterioration for the Saudi Inter-Urban Road Network". *GeoHunan International Conference*, Changsha, Hunan, China, 3-6 August 2009.
- [29] Amador-Jiménez LE, Mrawira D. "Reliability-Based initial pavement performance deterioration modelling". *International Journal of Pavement Engineering*, 12(2), 177-186, 2011.
- [30] Fekpe E, Attoh-Okine NO. "Deterioration modelling for lateritic-base flexible pavements". *Construction and Building Materials*, 9(3), 159-163, 1995.
- [31] Bennett C, Petersen W. *A Guide to Calibration and Adaptation*, Washington, DC, USA, PIARC, 1999.
- [32] Braga A, Čygas D. "Adaptation of pavement deterioration models to lithuanian automobile roads". *Journal of Civil Engineering and Management*, 8(3), 214-220, 2002.
- [33] Odoki JB, Anyala M, Bunting E. "HDM-4 adaptation for strategic analysis of UK local roads". *Proceedings of the ICE-Transport*, 166(2), 65-78, 2013.
- [34] Martin TC. "Heavy vehicle road wear on sealed unbound granular roads". *Proceedings of the ICE-Transport*, 164(1), 13-22, 2011.
- [35] Jorge D, Ferreira A. "Road network pavement maintenance optimisation using the hdm-4 pavement performance prediction models". *International Journal of Pavement Engineering*, 13(1), 39-51, 2012.
- [36] Chootinan P, Chen A, Horrocks MR, Bolling D. "A multi-year pavement maintenance program using a stochastic simulation-based genetic algorithm approach". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 725-743, 2006.
- [37] Chi S, Hwang J, Arellano M, Zhang Z, Murphy M. "Development of network-level project screening methods supporting the 4-year pavement management plan in Texas". *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 482-494, 2013.
- [38] Chou JS, Le TS. "Reliability-Based performance simulation for optimized pavement maintenance". *Reliability Engineering & System Safety*, 96(10), 1402-1410, 2011.
- [39] Meneses S, Ferreira A. "Flexible pavement maintenance programming considering the minimisation of maintenance and rehabilitation costs and the maximisation of the residual value of pavements". *International Journal of Pavement Engineering*, 16(7), 571-586, 2014.
- [40] İncegöl M, Ergün M. "An integrated graphical user interface for pavement deterioration modeling". *Scientific Research and Essay*, 6(17), 3649-3656, 2011.
- [41] Güngör AG, Hacak B, Ünal EN. "Üstyapı yönetim sistemi KGM uygulamaları". 2. *Karayolu Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 11-13 Ekim 2011.
- [42] Park K, Thomas NE, Wayne Lee K. "Applicability of the international roughness index as a predictor of asphalt pavement condition". *Journal of Transportation Engineering*, 133(12), 706-709, 2007.