

## Bitümlü Sıcak Karışım Üstyapılarda Görülen Yüzey Bozulmaları ile Düzgünsüzlük Arasındaki İlişkilerin Modellenmesinde Bazı Yaklaşımlar

Ufuk KIRBAŞ<sup>\*1</sup>, Mustafa KARAŞAHİN<sup>2</sup>, Birol DEMİR<sup>3</sup>, Muhammet KOMUT<sup>3</sup>, Emine Nazan ÜNAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı, Samsun

<sup>2</sup>İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>3</sup>Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara

(Alınış / Received: 08.08.2017, Kabul / Accepted: 07.12.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 16.02.2018)

**Anahtar Kelimeler**  
Üstyapı performansı,  
Yüzey bozulmaları,  
IRI

**Özet:** Esnek üstyapılarda görülen yüzey bozulmaları ile düzgünsüzlük arasında ilişkilerin araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde sınırlı sayıda yüzey bozulma türünün dikkate alındığı görülmektedir. Literatüre katkı sağlamak amacıyla bu çalışmada, 13 adet yüzey bozulma türü ve bozulma şiddetleri ile birlikte toplam 32 adet üstyapı bozulması ile IRI arasındaki ilişkilerin matematiksel modelleme analizi yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında doğrusal regresyon, değişkenli uyarlamalı regresyon eğrileri (MARS) ve yapay sinir ağları (YSA) yaklaşımları kullanılmıştır. Oluşturulan modellerin tahmin yetenekleri ortalama mutlak hata (OMH), kök ortalama karesel hata (KOKH), ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) ve regresyon katsayısı ( $R^2$ ) istatistiksel karşılaştırma yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Tahmin yeteneği en yüksek olan modelin YSA yaklaşımı kullanılarak oluşturulan model olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, YSA yaklaşımında girdi değişkenlerinin çıktı değişkeni üzerindeki etkileri bağlantı ağırlıklarına göre değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre, üstyapı bozulmaları oluşma nedenlerine (mekanizmalarına) göre incelendiğinde, IRI üzerinde % 43.8 yük kaynaklı, % 39 diğer sebepler kaynaklı ve % 17.2 iklim kaynaklı bozulmaların etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## Some Approaches to the Modeling of Relationships between Surface Distresses and Roughness in Hot-Mixed Asphalts

**Keywords**  
Pavement performance,  
Surface distresses,  
IRI

**Abstract:** When studies investigating the relationship between pavement roughness and surface distresses seen in flexible pavements are examined, a limited number of surface distress types are considered to be taken into account. In order to contribute to the literature, in this study, mathematical modeling analysis of relations between IRI and a total of 32 pavement distresses with 13 types of surface distress types and severities were carried out. Linear regression, multivariate adaptive regression splines (MARS) and artificial neural networks (ANN) approaches are used in modeling studies. Estimating capabilities of the analyzed mathematical models were evaluated using statistical comparison methods such as mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE), mean absolute relative error (MARE) and regression coefficient ( $R^2$ ). The model constructed using the ANN approach was ascertained to be the model with the highest prediction accuracy. In addition, in the ANN approach, the effects on the output variable of the input variables are evaluated according to the connection weights. According to this evaluation, when pavement distresses are examined according to the cause of distress, it is concluded that 43.8 % of IRI is caused by load, 39 % is caused by other causes and 17.2 % is caused by climate.

### 1. Giriş

Karayolu üstyapıları, trafik yükleri ve iklimin birleşik etkileri altında sürekli olarak bozulmaktadır. Mevcut durumu ve bozulma miktarını ifade edebilmek için

kullanılan üstyapı performans kavramı, tasarım ömrü boyunca trafikten ve iklimden kaynaklanan bozulma etkilerini karşılayabilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [1]. Üstyapı bozulmaları (çatlaklar, kalıcı deformasyonlar, suya bağlı bozulmalar vb.)

mevcut hizmet düzeylerinin değerlendirilmesinde oldukça önemli parametrelerdir. Bölgesel olarak, üstyapılarda görülen yüzey bozulmaları ile düzgünlük arasındaki ilişkilerin bilinmesi gerek üstyapı yönetim sistemlerinin (ÜYS) verimli işletilmesinde, gerekse ihtiyaç duyulan üstyapı tasarım analizlerinin doğru yapılmasında oldukça faydalı bilgiler sağlamaktadır.

Literatürde sıklıkla, düzgünlük (uluslararası düzgünlük indeksi ile ifade edilir, IRI) ile üstyapı bozulma parametrelerinin arasındaki ilişkilerin, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizi gibi istatistiksel tabanlı modelleme teknikleri kullanılarak araştırıldığı görülmektedir. Üstyapıların değerlendirilmesinde kullanılan bozulma tanımlama kılavuzlarında bozulmaların, onlarca farklı türde ve şiddette değerlendirilmesi öngörülmektedir. Bu nedenle, çok sayıda bağımsız değişkenin bir bağımlı değişkeni ifade edebilmesinde bu geleneksel yöntem istenen hassasiyette ilişkiler yakalayamamaktadır. Günümüzde çok sayıda bağımsız değişken ile model oluşturulmasında pratik kolaylıklar sağlayan, bağımsız değişkenlerin aşırı değerlerinde (yüksek veya düşük) anlamlı sonuçlar verebilen ve veri yığınları arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya çıkarabilen farklı modelleme teknikleri de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak parçalı regresyon yöntemi ile benzerlik taşıyan Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS) yöntemi ile kalibrasyon verilerinin herhangi bir fonksiyonel dağılıma benzemesi varsayımını gerektirmeyen Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi gösterilebilir.

Literatür incelendiğinde yüzey bozulmaları ile düzgünlük arasındaki ilişkileri modelleyen çalışmalar görülmektedir. Hozayen ve Alrukaibi [2] düzgünlük, üstyapı performansı oranı (PCR), çatlaklar, tekerlek izi ve soyulmalar arasında mantıksal ve istatistiksel kriterlere dayalı regresyon ilişkileri geliştirmiştir. Araştırmacılar, üstyapı performans göstergeleri IRI ve PCR'a karşılık yalnızca 3 adet bozulma türünü dikkate almışlardır. Al-Omari ve Darter [3] çalışmalarında performans göstergeleri olan IRI ve hizmet oranı (PSR) arasında regresyon eşitliklerini araştırmışlardır. Ayrıca, IRI ile tekerlek izi, deformasyonlar, yamalar ve çatlaklar arasındaki (4 adet bozulma türü) ilişkileri regresyon analizi yöntemi ile araştırmışlardır. Öte yandan, IRI ile tekerlek izi arasında verilerin birleştirilerek (homojenleştirerek kesim oluşturma) değerlendirilmesi ile doğrusal bir ilişkinin oluştuğunu saptamışlardır. Aguiar-Moya vd. [4] IRI ile enine ve boyuna çatlak, blok çatlak, yorulma çatlak ve tekerlek izi ile üstyapı yaşı, yağış miktarı ve karışım tasarım parametrelerinin de bağımsız değişken olarak kullanıldığı bir mekanistik-ampirik regresyon modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada 5 adet yüzey bozulma türü dikkate alınmıştır. Mactutis vd. [5] IRI ile değerlendirme yüzeyinde görülen çatlak

yüzdesi ve ortalama tekerlek izi derinliği arasında doğrusal regresyon modeli geliştirmişlerdir. Modelde performans değişimini belirleyebilmek için ölçülen IRI değerleri de bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Sandra ve Sarkar [6] çalışmalarında IRI ile çatlak, oyulma, soyulma, yama ve tekerlek izi olmak üzere 5 adet bozulma türü arasında bir doğrusal regresyon modeli oluşturmuşlardır. Çalışmada, sözü edilen bozulma türlerinin düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı şiddeti de model kalibrasyonunda dikkate alınarak toplam 15 adet bağımsız değişkenle bağımlı değişken tahmini yapılmıştır. Bu sayede, geliştirilen modelin bozulma şiddet düzeylerini de dikkate alması açısından bozulma tanımlama kılavuzlarında açıklanan üstyapı yüzey değerlendirme prensiplerine oldukça yaklaşan bir hassasiyette değerlendirme yapılabilmesi sağlanmıştır.

Modelleme tekniklerinden tekrarlı parçalı değerlendirme ve eğri uydurma tekniklerini birleştirerek kullanabilen MARS tekniği de üstyapı performans verileri ile yüzey bozulma verileri arasındaki ilişkileri araştırmak amacıyla kullanılmıştır. Attoh-Okkine vd. [7] IRI bağımlı değişkenini tahmin etmek için çatlaklar, çevresel faktörler, yaş, tekerlek izi standart sapması ve ortalama derinliği ile yama olmak üzere, dört tanesi yüzey bozulma verisi olan 6 adet bağımsız değişken kullanarak bir tahmin modeli geliştirmiştir.

Yüzey bozulmaları ile performans ilişkisinin araştırılmasında YSA yaklaşımını kullanan çalışmalar da göze çarpmaktadır. Lin vd. [8] yol sınıfı, sol ve sağ tekerlek izi, timsah sırtı çatlak, çatlak, yama, oyulma (hafif ve şiddetli), kasma, çökme, soyulma, hatalı rögarlar (hafif ve şiddetli) olmak üzere 14 adet yüzey bozulma girdisi ile IRI tahmini yapabilen bir model geliştirmiştir. Çalışma, literatürde çok sayıda veriyi girdi olarak kullanabilen ender çalışmalardandır. Ayrıca araştırmacılar, modelin sınır değerler hassasiyetini de araştırarak uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Chadra vd. [9] çalışmalarında IRI ve tekerlek izi, çatlaklar, oyulma, yama ve soyulma olmak üzere 5 adet yüzey bozulma türü arasında regresyon ve YSA yaklaşımlarını kullanarak modeller geliştirmiştir. Yüzey bozulma türlerinin farklı şiddet düzeyleri göz ardı edilmiştir. Çalışmada oluşturulan modellerin tahmin yetenekleri karşılaştırılarak en uygun yöntemin YSA olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ayrıca literatürde, tahmin modellerinin geliştirilmesinde, üstyapıların performansını etkileyen yüzey bozulmalarının yanında çok sayıda farklı parametreyi de dikkate alan çalışmalar bulunmaktadır. Çalışmalarda, bağımsız değişken sayısının çok olması bazı değişkenlerin sayısal değerlerle ifade edilememesi gibi sebeplerle yapay zeka tekniklerinin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Araştırmacılar tarafından, sayısal ve sözel verilerin bir arada değerlendirilmesinde oldukça kolaylıklar sağlayan bulanık mantık [10-12]

ve YSA [13-16] yaklaşımları ile her iki yöntemin bir arada kullanıldığı ANFIS yaklaşımının [17] oldukça sık tercih edildiği görülmektedir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar üstyapı performansı ve yüzey bozulmaları arasındaki ilişkinin modellenmesinde çoğunlukla doğrusal regresyon analizinin tercih edildiğini, nispeten daha az bir oranda doğrusal olmayan regresyon analizinin tercih edildiğini göstermektedir. Öte yandan yapılan çalışmalarda, bağımsız değişken olarak kullanılan yüzey bozulma türü çeşitliliğinin sınırlı sayıda olduğu ve hatta bozulmaların şiddet düzeylerini de dikkate alan çalışmaların oldukça sınırlı sayıda olduğu dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, doğrusal regresyon, MARS ve YSA yaklaşımları kullanılarak üstyapı bozulma türleri ile yüzey düzgünlüğü arasındaki matematiksel ilişkiler araştırılmıştır. Geliştirilen modellerde, üstyapı bozulma türleri olarak timsah sırt çatlak, kuma, blok çatlak, ondülasyon, çökme, kenar çatlağı, boyuna ve enine çatlak, yama, oyulma, tekerlek izi, toplanma, soyulma ve sökölme ile ayrışma olmak üzere 13 adet yüzey bozulma türü ve bozulma şiddetleri ile birlikte toplam 32 adet bağımsız değişken dikkate alınmıştır. Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğundaki bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı 10 adet karayolu kesiminde toplanan üstyapı bozulma verileri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kullanılan bu üç modelleme tekniği arasında istatistiksel parametrelere dayanan bir karşılaştırma yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

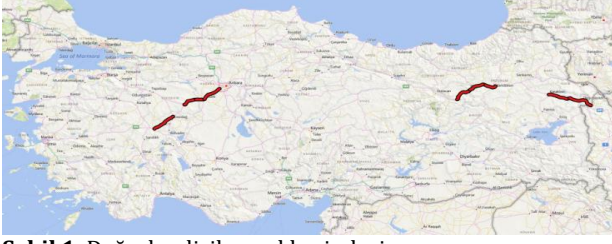
Bu çalışma kapsamında, KGM, Teknik Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığınca 2009 ve 2010 yıllarında 200-10, 200-11, 200-12, 100-26, 100-27, 100-28, 100-32, 100-33 ve 260-21 Kontrol Kesim No'lu (KKNO) yollarda yapılan yüzey bozulma ve IRI ölçüm verileri kullanılmıştır. Ölçümlerde daire başkanlığına ait 2009 model Dynatest Mark-III Profilometre Cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan profilometre cihazı ile ASTM E 950 standardına uygun IRI, sürüş sayısı (RN), tekerlek izinde oturma (TİO), makro yüzey dokusu (MDP) ve yol geometrik özellikleri (IMS) ile küresel konum (DGPS) verileri toplanabilmektedir [18]. Ancak, çalışmada, yüzey bozulmaları ile IRI arasındaki ilişki incelendiğinden, profilometre cihazının kaydettiği diğer veriler dikkate alınmamıştır.

IRI, literatürde ilk defa 1982 yılında Brezilya' da yapılan Uluslararası Yol Düzgünlük Deneyi ile tanımlanmıştır [1]. Kalibre edilmiş bir araç üzerine monte edilmiş titreşim ve lazer sensörlü uzunluk (yükseklik) ölçerlerin verileri kullanılarak oluşturulan profilin matematiksel modeli olarak tanımlanmaktadır [3]. IRI ölçümleri ve değerlendirmeleri ASTM E 950 standardında

tanımlanan profilometre cihazı ile çeyrek araç sisteminin (Quarter Car System - QCS) simüle edilmesi ile sağlanmaktadır [18]. Verilerin değerlendirilmesi aşamasında ölçülen değerler arasında istenmeyen sapma okumalarını süzmek ve istenilen aralıktaki değerleri elde etmek için otomatik filtreleme işlemi yapılmaktadır. IRI ölçümlerinde, cihazın standartları çerçevesinde 10-199 m arasında boyuna filtre uzunluğu ve 100 m filtre dalga boyu standardı kullanılmaktadır [18]. Araçta mesafe dönüştürücünün ürettiği elektronik vuruşlar (saniyede gönderilen lazer ışığı sayısı) ile hız ölçülerek, bunun yardımıyla zamanın bir fonksiyonu, seyahat edilen mesafenin bir fonksiyonuna dönüştürülmektedir. Ölçümler sırasında araca yerleştirilmiş bilgisayara kaydedilen veriler 1 m ölçüm uzunluğuna kadar hesaplanabilmektedir.

Araça yerleştirilmiş olan üç adet yüksek çözünürlüklü (High Definition - HD) kamera ile üstyapıların yüzey görüntü verileri analiz edilerek IRI verileri ile eş zamanlı yüzey bozulma verileri elde edilmiştir. Araça yerleştirilmiş olan üç adet kamera ile alınan bilgiler, eş zamanlı olarak veri işleme sistemleri tarafından kaydedilmektedir. Aracın ön camına yerleştirilmiş iki adet kameradan (Leica Dicomar lens, 13 x yakınlaşma, F1.6 (f=4.2mm - 55mm)) birincisi, detay görüntü kamerası olup, yol yüzeyinde görülen tüm yüzey bozulmalarını 2 mm çatlak genişliği hassasiyetiyle görebilecek şekilde optimize edilmiştir. Kamerada, 2 mm çatlak genişliği hassasiyetini elde edecek şekilde optimum kamera görüş mesafesi dikkate alınarak yol yüzeyi görüntüleri (fotoğraf) 20 m aralıklarla kaydedilmektedir. İkinci kamera çevre görüş kamerası olarak adlandırılıp, daha geniş görüş açısında yol çevre etkileşimi bilgilerini gerçek zamanlı olarak görüntüleyebilecek şekilde düzenlenmiştir. Üçüncü kamera diğer ikisine nazaran daha düşük çözünürlükte olup ölçüm sırasında anlık yaşanan durumları ve operatörlerin kısa bilgilerini kaydedebilmek amacıyla profilometre aracının içini kaydetmektedir. Yüzey bozulmalarının tespiti, KGM teknik personellerince, kameralar yardımıyla görüntülenen 20 m'lik detay görüntü fotoğraflarının görüntü işleme yazılımları yardımıyla bilgisayar ortamında üzerinde yapılan işaretlemelerle ölçülendirerek sağlanmıştır. Üstyapı yüzey bozulma verilerinin değerlendirmesinde PAVER sisteminin öngördüğü yüzey değerlendirme esasları dikkate alınmıştır [19]. 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 m<sup>2</sup> yüzey alanlarında PAVER sisteminin en küçük birimi olan örnek alanlar teşkil edilmiştir. 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 yüzey bozulma değerlendirmesi ve IRI ölçümleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında

üstyapıları değerlendirilen yol kesimlerinin geometrileri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Değerlendirilen yol kesimleri

Değerlendirilen yol kesimlerinin KKNO'larına göre her iki yön için ortalama hizmete açılış tarihleri, ölçümlerin yapıldığı tarih, KGM'nin hangi sorumluluk bölgesinde bulunduğu bilgileri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Değerlendirilen kesimlerin yapım bilgileri

KKNO	Yolun Hizmete Açıldığı Tarih	Ölçüm Tarihi	Bulunduğu Bölge
200-10	01.1996	12.2009	4. Bölge
200-11	01.2000	12.2009	4. Bölge
200-12	06.1998	12.2009	4. Bölge
100-26	01.2006	10.2010	12. Bölge
100-27	09.1994	10.2010	12. Bölge
100-28	01.2006	10.2010	12. Bölge
100-32	01.1998	10.2010	12. Bölge
100-33	01.1995	10.2010	12. Bölge
260-21	01.2006	10.2010	12. Bölge

Tablo 2. Değerlendirilen kesimlerinin trafik ve iklim bilgileri

KKNO	Trafik Hac. (YOGT)	Ağır Taşıt Or. (%)	Maks. Sıc. (°C)	Min. Sıc. (°C)
200-10	11549	%31	40.8	-21.5
200-11	11549	%31	40.8	-21.5
200-12	16586	%26	40.8	-21.5
100-26	2566	%51	39.2	-32.6
100-27	3907	%49	27.6	-15.5
100-28	8544	%22	27.6	-15.5
100-32	2388	%41	30.0	-16.2
100-33	2301	%42	38.6	-25.0
260-21	2822	%45	27.6	-15.5

Ayrıca, ölçümlerin yapıldığı yıllarda kesimlerde görülen en büyük yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) bilgileri ve trafik içerisindeki ağır taşıt oranı ile yol kesimlerinin içinde bulunduğu iklimi açıklayabilmek amacıyla gözlemlenen en yüksek ve en düşük sıcaklık bilgileri Tablo 2'de görülmektedir.

## 2.1. PAVER sistemi ve üstyapı bozulmaları

PAVER sistemi, üstyapı yüzeyinde  $225 \pm 90$  m<sup>2</sup> büyüklüğünde alanlarda, ASTM D 6433-11 kodlu bozulma tanımlama kılavuzunda (BSK üstyapılar için) tanımlanan şekilde toplanan yüzey bozulma verilerinin değerlendirilmesi prensibine dayanmaktadır [19]. Sistemin kabul ettiği bozulma tanımlama kılavuzunda, BSK üstyapılar için, her biri farklı bir kod değeriyle ifade edilen 20 farklı türde bozulma düşük (D), orta (O) ve yüksek (Y) şiddet düzeylerinde kategorilere ayrılmaktadır. ASTM D

6433-11 kodlu standartla açıklanan bozulma sınıfları Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. ASTM D 6433-11 bozulma türleri [19]

Kod	Bozulma	Ölçüm Birimi	Şiddet Düzeyi	Bozulma Nedeni
1	Timsah Sırtı Çatlak	m <sup>2</sup>	Evet	Yük
2	Kusma	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
3	Blok Çatlak	m <sup>2</sup>	Evet	İklim
4	Kabarma ve Oturma	m	Evet	Diğer
5	Ondülasyon	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
6	Çökme	m <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	Evet	Diğer
12	Cilalanma	m <sup>2</sup>	Hayır	Diğer
13	Oyulma	sayı	Evet	Yük
14	Demiryolu Geçişi	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
15	Tekerlek izi	m <sup>2</sup>	Evet	Yük
16	Toplanma	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
17	Tabaka Kayması Çat.	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
18	Şişme	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
19	Soyulma ve Sökülme	m <sup>2</sup>	Evet	İklim
20	Ayrışma	m <sup>2</sup>	Evet	İklim

Tablo 3 incelendiğinde PAVER sisteminde yüzey bozulmalarının oluşumunun yük, iklim ve diğer nedenler olmak üzere 3 temel nedene indirgenebildiği görülmektedir. Yük kaynaklı bozulmaların taşıt tekerleklerinden aktarılan dinamik yüklerden, iklim kaynaklı bozulmaların ise üstyapıların belirli periyotlarda maruz kaldığı sıcaklık farkları, yağış ve don gibi çevresel etkilerden kaynaklandığı bilinmektedir. Diğer nedenler olarak üstyapı tabakalarının oluşturulması sırasında meydana gelen ve denetimlerde gözden kaçan imalat hataları, üstyapıların projelendirilmesi sırasında tespit edilemeyen tasarım hataları, kışla mücadelede kullanılan çözücüler ve ekipmanların hasarları, çevresel organik kökenli (ağaçlar vb.) varlıkların etkileri, taşıt işletiminden kaynaklı (çözücü vb. sıvıların akması, yangın gibi) hasarlar diğer bozulma nedenleri olarak kabul edilebilmektedir.

## 2.2. Üstyapı bozulmalarının değerlendirilmesi

Tablo 3'de özetlenen bozulma türleri detaylıca incelendiğinde 18 adet bozulmanın D, O ve Y olmak üzere üç farklı yoğunluk şiddetinde, 1 adet bozulmanın O ve Y olmak üzere 2 farklı yoğunluk şiddetinde ve 1 adet bozulmanın tek yoğunluk şiddetinde değerlendirildiği görülmektedir. Bunlara ilaveten 14 adet bozulma alan verisi olarak, 5 adet bozulma uzunluk verisi olarak ve bir adet bozulma ise sayı verisi olarak toplanmaktadır.

Yüzey bozulma değerlendirmeleri standardın tanımladığı ölçüm birimleri kullanılarak tamamlanmıştır. Standartta tavsiye edilen alan, uzunluk ve sayı olmak üzere üç farklı ölçüm birimi olduğundan ve ölçüm değerlerinde göreceli olarak büyük farklar olduğundan dolayı oluşturulacak

modellerin tahmin gücünü arttırmak amacıyla bağımsız değişkenler standartlaştırılmıştır. Sistem tarafından öngörüldüğü üzere, bir yüzey bozulma verisi değerlendirildiği örnek alan boyutuna bölünerek sonucun 100 katı büyütülmesi ile standartlaştırılmış bozulma miktarı (SBM) değerleri elde edilmiştir. Yapılan bu işlem matematik olarak (1) nolu eşitlikte ifade edilmektedir.

$$SBM = \frac{\text{Bozulma Miktarı}}{\text{Örnek Alan Büyüklüğü}} * 100 \quad (1)$$

Yapılan yüzey değerlendirmelerinde incelenen yol kesimlerinde standardın tanımladığı 13 adet yüzey bozulma verisine rastlanılmıştır. Bozulmaların şiddet düzeyleri de dikkate alındığında toplan 38 farklı yüzey bozulma verisi toplanmıştır. Modelleme analizlerine geçmeden önce çok sayıda değişkenle çalışılacağından dolayı her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişkenle arasındaki farklar istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, iki grubun ortalamalarını karşılaştırarak, aradaki farkın istatistiksel olarak anlamlı mı, yoksa rastlantısal mı olduğuna karar verebilen t testi kullanılmıştır. Tablo 4'de yüzey bozulmaları ile IRI arasındaki farkların anlamlılık değerleri görülmektedir.

**Tablo 4.** Yüzey bozulma türleri ve IRI arasındaki ilişkiler

Anlamlılık	1D	10	1Y	2D
IRI	.000	.000	.000	.000
Anlamlılık	20	2Y	3D	30
IRI	.000	.000	.000	.000
Anlamlılık	3Y	5D	50	5Y
IRI	.000	.000	.000	.054
Anlamlılık	6D	60	6Y	7D
IRI	.000	.000	.000	.000
Anlamlılık	70	7Y	10D	100
IRI	.000	.165	.000	.000
Anlamlılık	10Y	11D	110	11Y
IRI	.000	.000	.000	.000
Anlamlılık	13D	130	13Y	15D
IRI	.000	.000	.995	.000
Anlamlılık	150	15Y	16D	160
IRI	.000	.000	.000	.000
Anlamlılık	16Y	190	19Y	20D
IRI	.729	.000	.000	.346
Anlamlılık	200	20Y		
IRI	.000	.995		

% 95 güvenilirlik düzeyi dikkate alındığında 5Y, 7Y, 13Y, 16Y, 20D ve 20Y türündeki bozulma verilerinin IRI ile istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bu sebeple, bu bozulma türleri analiz çalışmalarında değerlendirme dışı bırakılmıştır.

### 3. Bulgular

Çalışmalarda, istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler taşıyan 32 adet yüzey bozulma verisi ile IRI arasında doğrusal regresyon, MARS ve YSA modelleme

yaklaşımları kullanılarak matematiksel ilişkiler araştırılmıştır.

### 3.1. Doğrusal regresyon analizi

İstatistiksel regresyon teknikleri kullanan ampirik yaklaşımlar, üstyapıların karmaşık tepkileri ve performans göstergelerinin öngörülmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmada, yüzey bozulma verileri ile IRI arasında doğrusal regresyon modeli oluşturulmuştur. Matematik model (2) nolu eşitlikte görülmektedir.

$$IRI = \begin{bmatrix} 0.0585*1D+0.0738*10+0.0134*1Y \\ +0.0031*2D+0.0125*20+0.0587*2Y \\ +0.0112*3D+0.0409*30+0.0590*3Y \\ +0.0316*5D+0.0742*50+0.0528*6D \\ +0.0773*60+0.3818*6Y+0.0062*7D \\ +0.0196*70+0.0032*10D+0.0066*100 \\ +0.0115*10Y+0.0253*11D+0.0712*110 \\ +0.1141*11Y+0.3379*13D+0.4286*130 \\ +0.0432*15D+0.0252*150+0.0857*15Y \\ +0.0619*16D+0.0536*160+0.0112*190 \\ +0.0263*19Y+0.0069*200+1.1143 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Analiz edilen bu modelde tahmin doğruluğunu gösterdiği kabul edilen R<sup>2</sup> değeri 0.683 olarak bulunmuştur. Ayrıca, modelin istatistik anlamlılık değerinin oldukça düşük olduğu dikkat çekmektedir. Modelin ANOVA testi sonuçları Tablo 5'de ve bağımsız değişkenlerin t istatistiği değerleri Tablo 6'da görülmektedir.

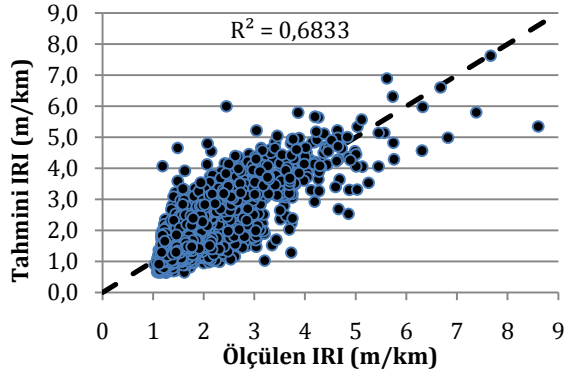
**Tablo 5.** Regresyon modeli ANOVA testi sonuçları

Model	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık
Regresyon	1858.050	58.064	221.801	0.000
Artık	861.273	0.262		
Toplam	2719.323			

**Tablo 6.** Bağımsız değişkenlerin t istatistiği değerleri

Model	t ist.	Model	t ist.	Model	t ist.
Sabit	71.849	50	16.988	11Y	5.745
1D	21.053	6D	10.990	13D	9.401
10	10.514	60	8.457	130	7.492
1Y	2.706	6Y	5.668	15D	33.417
2D	2.947	7D	1.574	150	11.066
20	6.842	70	2.784	15Y	7.679
2Y	5.785	10D	4.051	16D	8.671
3D	7.253	100	1.939	160	3.776
30	13.103	10Y	1.667	19M	6.697
3Y	2.065	11D	18.418	19H	3.672
5D	17.539	110	13.539	200	5.665

Matematik modelin katsayıları incelendiğinde tüm değerlerin pozitif yönde olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, göreceli olarak 6Y, 13D ve 130 bozulmalarının diğer bozulmalardan daha büyük olduğu diğer bir deyişle bu bozulmaların IRI üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Ölçülen ve model aracılığıyla tahmin edilen IRI değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Regresyon modeli tahmin doğruluğu

### 3.2. MARS yaklaşımı

MARS yöntemi, tekrarlı parçalı regresyon ve eğri uydurma yöntemlerinin olumsuz özelliklerine karşı daha kontrollü olmakla birlikte, her ikisinin olumlu yönlerini en iyi koruyacak şekilde birleştirmeyi amaçlamaktadır. MARS yöntemi kullanılarak iki yöntem arasında belli bir ödünleşme ile bu amaç gerçekleştirilmektedir [20]. MARS tekniği son yıllarda pek çok bilim ve teknolojiye başarıyla uygulanmıştır. MARS algoritması, temel olarak, doğrusal kesilmiş parçalı fonksiyonların genişlemesi prensibine dayanmaktadır. Bu durum (3) nolu eşitlikte özetlenmiştir.

$$[(x - \tau)]_+, [-(x - \tau)]_+ \quad (3)$$

Burada  $[q]_+$  değişkeni "maks (0, q)" ifadesini ve  $\tau$  bir tek değişkenli düğümü ifade etmektedir [21]. MARS algoritması olası tüm tek değişkenli parçalı doğrusal gösterimler için mafsal (düğüm) konumlarını ve tüm değişkenler arasındaki etkileşimleri araştırmaktadır. Yaklaşım, eğri uydurma algoritmalarına oldukça benzerdir. MARS yönteminin genel formu (4) nolu eşitlikte görülmektedir.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^P \sum_{b=1}^B \left[ \beta_{jb} (+) \text{Maks}(0, x_j - H_{bj}) + \beta_{jb} (-) \text{Maks}(0, H_{bj} - x_j) \right] \quad (4)$$

Burada, P bağımsız değişkenleri ve B temel fonksiyonları ifade etmektedir. Temel fonksiyonlar maks (0; x - H) ve maks (0; H - x) tek değişkenli bu iki eşitlik ile ifade edilir ve eğer  $\beta$  katsayıları 0 ise yalnızca bir eşitliğin olması yeterlidir. H değerlerine "mafsal" veya "düğüm" denir [22]. Mafsal aracılığı ile veri yığınlarını bölgelere ayıran bu yöntem doğrusal olmayan regresyon analizinin tersine gerekli durumlarda ve belirli limitlerde bağımsız değişkenleri etkisizleştirebilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak ekstrem değerlere sahip bağımsız değişkenlerin modele girdi olarak kullanılması halinde anlamsız sonuç (tahmin) değerlerinin ortaya çıkmasının önüne geçilebilmektedir. Bu durum, MARS yönteminin önemli üstün yanlarından bir tanesi olarak varsayılmaktadır.

MARS algoritması, mafsal noktalarının belirlenmesinde adım adım ilerleme işlemi ile temel fonksiyonlar için model sabitlerinin araştırmasını yaparken adım adım gerileme işlemi ile modelin tahmin doğruluğunu azaltan temel fonksiyonları elimine eder. Genelleştirilmiş çapraz geçerlilik kriteri (GCV) temel alınarak mafsal noktalarının uyum ölçüsü belirlenmektedir. GCV kriteri, modelde daha fazla parametrenin tahminiyle ilişkili değişkenlik için ayarlanacak bir ceza ile ortalama artık hatanın çarpılması ile belirlenmektedir [7]. Çalışma prensibi açısından çok katmanlı YSA'nın öğrenme aşamasına benzemektedir. Fakat, YSA'dan farklı olarak, verilere genelleme yapmamakta ve modele giren yeni bileşenlerin düzenlendiği adım adım gerileme sırasında kendisini aşırı uyuma karşı korumaktadır.

Çalışmada, yüzey bozulma verileri ile IRI arasında MARS tekniği kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Matematik model (5) nolu eşitlikte görülmektedir.

$$\text{IRI} = \begin{aligned} & 0.05272 * \text{TF1} - 0.0962 * \text{TF2} \\ & + 0.04050 * \text{TF3} - 0.03242 * \text{TF4} \\ & + 0.01694 * \text{TF5} - 0.12592 * \text{TF6} \\ & + 0.02244 * \text{TF7} - 0.16658 * \text{TF8} \\ & + 0.02550 * \text{TF9} - 0.03901 * \text{TF10} \\ & + 0.13806 * \text{TF11} - 0.10845 * \text{TF12} \\ & + 0.02467 * \text{TF13} - 0.06696 * \text{TF14} \\ & + 0.06809 * \text{TF15} - 0.16928 * \text{TF16} \\ & - 0.03698 * \text{TF17} + 0.01947 * \text{TF18} \\ & + 0.03554 * \text{TF19} - 0.11139 * \text{TF20} \\ & + 0.10766 * \text{TF21} + 0.00223 * \text{TF22} \\ & - 0.02263 * \text{TF23} + 0.03245 * \text{TF24} \\ & + 0.09608 * \text{TF25} - 0.06152 * \text{TF26} \\ & - 0.00991 * \text{TF27} + 0.28962 * \text{TF28} \\ & - 0.00847 * \text{TF29} + 0.00754 * \text{TF30} \\ & + 0.01251 * \text{TF31} - 0.16370 * \text{TF32} \\ & + 0.37139 * \text{TF33} + 0.05603 * \text{TF34} \\ & + 0.04861 * \text{TF35} + 0.022748 * \text{TF36} \\ & + 0.02888 * \text{TF37} - 0.00314 * \text{TF38} \\ & + 0.04052 * \text{TF39} + 0.02799 * \text{TF40} \\ & - 0.014915 * \text{TF41} + 0.03130 * \text{TF42} \\ & + 0.13051 * \text{TF43} + 0.32999 * \text{TF44} \\ & + 0.06257 * \text{TF45} + 0.03962 * \text{TF46} \\ & + 0.06452 * \text{TF47} - 0.05492 * \text{TF48} \\ & - 0.04038 * \text{TF49} - 0.00911 * \text{TF50} \\ & + 0.19908 * \text{TF51} - 0.14953 * \text{TF52} \\ & + 0.01254 * \text{TF53} - 0.06964 * \text{TF54} \\ & - 0.01756 * \text{TF55} - 0.19540 * \text{TF56} \\ & + 0.16296 * \text{TF57} + 0.09930 * \text{TF58} \\ & - 0.05488 * \text{TF59} - 0.18068 * \text{TF60} \\ & + 0.12142 * \text{TF61} - 0.07936 * \text{TF62} \\ & + 0.05248 * \text{TF63} - 0.08763 * \text{TF64} \\ & - 0.11736 * \text{TF65} - 0.13434 * \text{TF66} \\ & - 0.01141 * \text{TF67} + 0.05268 * \text{TF68} \\ & + 0.01981 * \text{TF69} + 0.14386 * \text{TF70} \\ & + 0.02258 * \text{TF71} - 0.02482 * \text{TF72} \\ & + 0.04041 * \text{TF73} - 0.09850 * \text{TF74} \\ & + 0.01967 * \text{TF75} - 0.05616 * \text{TF76} \\ & + 0.03644 * \text{TF77} + 0.14838 * \text{TF78} \\ & + 0.02958 * \text{TF79} + 0.01381 * \text{TF80} \\ & + 7.84444 \end{aligned} \quad (5)$$

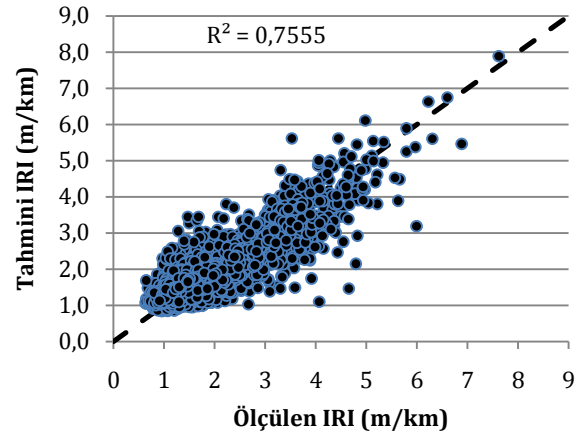
Modelin içerisinde değişkenlerle temsil edilen temel fonksiyonlar Tablo 7'de görülmektedir.

**Tablo 7.** MARS modelinde kullanılan temel fonksiyonlar

TF1= maks(0; 1D-11.667)	TF41= maks(0; 30.067-10D)
TF2= maks(0; 11.667-1D)	TF42= maks(0; 7D-1.433)
TF3= maks(0; 15D-2.133)	TF43= maks(0; 1.433-7D)
TF4= maks(0; 2.133-15D)	TF44= maks(0; 6Y)
TF5= maks(0; 11D-3)	TF45= maks(0; 160)
TF6= maks(0; 3-11D)	TF46= maks(0; 70-2.267)
TF7= maks(0; 50-6.333)	TF47= maks(0; 2.267-70)
TF8= maks(0; 6.333-50)	TF48= maks(0; 1D-4.333)
TF9= maks(0; 30-20.333)	TF49= maks(0; 11D-43.767)
TF10= maks(0; 20.333-30)	TF50= maks(0; 200-9.333)
TF11= maks(0; 110-2.333)	TF51= maks(0; 150-19.667)
TF12= maks(0; 2.333-110)	TF52= maks(0; 1Y)
TF13= maks(0; 150-6.333)	TF53= maks(0; 19Y)
TF14= maks(0; 6.333-150)	TF54= maks(0; 6D-2.767)
TF15= maks(0; 10-2.033)	TF55= maks(0; 10D-5.1)
TF16= maks(0; 2.033-10)	TF56= maks(0; 16D-7.667)
TF17= maks(0; 5D-15)	TF57= maks(0; 16D-3.667)
TF18= maks(0; 15-5D)	TF58= maks(0; 5D-1.833)
TF19= maks(0; 6D-11.667)	TF59= maks(0; 5D-5.367)
TF20= maks(0; 11.667-6D)	TF60= maks(0; 10D-49.667)
TF21= maks(0; 11Y)	TF61= maks(0; 7D-14.633)
TF22= maks(0; 190-22.667)	TF62= maks(0; 7D-9)
TF23= maks(0; 22.667-190)	TF63= maks(0; 3Y)
TF24= maks(0; 16D-0.667)	TF64= maks(0; 150-11.633)
TF25= maks(0; 0.667-16D)	TF65= maks(0; 150-23.833)
TF26= maks(0; 20-32.667)	TF66= maks(0; 100-15)
TF27= maks(0; 32.667-20)	TF67= maks(0; 15-100)
TF28= maks(0; 13D)	TF68= maks(0; 20-24)
TF29= maks(0; 3D-34)	TF69= maks(0; 200-37)
TF30= maks(0; 34-3D)	TF70= maks(0; 100-17.333)
TF31= maks(0; 15Y-3.8)	TF71= maks(0; 10Y)
TF32= maks(0; 3.8-15Y)	TF72= maks(0; 200-14)
TF33= maks(0; 130)	TF73= maks(0; 10D-37.667)
TF34= maks(0; 60)	TF74= maks(0; 110-5.667)
TF35= maks(0; 2Y)	TF75= maks(0; 3D-6)
TF36= maks(0; 200-2.267)	TF76= maks(0; 2D-20.2)
TF37= maks(0; 2.267-200)	TF77= maks(0; 2D-11)
TF38= maks(0; 2D-2.6)	TF78= maks(0; 10D-53.133)
TF39= maks(0; 2.6-2D)	TF79= maks(0; 2D-28)
TF40= maks(0; 10D-30.067)	TF80= maks(0; 11D-19.5)

Matematik model, 32 adet bağımsız değişken ve 1 adet bağımlı değişkenle 80 adet temel fonksiyon kullanılarak oluşturulmuştur. Model analizinde 0.0005 eşik değeri kullanılarak 0.220980 GCV hatası ile analiz tamamlanmıştır. Analiz edilen bu modelde tahmin doğruluğunu gösterdiği kabul edilen  $R^2$  değeri 0.756 olarak bulunmuştur. En uygun noktalarda mafsallar belirlenerek verilerin dağılımını eğri uydurma formunda idealleştiren bu matematik tahmin modelleme tekniği ile IRI değerlerinin belirlenebileceği açıkça görülmektedir. Geliştirilen modelin regresyon istatistik değerleri Tablo 8'de görülmektedir. Ölçülen ve model aracılığıyla tahmin edilen IRI değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3'de görülmektedir. Matematik modelin katsayıları incelendiğinde, regresyon modeline benzer şekilde, göreceli olarak 6Y, 13D ve 130 bozulmalarının diğer bozulmalardan daha büyük olduğu diğer bir deyişle bu bozulmaların IRI üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Geliştirilen bu tahmin modelinde her

bir bağımsız değişkenin ANOVA ayrıştırması Tablo 9'da görülmektedir.



**Şekil 3.** MARS modeli tahmin doğruluğu

**Tablo 8.** IRI tahmin modeli regresyon istatistik değerleri

	IRI
Ortalama (ölçülen)	1.849798
Standart sapma (ölçülen)	0.904754
Ortalama (tahmin)	1.849798
Standart sapma (tahmin)	0.786406
Ortalama (artık değer)	0
Standart sapma (artık değer)	0.447377
$R^2$	0.755496

**Tablo 9.** IRI tahmin modeli ANOVA ayrıştırması

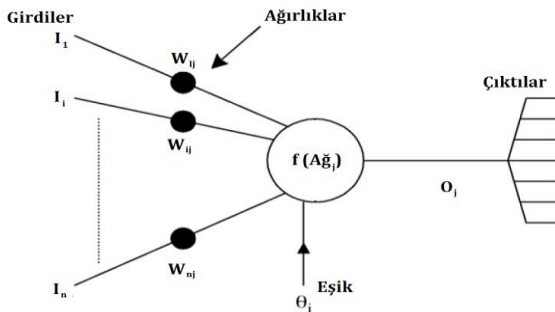
Fonksiyon	Ortalama	Standart Sapma	Temel Fonksiyon Sayısı	Bağımsız Değişken
1	1.496208	3.601346	3	1D
2	0.203140	1.421828	2	10
3	0.007072	0.192487	1	1Y
4	3.243635	8.601101	5	2D
5	0.614675	4.924194	3	20
6	0.047598	0.987075	1	2Y
7	1.149423	6.064634	3	3D
8	0.403852	3.419341	2	30
9	0.009730	0.316141	1	3Y
10	2.384502	5.092487	4	5D
11	0.273869	2.150611	2	50
12	0.474050	1.915177	3	6D
13	0.085906	1.005410	1	60
14	0.005316	0.132911	1	6Y
15	0.636754	2.373422	4	7D
16	0.187702	1.451008	2	70
17	7.90368	12.31334	6	10D
18	0.562975	2.809227	3	100
19	0.028037	0.542086	1	10Y
20	1.597633	6.930167	4	11D
21	0.213211	1.816993	3	110
22	0.027917	0.516106	1	11Y
23	0.029692	0.252331	1	13D
24	0.011937	0.156817	1	130
25	5.929331	7.458509	2	15D
26	1.298977	4.241319	5	150
27	0.084913	0.833335	2	15Y
28	0.320664	1.261559	4	16D
29	0.033704	0.649830	1	160
30	0.867008	5.904959	2	190
31	0.065473	1.255326	1	19Y
32	3.168071	7.440001	5	200

### 3.3. YSA yaklaşımı

YSA'lar, biyolojik sinir ağlarına benzer şekilde belirli performans özelliklerine sahip paralel bir bilgi işleme sistemleridir. Sinir ağları, nöron (bir sinir hücresi) adı verilen çok sayıda basit işlem ögesinden oluşmaktadır. Her bir nöron, yönlendirilmiş bağlantılar vasıtasıyla diğer nöronlara bağlıdır. Ayrıca, her bir yönlendirilmiş bağlantı kendisiyle ilişkilendirilmiş bir ağırlığa sahiptir. Yapı itibarıyla biyolojik sinirlere benzetilmelerinden dolayı sinaptik ağırlık olarak isimlendirilirler. Bir YSA ağı, oluşturma aşamaları sonucunda elde edilecek son halinin tam olarak kestirilememesinden dolayı genel olarak kapalı kutu olarak da isimlendirilmektedir. Öte yandan, geleneksel yöntemlere göre üstünlük olarak kabul edilen bu ağ yaklaşımı, geleneksel yöntemlerin başarısız olduğu sorunları çözmek için kullanılmaktadır. Ağın işlem yapabilme kabiliyeti, eğitim için kullanılan bir dizi veri seti ile adapte edilen sinaptik ağırlıklarda diğer bir deyişle ağ bağlantı güçlerinde saklıdır. Şekil 4'de yapay bir nöronun basit bir örneği görülmektedir. Matematiksel olarak, eğer  $I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$  girdi değerleri ve  $w_{1j}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{nj}$  sinaptik ağırlık değerleri olduğu kabul edilirse  $Ağ_j$ , gelen nöronun aktivasyonunun çarpımlarının toplamıdır. Ayrıca, tipik j'inci nöral bağlantıda bağlantıların sinaptik ağırlığı  $\sum I_i w_{ij}$  olarak ifade edilmektedir [9]. Eşik değeri olarak kabul edilen  $\theta_i$ , çıktıya eklenmektedir.  $Ağ_j$  (6) nolu eşitlikte görülmektedir. Burada n, girdi nöron sayısını i, girdi nöronlarının vektör gösterimini, w sinaptik ağırlıkların vektör gösterimini ve  $\theta_i$  eşik noktasını göstermektedir. j'inci nöral bağlantının çıktısı olarak kabul edilen ve aktivasyon fonksiyonu olarak isimlendirilen  $O_j$ , (7) nolu eşitlikte gösterilmektedir [23].

$$Ağ_j = \sum_{i=1}^n I_i w_{ij} + \theta_i \quad (6)$$

$$O_j = f(Ağ_j) \quad (7)$$



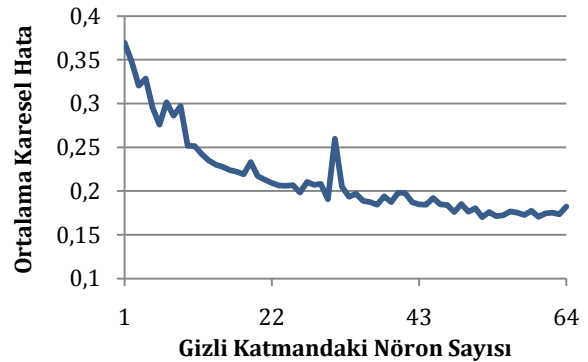
Şekil 4. Yapay nöronun fonksiyonel yapısı [24]

Eşik fonksiyonu, aktarım fonksiyonu veya sıkıştırma fonksiyonu olarak da adlandırılan aktivasyon fonksiyonu, bir nöronun giriş modelini belirtilen çıktı aralığına eşitlemek için kullanılır. En sık kullanılan eşik fonksiyonları doğrusal, sigmoid veya hiperbolik

fonksiyonlardır. Bu çalışmada, yarı-doğrusal olma avantajına sahip olan ve sifıra eşit girdiler için en büyük eğime sahip sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. IRI ile üstyapı bozulma parametrelerinin modellenmesinde geri yayılım algoritması (Back-propagation algorithm) kullanılmıştır. Geri yayılım algoritması, YSA modeli eğitimi için kullanılan mevcut yöntemler arasında en popüler ve en iyi test edilmiş olanı olduğu bilinmektedir.

Bir YSA modelinin geliştirilmesi süreci genellikle dört temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, problem alanının seçimi, her girdi, çıktı ve gizli katmandaki birim sayısını içeren ağ mimarisinin (topolojisi) belirlenmesi, öğrenme parametreleri ve tolerans seviyelerinin belirlenmesi, ağ eğitme için bir öğrenme yönteminin seçilmesi ve düzenlenen veri setleri yardımıyla ve ağı eğitilmesidir. Bu çalışmada, ağı eğitimi için geri-yayılım algoritması ile birlikte, tek bir gizli katmanı olan çok tabakalı ileri beslemeli sinir ağı tasarlanmıştır. Analiz aşamasında ağı öğrenme algoritması olarak Levenberg-Marquardt geri yayılım eğitim yöntemi kullanılmıştır.

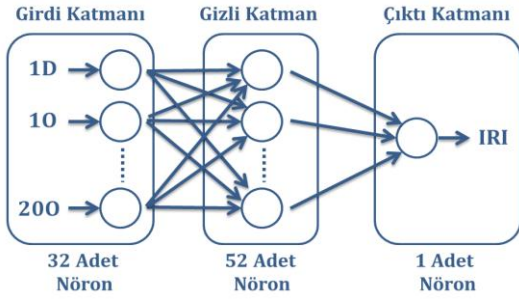
Üstyapı bozulma parametrelerini kullanarak düzgünlük tahmini yapabilmek için oluşturulan YSA mimarisinde, öncelikle gizli katmandaki nöronların optimum sayısı belirlenmiştir. Gizli katmandaki gizli nöronların sayısının, ortalama karesel hatayı (OKH) doğrudan etkilediği bilinmektedir. Bu amaçla, optimum sayıyı belirlemek için gizli katmanda 1 ile 64 aralığında nöron sayısı tesis edilmiş ve her bir ağı eğitme işlemi tamamlanmıştır. Eğitimler sonucunda oluşturulan ağlarda ölçülen IRI değerleri ile modellerin tahmin ettiği IRI değerleri arasında OKH değerleri hesaplanmıştır. Oluşturulan her bir ağ mimarisinde genel olarak gizli katmandaki nöron sayısının artmasıyla OKH'nın azaldığı görülmüştür. Değerlendirme sonucunda gizli katmandaki optimum nöron sayısı 52 olarak bulunmuştur. Bu değer üzerindeki nöron sayılarında OKH'larda az da olsa artış olduğu dikkat çekmektedir. OKH değerlerinin değişimi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Gizli katmandaki optimum nöron sayısının tahmini

Düzgünlük ve üstyapı bozulma parametrelerinin arasındaki ilişkilerin modellenmesinde kullanılan YSA modelinin mimarisi Şekil 6'da görülmektedir.

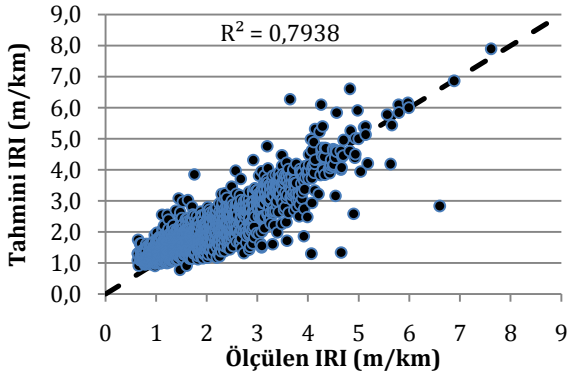




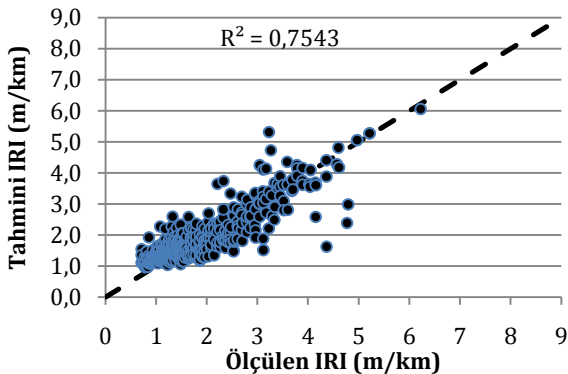
Şekil 6. Oluşturulan YSA ağının mimarisi (32:52:1)

Gizli katmandaki az sayıda nöronun, giriş ve çıkış değişkenleri arasında haritalama yetersizliğine neden olabileceği, fazla sayıda nöronun ise modelin veri setini ezberleyebileceği dolayısıyla yeni verilerde sağlıklı tahmin yapamayacağı bilinmektedir. Söz konusu bu tehditlerin ortadan kaldırılması amacıyla verilerin yaklaşık % 70'i eğitim (2327 adet), %15'i aşırı uyumu kontrol etmek için doğrulama (498 adet) ve kalan %15'i ağı daha önce tanımadığı verilerdeki performansını test (498 adet) etmek için ayrılmıştır. Ağı eğitilmesi aşamasında 1000 adet iterasyon öngörülmüşse de hedeflenen hata ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) değerine ulaşıldığında iterasyon sonlandırılmıştır.

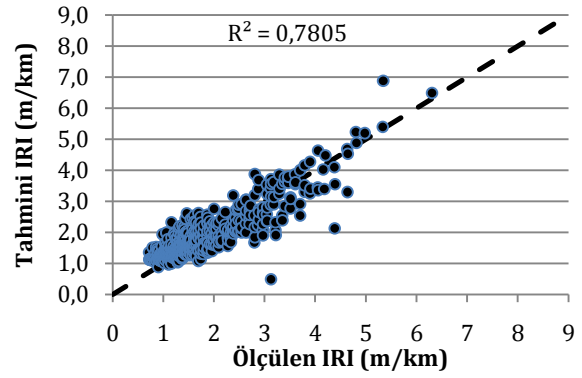
Ağın oluşturulması sırasında eğitime, doğrulama ve test aşamalarında model aracılığıyla tahmin edilen ve saha çalışmalarında ölçülen IRI değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7, 8 ve 9'da görülmektedir. Ayrıca, tüm verilerin karşılaştırılması Şekil 10'da görülmektedir.



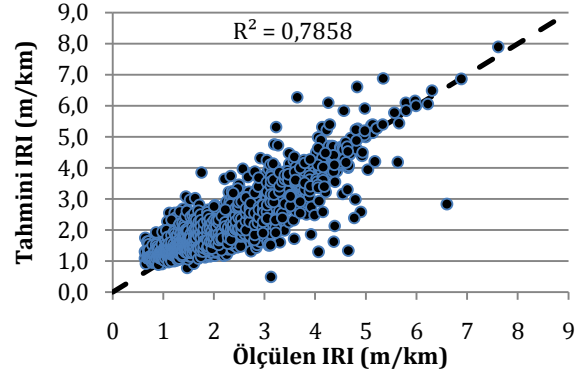
Şekil 7. Eğitim aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 8. Doğrulama aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 9. Test aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 10. Tüm veriler için YSA modeli tahmin doğruluğu

Analiz edilen bu YSA modelinde, ağ oluşturulmasının tüm aşamalarında tahmin doğruluğunu gösterdiği kabul edilen R<sup>2</sup> değerleri belirlenmiştir. R<sup>2</sup> değerleri eğitim aşamasında 0.794, doğrulama aşamasında 0.754 ve test aşamasında 0.781 olarak bulunmuştur. Ayrıca, tüm veriler dikkate alındığında bu değerlerin 0.786 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerden, YSA ağı modelinin hem eğitim, hem doğrulama hem de test aşamasında oldukça başarılı bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

### 3.3.1. Girdi parametrelerinin göreceli önemi

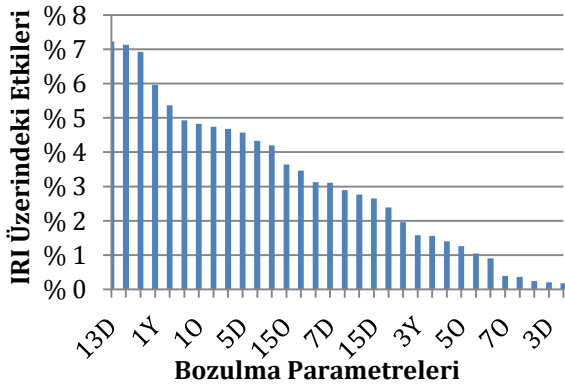
YSA regresyon problemlerinin çözümünde oldukça etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat, yapısı itibarıyla modelleme sırasında bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki önemini karşılaştırılamaması sebebiyle oldukça çok eleştirilmektedir. YSA'nın performansı bağımlı değişkeni doğru olarak tahmin etme konusunda iyi olsa dahi, bağımsız değişkenlerin önemini yorumlanması için uygulanabilecek yöntemlerin eksikliği dikkat çekmektedir [25]. Bir ağı öğrenme sırasında kazandığı bilgi, sayısal bağlantı (sinaptik) ağırlıkları ve bias değerlerinde örtülü olarak kodlanmaktadır. Çok tabakalı ve çok sayıda nöron ve bağlantıya sahip büyük ağlarda, ağırlık için çok sayıda sayısal değer ortaya çıkmakta ve çözüm süreci için anlamlı bir açıklama yapmak ve yorumlamak son derece zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, bağımsız değişkenlerinin göreceli önemi, Olden vd. [25] tarafından önerilen bağlantı ağırlıkları algoritması yöntemi ile bulunmuştur.

Önerilen yöntemde, girdi katmanı ile gizli katmanda ve gizli katmanla çıktı katmanı arasında oluşan bağlantı ağırlıklarının her bir girdi nöronu için çarpımlarının toplamları alınarak bir önem derecesi belirlenmektedir. Yöntem gereği, tüm bağımsız değişkenler için bulunan bu önem derecelerinin toplamları içerisindeki oransal değerinin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösterdiği varsayılmaktadır. Bahsi geçen matematiksel işlem eşitlik (8)'de özetlenmiştir.

$$\text{ÖD}_x = \sum_{y=1}^m w_{xy} w_{yz} \quad (8)$$

Burada, ÖD, her bir x bağımsız değişkeninin önem derecesini, y gizli tabakadaki nöronları ve z bağımlı değişkeni ifade etmektedir. Ayrıca, w tabakalar arasındaki bağlantı ağırlıklarını ifade ederken m gizli tabakadaki toplam nöron sayısını göstermektedir.

Değerlendirmeler sonucunda üstyapı bozulmalarının IRI üzerindeki oransal ağırlıkları Şekil 11 ve Tablo 10'da görülmektedir. Tablo 10 incelendiğinde göreceli olarak 13D, 6D ve 130 bozulmalarının diğer bozulmalardan daha büyük olduğu diğer bir deyişle bu bozulmaların IRI üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Öte yandan, yüksek şiddetteki bozulmaların IRI oluşumu üzerinde daha etkili olması beklenirken sonuçlar incelendiğinde etki derecelerinin zayıf olduğu görülmektedir. Bu durum ancak, saha incelemeleri ile toplanan üstyapı bozulma verilerinde yüksek bozulma şiddetindeki veri sayısının sonucu etkileyebilecek kadar çok olmamasıyla açıklanabilmektedir.

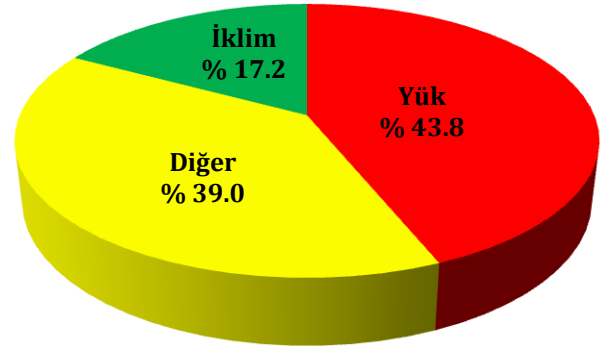


Şekil 11. Üstyapı bozulmalarının IRI üzerindeki etkileri

Tablo 10. Üstyapı bozulmalarının IRI üzerindeki etkileri

13D	% 7.22	6Y	% 4.67	11Y	% 2.89	50	% 1.26
6D	% 7.13	5D	% 4.58	200	% 2.76	160	% 1.05
130	% 6.93	15Y	% 4.33	15D	% 2.65	20	% 0.91
1Y	% 5.96	190	% 4.20	10Y	% 2.39	70	% 0.39
16D	% 5.36	150	% 3.64	100	% 1.96	19Y	% 0.36
11D	% 4.93	30	% 3.46	3Y	% 1.58	10D	% 0.25
10	% 4.82	110	% 3.13	2Y	% 1.56	3D	% 0.21
1D	% 4.74	7D	% 3.11	60	% 1.40	2D	% 0.18

PAVER sistemine göre bozulmalar oluşma nedenlerine (mekanizmalarına) göre yük, iklim ve diğer olmak üzere 3 farklı kategoride değerlendirilmektedir. Çalışmada değerlendirilen bozulmalar Tablo 10'da oluşma mekanizmalarına göre farklı renklerle ifade edilmiştir. Tabloda kırmızı renk yük kaynaklı bozulmaları, yeşil renk iklim kaynaklı bozulmaları ve sarı renk diğer sebeplerden kaynaklanan bozulmaları göstermektedir. Çalışmada, bozulma mekanizmalarının IRI üzerindeki etkilerini anlamak için her bir bozulma türünün oranı kendi içerisinde toplanarak, veriler üç kategoride birleştirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre yükten kaynaklı bozulmaların IRI oluşumu üzerindeki etkisinin %43.8, diğer sebeplerden kaynaklanan bozulmaların etkisinin %39.0 ve iklimden kaynaklı bozulmaların etkisinin %17.2 olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar grafik olarak Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 12. Oluşma mekanizmalarına göre üstyapı bozulmalarının IRI üzerindeki etkileri

### 3.4. Modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılması

Üstyapı bozulmaları ile IRI arasında çalışmada kullanılan modelleme yöntemlerini daha objektif değerlendirebilmek için, oluşturulan tüm modellerin ortalama mutlak hata (OMH), kök ortalama karesel hata (KOKH) ve ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) gibi geleneksel istatistik karşılaştırma yöntemleri kullanılmıştır. Bu istatistik karşılaştırma yöntemlerinin matematiksel gösterimleri (9), (10) ve (11) nolu eşitliklerde görülmektedir.

$$\text{OMH} = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \tilde{Y}_i|}{n} \quad (9)$$

$$\text{KOKH} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \tilde{Y}_i|^2} \quad (10)$$

$$\text{OMGH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \tilde{Y}_i|}{Y_i} \quad (11)$$

Burada  $Y_i$  ölçülen IRI değerini  $\tilde{Y}_i$  ise model aracılığıyla tahmin edilen IRI değerini göstermektedir. Oluşturulan modellerin istatistiksel olarak

performanslarının karşılaştırması Tablo 11’de görülmektedir.

**Tablo 11.** Modellerin performans karşılaştırması

Model	OMH	KOKH	OMGH	R <sup>2</sup>
Regresyon	0.369	0.509	% 21.3	0.683
MARS	0.325	0.447	% 19.1	0.756
YSA	0.302	0.423	% 18.3	0.786

Her üç model için doğruluk tahmininin mutlak ve göreceli ölçütleri Tablo 11’de gösterilmektedir. YSA modeli için OMH 0.307 olarak bulunmuştur. Bu değer doğrusal regresyon modeli ile elde edilenden % 18 daha az ve MARS modeli ile elde edilenden yaklaşık % 7 daha az olduğu görülmektedir. YSA modelinde OMGH değeri diğer modelleri göre % 18.3 ile en düşük değerdedir. Ayrıca, modelin tahmin gücünün bir göstergesi olduğu kabul edilen R<sup>2</sup> değerinin MARS modeline göre az farkla da olsa en büyük YSA modelinde olduğu görülmektedir. Bu ölçütlerin modellerin tahmin doğruluklarının bir göstergesi olduğunu göz önüne alırsak, YSA modelinin verilen üstyapı bozulma verileri için yol düzgünlüğünü diğer modellere nazaran kısmen daha iyi tahmin edebildiği sonucuna varılmaktadır. Öte yandan, MARS tekniği ve YSA tekniği kullanılarak oluşturulan modellerin tahmin doğrulukları arasındaki fark oldukça küçüktür. Bununla birlikte, MARS tekniğinin yapısı gereği aşırı değerlere sahip girdilere anlamsız sonuçların (tahmin) üretilmemesi, eğitim sırasında kendisini aşırı uyuma karşı koruyabilmesi, herhangi bir platformda kullanılacak matematiksel bir eşitlik verebilmesi gibi güçlü yönleri bulunması sebebiyle oldukça etkili bir modelleme tekniği olduğu açıkça görülmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Ülkemizdeki on adet farklı devlet yolunda BSK kaplamalı üstyapı kesimlerinde toplanan üstyapı bozulma verileri ve düzgünlük verileri, bu çalışmada IRI ile 32 adet üstyapı bozulma türü ve şiddeti arasında modeller geliştirmek için kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında çok sayıda bağımsız değişkenle bağımlı değişken tahmini yapabilmek için sıklıkla tercih edilen doğrusal regresyon, MARS ve YSA yaklaşımları tercih edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modellerin tahmin yetenekleri ortalama mutlak hata (OMH), kök ortalama karesel hata (KOKH), ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) ve regresyon katsayısı (R<sup>2</sup>) istatistiksel karşılaştırma yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiş ve tahmin yeteneği en yüksek olan modelin YSA yaklaşımı kullanılarak oluşturulan model olduğu tespit edilmiştir.

Regresyon ve MARS yaklaşımları ile oluşturulan matematik modellerin katsayıları incelendiğinde göreceli olarak 6Y, 13D ve 13O bozulmalarının diğer bozulmalardan daha büyük olduğu diğer bir deyişle bu bozulmaların IRI üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir. Tam olarak karşılığı olmasa da

benzerlik taşıması için YSA yaklaşımında bağımsız değişkenlerin (girdi) bağımlı değişken (çıktı) üzerindeki etkilerini bağlantı ağırlıklarına göre değerlendiren yöntem kullanılarak IRI üzerinde göreceli olarak 13D, 6D ve 13O bozulmalarının diğer bozulmalardan daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlendirme, üstyapı bozulmalarının oluşma mekanizmalarına göre incelendiğinde IRI üzerinde %43.8 yük kaynaklı, %39 diğer sebepler kaynaklı ve %17.2 iklim kaynaklı bozulmaların etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Üstyapı bozulma parametrelerinin modellenmesi, işletilen üstyapı yönetim sistemlerinin verimini arttıracağı ve üstyapı onarım çalışmalarında karar vericilere yardımcı olacağı bilinen bir gerçektir. Çalışmanın ileriki aşamalarında, onarım çalışmalarından sonra IRI ölçümü yapılarak kullanılan modellerin tahmin doğruluklarının hassasiyetinin tespit edebileceği öngörülmektedir.

#### 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.

#### Kaynakça

- [1] AASHTO. 1993. Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C, 624s.
- [2] Hozayen, H.A., Alrukaibi, F. 2009. Development of Acceptance Measures for Long Term Performance of BOT Highway Projects. ss 335-48. Masad, E., Alnuaimi, N.A., Sayed, T. and Al-Qadi, I.L. ed. 2009. Efficient Transportation and Pavement Systems: Characterization, Mechanisms, Simulation, and Modeling, Taylor&Francis Group, London, 912s.
- [3] Al-Omari, B., Darter, M.I. 1995. Effect Of Pavement Deterioration Types on IRI and Rehabilitation. Transportation Research Record, 1505(1995), 57-65.
- [4] Aguiar-Moya, J.P., Prozzi, J.A., de Fortier Smit, A. 2011. Mechanistic-Empirical IRI Model Accounting for Potential Bias. Journal of Transportation Engineering, 137(5), 297-304.
- [5] Mactutis, J., Alavi, S., Ott, W. 2000. Investigation of Relationship Between Roughness and Pavement Surface Distress Based on Westrack Project. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1699(2000), 107-113.

- [6] Sandra, A.K., Sarkar, A.K. 2013. Development of a Model for Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(8), 715-724.
- [7] Attoh-Okine, N.O., 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.
- [8] Lin, J.D., Yau, J.T., Hsiao, L.H. 2003. Correlation Analysis between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Network. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 12-16 January, Washington, D.C., 1-21.
- [9] Chandra, S., Sekhar, C.R., Bharti, A.K., Kangadurai, B. 2013. Relationship Between Pavement Roughness and Distress Parameters for Indian Highways. *Journal of Transportation Engineering*, 139(5), 467-475.
- [10] Pan, N.F., Ko, C.H., Yang, M.D., Hsu, K.C. 2011. Pavement Performance Prediction Through Fuzzy Regression. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 10010-10017.
- [11] Moazami, D., Behbahani, H., Muniandy, R. 2011. Pavement Rehabilitation and Maintenance Prioritization of Urban Roads Using Fuzzy Logic. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12869-12879.
- [12] Karaşahin, M., Terzi, S. 2014. Performance Model For Asphalt Concrete Pavement Based on the Fuzzy Logic Approach. *Transport*, 29(1), 18-27.
- [13] Yang, J., Lu, J., Gunaratne, M., Xiang, Q. 2003. Overall Pavement Condition Forecasting Using Neural Networks—An Application to Florida Highway Network. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 12-16 January, Washington, D.C., 1-28.
- [14] Attoh-Okine, N.O. 1999. Analysis of Learning Rate and Momentum Term in Back-Propagation Neural Network Algorithm Trained to Predict Pavement Performance. *Advances in Engineering Software*, 30(4), 291-302.
- [15] Terzi, S. 2007. Modeling the Pavement Serviceability Ratio of Flexible Highway Pavements by Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*, 21(3), 590-593.
- [16] Choi, J.H., Adams, T.M., Bahia, H.U. 2004. Pavement Roughness Modeling Using Back-Propagation Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19(4), 295-303.
- [17] Terzi, S. 2013. Modeling for Pavement Roughness Using the ANFIS Approach. *Advances in Engineering Software*, 57(2013), 59-64.
- [18] ASTM. 2009. ASTM E 950: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. . ASTM International. West Conshohocken, PA, 6s.
- [19] ASTM. 2011. ASTM D 6433-11: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International. West Conshohocken, PA, 49s.
- [20] Friedman, J.H. 1991. Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1-67.
- [21] Weber, G.W., Batmaz, İ., Köksal, G., Taylan, P., Yerlikaya-Özkurt, F. 2012. CMARS: A New Contribution to Nonparametric Regression with Multivariate Adaptive Regression Splines Supported by Continuous Optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 20(3), 371-400.
- [22] Attoh-Okine, N.O., Cooger, K., Mensah, S. 2009. Multivariate Adaptive Regression (MARS) and Hinged Hyperplanes (HHP) for Doweled Pavement Performance Modeling. *Construction and Building Materials*, 23(9), 3020-3023.
- [23] Kecman, V., 2001. *Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models*. MIT Press, Massachusetts, USA, 541s.
- [24] Kok, B.V., Yılmaz, M., Şengöz, B., Şengur, A., Avcı, E. 2010. Investigation of Complex Modulus of Base and SBS Modified Bitumen with Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7775-7778.
- [25] Olden, J.D., Joy, M.K., Death, R.G. 2004. An Accurate Comparison of Methods for Quantifying Variable Importance in Artificial Neural Networks Using Simulated Data. *Ecological Modelling*, 178(3-4), 389-397.