Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
6(2), 301 – 309, 2018
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.416037

Araştırma Makalesi Research Article

KONFORLU SÜRÜŞ İÇİN ULUSLARARASI DÜZGÜNSÜZLÜK İNDEKSİ SINIR DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Ufuk KIRBAŞ*

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Mühendisliği Böl., Ulaştırma A.D., Samsun, Türkiye

Anahtar Kelimeler

IRI,
Sürüş Konforu,
Asfalt Üstyapı.

Öz

Karayolu üstyapıları, sürüş sırasında yol kullanıcılarına konforu ve güvenliği sağlayan önemli bir bileşendir. Bu nedenle, karayolu işletiminden sorumlu otoritelerce, üstyapıların hizmet düzeylerinin iyi durumda olması oldukça önemsenmektedir. Çalışmada, bitümlü sıcak karışım kaplamalı devlet yollarında, otomobiller için üstyapıların mevcut hizmet düzeyi ile sürüş konforu arasındaki ilişkilerin araştırılması ve ISO 2631 standardında açıklanan konfor kriterlerine göre IRI'nın sınır değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, şehirlerarası bağlantı sağlayan yaklaşık 80 km uzunluğunda bir devlet yolunda IRI ölçümleri yapılmış ve yol kesimlere ayrılarak değerlendirilmiştir. Aynı yol kesimlerinde, farklı sürüş hızlarında taşıt içerisinde sürücü koltuğu üzerinden düşey doğrultuda titreşim verileri ölçülmüştür. Ölçümler ISO 2631 kodlu standarda göre değerlendirilerek a_{wz} (düşey doğrultuda frekans ağırlıklandırılmış karesel ortalama) değerleri bulunmuştur. Değerlendirilen yol kesimine ait ortalama sürüş hızı ve a_{wz} verileri ile IRI arasında yapay sinir ağı tekniği kullanılarak matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model aracılığıyla ISO standardında belirtilen konfor seviyelerine bağlı olarak farklı sürüş hızları için IRI'nın sınır değerleri belirlenmiştir. Analizler sonucunda, konforlu bir sürüş için hız arttıkça IRI sınır değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

DETERMINATION OF INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX LIMIT VALUES FOR COMFORTABLE RIDING

Keywords

IRI,
Ride Comfort,
Asphalt Concrete Pavement.

Abstract

Highway pavements are an important component that provides comfort and safety for road users while riding. Therefore, by the authorities responsible for road operation, it is quite important that the level of service of the pavements is in good condition. In the study, it was aimed to investigate the relationship between the existing serviceability level of the pavements and the ride comfort for passenger cars, and to determine the limit values of IRI according to the comfort criteria described in the ISO 2631 standard. For this purpose, IRI measurements were made on a state road about 80 km long providing intercity connections and the road was divided into sections evaluated. In the same road sections, vibration data were measured in the vertical direction over the driver's seat in the vehicle at different ride speeds. The measurements were evaluated according to the ISO 2631 coded standard and the a_{wz} (frequency weighted root mean square in vertical direction) values were found. A mathematical model was developed using the artificial neural network method between the average ride speed and a_{wz} data of the assessed road sections, and the IRI data. By means of the developed model, the limits of IRI have been determined for different ride speeds depending on the comfort levels specified in the ISO standard. As a result of the analyses, it was determined that as the ride speed increases for comfortable riding, the IRI limit values decrease.

Alıntı / Cite

Kırbaş, U., (2018). Konforlu Sürüş İçin Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi Sınır Değerlerinin Belirlenmesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 301-309.

* İlgili yazar / Corresponding author: ufukkirbas@gmail.com, ufuk.kirbas@omu.edu.tr, +90-362-319-1919 / 1056

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
Ufuk Kırbaş, 0000-0002-2389-425X

Başvuru Tarihi /Submission Date	17.04.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	28.04.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	18.05.2018
Yayım Tarihi / Published Date	23.06.2018

1. Giriş

1950'li yıllardan beridir araştırmacılar, üstyapıların mevcut hizmet düzeyini belirleme konusunda yoğun bir uğraş içerisindedir (Haas vd., 1994). Bu konuda ilk olarak en az üç adet değerlendirme uzmanının izafi değerlendirmesini öngören panel değerlendirme tekniği kullanılmıştır. Fakat, değerlendiren kişi her ne kadar konusunda uzman olsa da insan değerlendirmesi sırasında daima objektif sonuçların elde edilememesinden dolayı sonraki süreçte mekanik ölçme ve değerlendirme teknikleri geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda, Chloe profilometresinin ölçüm sırasındaki eğiminin varyansı, değerlendirilen kesimin çatlak alanı, yama alanı, tekerlek izi derinliği ve çukur alanını kullanan ampirik bir formül üretilmiştir. Sonraki yıllarda hizmet yeteneğinin üstyapı düzgünsüzlüğünün bir fonksiyonu olduğu düşünülmüştür. Bu süreçte, yolların mevcut performans seviyelerini objektif olarak değerlendirebilmek amacıyla üstyapıların düzgünsüzlüğü ile ilişkili olarak üstyapı servis yeteneği indeksi (PSI), sürüş sayısı (RN), sürüş konforu indeksi (RCI) gibi çeşitli değerlendirme bileşenleri geliştirilmiştir (Haas vd., 1994). Sonrasında, düzgünsüzlük ölçen aletlere ilaveten üstyapı bozulmalarını fotoğraf tekniğiyle toplayan ve görüntü işleme algoritmalarıyla değerlendiren sistemler geliştirilmiş ve tüm bu işlemlerin tamamını yapabilecek şekilde birleşik bir yapı haline dönüştürülmüştür (Shahin, 2005).

Üstyapıların mevcut performanslarını değerlendirme kriterlerinin geliştirildiği bu dönemde, üstyapı düzgünsüzlüğü ile ilişkili olarak çok sayıda indeks ortaya çıkmıştır. Değerlendirme kriterlerinin net olarak ortaya konulamaması, otoritelerce edinilen bilgi paylaşımlarının sağlanamaması gibi nedenlerle üstyapı düzgünsüzlüğünün tüm dünyada standart haline getirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu anlayış sonucunda Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI) değerlendirme bileşeni geliştirilmiştir.

IRI, tüm dünyada geçerli objektif bir düzgünsüzlük ölçütü olarak Dünya Bankası tarafından 1986 yılında oluşturulmuştur (Sayers vd., 1986). Teknik altyapısı NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) için yapılan önceki çalışmalara dayanarak kurulmuştur. IRI'nın, bir motorlu taşıtın üstyapı yüzeyinin pürüzlülüğüne verdiği tepkiyi ifade eden bir düzgünsüzlük ölçütü olduğu varsayılmıştır (Sayers ve Karamihas, 1998). Değeri, standart bir taşıtın yol yüzeyindeki düzgünsüzlüklere karşı verdiği tepki ile oluşan süspansiyon hareketinin toplamının (mm, inç vb.) filtrelenmiş oranının ölçüm sırasında taşıtın kat ettiği yol miktarına (km, mil vb.) oranlanmasıyla belirlenmektedir. Taşıtın süspansiyonunun tepki özellikleri, çeyrek taşıt benzetim modeli olarak bilinen bir dinamik model yardımıyla hesaplanmaktadır (Sayers vd., 1986).

AASHTO yol testi (1956-1960) ile başlayan çalışmalar sürüş konforu ile üstyapı hizmet düzeyi arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir (Carey ve Irick, 1960). Genel olarak, düzgünsüzlük terimi, konforsuz sürüşe neden olacak şekilde üstyapı yüzeyinin bozukluğunu göstermektedir. Çalışmalarda, düşey doğrultudaki titreşimlerin sürücü ve yolcuların konforunun değerlendirilmesinde en etkili faktör olduğu görülmektedir (Wang ve Easa, 2016, Cantisani ve Loprencipe, 2010, Sayers ve Karamihas, 1996). Özellikle düşey eksen doğrultusunda oluşan titreşimlerin iki ana sebebinin taşıtın mekanik yapısı ve taşıtın seyahat ettiği yolda görülen yüzey bozulmaları olduğu kabul edilmektedir (Wang ve Easa, 2016, Cantisani ve Loprencipe, 2010, Sayers ve Karamihas, 1996). Yapılan birçok çalışmada, sürüş konforunun, düşey doğrultuda ölçülen titreşim değerinin ağırlıklandırılmış frekans analizi ile bulunan karesel ortalamalı kökü (a_{wz}) ile değerlendirildiği görülmektedir (Wang ve Easa, 2016, Cantisani ve Loprencipe, 2010).

Literatürde üstyapıların hizmet düzeylerinin sürüş konforu üzerindeki etkilerini inceleyen oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır. Sürüş konforu genellikle Tüm Vücut Titreşimi (whole body vibration, WBV) değerlendirme yöntemlerinin anlatıldığı ISO 2631 ve BS 6841 kodlu uluslararası standartlar yardımıyla açıklanmaktadır (Griffin, 2012, Griffin, 2007). Cantisani ve Loprencipe (2010) çalışmalarında IRI ile a_{wz} arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Belirlenen bir yol kesiminde 80 km/h hızla IRI ve titreşim ölçümleri yapılmış ve sonuçlar bir tüm taşıt modelinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Geliştirilen bu model yardımıyla, farklı hız ve IRI değerlerine göre taşıt içerisinde oluşan titreşim değerleri tahmin edilmiş ve ISO 2631 standardında belirtilen konfor değerlendirme kriterlerine göre IRI'nın konfor sınır (eşik) değerleri belirlenmiştir. Wang ve Easa (2016), 89 adet karayolu kesiminde yüzey düzgünsüzlüğü, sürüş hızı, titreşim, sürtünme direnimi, sürücülerin verdiği psikolojik ve fizyolojik tepkiler ile üstyapıların

mevcut performansı arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Çalışmada, çok sayıda parametre arasındaki ilişkiler modellenmekle birlikte farklı yüzey sürtünme direnimine sahip üstyapılarda ISO 2631 standardında belirtilen konfor değerlendirmesine göre IRI'nın sınır değerleri belirlenmiştir. Abudinen vd. (2017) 102 farklı beton kaplamalı şehiriçi yol kesiminde IRI değerlerini ve 30 – 100 km/sa aralığında farklı sürüş hızlarında oluşan düşey doğrultudaki a_w (a_{wz}) değerlerini ölçmüşlerdir. Araştırmacılar, veriler arasında her bir sürüş hızı için ayrı regresyon eşitlikleri oluşturarak ISO 2631 standardında belirtilen konfor şartlarına göre IRI için sınır değerler belirlemişlerdir. Belirlenen sınır değerlerin (özellikle düşük hızlarda) Cantisani ve Loprencipe tarafından önerilen sınır değerlerden daha az olduğu dikkat çekmektedir. Kırbaş ve Karaşahin (2016) şehiriçi yollarda IRI'ya nazaran daha fazla tercih edilen Üstyapı Durum İndeksi (PCI) için ISO 2631 standardında belirtilen konfor şartlarına göre sınır değerler önermişlerdir. Çalışmada, bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı üstyapılarda 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda titreşim değerleri ölçülmüş ve her bir sürüş hızı için PCI ile a_{wz} arasındaki ilişkiler modellenmiştir. Modeller yardımıyla sürüş konforunu etkileyen PCI sınır değerleri tespit edilmiştir.

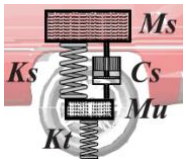
Ayrıca literatürde, insanın titreşime olan duyarlılığını sayısal değerlerle ifade etmeye çalışan çalışmalar bulunmaktadır. Duarte ve Melo (2018) çalışmalarında BSK ve taş kaplamalı yol üstyapılarının WBV açısından karşılaştırmasını yapmışlardır. Kim vd. (2011) aynı geometriye sahip BSK, parke taş (2 farklı çeşit), taş kaplamalı, ondülasyonlu olmak üzere beş farklı üstyapı kesiminde titreşim değerlendirmesi yapmışlardır. Ahlin ve Granlund (2002), IRI performans indeksi kullanan yönetim sistemlerinde kullanılmak üzere temel taşıt sürüş benzetimi için yol düzgünsüzlüğü, taşıt hızları ve düşey doğrultudaki WBV arasında bir ilişki kurmuşlardır. Literatürde, son yıllarda gelişen akıllı telefon teknolojisi ile yapılan titreşim ölçümleri ile pürüzlülük tahmini yapabilen çalışmalar da bulunmaktadır (Aydın vd., 2017).

Yapılan çalışmalarda, standart bir otomobil için aliyman yol kesiminde sürüş konforunu etkileyen iki temel bileşenin, üstyapının hizmet düzeyi ve sürüş hızı olduğu kabul edilmektedir (Abudinen vd., 2017, Wang ve Easa, 2016, Cantisani ve Loprencipe, 2010, Kırbaş ve Karaşahin, 2016). Çalışmada, yaklaşık 80 km uzunluğundaki devlet yolunda gidiş ve dönüş olmak üzere yolun sağ şeritlerinde profilometre cihazı ile IRI değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, aynı yol kesimlerinde standart bir otomobil ile farklı sürüş hızlarında sürücü koltuğu üzerinden düşey doğrultuda titreşim ölçümleri yapılmıştır. Titreşim ölçümleri ISO 2631 standardında belirlenen değerlendirme yöntemine göre analiz edilerek a_{wz} değerleri elde edilmiştir. Ölçülen tüm trafik şeritleri 1114 adet kesime ayrılarak değerlendirilen IRI, sürüş hızı ve a_{wz} değerleri arasındaki ilişkiler yapay sinir ağları (YSA) tekniği kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan matematik model aracılığıyla ISO standardının sınır değerleri ve farklı sürüş hızlarına göre IRI'nın sürüş konforunu etkileyen sınır değerleri belirlenmiştir. Çalışmada, literatürde yer alan diğer çalışmaların aksine muhtelif modeller yardımıyla üretilen sentetik veriler yerine gerçek ölçüm verileri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Uluslararası düzgünsüzlük indeksi (IRI)

Bir üstyapı yüzeyinin pürüzlülüğü genel olarak "düzgünsüzlük" olarak adlandırılmakta ve yüzey üzerindeki değerlendirme noktalarının kotlarının ideal bir referans düzleminden uzaklığının değişimi olarak tanımlanmaktadır (Sayers ve Karamihas, 1998). Düzgünsüzlük, taşınabilir eğim ölçerler, tepki tipi yol pürüzlülük ölçüm cihazları veya çeşitli diğer kesit ölçüm cihazları ile farklı yöntemler kullanılarak ölçülebilmektedir. Günümüzde yaygın olarak, uzaktan algılayıcılar (lazer veya ultrasonik sensörler) vasıtasıyla gerçekleştirilen kesit ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, nispeten yüksek hızda hareket eden bir araçtan, yol yüzeyi ile ölçme çubuğu arasındaki mesafe ve çubuğa yerleştirilmiş ivmeölçerler vasıtasıyla bir atalet referans sistemi arasındaki göreli yer değiştirmeler değerlendirilmektedir. Genel olarak, üstyapının düşey kesiti, bir taşıtın her bir tekerlek izine karşılık gelen, şerit başına iki çizgi boyunca ölçülmektedir (Perera ve Kohn, 2005). Üstyapıların düzgünsüzlüğü ve dolayısıyla sürüş konforunu değerlendirmek amacıyla geliştirilen ve uluslararası geçerliliği olan IRI, Dünya Bankası tarafından 1986 yılında oluşturulmuştur (Terzi, 2013). IRI değeri, üstyapının kesitinin uygun bir şekilde ölçülmesi, ardından bir referans taşıtın süspansiyonun yer değiştirmelerinin toplamını benzeten bir algoritma vasıtasıyla düzgünsüzlük girdilerinin işlenmesiyle belirlenmektedir (Sayers, 1995). Referans taşıtın süspansiyonunun tepki özellikleri, beş sabit ile karakterize edilen çeyrek taşıt modeli olarak bilinen basit bir dinamik model kullanılarak benzetilmektedir. Bu sabitlerden Cs süspansiyon sönümleme oranını, Ks süspansiyon yay oranını, Kt tekerlek yay oranını, Ms yaylanan kütleyi ve Mu yaylanmayan kütleyi ifade etmektedir. Şekil 1'de çeyrek taşıt modelinin grafik gösterimini ve model sabitleri görülmektedir.



V	= 80	km/sa
Cs/Ms	= 6	1/s
Ks/Ms	= 63.3	$1/s^2$
Kt/Ms	= 653	$1/s^2$
Mu/Ms	= 0.15	-

Şekil 1. Çeyrek taşıt modeli grafik gösterimi ve sabitleri

IRI hesabından oldukça yaygın olarak kullanılan çeyrek taşıt modelinde süspansiyonların dinamik özellikleri standart tarafından belirlenmiştir. Bu nedenle, gerçek bir taşıtın süspansiyon tepkileri ile ilişkilendirilmesi doğru sonuçlar vermemektedir. Bir

eğim birimiyle ifade edilen IRI'yı hesaplamak için kullanılan kesitin ölçüm prensipleri ASTM E950 (2009) standardında açıklanmaktadır. Ayrıca, IRI değerinin hesaplaması, ASTM E1926-98 (2008) standardında önerilen basitleştirilmiş bir algoritma yardımıyla yapılabilmektedir.

Çalışmada IRI ölçümleri, Karayolları Genel Müdürlüğüne ait Dynatest marka Mark-III tipi lazer ölçüm sistemli profilometre cihazı ile yapılmıştır. Ölçümlerin değerlendirilmesinde PROVAL paket yazılımı kullanılmıştır.

2.2. WBV ve titreşim değerlendirmesi

ISO 2631 (1997) standardının birinci bölümünde, titreşimlerin insan konforu üzerindeki etkilerinin nasıl belirleneceği açıklanmaktadır. Standartta konfor, sayısal olarak, ölçülen titreşim değerinin ağırlıklandırılmış frekans analizi ile bulunan karesel ortalamalı kökü (a_w) yardımıyla gösterilmektedir. Bu değerlendirme düşey doğrultudaki titreşimler için yapıldığında a_{wz} bileşeni ile ifade edilmektedir. a_{wz} bileşeninin hesabında, öncelikle, zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülen butterworth filtreleme tekniği kullanılarak filtrelenmiş düşey ivmelenme değerleri, üçte birlik oktav band aralıklarına karşılık gelen güç spektral yoğunlukları aracılığıyla hesaplanmaktadır. Sonrasında, bu ivme değerleri kendisine ait olan her bir band aralığına karşılık gelen ağırlık faktörü (w_k) ile çarpılmaktadır. Son olarak, filtrelenen her bir band aralığı için bulunan bu çarpımların karelerinin toplamının karekökü alınarak a_{wz} bileşeni hesaplanmaktadır (Griffin, 2007, Griffin, 2012). Söz konusu hesap matematiksel olarak (1) nolu formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

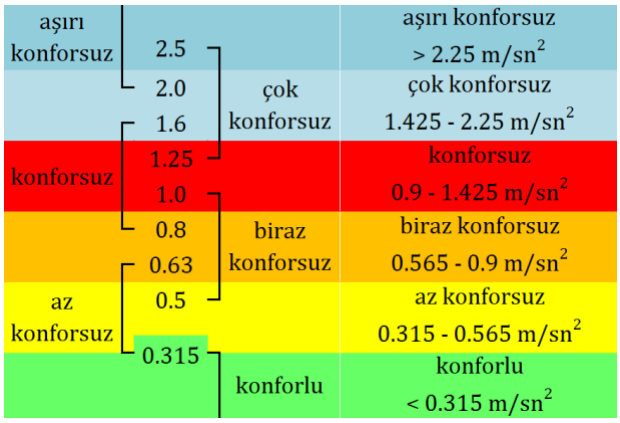
$$a_{wz} = \left[\sum_i \left(w_{k,i}\, a_{i,z}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

ISO 2631-1 (1997) standardında, a_w bileşeninin, insan vücuduna aktarılan titreşimin ortalamasının sayısal bir değerle açıklanmasında en uygun parametre olduğu kabul edilmektedir. Standartta, insan vücudunun hissettiği titreşim miktarının değerlendirilmesi için Tablo 1'de verilen aralıkların kullanılması tavsiye edilmektedir.

Tablo 1. a_{wz} değerlendirmesinde önerilen sınır değerleri

a_{wz}	Konfor Seviyeleri
< 0.315 m/s²	konforlu
0.315 – 0.63 m/s²	az konforsuz
0.5 – 1 m/s²	biraz konforsuz
0.8 – 1.6 m/s²	konforsuz
1.25 – 2.5 m/s²	çok konforsuz
> 2 m/s²	aşırı konforsuz

Çalışmada, ISO standardında belirtilen tanımlamalara uyarak tüm vücut titreşimini değerlendirebilmek için, bir ivmeölçerin yolcu ile olan etkileşimini sağlamak amacıyla sürücünün tam altına yerleştirilmiştir. Ayrıca, ivmeölçerin anlık titreşimlere karşı hassasiyetini arttırabilmek amacıyla elastik bir yatak içerisinde konumlandırılmıştır (ISO, 2005). Ölçülen titreşim değerleri MATLAB ara yüzünde geliştirilen ve ISO 2631 standardında açıklanan analiz yöntemini kullanan yazılım yardımıyla değerlendirilmiştir. Standartta, a_{wz} sonuçlarının değerlendirilmesinde, tavsiye edilen sınır değerler (Tablo 1) incelendiğinde konforsuzluk düzeylerinde kesinliğin bulunmadığı dikkat çekmektedir. Çalışmada deterministik bir çözümleme öngörüldüğünden dolayı, elde edilen sonuç değerlerinin yorumlanmasında bulanık olan bu sınırların aritmetik ortalaması alınarak bulunan değerler konforsuzluk sınır değerleri olarak kabul edilmiştir. Yapılan bu kabul Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Sonuçların değerlendirilmesinde yapılan kabul ve kullanılan sınır değerler

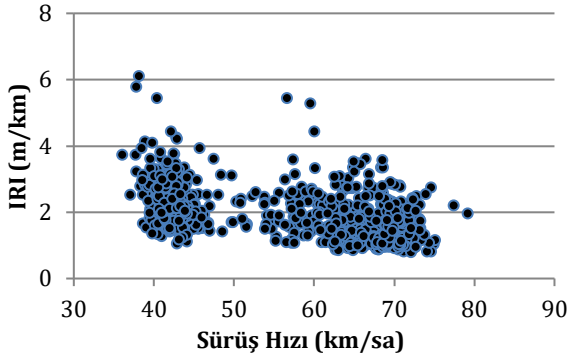
2.3. Değerlendirme verileri

Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 7. Bölge Müdürlüğü sınırlarında yer alan Samsun il merkezi – Havza ilçesi arasında bulunan yaklaşık 80 km uzunluğundaki 795-01 ve 795-02 kontrol kesim numaralı BSK kaplamalı devlet yolunda gidiş ve dönüş olmak üzere yolun sağ şeritlerinde IRI ve düşey doğrultuda titreşim ölçümleri yapılmıştır. Değerlendirmede kullanılan yol ağı Şekil 3'de kırmızı çizgi ile görülmektedir.

Şekil 3. Değerlendirmede kullanılan yol ağı

IRI ölçümü, önceki bölümlerde açıklanan profilometre cihazıyla 70 km/sa sürüş hızında gidiş ve dönüş olmak üzere yolun sağ şeritlerinde yapılmıştır. Düşey doğrultudaki titreşim ölçümleri aynı yol şeritlerinde euro car bölüm değerlendirmesine göre 4100-4600 mm uzunluk aralığında alt orta sınıf C sınıfına giren bir

yolcu taşıtı ile yapılmıştır. Ölçüm sırasında taşıt ile ani hızlanma ve yavaşlamalardan kaçınılarak sürüş hızının a_{wz} ve IRI üzerindeki etkisi dengeli tutulmaya çalışılmıştır. Ölçümler aynı yol ağında ve aynı trafik şeritlerinde iki defa tekrarlanmıştır. Titreşim verileri tarafımızca geliştirilen saniyede 1000 adet titreşim verisi (±4g, hassasiyet 500±15 mV/g) ve 1 adet konum verisi (koordinat ve hız) kaydedebilen titreşim ölçüm cihazı ile kaydedilmiştir. Yapılan IRI, titreşim ve hız ölçümleri hem IRI ölçümünde hem de titreşim ölçümünde kaydedilen konum verileri yardımıyla çakıştırılmıştır. Ölçülen yol ağı 250 m uzunluğundaki parçalara ayrılmış, oluşturulan 1114 adet farklı değerlendirme kesimi üzerinden değerlendirmeler tamamlanmıştır. Değerlendirilen kesimin sürüş hızı, 1 sn aralıklarla ölçülen noktasal hızların aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Değerlendirmede kullanılan verilerin dağılımını görsel olarak ifade edebilmek amacıyla kesimlere ait IRI ve sürüş hızı değerlerinin değişimi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Kesimlerin IRI ve sürüş hızı değerlerinin değişimi

3. Bulgular

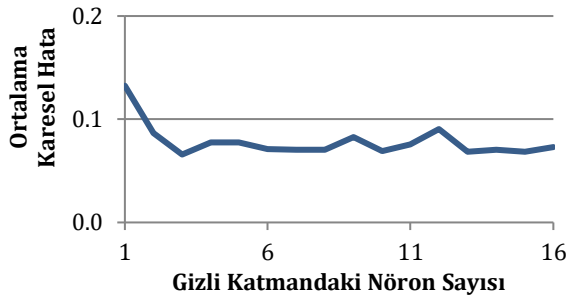
Önceki bölümde anlatıldığı şekilde ölçülen ve analiz edilen IRI, a_{wz} ve sürüş hızı verileri arasında matematiksel ilişkiler araştırılmıştır. Matematiksel ilişkilerin araştırılmasında yapay sinir ağı (YSA) modelleme tekniği kullanılmıştır.

YSA'lar, ya da sadece sinirsel ağlar, girdi verilerine karşılık gelen çıktıları işleyebilen, çok sayıda basit ve birbiriyle bağlantılı elemandan oluşan bilgi işlem sistemleridir (Attoh-Okine, 1999). Bu şekilde çalışan bir modelleme yönteminin sinir ağı olarak tanınmasının sebebi, çalışma prensibinin insan beyninin mimarisine benzerliğinden kaynaklanmaktadır. Yapıları, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem biriminden (nöronlar) oluşmaktadır. Her işlem birimi, transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Çalışması, işlem biriminin, diğer nöronlardan sinyalleri alması, birleştirmesi, dönüştürmesi ve sayısal bir sonuç ortaya çıkarması şeklindedir. Aslında, işlem birimleri kabaca gerçek nöronlara karşılık gelmekte ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanmaktadırlar (Kecman, 2001).

Literatürde, çok sayıda farklı YSA ağ yapısı ve öğrenme yöntemi olduğu görülmektedir. Sabit girdi ve çıktılar arasındaki matematiksel ilişkilerin ortaya çıkarılmasında, çok katmanlı mimariye sahip ileri beslemeli YSA ağlarının en yaygın olarak kullanılan ağ yapısı olduğu bilinmektedir (Attoh-Okine, 1999). Bu tipteki YSA ağlarında, ağın eğitimi için sıklıkla geri yayılmalı öğrenme algoritmasının kullanıldığı dikkat çekmektedir (Terzi, 2007). Girdi(ler) ve çıktı arasındaki ilişkilerin modellenmesi için üretilen veri setleri, eğitme, doğrulama ve test olmak üzere üç farklı aşamada kullanılmak amacıyla parçalara ayrılmaktadır. Eğitim aşamasında ağ, eğitim seti olarak adlandırılan bir dizi örnekten öğrenmek için tümevarım öğrenme ilkesini kullanmaktadır. Eğitim için kullanılan girdi verilerine göre bağlantı ağırlıklarını değiştiren bir öğrenme kuralı yardımıyla tahmini sonuçların gerçek sonuçlara yakınsanması sağlanarak ağın eğitimi tamamlanmaktadır.

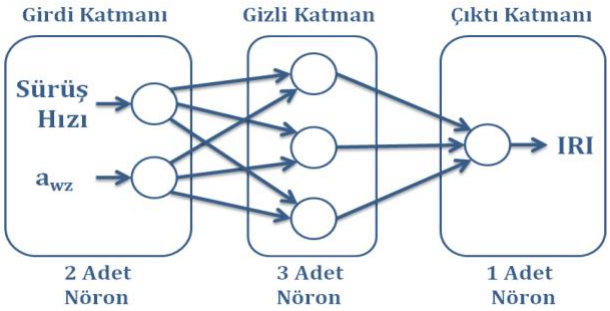
Çalışmada, oluşturulan YSA ağına girdi olarak Sürüş Hızı ve a_{wz} bileşenleri çıktı olarak IRI bileşeni tanımlanmıştır. Girdiler ve çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri matematiksel olarak modelleyebilmek amacıyla değerlendirilen 1114 adet verinin 780 adedi (%70) eğitim, 167 adedi (%15) doğrulama ve 167 adedi (%15) modelin testi için kullanılmıştır. En yüksek tahmin doğruluğunu bulabilmek amacıyla birden çok gizli katman ve her katmada birden çok nöron seçenekleri araştırılarak en uygun sinir ağı mimarisi oluşturulmuştur.

Çalışmada, en iyi sonucu elde edebilmek için, tek ve iki gizli katmanda her katman için 1 ile 16 aralığında nöron sayısı ile çok sayıda ağ oluşturularak optimum nöron sayısı belirlenmiştir. Analizler aşamasında ağın öğrenme algoritması olarak Levenberg-Marquardt geri yayılmalı eğitim kullanılmıştır. Gizli katman ve çıktı katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak logaritmik sigmoid aktarım fonksiyonu kabul edilmiştir. İki gizli katmanlı olarak oluşturulan sinir ağlarında eğitim aşamasında bulunan regresyon değerleri yüksek olsa da diğer aşamalarda (doğrulama ve test) tahmin doğruluğunun düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ISO standardının sınır değerlerine göre tahmin edilen IRI değerleri grafik olarak incelendiğinde tahmin değerlerinin anlamlı bir sonuç göstermediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada ağ tek gizli katmalı olarak tasarlanmıştır. Gizli katmanlardaki nöronların sayısı, ortalama karesel hatayı (OKH) doğrudan etkilemektedir. Çalışmada gizli katmandaki nöron sayısının en ideal rakamı OKH'nın en küçük olduğu ağ mimarisi araştırılarak tespit edilmiştir. OKH değerlerinin değişimi Şekil 5'de görülmektedir.



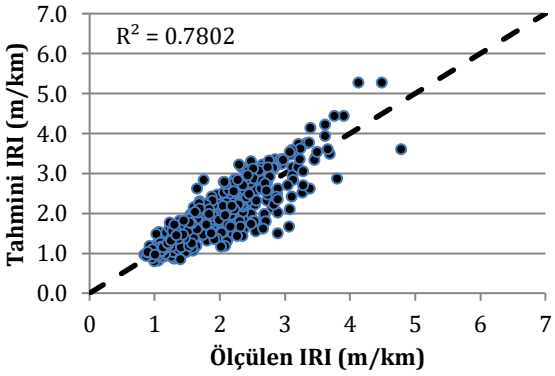
Şekil 5. Gizli katmandaki optimum nöron sayısının tahmini

Değerlendirme sonucunda gizli katmandaki optimum nöron sayısı 3 olarak bulunmuştur. Sürüş hızı ve a_{wz} girdilerine karşın 1 adet girdi katmanı (2 adet nöron), 1 adet gizli katman (3 adet nöron) ve 1 adet çıktı katmanı (1 adet nöron) olarak oluşturulan ağ mimarisinin BSK kaplamalı yollarda IRI tahmininde en optimal topoloji olduğu saptanmıştır. Tahmin doğruluğu en yüksek olacak şekilde optimize edilen ağ, kısaca (2:3:1) şeklinde tanımlanabilmektedir. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan YSA ağının mimarisi Şekil 6'da görülmektedir.

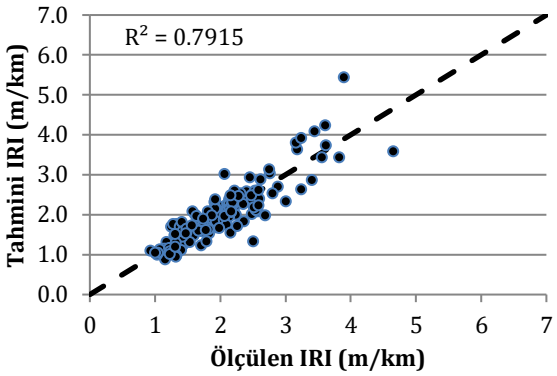


Şekil 6. Oluşturulan YSA ağının mimarisi (2:3:1)

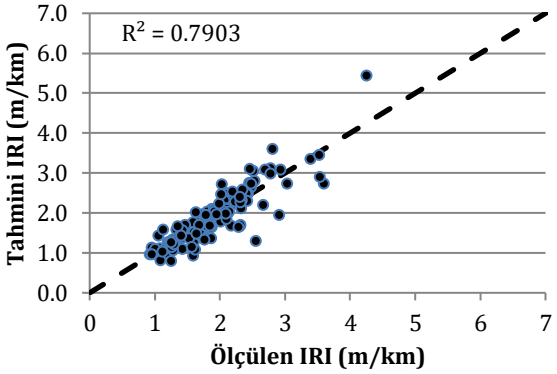
Modelin tahmin performansını gösteren R^2 değerleri eğitim veri seti için 0.7802, doğrulama veri seti için 0.7915, test veri seti için 0.7903 ve tüm girdi verileri için 0.7836 olarak bulunmuştur. Model aracılığıyla tahmin edilen ve arazi çalışmalarında ölçülen IRI değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7, 8 ve 9'da görülmektedir. Ayrıca, tüm verilerin karşılaştırılması Şekil 10'da görülmektedir.



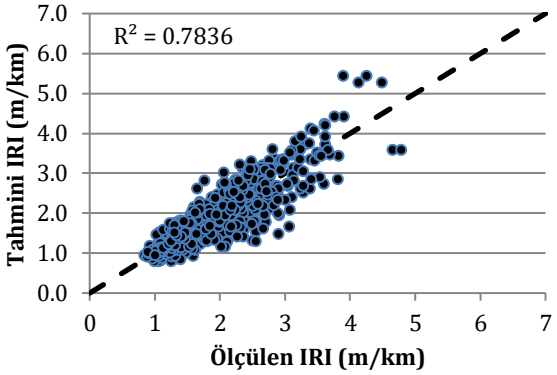
Şekil 7. Eğitim aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 8. Doğrulama aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 9. Test aşaması tahmin doğruluğu



Şekil 10. Tüm veriler için YSA modeli tahmin doğruluğu

Çalışmada konfor, düşey doğrultuda ölçülen titreşim verilerinin analizi sonucunda bulunan a_{wz} bileşeniyle ifade edilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde farklı sürüş hızlarında ve konfor seviyelerinde IRI'yı tahmin edebilen modelin uyum iyiliği diğer bir deyişle tahmin yeteneğinin % 70 oranının üzerinde olduğu anlaşılmaktadır.

Geliştirilen bu model aracılığıyla farklı sürüş hızlarında ve ISO 2631 standardında belirtilen konfor kıstaslarında IRI'nın sınır değerleri belirlenmiştir. Titreşim bileşenlerinin (a_{wz}) konforun ifadesi olarak yorumlanmasında bölüm 2.2'de açıklanan kabuller dikkate alınmıştır. Değerlendirmeler sonucunda bulunan IRI sınır değerleri Tablo 2'de görülmektedir. Çalışmada, saha ölçümlerinden elde edilen ve konforsuzluğu ifade eden titreşim değerlerinden "konforsuz" üzeri (çok konforsuz, aşırı konforsuz) değerlendirme kategorisine giren ölçüm verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle, konforsuz ve üzeri

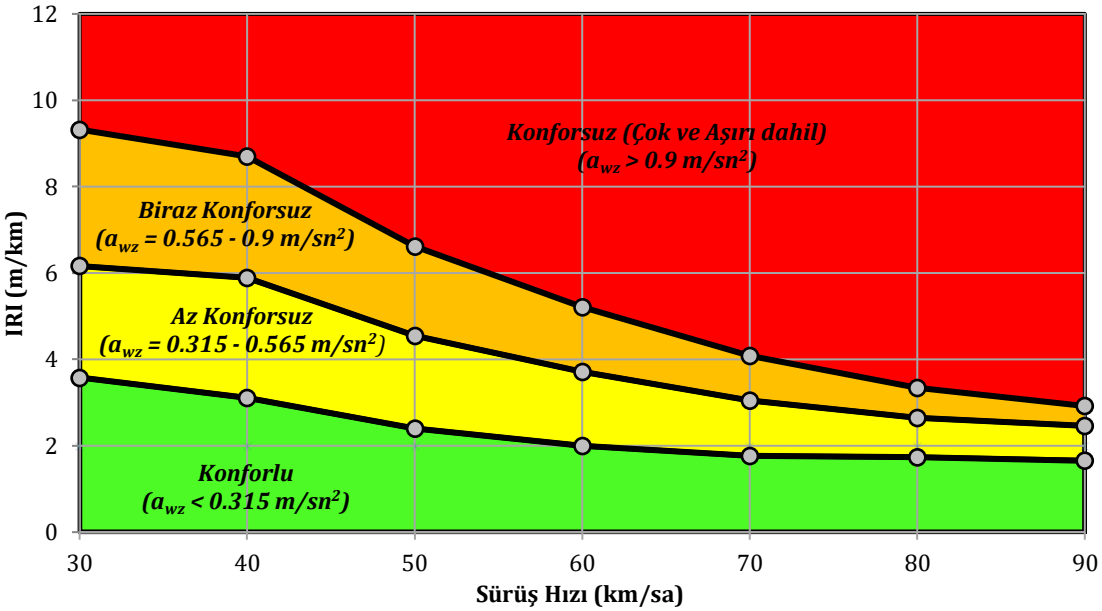
kategorilerdeki ölçüm verileri konforsuz olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Çeşitli sürüş hızlarında önerilen a_{wz} ve IRI sınır değerleri

Sürüş Hızı (km/sa)	Sürüş Konforu IRI (m/km) Sınır Değerleri			
	konforlu	az konforsuz	biraz konforsuz	konforsuz
90	< 1.652	1.652 - 2.462	2.462 - 2.921	> 2.921
80	< 1.744	1.744 - 2.642	2.642 - 3.341	> 3.341
70	< 1.768	1.768 - 3.042	3.042 - 4.081	> 4.081
60	< 2.001	2.001 - 3.717	3.717 - 5.213	> 5.213
50	< 2.400	2.400 - 4.553	4.553 - 6.609	> 6.609
40	< 3.115	3.115 - 5.894	5.894 - 8.705	> 8.705
30	< 3.581	3.581 - 6.162	6.162 - 9.323	> 9.323

Tablodaki değerler incelendiğinde, konforlu sürüş sağlayabilmek için sürüş hızı arttıkça daha düşük IRI değerlerine ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, üstyapıların mevcut hizmet düzeyini (dolayısıyla üstyapıların sürüş konforunu) ifade ettiği kabul edilen IRI'nın, sürüş konforunu, hıza bağlı olarak ifade edebildiğini göstermektedir. Birçok araştırmacı çalışmalarının sonunda sürüş konforundan bahsederken mevcut hizmet düzeyinin yanında sürüş hızının da dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Cantisani ve Loprencipe, 2010, Abudinen vd., 2017, Yu vd., 2006). Çalışma sonunda önerilen ve Tablo 2'de sayısal değerleriyle ifade edilen IRI'nın sınır değerleri grafik olarak Şekil 11'de görülmektedir.

Konu ile ilgili literatür detaylıca incelendiğinde bu çalışmaya benzer bir değerlendirmenin Cantisani ve Loprencipe tarafından yapıldığı görülmektedir (Cantisani ve Loprencipe, 2010). Sonuçlar karşılaştırıldığında, düşük sürüş hızlarında (50 km/sa ve altında) çalışmada bulunan IRI değerlerinin çok küçük farklarla Cantisani ve Loprencipe'in çalışmasında bulunan değerlere göre daha düşük olduğu, yüksek hızlarda (60 km/sa ve üzeri) IRI değerlerinin Cantisani ve Loprencipe'in çalışmasında bulunan değerlere göre daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Araştırmacıların çalışmalarında arazide ölçtükleri sınırlı sayıdaki IRI, sürüş hızı ve titreşim verilerini geliştirdikleri tüm taşıt modelini kalibre etmede kullandıkları anlaşılmaktadır. Ayrıca, titreşim verilerini ISO standardının belirttiği şekilde üzerinde sürücü varken WBV değerlerini okumak yerine sağ ön koltuktan üzerinde sürücü yokken okuduğu anlaşılmaktadır. Ölçme ve değerlendirme aşamalarında yapılan kabul farklılıklarından dolayı sonuçların birebir örtüşmediği tahmin edilmektedir. Öte yandan, yapılan bu çalışma ve Cantisani ve Loprencipe'in çalışması arasında sınır değerlerinde küçük farklılıklar olsa da, hızlara göre sınır değerlerin eğilimlerinin bire bir örtüştüğü açıkça görülmektedir.



Şekil 11. Sürüş hızına bağlı sürüş konforunun IRI sınır değerleri grafik gösterimi

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada, insan vücudunun maruz kaldığı titreşim yardımıyla açıklanan farklı sürüş konforu seviyelerinin, sürüş hızına bağlı olarak IRI sınır değerleri araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı hizmet düzeylerine sahip BSK kaplamalı yollarda (IRI değerleri bilinen) farklı sürüş hızlarında titreşim ölçümleri yapılmış ve aralarındaki ilişkiler YSA tekniği kullanılarak modellenmiştir. Geliştirilen model aracılığıyla ISO 2631 standardında belirtilen konfor seviyelerine bağlı olarak farklı sürüş hızları

için IRI'nın sınır değerleri belirlenmiş, sonuçlar tablo ve grafikler yardımıyla sunulmuştur. Çalışmanın literatürde yapılan benzer çalışmalara göre en üstün yanı, benzetim teknikleri ile üretilen sentetik veriler yerine gerçek saha ölçümleri ile elde edilen verilerin kullanılarak sonuçların üretilmesi olmuştur. Çalışmanın sonuçlarının literatürdeki diğer çalışmalara benzerlik göstermesinin yanında oluşan küçük farklılıkların sebepleri önceki bölümde açıklanmıştır.

Sonuç grafiği incelendiğinde, sürüş konforunun üstyapıların mevcut hizmet düzeylerinin yanında hıza da bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Öte yandan, konforlu bir sürüşü temin edebilmek için, 60 km/sa ve üzeri hızlarda üstyapıların hizmet düzeyinin 50 km/sa ve daha düşük hızlara nazaran çok daha önemli bir değerlendirme parametresi olduğu anlaşılmaktadır. Sürüş hızı arttıkça, özellikle konfor seviyesi düşük (az konforsuz, biraz konforsuz) olan, dolayısıyla çok miktarda titreşime maruz kalınan üstyapı kesimlerinde, IRI'nın konfor seviyesi üzerinde çok daha etkili olduğu çok açıktır.

Benzer çalışmaların standart bir yolcu otomobilinin yanında, özellikle yolcu taşımada kullanılan orta ve büyük aks uzunluğuna sahip taşıtlarla tekrarlanmasının literatüre çok önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, diğer üstyapı çeşitleri (sathi kaplama, beton yol vb.) ile kaplanmış yollarda benzer çalışmaların tekrarlanmasının konunun gelişmesi için benzersiz faydalar sağlayacağı çok açıktır.

Teşekkür

Yazar, IRI ölçümlerinin yapılması konusunda destek sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü'ne ve tüm değerli çalışanlarına teşekkür eder.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynakça

Abudinen, D., Fuentes, L.G., Carvajal Muñoz, J.S., 2017. Travel Quality Assessment of Urban Roads Based on International Roughness Index. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, 2612, 1-10.

Ahlin, K., Granlund, N.O.J., 2002. Relating Road Roughness and Vehicle Speeds To Human Whole Body Vibration and Exposure Limits. International Journal of Pavement Engineering, 3, 207-216.

ASTM 2008. Standard Practice For Computing International Roughness Index of Roads From Longitudinal Profile Measurements. ASTM E 1923-08. West Conshohocken, Pa: ASTM International.

ASTM 2009. Standard Test Method For Measuring The Longitudinal Profile of Traveled Surfaces With An Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. ASTM E 950. West Conshohocken, Pa: ASTM International.

Attoh-Okine, N.O., 1999. Analysis of Learning Rate and Momentum Term In Backpropagation Neural Network Algorithm Trained to Predict Pavement Performance. Advances in Engineering Software, 30, 291-302.

Aydın, M.M., Yıldırım, M.S., Forslof, L., 2017. The Use of Smart Phones to Estimate Road Roughness: A Case Study in Turkey. International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET 2017), 21-23 Sept., Bayburt, Turkey.

Cantisani, G., Loprencipe, G., 2010. Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. Journal of Transportation Engineering, 136, 818-826.

Carey Jr, W. N., Irick, P. E., 1960. The Pavement Serviceability-Performance Concept. Highway Research Board Bulletin, 40-58.

Duarte, M. L. M. , De Melo, G. C., 2018. Influence of Pavement Type and Speed on Whole Body Vibration (WBV) Levels Measured on Passenger Vehicles. Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40.

Griffin, M. J., 2007. Discomfort From Feeling Vehicle Vibration. Vehicle System Dynamics, 45, 679-698.

Griffin, M. J., 2012. Handbook Of Human Vibration, London, Uk, Academic Press.

Haas, R., Hudson, W. R., Zaniewski, J. P., 1994. Modern Pavement Management, Malabar, Florida, Usa, Krieger Pub. Co.

ISO 1997. Mechanical Vibration and Shock - Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration, Part 1: General Requirement. ISO 2631-1. Geneva, Switzerland: ISO.

ISO 2005. Human Response To Vibration - Measuring Instrumentation. ISO BS EN 8041:2005. Geneva, Switzerland: ISO.

Kecman, V., 2001. Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models, Massachussetts, Usa, Mit Press.

Kim, M. S., Kim, K. W. , Yoo, W. S. 2011. Method To Objectively Evaluate Subjective Ratings Of Ride

Comfort. International Journal Of Automotive Technology, 12, 831-837.

Kırbaş, U. , Karaşahin, M., 2016. Investigation of Ride Comfort Limits on Urban Asphalt Concrete Pavements. International Journal of Pavement Engineering, 1-7.

Perera, R. W., Kohn, S. D. 2005. Quantification of Smoothness Index Differences Related To Long-Term Pavement Performance Equipment Type. Georgetown Pike: Federal Highway Administration.

Sayers, M. W., 1995. on The Calculation of International Roughness Index From Longitudinal Road Profile. Transportation Research Record, 1501, 1-12.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., Queiroz, C. A. V., 1986. The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and A Calibration Standard For Measurements, Washington, D.C., U.S.A., The World Bank.

Sayers, M. W., Karamihas, S. M., 1996. Interpretation of Road Roughness Profile Data. UMTRI 96-19, Final Report, Federal Highway Administration.

Sayers, M. W., Karamihas, S. M., 1998. The Little Book of Profiling, Michigan, University of Michigan.

Shahin, M. Y., 2005. Pavement Management For Airports, Roads, and Parking Lots, New York, Springer.

Terzi, S., 2007. Modeling The Pavement Serviceability Ratio of Flexible Highway Pavements By Artificial Neural Networks. Construction and Building Materials, 21, 590-593.

Terzi, S., 2013. Modeling For Pavement Roughness Using The Anfis Approach. Advances In Engineering Software, 57, 59-64.

Wang, F., Easa, S., 2016. Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements. Journal of Testing and Evaluation, 44, 1671-1682.

Yu, J., Chou, E. Y. J., Yau, J.-T., 2006. Development of Speed-Related Ride Quality Thresholds Using International Roughness Index. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, 1974, 47-53.