



ÜSTYAPI DURUM İNDEKSİ VE SÜRÜŞ KONFORU ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN MODELLENMESİ

Ufuk KIRBAŞ^{1*}, Mustafa KARAŞAHİN²

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Üstyapı Performansı,
PCI,
Sürüş Konforu,
Tüm Vücut Titreşimi.

Öz

Çalışmada üstyapı performans göstergesi olarak kullanılan Üstyapı Durum İndeksi (PCI) ve yolcu otomobilinde maruz kalınan tüm vücut titreşimi miktarı arasındaki ilişkilerin matematik olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Titreşim ölçümleri, teknik detayları ISO 2631 standardında açıklanan frekans ağırlıklı veri işleme yöntemine göre analiz edilerek düşey doğrultuda a_w değerleri elde edilmiştir. Bitümlü sıcak karışım üstyapıya sahip bir kentsel yol ağında belirlenen yol kesimlerinde, PCI değerleri ve 20-50 km/sa sürüş hızı aralığında yapılan gerçek titreşim ölçüm verileri arasındaki matematiksel ilişkiler doğrusal regresyon analizi kullanılarak modellenmiştir. Modellerin istatistik olarak uyumları incelenmiştir. Her bir sürüş hızı için oluşturulan matematik model aracılığıyla PCI'nin sürüş konforunu etkileyen eşik değerleri ve PAVER sisteminde önerilen geleneksel değerlendirme ölçeğindeki PCI sınır değerlerine karşılık gelen sürüş konforu değerleri belirlenmiştir. Değerlendirilen hız aralığında PCI sınır değerleri sırasıyla 'az konforsuz- biraz konforsuz' eşliğinde 0, 11, 29, 41, 'konforlu - az konforsuz' eşliğinde 37, 62, 69, 77 olarak bulunmuştur. Son olarak doğrusal regresyon analizi yöntemi ile üretilen eşik değerleri literatürde bulunan önceki çalışmalarda lojistik regresyon, bulanık mantık ve yapay sinir ağları teknikleri ile elde edilen eşik değerleri ile kıyaslanmıştır. Doğrusal regresyon analizinin diğer tekniklere nazaran daha düşük PCI eşik değerleri verdiği tespit edilmiştir.

MODELING THE RELATIONSHIPS BETWEEN PAVEMENT CONDITION INDEX AND RIDE COMFORT

Keywords

Pavement Performance,
PCI,
Ride Comfort,
Whole-Body Vibration.

Abstract

The study, it is aimed to mathematically model the relationships between the Pavement Condition Index (PCI), which is used as a pavement performance indicator, and the amount of whole-body vibration exposure in a passenger car. Vibration measurements were analyzed according to the frequency-weighted data processing method, the technical details of which were explained in the ISO 2631 standard, and a_w values were obtained in the vertical direction. Mathematical relationships between PCI values and actual vibration measurement data in the range of 20-50 km/h ride speed were modeled using linear regression analysis on the road sections determined in an urban road network with a bituminous hot-mixed pavement. The statistical compatibility of the models was examined. Through the mathematical models generated for each ride speed, the threshold values of PCI that affect ride comfort, and the ride comfort values corresponding to the PCI limit values in the traditional evaluation scale recommended by the PAVER system were determined. In the evaluated speed range, the PCI limit values were 0, 11, 29, 41 on the 'a little uncomfortable - fairly uncomfortable' threshold, 37, 62, 69, 77 on the 'not uncomfortable - a little uncomfortable' threshold, respectively. Finally, the threshold values produced by the linear regression method were compared with the threshold values obtained by logistic regression, fuzzy logic and artificial neural network techniques in previous studies in the literature. It was determined linear regression analysis generated lower PCI threshold values than other techniques.

* İlgili yazar / Corresponding author: ufuk.kirbas@omu.edu.tr

Alıntı / Cite

Kırbaş, U., Karasahin, M., (2022). Üstyapı Durum İndeksi ve Sürüş Konforu Arasındaki İlişkilerin Modellenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 878-890.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

U. Kırbaş, 0000-0002-2389-425X
M. Karasahin, 0000-0002-3811-2230

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.12.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.05.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	30.05.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

1. Giriş (Introduction)

Karayolu ağlarında güvenlik ve konforu sağlayan en önemli unsur olarak yol üstyapısı görülmektedir. Bir yol üstyapısından pürüzsüz, konforlu ve güvenli bir sürüş sağlama imkanı sunabilmesi beklenmektedir. AASHTO yol testi kapsamında yapılan çalışmalardan üstyapıların hizmet düzeyi hakkında bilgilerin çok önemli kısmının yüzey düzgünlüğü yardımıyla elde edildiği görülmektedir (Carey Jr ve Irick, 1960; Terzi ve Ahmed, 2020). Yol testi ile başlayan ve günümüze kadar devam eden çalışmalar sürüş kalitesi ile üstyapı hizmet düzeyi diğer bir adıyla düzgünlüğü arasında oldukça yüksek bir korelasyonun olduğunu göstermektedir (Shahin, 2005). Düzgünlük, seyahat edenler üzerinde konforsuzluğa neden olacak şekilde yol üstyapısının yüzeyinde görülen bozulmaların tümünü göstermektedir. Üstyapılarda görülen yüzey bozulmaları sürüş esnasında yol kullanıcılarının düşey ve yanal doğrultuda titreşime maruz kalmalarına sebep olmaktadır (İskender vd., 2022). Seyahat eden kişilerin (sürücü ve yolcular) konfor seviyesini sayısal olarak en makul şekilde ifade edebilen bileşen üstyapının boyuna profilinden türetilen düşey doğrultudaki titreşimlerdir (Cantisani ve Loprencipe, 2010; Sayers ve Karamihas, 1996; Wang ve Easa, 2016). Seyahat halinde taşıt içerisinde düşey eksen doğrultusunda maruz kalınan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısında oluşan rotasyonel hareketler ile yol yüzeyinde görülen yüzey bozulmaları olduğu bilinmektedir. Üstyapı performanslarının dolayısıyla sürüş konforunun üzerinde en önemli etkinin üstyapılarda görülen bozulmalar ve kusurlar olduğu bilinen bir gerçektir (Haas vd., 1994; Kırbaş ve Karasahin, 2018a). İşletmeciler, üstyapı tarafından yolun kullanıcılarına sunulan bu imkanların seviyesinin yeterliliğine ilişkin derecelendirme yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini savunmaktadırlar (Shahin, 2005).

Çalışmada üstyapının performans seviyesi ile sürüş konforu arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu kapsamda üstyapısı bitümlü sıcak karışım (BSK) olan ve kentsel alanda hizmet veren yaklaşık 56 km uzunluğunda bir karayolu ağında, platformun tüm şeritlerinde PCI değerleri belirlenmiştir. Eş zamanlı olarak değerlendirilen yol kesimlerinde standart bir yolcu otomobili ile 20, 30, 40 ve 50 km/sa sürüş hızlarında sürücü koltuğu üzerinden düşey eksende tüm vücut titreşimi ölçümleri yapılmıştır. ISO 2631 teknik standardında değerlendirme esasları anlatılan analiz yöntemi kullanılarak titreşim ölçümlerinden a_{wz} parametre değerleri elde edilmiştir. Ölçülen tüm yol ağı kesimlere ayrılarak değerlendirilen 20, 30, 40 ve 50 km/sa sürüş hızları için Üstyapı Durum İndeksi (PCI) ve a_{wz} değerleri arasındaki matematiksel ilişkiler doğrusal regresyon analizi modelleme tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Modelleme sonucu üretilen modellerin başarı düzeyleri regresyon katsayısı (R^2) karşılaştırma metriği kullanılarak değerlendirilmiştir. Üretilen matematik modeller aracılığıyla bahsi geçen her bir sürüş hızı için ISO standardının konforu ifade eden sınır değerlerine karşılık gelen PCI eşik değerleri belirlenmiştir. Bunun yanında üstyapıların performans seviyesinin gösteriminde kullanılan PAVER sistemi tarafından Geleneksel PCI Ölçeği olarak tavsiye edilen PCI sınır değerlerine karşılık gelen sürüş konforu değerleri belirlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Yol üstyapıların mevcut performansını sayısal olarak ifade edebilmek amacıyla çok sayıda indeks geliştirilmiştir. Uluslararası Düzgünlük İndeksi (International Roughness Index, IRI), Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index, PCI), Üstyapı Hizmet İndeksi (Pavement Serviceability Index, PSI), Sürüş Sayısı (Ride Number, RN) bunların başlıcaları arasında yer almakla birlikte çok daha fazla sayıda indeks olduğu bilinmektedir (Kırbaş ve Karasahin, 2016). Çalışmalardan farklı sürüş hızlarında tekrarlanan ölçümlerde üstyapı performans değerlendirme indeksi olarak çoğunlukla IRI'nın kullanıldığı, yanında PSI ve RN gibi indekslerinde tercih edildiği görülmektedir (Fuentes vd., 2021; La Torre vd., 2002; Yu vd., 2006). Kentsel yol üstyapılarında ise sıklıkla PCI'nin tercih edildiği anlaşılmaktadır (Kırbaş ve Karasahin, 2018a, 2019). Analizlerde oldukça yoğun bir şekilde yalnızca düşey doğrultudaki titreşimlerin değerlendirildiği dikkat çekmektedir. Çalışmalarda özellikle kentsel hız limitlerinde farklı boyutlardaki yolcu taşıtı (otomobil) türü taşıtlarda kaydedilen titreşimlerin taşıtın marka ve modeline göre önemli miktarda değişiklik göstermediği vurgulanmaktadır (Duarte ve de Melo, 2018; Múčka, 2020, 2021).

Uluslararası alanda geçerliliği olan ISO 2631 ve BS 6841 standartları Tüm Vücut Titreşimi (TVT) (Whole-Body Vibration, WBV) kavramının matematik temellerini açıklamaktadırlar. Araştırmacılar sürüş konforunu sayısal

olarak ifade edebilmenin en yalın halinin TVT değerlendirmesiyle olabileceği konusunda hem fikirdir (Griffin, 2007; Griffin, 2012). Çok sayıda çalışmada düşey eksen doğrultusunda ölçülen titreşim verilerinin ağırlıklandırılmış frekans çözümlenmesinden sonra değerlerin karesel ortalamalı kökü (a_w) alınarak sürüş konforunun değerlendirildiği görülmektedir (Cantisani ve Loprencipe, 2010; Wang ve Easa, 2016). Bunun yanında çok sık olmasa da titreşim doz değeri (Vibration Dose Value, VDV) parametresi de tercih edilmektedir (Cantisani ve Loprencipe, 2010; Griffin, 2007; ISO, 1997; Kirbaş ve Karashahin, 2018b; Múčka, 2020).

Tablo 1. Üstyapı performans indeksleri ve sürüş konforu bileşenleri arasındaki ilişkilerin araştırma özeti (Research summary of the relationships between pavement performance indexes and ride comfort components)

Referans	Yıl	Taşıt Türü & Ölçüm Noktası	Hız Aralığı (km/sa)	Bağımsız Değişken	Bağımlı Değişken	Matematik Model	R ²
(Yu et al., 2006)	2006	Çeyrek taşıt modeli & Araç gövdesinin yaysız kütlesi	10 - 120	Şok	IRI, Hız	Doğrusal olmayan Regresyon	0.98
(Fichera, Scionti, & Garesci, 2007)	2007	Otobüs (3 çeşit) & Yolcu koltuğu	60	a_{wz} & a_w XYZ	IRI	Doğrusal Regresyon	0.752 - 0.882
(Cantisani & Loprencipe, 2010)	2010	Yolcu taşıtı & Yolcu koltuğu	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	a_{wz}	IRI	Doğrusal Regresyon	0.750 - 0.930
(Wang & Easa, 2016)	2016	Yolcu taşıtı & Sürücü ve yolcu koltuğu	40 - 120	a_{wz}	IRI, Hız	Doğrusal olmayan Regresyon ve Bulanık Mantık	0.880 - 0.870
(Múčka, 2017)	2017	Yolcu taşıtı, ticari taşıt, panelvan, ambulans, otobüs, kamyon & Yolcu koltuğu	30 - 120	IRI	Hız	Doğrusal Regresyon	0.988 - 0.997
(Abudinen, Fuentes, & Carvajal Muñoz, 2017)	2017	Çeyrek taşıt modeli & Yolcu koltuğu	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	a_{wz}	IRI	Doğrusal Regresyon	0.410 - 0.520
(Kirbaş, 2018)	2018	Yolcu taşıtı & Sürücü Koltuğu	30 - 90	IRI	a_{wz} , Hız	Yapay Sinir Ağları	0.784
(Kirbaş & Karashahin, 2018a)	2018	Yolcu taşıtı & Sürücü Koltuğu	20 - 50	PCI	Hız	Lojistik Regresyon	0.662 - 0.999
(Kirbaş & Karashahin, 2019)	2019	Yolcu taşıtı & Sürücü Koltuğu	20 - 50	a_{wz}	PCI, Hız	Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık	0.866 - 0.965, 0.759 - 0.916
(Nguyen, Lechner, Wong, & Tan, 2019)	2019	Otobüs & Yolcu koltuğu	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	a_{wz}	IRI	Doğrusal Regresyon	0.790 - 0.820
(Zhang, Wang, Jing, Wu, & Li, 2020)	2020	Yolcu taşıtı & Yolcu koltuğu	30, 50, 70	a_w	IRI, Hız	Doğrusal olmayan Regresyon	0.849, 0.916
(Múčka, 2020)	2020	Yolcu taşıtı (9 çeşit) & Yolcu Koltuğu	30 - 120	VDV	IRI, Hız	Doğrusal olmayan Regresyon	0.255 - 0.483
(Guanyu, Michael, & Gurmel, 2020)	2020	Yolcu taşıtı (simülasyon) & Ölçüm noktası belirsiz	30, 50	IRI	İvme rms, Hız, Kişi sayısı, Rijitlik, Amortisör kuvveti, Lastik basıncı	Doğrusal olmayan Regresyon, Yapay Sinir Ağları, Karar ağacı, Rasgele orman algoritması	0.730 - 0.950
(Múčka, 2021)	2021	Yolcu taşıtı (9 çeşit) & Yolcu Koltuğu	30 - 140	a_w XYZ	IRI, Hız	Doğrusal olmayan Regresyon	0.317 - 0.493

Literatürde üstyapı performans indeksleri ile sürüş konforu arasındaki matematiksel ilişkilerin araştırıldığı konunun ilerlemesinde önemli kilometre taşı olarak kabul edilebilecek bazı çalışmalar Tablo 1'de özet halinde sunulmuştur. Tablo detaylıca incelendiğinde ilişkilerin açıklanmasında sıklıkla regresyon yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1'de görüldüğü üzere regresyon katsayısı dikkate alınarak karşılaştırma yapılırsa matematiksel ilişkilerin belirlenmesinde bazı çalışmalarda oldukça yüksek tahmin doğruluklarının yakalanabildiği, buna karşılık bazı çalışmalarda ise tahmin doğruluklarının sınırlı seviyede kaldığı göze

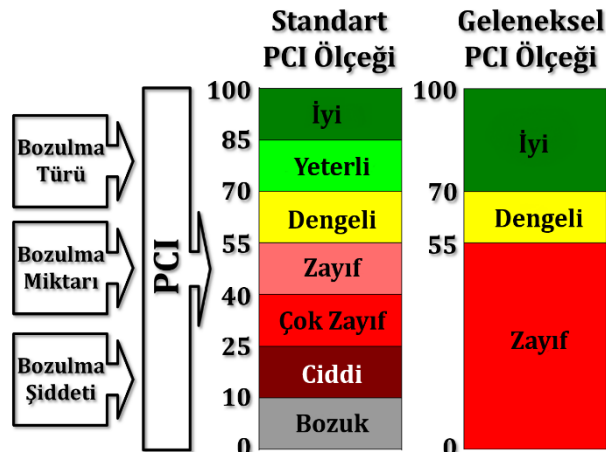
çarpılmaktadır. Öte yandan, ilişkilerin belirlenmesinde birden çok tekniğin karşılıklı değerlendirilmesinin yapıldığı çalışmanın oldukça az sayıda olduğu çok açıktır.

Üstyapıların mevcut durumunu gösteren performans göstergeleri ile sürüş konforu arasındaki ilişkileri araştıran çalışmalar sınırlı sayıdadır. Cantisani ve Loprencipe kalibre ettikleri bir taşıt modeli ile ürettikleri verileri kullanarak, Wang ve Easa 89 farklı esnek üstyapı kesiminde ölçtükleri verileri kullanarak, Abudinen vd. 102 farklı beton kaplamalı şehiriçi yol kesiminde yaptıkları ölçüm verilerini kullanarak IRI ile düşey doğrultudaki a_w (a_{wz}) değerleri arasındaki ilişkileri araştırmışlardır (Abudinen et al., 2017; Cantisani ve Loprencipe, 2010; Wang ve Easa, 2016). Yapılan çalışmalarda ISO 2631 standardında belirtilen konforsuzluk sınırlarına karşılık gelen IRI eşik değerleri belirlemişlerdir. Bu değerler farklı sürüş hızları için kalibre edilen modeller aracılığıyla üretilmiştir (Abudinen et al., 2017). Kırbaş ve Karaşahin şehir içi karayolu üstyapılarının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan PCI'm ISO 2631 standardında belirtilen konfor parametresi sınırlarına karşılık gelen eşik değerleri önermişlerdir (Kırbaş ve Karaşahin, 2018a, 2019). Araştırmacılar çalışmalarında PCI ve a_{wz} arasındaki ilişkileri araştırırken lojistik regresyon, yapay sinir ağları ve bulanık mantık modelleme tekniklerini kullanmışlardır (Kırbaş ve Karaşahin, 2018a, 2019). Bu çalışmalar ilişkilerin modellenmesinde regresyon teknikleri harici farklı tekniklerin kullanıldığı sınırlı çalışmalardandır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index)

Üstyapıların mevcut performans seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan ölçümler, sürüş esnasında taşıt içerisinde seyahat eden kişilerin maruz kaldığı rahatsızlığı sayısal olarak ifade edebilme prensibine dayanmaktadır. PAVER sistemi, bir üstyapı yüzeyinde rasgele dağıtım prensiplerine göre seçilen $225 \pm 90m^2$ boyutlarında örnek birimlerde (ÖB) (sample unit), ASTM D 6433 kodlu standarda göre toplanan yüzey bozulma verilerinin değerlendirilmesiyle üstyapıların mevcut performansının tespiti sürecini açıklamaktadır (ASTM, 2016; Şahin, 2005). Bu sistemde sürüş konforunun bir ölçüsü olan üstyapının hizmet edebilme yeteneği, esas olarak PCI gösterimi ile tarif edilmektedir. Bitümü Sıcak Karışım (BSK) yol üstyapılarında görülen yüzey bozulmalarının 20 farklı çeşitte tanımlanabileceği standardize edilmiştir. Değerlendirme düşük (D), orta (O) ve yüksek (Y) şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, ÖB'in büyüklüğüne oranlanarak elde edilen değerlerin bozulma türüne göre hazırlanmış düşülen değer (DD) (deduct value) tablolarından sonuç değerleri okunarak yapılır. Elde edilen DD'ler 100'den çıkarılarak üstyapının performansını 0 – 100 arasında bir değerle tanımlayan PCI değeri elde edilir. Bir üstyapı için hesaplanan PCI değeri olarak 100 hiç bozukluk bulunmayan en iyi derecedeki üstyapıyı 0 ise tamamen bozulmuş kullanılmayacak derecedeki üstyapıyı ifade etmektedir. PCI, üstyapıya ait bozulma türü, bozulma miktarı ve bozulma şiddeti bileşenlerinin ortak değerlendirilmesi sonucunda üstyapının mevcut performansını gösteren bir indekstir (ASTM, 2016; Şahin, 2005). PCI indeksinin bileşenleri ve değerlendirme ölçekleri Şekil 1'de görülmektedir. PAVER sisteminde üstyapıların performans seviyelerini ifade edebilmek amacıyla ölçek kavramı geliştirilmiştir. Sistemde kullanıcılara detaylı bir değerlendirme için tavsiye edilen "Standart PCI Ölçeğinde" üstyapı 7 farklı kategoride sınıflara ayrılırken uygulamaya yönelik karar verme aşamasında faydalanılabilecek ölçek olan "Geleneksel PCI Ölçeği" üstyapının durumunu 3 farklı kategoride değerlendirmektedir. Söz konusu ölçekler ve sınır değerleri Şekil 1'de görülmektedir. Aynı zamanda değerlendirme ölçeklerinde üstyapı performansını "iyi", "yeterli" gibi sözel ifadelerle de tanımlamak mümkündür.



Şekil 1. PCI bileşenleri ve değerlendirme ölçekleri (PCI components and rating scales) (ASTM, 2016)

Sistemde bozulmaların şiddet düzeylerinin (D, O, Y) sürüş kalitesini etkileme dereceleri de tanımlanmıştır. D şiddet seviyesinde taşıt içerisinde titreşimler fark edilir seviyededir ancak konfor veya güvenlik için hızda herhangi bir azalmaya gerek yoktur. M şiddet seviyesinde taşıt içerisinde titreşimler önemli miktarda fark edilir seviyededir ve güvenlik ve konfor için hızda bir miktar azalma gerektirir. Y şiddet seviyesinde taşıt içerisinde titreşimler aşırı derecede fark edilir seviyededir, aynı zamanda güvenlik ve konfor için hızın önemli ölçüde azaltılmasını gerektirir.

3.2. TVT ve Titreşim Değerlendirmesi (WBV and Vibration Evaluation)

Sürüş konforunun değerlendirilmesinde en gerçekçi yaklaşımın TVT analizi olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Bir sürücüye sürüş esnasında, koltuğun oturma yüzeyinden, sırt bölgesinden, ayak bölgesinden ve direksiyondan olmak üzere dört farklı bölgeden titreşimler etki etmektedir. Bu titreşimleri karakterize edebilmek veya bu titreşimler için uygun bir değerlendirme kriteri belirlemek için konu üzerinde çok sayıda çalışma yapılmaktadır (Kim vd., 2011). Konforsuzluk, faaliyeti duraklatma, sağlığı olumsuz etkileme, oldukça düşük genlikteki titreşimi dahi algılama ve hareket hastalıkları gibi gittikçe şiddetlenen beş olumsuz etki, insan vücudunun TVT'ye olan tepkisini göstermektedir (Griffin, 2012). Yapılan çalışmalardan TVT kavramının açıklanmasında sıklıkla ISO 2631 standardının kullanıldığı görülmektedir.

Standardın birinci bölümü (ISO 2631-1) titreşim ölçüm ve analiz yöntemlerini açıklamaktadır. Bu standart, insan üzerine olan etkileri açısından 0.5 Hz ile 80 Hz frekans aralığında konfor, sağlık ve algı değerlendirmelerini, 0.1 Hz ile 0.5 Hz aralığında ise hareket hastalıkları değerlendirmelerini yapmak üzere titreşimleri sınıflandırmaktadır (ISO, 1997). Bu teknik standartta sürüş konforu tüm vücut titreşimi verilerinin ağırlıklandırılmış frekans çözümlenmesinden sonra değerlerin karesel ortalamalı kökü alınarak üretilen a_{wz} parametresi aracılığıyla gösterilmektedir. Bu değerlendirme düzeyi doğrultudaki titreşimler için yapıldığında a_{wz} parametresi ile ifade edilmektedir. a_{wz} parametresinin hesabında, düşey eksenindeki titreşim sinyallerinin zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürüldükten sonra butterworth tekniği ile 1/3 oktav band aralıklarına filtre edilmesiyle elde edilen güç spektral yoğunlukları elde edilir. Ardından güç spektral yoğunluğu bilinen sinyallerin genliği ile ait olduğu band aralığına karşılık gelen ağırlık faktörü (w_k) ile çarpılmaktadır. Değerlendirilen frekans aralığında kalan tüm band aralığı değerleri için elde edilen bu çarpım değerlerinin toplam karelerinin karekökü alınarak a_{wz} bileşeni hesaplanmaktadır (Griffin, 2007; Griffin, 2012). Kısaca açıklanan hesaplama yöntemi (1) nolu eşitlikte formülize edilmiştir.

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

ISO 2631'de titreşim analiz sonuçlarının yorumlanması için tavsiye edilen sayısal değerler incelendiğinde konforsuzluğu ifade eden sınır değerlerin birbirlerinin içine geçmiş olduğu dikkat çekmektedir (bkz. Tablo2). Çalışmada deterministik bir analiz öngörüldüğü için, elde edilen sonuç değerlerinin yorumlanmasında bulanık olan bu aralıkların alt sınırları alınarak bulunan değerler, konforsuzluk sınır değerleri olarak kabul edilmiştir. Bu kabul Şekil 2'de görsel olarak açıklanmıştır.

Tablo 2. ISO 2631'de önerilen konforsuzluk ölçeği (Discomfort scale recommended in ISO 2631) (ISO, 1997)

a_{wz} değerleri	Konforsuzluk Seviyesi
< 0.315 m/sn ²	konforlu
0.315 – 0.63 m/sn ²	az konforsuz
0.5 – 1 m/sn ²	biraz konforsuz
0.8 – 1.6 m/sn ²	konforsuz
1.25 – 2.5 m/sn ²	çok konforsuz
> 2 m/sn ²	aşırı konforsuz

aşırı konforsuz	2.5	} çok konforsuz	aşırı konforsuz > 2.0 m/sn ²
	2.0		çok konforsuz 1.25 - 2.0 m/sn ²
konforsuz	1.6	} biraz konforsuz	konforsuz 0.8 - 1.25 m/sn ²
	1.25		biraz konforsuz 0.5 - 0.8 m/sn ²
az konforsuz	1.0	} konforlu	az konforsuz 0.315 - 0.5 m/sn ²
	0.8		konforlu < 0.315 m/sn ²
	0.63		
	0.5		
	0.315		

Şekil 2. Konforsuzluk değerlendirilmesinde kullanılan sınır değerler (Limit values used in the evaluation of discomfort)

3.3. Saha Ölçümleri ve Değerlendirmeleri (Field Measurements and Evaluations)

Seyahat sırasında maruz kalınan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısından kaynaklı rotasyonel titreşimler ve üstyapı yüzey bozulmaları olduğu çok sayıda çalışmada vurgulanmaktadır (Kırbaş ve Karashahin, 2018b; Múčka, 2020). Çalışmada öncelikle üstyapı performans aralığı en kötüden en iyiye ölçeği tümüyle tasvir edecek şekilde seçilmiş BSK kaplamalı yol kesimlerinde üstyapı performans seviyeleri (PCI değerleri) belirlenmiştir. Ardından amaç üstyapı bozulmalarından kaynaklı titreşim, başka bir deyişle konforsuzluğu araştırmak olduğu için aynı kesimlerde dişey doğrultudaki titreşim değerlendirilmesi yapılmıştır.

Çalışmada, Samsun iline ait farklı hizmet seviyelerindeki kentsel karayolu ağında 99 adet farklı kesimde PAVER sisteminin öngördüğü ASTM D 6433 kodlu standart esasına uygun yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Seçilen bu yollarda yüzey bozulma değerlendirilmesi yapılması amacıyla PAVER sistemi kurallarına uyan 1415 adet ÖB öngörölmüş olup 1375 adet ÖB'de yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Aynı zamanda, PAVER sistemine göre üstyapıların mevcut performanslarını gösteren PCI değerleri belirlenmiştir. Toplanan yüzey bozulma verileri ASTM D 6433 kodlu standardın teorik temelleri üzerine hazırlanmış olan PAVER Paket Yazılımı ® aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Titreşim ölçümleri yüzey bozulma değerlendirmelerinin yapıldığı aynı yol kesimlerinde eş zamanlı olarak Euro car taşıt değerlendirme sınıfına göre C segmentine giren bir yolcu taşıtı ile yapılmıştır. Titreşim değerleri bir adet ivmeölçer ($\pm 4g$ ölçüm aralığı, 500 ± 15 mV/g hassasiyet), bir adet GPS anteni (< 3 m doğruluk) ve bir adet veri kaydediciden oluşan ivme ölçüm seti aracılığıyla toplanmıştır. Dişey titreşim verileri saniyede 1000 adet ve GPS verileri saniyede 1 adet aralıklarla toplanmış ve anlık olarak bilgisayara aktarılmıştır. Çalışmada taşıt içerisinde kaydedilen titreşim ölçümleri ISO 2631 standardının da tavsiye ettiği şekilde sürücü ile etkileşimini sağlar şekilde sürücü koltuğu üzerinden toplanmıştır. Ayrıca, sürücünün tam altına yerleştirilen ivmeölçer ölçüm sırasında meydana gelen gürültüden izole olabilmesi için elastik bir yatak içerisinde konumlandırılmıştır (ISO, 2005). Farklı sürüş hızlarında kaydedilen titreşim verileri ISO standardında açıklanan titreşim parametresi analizini kullanan MATLAB® üzerinde çalışan ve araştırmacılar tarafından geliştirilen ara yüz yazılım yardımıyla değerlendirilmiştir. Saha araştırmaları için kullanılan titreşim ölçüm seti Şekil 3'de görölmektedir.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan titreşim ölçüm seti (Vibration measurement set used in the study)

Dünyanın birçok ülkesinde kentsel yollarda azami hız limitinin yaklaşık 50 km/sa olarak kabul edildiği varsayılmaktadır. Bu sebeple, 20, 30, 40 ve 50 km/sa sabit hızlarda titreşim ölçümleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, arazi çalışmaları sırasında kentsel alanlarda yol geometrilerinden kaynaklı 50 km/sa üzerinde sabit hızlarda uzun süreli ölçüm yapabilmenin mümkün olmayacağı saptanmıştır. Değerlendirilen kesimlerde ölçüm hızını değiştirmeden ölçümlerin yapılabilmesi için aynı platform ve şerit boyunca taşıtla durmadan devam edilerek ve hız mümkün olduğunca korunmaya çalışılarak ölçümler tamamlanmıştır. Birden çok

trafik şeridi olan yol kesimlerinden ayrı ayrı her bir şerit için titreşim ölçümleri yapılmış ve a_{wz} değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin ortalaması alınarak kesimin genelini yansıtan a_{wz} değeri hesaplanmıştır. İfade edilen bu yaklaşım (2) nolu eşitlik yardımıyla açıklanmaktadır.

$$a_{wz} = \frac{a_{wz_{\text{şerit 1}}} + a_{wz_{\text{şerit 2}}} + \dots + a_{wz_{\text{şerit n}}}}{n} \quad (2)$$

Konfor değerlendirmesi yapılan yollarda 20, 30 ve 50 km/sa ölçüm hızların her biri için 22 farklı kesimde titreşim ölçümü yapılmıştır. Kentsel yollarda ortalama sürüş hızı olduğu tahmin edilen 40 km/sa ölçüm hızında ise 99 farklı kesimde titreşim ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm hızında çok daha fazla veri toplanarak, farklı PCI değerlerine göre ölçülen a_{wz} değerlerinin değişimlerinin tutarlılığı kontrol edilmiştir. Titreşim ölçümü yapılacak kesimlerin belirlenmesinde Standart PCI ölçeğinde belirtilen yedi adet aralığın (Şekil 1 bkz.) her birinde en az bir verinin (üstyapı PCI değerinin) bulunması prensibi dikkate alınmıştır. Bu şekilde, değerlendirme yapılan verilerin 0 - 100 aralığında tüm PCI ölçek aralıklarını ifade edebilmesi sağlanmıştır.

4. Bulgular (Results)

4.1. Doğrusal Regresyon Modeli (Linear Regression Model)

İstatistiksel regresyon teknikleri kullanan ampirik yaklaşımlar, PCI ve sürüş konforu arasındaki ilişkilerin öngörülmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 1 incelendiğinde değerlendirilen yol kesimlerinin üstyapı performans göstergeleri ile titreşim parametreleri arasındaki ilişkilerin en çok doğrusal regresyon analizi ile değerlendirildiği görülmektedir. İstatistiksel olarak anlamlı ilişkiler taşıdığı çok sayıda çalışmada tespit edilen PCI ve a_{wz} değerleri arasındaki matematiksel ilişkiler doğrusal regresyon analizi yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca, a_{wz} bileşeninin bağımsız değişken, PCI ve sürüş hızı bileşeninin bağımlı değişken olduğu durumda muhtelif doğrusal olmayan ilişkiler (karesel, üstel vb.) de araştırılmış, doğrusal regresyon yaklaşımından daha yüksek sayılabilir model tahmin doğruluklarının elde edilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan ilişkiler ile oluşturulan modellerde sınır değerler anlamsız çıktılar vermektedir.

Bir regresyon modelinin oluşturulmasında modellenen bağımlı değişkenin normal dağılıma uygun olması şartı aranmaktadır (Fisher, 1922). Dört farklı sürüş hızı için oluşturacağımız konforsuzluk seviyesi tahmin modellerinde, bağımlı değişken a_{wz} değerlerinin normal dağılıma uygunluğunu araştırmak amacıyla Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk Testleri uygulanmıştır. Değerlendirme sonucunda, tüm sürüş hızlarını temsilen üretilen veri dağılımlarında anlamlılık değerlerinin 0.05 değerinden büyük olduğu tespit edilmiştir. Sonucunda bağımlı değişken olarak a_{wz} değerlerinin %95 güven aralığında normal dağılıma uygun olduğu saptanmıştır. Ayrıca, histogram grafikleri ve test sonuç değerleri Şekil 4 ve Tablo 3'de görülmektedir. Ayrıca şekillerden görüldüğü üzere a_{wz} dağılımları belirli bir seviyede çarpıklık arz etse de istatistik analiz sonuçları kabul edilebilir seviyede kalmaktadır. Kullanılan veri setinin üretiminin zorlukları dikkate alındığında ve çok sayıda çalışmada sınırlı sayıda özgün veri yığını ile çalışılabildiği dikkate alındığında analizlerin tamamlanmaya değer olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada her bir sürüş hızı için doğrusal regresyon analizi yaklaşımı ile geliştirilen matematik modeller Tablo 4'de (3, 4, 5, 6) nolu eşitliklerde görülmektedir. Ayrıca ilgili tabloda modellerin regresyon doğrulukları (R^2) da görülmektedir. Modellerin varyans analiz değerlendirmesi sonucunda istatistik anlamlılık değerlerinin kabul edilebilirlik sınırında olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca her bir hız için üretilen modelin bağımlı (a_{wz}) ve bağımsız (PCI) değişkenleri arasındaki pearson korelasyon değerleri ve anlamlılıkları Tablo 5'de özetlenmiştir. Analiz için kullanılan verilerin dağılımları, doğrusal değişimleri ile PCI ölçeğine göre hangi aralıkta kaldığını gösteren şematik gösterim Şekil 5'de görülmektedir.

Tablo 3. Bağımlı değişkenlerin normal dağılım uygunluğu testlerinin anlamlılıkları (Significance of tests of normal distribution suitability of dependent variables)

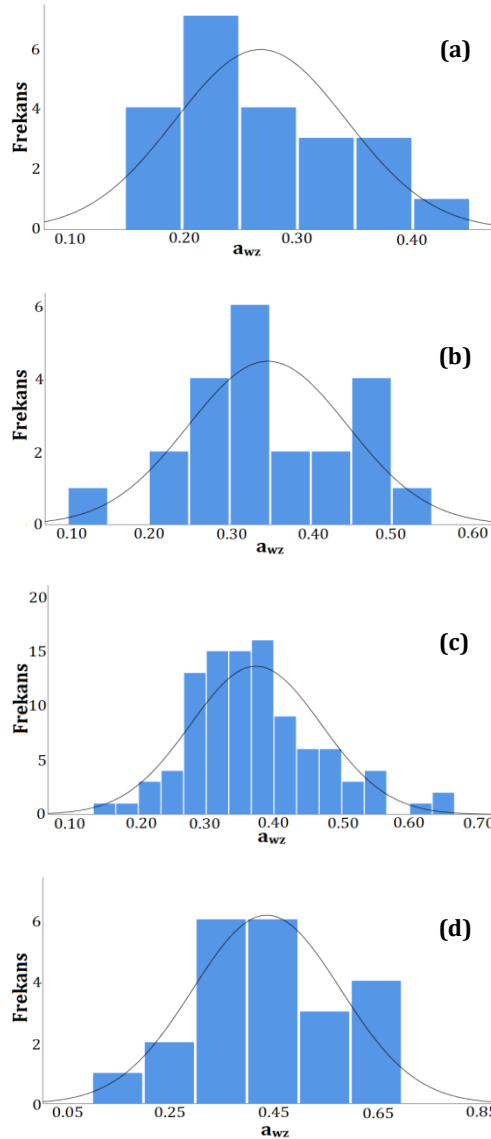
Sürüş Hızı	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk
20 km/sa	0.061	0.153
30 km/sa	0.079	0.436
40 km/sa	0.052	0.101
50 km/sa	0.082	0.553

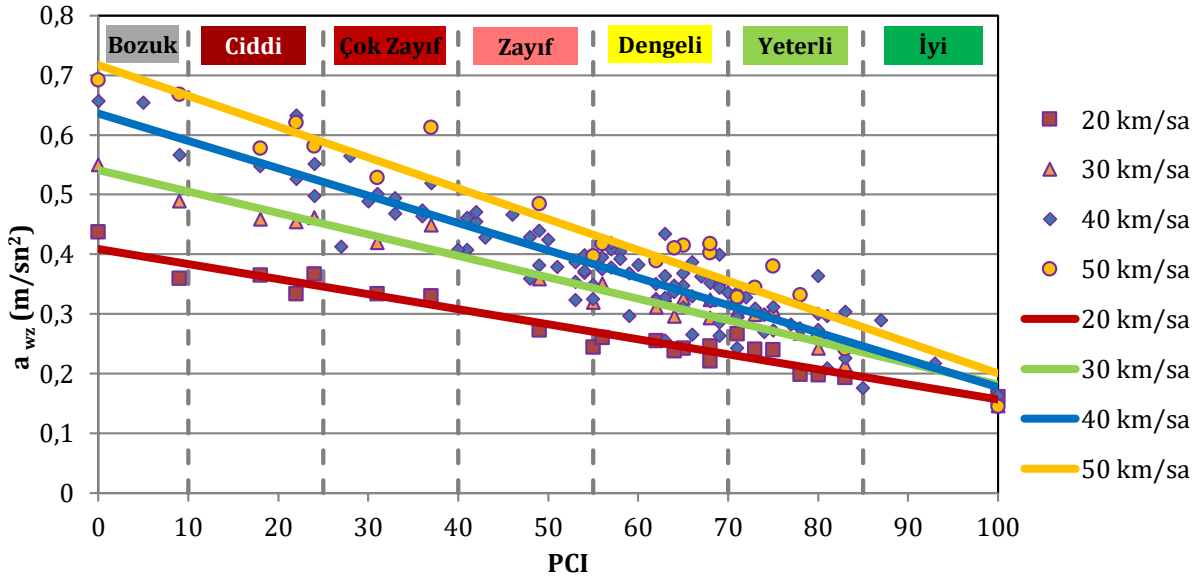
Tablo 4. PCI ve a_{wz} arasındaki doğrusal eşitlikler (Linear equations between PCI and a_{wz})

Sürüş Hızı	Model	R ²	Eşitlik No
20 km/sa	$a_{wz} = -0.0025 \cdot \text{PCI} + 0.4088$	0.940	(3)
30 km/sa	$a_{wz} = -0.0036 \cdot \text{PCI} + 0.5415$	0.955	(4)
40 km/sa	$a_{wz} = -0.0046 \cdot \text{PCI} + 0.6361$	0.846	(5)
50 km/sa	$a_{wz} = -0.0052 \cdot \text{PCI} + 0.7172$	0.931	(6)

Tablo 5. Regresyon modeli katsayılarının korelasyonları (Correlations of the regression model coefficients)

Sürüş Hızı		a_{wz}			
		20 km/sa	30 km/sa	40 km/sa	40 km/sa
P. Korelasyon	PCI	-0.970	-0.977	-0.920	-0.965
Anlamlılık	PCI	0.000	0.000	0.000	0.000

**Şekil 4.** 20 km/sa (a), 30 km/sa (b), 40 km/sa (c), 50 km/sa (d) sürüş hızları için üretilen a_{wz} değerlerinin normal dağılım histogramları (Normal distribution histograms of a_{wz} values produced for ride speeds of 20 km/h (a), 30 km/h (b), 40 km/h (c), 50 km/h (d))



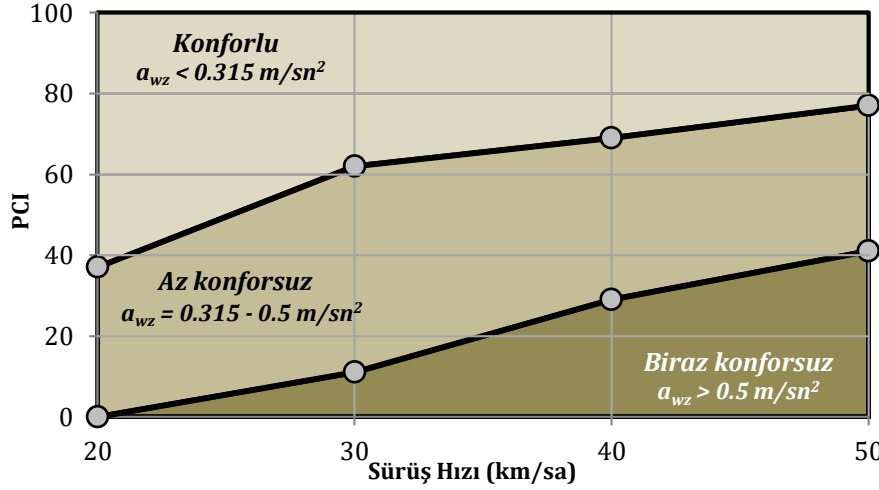
Şekil 5. Oluşturulan modellerin görsel anlatımı (Visual representation of the created models)

Her bir hız için a_{wz} titreşim parametresine ait veri yığınlarının normal dağılıma uygunlukları Tablo 3'de görülmektedir. Farklı sürüş hızlarında veri yığınlarının büyüklükleri birbirlerinden farklı olduğundan çalışmada normal dağılımı sorgulayan her iki yaklaşım da uygulanmıştır. Veri setlerinin %95 güven aralığı içerisinde normal dağılıma uygunlukları Kolmogorov-Smirnov yaklaşımında Shapiro-Wilk yaklaşımına göre sınır değerlere daha yakın olduğu göze çarpmaktadır. Analizler sonucu bulunan PCI ve a_{wz} arasındaki doğrusal modellerin R^2 değerleri (bkz. Tablo 4) oldukça yüksektir. Bu sonuçlar modellerin tahmin doğruluklarının oldukça yüksek olduğunu düşündürmekle birlikte farklı hızlarda PCI ve a_{wz} arasında doğrusal bir değişim olduğunun altını çizmektedir. Tablo 5'de görülen bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon değerleri de bu savı haklı çıkarmaktadır. PCI ve a_{wz} verilerinin bir koordinat düzleminde dağılımları ilgili tablolardaki öngörülerini görsel hale getirmektedir. Şekil 5 ile sunulan bu görsellik doğrusal değişimleri hızlara göre farklı renklerle ifade etmektedir. Şekil incelendiğinde PCI değerinin yüksek olduğu kesimlerde hızlara göre konfor seviyelerinin göreceli olarak birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Öte yandan PCI değerlerinin düştüğü kesimlerde konforsuzluk seviyeleri arasındaki farkların da açıldığı göze çarpmaktadır. PCI değerlerinin en düşük olduğu seviyelerde 20 - 50 km/sa sürüş hızları arasında neredeyse yarı yarıya sürüş konforunda azalma olduğu fark edilmektedir. Ayrıca Şekil 5'de üstyapıların performans seviyelerine göre veri dağılımlarının daha iyi anlaşılması amacıyla PCI eşikleri grafik üzerine işlenmiştir.

4.2. PCI Eşik Değerleri (PCI Thresholds)

Titreşim değerlendirmelerinin sonucunda tüm sürüş hızlarında elde edilen a_{wz} değerlerinin konfor seviyesi karşılıklarının, konforlu, az konforsuz ve biraz konforsuz olmak üzere en fazla üç kategoride toplandığı görülmüştür. Bu durumda, belirsizliğin yalnızca ilgili ölçeğin 0.5 - 0.63 m/sn² aralığına karşılık gelen az konforsuz ve biraz konforsuz konfor değerleri arasında olduğu görülmektedir. Matematik modelleme yardımıyla konfor sınırlarını mutlak olarak belirleyebilmek için az konforsuz ve biraz konforsuz arasındaki limit değeri güvenli tarafta kalabilmek için alt sınır değeri olan 0.5 m/s² olarak kabul edilmiştir. Bu kabul ışığında her sürüş hızı için PCI ve a_{wz} değerleri arasında doğrusal regresyon tekniği kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur ve bu modeller yardımıyla her bir sürüş hızı için 0 - 100 aralığında PCI bağımsız değişkenlerine karşılık gelen konfor eşikleri belirlenmiştir. a_{wz} titreşim parametresini kullanarak konfor seviyesinin yorumlanmasında bölüm 2.2'de vurgulanan kabuller dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda bulunan PCI eşik değerleri Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6'da görülen sonuç değerler sürüş sırasında konforun korunabilmesi için sürüş hızının artışı ile üstyapı kesimlerinde daha yüksek PCI değerlerine ihtiyaç olduğunu ifade etmektedir. Bu açıklama üstyapıların mevcut hizmet düzeyini gösteren PCI'nin sürüş konforunu ancak sürüş hızına bağlı olarak ifade edebildiğini anlatmaktadır. Bu durum literatürde yer alan çok sayıda çalışmada araştırmacılar tarafından vurgulanmış, sürüş konforunu açıklamak için üstyapının mevcut performans seviyesinin yanında sürüş hızının da dikkate alınması gerektiğinin altı çizilmiştir (Abudinen et al., 2017; Cantisani ve Loprencipe, 2010; Yu et al., 2006). Çalışmanın sonunda elde edilen PCI'nin eşik değerleri sayısal değerler olarak Tablo 6'da ve grafik olarak Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Kentsel yol ağında BSK kaplamalı üstyapılarda konforlu sürüş için PCI eşik değerleri (PCI thresholds for comfortable riding on HMA paved pavements in the urban road network)

Tablo 6. Konforlu sürüş için PCI eşik değerleri (PCI thresholds for comfortable riding)

Sürüş Hızı	Konforlu - Az konforsuz	Az konforsuz - Biraz konforsuz
20 km/sa	37	0
30 km/sa	62	11
40 km/sa	69	29
50 km/sa	77	41

5. Tartışma (Discussion)

5.1. Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması (Comparison of Modeling Approaches)

Bu çalışmada kullanılan veriler lojistik regresyon, bulanık mantık ve yapay sinir ağları teknikleri ile değerlendirilmiş ve önceki çalışmalarda sonuçları yayınlanmıştır (Kırbaş ve Karaşahin, 2018a, 2019). Bu çalışmada elde edilen sonuç değerler ile birlikte tüm modelleme yaklaşımları ile elde edilen eşik değerler bir veri yığını halinde Tablo 7'de görülmektedir.

Tablo 7. Farklı modelleme yaklaşımları ile bulunan eşik değerlerin karşılaştırılması (Comparison of threshold values found with different modeling approaches)

Sürüş Hızı	Konforlu - Az konforsuz			
	Doğrusal Regresyon Model	Lojistik Regresyon Model	Yapay Sinir Ağları	Bulanık Mantık
20 km/sa	37	43	42	40
30 km/sa	62	63	67	70
40 km/sa	69	70	72	79
50 km/sa	77	78	78	82
Sürüş Hızı	Az konforsuz - Biraz konforsuz			
	Doğrusal Regresyon Model	Lojistik Regresyon Model	Yapay Sinir Ağları	Bulanık Mantık
20 km/sa	0	0	0	0
30 km/sa	11	5	12	11
40 km/sa	29	36	30	39
50 km/sa	41	51	45	50

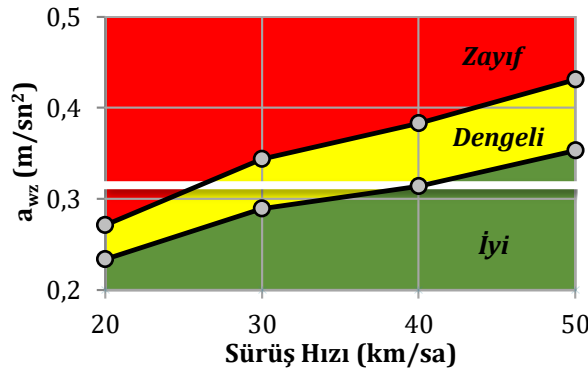
Tablo 7 detaylıca incelendiğinde hem konforlu ile az konforsuz sınırındaki hem de az konforsuz ve biraz konforsuz sınırındaki eşik değerlerde en düşük sonuç değer üreten yaklaşımın doğrusal regresyon modeli olduğu görülmektedir. Doğrusal regresyon modelini bulanık mantık yaklaşımı takip etmektedir. Lojistik regresyon ve sinir ağları noktasal yüksek ve alçak değerler üretmekle beraber nispeten birbirlerine yakın sonuçlar ürettikleri anlaşılmaktadır. Çeşitli modelleme yaklaşımlarının sonucu üretilen eşik değerlerin arasında üstyapıların

işletmecilerine en avantaj sağlayanının doğrusal regresyon modeli olması, literatürde de en çok bu yaklaşımda çalışmanın yapılmış olmasına ilave bir anlam da katmaktadır.

5.2. Üstyapı Performans Sınırlarının Konfor Karşılıkları (Comfort Correspondences of Pavement Performance Limits)

Üstyapıların mevcut performanslarının değerlendirme ölçeği işletmeci otoriteye göre farklılıklar göstermektedir. Dünyada birçok farklı ülkede farklı hizmet sınıflarındaki yollar için üstyapı performans kriteri kabulleri yapılmıştır. PAVER sistemi bu durumu iki farklı değerlendirme ölçeği (Standart ve geleneksel) ile sayısal sınırlara bağlamıştır. Çalışmada modelin sorgulanmasının ikinci aşamasında PAVER sisteminin öngördüğü Geleneksel PCI değerlendirme ölçeğine göre üstyapı performans kriteri sınır değerlerinin sürüş konforu karşılıkları belirlenmiştir. PAVER sisteminde BSK kaplamalı yol ağında hizmet veren yol üstyapılarının performans seviyelerini belirlemede kullanılan sınır değerleri ve sonuçları daha anlaşılır kılmak için uygulanan renk ölçeği sistemin de önerdiği haliyle Şekil 1’de görülmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen doğrusal regresyon modeline Şekil 1’de önerilen geleneksel ölçeğe ait PCI sınır değerleri ve 20 – 50 km/sa aralığında sürüş hızı değerleri girilerek sınır değerlere karşılık gelen sürüş konforu (a_{wz}) değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar Tablo 8’de görülmektedir. Model aracılığıyla üretilen ve Tablo 8’de sayısal değerleriyle ifade edilen sürüş konforunun (a_{wz}) sınır değerleri grafik olarak Şekil 7’de görülmektedir. Görsel değerlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla Şekil 1’de önerilen renk ölçeği Şekil 7’de kullanılmıştır. Şekilde konforlu ve Az konforsuz konfor seviyelerini ayıran 0.315 (m/sn^2) değeri beyaz çizgi ile ayrılarak hıza göre konfor seviyesindeki değişim daha belirginleştirilmiştir.



Şekil 7. Geleneksel PCI ölçeğinin sınır değerlerine karşılık gelen a_{wz} değerlerinin grafiksel gösterimi (Graphical representation of a_{wz} values corresponding to the limit values of the conventional PCI scale)

Şekil 7’den görüldüğü üzere PAVER sisteminin önerdiği geleneksel PCI ölçek değerlendirmesine göre ‘İyi’ üstyapı performans seviyesinde 40 km/sa sürüş hızına kadar konforlu bir sürüş sağlanabilmektedir. Bu seviyede 40 km/sa üzerindeki hızlarda konforlu seviyesinde bir sürüşün sağlanamadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, ‘Dengeli’ üstyapı performans seviyesinde yaklaşık 27 km/sa üzerindeki hızlarda konforlu seviyesinde bir sürüşün sağlanamadığı grafikten görülmektedir. İlaveten ölçeğe göre ‘Zayıf’ üstyapı performans seviyesinde değerlendirilen hız aralığında herhangi bir hızda konforlu bir sürüşün sağlanamadığı çok açıktır.

6. Sonuç (Conclusion)

Çalışmada, insan vücudunun maruz kaldığı titreşim yardımıyla açıklanan farklı sürüş konforu seviyelerinin PCI değerleri ile arasındaki matematiksel ilişkiler 20-50 km/sa hız aralığında araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı hizmet düzeylerine sahip sıcak asfalt kaplamalı yollarda (PCI değerleri bilinen) farklı sürüş hızlarında titreşim ölçümleri yapılmış ve aralarındaki ilişkiler doğrusal regresyon modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Üretilen modelin başarı düzeyi (R^2) ve istatistiksel yaklaşımlarla kabul edilebilir bir değerlendirme aracı olup olmadığı araştırılmıştır. Değerlendirmeler sonucu kabul edilebilir olduğu tespit edilen matematik model aracılığıyla, ISO standardının sınır değerleri ve farklı sürüş hızlarına göre PCI’nın sürüş konforunu etkileyen eşik değerleri belirlenmiş, sonuçlar tablo ve grafikler yardımıyla sunulmuştur. Bunun yanında PAVER sisteminin geleneksel değerlendirme ölçeğinde tavsiye edilen ve üstyapıları üç kategoriye ayıran PCI sınır değerlerine (PCI = 55 ve 70) karşılık gelen sürüş konforu değerleri belirlenmiştir. Tüm bu değerlendirmeler grafikler aracılığıyla görselleştirilerek çalışmanın okunabilirliğine katkı sağlanmıştır. Yapılan bu değerlendirmeler ışığında aşağıda belirtilen tespitler elde edilmiştir.

- Sürüş konforunun üstyapıların mevcut hizmet düzeylerinin yanında hıza da bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

- Konfor seviyesi düşük (az konforsuz, biraz konforsuz) olan (çok miktarda titreşime maruz kalınan) üstyapı kesimlerinde, PCI'nin sürüş konforu üzerinde daha etkili olduğu açıktır.
- Üstyapı performansının düşük olduğu PCI değerlerinde, 20 – 50 km/sa hız aralığında sürüş sırasında maruz kalınan konforsuzluğun hızın artışı ile iki katına kadar arttığı fark edilmektedir. Kentsel karayolu ağlarında hız denetiminin yetersiz olduğu yol kesimlerinde PCI'nin konforsuzluk üzerindeki etkisi daha şiddetli bir şekilde hissedilmektedir.
- Öte yandan, farklı sürüş hızlarında bulunan regresyon modelleri ve modellerin istatistik göstergeleri, PCI ile a_{wz} arasında doğrusal bir değişim olduğunu göstermektedir. Literatürdeki bazı çalışmaların yanında bu çalışmada da PCI ve a_{wz} arasındaki ilişkinin basitçe doğrusal regresyonla gösterilebileceğinin altı çizilmiştir.
- 20 – 50 km/sa hız aralığında PAVER sisteminin önerdiği geleneksel PCI ölçek değerlendirmesine göre 'İyi' üstyapı performans seviyesinde 40 km/sa sürüş hızına kadar konforlu bir sürüş sağlanabilmektedir. Bu seviyede 40 km/sa üzerindeki hızlarda konforlu seviyesinde bir sürüşün sağlanamadığı anlaşılmaktadır.
- 'Dengeli' üstyapı performans seviyesinde yaklaşık 27 km/sa üzerindeki hızlarda konforlu seviyesinde bir sürüşün sağlanamadığı görülmektedir. İlaveten ölçeğe göre 'Zayıf' üstyapı performans seviyesinde değerlendirilen hız aralığında herhangi bir hızda konforlu bir sürüşün sağlanamadığı çok açıktır.
- Dört farklı modelleme tekniği ile üretilen sonuç değerler karşılaştırıldığında, hem konforlu ile az konforsuz sınırındaki hem de az konforsuz ve biraz konforsuz sınırındaki eşik değerlerde en düşük sonuç değer üreten yaklaşımın doğrusal regresyon modeli olduğu görülmektedir. Doğrusal regresyon modelini bulanık mantık yaklaşımı takip etmektedir. Lojistik regresyon ve sinir ağları noktasal yüksek ve alçak değerler üretmekle beraber nispeten birbirlerine yakın sonuçlar ürettikleri anlaşılmaktadır.
- Çeşitli modelleme yaklaşımlarının sonucu üretilen eşik değerleri arasında üstyapıların işletmecilerine en çok avantaj sağlayanının doğrusal regresyon modeli olması, literatürde de en çok bu yaklaşımda çalışmanın yapılmış olmasına ilave bir anlam da katmaktadır.

Çalışmanın literatürde yapılan benzer çalışmalara göre en üstün yanı, simülasyon teknikleri ile üretilen sentetik veriler yerine gerçek saha ölçümleri ile elde edilen verilerin kullanılarak sonuçların üretilmesinin yanında PAVER sisteminin geleneksel PCI ölçeği sınırlarının sürüş konforu seviyeleri bulunmuştur.

Belirlenen bu limitlerin, üstyapıların işletiminden (bakım&onarım) sorumlu birimler için, sorumluluklarında bulunan yol ağlarındaki memnuniyeti tespit edebilmelerinde önemli bir araç olacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- 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.
- ASTM. 2016. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, ASTM D 6433-16. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- Cantisani, G., Loprencipe, G., 2010. Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. Journal of Transportation Engineering, 136 (9), 818-826.
- Carey Jr, W. N., Irick, P. E., 1960. The pavement serviceability-performance concept. Highway Research Board Bulletin, 250, 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 (3), 150.
- Fichera, G., Scionti, M., Garesci, F., 2007. Experimental Correlation between the Road Roughness and the Comfort Perceived In Bus Cabins. SAE Technical Paper, 352, 1-13.
- Fisher, R. A., 1922. The Goodness of Fit of Regression Formulae, and the Distribution of Regression Coefficients. Journal of the Royal Statistical Society, 85 (4), 597-612.
- Fuentes, L., Camargo, R., Martínez-Arguelles, G., Komba, J. J., Naik, B., Walubita, L. F., 2021. Pavement serviceability evaluation using whole body vibration techniques: a case study for urban roads. International Journal of Pavement Engineering, 22 (10), 1238-1249.
- Griffin, M. J., 2007. Discomfort from feeling vehicle vibration. Vehicle System Dynamics, 45 (7-8), 679-698.

- Griffin, M. J., 2012. Handbook of human vibration. London, UK: Academic press.
- Guanyu, W., Michael, B., Gurmel, G., 2020. Study of the Factors Affecting Road Roughness Measurement Using Smartphones. *Journal of Infrastructure Systems*, 26 (3), 04020020.
- 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. Geneva, Switzerland: ISO.
- İskender, E., Seymen A., Aksoy, A., 2022. Asfalt Kaplamalarda Tabaka Kalınlığının Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (1), 61-73.
- 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 (6), 831-837.
- Kırbaş, U., 2018. Konforlu Sürüş İçin Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi Sınır Değerlerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (2), 301-309.
- Kırbaş, U., Karaşahin, M., 2016. Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads. *Construction and Building Materials*, 116, 281-288.
- Kırbaş, U., Karaşahin, M., 2018a. Investigation of ride comfort limits on urban asphalt concrete pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 19 (10), 949-955.
- Kırbaş, U., Karaşahin, M., 2018b. Pavement performance levels causing human health risks. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 70 (10), 851-861.
- Kırbaş, U., Karaşahin, M., 2019. Determination of Pavement Performance Thresholds for Comfortable Riding on Urban Roads. *Journal of Testing and Evaluation*, 47 (1), 57-77.
- La Torre, F., Ballerini, L., Di Volo, N., 2002. Correlation Between Longitudinal Roughness and User Perception in Urban Areas. *Transportation Research Record*, 1806 (1), 131-139.
- Múčka, P., 2017. Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration. *Journal of Infrastructure Systems*, 23 (2), 04016029.
- Múčka, P., 2020. Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (4), 04020064.
- Múčka, P., 2021. International Roughness Index Thresholds Based on Whole-Body Vibration in Passenger Cars. *Transportation Research Record*, 2675 (1), 305-320.
- Nguyen, T., Lechner, B., Wong, Y. D., Tan, J. Y., 2019. Bus Ride Index – a refined approach to evaluating road surface irregularities. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (2), 423-443.
- Sayers, M. W., Karamihas, S. M., 1996. Interpretation of road roughness profile data: 166: Federal Highway Administration.
- Shahin, M. Y., 2005. Pavement management for airports, roads, and parking lots. New York: Springer.
- Terzi, S., Ahmed, M.H., 2020. Kırsal Yolların Üstyapı Performans Analizinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanılabilirliği: Isparta Örneği, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (3), 904-911.
- Wang, F., Easa, S., 2016. Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 44 (4), 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.
- Zhang, J., Wang, L., Jing, P., Wu, Y., Li, H., 2020. IRI Threshold Values Based on Riding Comfort. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (1), 04020001.