



Karayolu esnek yol üstyapılarında görülen yüzey bozulma türlerinin sürüş konforuna etkilerinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effects of surface distress types observed in the flexible road pavements on the ride comfort

Ufuk Kırbas^{1,*} , Mustafa Karasahin² 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

Öz

Çalışmada, bitümlü sıcak karışım üstyapılarda oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Bu amaçla, 98 adet kesimde yüzey bozulma verileri incelenmiş ve Paver sistemine göre analiz edilmiştir. Her bir bozulmanın türü, şiddeti ve miktarına göre üstyapı performansı üzerine olan olumsuz etkisi düşülen değer (DD) yaklaşımı ile normalize edilmiştir. Ayrıca üstyapı kesimlerinin mevcut performansını ifade eden Üstyapı Durum İndeksi (PCI) değerleri hesaplanmıştır. Ardından araç içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla aynı kesimlerde düşey doğrultudaki titreşim verileri kaydedilmiş ve ISO 2631-1 kodlu standarda göre analiz edilerek titreşim değerlendirme parametreleri elde edilmiştir. Taşıt içerisinde üç farklı noktada maruz kalınan titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmış ve kesimlerin PCI ile titreşim parametreleri arasındaki değişimler görselleştirilmiştir. Yama ve çökme türü bozulmaların diğerlerine nazaran sürüş konforu üzerinde daha fazla olumsuz etkisinin olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Esnek üstyapı, Sürüş konforu, Titreşim, Korelasyon

1 Giriş

Üstyapılarda hizmet düzeyi, yol kullanıcılarına istenen seviyede hizmet sunma kabiliyetini ifade etmektedir. Hizmet düzeyi, düzgün, konforlu ve güvenli sürüş sağlamak gibi üstyapıların her bir yapım amacı için ayrı ayrı tanımlanmaktadır [1]. Sürüş kalitesi ise taşıtla yapılan bir seyahatin tüm deneyiminin (hareket ortamı ve diğer faktörler dahil olmak üzere) sürücü ve yolcular tarafından algılanıp derecelendirildiği bir kavramdır [2]. Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS) teorisinin geliştirilmeye başlandığı yıllarda, uzmanlar tarafından karayolu üstyapılarının servis yeteneklerinin, sürüş konforunu temel alan panel değerlendirmelerle yapıldığı bilinmektedir. Fakat değerlendiren kişi her ne kadar konusunda uzman olsa da insan değerlendirmesi sırasında mutlak benzer sonuçlar

Abstract

The study investigated the similarities between the surface distresses in the bituminous hot mix pavements and the vibration values exposed in the vehicle. To this end, surface distress data in 98 sections were examined and analyzed according to the Paver system. The adverse effect on pavement performance was normalized with the deducted value (DD) approach according to the type, severity, and amount of each distress. In addition, the Pavement Condition Index (PCI) values expressing the current performance of the pavement sections were calculated. Then, with the help of accelerometers placed at three different points in the vehicle, namely the driver's seat, the middle axle and the right front passenger seat, vertical vibration data in the same sections were recorded and analyzed according to the ISO 2631-1 coded standard, and vibration evaluation parameters were obtained. The similarity values between the vibration parameters exposed at three different points in the vehicle and the DD data expressing the deterioration were investigated, and the changes between the PCI and vibration parameters of the sections were visualized. It has been observed that patching and depression type distresses negatively affect ride comfort than others.

Keywords: Flexible pavement, Ride comfort, Vibration, Correlation

üretilememesinden dolayı gelişim sürecinde kısıtları kurallarla tanımlanmış objektif sonuçlar verebilme kabiliyetine sahip muhtelif değerlendirme indeksleri ortaya çıkmıştır [3].

Ekonomik olması münasebetiyle üstyapının mevcut performansını belirlemede sıkça yüzey bozulma verilerinin tercih edildiği görülmektedir. Yüzey bozulma verilerini kullanarak geliştirilen indeksler arasında ağırlıklı olarak tercih edilenlerin üstyapı durum indeksi (PCI), üstyapı durum oranı (PCR), üstyapı yüzey değerlendirme ve oranlama sistemi (PASER) ve kalan servis ömrü (RSL) indekslerinin olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır [4-7]. Bunun yanında değerlendirme kriterlerinin geliştirildiği süreçte, yüzey profilinin bir türevi olan yüzey düzgünlüğü ile ilişkili olarak da çok sayıda indeks ortaya

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ufuk.kirbas@omu.edu.tr (U. Kırbas)

Geliş / Received: 20.09.2021 Kabul / Accepted: 24.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.998065

çıkılmıştır [1]. Değerlendirme kriterlerinin net olarak ortaya konulamaması, otoritelerce edinilen bilgi paylaşımlarının sağlanamaması gibi nedenlerle üstyapı düzgünlüğünün tüm dünyada standart haline getirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu anlayış sonucunda uluslararası düzgünlük indeksi (IRI) değerlendirme bileşeni geliştirilmiştir [8, 9].

Yapılan çalışmalardan araştırmacıların sıklıkla yüzey bozulma verileri (çatlaklar, deformasyonlar vb.) ile yüzey düzgünlüğü arasındaki ilişkileri değerlendirebilen modeller üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir. İlişkileri ortaya koyan bu modellerin yapay sinir ağları, bulanık mantık, veri madenciliği vb. ileri seviye matematik modelleme teknikleri kullanılarak oluşturulduğu görülmektedir. Esnek üstyapı bozulmaları ile IRI arasındaki ilişkileri ortaya koyan modellerin literatürde en sık karşılaşılan çalışma konusu olduğu açıklıkla görülmektedir [10-13].

Literatürde yüzey bozulma türlerinin üstyapıların performansını ifade etmede kullanılan sayısal gösterimler (indeks vb.) üzerindeki ağırlıklarını ya da etki derecelerini gösteren çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Kırbaş vd. timsah sırt çatlak, yama, ondülasyon ve çökmenin de aralarında bulunduğu 13 adet bozulma türünün bozulma şiddetlerini de dikkate alacak şekilde IRI üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir [14]. Literatürde yüzey bozulma türlerinin mevcut performans gösterimini ifade etmede kullanılan performans indeksi, pürüzlülük ifadesi, konforsuzluk değeri gibi sayısal gösterimler üzerindeki tekil etkilerinin araştırıldığı çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Aliyman bir yol kesiminde standart binek otomobil için üstyapının mevcut performansı ve sürüş hızı sürüş konforunu etkileyen en önemli iki anahtar faktördür [15]. Özellikle düşey eksen doğrultusunda taşıt içerisinde maruz kalınan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısı ve taşıtın seyahat ettiği yolda görülen yüzey bozulmaları olduğu bilinmektedir [16].

Çalışmada, sınırları belirlenmiş bir bitümlü sıcak karışım (BSK) yol üstyapısı kesiminde oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı performans seviyelerinde 20 adet karayolu esnek üstyapısında 98 adet farklı yol kesimde yüzey bozulma verileri kayıt edilmiştir. Bozulmalar esasları ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan Paver sistemine göre analiz edilmiş ve üstyapıların mevcut performansları üzerine olumsuz etkileri belirlenmiştir. Her bir bozulmanın türü, şiddeti ve miktarına göre üstyapı performansı üzerine olan olumsuz etkisini aynı eşdeğerde karşılaştırabilmek diğer bir değişle normalize etmek için düşülen değer (DD) (deduct value) yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca üstyapı kesimlerinin mevcut performansını ifade eden PCI değerleri hesaplanmıştır. Ardından araç içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla aynı yollarda düşey doğrultudaki titreşim verileri kaydedilmiştir. Veriler ISO 2631-1 kodlu standartta açıklanan prensiplere göre analiz edilerek titreşim değerlendirme parametre değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında her bir üstyapı kesimi

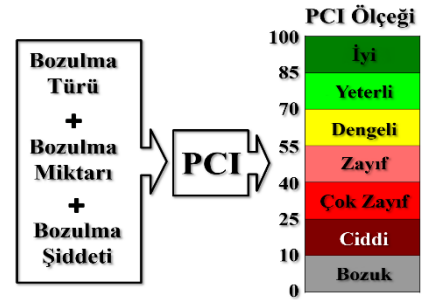
için taşıt içerisinde üç farklı noktada üretilen titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmıştır. Değerlendirmelerde her bir bozulma türü dikkate alındığı gibi yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere üç farklı bozulma nedenine göre bozulma türleri gruplanarak da değerlendirmeler tekrarlanmıştır. Ayrıca kesimlerin PCI değerleri ile titreşim parametreleri arasındaki değişim grafikler aracılığıyla açıklanmıştır.

2 Materyal ve metot

Çalışmanın bu bölümünde Paver sisteminin teorik esasları ile titreşim verilerinin değerlendirilmesinin matematik altyapısı açıklanmıştır.

2.1 ASTM D6433 standardı (Paver sistemi)

Paver sistemi, rastgele dağılım prensiplerine göre seçilen 225 ± 90 m² büyüklüğünde örnek alanlarda, ASTM D 6433 kodlu bozulma tanımlama kılavuzuna göre toplanan bozulma verilerinin değerlendirilerek, üstyapının mevcut performansını ortaya koyan bir değerlendirme metodudur. Değerlendirme düşük (D), orta (O) ve yüksek (Y) şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, örnek birim'in (ÖB) (sample unit) büyüklüğüne oranlanarak elde edilen değer bozulma türüne göre hazırlanmış DD 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 [3, 17]. PCI indeksinin bileşenleri ve değerlendirme ölçeği Şekil 1'de görülmektedir.



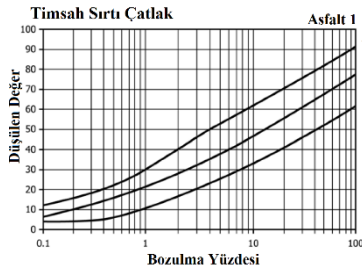
Şekil 1. PCI bileşenleri ve değerlendirme ölçeği [17]

Üstyapıların mevcut performansını tanımlamak amacıyla kullanılan ölçek kavramı Paver sisteminde mevcut durumu farklı renklerle betimlemeye de kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu değerlendirme ölçeğinde üstyapı performansını “iyi”, “yeterli” gibi sözel ifadelerle de tanımlamak mümkündür. Paver sisteminin altlık olarak kullandığı BSK kaplamalı yol ve otoparklar için kullanılan ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan bozulma türleri, arazi ölçüm birimi, şiddeti ve oluşma nedenleri Tablo 1’de görülmektedir.

Bozulmaların değerlendirmesinde D, O ve Y şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, ÖB'in büyüklüğüne oranlanarak ve 100 katı kadar çoğaltılarak bozulmanın örnek alan içindeki ağırlığı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ağırlık değerleri ve bozulma şiddet düzeyi bilgisi yardımıyla elde edilen değerler bozulma türüne göre hazırlanmış grafiklerden DD değerleri okunarak incelenen bozulmanın ÖB içerisinde toplam bozulmaya katkısı belirlenmektedir. Sistemin kullandığı bu DD yaklaşımı herhangi bir türdeki ve şiddet düzeyindeki bozulmanın sayısal karşılığını ifade etmektedir. Böylece farklı türde, farklı ölçüm miktarında ve farklı şiddet düzeyinde toplanan üstyapı bozulma verilerinin, birbirleri ile karşılaştırılabilir bir sayısal ortak payda da ifade edilebilmesi sağlanmaktadır. Böylece çok çeşitli bozulma türleri bir ortak birim çatısında birleştirilerek normalize edilmiş halleriyle yorumlamaya imkan tanınmaktadır. Örnek olması açısından standartta timsah sırt çatlaklar türü bozulmalar için önerilen DD grafiği Şekil 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Paver sistemi bozulma türleri [17]

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

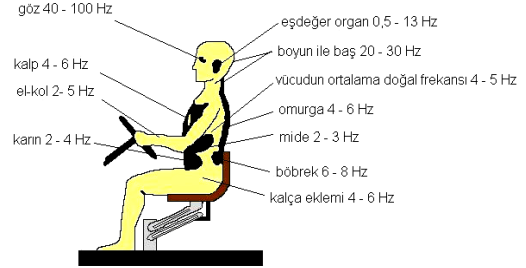


Şekil 2. DD grafiği örneği [17]

2.2 ISO 2631-1 standardı (Tüm vücut titreşimi)

Tüm vücut titreşiminin açıklanmasında insan vücudunun maruz kaldığı kabul edilebilir seviyeyi belirlemek için etkili olan başlıca faktörler ISO 2631-1 [18] standardında açıklanmaktadır. ISO 2631-1 standardında titreşimin insan üzerinde sağlık, konfor, algı kaybı (dikkat dağınıklığı vb.) ve hareket hastalıkları olmak üzere dört olası etkisinin bulunduğu vurgulanmaktadır. Uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucu sağlık, konfor ve algı kaybının 0,5 Hz ile 80 Hz

arasındaki titreşim frekanslarında olduğu standartlaştırılmıştır. Öte yandan, doğadaki tüm nesnelere gibi insan vücudundaki organların da doğal frekanslı titreşimleri bulunmaktadır. Bu nedenle, vücudun maruz kaldığı titreşim ile organların titreşimlerinin birbiriyle çakışması durumunda ortaya çıkan rezonans uzun süreli maruziyet seviyelerinde vücutta rahatsızlıklara sebep olmaktadır [19]. İnsan vücut parçalarının kabul edilen doğal frekans değerleri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. İnsan vücudunun doğal frekansları [20]

ISO 2631-1 standardında, ivme verilerinin 1/3 oktav bant frekans limitlerine göre Butterworth filtreleme tekniği kullanılarak sinyallerin analiz edilmesi tavsiye edilmektedir. Bu kapsamda, titreşim sinyalleri alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler kullanılarak ilgili bant frekanslarına dönüştürülerek ve dijital filtreleme yapılarak değerlendirilmektedir. ISO 2631-1 kodlu standartta belirtilen tanımlamalara uyarak tüm vücut titreşimini (TVT) kantitatif olarak değerlendirebilmek için, bir ivmeölçerin yolcu ile olan etkileşimini sağlamak amacıyla sürücünün tam altına (ischial tuberosity) bir kauçuk muhafaza diski içerisinde yerleştirilmiş olması gerekmektedir [18, 21].

Ölçümler sonucunda 1/3 oktav bantlarına ayrılan ivme değerlerine, frekans ağırlık filtrelerinde tanımlanan kazançların uygulanarak, ilgili eksen doğrultusunda ağırlıklandırılmış toplam değerleri (a_w) aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilmektedir. ISO 2631-1 standardında insan vücuduna aktarılan ivmelenmeyi en yalın haliyle ifade etmek için kullanılacak en uygun parametrenin a_w olduğu ifade edilmektedir. Parametrenin sayısal ifadesi Denklem (1)'de gösterilmektedir.

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Burada a_w frekans ağırlıklandırılmış ivmeyi, w_i ilgili frekans tanımlanan ağırlık faktörünü, a_i i inci 1/3 oktav bandı için ivmelenme karesel ortalama kökü değerini göstermektedir.

Öte yandan, titreşim değerlendirmesinde titreşimin TVT üzerinde ortalama değerini ifade eden a_w parametresinin yanında anlık şok değerlerini de gösterme konusunda kabiliyeti olan maksimum aktarılan titreşim değeri (MTVV) parametresi de kullanılmaktadır. Bir değerlendirme zaman aralığında kaydedilen tüm ivme değerlerini belirli kısa zaman aralıklarında değerlendirmesi münasebetiyle yol

kullanıcılarına aktarılan rastgele şok titreşimlerini tanımlanabilmektedir. Yapılan değerlendirme, belirlenen bir zaman aralığında oluşan ağırlıklandırılmış hareketli karesel ortalamanın ($a_w(t_0)$) maksimumu bulunarak MTVV parametresi üretilir. Söz konusu hareketli karesel ortalama değeri **Denklem (2)** ile ifade edilmektedir.

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Denklemden $a_w(t)$ anlık frekans ağırlıklandırılmış ivmelenme değerini, τ hareketli ortalama zaman dilimini, t ölçüm değişkenini, t_0 ölçüm zamanını ifade etmektedir [18]. ISO 2631-1 standardında hareketli ortalamanın zaman dilimi olarak 1 saniye seçilmesi tavsiye edilmektedir. Bu bilgiler ışığında MTVV parametresi **Denklem (3)**'de ifade edildiği şekilde elde edilmektedir.

$$\text{MTVV} = \text{maks}[a_w(t_0)] \quad (3)$$

2.3 Yol ağı ve bozulmaların değerlendirilmesi

Çalışmada, Samsun iline ait farklı hizmet seviyelerindeki 20 adet farklı şehir içi karayolunda 98 adet farklı kesimde, diğer bir deyişle yaklaşık olarak 55.750 m uzunluğundaki yolda 337.867 m² alanda Paver sisteminin öngördüğü ASTM D 6433 kodlu standart esasına uygun yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Aynı zamanda, Paver sistemine göre üstyapıların mevcut performanslarını gösteren PCI değerleri belirlenmiştir. Seçilen bu yollarda yüzey bozulma değerlendirmesi yapılması amacıyla Paver sistemi kurallarına uyan 1415 adet ÖB öngörülmüş olup 1375 adet ÖB'de yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Bu anlamda, öngörülen ÖB'lerin % 97,2'sinde yüzey bozulma verileri toplanmakla birlikte, incelenen tüm kesimlerde Paver sistemi tanımına göre proje düzeyi hassasiyetini sağlayacak sayıda ÖB'de yüzey bozulma değerlendirmeleri yapılmıştır. Yüzey bozulma değerlendirmelerinin yapıldığı yol ağı **Şekil 4**'de görülmektedir.



Şekil 4. Bozulma değerlendirmelerinin yapıldığı yol ağı (mavi çizgi)

Toplanan yüzey bozulma verileri ASTM D 6433 kodlu standardın teorik temelleri üzerine hazırlanmış olan Paver Paket Yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bunun yanında kesimlerin PCI değerlerinin PCI ölçeğine göre renklendirilmiş yol ağı durumu **Şekil 5**'de görülmektedir.



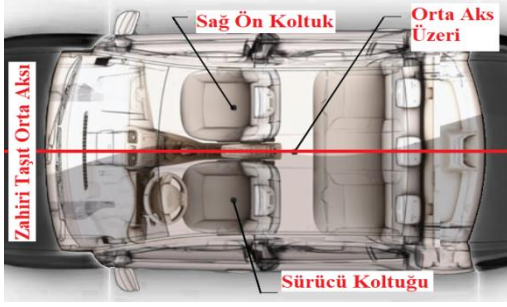
Şekil 5. Ağın PCI ölçeği değerlendirilmesi

2.4 Titreşim değerlendirmesi

Düşey eksen doğrultusunda oluşan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısından kaynaklı rotasyonel titreşimler ve taşıtın seyahat ettiği yolda görülen yüzey bozulmaları olduğu çok sayıda çalışmada vurgulanmaktadır [16, 22]. Bu bölümde kesimlerde görülen üstyapı bozulmalarının seyahat sırasında taşıta olan düşey doğrultudaki etkileri araştırılmıştır. Üstyapılarda görülen bozulmaların etkilerinin değerlendirilebilmesi için taşıt içerisinde üç farklı noktada seyahat halindeki düşey titreşimleri ölçülmüştür. Çalışmada amaç üstyapı bozulmalarından kaynaklı titreşim, başka bir deyişle konforsuzluğu araştırmak olduğu için yalnızca düşey doğrultudaki titreşimler değerlendirilmeye alınmıştır. Titreşim ölçümleri, Euro Car segment değerlendirmesine göre 4100-4600 mm uzunluk aralığında alt orta sınıf C segmentine giren bir araçla yapılmıştır.

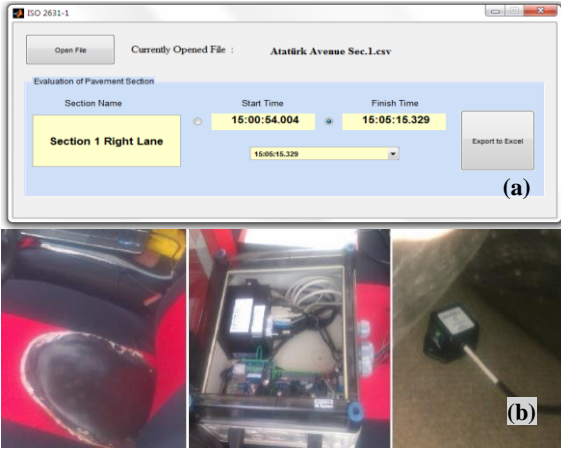
Titreşim değerleri üç adet ivmeölçer, GPS anteni ve veri toplama cihazından oluşan ivme ölçüm seti aracılığıyla toplanmıştır. Düşey titreşim verileri saniyede 1000 adet (1000 Hz) ve GPS verileri saniyede 1 adet aralıklarla toplanmış ve anlık olarak bilgisayara aktarılmıştır. Ölçümler sırasında ivmeölçerler, sürücü koltuğu (üzerinde sürücü var), sağ ön koltuk (üzerinde yolcu yok) ve orta aks üzeri (ayak hizası) olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilmiştir. Söz konusu ivme ölçümlerinin ISO 2631-1 kodlu standartta belirtilen tanımlamalara uyararak, yolcu ile olan etkileşimini değerlendirmek amacıyla bir ivmeölçer sürücünün tam altına yerleştirilmiş, diğerleri ilgili noktalara sabitlenmiştir. İvme ölçüm noktaları **Şekil 6**'da görülmektedir.

Bahsedilen titreşim ölçümlerinin kullanım amacı titreşim değerleri ile yüzey bozulmalar arasındaki ilişkileri ortaya koymak olduğu için ölçümlerden yolun boyuna profilinin değerlendirilmesi gerektiği sonucu çıkarılabilmektedir. Bu sebeple, titreşim ölçümlerinde genel prensip olarak ASTM E 950, E 1082 – 90, E 1926 – 08 vb. kodlu standartlarda tariflenen boyuna profil ölçüm prensipleri kabul edilmiştir. Söz konusu standartların genel yaklaşımı göz önüne alındığında ölçümlerin sabit bir şeritte, minimum 20 km/sa olmak üzere sabit bir hızda yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Taşıt içerisine ölçüm noktaları

Ölçülen titreşim değerleri çalışmayı yapan araştırmacılar tarafından MATLAB® ara yüzünde geliştirilen ve ISO 2631 standardında açıklanan analiz yöntemini kullanan yazılım yardımıyla değerlendirilmiştir. Saha araştırmaları için kullanılan titreşim ölçüm seti ve titreşim verilerinin değerlendirilmesi için geliştirilen yazılım Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. (a) titreşim değerlendirme yazılımı, (b) titreşim ölçüm seti

Ölçümlerin sağlıklı ve verimli bir şekilde tamamlanabilmesi ve yorumlanması için hangi sürüş hızda yapılması gerektiği araştırılmıştır. Bu amaçla, seçilen pilot ölçüm bölgesinde düşey ivme ölçümleri 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda her şerit için ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrıca, arazi çalışmaları sırasında 50 km/sa üzerinde hızlarda ölçüm yapabilmenin mümkün olmayacağı saptanmıştır. Pilot olarak seçilen değerlendirme yolunda ölçüm hızını değiştirmeden ölçümlerin yapılabilmesi için aynı platform ve şerit boyunca taşıtla durmadan devam edilerek ve hız mümkün olduğunca korunmaya çalışılarak ölçümler tamamlanmıştır.

Titreşim ölçümleri tanımlanan yol boyunca bütün halinde ve her bir trafik şeridi için ayrı ayrı ölçülmüştür. Sonrasında genellikle hemzemin kavşak noktaları kesim başlangıç ve sonu kabul edilerek yapılan ölçümler her bir kesim için parçalara ayrılmıştır. Bu anlamda, öncelikli olarak toplanan GPS ölçümleri coğrafi bilgi sistemi programında okunur hale getirilerek kesimlerin başlangıç ve sonunu gösteren noktalardaki zaman verileri okunarak, değerlendirme kesimleri birbirlerinden ayrılmıştır. Söz konusu çalışmanın

yapıldığı coğrafi bilgi sistemi uygulaması aşağıdaki Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Titreşim ölçümlerinin kesimlere ayrılması

Ölçümler sırasında kesim boyunca sabit hızın korunması esası gereğince, aracın ölçüm hızına ulaşması için kesimin başlangıcından yeter mesafe kadar önce ölçüme başlanıp, kesimin bitişinden itibaren durma mesafesi kadar sonra ölçüm sonlandırılmıştır. Bu anlamda, gerek birbirini takip eden kesimlerin ivme verilerinin ayrılmasında gerekse, hızlanma ve yavaşlama evrelerinde yapılan ölçümlerin kesimi gösteren ölçümlerden ayrılmasında yukarıda bahsedilen yazılımlar kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Ölçüm hızının tespiti

Titreşim verilerinin değerlendirilmesi konusunda esas kabul edilen ISO 2631-1 kodlu standarda göre herhangi bir kesimin düşey doğrultuda titreşim karakteristiğini a_w titreşim parametresinin yansıttığı ayrıca, standartta kabul edilen ölçüm noktası tarifine uyan, TVT kavramına göre konforsuzluğu en doğru tarifleyen noktanın sürücü koltuğundan yapılan ölçüm olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, en uygun ölçüm hızının belirlenmesi araştırmasında sürücü koltuğundan ölçülen titreşim verilerinden elde edilen a_w değerlerinin kullanılması en doğru seçim olarak kabul edilmiştir.

En uygun ölçüm hızını belirlemek amacıyla seçilen pilot değerlendirme yolunda Paver sistemini kesimlere ayırma prensibine uyularak saptanan 16 adet yol kesiminin her bir şeridinde, aynı güzergahlarda 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan düşey titreşim ölçümlerinin parametreleri ISO 2631-1'e göre hesaplanmış a_w değerleri bulunmuştur.

Öte yandan, yapılan değerlendirmenin geliştirilmesi için araçtan kaynaklı oluşan düşey titreşimlerin etkisinden kurtulmak amacıyla her bir ölçüm noktası için kalibrasyon parametreleri üretilmiştir. Söz konusu parametrelerin üretilmesinde temel amaç taşıtın mekanik yapısından kaynaklı oluştuğu varsayılan ve her durumda oluşması beklenen düşey titreşim değerlerinin belirlenmesidir. Böylece, herhangi bir yolda yapılan ölçüm sonrasında bulunan parametrik titreşim değerlerinden kalibrasyon için bulunan parametrik titreşim değerlerinin çıkarılması ile düzeltilmiş titreşim parametresinin bulunacağı kabul edilmiştir. Söz konusu değerlendirmenin a_w parametresi için matematik ifadesi Denklem (4)'de görülmektedir. Çalışmada, kesimlere ait düşey titreşim verilerinin

belirlenmesinde, titreşim ölçümleri yapılarak her bir kesime ait hesaplanan titreşim parametrelerinden her bir hız için üretilen kalibrasyon parametrelerinin çıkartılması sonucu bulunan düzeltilmiş titreşim parametrelerinin (düz.a_w) kullanılması ve buna göre değerlendirmelerin yapılması kabul edilmiştir.

$$\text{düz.a}_w = a_{w \text{ ham}} - a_w \text{ kalibrasyon} \quad (4)$$

En uygun ölçüm hızını belirlemek amacıyla düşey titreşim parametresi ile deneme kesimlerinin üstyapı performansı arasındaki yakınlık araştırılmıştır. İlişkilerin araştırılmasında öncelikli olarak doğrusal korelasyonlara bakılmıştır. Ardından korelasyondan başka daha birçok değerlendirme yapılmakla birlikte dikkate değer bir başka ilişkinin logaritmik ilişki ile kurulabildiği tespit edilmiştir. Gerek doğrusal ilişkili korelasyon, gerekse logaritmik ilişkideki regresyon değerlendirilmesinde en yüksek benzerlik 40 km/sa ölçüm hızında yakalandığı görülmüştür. Titreşim parametresi ile PCI arasındaki doğrusal korelasyon ve logaritmik ilişkideki regresyon değerleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. düz.a_w – PCI arasındaki benzerlik

Ölçüm Hızı	20 km/sa	30 km/sa	40 km/sa	50 km/sa
Korelasyon	-0.909	-0.931	-0.966	-0.913
Logaritmik R ²	0.832	0.874	0.917	0.799

Ölçüm değerlendirmelerinin yapıldığı ve çalışmanın ilerisi için kararların alınması gerektiği tam bu noktada, standardın en uygun ölçüm yeri olarak tanımladığı üzerinde sürücü varken sürücü koltuğu üzerinden yapılan titreşim ölçümlerinde sürücünün ağırlığının değerlendirme sonuçlarını etkileyip etkilemediği sorgulanmıştır. Bu amaçla, yüzey düzgünlük karakteristiğinin homojen olduğu kabul edilebilecek bir üstyapı kesiminde farklı ağırlıklı sürücülerle de ölçümler yapılmıştır. Diğer bir deyişle, yalnızca sürücü ağırlıklarının titreşim parametreleri üzerine olan etkilerini değerlendirebilmek amacıyla üstyapı PCI değeri 100 kabul edilebilecek durumda olan bir üstyapı kesiminde 58 kg, 80 kg ve 113 kg ağırlığındaki sürücülerle 20, 30, 40 ve 50 km/sa ölçüm hızlarında aynı güzergahta çok sayıda ölçümler yapılmış ve titreşim parametreleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bu titreşim parametreleri hem parametrik hem de parametrik olmayan istatistik yöntemlerle değerlendirilmiş, değerler arasında istatistik olarak anlamlı bir fark olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan tüm istatistik değerlendirmelerde SPSS paket programı kullanılmıştır. Öncelikli olarak, parametrik olmayan yöntemlerle değerlendirme yapılmıştır. Bu anlamda, parametrik olmayan verilere sahip ikiden fazla grubun ölçümlerinin karşılaştırılmasında Kruskal-Wallis H Testi kullanılmıştır. 58, 80 ve 113 kg olmak üzere farklı sürücü ağırlıklarında ve 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan ölçümler sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön koltuk ölçüm noktalarının her biri için istatistik olarak değerlendirmiştir. Değerlendirme sonucunda, yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda

yapılan ölçümlerde üretilen titreşim parametrelerinin farklarının istatistik olarak anlamsız olduğu saptanmıştır.

Bir değerlendirme de parametrik ANOVA testi kullanılarak yapılmıştır. Bilindiği üzere istatistik değerlendirmelerde parametrik değerlendirmelerin yapılabilmesi için verilerin homojen olması ve normal dağılıma uyması şartları aranmaktadır. Bu nedenle, öncelikli olarak varyans testi homojenliğine göre yapılan değerlendirme sonucu bulunan değerler 40 ve 50 km/sa hızlarda sürücü koltuğu ve orta aks üzerinde yapılan ölçümlerden üretilen titreşim parametrelerinin homojen olduğu görülmüştür. Ayrıca testin tamamlanmasında ikinci şart olarak kabul edilen normal dağılıma uygunluk da değerlendirilmiştir. Bu manada tüm titreşim parametrelerinde (a_w, MTVV) Tek Örneklem Kolmogorov Smirnov Testi uygulanarak tüm sürüş hızlarında ve tüm ölçüm noktalarında 58, 80 ve 113 kg ağırlığındaki sürücüler için üretilen verilerin normal dağılıma uyduğu sonucuna ulaşılmıştır. Parametrik istatistik değerlendirme yöntemi olan ANOVA analizi sonucunda da tıpkı parametrik olmayan istatistik analiz Kruskal-Wallis H Testi değerlendirmesi sonucunda olduğu gibi yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan ölçümlerde üretilen titreşim parametrelerinin farklarının istatistik olarak anlamsız olduğu saptanmıştır. İstatistik değerlendirmeler sonucu yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda sürücü ağırlığının önemsiz olduğu kabul edilebilmektedir.

Yapılan tüm bu analizler sonucunda en uygun ölçüm hızı olarak titreşim parametresi ile PCI arasında benzerliğin en yüksek olduğu 40 km/sa sürüş hızı kabul edilmiştir. Üstyapının yuvarlanma yüzeyinden kaynaklı oluşan titreşimlerin değerlendirildiği çalışmalar detaylıca incelendiğinde en uygun sürüş ölçüm hızını belirlemek için bu bölümde anlatılan prosedüre benzer herhangi bir ön hazırlığın yapılmadığı dikkat çekmektedir. İlâveten literatürde sürüş esnasında taşıtın mekanik aksamlarının dönme etkisiyle oluşan titreşimi minimize edecek bir kalibrasyon düzeltmesinin yapılmadığı ise çok açıktır. Bu çalışmanın en özgün taraflarından bir tanesi olarak en uygun sürüş hızının belirlenmesi ve taşıt etkilerini minimize eden kalibrasyon sürecinin işletilmesi olduğu söylenebilmektedir.

3.2 Bozulma türleri ile titreşim parametreleri arasındaki benzerlikler

Çeşitli değerlendirmeler sonucunda en uygun ölçüm hızının 40 km/sa olması gerektiği ve 80 kg ağırlığındaki sürücü ile ölçümlerin yapılmasının bir farklılık arz etmeyeceğinin istatistik olarak tespitinden sonra Paver sistemine göre değerlendirilen 20 adet karayolunda yapılan düşey ivme ölçümleri ISO 2631-1 standardı esaslarına göre değerlendirilmiştir. 98 adet kesimin her birinin her ölçüm noktası için titreşim parametreleri hesaplanmıştır.

Daha önceden vurgulandığı üzere yapılan analizler sonucunda ölçüm hızı olarak 40 km/sa hızın en uygun hız olduğu belirlenmiştir. Fakat uygulamada, şehirçi trafik koşullarında, belirli bir şeritten tam olarak belirli bir hızda gitmenin trafik, yolların boyuna eğimi gibi geometrik kısıtlar vb. muhtelif sebeplerle sabit hızın korunmasının mümkün olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, ölçüm hızı 40±5 km/sa

olarak kabul edilmiştir. Ölçümler çok şeritli platformlarda her bir trafik şeridi için kesim başlangıç ve bitiş noktaları arasında ayrı ayrı ölçülmüş, titreşim parametreleri hesaplanmış, hesaplanan parametrelerin ortalaması alınarak kesimin titreşim parametre değerleri elde edilmiştir. Ölçümler sırasında, cihaz dahilinde bulunan konum belirleme anteni ile bir saniye aralıkla konum verilerinin yanında hız verileri de kaydedilmiştir. Dolayısıyla değerlendirmede, 1 sn aralıklarla toplanan araç hızının aritmetik ortalaması kesimin ortalama hızı olarak kabul edilmiş ve kesimlere ait km/sa biriminde hız bileşenleri elde edilmiştir. Yapılan bazı çalışmalardan hız bileşeninin düz.a_w ile birlikte değerlendirmesinde en uygun ilişkinin logaritma e tabanında karşılığı alınarak düz.a_w parametresine bölümü ile yakalanabildiği öngörülmüştür.

Çalışmanın veri toplama ve parametrik değerleri elde etme aşamasından sonra veriler arasındaki anlamlı ilişkiler araştırılmıştır. Bu maksatla öncelikli olarak yüzey bozulma verileri ile düzeltilmiş titreşim parametrelerinden geneli yansıtan düz.a_w parametresi arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Öncelikli olarak, düz.a_w parametresi ile hız faktörü değerlendirmeye katılarak ya da katılmaksızın PCI değerleri arasındaki doğrusal korelasyon değerleri incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki Tablo 3’de görülmektedir.

Tablo 3. Titreşim parametresi – PCI korelasyon ilişkisi

	düz.a _w - PCI	düz.a _w / ln (Hız) - PCI
Sürücü Koltuğu	-0.9199	-0.9226
Orta Aks Üzeri	-0.9036	-0.9037
Sağ Ön Koltuk	-0.8305	-0.8334
Ortalamalar	-0.8955	-0.8978

Değerlendirme sonrasında, PCI değerleri ile düz.a_w parametreleri arasında doğrusal ilişkinin negatif doğrultuda oldukça yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek korelasyonun sürücü koltuğu üzerinde olduğu bunu sırasıyla orta aks üzeri ve sağ ön koltuğun izlediği saptanmıştır. Ayrıca, değerlendirmeye hız bileşeni dahil edildiğinde korelasyonun çok az miktarda arttığı belirlenmiştir. SPSS programında yapılan değerlendirmede %95 hassasiyet oranında korelasyonlar anlamlı çıkmıştır. Bir başka değerlendirme de Paver sisteminin kabul ettiği yük oluşma nedenlerine göre yapılmıştır. Bilindiği üzere Paver sistemi taşıt dingil yüklerinin tasarlanandan fazla olmasından kaynaklı bozulmaları ‘Yük’ türü, gece ve gündüz sıcaklık farkı ile yaz kış koşulları iklim etkilerine hazırlıklı olmayan malzeme seçiminden kaynaklı bozulmaları ‘İklim’ türü, imalat hataları, tasarım hataları, uygulama hataları, tuzlama çalışmaları vb. kaynaklı bozulmaları ‘Diğer’ türü bozulmalar olarak 3 ana alt başlıkta birleştirmiştir.

Paver sistemi hesap esaslarında her bir bozulmanın genel sonuca etkisi DD ile ortak paydada ifade edilmektedir. Başka bir deyişle sistemde DD kullanılarak, saha çalışmalarında farklı ölçüm birimlerinde (uzunluk, alan vb.), farklı boyutlarda, farklı şiddet düzeylerinde (D, O, Y) toplanan bozulmalar aynı birim ile sayısal olarak ifade edebilme imkanı sağlamaktadır. Böylece, Yük, İklim ve Diğer türü bozulma sınıflarına giren her bir bozulmanın DD değerleri

hesaplanarak titreşim parametreleri ile benzerliği araştırılmıştır. Sınırları tanımlanmış bir yol kesiminde titreşim her bir trafik şeridi için kesim boyunca ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle titreşim parametreleri değerlendirilen kesimin bütününe yansıtılmaktadır. Oysaki bozulma verilerine bağlı olarak bulunan DD değerleri kesimin büyüklüğünden bağımsız yalnızca değerlendirilen bozulmanın olduğu bölgeyi yansıtılmaktadır. Bu nedenle, bozulmaların DD verileri bozulma miktarının ÖB alanına bölünmesiyle normalize edilmesinden dolayı titreşim parametreleri gibi kesimin bütününe ifade edebilmektedir. Bu bölme işlemi sonucunda bulunan değerlerin DD karşılıkları ile (bkz. örnek Şekil 2) titreşim parametreleri arasındaki Pearson doğrusal korelasyonları araştırılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda analiz edilen korelasyon değerleri Sürücü Koltuğu (S.K.), Orta Aks Üzeri (O.A.Ü.) ve Sağ Ön Koltuk (S.Ö.K.) ölçüm noktalarında ve bu üç değer aritmetik ortalaması (Ort.) alınarak bulunan değerlerde yük türü bozulmalar için Tablo 4’de, iklim türü bozulmalar için Tablo 5’de ve diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalar için Tablo 6’da görülmektedir. Tablolarda %95 hassasiyet oranında korelasyonları anlamlı olan ilişkiler gri dolgulu hücrelerle gösterilmiştir.

Tablo 4. Titreşim – Yük Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a _w - Yük T.B.	a _w / ln (Hız) - Yük T.B.	MTVV - Yük T.B.	MTVV / ln (Hız) - Yük T.B.
S.K.	0.568	0.581	0.213	0.224
O.A.Ü	0.634	0.644	0.242	0.252
S.Ö.K	0.606	0.615	0.228	0.236
Ort.	0.627	0.638	0.245	0.255

Tablo 5. Titreşim – İklim Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a _w - İklim T.B.	a _w / ln (Hız) - İklim T.B.	MTVV - İklim T.B.	MTVV / ln (Hız) - İklim T.B.
S.K.	0.201	0.211	-0.102	-0.097
O.A.Ü	0.266	0.274	-0.089	-0.084
S.Ö.K	0.364	0.372	-0.004	0.001
Ort.	0.317	0.326	-0.049	-0.044

Tablo 6. Titreşim – Diğer Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a _w - Diğer T.B.	a _w / ln (Hız) - Diğer T.B.	MTVV - Diğer T.B.	MTVV / ln (Hız) - Diğer T.B.
S.K.	0.662	0.672	0.245	0.252
O.A.Ü	0.669	0.674	0.263	0.270
S.Ö.K	0.699	0.705	0.302	0.308
Ort.	0.706	0.714	0.300	0.307

Oluşma nedenlerine göre bozulmalar Tablo 1’de sınıflanmıştır. Analizlerden anlaşıldığı üzere yük türü bozulmalar ile diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalar a_w ve MTVV titreşim parametrelerinde hız faktörünü dahil ederek ya da etmeksizin tüm titreşim ölçüm noktalarında korelasyonlar anlamlı çıkmıştır. İklim türü bozulmalarda ise yalnızca a_w parametresi ile olan ilişkiler anlamlı çıkmıştır.

Genel olarak anlık şok değerlerini daha çok yansıttığı kabul edilen MTVV parametresinin korelasyon değerlerinin a_w parametresinin yanında çok daha zayıf kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum genel konforsuzluğu ifade eden a_w parametresinin MTVV parametresine nazaran yüzey bozulmaları ile ilişkileri ifade etmede çok daha etkili olduğunu akıllara getirmektedir. Standartta önerilen yaklaşıma göre MTVV parametresi a_w parametresinin ölçüm süresi boyunca 1 sn aralıklarla değerlendirilmesi ve değer olarak en büyüğünün alınması ile elde edilmektedir. Anlaşıldığı üzere 40 km/sa gibi sürüş hızı dikkate alındığında önemli miktarda titreşime sebep olan bozulmalardan dahi çok kısa süre etkilenildiği için kısa aralıklarla değerlendirme yaklaşımı böyle bir analizde sonuç üreten bir yaklaşım olmayacaktır. Ayrıca standardın tavsiyesine göre 1 sn'den daha kısa aralıkla veriler değerlendirildiğinde çok uç değerlerde sonuçlar alınacağından gerçekçi sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle çalışmanın ileriki aşamasında karşılaştırmalarda titreşim parametresi olarak a_w kullanılmıştır.

Değerlendirmeler sonucunda, genel olarak yüksek korelasyonun diğer sebeplerden ve yükten kaynaklı bozulmalarda olduğu iklimden kaynaklı bozulmaların korelasyonun ise daha az olduğu saptanmıştır. Bu durumun sebebi olarak, boyuna ve enine çatlak, blok çatlak, soyulma ve sökölme vb. iklimden kaynaklı bozulmaların yüzey düzgünlüğü üzerine dolayısıyla düşey titreşime etkilerinin az oluşu olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Göreceli olarak yükten kaynaklı bozulmalarda orta aks üzerindeki ölçümlerde korelasyon daha yüksek iken diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalarda tüm ölçüm noktalarının korelasyonlarının birbirlerine yakın olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca diğer sebeplerden kaynaklanan bozulmaların korelasyonlarının yük sebebi bozulmalara nazaran az miktarda da olsa daha fazla olduğu görülmektedir. altyapı yetersizlikleri, imalat hataları gibi sebeplerle oluşan bozulmalar yük ve iklim gibi tasarım hataları sonucunda oluşan bozulmalara nazaran daha çok konforsuzluğa sebep olmaktadır. Örneğin çökme gibi üst yapıyı destekleyen tabakaların ve altyapının yetersiz sıkışmasından kaynaklanan bozulmaların, öte yandan düzgün tanzim edilemeyen yamaların konforsuzluk üzerindeki etkileri büyüktür. Genel itibarıyla farklı ölçüm noktalarındaki korelasyonlar arasındaki farkların küçük olduğu ve hız bileşeninin değerlendirmeye katılmasıyla da korelasyonlarda önemli farkların oluşmadığı açıkça görülmektedir.

Benzer bir değerlendirme de ayrı ayrı her bir bozulma türü için yapılmıştır. Tablo 1'de bozulmalar ASTM D 6433 standardına göre bozulma kodu altında numaralandırılmıştır. Analizlerde bozulmalar burada bahsi geçen kodlarla ifade edilmiştir. Değerlendirilen yol ağında 8 (yansıma çatlak) ve 9 (kenar/banket düşüklüğü) kodlu bozulmalar yer almadığı için analizlerde bu bozulmalara yer verilmemiştir. Değerlendirmeler sonucunda analiz edilen Pearson korelasyon değerleri her bir bozulma için Tablo 7'de görülmektedir. Tabloda %95 hassasiyet oranında korelasyonları anlamlı olan ilişkiler gri dolgulu hücrelerle gösterilmiştir.

Tablo 7. Titreşim – bozulmaların korelasyon ilişkisi

	$a_w - 1$	$a_w - 2$	$a_w - 3$	$a_w - 4$	$a_w - 5$
S.K.	0.524	0.017	0.098	0.141	0.406
O.A.Ü	0.569	-0.001	0.147	0.197	0.302
S.Ö.K	0.605	0.086	0.077	0.233	0.444
Ort.	0.600	0.050	0.104	0.213	0.410
	$a_w - 6$	$a_w - 7$	$a_w - 8$	$a_w - 9$	$a_w - 10$
S.K.	0.537	-0.029	-	-	0.165
O.A.Ü	0.550	-0.059	-	-	0.144
S.Ö.K	0.590	-0.091	-	-	0.045
Ort.	0.588	-0.074	-	-	0.098
	$a_w - 11$	$a_w - 12$	$a_w - 13$	$a_w - 14$	$a_w - 15$
S.K.	0.537	0.132	0.434	0.363	0.180
O.A.Ü	0.587	0.195	0.495	0.343	0.216
S.Ö.K	0.566	-0.007	0.511	0.396	0.068
Ort.	0.585	0.078	0.509	0.388	0.134
	$a_w - 16$	$a_w - 17$	$a_w - 18$	$a_w - 19$	$a_w - 20$
S.K.	0.068	0.191	0.315	-0.165	0.332
O.A.Ü	0.036	0.166	0.183	-0.136	0.388
S.Ö.K	-0.056	0.061	0.187	-0.159	0.535
Ort.	-0.008	0.118	0.216	-0.159	0.472

Korelasyon değerleri sayısal büyüklükler olarak incelendiğinde herhangi bir titreşim ölçüm noktasında herhangi bir bozulma türünde çok yüksek değerlerde korelasyon büyüklüklerinin oluşmadığı görülmektedir. Saha gözlemlerinde, bir üst yapı kesiminin yüzeyinde bir bozulma türünün kendi başına oluşmadığı, birbirini tetikleyen etkilerle aynı oluşma mekanizmasına bağlı olarak bozulmaların birbirlerine yakın sıklıklarda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada her ne kadar bozulma türlerini DD normalleştirme yaklaşımı ile birbirlerinden ayırarak bozulma türlerinin konforsuzluğa etkileri açısından bir farklılık yaratılmak istense de değerlendirilen yol kesimlerinde bozulma türlerinin birbirlerini etkilemeleri tekil değerlendirmedeki analizlerin başarısını zayıflatmaktadır.

Yapılan analizlerde 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama), 13 (oyulma), 14 (demiryolu geçişi) ve 20 (ayırışma) kodlu bozulmalarda tüm ölçüm noktalarında bozulmaların titreşim parametreleri ile dolayısıyla konforsuzlukla korelasyonlu olduğu ve bu korelasyonun istatistik olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Titreşim parametresi ile korelasyonları anlamlı çıkan bu bozulma türleri oluşma nedenlerine göre değerlendirildiğinde her üç oluşma nedenine göre de bozulmaların titreşim parametresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyon değerleri 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama) ve 13 (oyulma) kodlu bozulmalarda görülmektedir.

Analiz değerlerinden sürücü koltuğunda hissedilen en büyük konforsuzluk sebebinin eşit korelasyon değerleriyle 6 (çökme) ve 11 (yama) türü bozulmalardan kaynaklandığı görülmektedir. Çökme (6) türü bozulmalarda taban yetersizliğinden oluşan oturmalarla rögar kapağı gibi yer altı sistemlerinin de dayanım yetersizliklerinin de etkili olduğu söylenebilir. Bu durum özellikle yer altı sistemlerinin kurallarına uygun yapılması yol üst yapısını tasarımına uygun yapmak kadar önemli olduğunu düşündürmektedir.

Ayrıca esnek üstyapıların en avantajlı çözümlerinden olan yamalar (11) teknik kurallarına uygun yapılmazsa ciddi miktarda konforsuzluk sebebidir. Sadece yama ve çökme türü bozulmalar ülkemizde yerel yönetimlerin üstyapı ve altyapıların yönetilmesindeki bakış açılarına ışık tutmaktadır. Aracın orta alanda ayak seviyesinde (O.A.Ü.) en büyük konforsuzluk yine yama (11) türü bozulmalar ile en yüksek oranda ilişkili iken üzerinde sürücünün olmadığı boş koltukta ise (S.Ö.K.) en yüksek konforsuzluk timsah sırtı çatlaklarla (1) ilişkili olmaktadır. Bu üç ölçüm noktasındaki üretilen analiz değerlerinin ortalaması alındığında ise yine timsah sırtı çatlakların (1) konforsuzlukla yakın ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Literatürde yüzey bozulmalar ile konforsuzluk arasındaki ilişkiler ancak sürüş konforunu yansıttığı kabul edilen IRI parametresi kullanılarak yapılmıştır. Sınırlı sayıda yapılan çalışmalardan Mubarakı [23] çalışmasında boyuna ve enine çatlaklarda (10) 0.4, tekerlek izi türü bozulmalarda (15) 0.39 ve ayrışma türü bozulmalarda (2) ise 0.4 gibi benzerlikler bulunduğu görülmektedir. Bu çalışma ile ayrışma türü bozulmalarda benzerlikler birbirine yakın görülmektedir. Literatürde çalışmalar sıklıkla bozulma verilerini IRI değerini tahmin eden modellerde bağımsız değişken olarak kullandıkları için bu çalışmadaki analiz sonuçlarını karşılaştırabilecek bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Benzer şekilde bozulmaların değerlendirilmesinde genel itibarıyla farklı ölçüm noktalarındaki korelasyonlar arasındaki farkların küçük olduğu ve hız bileşeninin değerlendirmeye katılmasıyla da korelasyonlarda önemli farkların oluşmadığı açıklıkla görülmektedir. Ölçüm hızının da değerlendirilmeye katılması ile elde edilen korelasyon değerleri Tablo 8’de görülmektedir.

Tablo 8. Titreşim ve ölçüm hızı – bozulmaların korelasyon ilişkisi

	$a_w / \ln(Hız)-1$	$a_w / \ln(Hız)-2$	$a_w / \ln(Hız)-3$	$a_w / \ln(Hız)-4$	$a_w / \ln(Hız)-5$
S.K.	0.540	0.012	0.102	0.157	0.405
O.A.Ü	0.582	-0.007	0.150	0.212	0.298
S.Ö.K	0.615	0.082	0.080	0.245	0.442
Ort.	0.612	0.046	0.107	0.227	0.408
	$a_w / \ln(Hız)-6$	$a_w / \ln(Hız)-7$	$a_w / \ln(Hız)-8$	$a_w / \ln(Hız)-9$	$a_w / \ln(Hız)-10$
S.K.	0.535	-0.029	-	-	0.159
O.A.Ü	0.545	-0.059	-	-	0.137
S.Ö.K	0.589	-0.092	-	-	0.041
Ort.	0.586	-0.074	-	-	0.092
	$a_w / \ln(Hız)-11$	$a_w / \ln(Hız)-12$	$a_w / \ln(Hız)-13$	$a_w / \ln(Hız)-14$	$a_w / \ln(Hız)-15$
S.K.	0.549	0.147	0.436	0.362	0.186
O.A.Ü	0.596	0.209	0.494	0.341	0.221
S.Ö.K	0.574	0.004	0.513	0.396	0.073
Ort.	0.595	0.090	0.510	0.387	0.140
	$a_w / \ln(Hız)-16$	$a_w / \ln(Hız)-17$	$a_w / \ln(Hız)-18$	$a_w / \ln(Hız)-19$	$a_w / \ln(Hız)-20$
S.K.	0.061	0.185	0.318	-0.152	0.335
O.A.Ü	0.030	0.160	0.184	-0.123	0.388
S.Ö.K	-0.060	0.057	0.188	-0.149	0.537
Ort.	-0.013	0.113	0.217	-0.147	0.474

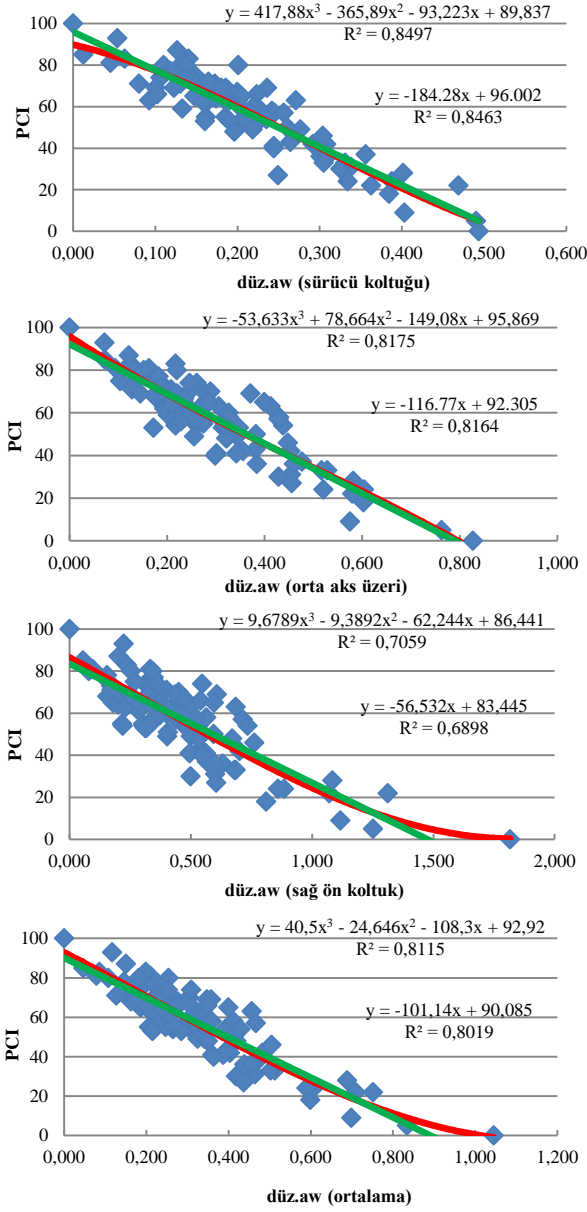
Bozulma türlerin göre yapılan korelasyon değerlendirmesinde MTVV parametresinin kesimin genelini yansıtmak konusunda yetersiz kaldığı öngörüsüyle her bir bozulma için korelasyon değerlendirmeleri MTVV parametresi için tekrarlanmamıştır.

Literatür detaylıca incelendiğinde yüzey bozulmalarının sürüş konforuna etkileri ya da benzerliklerini araştıran çalışmaların sınırlı olduğu göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın benzeri bozulmaları DD gibi bir parametre ile normalleştiren ve birbirine benzeten aynı zamanda doğrudan bir konfor parametresi ile karşılaştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Üstelik burada olduğu gibi esnek üstyapılar için ASTM D 6433 standardındaki çoğu bozulma türünü değerlendirmeye alan, bozulmaları oluşma nedenlerine göre gruplayan ve farklı noktalardaki titreşim değerleri ile karşılaştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmanın özgün tarafının bu noktalar olduğunun altının çizilmesi gerekmektedir.

3.3 Titreşim parametreleri ve PCI arasındaki matematiksel ilişkiler

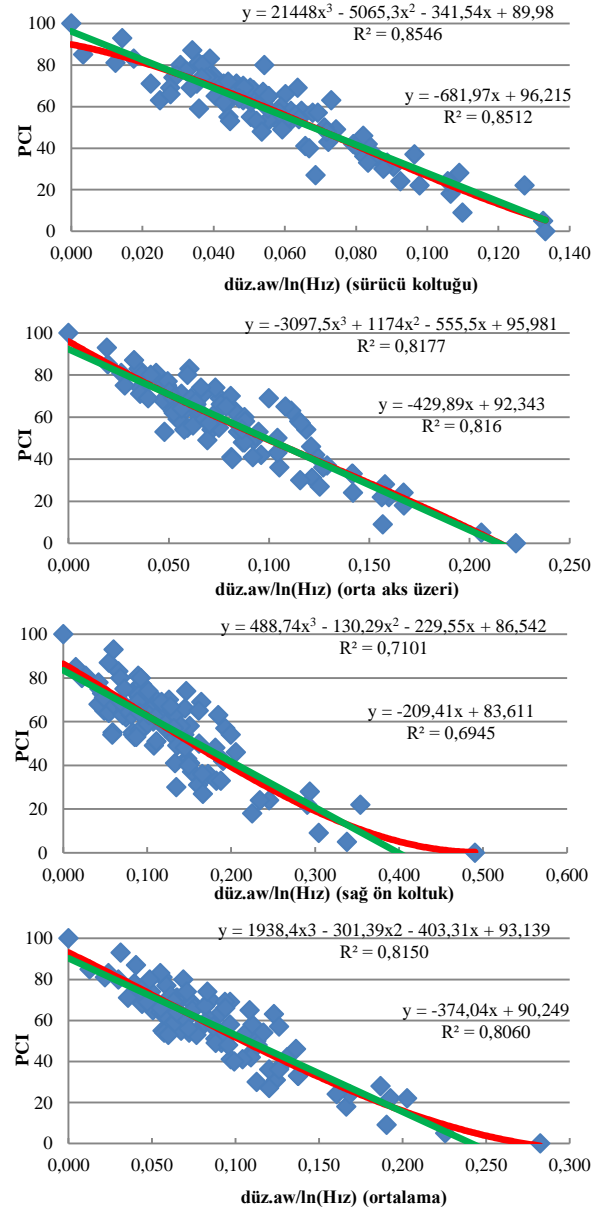
Doğrusal ilişkileri tanımlayan korelasyonlardan başka daha birçok değerlendirme yapılmakla birlikte dikkate değer bir başka ilişkinin 3. derece polinom ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.

Değerlendirmeler sonucunda benzerliklerin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Öte yandan, benzerliklerin hız bileşeninin değerlendirmeye alındığı durumda, alınmadığı durumdan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, en yüksek ilişkinin sürücü koltuğunda yapılan ölçümlerde olduğu görülmektedir. Sürücü koltuğunu sırasıyla orta aks üzeri ve üç noktada (sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön koltuk) yapılan ölçümlerin ortalamalarının alınarak oluşturulan toplam ortalamalar değerinin takip ettiği görülmektedir. En düşük ilişki sağ ön koltukta yapılan ölçümlerde görülmektedir. Sürücü koltuğu üzerinde oluşan $d_{z,aw}$ parametresi ile PCI arasında 3. derece polinom ilişkisi $R^2=0.8497$, doğrusal ilişkisi $R^2=0.8463$ regresyon değeri ile belirlenmiştir. Yapılan tüm değerlendirmelerde, ağırlıklı olarak sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşimlerden üretilen parametrelerle, yüzey bozulma çıktıları arasında yüksek bir ilişkinin olduğu göze çarpan bir gerçektir. Bu nedenle, titreşim parametrelerinden üstyapının durumunu tahmin eden modellerin oluşturulmasında sürücü koltuğu üzerinden kaydedilen titreşim verileri önemli bir rol oynamaktadır. Orta aks üzeri ve sağ ön koltukta yapılan değerlendirmelerde sırasıyla polinom regresyon değerleri $R^2=0.8175$ ve $R^2=0.7059$, doğrusal regresyon değerleri $R^2=0.8164$ ve $R^2=0.6898$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Oldukça yüksek olan bu regresyon katsayıları, orta aks üzeri ve sağ ön koltukta yapılan titreşim ölçümlerinin de PCI değeri ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Yapılan ölçümlerin ortalamalarında ise polinom regresyon $R^2=0.8115$ doğrusal regresyon $R^2=0.8019$ olarak karşımıza çıkmaktadır. Kurulan bu matematiksel ilişkiler grafik haliyle Şekil 9’da görülmektedir.



Şekil 9. Ölçüm noktalarına göre a_w – PCI ilişkileri

Sonraki aşamada, değerlendirmeler hız bileşeni de eklenerek yapılmıştır. Hız bileşeninin katsayı olarak değerlendirmeye girmesiyle regresyon katsayılarının dolayısıyla ilişkilerin derecesinin arttığı gözlemlenmiştir. Hız bileşeni değerlendirmeye alındığında da en yüksek regresyon polinom regresyon $R^2=0.8546$ doğrusal regresyon $R^2=0.8512$ olarak sürücü koltuğunda, daha sonra polinom regresyon $R^2=0.8177$ doğrusal regresyon $R^2=0.8166$ ile orta aks üzeri, polinom regresyon $R^2=0.8150$ doğrusal regresyon $R^2=0,8060$ ile toplam ortalamalar ve son olarak polinom regresyon $R^2=0.7101$ doğrusal regresyon $R^2=0.6945$ ile sağ ön koltukta görülmektedir. Oluşturulan bu matematiksel ilişkiler grafik haliyle Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Ölçüm noktalarına göre $a_w/ln(Hız)$ – PCI ilişkileri

4 Sonuçlar

Çalışmada, BSK yol üstyapılarında oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır. Bu amaçla, 98 adet yol kesimde yüzey bozulma verileri kayıt edilmiş, bozulmalar esasları ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan Paver sistemine göre analiz edilmiştir. Bozulmaların üstyapıların mevcut performansları üzerine olumsuz etkileri düşülen değer (DD) yaklaşımı kullanılarak normalize edilmiştir. Standart bir yolcu taşıtı içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktada düşey titreşim parametreleri belirlenmiştir. Her bir üstyapı kesimi için taşıt içerisinde üç farklı noktada üretilen titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmıştır. Değerlendirmelerde her bir bozulma türü

dikkate alındığı gibi yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere üç farklı bozulma nedenine göre bozulma türleri gruplanarak da değerlendirilmeler tekrarlanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucun özet olarak aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

- Genel konforsuzluğu ifade eden a_w parametresinin MTVV parametresine nazaran yüzey bozulmaları ile ilişkileri ifade etmede çok daha etkili olduğu saptanmıştır.
- Genel olarak yüksek korelasyonun yük ve diğer sebepler kaynaklı bozulmalarda olduğu iklimden kaynaklı bozulmaların korelasyonun ise daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Göreceli olarak yükten kaynaklı bozulmalarda orta aks üzerindeki ölçümlerde korelasyon daha yüksek iken diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalarda tüm ölçüm noktalarının korelasyonlarının birbirlerine yakın olduğu görülmüştür.
- Yapılan analizlerde 1 (Timsah Sırtı Çatlak), 5 (Ondülasyon), 6 (Çökme), 11 (Yama), 13 (Oyulma), 14 (Demiryolu Geçışı) ve 20 (Ayrışma) kodlu bozulmalarda tüm ölçüm noktalarında bozulmaların titreşim parametreleri ile dolayısıyla konforsuzlukla korelasyonlu olduğu ve bu korelasyonun istatistik olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir.
- 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama) ve 13 (oyulma) kodlu bozulmaların titreşim parametreleri ile korelasyonunun diğer bozulma türlerine göre bir miktar daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

Yapılan bu çalışma ile bakım ve onarımdan sorumlu otoritelere sorumluluk ağlarındaki yollarda sürüş konforunu daha yüksek tutabilmek adına onarım önceliklerinin belirlenmesi noktasında faydalı çıktılarının üretildiği düşünülmektedir. Çalışmanın ileriki aşamalarında daha büyük veri yığınları ile çalışılmanın tekrarlanmasının ve aynı zamanda diğer üstyapı çeşitleri için de benzer analizlerin yapılmasının literatüre yapılan katkıyı ziyadesiyle pekiştireceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar çalışmaya verdiği katkılardan dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi ve İstanbul Gelişim Üniversitesine teşekkür ederler.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] R. Haas, W. R. Hudson, and J. P. Zaniewski, Modern Pavement Management. Malabar, Florida, USA: Krieger Pub. Co., p. 583, 1994.
- [2] M. J. Griffin, Handbook of human vibration. London, UK: Academic press, p. 1008, 2012.
- [3] M. Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots. New York: Springer, p. 572, 2005.
- [4] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads. Construction and Building Materials, 116, 281-288, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.118>.
- [5] A. Wolters, K. Zimmerman, K. Schattler, and A. Rietgraf, Implementing pavement management systems for local agencies. 2011.
- [6] L. Picado-Santos, A. Ferreira, A. Antunes, C. Carvalheira, B. Santos, M. Bicho, I. Quadrado, S. Silvestre, Pavement management system for Lisbon. vol. 157: Thomas Telford Ltd, pp. 157-165, 2004.
- [7] A. Ferreira, L. d. Picado-Santos, Z. Wu, and G. Flintsch, Selection of pavement performance models for use in the Portuguese PMS. International Journal of Pavement Engineering, 12, 1, 87-97, 2011. <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.506538>.
- [8] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and C. A. V. Queiroz, The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. Washington, D.C., U.S.A.: The World Bank, p. 454, 1986.
- [9] M. W. Sayers and S. M. Karamihas, Interpretation of road roughness profile data. Federal Highway Administration, Final Report UMTRI 96-19, 1996.
- [10] M. Kardeşahin and S. Terzi, Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach. Transport, 29, 1, 18-27, 2014. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.893926>.
- [11] S. Terzi, Modeling the pavement serviceability ratio of flexible highway pavements by artificial neural networks. Construction and Building Materials, 21, 3, 590-593, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.001>.
- [12] S. Terzi, Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach. Advances in Engineering Software, 57, 2013, 59-64, 2013, doi: 10.1016/j.advensoft.2012.11.013.
- [13] U. Kırbaş, IRI Sensitivity to the Influence of Surface Distress on Flexible Pavements. Coatings, 8, 8, 2018. <https://doi.org/10.3390/coatings8080271>.
- [14] U. Kırbaş, M. Kardeşahin, B. Demir, M. Komut, and E. N. Ünal, Bitümlü Sıcak Karışım Üstyapılarda Görülen Yüzey Bozulmaları ile Düzgünsüzlük Arasındaki İlişkilerin Modellenmesinde Bazı Yaklaşımlar. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22, 2, 2018. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.32804>.
- [15] F. Wang and S. Easa, Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements. Journal of Testing and Evaluation, 44, 4, 1671-1682, 2016. <https://doi.org/10.1520/jte20140339>.
- [16] P. Múčka, Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 146, 4, 04020064 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000200>.
- [17] ASTM D 6433-16, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM, West Conshohocken, PA, United States, 2016.

- [18] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement, ISO, Geneva, Switzerland, 1997.
- [19] C. İ. Çay, Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümleme Elemanları Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2006.
- [20] İ. Keleş, Titreşim Esaslı Taşıt Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya, 2001.
- [21] ISO BS EN 8041, Human response to vibration - Measuring instrumentation, ISO, Geneva, Switzerland, 2005.
- [22] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Pavement performance levels causing human health risks. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 70, 10, 851-861, 2018, <https://doi.org/10.14256/jce.2120.2017>.
- [23] M. Mubarakı, Study the Relationship between Pavement Surface Distress and Roughness Data. 5th International Conference on Transportation and Traffic Engineering (ICTTE 2016), MATEC Web of Conferences 81, 02012, 2016, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168102012>

