



# Karayolu - demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığını etkileme seviyeleri

## Human health impact levels of vibration exposure at highway - railroad level crossings

Ufuk Kırbaş<sup>1,\*</sup> , Mustafa Karaşahin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

### Öz

Çalışmada yolcu otomobili türü bir taşıtla karayolu - demiryolu hemzemin geçidi (DHG) geçişlerinde maruz kalınan ve insan sağlığını olumsuz etkileyen Tüm Vücut Titreşimi (TVT) seviyeleri araştırılmıştır. Öncelikle çalışmada geometrileri bilinen bazı yol profillerinde farklı hızlarda titreşim ölçümleri yapılmış ve bu veriler yardımıyla sayısal ortamda taşıtın tepkilerini verebilecek bir dinamik model kalibre edilmiştir. Ardından farklı sürüş hızlarında Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) şiddet düzeylerinde DHG geçişlerinde maruz kalınan titreşim verileri yardımıyla raylar arasında ve ray dışında kalan bölümler ISO 8608 standardında tanımlanan yol profillerine benzetilmiştir. TVT'ni betimleyen taşıt dinamik modeli kullanılarak D, O ve Y şiddet seviyelerinde tek hatlı ve çift hatlı DHG'de insan vücudunun maruz kaldığı titreşim verileri üretilmiştir. Simülasyonda taşıt hızları 10 ila 50 km/sa aralığında onar birim değiştirilerek sürüş hızının etkileri de değerlendirilmiştir. ISO 2631 standardında tanımlanan titreşim parametrelerinden titreşim doz değeri (VDV) ile titreşimin insan sağlığı üzerindeki genel rahatsızlık oluşumunun seviyeleri, eşdeğer statik basınç gerilimi (Se) parametresi ile taşıyıcı iskelet sisteminin (lomber omurga) etkilenme seviyeleri araştırılmıştır. Üç farklı bozulma şiddetinde, tek ve çift demiryolu hattı geçişlerinde bu olumsuzlukların oluşumuna sebebiyet verebilecek geçiş sayıları tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sürüş konforu, Tüm vücut titreşimi, Demiryolu geçidi

### 1 Giriş

Günümüz modern şehirlerinde toplu taşımanın vazgeçilmez bir unsuru demiryolu taşımacılığıdır. Gelişen şehirleşmenin sonucu olarak ulaşım ağları her geçen gün daha fazla büyümektedir. Ayrıca kentsel yapılaşmanın içerisinde karayolu ve demiryolu ağlarının kesişmelerinin artışı kaçınılmaz bir durum olmaktadır. Bir karayolu üstyapısının hizmet düzeyi pürüzsüz, konforlu ve güvenli olma prensiplerinin her biri ayrı ayrı dikkate alınarak ifade edilmektedir. Sürüş kalitesi ise yapılan bir yolculukta sürücü ve yolcular tarafından hissedilen hareketlilik ortamı ve diğer

### Abstract

The Whole Body Vibration (WBV) levels, which are exposed at the Highway - Railroad Level Crossing (RLC) passes with a passenger car type vehicle and adversely affect human health, were investigated in the study. First of all, vibration measurements were made at different speeds on some road profiles with known geometries, and a dynamic model that could give the vehicle's responses in the digital environment was calibrated with the help of these data. Then, with the help of vibration data exposed in RLC transitions at Low (L), Medium (M) and High (H) severity levels at various ride speeds, the sections between and outside the rails are compared to the road profiles defined in the ISO 8608 standard. Using the vehicle dynamic model describing the WBV, vibration data that the human body is exposed to were produced in single-track and double-track RLC at L, M and H severity levels. In the simulation, the effects of the ride speed were also evaluated by changing the vehicle speeds in the range of 10 to 50 km/h by ten units. Vibration dose value (VDV), which is the vibration parameter defined in the ISO 2631 standard, the levels of general nuisance caused by vibration on human health, the equivalent static pressure stress (Se) parameter and the level of influence of the supporting skeleton system (lumbar spine) were investigated. The number of transitions that may cause the formation of these negativities in single and double railroad crossings with three different distress severities have been determined.

**Keywords:** Ride comfort, Whole body vibration, Railroad level crossing

faktörler de dikkate alınarak ortaya çıkan toplam tecrübenin bir derecesi olarak tanımlanmaktadır [1, 2]. Sürüş sırasında insan vücudunu olumsuz etkileyen yol kaynaklı en önemli sebep yol yüzeyinde görülen üstyapı bozulmalarıdır. ASTM D 6433 standardına göre [3] yirmi farklı üstyapı bozulma türünden biri olan karayolu - demiryolu hemzemin geçidi (DHG) geçişi, özellikle kentsel karayolu ulaşım ağlarında sürüş kalitesini azaltan bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yol üstyapıların mevcut performansını sayısal olarak ifade edebilmek amacıyla çok sayıda indeks geliştirilmiştir.

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

Geliş / Received: 03.12.2022 Kabul / Accepted: 09.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1214112

Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index, IRI), Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index, PCI), Üstyapı Hizmet Düzeyi İndeksi (Pavement Serviceability Index, PSI), Sürüş Sayısı (Ride Number, RN) bunların başlıcaları arasında yer almakla birlikte çok daha fazla sayıda indeks olduğu bilinmektedir [4]. Sürüş kalitesini sayısal olarak ifade edebilmek için ISO 2631 standardında bahsedilen frekans ağırlıklandırılmış titreşim değerlendirme sıklıkla ( $a_w$ ) kullanılmaktadır [1, 2, 5-7]. Literatürde, taşıt içerisinde maruz kalınan titreşimle üstyapı performans indeksleri arasındaki ilişkileri araştıran çok sayıda çalışmanın olduğu dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalarda makro pürüzlülüğü temsil eden sinyal yığımlarına diğer bir değişle yol yüzeyini sayısal olarak ifade edebilen profil girdilerine göre tepki üreten dinamik taşıt modelleri yardımıyla sürüş konforu analiz edilmektedir. Cantisani ve Loprencipe oluşturdukları bir dinamik taşıt modelini profilini belirleyebildikleri yol ivme ölçümleri ile kalibre etmişlerdir [5]. Kalibre dinamik modeli kullanarak Uzun Dönemli Üstyapı Performansı (Long-Term Pavement Performance, LTPP) verileri yardımıyla IRI ve düşey doğrultudaki  $a_w$  değerlerini analiz etmişler, sürüş konforuna ilişkin IRI eşik değerlerini önermişlerdir. Zhang vd. benzer şekilde yol yüzeyini ve profilini bir taşıt sürüş simülöründe benzetim yaparak IRI ve  $a_w$  arasında değerlendirme yapmışlardır [8]. Farklı yaş ve eğitim düzeyine sahip sürücü deneklerin de değerlendirmeye alındığı çalışmada IRI konfor eşik değerleri önerilmiştir. Hou vd. çalışmalarında bir dinamik taşıt modeli aracılığıyla ürettikleri  $a_w$  değerleri ile IRI arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir [9]. Çalışmalarda özellikle kentsel hız limitlerinde farklı boyutlardaki yolcu otomobili türü taşıtlarda kaydedilen titreşimlerin taşıtın marka ve modeline göre önemli miktarda değişiklik göstermediği vurgulanmaktadır [7, 10, 11].

Bununla beraber, literatürde ISO 8608 standardında [12, 13] teknik tanımları belirlenen yol sınıflarına göre yapay yol profil girdileri ile sürüş kalitesini değerlendiren çalışmalar da dikkat çekmektedir. Nguyen vd. kentsel yolcu otobüsünü temsil eden bir dinamik model ile ürettiği sürüş konforu ile IRI arasında benzerlikleri araştırmış ve otobüs türü taşıtlar için IRI konfor eşikleri geliştirmiştir [14]. Saha ölçümleri ile kalibre ettiği dinamik taşıt modelinde girdi olarak ISO 8608'de önerilen yol sınıfı kategorilerine karşılık gelen IRI değerleri belirlenmiştir. Múčka çalışmasında rijit yol üstyapılarında ISO 8608'e göre ürettiği yol profillerine çatlak benzeri sinyal de ilave ederek sürüş konforu üzerindeki etkilerini analiz etmiştir [15].

Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda taşıt içerisinde maruz kalınan üstyapı yüzeyinden kaynaklı titreşimlerin sürüş konforuna ve insan sağlığına olan olumsuz etkilerinin, sıklıkla, üstyapının mevcut durumunu ifade eden performans indeksi bileşenleri (IRI, PCI vb.) aracılığıyla değerlendirildiği görülmektedir. Literatürde, özellikle kentsel yol ağlarında, sürücülerin karşısına çıkan yol bozulmalarının seyahat eden kişiler üzerine olan olumsuz etkilerini tekil olarak ortaya koyabilen çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bununla beraber titreşimin insan vücudu üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalarda, araştırmacıların sıklıkla konforsuzluk algısını

değerlendirdikleri dikkat çekmektedir. Diğer bir değişle literatür incelendiğinde, sürüş sırasında titreşimin insan vücudu üzerinde geçici ya da kalıcı olabilecek sağlık kaybı ihtimallerine sebep olacak maruziyet seviyelerinin neredeyse araştırılmadığı açıkça görülmektedir. Oysaki seyahat esnasında geçici dahi olsa yaşanan bir sağlık sorununun (baş dönmesi, mide bulantısı vb.) sürüş güvenliğini olumsuz etkilediği çok açıktır.

Çalışmanın konusu ile yakından ilgili olarak Kırbaş ve Kardeşahin [16] yaptıkları çalışmada yolcu otomobili türü taşıtlarda seyahat eden kişilerin demiryolu hemzemin geçitlerinden geçişlerde maruz kaldığı konforsuzluğun düzeylerini belirlenmişlerdir. Çalışma kapsamında gerçek titreşim ölçüm verileri ile kalibre edilmiş bir çeyrek taşıt simülasyon modeli ile demiryolu geçişini betimleyen yapay yol profilinden farklı sürüş hızlarında geçişlerde sürücü ve yolcuların maruz kaldığı titreşimler üretilmiştir. Bu titreşimlerin sebep olduğu konforsuzluk seviyeleri tüm değişkenleriyle ifade edilmiştir. Yazarlar çalışmalarında ISO 2631 standardında konforu ifade ettiği varsayılan frekans ağırlıklı karesel ortalamalı ivme ( $a_w$ ) parametresini kullanılmışlardır. Bu çalışmada ise kentsel karayolu trafiğinde en sık görülen yolcu otomobili türü taşıtlarda seyahat eden sürücü ve yolcuların farklı hızlarda demiryolu hemzemin geçişlerinde maruz kaldıkları insan sağlığını olumsuz etkileyen Tüm Vücut Titreşimi (TVT) seviyeleri analiz edilmiştir. Diğer bir değişle çalışma kapsamında titreşimin insan sağlığını olumsuz etkilediği maruziyet seviyeleri (DHG geçiş sayıları) analiz edilmiştir. Analizleri yapabilmek amacıyla Simulink (MATLAB®) ortamında bir çeyrek taşıt dinamik taşıt modeli oluşturulmuştur. Taşıt modelini kalibre edebilmek amacıyla yolcu otomobili türü bir taşıtla iki farklı yükseklikte tümseğin bulunduğu yol kesimlerinde 20-50 km/sa aralığında titreşim ölçümleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında kaydedilen titreşim verileri ISO 2631 standardında tanımlanan kalibrasyon amacıyla yol yüzeyinin bütünü sayısal olarak değerlendirebilen frekans ağırlıklı karesel ortalamalı ivme ( $a_w$ ) parametresi yardımıyla karakterize edilerek değerlendirilmiştir. ISO 8608 standardında kabul edilen yol sınıflandırmalarına uygun parametrelerle oluşturulan yol profilleri dinamik taşıt modeline girdi olarak kullanılmıştır. Yapılan gerçek titreşim ölçümleri ve dinamik simülasyon sonuçları arasındaki farklar kalibre edilerek taşıtın belirlenen bir yol profiline olan tepkileri sayısal hale getirilmiştir. Diğer bir değişle dinamik taşıt modeli kalibre edilmiştir. Sonrasında ASTM D 6433 standardında belirtilen Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) olmak üzere üç değişik bozulma şiddetindeki demiryolu hemzemin geçitlerinden titreşim verileri kaydedilmiştir. Farklı bozulma şiddetlerindeki demiryolu hemzemin geçitlerinin raylar arasında ve ray dışında kalan bölümlerinin ISO 8608 standardına göre hangi parametreler ile ifade edilebileceği araştırılmıştır. Yapılan tüm bu kalibrasyonlar neticesinde simulink ortamında çalıştırılan ve gerçek taşıt tepkilerini verebilen dinamik taşıt modeli simülasyonu yardımıyla yolcu otomobilinde seyahat eden bir kişinin şehir içinde farklı sürüş hızlarında tek hatlı ve çift hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kaldığı TVT'nin seviyeleri belirlenmiştir. Analizler D, O ve Y şiddet seviyelerinde tek

hatlı ve çift hatlı demiryolu hemzemin geçitlerini temsil edebilecek sayısal olarak oluşturulan yol profilleri aracılığıyla yapılmıştır. Tek ve çift hatlı demiryolu geçişini temsil eden en kesitlerde her bir şiddet seviyesi için ayrı ayrı oluşturulan yol profilleri 10 - 50 km/sa aralığındaki sürüş hızlarında tekrarlanarak dinamik simülasyon koşuturulmuştur. Böylece sürüş hızlarının TVT üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında dinamik model ile üretilen titreşim verileri ISO 2631 standardında tanımlanan ve titreşimin insan sağlığı üzerindeki olumsuzluk seviyelerini ifade etmek amacıyla geliştirilmiş olan titreşim doz değeri (VDV) ve eşdeğer statik basınç gerilimi ( $S_e$ ) titreşim parametreleri yardımıyla karakterize edilerek değerlendirilmiştir. ISO standardında, tanımlanan titreşim parametrelerinden VDV ile titreşimin insan sağlığı üzerindeki genel rahatsızlık oluşumunun seviyelerinin,  $S_e$  parametresi ile taşıyıcı iskelet sisteminin etkilenme seviyelerinin araştırılması önerilmektedir. Çalışmada karayolu-demiryolu hemzemin geçitlerinde, tek ve çift demiryolu hattı geçişlerinde sağlık açısından bu olumsuzlukların oluşumuna sebebiyet verebilecek geçiş sayıları tespit edilmiştir. Sonuçlar açıklamalı grafiklerle görselleştirilerek yorumlanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 ISO 2631-1 standardı

Çalışmalar taşıt içerisinde maruz kalınan ve üstüya yüzeyinden kaynaklanan titreşimlerin, TVT değerlendirmesi ile analiz edilebileceğini göstermektedir [7, 17]. İnsan vücudu ile temas edilerek yapılan düşey doğrultudaki titreşim ölçümlerinin ISO 2631 standardında belirtilen TVT analiz yaklaşımı ile değerlendirildiği analizlere ilişkin örnekler mevcuttur [6]. Standardın birinci bölümünde (ISO 2631-1) titreşim ölçüm ve analiz metodolojileri açıklamaktadır. Titreşimlerin insan vücudu üzerine olan etkilerinin değerlendirilmesinde 0.5 ile 80 Hz frekans aralığında konfor, sağlık ve algılama analizleri, 0.1 ile 0.5 Hz aralığında ise hareket kaynaklı hastalıkların analizleri yapılmaktadır [18].

İnsan vücudunun tepkisine göre titreşim ölçümlerini değerlendirebilmek için maruz kalınan titreşimin niceliklerinin (frekans, yön vb.) görelî öneminin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple, titreşimlerin belirli aralıktaki frekanslarının, insan vücudu üzerinde kabul edilen etkilerine göre ağırlıklandırma kavramı geliştirilmiştir. Diğer bir deyişle, insan vücudunun farklı frekans aralıklarındaki titreşimlere tepkilerini belirgin hale getirebilmek için standardın önerdiği ağırlık değeri kadar büyütülmektedir [2].

ISO 2631 standardına göre titreşim ölçümleri koltuk arkası (sırt), koltuk üzeri, ayaklar olmak üzere üç farklı noktadan üç farklı eksende yapılabileceği tavsiye edilmektedir. Yapılan çalışmalardan TVT'nin belirlenmesinde en etkili olan ölçüm noktasının koltuk üzeri olduğu bilinmektedir [2]. Titreşim ölçümlerinde, ISO 2631-1, EN ISO 8041 ve ISO 10326-1 standartlarında açıklanan talimatlar izlenerek insan vücudunda en doğru kantitatif TVT'lerinin oluşmasını sağlamak için ivmeölçerlerin bir kauçuk muhafaza disk içinde, kalça kemiği (ischial tuberosity) [7] altına yerleştirilmesi önerilmektedir [6, 19,

20].

Ayrıca, arazi ölçümleri yol yüzeyinden kaynaklı bozulmaların insan vücudu üzerindeki etkilerinin araştırılması konusunda en etkili titreşim yönünün düşey doğrultuda (z) etkiyen titreşimler olduğunu göstermektedir [7, 10, 21]. Standartta konfor, sayısal olarak, ölçülen titreşim değerinin ağırlıklandırılmış frekans analizi ile bulunan karesel ortalamalı kökü ( $a_w$ ) yardımıyla gösterilmektedir. Bu değerlendirme düşey doğrultudaki titreşimler için yapıldığında  $a_{wz}$  bileşeni ile ifade edilmektedir.  $a_{wz}$  bileşeninin hesabında, öncelikle, zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülen butterworth filtreleme tekniği kullanılarak filtrelenmiş düşey ivmelenme ( $a_{i,z}$ ) değerleri, üçte birlik oktav band aralıklarına karşılık gelen güç spektral yoğunlukları aracılığıyla hesaplanmaktadır. Sonrasında, bu ivme değerleri kendisine ait olan her bir band aralığına karşılık gelen ağırlık faktörü ( $w_{k,i}$ ) ile çarpılmaktadır. Son olarak, filtrelenen her bir band aralığı için bulunan bu çarpımların karelerinin toplamının karekökü alınarak  $a_{wz}$  bileşeni hesaplanmaktadır [2, 18]. Söz konusu hesap matematiksel olarak Denklem (1) yardımıyla hesaplanabilmektedir.

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

ISO 2631-1 standardında, titreşimin insan sağlığı üzerine olan genel olumsuzluğu ifade eden etkisi VDV titreşim değerlendirme parametresi ile açıklanmaktadır. VDV parametresi, titreşim ölçümünün süresini de değerlendirmeye katmaktadır. Aynı zamanda insan vücudu ani ivme değişimlerine (şoklara) çok duyarlı olduğundan, sürücü ve yolcular titreşim ölçümündeki tepe ivme noktalarına çok daha duyarlıdır [2]. VDV değerlendirmesi, belirli bir zaman aralığında ikinci güç yerine ivme ölçümlerinin dördüncü gücü alınarak yapılmaktadır. VDV parametresi Denklem (2) ile hesaplanmaktadır ve birimi  $m/s^{1.75}$ 'tir. Bu eşitlikte  $a_w(t)$  anlık frekans ağırlıklı ivmeyi ve T ise ölçüm süresini göstermektedir. Titreşim maruziyeti birden fazla zaman aralığında (i) ve farklı büyüklüklerde oluştuğunda, toplam maruziyet için VDV parametresi Denklem (3) ile hesaplanabilmektedir.

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$VDV_{\text{toplam}} = \left( \sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

VDV parametresi ile ifade edilen insan sağlığının olumsuz etkilenebileceği titreşime maruz kalma sınır değerleri Tablo 1'de görülmektedir [22].

**Tablo 1.** VDV parametresine göre titreşimin insan sağlığını olumsuz etkileme sınırları

VDV ( $m/sn^{1.75}$ )	Açıklaması
< 8.5	Sağlık risklerinin oluşması çok beklenmez
8.5 - 17	Sağlık risklerinin oluşması konusunda dikkat edilmelidir
> 17	Sağlık risklerinin oluşması muhtemeldir



## 2.2 ISO 2631-5 standardı

ISO 2631-5 standardında tanımlanan titreşim analizi, insan vücudunun seyahat halinde maruz kaldığı titreşimi taşıt koltuğu üzerinden ölçerek değerlendirme yaklaşımına göre kurgulanmıştır. Mekanik şoklar, insan vücudunun taşıyıcı iskelet sisteminin en çok alt kısmını (lomber omurga) olumsuz etkilemektedir. Bu standartta lomber omurga tepkisini hesaplamak için titreşime maruz kalan kişinin dik oturduğu ve maruz kalma sırasında koltuktan isteyerek kalkmadığı varsayılmıştır [23]. Omurga tepkisinin x ve y yönlerinde yaklaşık olarak doğrusal ve z yönünde (düşey) doğrusal olmayan şekilde davrandığı kabul edilmektedir. Standart düşey doğrultuda doğrusal olmayan davranışın tekrarlayan bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli kullanılarak ifade edilebileceğini vurgulamaktadır. Maruz kalınan ivme değerine karşılık omuriliğin verdiği tepki  $D_k$  (k yönünde) **Denklem (4)** ile açıklanmaktadır.

$$D_k = \left[ \sum_i A_{ik}^6 \right]^{1/6} \quad (4)$$

Eşitlikte  $A_{ik}$ , k yönünün tepki ivmesinin i'nci zirvesini, k ise x, y veya z yönlerini temsil etmektedir. Teoriye göre titreşimlerin zirve değerleri x ve y yönlerinde pozitif ve negatif yönlerde oluşabileceği varsayılabilir ancak, z yönünde yalnızca pozitif yönde oluştuğu kabul edilmektedir. Çünkü omuriliğin sıkışması titreşime maruz kalmanın şiddeti ile yani oluşan basınç kuvveti ile çok daha fazla ilişkilendirilmektedir. Palmgren-Miner yaklaşımı ile oluşturulan biyomekanik modelde, mekanik şoku etkileyen faktörlerin sağlıklı bir kişinin omurgasındaki tepe basıncı sayısı ve büyüklükleri olduğu bulunmuştur [23]. Bu varsayımlarla omurga üzerindeki bu etkiyi, **Denklem (5)**'de gösterilen eşdeğer bir statik basınç gerilimi  $S_e$ , ile ifade edebilmek mümkün olmaktadır.

$$S_e = \left[ \sum_{k=x,y,z} (m_k D_k)^6 \right]^{1/6} \quad (5)$$

Burada  $D_k$ , k doğrultusundaki titreşim seviyesidir. Standart düşey doğrultuda  $m_k$  katsayısının değerini  $m_z = 0.032 \text{ MPa/(m/s}^2)$  alınmasını tavsiye etmektedir. Eğer  $D_k$  değeri günlük titreşime maruz kalma seviyesini yansıtıyorsa, bu değeri kullanarak hesapladığımız günlük eşdeğer statik sıkıştırma dozu değeri ( $S_{ed}$ ) bulunabilmektedir.  $S_e$  parametresi ile ifade edilen titreşimin lomber omurga üzerindeki olumsuz etkilenme seviyeleri **Tablo 2**'de özetlenmektedir [23].

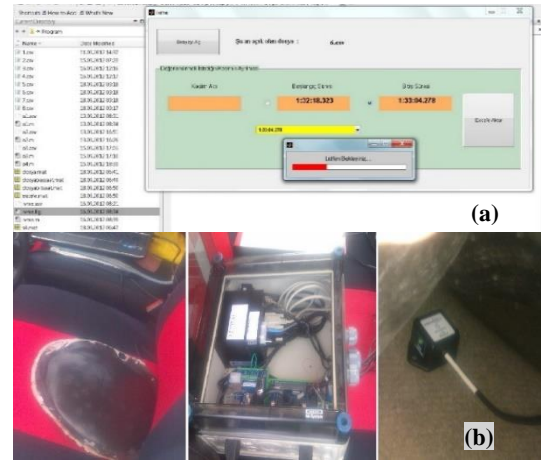
**Tablo 2.** Titreşimin lomber omurgayı olumsuz etkileme sınırları

$S_e$ (MPa)	Açıklaması
< 0.5	Düşük olasılıklı olumsuz sağlık etkisi
0.5 – 0.8	Orta olasılıklı olumsuz sağlık etkisi
> 0.8	Yüksek olasılıklı olumsuz sağlık etkisi

## 2.3 Titreşim analizi ve kullanılan ekipmanlar

Dinamik taşıt modelinin kalibrasyonu için kullanılan titreşim verilerinin kaydedilmesinde, iki adet ivmeölçer (açıklık  $\pm 4g$ , hassasiyet  $500 \pm 15 \text{ mV/g}$ ), bir adet GPS anteni ( $< 3 \text{ m}$  hassasiyet) ve bir veri kaydediciden oluşan bir ivme

ölçüm seti kullanılmıştır. Düşey doğrultuda titreşim ölçümleri, Euro Car değerlendirmesinin tavsiye ettiği C segmentine giren bir yolcu taşıtı ile yapılmıştır. Saha ölçümlerinde düşey doğrultudaki ivme verileri saniyede 1000 adet, GPS verileri ise saniyede 1 adet konum ve 1 adet hız olarak toplanmıştır. 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 geliştirilen titreşim değerlendirme yazılımı **Şekil 1**'de görülmektedir.



**Şekil 1.** Analiz yazılımı (a) ve titreşim ölçüm seti (b)

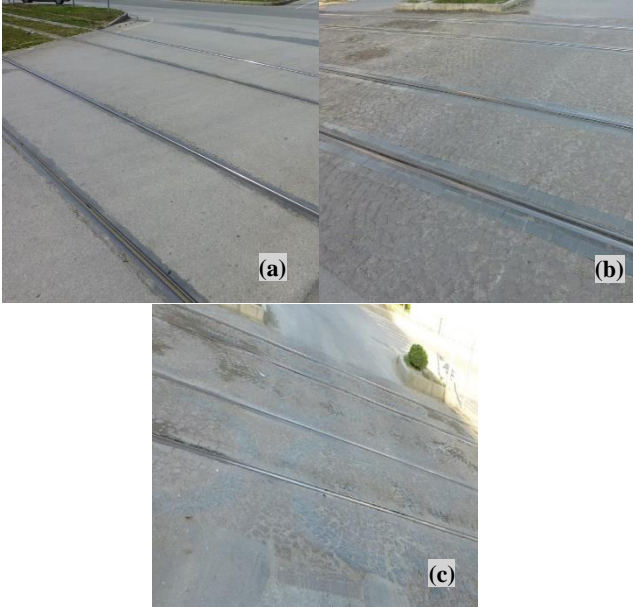
## 2.4 Demiryolu geçişi türü üstyapı bozulması

ASTM tarafından D 6433 koduyla yayınlanmış olan teknik standartta esnek yol üstyapıları için yirmi farklı türde bozulmanın olduğu belirtilmektedir [3]. Standartta, her bir bozulmayı açıklamak amacıyla kullanılan tanımların daha iyi anlaşılması ve değerlendirme yapan kişilere yardımcı olması için bozulma türleri ve şiddetleri fotoğraflarla desteklenmiştir. Bu bozulmalar arasında 14 nolu bozulma demiryolu geçişi olarak tanımlanmıştır [3]. Standartta bozulma türlerinin büyük çoğunluğunun Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) olmak üzere üç farklı bozulma şiddetinde değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir. Aynı zamanda standartta üstyapıların bozulma nedenleri yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere kategorilere ayrılmıştır. Demiryolu geçişi türü bozulmanın oluşma nedeni olarak diğer nedenler kabul edilmektedir. Diğer nedenler, tasarım aşamalarından bağımsız öngörülemez ve kaçınılmaz zorlanılan nedenler olarak kabul edilmektedir.

Standartta, demiryolu geçişi türü bozulmalar rayların etrafında, rayların aralarında veya demiryolu hatları aralarında oluşan çökmeler veya kabarmalar gibi bozuk alanlar olarak açıklanmaktadır. Bu alanlar eğer sürüş kalitesinde bir kayba yol açmayacak şekilde ise yani düzgünse bozulma olarak kabul edilmemektedir. Bozulma şiddetleri D ise düşük seviyede sürüş konforu kaybına, O ise orta seviyede sürüş konforu kaybına, Y ise yüksek seviyede sürüş konforu kaybına yol açtıkları kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, çift hatlı demiryolu geçişlerinin bozulma şiddetlerini kategorileştirebilmek için çok sayıda saha

gözlemi ve arazi ölçümü sonucu incelenmiştir. Standartta bozulmaları betimleyen kılavuz fotoğraflarla ölçümü yapılan demiryolu geçişleri kıyaslanmış ve karşılıklı değerlendirilmiştir. İncelemeler sonucu ortalama şehir içi sürüş hızı kabul edilebilecek 30 – 40 km/sa sürüş hızlarında, sürüş konforunu ifade eden  $a_{wz}$  değeri 0.8 m/sn<sup>2</sup>'den daha küçük ise düşük şiddetli, 0.8 ile 1.25 m/sn<sup>2</sup> aralığında ise orta şiddetli, 1.25 m/sn<sup>2</sup>'den daha büyük ise yüksek şiddetli bozulma sayılabileceği kabul edilmiştir. Diğer bir değişle, çift hatlı demiryolu geçişlerinde bu hız aralıklarında D şiddetindeki bozulmanın biraz konforsuz veya daha konforlu bir geçişe, O şiddetindeki bozulmanın konforsuz bir geçişe ve Y şiddetindeki bozulmanın çok konforsuz veya daha şiddetli bir konfor seviyesinde geçişe sebep olduğu varsayılmıştır. Yapılan saha gözlemleri ile kabuller ışığında inceleme ve ölçüm yapılan üç farklı şiddetteki demiryolu geçişine ait birer örnek Şekil 2'de görülmektedir.

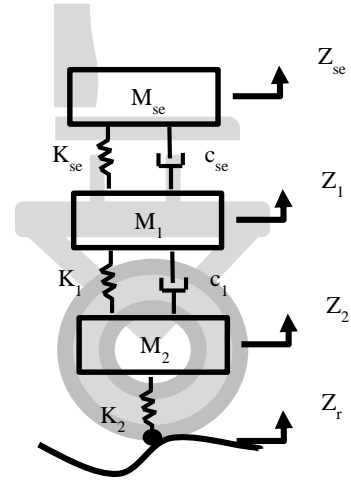


Şekil 2. İnceleme yapılan D (a), O (b) ve Y (c) şiddetindeki demiryolu geçişi örnekleri

### 2.5 Çeyrek taşıt modeli

Bir aracın davranışını, yol yüzeyine karşı verdiği tepkileri simüle etmek için dinamik taşıt modelleri kullanılmaktadır. Taşıt modelleri tek, iki ya da dört tekerleği betimleyen ayrı kütlelerden, yaylardan, sürtünme elemanlarından ve amortisörlerden oluşur [24]. Üstyapı profil verilerinin analiz edilmesinde uygulanan çeyrek taşıt simülasyon kavramı, Kamu Yolları Bürosu (Bureau of Public Roads)'nun uzun yıllardır devam ettirdiği model çalışmalarına dayanmaktadır. Michigan Üniversitesi'nde yapılan araç simülasyon çalışmalarının ışığında tüm-arac ve yarım-arac simülasyon modellerinin çeyrek-arac simülasyon modellerinin üzerinde bir avantaj sağlamadığı sonucuna varılmıştır [25]. Çok yüksek olmayan sürüş hızlarında çeyrek taşıt modellemesi yapılırken lastik sönümleme etkisinin oldukça küçük seviyede kaldığı dolayısıyla ihmal edilebileceği bilinmektedir [14]. Ağırlıklandırılmış titreşim değerlendirmesinde dinamik taşıt modeline girdi olarak

kullanılan yol profilinin sayısal olarak ifade edilmesinde lastik noktası temas modeli ve hareketli ortalama profil modeli yaklaşımları arasında marjinal bir farkın oluşmadığı bilinmektedir [26]. Ayrıca yapılan analizlerde sürüş hızı arttıkça farkın çok daha azaldığı görülmektedir [26]. Çalışmada kullanılan ve sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşimi ifade ettiği kabul edilen çeyrek taşıt modeli MATLAB® tabanlı bir grafik programlama ortamı olan Simulinkte modellenmiş ve kullanılan simülasyon parametreleri Şekil 3 ve Tablo 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Çeyrek taşıt modeli şematik gösterimi [16]

Tablo 3. Simülasyonda kullanılan model parametreleri [16]

Model Parametreleri	Değeri	Birimi
$M_{se}$ Koltuk ve sürücü kütlesi	110	kg
$M_1$ Aracın dörtte biri yaylı kütlesi	274	kg
$M_2$ Aracın dörtte biri yaylı olmayan kütlesi	41.1	kg
$K_{se}$ Koltuk süspansiyonu yay sertliği	8000	N/m
$K_1$ Araç süspansiyon yay sertliği	17344.2	N/m
$K_2$ Lastik sertliği	178922	N/m
Koltuk süspansiyonunun sönümleme oranı	3000	Ns/m
$c_1$ Araç süspansiyonunun sönümleme oranı	1644	Ns/m
$Z_r$ Yol profili		

Taşıt modellemesinde kullanılan parametrelerin nümerik değerleri ve oranları IRI kalibrasyonu için kullanılan değerlere uygun olacak şekilde belirlenmiştir [27]. Kullanılan çeyrek taşıt simülasyon modelini matematiksel olarak Denklem (6), Denklem (7) ve Denklem (8)'de tanımlamak mümkündür.

$$M_{se}\ddot{Z}_{se} + K_{se}(Z_{se} - Z_1) + c_{se}(\dot{Z}_{se} - \dot{Z}_1) = 0 \quad (6)$$

$$M_1\ddot{Z}_1 - K_{se}(Z_{se} - Z_1) - c_{se}(\dot{Z}_{se} - \dot{Z}_1) + K_1(Z_1 - Z_2) + c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) = 0 \quad (7)$$

$$M_2\ddot{Z}_2 - K_1(Z_1 - Z_2) - c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + K_2(Z_2 - Z_r) = 0 \quad (8)$$

### 2.6 Yapay yol profili

Yüzeysel yol yükselteleri (kot farkları), yol boyunca ilerleyen kara araçlarında rasgele titreşimlere neden

olmaktadır. Bu nedenle, bir taşıtın dinamik yanıtını önceden tahmin ederken gerçekçi bir yol modeli kullanmak oldukça önemlidir. Bir yolun profili, yol üzerinde ve yola paralel olarak ölçülen yuvarlanma yüzeydeki kot değişiklikleri olarak tanımlanmaktadır. ISO 8608 standardı yol profili sinyallerinin güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) analizlerine göre, konumsal frekans  $n_0=0.1$  döngü/m ve açılmal konumsal frekans  $\Omega_0=1$  rad/m değerlerine karşılık gelen bir sınıflandırma önerisi getirmektedir [12]. Standartta yolun profiline ait PSD değerini kullanarak sekiz ayrı üstyapı kalitesi sınıfı (A, B, C, D, E, F, G, H) önerilmiştir. Burada sürüş kalitesi açısından A sınıfı en iyi yolu H ise en kötü yolu temsil etmektedir.

Standartta, rasgele yer değiştirmelerin fourier dönüşümü ile elde edilen yol profil kotlarının PSD analizi değerlendirilmesi ile bir yapay yol profili üretilmesi mümkün olabilmektedir [13]. Yapılan bazı araştırmalarda eğer düşey yer değiştirmelerin PSD fonksiyonu biliniyorsa, bir  $A_i$  genliğinde ve  $n_i$  konumsal frekansında basit harmonik bir kosinüs fonksiyonu ifadesini kullanarak ve 0 ile  $2\pi$  aralığında tekdüze bir olasılık dağılımına rastgele bir faz açısı  $\varphi_i$  ekleyerek yapay bir yol profili oluşturmanın mümkün olduğu görülmektedir [24, 28]. Yapay yol profili sayısal olarak Denklem (9)'da ifade edilebilmektedir.

$$h(x) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(2\pi n_i x + \varphi_i) \quad (9)$$

Yapılan stokastik değerlendirme kabulünde modifiye edilmiş yol profil sinyalinin genliği ( $A_i$ ) yerine düşey yer değiştirmenin PSD'si ifadesi yerleştirilerek ISO 8608 standardına uygun yapay bir yol profili Denklem (10)'la oluşturulabilmektedir [13, 24, 29].

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} 2^k 10^{-3} \left( \frac{n_0}{\Delta n} \right) \cos(2\pi i \Delta n x + \varphi_i) \quad (10)$$

Bu denklemde  $x$ , 0'dan  $L$ 'ye (profil toplam uzunluğu) kadar yatay profil uzunluğunu göstermektedir.  $\Delta n$  profilin sinyal aralığını,  $N$  profildeki toplam düşey yer değiştirme sinyal (nokta) sayısını,  $i$  0'dan  $N$ 'e kadarki sinyalin sırasını ifade etmektedir.  $k$  katsayısı standartta tarif edilen yol profili sınıflarına göre A sınıfından H sınıfına kadar (A, B, C, D, E, F, G, H) yol sınıflarına (aslında kastedilen yol üstyapısı) karşılık gelen 3'ten 9'a kadar artan tam sayı değeri alabilen sabit bir değerdir. Ayrıca  $n_0=0.1$  döngü/m değerini ve  $\varphi_i = 0-2\pi$  aralığında düzgün bir olasılık dağılımını izleyen rastgele faz açısı betimlemektedir.

### 3 Kalibrasyon ve bulgular

Yol yüzeyinin sürüş etkisini analiz edebilmek için yapay yol profillerinin kullanıldığı ve bu yöntemin taşıt süspansiyon tasarımında oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Fakat üstyapı bozulmalarının değerlendirilmesinde ve onların kullanıcılar üzerindeki etkisinin tespit edilmesinde tam olarak yeterli olmayabileceği için arazi ölçümleri ile mutlaka kalibre edilmeleri gerekmektedir [14, 30]. Çalışmanın bu aşamasında öncelikli olarak geometrisi bilinen yol kesimlerinde yapılan titreşim ölçümleri ile dinamik taşıt

modeli kalibrasyonu ve sonrasında farklı şiddet seviyelerindeki demiryolu geçişlerinde rayların ve hatların arasındaki yol (üstyapı) profili karakterize edilmiştir.

#### 3.1 Taşıt dinamik modelinin kalibrasyonu

Çalışmada MATLAB® Simulink arayüzünde oluşturulan taşıt modeli kalibre edilmiştir. Bu amaçla, bir yolcu otomobili ile profili bilinen bazı yol kesimlerinde titreşim ölçümleri yapılmıştır. İncelenen kesimler, kesimin tam ortasında geometrisi bilinen bir dar hız kesici tümsek (HKT) olacak şekilde belirlenmiştir. Ölçümlerde yardımcı olması için ölçüm mesafeleri yol yüzeyine işaretlenmiştir. Taşıtın farklı yol profilindeki tepkilerini tam belirlemek için iki farklı geometride HKT'in olduğu test kesimleri tercih edilmiştir. Bunun yanında yüzey profilini daha sağlıklı yaratabilmek için tercih edilen test kesimlerinde HKT'lerin öncesinde ve sonrasında yüzey bozulmalarının olmamasına ve ISO 8608 standardına göre A sınıfına uyan bir yol profili olmasına özen gösterilmiştir. Titreşim ölçümü yapılan test kesimleri üzerinde bulunan HKT'lerin boyutları Tablo 4'de görülmektedir.

**Tablo 4.** Kalibrasyonda kullanılan HKT'lerin geometrik bilgileri

HKT	Genişlik (cm)	Yükseklik (cm)	Y/G Oranı
HKT1	40	5	0.125
HKT2	75	10	0.133

Her bir HKT'nin öncesinde ve sonrasında beş metre mesafe olacak şekilde titreşim ölçümleri yapılmıştır. Yani test kesimlerinde titreşim ölçümleri  $5 \text{ m} + \text{HKT genişliği} + 5 \text{ m}$  uzunluklarında ve 20, 30, 40 ve 50 km/sa sürüş hızlarında tekrar edilmiştir. Sürüş esnasında titreşim ölçümlerini etkileyecek ani rüzgar, ani ivme, engele yanaşma açısı vb. çok sayıda etken bulunması sebebiyle ölçümler en az üç defa tekrarlanarak analiz için birbirlerine yakın ve anlamlı olanlardan biri seçilmiştir. En az üç ölçüm yapılmasının sebebi ölçümlerin kendi içinde tutarlılıklarının kontrol edilmek istenmesidir. Titreşim ölçümleri bir süreklilik içerdiğinden dolayı ölçümleri genelleyen bir istatistik gösterim (ortalama vb.) ile ifade etmek kendi içerisinde tutarsızlıklara neden olabilecektir. Bu nedenle çok sayıda ölçümden anlamlı görülen biri analiz değeri olarak kabul edilmiştir. Ölçülen titreşim verileri ISO 2631 standardında belirtilen yöntemle işlenmiş her bir ölçüme ait titreşimin ortalama değerini ifade eden  $a_{wz}$  değeri hesaplanmıştır. Çalışmada titreşimin insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri değerlendirilmiş, VDV ve  $S_e$  titreşim parametreleri kullanılmış olmasına rağmen kalibrasyon  $a_w$  parametresi aracılığıyla tamamlanmıştır. Bunun sebebi VDV ve  $S_e$  parametrelerinin titreşime karşın maruziyetin özel durumlarını açıklamak amacıyla kullanılmasıdır. Bu parametreler titreşimin genel değişimini yansıtmamaktadırlar.

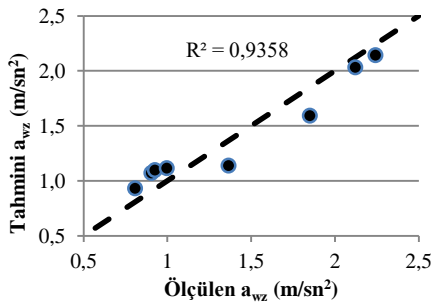
Sonrasında, bu test kesimlerinin profilleri HKT öncesi ve sonrası yapay yol profili ( $k$  katsayısı 3 alınarak) yardımıyla ve HKT geometrisi ise bir yay olarak sayısallaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan ivme ölçüm seti anlatılırken saniyede 1000 adet ivme sinyalinin (1000 Hz) okunduğunun altı çizilmiştir. Benzer şekilde dinamik taşıt modelinin



tepkilerinin benzer olabilmesi varsayımıyla, bu sayısallaştırmada tüm düşey profil kot değerleri ölçüm hızına bağlı olarak kesim uzunluğunun süre karşılığı boyunca her bir saniyede 1000 adet kot değeri olacak şekilde profil sinyalleri üretilmiştir. Kalibrasyon ölçümlerinde taşıt hızları tamsayılarla olacak şekilde planlansa da ölçümler sırasında kaydedilen verilerden bu hızların planlanandan biraz farklılaştığı görülmüştür. Bu nedenle kalibrasyon işleminin gerçekliğini kaybetmemesi amacıyla ölçüm hızı olarak sahada kaydedilen hızlarla değerlendirmeler tamamlanmıştır.

Kalibrasyon işleminin daha sağlıklı ve kontrollü yapılması için titreşim ölçümleri sürücü koltuğu üzeri ve taşıt zemininden (ayak hizası) yapılmıştır. Tüm ölçümler ağırlığı 80 kg olan tek bir sürücü ile tamamlanmıştır. Kalibrasyon, belirlenen test kesimlerinde yapılan ölçümlerden sonra kaydedilen titreşimler ve dinamik taşıt modeli aracılığıyla yapılan simülasyonlar ile elde edilen titreşimlerin zaman tanım alanında karşılaştırılmasına dayanmaktadır [5, 31]. MATLAB® Simulink yazılımı ile öncelikle taşıt yer seviyesinde (zeminde) ve sonra sürücü koltuğu üzerinde kaydedilen titreşimleri elde edebilmek için simülasyonu zorlayarak, belirlenen ölçüm hızlarında model parametresine yardımcı sabit değerlerin hesaplaması tamamlanmıştır.

Lokal düzensizlikler olan tümsekler, yaygın düzensizlik durumundan farklı olarak araca bir şok ivme etki ettirmektedir. Bir tümseğin öncesinde ve sonrasında minimum düzeyde kot değişimi olmasına rağmen kısa bir mesafede önemli bir kot değişimi olduğu halde model ve kalibrasyonu oldukça yüksek doğrulukta titreşim değerleri elde edebilmiştir. Sürücü koltuğu üzerinden sahada ölçülen titreşimler ve kalibre dinamik model ile simüle edilen titreşimlerin analizi sonucu bulunan  $a_{wz}$  parametreleri arasında regresyon benzerliği 0.9358 olarak bulunmuştur. Bahsedilen bu karşılaştırma Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Ölçüm ve tahmin yoluyla bulunan  $a_{wz}$  parametrelerinin karşılaştırılması [16]

### 3.2 Bozulma şiddetine göre yol profili

Kalibrasyonun ikinci aşamasında D, O ve Y bozulma şiddetindeki demiryolu geçişlerinde raylar arasındaki açıklıklarda ve hatlar dışındaki mesafelerde (hat öncesi ve sonrası ile iki hat arası) kabul edilebilecek yol profilleri tespit edilmiştir. Bu amaçla, çift hatlı bir demiryolunun hemzemin geçitlerinden geçişlerde sürücü koltuğu üzerinden muhtelif sürüş hızlarında titreşimler okunmuş ve  $a_{wz}$  parametre değerleri belirlenmiştir. Çift hatlı bir demiryolu geçişi için

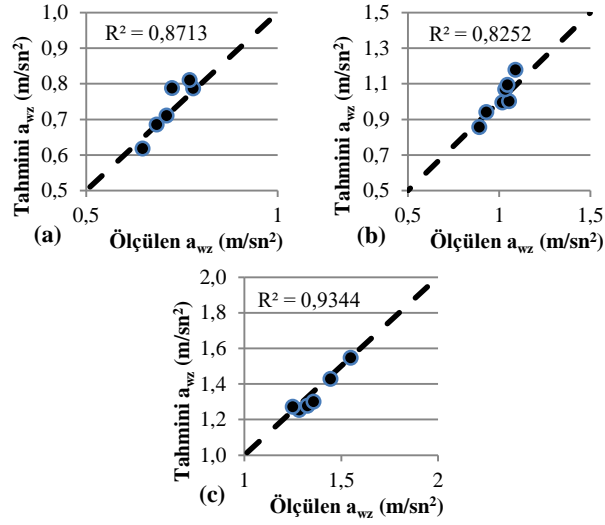
ölçülen kesim uzunluğu belirlenirken demiryolu hatları öncesi ve sonrası 3.5 metre yanaşma ve uzaklaşma uzunlukları kabul edilmiştir. Bu uzunluklar yolcu otomobili türü bir taşıtın iki dingili arası açıklığını gösterir bir değerdedir. Bu değer seçilmesinin sebebi bu çalışmada yalnızca demiryolu geçişi türü bozulma değerlendiriliyor olmasıdır. Eğer daha uzun mesafeler değerlendirilecek olsa, yol üstyapılarında görülen olası başka tür bozulmalarla da karşılaşılabilirdi çok açıktır. Daha kısa mesafelerde yapılan değerlendirilmelerde ise taşıtın bütününe tepkilerinin algılanamayacağı gerçeği ile karşılaşılmaktadır. İki demiryolu hattı arası mesafe ise 3 m olarak kabul edilmiştir. Bu değer titreşim verilerinin toplandığı saha çalışmalarında ölçülerek bulunmuştur. Ölçümü yapılan demiryolu hat genişliği normal hat genişliğinde olup 1.5 m’dir. Ray geçişlerinde karayolu taşıtlarına yuvarlanma kolaylığı sağlamak amacıyla oluk kesitli rayların kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca saha değerlendirmesi yapılan demiryolu hatlarında da aynı ray türü bulunduğundan oluşturulan sayısal yol profilinde yaklaşık 10 cm genişliğinde oluklu ray modellenmiştir. Nedeni yukarıdaki şekilde izah edilen demiryolu hemzemin geçişi bozulma kesiminin toplam uzunluğu 13 m olarak kabul edilmiştir.

Saha ölçümlerinde ASTM D 6433 standardında tanımlanan bozulma açıklamalarına ve bozulma görüntülerine dayanarak seçilen demiryolu geçişlerinde bu uzunluktaki yol kesimlerinde ölçümler ve analizler tamamlanmıştır. Devamında bilgisayar ortamında benzer mesafelerde yol profilleri sayısal olarak oluşturulmuştur. Bu yol profilleri girdi oluşturularak kalibre edilen taşıt dinamik modeli oluşturulmuş ve sürücü koltuğu üzerindeki titreşim değerleri simüle edilmiştir. ISO 8608’e göre oluşturulan yol profilleri rasgelelik prensibi ile oluşturulduğu için her simülasyon sonucu aynı değerler bulunmamaktadır. Bu nedenle simülasyon ile bulunan tahmini  $a_{wz}$  değerleri modelin on defa tekrar koşutularak bulunan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

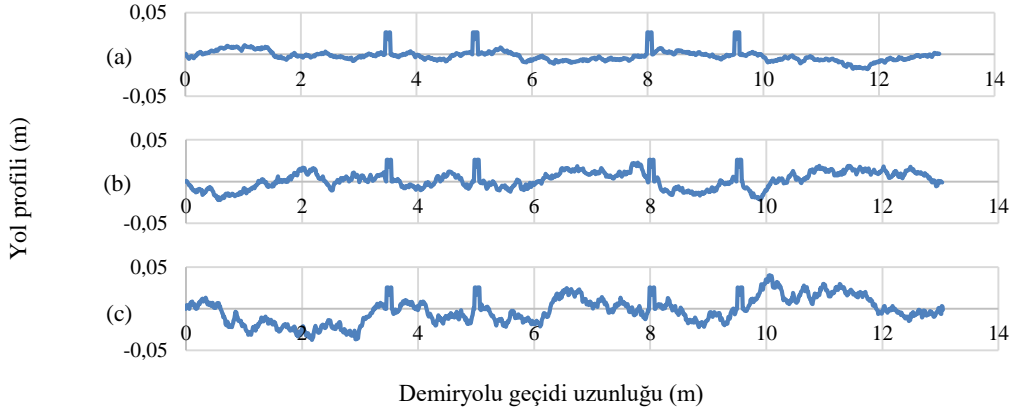
Yapılan titreşim analizleri sonuçlarına göre deneme yanılma yöntemiyle D şiddet seviyesi için k katsayısının 5 (C yol sınıfı), O şiddet seviyesi için k katsayısının 6 (D yol sınıfı) ve Y şiddet seviyesi için k katsayısının 7 (E yol sınıfı) seçilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. İlgili katsayılar seçilerek oluşturulan yol profil girdileriyle yapılan simülasyon sonucu üretilen  $a_{wz}$  parametre değerleri ile saha ölçümleri yapılarak hesaplanan  $a_{wz}$  parametre değerleri karşılaştırıldığında önemli benzerliklerin yakalanabildiği fark edilmektedir. Üç farklı bozulma şiddeti için değerlendirme sonuçları, regresyon benzerlikleri ve karşılaştırmalar Şekil 5’de görülmektedir.

## 4 Tartışma

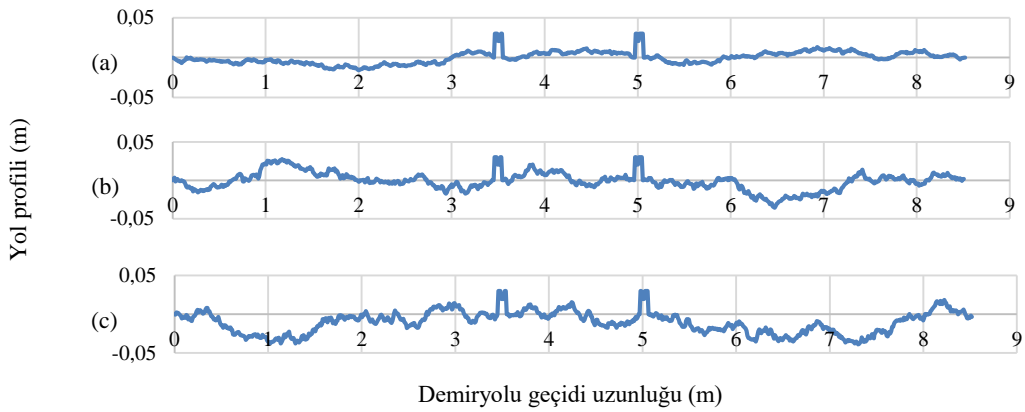
Çalışmanın sonraki bölümünde yolcu otomobili türü bir taşıtla çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT seviyeleri belirlenmiştir. MATLAB® yazılımı üzerinde yapılan kodlama ile önceki bölümde analizler sonucu tespit edilen yol sınıfı katsayılarını (k) dikkate alarak çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitleri için yol profilleri oluşturulmuştur. Okuyuculara yardımcı olmak amacıyla her bir bozulma şiddetinde



Şekil 5. D (a), O (b) ve Y (c) şiddetindeki demiryolu geçişi titreşim parametrelerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Çift Hatlı bir demiryolu geçidi D (a), O (b), Y (c) şiddetindeki yol profili [16]



Şekil 7. Tek Hatlı bir demiryolu geçidi D (a), O (b), Y (c) şiddetindeki yol profili [16]

demiryolu geçitlerinde oluşan yol profillerinin (diğer bir deyişle yol profil sinyallerinin) birer örneği sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de görülmektedir. Daha önce vurgulandığı üzere sürüş sırasında yalnızca demiryolu geçişlerinden kaynaklı TTV seviyelerini belirleyebilmek amacıyla çift hatlı

demiryolu geçidinde 13 m, tek hatlı demiryolu geçidinde ise 8.5 m uzunluktaki kesimde titreşimler benzetilmiştir.

Literatür detaylıca incelendiğinde yapılan çalışmalardan saha ölçüm verileri ile yapılan ağırlıklandırılmış titreşim analiz değerlendirmelerinde, aynı üst yapı kesiminde aynı taşıtla ve aynı hızla yapılan ölçümlerde dahi %17’ye varan



farkların oluşabileceği anlaşılmaktadır [7, 11]. Gerçek durumu simüle edebilmek amacıyla bu çalışmada rayların arasında bulunan açıklıklarda yol profil sinyalleri ISO 8608'e göre üretilmiştir. ISO standardının önerdiği üzere yol profil sinyalleri her bir simülasyonda tekrar üretilmekte gerçek arazi koşullarını oldukça gerçekçi yansıtmaktadır. Bu durum önce yol profilinin oluşturulması sonra taşıt dinamik tepkileri ile sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşim sinyallerinin üretilmesi ve en son olarak titreşim parametre değerinin hesaplanması şeklinde çalışan simülasyon yordamının her çalıştırıldığında belli oranda sapmaların olduğu sonuç değerlerin üretilmesi ile sonuçlanmaktadır. Çalışmada çift hatlı ve tek hatlı demiryolu geçitlerinde TVT değerleri kalibre edilen dinamik simülasyon modeli kullanılarak üretilmiştir. Titreşim sinyallerinin üretiminde 10, 20, 30, 40 ve 50 km/sa kentsel hız aralıklarında taşıt sürüş hızları dikkate alınmıştır. Elde edilen titreşim verileri TVT'nin genel olarak insan sağlığına olumsuz etkileri açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla ISO 2631-1 standardında teknik kriterleri açıklanan ve titreşimin sağlığa olumsuz etkilerini ifade etmek amacıyla kullanılabilen VDV parametresi kullanılmıştır. Aynı zamanda maruz kalınan düşey doğrultudaki titreşiminin omurilik üzerinde oluşturduğu baskı sonucu muhtemel olumsuzluklar üzerine de bir değerlendirme yapılmıştır. Bu maksatla ISO 2631-5 standardında izahatı yapılan ve teorik olarak titreşimin omurilik üzerindeki olumsuzluğunu ifade etmede kullanılabilen biyomekanik modelin sonucu olarak kabul edilen  $S_e$  parametresi kullanılmıştır. Değerlendirmesi yapılan tüm parametrelerin sayısal değerlerinin standartlarda önerilen eşik değerler açısından kıyaslaması ve yorumlaması yapılmıştır.

#### 4.1 İnsan Sağlığını Olumsuz Etkileme Seviyeleri

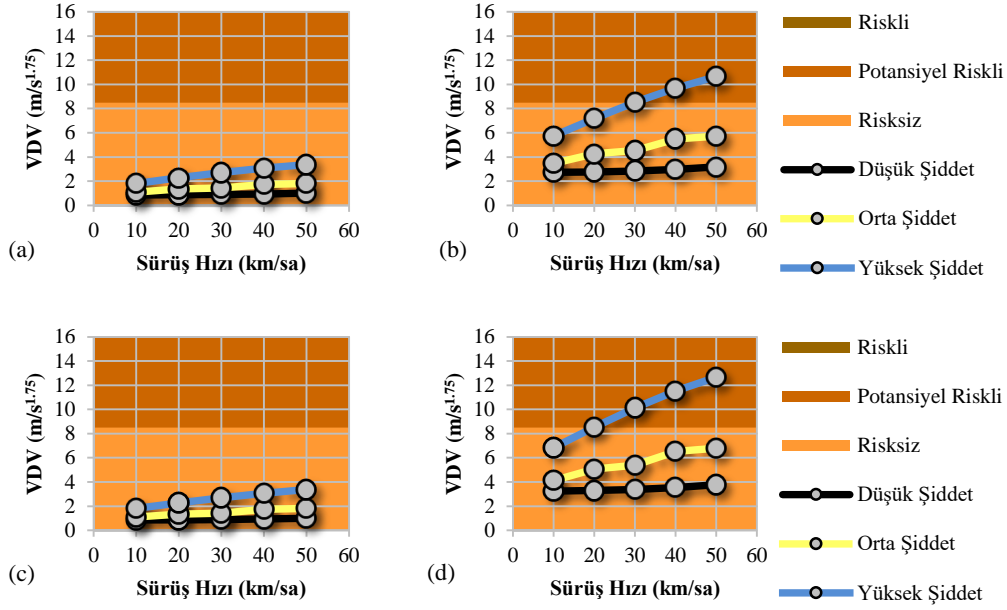
Çalışmada demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığı üzerine olumsuz etki seviyeleri araştırılmıştır. Bu bölümde titreşim değerlendirme yöntemlerinin taşıt içerisindeki sürücünün maruz kaldığı mekanik şok miktarı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Titreşimin insan üzerindeki olumsuz etkileri, bu amaçla sıklıkla kullanılan ISO 2631 standardında açıklanan VDV ve  $S_e$  bileşenleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinin yapay yol profilleri oluşturularak dinamik simülasyon modeli ile üretilen titreşim verilerinden VDV ve  $S_e$  parametreleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerde VDV ve  $S_e$  parametrelerinin tek bir geçişte ve günlük maruziyet değeri olarak kabul edilebilecek 100 ve 200 defa geçişlerde alacağı değerler belirlenmiştir. Bu değerler herhangi bir bilgi veya teoriye dayanmaksızın çoklu geçişlerdeki değişimi ortaya koyabilmek amacıyla olası geçiş sayısı olarak öngörülerek seçilmiştir.

Analizler sonucunda beklendiği üzere sürüş hızı arttıkça VDV değerinin arttığı görülmektedir. Yapılan tüm değerlendirmeler sonucu elde edilen VDV değerleri ve değişimleri çift hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 8'de ve tek hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 9'da grafik olarak açıklanmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9'da çift ve tek hatlı demiryolu geçitleri tek bir geçiş ve çok sayıda geçişi örneklemek

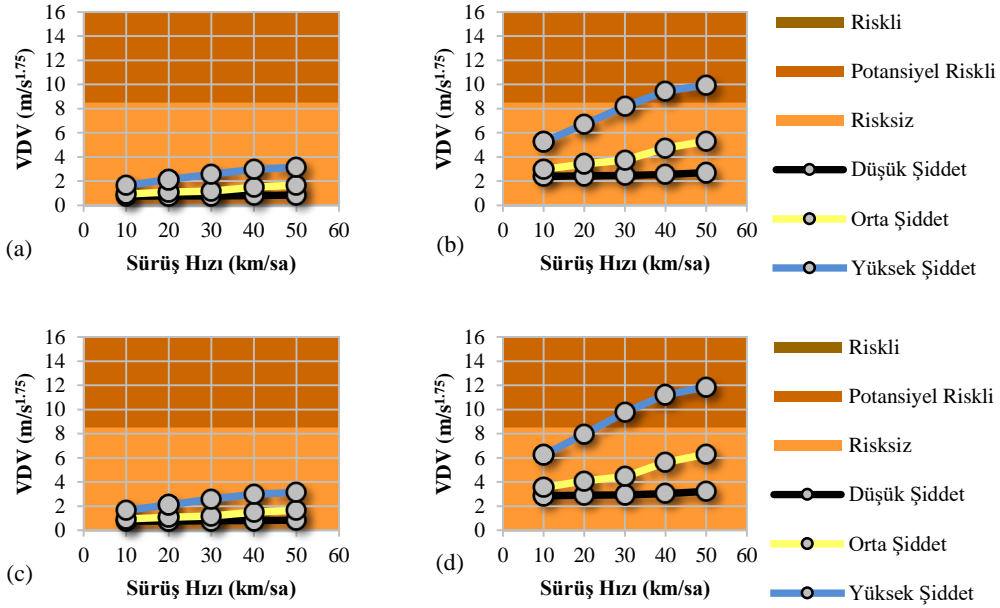
amacıyla 100 ve 200 adet geçiş için yan yana gösterilmiştir. Bu sebeple grafikleri anlamada yardımcı olan antetler yalnızca birer defa yerleştirilmiştir. VDV değerinin artışında birinci öncelikli etkenin bozulma şiddeti olduğu açıkça görülmektedir. Sürüş hızındaki artışa paralel olarak D şiddetteki demiryolu geçidi VDV değeri çok fazla artmamasına rağmen Y şiddetteki demiryolu geçidi VDV değerlerinde dramatik bir artış göze çarpmaktadır. D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde özellikle düşük hızlarda VDV değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Tek geçişte tüm şiddet seviyelerinde gerek çift hatlı gerekse tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde oluşan TVT, standartta tanımlanan VDV ölçüğüne göre insan vücudunun olumsuz etkilenmediği sağlık riski açısından risksiz sınırlarında kaldığı görülmektedir. Çift hatlı ve Y şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinde günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli sınırlarına geçilmektedir. Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta olumsuz bir etkinin görüldüğü sağlık riski açısından riskli kabul edilecek bir seviyeye ulaşılmamaktadır.

Çift hat ve tek hat demiryolu hemzemin geçitleri kendi aralarında kıyaslandığında çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı TVT analizi sonucu bulunan VDV değeri tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olmaktadır. Bozulma şiddetlerine göre bu kıyaslama yapıldığında tek hatlı demiryolu geçidinde D şiddette hızın artışı ile VDV değerinde ortalama %3 oranında, O şiddette ortalama %11 ve Y şiddette ortalama %20 oranında artış olduğu görülmektedir. Bu değişimler çift hatlı demiryolu geçitlerinde D şiddette %3, O şiddette %13 ve Y şiddette %25 oranında ortalama değerlere karşılık gelmektedir. D şiddette tek hat ve çift hat geçitlerde bir farklılık olmamaktadır. Öte yandan hızın artışı ile O ve Y şiddette çift hat geçişin tek hata nazaran daha fazla sağlık riskini ortaya çıkardığı çok açıktır. Bu değerlerin değişimi dikkate alındığında tek hatlı demiryolu geçitlerinde hızın artışı ve bozulma şiddetinin kötüleşmesine bağlı olarak VDV değerleri ortalama %11 oranında artmakta iken çift hatlı demiryolu geçitlerinde bu değer %14 olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmada son olarak titreşimin lomber omurda üzerine olumsuz etkisini sayısal olarak betimlemek için, maruz kalınan TVT'i  $S_e$  parametresi açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede de analizler VDV değerlendirmesi ile aynı kriterler dikkate alınarak tamamlanmıştır. Yapılan tüm değerlendirmeler sonucu elde edilen  $S_e$  değerleri ve değişimleri çift hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 10'da ve tek hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 11'de grafik olarak gösterilmiştir.  $S_e$  parametresinin değerlendirilmesinde hem çift hatlı hem de tek hatlı demiryolu geçidinden tek bir geçişte tüm hızlarda ISO 2631 standardına göre düşük olasılıklı sağlık riski (SR) sınırlarında kalmaktadır. 200 defa geçişlerde  $S_e$  parametresi Y şiddet seviyesine sahip çift hatlı demiryolu hemzemin geçidinde 50 km/sa ve üzerinde hızlarda orta olasılıklı SR etki sınırında kalmaktadır.



Şekil 8. Çift hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin VDV değerleri



Şekil 9. Tek hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin VDV değerleri

Değerlendirilen diğer sorgulamaların tamamında düşük olasılıklı SR sınırlarında kalınmaktadır.

D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde  $S_e$  değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Y şiddetindeki demiryolu geçitlerinde D ve O şiddetinden farklı olarak hızın artışı ile kayda değer bir SR artışının olduğu dikkat çekmektedir. Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir

SR oluşturacak olumsuz etkilenme seviyesine ulaşmamaktadır.

Çift hat ve tek hat demiryolu geçitleri kendi aralarında kıyaslandığında çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı TVT analizi sonucu bulunan  $S_e$  değeri tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazla olmaktadır. Bozulma şiddetlerine göre bu kıyaslama yapıldığında tek hatlı demiryolu geçidinde D şiddette hızın artışı ile  $S_e$  değerinde ortalama %3 oranında, O şiddette

ortalama %16 ve Y şiddette ortalama %18 oranında artış olduğu görülmektedir. Bu değişimler çift hatlı demiryolu geçitlerinde D şiddette %4, O şiddette %14 ve Y şiddette %17 oranında ortalama değerlere karşılık gelmektedir. Hızın artması ile D şiddetinde tek hat geçitler çift hat geçitlere nazaran %1 daha az SR oluşmasına neden olmaktadır. Tam tersi olarak hızın artışı ile O şiddette çift hat geçitlerde tek hat geçitlere nazaran %2 daha az ve Y şiddette %1 oranında daha az SR oluşması dikkat çekmektedir. Bu durum hızın artması ile çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde oluşan SR'inde çok küçük oranlarda farklılıklar olsa da aslında çift hat veya tek hat geçişlerinde dikkate değer bir farklılığın oluşmadığını düşündürmektedir. Öte yandan hızın artışı ile O ve Y şiddette çift hat geçişin tek hata nazaran daha fazla sağlık riskini ortaya çıkardığı çok açıktır. Bu değerlerin değişimi dikkate alındığında tek hatlı demiryolu geçitlerinde hızın artışı ve bozulma şiddetinin kötüleşmesine bağlı olarak  $S_e$  değerleri ortalama %12 oranında artmakta iken çift hatlı demiryolu geçitlerinde bu değer %11 olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 4.2 İnsan sağlığını olumsuz etkileyen geçiş sayıları

Çalışmada demiryolu hemzemin geçitlerinde TVT'nin insan sağlığını olumsuz etkilediği ve hasar bırakma potansiyelinin olduğu geçiş sayıları da (N) tespit edilmiştir. Bu bilgi ISO 2631 standardında belirtilen  $S_e$  ve VDV bileşenlerinin eşik değerlerine hangi sayıda geçişle ulaşıldığının belirlenmesi ile açıklanmaktadır. N sayıları,

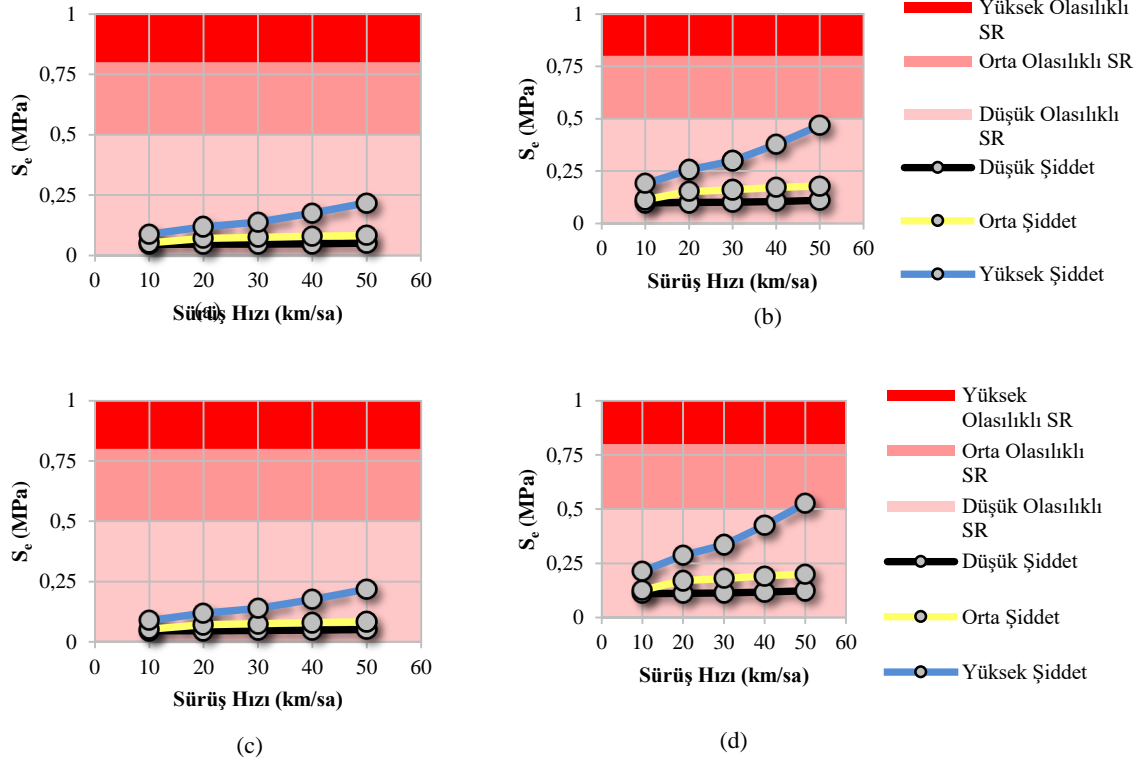
titreşimin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ifade eden VDV ve  $S_e$  bileşenlerinin günlük titreşim maruziyetini ifade eden yaklaşımlardan (2 ve 5 eşitlikleri) türetilerek elde edilmektedir [32]. Bu maksatla, günlük çok sayıda geçiş ifade eden  $VDV_d$  bileşeninin eşik değeri olarak belirlenen değerine göre (ISO 2631-1 standardında  $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$ ) maksimum geçiş sayısı  $N_{8.5}$  Denklem (11) ile ifade edilebilmektedir.

$$N_{8.5} = \left( \frac{8.5}{VDV_d} \right)^4 \quad (11)$$

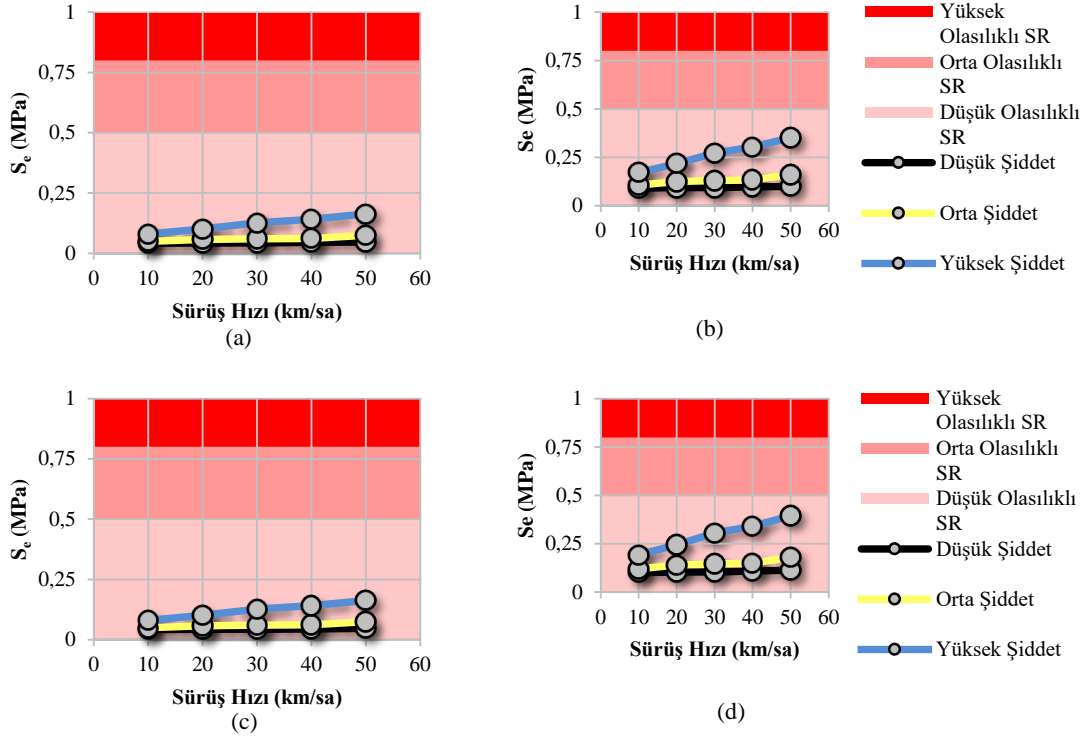
Benzer şekilde, günlük çok sayıda geçiş ifade eden  $S_{ed}$  bileşeninin eşik değeri olarak belirlenen değerine göre (ISO 2631-5 standardında 0.5 MPa) maksimum geçiş sayısı  $N_{0.5}$  Denklem (12) ile ifade edilebilmektedir.

$$N_{0.5} = \left( \frac{0.5}{S_{ed}} \right)^6 \quad (12)$$

Çalışmada incelenen çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinin her biri için ISO 2631 standardında titreşimin olumsuz etkisini gösteren her iki bileşenin farklı sürüş hızlarında insan sağlığını olumsuz etkileyebilecek geçiş sayıları Tablo 5'de görülmektedir.



Şekil 10. Çift hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin  $S_e$  değerleri



Şekil 11. Tek hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin  $S_e$  değerleri

Tablo 5. Sağlığın olumsuz etkilendiği eşikleri ifade eden demiryolu hemzemin geçidi geçiş sayıları

		Bozulma Şiddeti	Sürüş Hızı (km/sa)				
			10	20	30	40	50
Çift Hatlı Demiryolu Geç.	$N_{8,5}$ $VDV_d(m/s^{1.75})$	D	9490	8908	7943	6646	5155
		O	3581	1583	1244	576	490
		Y	479	196	99	59	41
	$N_{0,5}$ $S_{ed}(MPa)$	D	1756167	1614890	1452988	1201548	874658
		O	760980	127064	92271	61123	47909
		Y	33051	5569	2205	532	147
Tek Hatlı Demiryolu Geç.	$N_{8,5}$ $VDV_d(m/s^{1.75})$	D	15542	14504	13874	12141	9758
		O	6602	3732	2668	1032	664
		Y	681	259	115	66	53
	$N_{0,5}$ $S_{ed}(MPa)$	D	2934551	2477208	2437926	1906316	1496697
		O	1064067	424546	333984	280835	91659
		Y	60991	14686	3872	2007	832

Hızın ve demiryolu geçişi türü bozulmanın şiddetinin artması ile insan sağlığını etkileyebilecek geçiş sayılarının sınırları dramatik bir şekilde azalmaktadır. Veriler incelendiğinde tek hatlı demiryolu geçitlerinin çift hatlı demiryolu geçitlerine göre çok daha fazla geçişe imkan tanıdığı fark edilmektedir. Demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT'den lomber omurganın olumsuz etkilenme sınırlarının insan vücudunun genel olarak etkilenme sınırından, başka bir deyişle  $S_e$  parametresinin VDV parametresinden çok daha iyimser bir eğilimde olduğu açıktır. Başka bir bakış açısında göre titreşimin olumsuz etkilerinden tüm vücudun olumsuz etkilenmesinin lomber omurganın olumsuz etkilenmesinden daha önce olacağı anlaşılmaktadır. Analizlerde en olumsuz şartları ifade eden Y şiddet düzeyinde çift hatlı demiryolu geçitlerinde ve 50 km/sa sürüş hızında dahi sağlığın olumsuz etkilenmesi VDV parametresine göre 41 geçiş sayısında oluşuyor iken  $S_e$

parametresine göre 147 geçiş sayısında oluşmaktadır. Y şiddet düzeyinde tek hatlı demiryolu geçitlerinde ise sağlığın olumsuz etkilenmesi VDV parametresine göre 53 geçiş sayısında oluşuyor iken  $S_e$  parametresine göre 832 geçiş sayısında oluşmaktadır. Yapılan bu değerlendirmeler ışığında aşağıda belirtilen tespitler elde edilmiştir.

- VDV ve  $S_e$  parametre değerlerinin artışında birinci öncelikli etken bozulma şiddeti ve sürüş hızıdır.
- D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde hızın artışı ile VDV değerleri birbirlerine yakın ve nispeten küçük artışlarla seyrederken Y şiddetinde geçidi VDV değerlerinde dramatik bir artış oluşmaktadır.
- VDV değerleri tek geçişte tüm şiddet seviyelerinde gerek çift hatlı gerekse tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde insan vücudunun olumsuz etkilenmediği sağlık riski açısından risksiz sınırlarında kalmaktadır.



- Çift hatlı ve Y şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinde günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli sınırlarına geçilmektedir.
- Çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı titreşim kaynaklı genel olumsuzluk tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olmaktadır.
- $S_e$  parametresinin değerlendirilmesinde hem çift hatlı hem de tek hatlı demiryolu geçidinden tek bir geçişte tüm hızlarda ISO 2631 standardına göre düşük olasılıklı sağlık riski (SR) sınırlarında kalınmaktadır.
- 200 defa geçişte  $S_e$  parametresi Y şiddet seviyesine sahip çift hatlı demiryolu hemzemin geçidinde 50 km/sa ve üzerinde hızlarda orta olasılıklı SR etki sınırında kalınmakta ve diğer sorgulamaların tamamında düşük olasılıklı SR sınırlarında kalınmaktadır.
- D ve O şiddetindeki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde  $S_e$  değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği, Y şiddetinde ise hızın artışı ile kayda değer bir SR artışının olduğu dikkat çekmektedir.
- Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir SR oluşturacak olumsuz etkilenme seviyesine ulaşılmamaktadır.
- Çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunda lomber omurganın maruz kaldığı olumsuzluk seviyesi tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazladır.
- Demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT'den lomber omurganın olumsuz etkilenme sınırlarının insan vücudunun genel olarak etkilenme sınırından, başka bir deyişle  $S_e$  parametresinin VDV parametresinden çok daha iyimser bir eğilimde olduğu görülmektedir.

## 5 Sonuçlar

Yol üstyapılarının mevcut durumu o ülkenin ekonomik gelişmişlik seviyesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir [17]. Üstyapı yüzey bozulmaları kentsel yol ağlarında sıklıkla karşılaşılan ve sürücülere önemli miktarda rahatsızlık veren sorunların başında gelmektedir. Özellikle, trafiğin zorlayıcı etkilerinden (sinyalize düzenlemelerde yeşil sürenin kısa olması gibi) kaynaklı göreceli olarak yüksek hızla sürüş ihtiyacı gerekliliği bu rahatsızlığı katmerli hale getirmektedir. Çalışmada ASTM D 6433 standardında üç farklı bozulma şiddetinde ifade edilen bitümlü sıcak karışım üstyapılarda görülen demiryolu geçidi türü bozulmaların üzerinden taşıt ile geçişlerde maruz kalınan titreşimin insan sağlığı açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Analizlerde demiryolu hemzemin geçitlerinin farklı sürüş hızlarında ve farklı bozulma şiddetlerinde çift hatlı ve tek hatlı olmak üzere iki farklı yol kesiminde yolcu otomobili türü taşıt kullanıcılarının maruz kaldıkları TVT seviyeleri belirlenmiştir. Değerlendirmelerde ISO 2631 standardında izahatı yapılan titreşim değerlendirme parametreleri kullanılmıştır. Titreşimin insan sağlığı üzerine genel olumsuzluk etkisini ifade etmek amacıyla VDV parametresi ve insan sağlığının yanında lomber omurga üzerine olumsuz etkisini ifade etmek amacıyla  $S_e$  parametreleri kullanılmıştır.

Yapılan analizlerde titreşim parametre değerlerinin artışında öncelikle bozulma şiddeti ve sürüş hızının etkili olduğu görülmüştür. Taşıtların geçtiği hat sayısı açısından maruz kalınan genel olumsuzluğun çift hatlı demiryolu geçidinde tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Lomber omurganın maruz kaldığı olumsuzluk seviyesi açısından ise çift hatlı demiryolu geçidinde tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazla olduğu görülmüştür. Otomobil türü taşıt kullanıcıları üzerinde çift hatlı ve yüksek şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinden günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli durumun oluştuğu saptanmıştır. Öte yandan, çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defaya kadar geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir sağlık riskinin oluşmadığı görülmektedir. Demiryolu hemzemin geçitlerinde hızın artması ile demiryolu geçişi türü bozulmanın düşük ve orta şiddet seviyelerinde olumsuzluk artışının göreceli olarak sınırlı seviyelerde olmasının yanında, bozulmanın yüksek şiddet seviyelerinde artış dramatik bir şekilde yüksektir.

Çalışma kapsamında geliştirilen ve kalibre edilen model otomobil türü taşıtın tepkilerini yansıtmakla sınırlandırılmış olmakla birlikte çalışmanın sonraki aşamalarında diğer taşıt türlerinin de analiz edilmesinin konuyu çok daha anlaşılır hale getirebileceği düşünülmektedir.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Benzerlik oranı (iThenticate): %9

## Kaynaklar

- [1] 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>.
- [2] M. J. Griffin, Discomfort from feeling vehicle vibration. Vehicle System Dynamics, 45, (7-8), 679-698, 2007. <https://doi.org/10.1080/00423110701422426>.
- [3] ASTM D 6433, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D6433-20>.
- [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] G. Cantisani and G. Loprencipe, Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. Journal of Transportation Engineering, 136 (9), 818-826, 2010. <https://doi.org/10.1061/ASCE/TE.1943-436.0000143>.
- [6] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement. ISO, Geneva, Switzerland, 1997.

- [7] P. Múčka, Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (4), 04020064, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000200>.
- [8] J. Zhang, L. Wang, P. Jing, Y. Wu, and H. Li, IRI Threshold Values Based on Riding Comfort. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (1), 04020001, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000144>.
- [9] X. Hou, X. Liang, S. Ma, and W. Hua, "The Analysis of the Correlation between International Roughness Index and Body Ride Comfort. Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), pp. 2554-2561, Harbin, China, 5-9 August 2009.
- [10] M. L. M. Duarte and G. C. de Melo, 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, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1057-0>.
- [11] P. Múčka, International Roughness Index Thresholds Based on Whole-Body Vibration in Passenger Cars. *Transportation Research Record*, 2675 (1), 305-320, 2021. <https://doi.org/10.1177/0361198120960475>.
- [12] ISO 8608, Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data. ISO, Geneva, Switzerland, 1995.
- [13] H. Du, W. Li, D. Ning, and S. Sun, *Advanced Seat Suspension Control System Design for Heavy Duty Vehicles*, 1st Edition. Academic Press, London, UK, 2020.
- [14] T. Nguyen, B. Lechner, Y. D. Wong, and J. Y. Tan, Bus Ride Index – a refined approach to evaluating road surface irregularities. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (2), 423-443, 2019. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1625806>.
- [15] P. Múčka, Sensitivity of Road Unevenness Indicators to Distresses of Composite Pavements. *International Journal of Pavement Research Technology*, 8 (2), 72-84, 2015. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(2\).72](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(2).72).
- [16] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Discomfort limits provided by railroad crossings to passenger cars. *International Journal of Pavement Engineering*, Online pub., 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2001817>.
- [17] D. Abudinen, L. G. Fuentes, and J. S. Carvajal Muñoz, Travel Quality Assessment of Urban Roads Based on International Roughness Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2612 (1), 1-10, 2017. <https://doi.org/10.3141/2612-01>.
- [18] M. J. Griffin, *Handbook of human vibration*. Academic press, London, UK., 2012, p. 1008.
- [19] ISO BS EN 8041, Human response to vibration - Measuring instrumentation, ISO, Geneva, Switzerland, 2005.
- [20] ISO 10326-1, Mechanical vibration — Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration — Part 1: Basic requirements, ISO, Geneva, Switzerland, 2016.
- [21] H. Zhang and W. Yang, Evaluation Method of Pavement Roughness Based on Human-Vehicle-Road Interaction. *Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP)*, pp.3541-3551, Beijing, China, 2010.
- [22] A. Bhattacharya and J. D. McGlothlin, *Occupational ergonomics: theory and applications* (no. 27). CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 1996, p. 1332.
- [23] ISO 2631-5, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks, ISO, Geneva, Switzerland, 2004.
- [24] M. Agostinacchio, D. Ciampa, and S. Olita, The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review*, 6 (3), 267-275, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8>.
- [25] R. Haas, W. R. Hudson, and J. P. Zaniewski, *Modern Pavement Management*. Krieger Pub. Co., Malabar, Florida, USA., 1994, p. 583.
- [26] P. Múčka and L. Gagnon, Influence of tyre-road contact model on vehicle vibration response. *Vehicle System Dynamics*, 53 (9), pp. 1227-1246, 2015. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1041992>.
- [27] ASTM E 1170, Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surface, ASTM, West Conshohocken, PA, 1997. <https://doi.org/10.1520/E1170-97R17>.
- [28] S. Park, A. A. Popov, and D. J. Cole, Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration. *Journal of Terramechanics*, 41 (1), 41-68, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.02.010>.
- [29] H. Salmani, M. Abbasi, T. Fahimi Zand, M. Fard, and R. Nakhaie Jazar, A new criterion for comfort assessment of in-wheel motor electric vehicles. *Journal of Vibration and Control*, 28 (3-4), 316–328, 2020. <https://doi.org/10.1177/1077546320977187>.
- [30] G. Loprencipe and P. Zoccali, Ride Quality Due to Road Surface Irregularities: Comparison of Different Methods Applied on a Set of Real Road Profiles. *Coatings*, 7 (5), 59, 2017. <https://doi.org/10.3390/coatings7050059>.
- [31] G. Bonin, G. Cantisani, G. Loprencipe, and M. Sbrolli, Ride Quality Evaluation: 8 d.o.f. Vehicle Model Calibration. *4th International SIV Congress*, pp. 75-83, Palermo, Italy, 12-14 September, 2007.
- [32] E. Khorshid, F. Alkalby, and H. Kamal, Measurement of whole-body vibration exposure from speed control humps. *Journal of Sound and Vibration*, 304 (3-5), 640-659, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.013>.

