

Primljen / Received: 1.6.2017.  
Ispravljen / Corrected: 12.12.2017.  
Prihvaćen / Accepted: 15.6.2018.

Dostupno online / Available online: 25.10.2018.

# Razine svojstava kolničkih konstrukcija rizičnih za ljudsko zdravlje

## Autori:



Doc.dr.sc. **Ufuk Kirbaş**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Ondokuz Mayıs  
Građevinski fakultet  
Samsun, Turska  
[ufuk.kirbas@omu.edu.tr](mailto:ufuk.kirbas@omu.edu.tr), [ufukkirbas@gmail.com](mailto:ufukkirbas@gmail.com)



Prof.dr.sc. **Mustafa Karaşahin**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Istanbul Gelisim  
Građevinski fakultet  
Istanbul, Turska  
[mkarasahin@gelisim.edu.tr](mailto:mkarasahin@gelisim.edu.tr)

Izvorni znanstveni rad

**Ufuk Kirbaş, Mustafa Karaşahin**

## Razine svojstava kolničkih konstrukcija rizičnih za ljudsko zdravlje

U radu se analiziraju granična svojstva asfaltnih kolnika, odnosno djelovanje vibracija uslijed kretanja vozila na zdravlje vozača osobnih automobila koji prometuju po gradskim cestama. Ukupne vrijednosti vibracija u vertikalnom smjeru mjerene su kod različitih brzina prometovanja na dionicama kolnika kojima je indeks stanja kolnika određen prema sustavu PAVER, a vrijednosti vibracija (VDVz) su izračunane. Rezultati procjene pokazuju da razine karakteristika kolnika trebaju biti barem "dovoljne" kako ljudsko zdravlje ne bi bilo ugroženo kod brzine kretanja vozila 50 km/h tijekom osmosatne vožnje u jednom danu.

### Ključne riječi:

svojstva kolnika, PCI, VDV, brzina prometovanja, zdravstveni rizik

Original scientific paper

**Ufuk Kirbaş, Mustafa Karaşahin**

## Pavement performance levels causing human health risks

This study investigates performance thresholds of hot mix asphalt pavements in terms of health risks from vibrations affecting drivers of passenger cars on urban roads. The whole-body vibration values in vertical direction are measured at various riding speeds at some pavement sections that are on the pavement condition index (PCI) rating scale proposed by the PAVER system, while the vibration values (VDVz) are calculated. Evaluation results reveal that pavement performance levels have to be at least "fair" (PCI scale range between 55 and 70) to ensure that the health of human body is not negatively affected at 50 km/h riding speed during a daily 8-hour driving.

### Key words:

pavement performance, PCI, VDV, riding speed, health risk

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Ufuk Kirbaş, Mustafa Karaşahin**

## Ebenen der Fahrbahneigenschaften, die für die menschliche Gesundheit riskant sind

In der Abhandlung analysiert man die Grenzeigenschaften der asphaltierten Fahrbahnen beziehungsweise die Auswirkung der Vibration aufgrund der Bewegung von Fahrzeugen auf die Gesundheit von Pkw-Fahrern, die auf den Stadtstraßen fahren. Die Gesamtwerte der Vibrationen in vertikaler Richtung wurden bei unterschiedlichen Verkehrsgeschwindigkeiten auf Fahrbahnabschnitten gemessen, deren Index des Fahrbahnzustandes gemäß dem PAVER-System bestimmt wurde, und die Vibrationswerte (VDVz) wurden berechnet. Die Bewertungsergebnisse zeigen, dass die Ebenen der Fahrbahneigenschaften zumindest "ausreichend" sein sollten, um die menschliche Gesundheit bei Fahrgeschwindigkeiten von 50 km/h während einer achtstündigen Fahrt an einem Tag nicht zu gefährden.

### Schlüsselwörter:

Fahrbahneigenschaften, PCI, VDV, Verkehrsgeschwindigkeit, Gesundheitsrisiko

## 1. Uvod

Uporabivost kolnika je koncepcija utemeljena na numeričkim vrijednostima kojima se opisuje razina udobnosti koju uživaju vozači i putnici tijekom vožnje na autocestama. Razina uporabivosti kolnika bazira se na načelima glatkoće, udobnosti i sigurnosti [1, 2]. Stupanj kvalitete vožnje je definiran na temelju cjelokupnog iskustva putovanja vozilom vozača i putnika (uključujući kretanje, okolinu i druge faktore) [3]. Uvidom u novije spoznaje iz teorije sustava upravljanja kolnicima, utvrđeno je da se uporabivost kolnika može odrediti primjenom skupne ocjene bazirane na ocjeni kvalitete prometovanja koju donose stručnjaci za kolnike [1].

Poznato je da oštećenja kolnika negativno utječu kako na vozače tako i na putnike [1]. U mnogim se studijama navodi da su od negativnih utjecaja najizraženije vibracije koje se javljaju u samom vozilu. Također je poznato da su glavni uzroci vertikalnih vibracija mehanička konstrukcija vozila i oštećenja kolnika na prometnici kojom prometuje vozilo. Za kratka putovanja kakvoća vožnje definira se udobnošću vožnje i parametrima sigurnosti. Međutim, ljudsko zdravlje, pa tako i izloženost tijela vibracijama, javlja se kao jedna od komponenata tijekom dužih putovanja [3]. Vibracije loše utječu na mnoge zaposlenike. Bovenzi navodi da je 4 do 7% od svih zaposlenih osoba u SAD-u, Kanadi i nekim europskim državama izloženo potencijalno opasnim vibracijama [4]. Dvanaest posto zaposlenih u sektorima prometa, skladištenja i komunikacija te četrnaest posto zaposlenih u sektorima veleprodaje i maloprodaje, popravljivanja motornih vozila, motocikla i kućanstvima, izloženo je potencijalnim opasnostima od vibracija [4]. Radnici zaposleni u industriji građevinarstva, rudarstva, poljoprivrede i prometa često su podložni opasnim razinama vibracija. U prometnoj je industriji poznato da vibracije negativno utječu na vozače teških komercijalnih vozila. U literaturi se navodi da se još uvijek zanemaruju negativni utjecaji vibracija na vozače osobnih automobila koji ta vozila koriste u poslovne svrhe.

U literaturi nalazimo tek ograničeni broj studija koje se bave pitanjem kvalitete vožnje ili, drugim riječima, pitanjem osjetljivosti osoba na vibracije koje se javljaju tijekom vožnje, a koje uzimaju u obzir udobnost, zdravstveni rizik i sigurnost. Kvaliteta vožnje i granice vibracija koje negativno djeluju na ljudsko zdravlje uglavnom se određuju pomoću međunarodnih normi ISO 2631 i BS 6841, u kojima su opisane metode za ocjenjivanje vibracija cijelog tijela (eng. *whole-body vibration* - WBV). U mnogim se studijama kvaliteta vožnje ocjenjuje pomoću vrednovanog efektivnog ubrzanja ( $a_w$ ) i vrijednosti vibracijske doze (eng. *Vibration Dose Value* - VDV) određenog na temelju analize izmjerenih vertikalnih vibracija, ponderiranih s obzirom na frekvenciju [5, 6]. Već se dugi niz godina veliko značenje pridaje udobnosti vožnje i sigurnosti na cestama na kojima se razvijaju velike brzine. Međutim, novije su studije pokazale da kvaliteta vožnje povezana sa stanjem kolnika bitno utječe na sigurnost cestovnog prometa i ljudsko zdravlje i na cestama s niskim brzinama prometovanja [7, 8].

Provedene analize pokazuju da se odnos između svojstva kolnika i vibracija cijelog tijela za vozače i putnike uglavnom ocjenjuje samo mjerenjem vertikalnih vibracija, pri čemu se zanemaruju vibracije u svim ostalim osima. Cantisani i Loprencipe istraživali su odnos između međunarodnog indeksa hrapavosti (eng. *international roughness index* - IRI) koji upućuje na svojstva kolnika i vertikalne akceleracije ponderirane s obzirom na vrednovano efektivno ubrzanje ( $a_{wz}$ ) prema normi ISO 2631. U toj studiji vrijednosti IRI i vrijednosti vibracija određivale su se na dionici ceste pri brzini od 80 km/h, s tim da su dobiveni rezultati korišteni u kalibriranju cjelokupnog modela vozila [5].

Pradena i Houben objašnjavaju granične vrijednosti indeksa IRI koje se mogu koristiti u gradskim cestovnim mrežama tako da ceste mogu služiti vozilima, vozačima i putnicima, bez štetnih utjecaja (u odnosu na vertikalnu vibraciju) [9]. U svome radu Lakušić i dr. istražuju odnos između površinskih oštećenja, vrijednosti indeksa IRI i vibracija kojima su izložena vozila. Oni predlažu sustav koji se može primijeniti pri donošenju odluka za provedbu sanacije kolnika na gradskim prometnicama [10].

Neke studije pokazuju da svojstva kolnika poput niske razine uporabivosti loše utječu na ljudsko zdravlje tijekom dužih putovanja [3, 11].

Osim toga, mnoge studije pokazuju da primjena vrijednosti VDV koja uključuje trajanje izloženosti u analizi vibracija te analizu ekstremnih vrijednosti u mjerenju akceleracije, omogućuje postizanje točnijih rezultata u svrhu iskazivanja kvantitativnog utjecaja vibracija na ljudsko zdravlje [12]. U nekim se studijama analizira izloženost vibracijama u vozilima koja se koriste na neravnim terenima (npr. na vojnim poligonima, u poljoprivredi, građevinarstvu itd.) te utjecaj tih vibracija na ljudsko zdravlje na temelju normi ISO 2631-1 i ISO 2631-5 [13, 14]. Dugotrajno izlaganje WBV-u može uzrokovati poteškoće u području lumbalne kralježnice. Međutim, te poteškoće nisu dovoljno velike da bi se mogao ustanoviti odnos između vibracija cijelog tijela i rizika od oštećenja lumbalne kralježnice [15]. Kao i kod svih ostalih struktura u prirodi, i organi ljudskog tijela također emitiraju vibracije u rasponu prirodnih frekvencija. Stoga rezonancija koja proizlazi iz konflikta između vibracijskih signala kojima je izloženo ljudsko tijelo i prirodnih vibracija organa dovodi do neugode u tijelu u slučaju dugotrajnijeg izlaganja [3].

U nekim studijama prikazanim u literaturi, koncepcija vibracija cijelog tijela pokušava se objasniti na temelju osobnih percepcija i interpretacija. Izrađene su studije u okviru kojih se mjeri broj otkucaja srca te ocjenjuje reakcija ljudi pri izlaganju određenim vibracijama koje se generiraju putem ovjesnih sustava u laboratoriju [16, 17].

Isto tako, postoje i studije u kojima se istražuje ergonomska struktura vozačkog sjedala i ovjesi građevinskih vozila i strojeva (kamiona, tegljača, valjaka itd.) te se analizira izloženost vozača vibracijama cijelog tijela ovisno o terenskim uvjetima u kojima se dotična vozila i mehanizacija koriste [18, 19]. Druge studije uspoređuju rezultate statističke analize podataka o vibracijama s pokazateljima svojstva kolnika te se opisuje odnos između

odstupanja od standardnih devijacija u uzdužnom smjeru, korijena kvadrata srednje vrijednosti akceleracije i asimetrije [20].

Mnogi pokazatelji svojstava kolnika, prihvaćeni od brojnih nadležnih institucija, usvojeni su kao norme koje se primjenjuju diljem svijeta, [21]. Treba napomenuti da do sada nije proveden dovoljan broj istraživanja koja uspoređuju granična svojstva kolnika koja bi upućivala na postojanje zdravstvenog rizika s obzirom na pokazatelje učinkovitosti i izloženost vibracijama u cestovnim vozilima.

U ovom se radu granična svojstva asfaltnih kolnika procjenjuju kroz zdravstveni rizik za vozače koji voze osobne automobile prema općepriznatim ergonomskim ograničenjima koja se uzimaju u obzir u vezi s vibracijama. Ispitani su asfaltni kolnici (HMA) koji se najčešće koriste u urbanim sredinama. Kako bi se objasnilo sedam razina svojstava, odabrani su kolnici koji se nalaze na ljestvici indeksa stanja kolnika (eng. *Pavement Condition Index - PCI*) prema sustavu PAVER.

Na tim su kolnicima izmjerene vibracije cijelog tijela u vertikalnom smjeru na sjedištu vozača (točno ispod vozača) pri brzinama vožnje od 20, 30, 40 i 50 km/h, a izračunane su i vertikalne vrijednosti vibracijske doze ( $VDV_z$ ) definirane u normi ISO 2631-1. Na temelju tih podataka procijenjene su vrijednosti vibracijske doze ( $VDV_z$ ) za svaku brzinu vožnje za putovanja u trajanju od 1, 2, 4, 6, 8, 10 i 12 sati na različito izvedenim kolnicima. Rezultati su procijenjeni pomoću dijagrama, na bazi prosječnih raspona ljestvice PCI za svaku brzinu prometovanja. Na taj su način određena granična svojstva kolnika u odnosu

na zdravstveni rizik za razne razine učinkovitosti kolnika na urbanim prometnicima tijekom dugotrajnih putovanja. Pritom su dobivene i značajne informacije za razumijevanje razine svojstva kolnika koje nepovoljno utječu na ljudsko zdravlje, i to posebno za vozače osobnih automobila koji u velikoj mjeri sudjeluju u gradskom prometu (taksisti itd.).

## 2. Materijali i metode

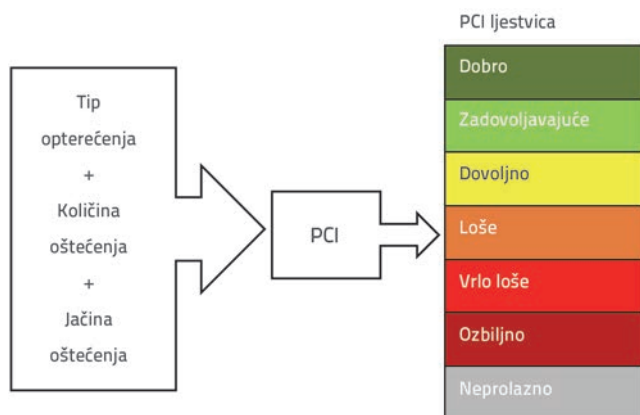
### 2.1. Ocjena učinkovitosti kolnika

Sustav PAVER je sustav ocjenjivanja koji se primjenjuje za procjenu trenutačnih svojstava kolnika na bazi prikupljenih podataka prema uputama za identifikaciju iz norme ASTM D 6433-11 na uzorcima površine od  $225 \pm 90 \text{ m}^2$  koji su odabrani nasumično u skladu s načelima za raspoređivanje. U tim se procjenama koeficijent definira određivanjem odnosa između veličine površine uzorka i podataka o 20 raznih vrsta nedostataka kolnika, uz grupiranje u tri razine: niska (L), srednja (M) i visoka (H) razina. Na temelju tog koeficijenta određene su indicirane vrijednosti prema tablicama o razini učinkovitosti koje se pripremaju za svaku vrstu oštećenja. Odbijanjem dobivenih indiciranih vrijednosti od 100 dobiva se vrijednost PCI, kojom se definira svojstvo kolnika pomoću numeričkih vrijednosti od 0 do 100 prema normi ASTM D 6433-11 [22]. Kada vrijednost PCI iznosi 100, radi se o kolniku na kojemu nema oštećenja i koji je u najboljem stanju, a kada PCI vrijednost iznosi 0, kolnik je potpuno uništen i nepogodan za korištenje. PCI je indeks koji

Tablica 1. Klasifikacija oštećenja za asfaltno-betonske kolnike prema ASTM D 6433-11 [22]

Šifra	Oštećenje	Jedinica mjere	Definirane razine ozbiljnosti	Uzrok	Šifra	Oštećenje	Jedinica mjere	Definirane razine ozbiljnosti	Uzrok
1	Krokodilske pukotine	m <sup>2</sup>	Da	Opterećenje	11	Krpanje udarnih jama	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo
2	Znojenje	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo	12	Poliranost agregata	m <sup>2</sup>	Ne	Ostalo
3	Mrežaste pukotine	m <sup>2</sup>	Da	Klima	13	Udarne jame	Broj	Da	Opterećenje
4	Izbočine i udubljenja	m	Da	Ostalo	14	Željeznički prijelazi	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo
5	Valovanje	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo	15	Pojava kolotruga	m <sup>2</sup>	Da	Opterećenje
6	Uleknuća	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo	16	Pomaknuća	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo
7	Pojava rubnih pukotina	m	Da	Opterećenje	17	Pojava kliznih pukotina	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo
8	Pojava odraznih pukotina	m	Da	Klima	18	Bubrenje	m <sup>2</sup>	Da	Ostalo
9	Odlamanje traka/bankine	m	Da	Ostalo	19	Krunjenje	m <sup>2</sup>	Da	Klima
10	Pojava uzdužnih i poprečnih pukotina	m	Da	Klima	20	Trošenje uslijed atmosferskih utjecaja	m <sup>2</sup>	Da	Klima

pokazuje trenutačna svojstva kolnika, a temelji se na procjeni zajedničkih komponenata tipa oštećenja, razine oštećenja i ozbiljnosti oštećenja na površini kolnika [23]. Komponente PCI i ljestvica za ocjenjivanje prikazani su na slici 1.



Slika 1. Raspon indeksa stanja kolnika (PCI) prema normi ASTM D 6433-11 [22]

Koncepcija ljestvice za ocjenjivanje svojstava kolnika primjenjuje se u sustavu PAVER za opisivanje trenutačnog stanja kolnika pomoću raznih boja. Istovremeno se učinkovitost kolnika na toj ljestvici PCI opisno definira i kao "dobra" ili "zadovoljavajuća". U tablici 1. prikazana je kategorizacija oštećenja bazirana na sustavu PAVER koja se primjenjuje i za parkirališta (prema normi ASTM D 6433-11).

U ovom su istraživanju podaci o svojstvima kolnika prikupljeni na 23 gradske cestovne dionice u turskom gradu Samsunu. Sve dionice su asfaltirane vrućim asfaltnim mješavinama te s drugačijim razinama uporabivosti, kako je i definirano normom ASTM D 6433-11 koja se primjenjuje u sustavu PAVER. Podaci o površinskim oštećenjima prikupljeni su na 88,8% prvobitno definiranih cesta u svrhu ocjene stanja kolnika prema zahtjevima sustava PAVER. Međutim, na svim analiziranim dionicama, prema zahtjevima sustava PAVER, ocjenjivanje površine kolnika provedena su i na određenom broju uzoraka kako bi se povećala preciznost ocjenjivanja.

## 2.2. Mjerenje vibracija (ISO 2631) i ocjena

Prema podacima iz odgovarajućih studija, vibracije WBV akutno štetno djeluju na oštrinu vida i razinu spretnosti [24]. Vibracije dovode do zamora mišića, a taj je zamor jedan od osnovnih uzročnika prometnih nesreća. Uočeno je da više faktora utječe na sigurnost ponašanja vozača u cestovnom prometu [25]. Ti se faktori mogu grupirati u: organizacijske faktore (dužina putovanja, vrijeme putovanja, odmori), faktori vezani za radno mjesto (ergonomija, fizički faktori u kabini), vanjski faktori (gustoća prometa, vremenski uvjeti) i osobni faktori (starost, zdravstveno stanje).

Štetna djelovanja od vibracija cijelog tijela su: želučano–crijevne tegobe, degenerativne promjene u kralježnici, bol u donjem dijelu

leđa, teškoće u funkcioniranju autonomnog živčanog sustava, problemi s vratom i glavobolje [14]. U studijama se također navodi da se granice negativnog djelovanja vibracija na čitavo tijelo mogu iskazati kao matematički izraz [11, 13, 19]. U normi ISO 2631-1 opisani su osnovni faktori za objašnjenje WBV-a, tj. faktori potrebni za određivanje prihvatljive razine izlaganja ljudskog tijela vibracijama [26]. Četiri su moguća utjecaja vibracija na ljudsko tijelo: pogoršanje zdravstvenog stanja, umanjeње udobnosti, slabljenje percepcijskih sposobnosti i bolest kretanja (kinetozna). U normi ISO 2631-1, rasponi frekvencija u kojima dolazi do takvih utjecaja variraju od 0,5 do 80 Hz.

U normi ISO 2631-1 preporučuje se primjena Butterworthovog postupka filtriranja radi ocjenjivanja akcelerijskih signala u granicama frekvencije tercnog pojasa. U ovom kontekstu vibracijski se signali procjenjuju pomoću niskopropusnih i visokopropusnih filtera te pomoću digitalnog filtriranja, čime se ti signali pretvaraju u relevantne frekvencije. Za ocjenu vibracija cijelog tijela na temelju definicija iz norme ISO 2631-1, akcelometar na odgovarajućoj elastičnoj podlozi treba postaviti točno ispod vozača (kako bi se postiglo potpuno međudjelovanje uređaja i vozača).

Na temelju podjele na frekvencijska područja tercnog pojasa, množenjem akcelerijske frekvencije s ponderima definiranim u normi mogu se odrediti akceleracije ponderirane s obzirom na vrednovano efektivno ubrzanje ( $a_w$ ) i to zasebno za sva područja, primjenom jednadžbi koje se daju u nastavku. Prema normi ISO 2631-1,  $a_w$  smatra se prilično pogodnim parametrom za objašnjavanje prijenosa ubrzanja koju osjeća osoba na koju djeluju vibracije [26]. Vrijednost  $a_w$  se izračunava pomoću izraza (1):

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

gdje je  $a_w$  konfigurirana frekvencija vertikalne akceleracije,  $w_i$  je ponderijski faktor kojim se definira povezani faktor,  $a_i$  je vertikalna vrijednost srednjeg kvadrata (RMS) za interval tercnog pojasa. Ako je jedna vrijednost vršnog faktora vibracijskih mjerenja veća od 9, to znači da se treba razmotriti primjena metode bazirane na vrijednosti vibracijske doze (VDV), i to naročito kod predviđanja zdravstvenih rizika [26]. Prema normi ISO 2631-1, predviđanje vršne akceleracije točnije se može provesti metodom vibracijske doze VDV nego primjenom parametra  $a_w$ . Zbog toga se u određenom vremenskom intervalu analiza vrijednosti VDV provodi na četvrtoj potenciji akcelerijskih mjerenja umjesto na drugoj. Jedinica parametara metode VDV je  $m/s^{1.75}$ , iako se vrijednost VDV izračunava pomoću izraza (2) [26]:

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

gdje je  $a_w(t)$  vrednovano efektivno ubrzanje trenutne frekvencije, a  $T$  je vrijeme mjerenja. Kada se izloženost vibracijama sastoji

od više vremenskih intervala ( $i$ ) različitih magnituda, tada se vrijednost VDV izračunava za čitavo vrijeme izloženosti pomoću jednadžbe (3) [26]:

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

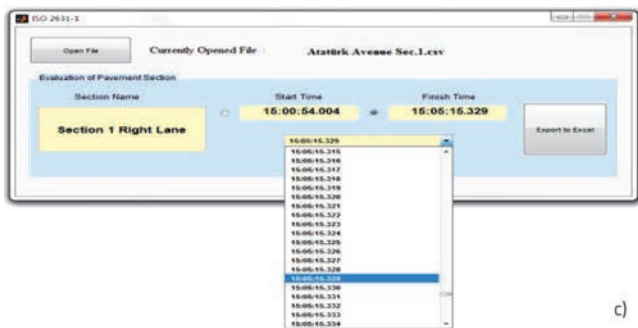
Kao što se vidi iz ovog matematičkog izraza, vrijednost VDV povećava se s povećanjem vremena mjerenja. U ovom se smislu vrijednost VDV može koristiti za izražavanje posljedica vibracija i jednodnevnog izlaganja za vrijeme rada ili putovanja, kao što se i navodi u normi ISO 2631-1. Drugim riječima, vrijeme izlaganja može se uzeti u obzir jer je upravo vrijednost VDV vrlo koristan pokazatelj za ocjenu vibracija u vezi sa zdravstvenim rizicima. Osim toga, sljedeći se pristup, dan u izrazu (4), preporučuje za izračunavanje potencijalnih vrijednosti VDV-a kojim su pojedinci izloženi za vrijeme dugotrajnih vibracija baziranih na reprezentativnom mjerenju VDV-a za kraća razdoblja [27]:

$$VDV = VDV_{part} \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{t}} \quad (4)$$

gdje je  $VDV_{part}$  vrijednost VDV izmjerena u reprezentativnom razdoblju, dok vrijednosti  $t$  i  $T$  označavaju trajanje čitave smjene. U ovom su radu vrijednosti vertikalnih vibracija izmjerenih na vozačevu sjedištu, zadane vrijednosti PCI, te vrijednosti VDV ( $VDV_z$ ), definirane su u skladu s metodom opisanom u normi ISO 2631-1. Mjereni su i analizirani samo podaci o vertikalnim vibracijama, jer se u radu ocjenjuju samo utjecaji

vibracija uzorkovanih trenutačnom razinom svojstva kolnika, koja se određuje na temelju površinskih oštećenja. Vrijednosti vibracije izmjerene su u vertikalnom smjeru na cestama na kojima je obavljeno ocjenjivanje postupkom PAVER. Za takvo je mjerenje korišten sustav za mjerenje vibracija koji se sastoji od vertikalnih akcelerometara podešenih za mjerenje vibracija ( $\pm 4g$ , osjetljivost:  $500 \pm 15$  mV/g), GPS antene i uređaja za bilježenje podataka. Podaci o vertikalnom ubrzanju i GPS podaci mjereni su i odmah preneseni na računalo kao akceleracije od 1000 pcs u sekundi za jednu lokaciju i jednu brzinu u sekundi tijekom mjerenja. Prema uputama iz normi ISO 2631-1 i ISO 8041 jedan akcelerometar na elastičnoj podlozi je postavljen ispod vozača kako bi se omogućilo što točnije kvantitativno određivanje vibracija cijelog tijela [28]. Vrijednosti vibracija izmjerene su pomoću računalnog programa razvijenog u programu MATLAB pomoću analitičke metode opisane u normi ISO 2631-1 te su dobivene vrijednosti  $VDV_z$  i vremena mjerenja po dionicama (što je određeno prije definiranja vrijednosti PCI). Mjerenja vertikalnih vibracija provedena su pomoću osobnog vozila "klase C" (niža srednja klasa) prema klasifikaciji Euro Car, što odgovara vozilu dužine od 4100 do 4600 mm. Vozač ima 36 godina, visok je 172 cm te mase 85 kg.

Cilj je ovog rada je istražiti granične razine svojstava kolnika koje utječu na zdravstveni rizik uslijed djelovanja vibracija kojima je izloženo ljudsko tijelo u osobnom vozilu pri brzinama od 20, 30, 40 i 50 km/h, što su tipične brzine prometovanja u gradskim područjima. Zbog toga je potrebno ocijeniti uzdužni profil cestovne prometnice na temelju mjerenja vibracija. Tijekom mjerenja vibracija usvojena su načela mjerenja uzdužnog profila



Slika 2. a i b) Sastav za mjerenje vibracija; c) Program za analizu vibracija; d) Prikaz probne dionice

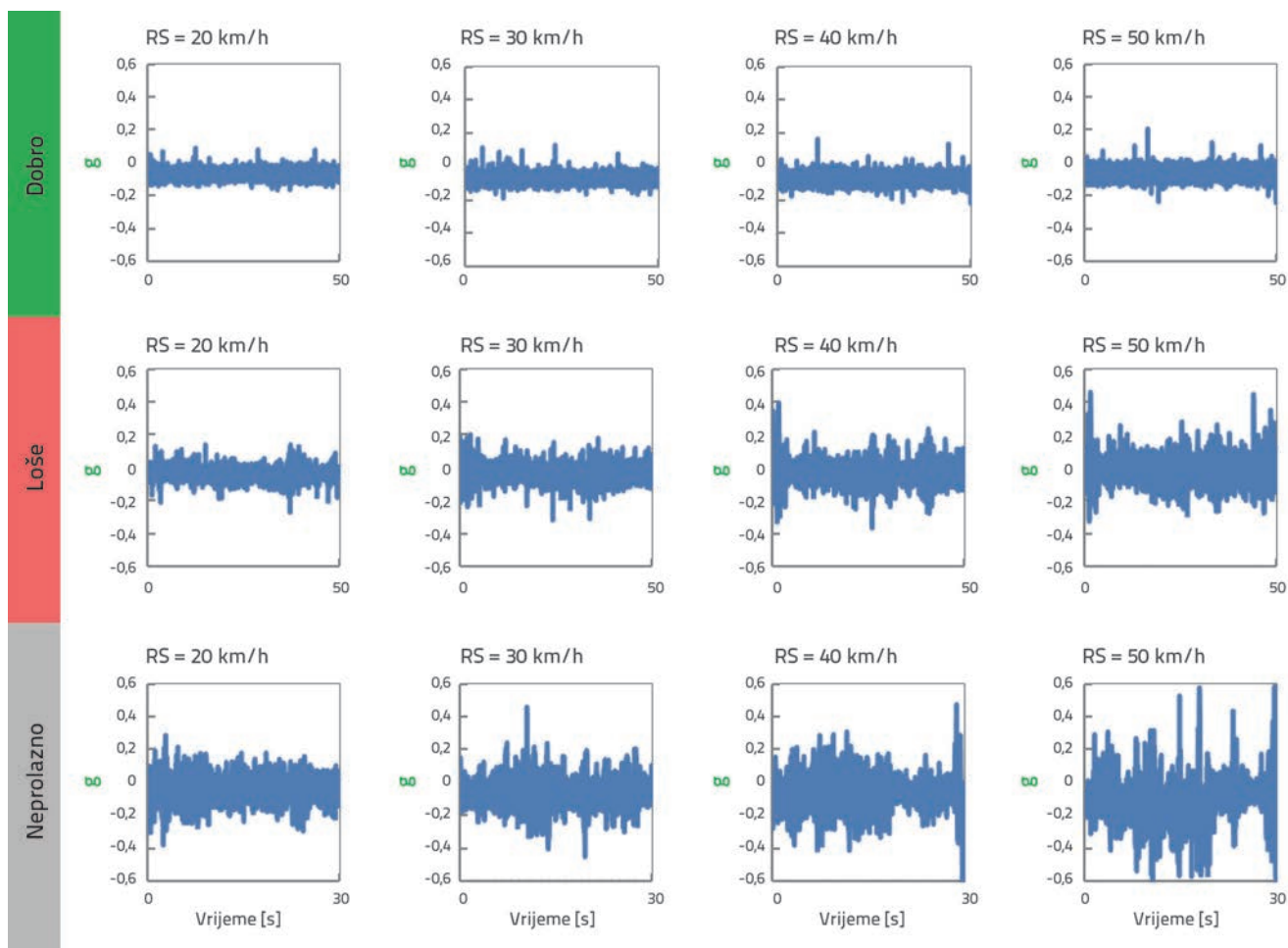
koja su definirana u normama ASTM E 950 [29], E 1082 – 90 [30] i E 1926 – 08 [31].

Prema općim načelima iskazanima u tim normama, kao kriteriji za mjerenje usvojene su sljedeće postavke: mjerenje istih prometnih trakova i minimalna konstantna brzina vozila od 20 km/h. Na slici 2. prikazan je sustav za mjerenje vibracija koji je korišten u terenskim ispitivanjima, računalni program za analizu vibracija, i segment probne dionice.

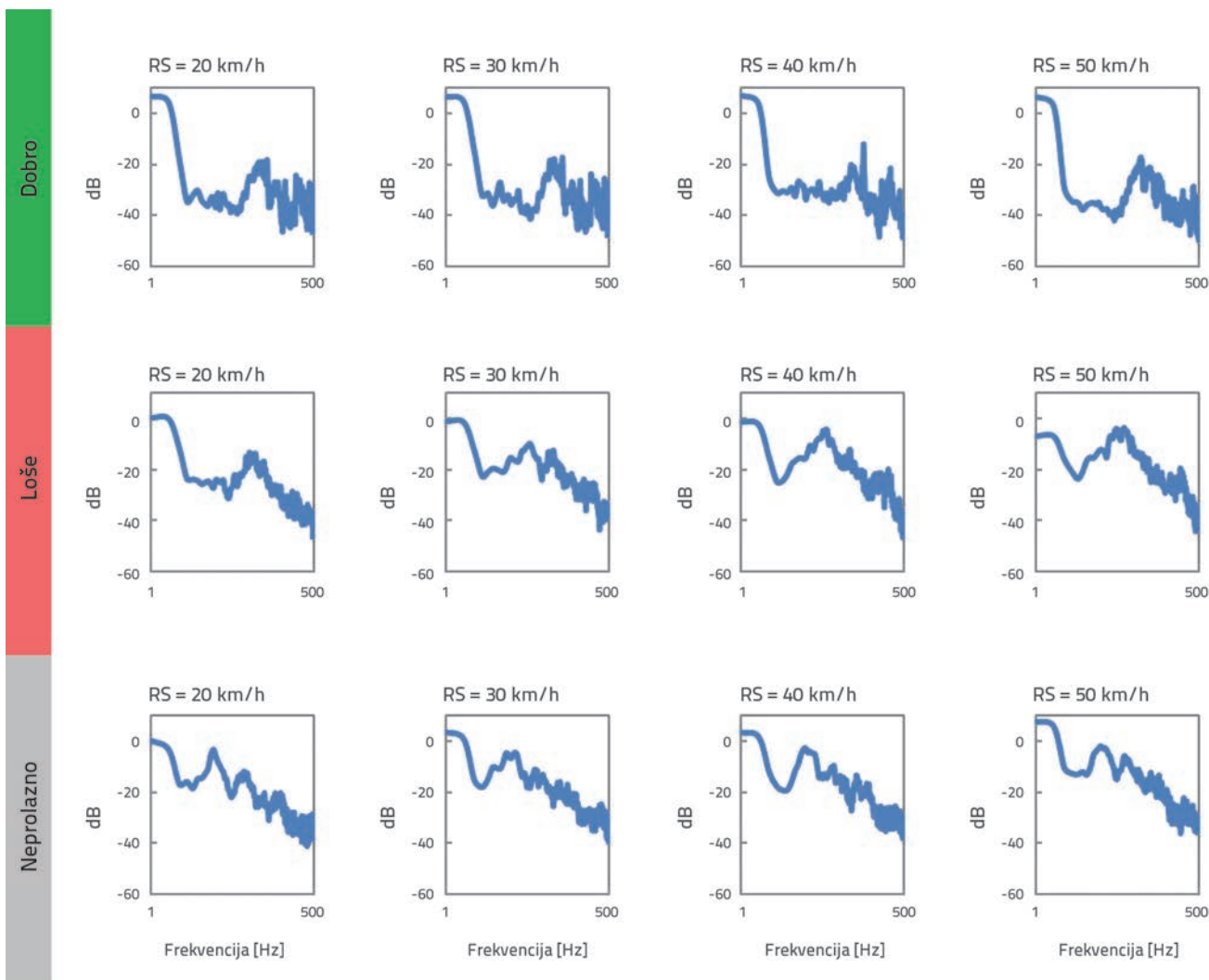
U mnogim državama diljem svijeta, maksimalna dopuštena brzina prometovanja u gradskim područjima obično iznosi oko 50 km/h. Stoga su mjerenja vibracija provedena i analizirana za konstantne brzine od 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h i 50 km/h. Mjerenja vibracija provedena su na 23 dionice cestovnih prometnica za svaku brzinu prometovanja. Na cestama s više prometnih trakova mjerenja vibracija provedena su zasebno za svaki trak, a vrijednosti  $VDV_z$  također su određene za pojedinačne trakove. Vrijednost  $VDV_z$  za čitavu dionicu izračunana je određivanjem prosjeka pojedinačnih vrijednosti.

Prilikom određivanja dionica na kojima će se obaviti mjerenja vibracija, usvojeno je načelo prema kojemu se barem jedno mjerenje (tj. određivanje vrijednosti PCI) treba obaviti za svaki od sedam raspona zadanih u ljestvici za ocjenjivanje indeksa

stanja kolnika (PCI) (slika 1.). Na taj je način omogućeno iskazivanje raspona ocjena PCI za sve analizirane podatke. Podaci o vibracijama izmjereni na istoj dionici za razne brzine prometovanja recipročno su analizirani sa svojim "sirovim" stanjem. Uočeno je da podaci o vibracijama mogu biti logični čak i kada nisu ponderirani, i to zato što se pri prolasku vozila kroz dionicu generiraju velike amplitude, naročito pri nižim razinama učinkovitosti. Općenito uzevši, amplitude vibracija rastu usporedno sa smanjenjem učinkovitosti kolnika te s povećanjem brzine. Neponderirani podaci o vibracijama za dobre, loše i neprolazne razine učinkovitosti dionice prikazani su na slici 3. Slična je analiza provedena određivanjem spektralne gustoće snage (eng. *power spectral density* - PSD) za podatke, kako bi se ustanovilo koliko energije imaju signali vibracija u svakoj komponenti frekvencije. Analize pomoću postupka PSD provedene na nekim dionicama za razine svojstva "dobro", "loše" i "neprolazno", prikazane su na slici 4. Poznato je da se spektralne gustoće mnogo ne mijenjaju u niskofrekvencijskim vibracijama koje utječu na ljudsko tijelo iako se radi o značajnim razlikama u amplitudama [3, 11, 13]. Ovaj je slučaj prikazan na slici 4. Općenito se smatra da su brzina vozila i pokazatelj trenutanih svojstva kolnika dva faktora koja najviše utječu na kvalitetu



Slika 3. Neponderirane vibracije u vertikalnom smjeru (z) za nekoliko raspona učinkovitosti pri različitim brzinama prometovanja (RS)



Slika 4. Neponderirane spektralne gustoće snage (PSD) za određene razine učinkovitosti pri različitim brzinama prometovanja (RS) (os x je skala log po bazi 10)

prometovanja osobnim vozilima na ravnim cestovnim dionicama bez nagiba. Metode za predviđanje zdravstvenog rizika koji proizlazi iz izloženosti vibracijama cijelog tijela (0,5 – 80 Hz) na poslu obično se baziraju na dvama parametrima: akceleraciji koja se prenosi na dio ljudskog tijela u kontaktu s izvorom vibracija, i na trajanju izloženosti [32]. Kao što je prije opisano, vrijednosti  $VDV_z$  i vrijeme mjerenja na dionicama dobivaju se mjerenjem vibracija u vertikalnom smjeru pri brzinama prometovanja od 20, 30, 40 i 50 km/h na asfaltnim kolnicima s raznim razinama svojstava. Primjenom izraza (4) dobivaju se potencijalne vrijednosti vibracija ( $VDV_z$ ) u vozilu za svaku brzinu prometovanja u vremenu putovanja od 1, 2, 4, 6, 8, 10 i 12 sati na dionicama s raznim razinama svojstava.

U analizi se vrijednosti PCI za kolnike iskazuju za svaki od sedam raspona, definiranih prema ljestvici ocjenjivanja postupka PAVER kako bi se odredile cestovne dionice na kojima će se obaviti mjerenje. U tom kontekstu, očekivalo se da će prosječna vrijednost PCI dionice odabrane iz svakog raspona biti u blizini

prosječna granične vrijednosti ljestvice. Prosječne vrijednosti prikazane u tablici 2. pokazuju da se prosječne vrijednosti PCI za dionice na kojima su određena svojstva kolnika bila vrlo bliska prosječnim vrijednostima iz ljestvice PCI. Kako gornja granična vrijednost ne uključuje samo one u rasponu ljestvice koje su označene kao "dobre", parametri vibracija izračunani su na cestovnim dionicama na kojima je vrijednost PCI iznosila 100. Primjenom istog pristupa vrijednost  $VDV_z$ , izmjerena i analizirana za kolnike s raznim vrijednostima PCI i srednjim vrijednostima dobivena je u skladu s odgovarajućim intervalom na ljestvici PCI. Tako je određena jedinstvena prihvatljiva vrijednost  $VDV_z$  iskazana intervalom na ljestvici. Kao primjer u tablici 2 prikazana je osmosatna izloženost vozača (vrijednosti  $VDV_z$ ) različitim brzinama prometovanja i različitim rasponima na ljestvici PCI.

U određenim odobrenim tehničkim normama i propisima iskazane su granice vrijednosti VDV za koje se smatra da negativno djeluju na ljudsko zdravlje. U Direktivi Europske

Tablica 2. Vrijednosti  $VDV_z$  ( $m/s^{1.75}$ ) na razmatranim cestovnim dionicama tijekom osmosatnog putovanja

Ocjena stanja kolnika	Prosječne vrijednosti PCI (prema ASTM 6433)	Prosječne vrijednosti PCI na izmjerenim dionicama	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
Dobro	93	100	3,0915	3,4116	3,0067	2,7449
Zadovoljavajuće	78	77	4,7759	6,3631	6,3436	7,1976
Dovoljno	63	64	5,0332	6,7696	7,4656	9,0546
Loše	48	49	5,4668	7,1967	8,1802	9,5966
Vrlo loše	33	34	6,7999	8,6802	10,3964	11,3581
Ozbiljno	18	21	7,7099	9,9420	11,6310	12,4978
Neprolazno	5	5	8,6847	10,9806	13,1556	13,7561

unije o fizikalnim agensima preporučuje se usvajanje akcijske vrijednosti izlaganja od  $9,1 m/s^{1.75}$  te granične vrijednosti izlaganja od  $21 m/s^{1.75}$  nakon osmosatnog izlaganja vibracijama [33, 34]. Drugim riječima, ljudsko zdravlje može biti narušeno, i može doći do trajnih oštećenja tijela, pri vrijednosti od  $9,1 m/sn^{1.75}$  i izlaganju vibracijama na putovanju koje traje više od osam sati. Isto tako, uvjeti za raspon izlaganja vibracijama u kojem može doći do narušavanja ljudskog zdravlja iskazani su i u normi ISO 2631-1, vidi tablicu 3 [34].

Tablica 3. Granice izlaganja ljudskog zdravlja [34]

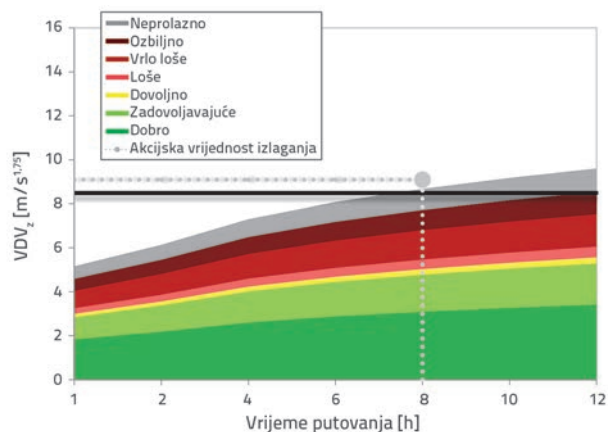
$VDV [m/s^{1.75}]$	Opis
$< 8,5$	Zdravstveni rizici nisu objektivno utvrđeni
$8,5 - 17$	Potreban je oprez glede mogućih zdravstvenih rizika
$> 17$	Zdravstveni rizici su mogući

### 3. Rezultati

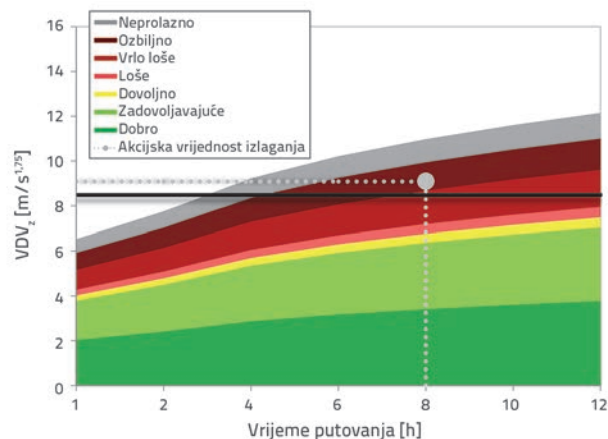
WBV se može definirati kao vibracije koje osjeća neka osoba uslijed izravnog kontakta s vibrirajućim površinama [3]. Stoga se, prema normi ISO 2631-1, pomoću vrijednosti vibracijske doze (VDV) mogu dobiti precizniji rezultati od ocjene  $a_w$  u ekstremnim točkama, gdje su najviši i najniži podaci o akceleraciji odabrani kao parametri za ocjenjivanje.

U ovom su radu opisane prihvatljive granične vrijednosti koje su definirale nadležne ustanove uzimajući u obzir osnovne značajke ljudskog tijela, iako se pojedinačno mogu odrediti i nešto drugačije vrijednosti prihvatljivosti za osjetljivost i snagu vibracija. U zaključku se smatra da povećanje vrijednosti VDV iznad granične vrijednosti od  $8,5 m/s^{1.75}$  negativno utječe na ljudsko tijelo. Istovremeno se može reći da je povećanje iznad granice od  $9,1 m/s^{1.75}$  nakon osmosatne izloženosti vibracijama također parametar koji iskazuje negativno djelovanje na ljudsko zdravlje. U vezi s ovim podatkom, vrijednosti  $VDV_z$  za različite periode izloženosti vibracijama i za različite brzine prometovanja, grafički su prikazane za svaki od sedam intervala na ljestvici PCI. Grafički prikaz oblikovan je primjenom sustava boja koji

se predlaže u okviru sustava PAVER za ocjenjivanje pomoću ljestvice PCI. Na svakom se prikazu vidi prag nepovoljnog utjecaja na ljudsko zdravlje ( $8,5 m/s^{1.75}$ ) s graničnom linijom i akcijskom vrijednošću koja odgovara osmosatnom izlaganju vibracijama ( $9,1 m/s^{1.75}$ ). Promjene vrijednosti  $VDV_z$  dobivene mjerenjem istih dionica pri brzinama prometovanja od 20, 30, 40 i 50 km/h, i srednje vrijednosti određene prema ljestvici PCI, prikazane su na slikama 5., 6., 7. i 8.

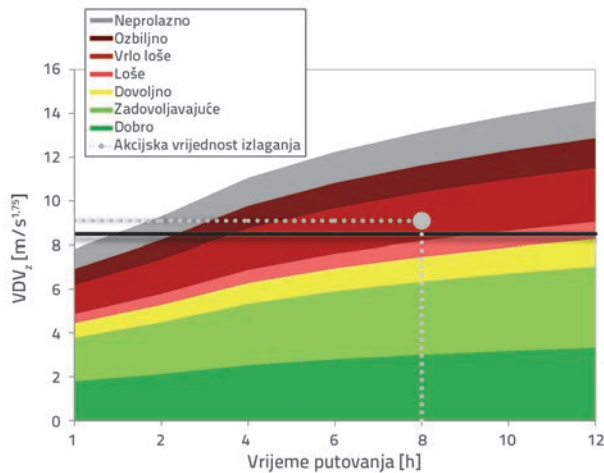
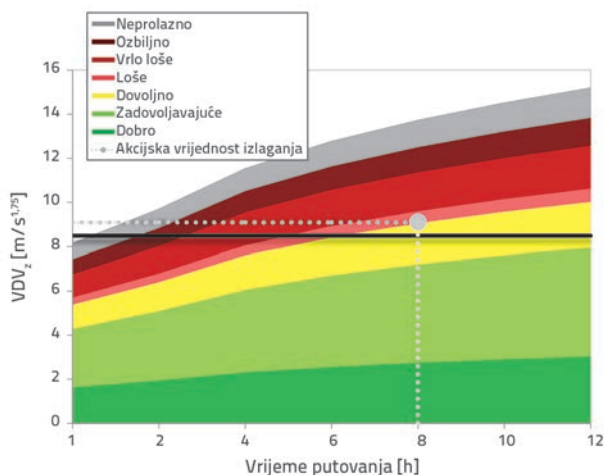


Slika 5. Promjene vrijednosti  $VDV_z$  pri brzini prometovanja od 20 km/h



Slika 6. Promjene vrijednosti  $VDV_z$  pri brzini prometovanja od 30 km/h



Slika 7. Promjene vrijednosti  $VDV_z$  pri brzini prometovanja od 40 km/hSlika 8. Promjene vrijednosti  $VDV_z$  pri brzini prometovanja od 50 km/h

Kao što se može vidjeti na slikama 5., 6., 7. i 8., izloženost ljudskog tijela vibracijama povećava se s povećanjem brzine prometovanja. Slika 5. pokazuje da se akcijska vrijednost izlaganja ne može ni postići tijekom osmosatnog putovanja pri brzini od 20 km/h. Nakon osmog sata, granice vibracija negativne za ljudsko zdravlje postignute se samo na cestama gdje su svojstva kolnika dobila "neprolaznu" ocjenu. Kao što vidimo na slici 6., pri brzini prometovanja od 30 km/h akcijska vrijednost izloženosti postignuta je na kolnicima s ocjenom "ozbiljno stanje", dok su granice negativnih vibracija za ljudsko zdravlje postignute za tri sata na cestama koje su dobile "neprolaznu" ocjenu, za četiri sata na cestama s "ozbiljnim" stanjem kolnika te za sedam sati na cestama "vrlo loših" svojstava kolnika. Osim toga, kao što možemo vidjeti na slici 7., pri brzini prometovanja od 40 km/h, akcijska vrijednost izloženosti postignuta je na cestama "vrlo loših" svojstava kolnika, dok su granice vibracija negativne za ljudsko zdravlje postignute za jedan sat i trideset minuta na cestama koje su dobile "neprolaznu" ocjenu, za dva sata na cestama gdje je stanje "ozbiljno", za četiri sata na cestama gdje su svojstva kolnika "vrlo loša", te za osam sati na cestama gdje

su svojstava "loša". Konačno, na slici 8. vidimo da je pri brzini prometovanja od 50 km/h, akcijska vrijednost izloženosti postignuta na dionicama koje su na granici između "loše" i "dovoljne" učinkovitosti kolnika. S druge strane, razine svojstva kolnika od najgore do najbolje poprilično brzo su se približavale granicama vibracija koje su negativne za ljudsko zdravlje kod brzine 50 km/h za vrijeme putovanja od nešto više od jednog sata. Pri toj brzini, granica negativnih vibracija za ljudsko zdravlje dostigla je razinu "dovoljno" nakon otprilike šest sati putovanja.

Te analize pokazuju da, uz negativan utjecaj na udobnost putovanja i sigurnost, ceste loših karakteristika kolnika mogu također negativno utjecati i na zdravlje vozača i putnika zbog poremećaja nastalih uslijed vibracija tijekom duljih putovanja. Drugim riječima, ova analiza pokazuje da zdravlje vozača može biti ugroženo ako koristi vozilo otprilike šest sati vozeći prosječnom brzinom od 50 km/h na kolnicima gdje je razina svojstava niža od vrijednosti "dovoljno" (raspon PCI: 70 do 55). Situacija je gotovo identična kada se radi o vozaču koji vozilo koristi više od osam sati i vozi prosječnom brzinom od 40 km/h na kolnicima gdje je razina svojstava niža od vrijednosti "loše" (raspon PCI: 55 do 40).

#### 4. Rasprava

Poznato je da su prema koncepciji upravljanja kolnicima parametri kao što su udobnost vožnje i stanje kolničke konstrukcije vrlo značajni za određivanje graničnih vrijednosti pri donošenju odluka o održavanju, sanaciji i obnovi kolnika [1]. Međutim, treba napomenuti da su dugoročni utjecaji kolnika na vozače izostavljeni u toj analizi. Nisu uzimani u obzir niti utjecaji gradskih cestovnih prometnica na korisnike osobnih vozila za poslovne namjene te na dužim vožnjama.

Prema normi ISO, granica na kojoj vozači počinju osjećati negativne posljedice vibracija iznosi  $8,5 \text{ m/s}^{1.75}$ . Uzimajući taj podatak u obzir, u tablici 4. prikazuju se razine svojstava kolnika koje su potrebne kako na vozače ne bi nepovoljno utjecale vibracije tijekom dužih putovanja u jednom danu. U takvim se slučajevima vozači trebaju češće odmarati.

Tablica 4. Razine svojstava kolnika na kojima vozači počinju osjećati negativne posljedice vibracija, za razne brzine i vremena putovanja

Vrijeme putovanja [sati]	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
1	Ne	Ne	Ne	Neprolazno
2	Ne	Ne	Neprolazno	Ozbiljno
4	Ne	Neprolazno	Ozbiljno	Vrlo loše
6	Ne	Ozbiljno	Vrlo loše	Loše
8	Neprolazno	Vrlo loše	Vrlo loše	Dovoljno
10	Neprolazno	Vrlo loše	Loše	Dovoljno
12	Ozbiljno	Vrlo loše	Loše	Dovoljno

Analiza rezultata pokazuje da nema negativnih posljedica za šestosatne vožnje pri brzini od 20 km/h, za dvosatne vožnje pri brzini od 30 km/h i za jednostane vožnje pri brzini od 40 km/h. Također se može uočiti da kod kratkih putovanja vibracije ne djeluju negativno na vozače pri niskim razinama učinkovitosti kolnika. Stoga bi kolnik trebao biti na razini svojstava "dovoljno" za vožnju od 8 sati na dan pri brzini od 50 km/h. Ovaj je rezultat u skladu s minimalnim razinama svojstava kolnika koja bi trebala biti ostvarena na gradskim cestama, kako je i predloženo prema sustavu PAVER [23]. Iz toga se može zaključiti da je prijedlog koji se daje u sustavu PAVER također prikladan za zaštitu ljudskog zdravlja od štetnog djelovanja vibracija.

Također je poznato da su vozači koji prelaze veće udaljenosti vozeći po gradskim cestama izloženi poprečnim i uzdužnim vibracijama koje su uzrokovane geometrijom ceste i prometom. Kako prosječna osoba tijekom svog života provede mnogo godina na putu, može se pouzdano zaključiti da na nju negativno utječu vibracije koje nastaju zbog propadanja cestovnih kolnika.

## 5. Zaključak

Vozači i putnici izloženi su vibracijama čitavog tijela tijekom vožnje, što negativno utječe na mnoge relevantne aspekte kao što su udobnost, ljudsko zdravlje i sigurnost. Parametar VDV izuzetno je koristan za iskazivanje djelovanja vibracija tijekom rada ili putovanja. U ovom se radu parametri VDV koriste za istraživanje odnosa između trajanja izloženosti vibracijama koja negativno utječe na ljudsko tijelo u smislu štetnog djelovanja na zdravlje i svojstva kolnika. Kolnici su određeni iskazivanjem raspona svojstava na bazi ljestvice PCI. Zatim su podaci o vibracijama izmjereni pri brzinama od 20, 30, 40 i 50 km/h, te su izračunane vrijednosti VDV u vertikalnom smjeru. Na temelju podataka o vibracijama izmjenjenima na cestovnim dionicama, određene su potencijalne vrijednosti vibracija

na osnovi vremena mjerenja i vrijednosti  $VDV_z$  pri različitim brzinama prometovanja, za dugotrajno izlaganje vibracijama koje se generiraju u vozilu. Izvedeni su grafički prikazi i rezultati su ocijenjeni pomoću tih vrijednosti  $VDV_z$  za svaku brzinu prometovanja, na temelju prosječnog raspona u ljestvici PCI. Analiza rezultata upućuje na porast izloženosti vibracijama s porastom brzine prometovanja. Iako na ljudsko tijelo nisu negativno utjecale vibracije na svakoj razini svojstava kolnika pri brzini od 20 km/h, uočeno je da se nepovoljni utjecaji javljaju pri višim brzinama prometovanja kada putovanje traje više od osam sati. Što se tiče vozača koji svakog dana prosječno voze osam sati po gradskim prometnicama, štetni utjecaji na njihovo zdravlje zbog vibracija kojima su izloženi trebali bi se spriječiti tako da se osigura razina svojstava kolnika od barem "vrlo loše" pri brzini prometovanja od 40 km/h. Osim toga, određeno je da razina učinkovitosti kolnika treba biti na granici između "loše" i "dovoljno" za brzine prometovanja od 50 km/h. Poznato je također da su vozači, kada voze brzinom većom od maksimalno dopuštene, u mnogim slučajevima izloženi trenutačnim vibracijama tijekom gradske vožnje s čestim intervalima "stani-kreni". Stoga se može zaključiti da razine svojstava kolnika trebaju biti što je moguće više kako bi se izbjegao nepovoljan utjecaj vibracija na ljudsko zdravlje. Ovo bi istraživanje moglo poslužiti agencijama odgovornima za upravljanje kolnicima (što uključuje i njihovo održavanje i sanaciju) kao sredstvo za prikupljanje značajnih i korisnih informacija, te za određivanje razine zadovoljstva vozača koji koriste cestovnu mrežu za koju su spomenute agencije nadležne.

## Zahvala

Autori zahvaljuju na pomoći koju im je pružilo Sveučilište u Istanbulu i Sveučilište Ondokuz Mayıs.

## LITERATURA

- [1] Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J.P.: Modern Pavement Management, Krieger Pub. Co., Malabar, Florida, USA, 1994.
- [2] Gáspár, L.: Management Aspects of Road Pavement Rehabilitation, Građevinar, 69 (2017) 1, pp. 31-40, <https://doi.org/10.14256/JCE.1629.2016>
- [3] Griffin, M.J.: Handbook of Human Vibration, Academic press, London, UK, 2012.
- [4] Bovenzi, M.: Health Effects of Mechanical Vibration, G Ital Med Lav Ergon, 27 (2005) 1, pp. 58-64.
- [5] Cantisani, G., Loprencipe, G.: Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits, Journal of Transportation Engineering, 136 (2010) 9, pp. 818-826, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000143)
- [6] Kim, M.S., Kim, K.W., Yoo, W.S.: Method to Objectively Evaluate Subjective Ratings of Ride Comfort, International Journal of Automotive Technology, 12 (2011) 6, pp. 831-837, <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0095-8>
- [7] Chan, C.Y., Huang, B., Yan, X., Richards, S.: Investigating Effects of Asphalt Pavement Conditions on Traffic Accidents in Tennessee Based on the Pavement Management System (Pms), Journal of Advanced Transportation, 44 (2010) 3, pp. 150-161, <https://doi.org/10.1002/atr.129>
- [8] Li, Y., Liu, C., Ding, L.: Impact of Pavement Conditions on Crash Severity, Accid Anal Prev, 59 (2013), pp. 399-406, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.028>
- [9] Pradena, M., Houben, L.: Functional Thresholds for Design-Maintenance of Urban Pavements, Građevinar, 68 (2016) 6, pp. 485-492, <https://doi.org/10.14256/JCE.1464.2015>

- [10] Lakušić, S., Brčić, D., Tkalčević Lakušić, V.: Analysis of Vehicle Vibrations—New Approach to Rating Pavement Condition of Urban Roads, *PROMET-Traffic&Transportation*, 23 (2011) 6, pp. 485-494, <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.183>
- [11] Griffin, M.J.: Discomfort from Feeling Vehicle Vibration, *Vehicle System Dynamics*, 45 (2007) 7-8, pp. 679-698, <https://doi.org/10.1080/00423110701422426>
- [12] Turner, M., Griffin, M.J.: Motion Sickness in Public Road Transport: Passenger Behavior and Susceptibility, *Ergonomics*, 42 (1999) 3, pp.444-461, <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- [13] Alem, N.: Application of the New Iso 2631-5 to Health Hazard Assessment of Repeated Shocks in U.S. Army Vehicles, *Industrial Health*, 43 (2005), pp. 403-412, <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.403>
- [14] Eger, T., Stevenson, J., Boileau, P.É., Salmoni, A.: Predictions of Health Risks Associated with the Operation of Load-Haul-Dump Mining Vehicles: Part 1-Analysis of Whole-Body Vibration Exposure Using Iso 2631-1 and Iso-2631-5 Standards, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38 (2008) 9-10, pp. 726-738, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.08.012>
- [15] Ayari, H., Thomas, M., Dore, S.: A Design of Experiments for Statistically Predicting Risk of Adverse Health Effects on Drivers Exposed to Vertical Vibrations, *Int J Occup Saf Ergon*, 17 (2011) 3, pp. 221-232, <https://doi.org/10.1080/10803548.2011.11076888>
- [16] Wang, F., Easa, S.: Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements, *Journal of Testing and Evaluation*, 44 (2016) 4, pp. 1671-1682, <https://doi.org/10.1520/JTE20140339>
- [17] Ahn, S.J.: Discomfort of Vertical Whole-Body Shock-Type Vibration in the Frequency Range of 0.5 to 16 Hz, *International Journal of Automotive Technology*, 11 (2010) 6, pp. 909-916, <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0108-z>
- [18] Hostens, I., Ramon, H.: Descriptive Analysis of Combine Cabin Vibrations and Their Effect on the Human Body, *Journal of Sound and Vibration*, 266 (2003) 3, pp. 453-464, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00578-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00578-9)
- [19] Zhao, X., Schindler, C.: Evaluation of Whole-Body Vibration Exposure Experienced by Operators of a Compact Wheel Loader According to Iso 2631-1:1997 and Iso 2631-5:2004, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (2014) 6, pp. 840-850, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.09.006>
- [20] Muniz de Farias, M., de Souza, R.O.: Correlations and Analyses of Longitudinal Roughness Indices, *Road Materials and Pavement Design*, 10 (2009) 2, pp. 399-415, <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690202>
- [21] Sandra, A.K., Sarkar, A.K.: Development of a Model for Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses, *International Journal of Pavement Engineering*, 14 (2013) 8, pp. 715-724, <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.703322>
- [22] ASTM. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D 6433-11. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2011.
- [23] Shahin, M.Y.: *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*, Springer, New York, 2005.
- [24] Mallick, Z.: Investigating Data Entry Task Performance on a Laptop under the Impact of Vibration: The Effect of Color, *Int J Occup Saf Ergon*, 13 (2007) 3, pp. 291-303, <https://doi.org/10.1080/10803548.2007.11076729>
- [25] Jamroz, K., Smolarek, L.: Driver Fatigue and Road Safety on Poland's National Roads, *Int J Occup Saf Ergon*, 19 (2013) 2, pp. 297-309, <https://doi.org/10.1080/10803548.2013.11076987>
- [26] ISO. Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Part 1: General Requirement. ISO 2631-1. Geneva, Switzerland: ISO; 1997.
- [27] South, T.: *Managing Noise and Vibration at Work*, Routledge, 2013, <https://doi.org/10.4324/9780080479132>
- [28] ISO. Human Response to Vibration - Measuring Instrumentation. ISO BS EN 8041:2005. Geneva, Switzerland: ISO; 2005.
- [29] ASTM. Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. ASTM E 950. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2009.
- [30] ASTM. Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness. ASTM E 1082-90. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2007.
- [31] ASTM. Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements. ASTM E 1923-08. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2008.
- [32] Mandal, B.B., Mansfield, N.J.: Contribution of Individual Components of a Job Cycle on Overall Severity of Whole-Body Vibration Exposure: A Study in Indian Mines, *Int J Occup Saf Ergon*, 22 (2016) 1, pp. 142-151, <https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1116815>
- [33] Nelson, C.M., Brereton, P.F.: The European Vibration Directive, *Industrial Health*, 43 (2005) 3, pp. 472-479, <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.472>
- [34] Bhattacharya, A., McGlothlin, J.D.: *Occupational Ergonomics: Theory and Applications*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1996.