

Primljen / Received: 15.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 5.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 22.1.2016.

Dostupno online / Available online: 10.7.2016.

# Funkcionalni kriteriji za održivo projektiranje gradskih kolnika

## Autori:



**Mauricio Pradena**, dipl.ing.građ.

<sup>1</sup> Sveučilište Concepción, Čile  
Građevinski fakultet

<sup>2</sup> Tehničko sveučilište u Delftu, Nizozemska  
Odjel za kolničke konstrukcije  
[m.a.pradenamiquel@tudelft.nl](mailto:m.a.pradenamiquel@tudelft.nl)



Izv.prof.dr.sc. **Lambert Houben**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište u Delftu, Nizozemska  
Odjel za kolničke konstrukcije  
[L.J.M.Houben@tudelft.nl](mailto:L.J.M.Houben@tudelft.nl)

Pregledni rad

**Mauricio Pradena, Lambert Houben**

## Funkcionalni kriteriji za održivo projektiranje gradskih kolnika

Funkcionalni kriteriji na gradskim prometnicama uglavnom se definiraju subjektivnim metodama, a ne pomoću objektivnih i ponovljivih postupaka. Danas su dostupne nove tehnologije za određivanje vrijednosti indeksa ravnosti (IRI), poput metode vibracije cijelog tijela (WBV) i metode varijabilnosti srčane frekvencije. Provedene su analize dostupnih tehnologija prema cjelovitom pristupu PC-O (eng. Pavements Clients - Oriented) uključujući simulacije pomoću računalnog programa HDM-4 (eng. Highway Development and Management system). U radu su predloženi IRI kriteriji za brzine dopuštene na gradskim prometnicama, takozvani IRIcity kriterij.

### Ključne riječi:

kolnici, funkcionalnost, projektiranje, održavanje, IRI, HDM-4

Subject review

**Mauricio Pradena, Lambert Houben**

## Functional criteria for sustainable design of urban pavements

Functional criteria have been mostly defined in urban pavements using subjective methods, rather than by means of objective and repeatable procedures. The Whole Body Vibration, the Heart Rate Variability, and new technologies to determine the IRI (International Roughness Index), are nowadays available. For that, an analysis of available technologies is made under a PC-O (Pavements Clients-Oriented) integral perspective, including simulations with the HDM-4 computer program. The IRI criteria for speeds allowed on urban roadways, i.e. the so-called IRIcity criteria, are proposed in the paper.

### Key words:

pavements, functionality, design, maintenance, IRI, HDM-4

Übersichtsarbeit

**Mauricio Pradena, Lambert Houben**

## Funktionale Kennwerte zum nachhaltigen Entwurf städtischer Fahrbahnen

Funktionale Kennwerte bei städtischen Fahrbahnen werden hauptsächlich mittels subjektiver Methoden definiert und nicht aufgrund objektiver und wiederholbarer Verfahren. Heute sind neue Technologien zur Ermittlung des Rauigkeitsindex (IRI) verfügbar, z.B. Vibration des Gesamtkörpers (WBV), und auf Herzfrequenzvariation basierende Methoden. Analysen der verfügbaren Technologien wurden mit dem integralen Verfahren PC-O durchgeführt, einschliesslich Simulationen mit dem Computerprogramm HDM-4. In dieser Arbeit werden IRI Kennwerte für zulässige Geschwindigkeiten auf städtischen Fahrbahnen vorgeschlagen, sogenannte IRIcity Kriterien.

### Schlüsselwörter:

Fahrbahnen, Funktionalität, Entwurf, Instandhaltung, IRI, HDM-4

## 1. Uvod

Pojam funkcionalno odnosi se na nešto praktično i korisno. U cestovnom inženjerstvu funkcionalno svojstvo kolnika definira ravnost njegove površine [1]. Thenoux i Gaete [2] proširili su tu definiciju na opće stanje kolnika uzimajući u obzir uporabljivost, sigurnost i troškove korištenja. Zadovoljstvo korisnika je cilj kojem bi trebao težiti svaki pružatelj usluga [3]. U smislu kvalitete, to zapravo uključuje primjenu načela o interesu korisnika prema normi ISO 9000: 2005 [4]. Iako je osiguranje nosivosti kolničke konstrukcije glavni zadatak inženjera pri projektiranju, sudionici u prometu ponajprije ocjenjuju kvalitetu ceste s obzirom na ravnost kolnika i kvalitetu vožnje temeljenu na funkcionalnom stanju kolnika [5]. Sudionici u prometu i vlasnici (ili njihovi zastupnici) prijevozničkih kompanija najbrojniji su korisnici cesta [3], kojima je najvažnija kvaliteta ceste. Uz to, prijevozničke kompanije kao prioritet navode troškove tijekom uporabnog vijeka kolnika [3].

Studija za procjenu održavanja cestovne infrastrukture (eng. *The Road Infrastructure Maintenance Evaluation Study - RIMES*) definira standarde održavanja kolnika kao "primjenu specifičnog održavanja u specifičnim uvjetima za specifične vrste kolnika i mostova" [6]. Standard održavanja odnosi se na način održavanja, vrstu oštećenja i razinu intervencije s obzirom na oštećenje kolnika [7]. Uzimajući u obzir da korisnici ceste ponajprije traže ispunjenje uvjeta vezane uz kvalitetu vožnje, potrebno je definirati razinu intervencije (kriterije) koja se temelji na udobnosti vožnje. Udobnost vožnje ovisi o ravnosti kolnika, interakciji vozila i kolnika te reakciji vozača na vibracije. Indeks ravnosti (eng. *International Roughness Index - IRI*) razvijen je 1982. godine u svrhu standardizirane i objektivne ocjene vozačeve percepcije ravnosti kolnika. Od tada indeks IRI ima široku primjenu prilikom mjerenja ravnosti međugradskih kolnika, a također služi za određivanje prioriteta pri održavanju i sanaciji kolnika. Zapravo, indeks IRI je pokazatelj općeg stanja kolnika jer na njegovu vrijednost utječu različita oštećenja [9-11]. Gradske prometnice imaju drugačije karakteristike u usporedbi s međugradskim prometnicama, primjerice veći broj ugrađenih poklopaca za revizijska okna, učestala raskrižja, kraće dionice, prometne znakove i znakove za obavezno zaustavljanje. Na gradskim prometnicama funkcionalni kriteriji uobičajeno se definiraju na temelju subjektivne ocjene ili pomoću indeksa PSR (eng. *Pavement Serviceability Rating*) i indeksa PCI (eng. *Pavement Condition Index*). Ipak, podaci prikupljeni na ovaj način međusobno se razlikuju u smislu pouzdanosti, ponovljivosti, prenosivosti, preciznosti, usporedivosti, itd. Dakle, vidljivo je da postoji jasna potreba za objektivnim, ponavljajućim, pouzdanim, prijenosnim, ekonomičnim funkcionalnim gradskim kriterijima, koji uključuju i odgovarajuće mjere za korisnike cesta i upravitelje gradskih prometnih sustava.

Zapravo, održavanje kolnika treba provoditi na optimalan način, ne samo zbog pravila koja zahtijeva sustav gospodarenja kolnicima (eng. *Pavement Management System - PMS*) nego i zbog aktualnih trendova integriranog projektiranja koji sadrži funkcionalne analize tijekom uporabljivosti kolnika. U oba

slučaja objektivnost je od presudne važnosti. Da bi funkcionalni kriteriji bili upotrebljivi, pri projektiranju treba voditi računa o praktičnosti. Danas postoje brojne mogućnosti za korelaciju stanja kolnika s udobnosti vožnje, primjerice tehnologije kao što su metoda vibracije cijelog tijela (eng. *Whole Body Vibration - WBV*) [12-15], metoda varijabilnosti srčane frekvencije (eng. *Heart Rate Variability - HRV*) [16] i druge napredne tehnologije koje terenska mjerenja čine ekonomičnijim, prihvatljivijim, pouzdanijim, jednostavnijim i praktičnijim. Cilj je ovog rada predložiti funkcionalne kriterije za održavanje gradskih kolnika kako bi se olakšalo objektivno projektiranje/održavanje gradske prometne mreže. Korelacija između stanja kolnika, udobnosti vožnje i ostalih značajnih faktora za gradske kolnike procijenjena je za tu svrhu. Nadalje, PC-O (eng. *Pavements Clients - Oriented*) cjeloviti je pristup definiran kako bi se eksplicitno odredile potrebe korisnika prometnica. Cjeloviti pristup uključuje između ostalog HDM-4 (eng. *Highway Development and Management system*) [17], kao odgovor na zahtjev korisnika cesta za ekonomskom isplativosti tijekom uporabljivosti.

## 2. Metodologija predlaganja funkcionalnih održivih kriterija

Objektivna procjena udobnosti vožnje jest zahtjevan zadatak, jer treba uzeti u obzir vozačevu percepciju dinamičkih učinaka koji se prenose na vozilo [15]. Postoje brojne studije koje sadrže mjerenja profila kolnika, simulacije i procjene vibracija vozila kako bi se povežalo stanje kolnika s udobnosti vožnje uz ostale sadržaje koji se nalaze na gradskim prometnicama. Metodologija primijenjena u ovom istraživanju uključuje analizu korelacija i primjenu PC-O cjelovitog pristupa s ciljem određivanja funkcionalnih kriterija.

### 2.1. Korelacije između stanja kolnika i udobnosti vožnje na gradskim prometnicama

#### 2.1.1. Subjektivna procjena

Uobičajeno se funkcionalni održivi kriteriji definiraju primjenom indeksa PCI ili PSR, stoga djelomično ovise o ljudskoj prosudbi. Kada je određena veza s načinima oštećenja kolnika, odstupanje nagiba kolnika povezano s nepravilnostima površine kolnika predstavlja najutjecajnije oštećenje [18]. To znači da nepravilnost površine ima najveći utjecaj na korisničku ocjenu stanja kolnika. Autori poput Shafizadeha i Manneringa [19] te Rensa i Staleyja [20] provjerili su to uz prisutnost sadržaja koji se mogu naći na gradskim prometnicama, povezujući subjektivnu procjenu s objektivnim pokazateljima.

#### 2.1.2. Indeks ravnosti (IRI)

Indeks ravnosti IRI utemeljen je simulacijom odgovora generičkog vozila, tzv. modela četvrtine automobila, na ravnosti kolnika pri brzini od 80 km/h. Predložen je 1982. godine kao statistički

pokazatelj nepravilnosti površine kolnika i kao referentna veličina (mjera) koja može poslužiti za usporedbu kvalitete vožnje po kolnicima diljem svijeta [8]. Danas se IRI primjenjuje u brojnim državama i predstavlja prihvatljiv standard za određivanje profila kolnika [5], koji omogućuje inženjerima objektivne i dosljedne usporedbe o stanju kolnika [21]. Iako ceste mogu imati različite nazive i vizualne karakteristike diljem svijeta, znanstvenici mogu usporediti rezultate analize vibracija na cestama sa sličnim vrijednostima indeksa IRI [22]. Između ostalog, indeks IRI je definiran kao matematička transformacija uzdužnog profila, zbog čega su mjerenja neovisna o uređaju i stabilna su tijekom vremena [23]. Te posebnosti čine indeks IRI jedinstvenim među ostalim parametrima koji se odnose na udobnost vožnje poput parametara RN (eng. *Ride Number*), RI (eng. *Ride Index*), MRN (eng. *Mays Ride Number*), RQI (eng. *Ride Quality Index*). Međutim, postoje nedoumice u vezi s primjenom indeksa IRI na gradskim kolnicima, jer je u gradu dopuštena brzina manja od 80 km/h te zbog specifičnosti gradskih kolnika (ugrađeni poklopci za revizijska okna, usporivači brzine, itd.). Osim toga, duljina homogenih dionica na gradskim prometnicama često je kraća od 320 m, koliko je iznosila uobičajena duljina homogenih dionica primijenjena kod IRRE (eng. *International Road Roughness Experiment*) [24].

### 2.1.3. Vibracije cijelog tijela (WBV)

Norma ISO 2631-1 [13] "Mehaničke vibracije-procjena izloženosti čovjeka vibracijama cijelog tijela - prvi dio: Opći zahtjevi" navodi postupak određivanja vertikalnog ubrzanja u vozilu ( $\alpha_{wz}$ , ponderirano ubrzanje vozila RMS) i daje referentne granice za približnu procjenu posljedica vibracija vozila na udobnost putnika. Izraz  $\alpha_{wz}$  se može izračunati za različite brzine, uključujući i brzine na gradskim prometnicama.

### 2.1.4. Analiza varijabilnosti srčane frekvencije (HRV)

Varijabilnost srčane frekvencije (eng. *Heart Rate Variability* - HRV) je ključni parametar za opisivanje stanja ravnoteže simpatičke-parasimpatičke napetosti, što predstavlja ciklički fenomen otkucaja srca u određenom vremenu [16]. Mjerenjem HRV moguće je procijeniti fiziološku reakciju vozača s obzirom na stanje kolnika i različite brzine kretanja, uključujući i one koje se pojavljuju na gradskim prometnicama. Zhang i suradnici [16] primijenili su elektrokardiogram za određivanje parametara varijabilnosti srčane frekvencije, poput RMSSD- korijena srednje vrijednosti kvadrata razlike uzastopnih R-R intervala (otkucaja srca).

## 2.2. PC-O cjeloviti pristup

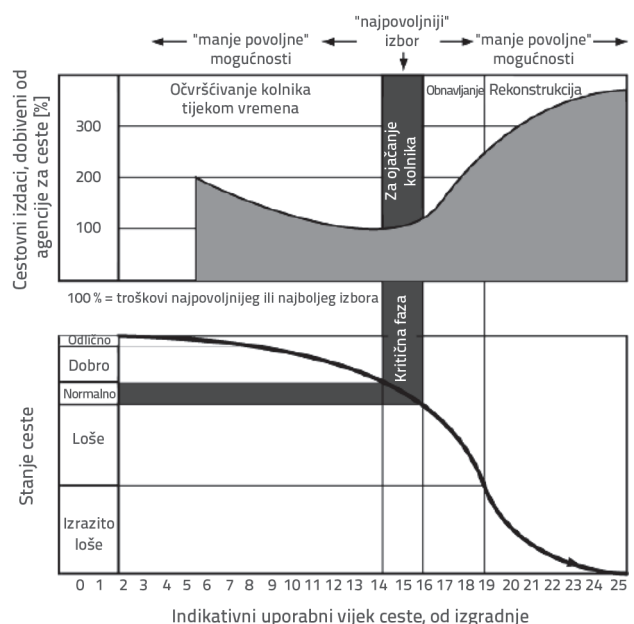
Pojam funkcionalno odnosi se na nešto praktično i korisno. Konkretno, u cestovnom inženjerstvu funkcionalno stanje kolnika izravno je povezano s korisnicima cesta. Definicija funkcionalnog kriterija koja se temelji na udobnosti vožnje vrlo je složena zbog potrebe da se povežu parametri poput stanja kolnika, dinamičkog odgovora vozila i ljudske fiziološke reakcije

na sadržaje koji mogu biti prisutni na gradskim prometnicama. Osim toga, funkcionalni kriteriji moraju biti objektivni kako bi služili potrebama gradskog sustava upravljanja kolnicima i njihova integralnog projektiranja. Ukratko, funkcionalni kriteriji na gradskim kolnicima moraju biti relevantni za korisnike ceste i upravitelja gradskim prometnim sustavima. Uzimajući u obzir zahtjeve korisnika ceste, primijenjen je cjeloviti PC-O pristup zbog složene problematike i ograničenosti - pretpostavki i pojednostavljenja korelacija iz potpoglavlja 2.1.

Upravljanje kolnicima (eng. *Pavement management* - PM) definirano je kao dio PC-O integralnog pristupa kako bi se ispunio zahtjev ekonomičnosti za upravitelja gradskih prometnih sustava. Primjena PC-O integralne perspektive obuhvaća analizu važnosti korelacije prikazane u potpoglavlju 2.1. Rezultati PM perspektive dobiveni su modeliranjem oštećenja kolnika i troškova korisnika ceste (eng. *Road Users Costs* - RUC) za tipične prometnice primjenom sustava HDM-4 [17]. Definicija funkcionalnih kriterija je određena prema interpretaciji rezultata različitih komponenti cjelovitog pristupa.

## 3. Perspektiva upravljanja kolnicima

Perspektiva upravljanja kolnicima omogućuje eksplicitno uključivanje potrebe uporabnog ciklusa isplativosti upravitelju gradskih prometnih sustava u PC-O cjeloviti pristup. Da bi se odredio optimalan trenutak primjene mjera održavanja kod kolničkih konstrukcija, potrebno je odrediti "kritičnu fazu" ili "kritičnu točku" gdje stopa oštećenja kolnika ubrzano raste s rashodima održavanja ceste i korisničkim troškovima. Prema tome, kritična faza ili kritična točka na krivulji koja opisuje oštećenja kolnika (slika 1.) ili RUC dobar su parametar za određivanje funkcionalnog kriterija.



Slika 1. Najpovoljnija i manje povoljna rješenja intervencije - troškovi upravitelja gradskim prometnim sustavima [25]

Lee i Chatti [26] primijenili su kritičnu točku akumuliranih naprezanja uslijed većih dinamičkih osovinskih opterećenja kako bi dobili RQI kriterije za autoceste. Fernandez i Neves [27] su se koristili naglim porastom rizika od nezgode za definiranje vrijednosti kriterija za indeks trenja, koeficijent trenja i dubinu teksture. Papageorgiou i Mouratidis [28] definirali su IRI kriterij preko točke infleksije krivulje koja povezuje indeks IRI s troškovima putovanja (eng. *Travel Time Costs* - TTC), gdje je TTC izračunan primjenom pojednostavljenog modela koji se bazira na HDM-4 modelu brzine, a primjerice utjecaj troškova korištenja vozila (eng. *Vehicle Operation Costs* - VOC) nije uzet u obzir. PC-O cjeloviti pristup i sustav upravljanja HDM-4 primijenjeni su (bez pojednostavljenja) za izračun oštećenja kolnika i RUC (VOC + TTC).

Međutim, funkcionalni kriteriji su definirani krivuljom koja opisuje oštećenje kolnika, povezano primjerice s troškovima održavanja (kao na slici 1.), i krivuljom koja prikazuje RUC povezan s ekonomskim troškovima za društvo.

## 4. Prijedlozi za održavanje funkcionalnog kriterija

### 4.1. Uporabna svojstva za definiranje funkcionalnih kriterija

Primjenom PC-O cjelovitog pristupa funkcionalni kriteriji trebaju se temeljiti na parametrima koji odgovaraju potrebama korisnika ceste. Ravnost kolnika snažno je povezana s performansama kolnika i pruža dobru cjelokupnu ocjenu stanja kolnika te je u dobroj korelaciji sa subjektivnim procjenama korisnika kolnika [5, 29]. Zapravo, indeks IRI je najbolji jedinstveni pokazatelj vozačeve percepcije ravnosti ceste [30]. Danas je dostupna različita oprema koja omogućuje ekonomičnije i praktičnije određivanje indeksa IRI.

Hass i suradnici [31] su na konferenciji "Best Practices in Urban Transport Planning: Measuring Change" upozorili da čak i kada je indeks IRI objektivan parametar njegova pogrešna upotreba može uzrokovati nedostatak objektivnosti u sustavu upravljanja kolnicima.

Ipak, kako bi se poboljšali uvjeti vožnje na cestama, važno je evidentirati ravnost kolnika [32]. To pridonosi racionalnosti u sustavu upravljanja kolnicima, smanjujući troškove održavanja gradskih prometnica [33]. Od njegove pojave 1982., indeks IRI se primjenjuje kao objektivna mjera ravnosti međugradskih kolnika. Koristi se u Kanadi [34, 35], Poljskoj [36], Brazilu [37], Čileu [38], Kolumbiji [39], Kini [40], Indiji [41, 42]. Prema Tighe i suradnicima [34], u čak 60 % kanadskih gradova propisana je upotreba indeksa IRI u sustavu gospodarenja kolnicima. U Sjedinjenim Američkim Državama, osim primjene indeksa IRI u gradovima kao što su Denver [20], Utah [43], Wisconsin [32], Louisiana [44], New York [45], Dewan i Smith [10], razvili su model kako bi odredili indeks IRI na temelju oštećenja kolnika, te kako bi odredili VOC na gradskim prometnicama za potrebe agencija koje upravljaju kolnicima na području zaljeva San Francisco.

Zapravo, oštećenja kolnika utječu na indeks IRI, dok je indeks IRI izravno povezan s RUC-om. Na primjeru jednadžbe (1), koja je primijenjena u HDM-4 kako bi se izračunao indeks IRI kod običnih betonskih kolnika (eng. *Jointed Plain Concrete Pavements* - JPCPs) [9], može se uočiti da i druga oštećenja kolnika utječu na indeks IRI (slično kao kod asfaltnih kolnika), jer je indeks IRI također pokazatelj općeg stanja kolnika.

$$IRI = IRI_0 + 0,00265 \cdot (TFAULT) + 0,0291 \cdot (SPALL) + 0,15 \cdot 10^6 \cdot (TRACK)^3 \quad (1)$$

gdje je:

- $IRI$  - indeks ravnosti [m/km]
- $IRI_0$  - početna ravnost kolnika [m/km]
- $TFAULT$  - poprečno odvajanje spoja [mm/km]
- $SPALL$  - oljuštenje spojeva [%]
- $TRACK$  - poprečne pukotine [No/km].

Zbog razloga objašnjenih u ovom poglavlju (ali i u sljedećim), u ovom radu indeks IRI je pokazatelj učinka koji određuje funkcionalni kriterij za održavanje gradskih kolnika. Posebnosti gradskih prometnica (ugrađeni poklopci za ravnijska okna, brojna raskrižja, usporivači brzine i sl.) mogu se uzeti u obzir tijekom procjene indeksa IRI, ali i ne moraju. Eliminacija iz proračuna je moguća zahvaljujući suvremenoj opremi i računalnim programima.

Kvantifikaciju dodatnih sadržaja na prometnicama obradili su Rens i Staley [20], Caro i Peña [46] te Reggin i suradnici [47]. Na sličan način, utjecaj geometrije konstrukcije može se eliminirati ili uzeti u obzir pri izračunu indeksa IRI. Utjecaj geometrije konstrukcije može se izostaviti na način koji su predložili Pradena et Pradena i suradnici [48]. Odluku da se uvrsti ili eliminira utjecaj geometrijske karakteristike ceste donosi upravitelj gradskih prometnih sustava. Upravitelji gradskih prometnih sustava također su odgovorni za odlučivanje o duljini homogenih dionica pri vrednovanju indeksa IRI u gradu (primjerice 100 m). U svakom slučaju, osnove proračuna indeksa IRI su iste, kao što je to predstavljeno ovim radom. Svaki upravitelj gradskim prometnim sustavima donosi odluku o duljini referentnog presjeka za procjenu IRI faktora u gradu (primjerice 100 m). Prema prigovorima La Torrea i suradnika [24], duljine homogenih dionica od 320 m u eksperimentu IRRE su konzervativne s obzirom na opremu kojom se koristilo; trenutačni inercijalni profil može dati valjane rezultate na dionici duljine 94 m.

### 4.2. Parametri svojstava za definiranje funkcionalnih kriterija

#### 4.2.1. Relevantnost korelacija WBV, HRV i subjektivne procjene

Budući da je indeks IRI objektivan, praktičan, lako se prikuplja, vremenski stabilan, pouzdan, precizan, prenosiv i ekonomičan pokazatelj svojstava kolnika koji se primjenjuje diljem svijeta,

Tablica 1. Kritične IRI točke za različite ceste prema perspektivi gospodarenja kolnicima (*Pavement Management Perspective* - PM perspektiva)

Cesta - Regija	Zemljopisna širina	Klima	Promet 20 godina [milijuni ESALs]	IRI PM [m/km]
A-Metropolitan	33° 27' S	Mediteranska, suha ljeta	7,66	2,76
B-Metropolitan	33° 27' S	Mediteranska, suha ljeta	1,88	2,63
A-Bio Bio	36° 47' S	Mediteranska s utjecajem oceana	4,91	2,87
B-Bio Bio	36° 47' S	Mediteranska s utjecajem oceana	1,36	2,72
A-Magallanes	53° 8' S	Oceanska	0,62	2,73
B-Magallanes	53° 8' S	Oceanska	0,31	2,67

provedena su brojna istraživanja o korelaciji WBV, HRV i subjektivnih procjena s indeksom IRI [14-16, 19, 20].

Međutim, subjektivna procjena ovisi o percepciji svakog pojedinog korisnika. Stoga ta percepcija može biti drugačija s obzirom na okolinu, iskustvo i očekivanja pojedinog korisnika. Primjerice, Shafizadeh i Mannering [19] empirijski su odredili IRI kriterije prema normama *Federal Highway Administration of USA* koje se temelje na vozačevoj percepciji gradskih kolnika u Saveznoj Državi Washington. Međutim, kada je bitno da indeks IRI ima snažnu povezanost s percepcijom vozača u različitim krajevima svijeta, IRI kriterij se definira primjenom PC-O cjelovitog pristupa koji ima potrebnu objektivnost s mogućnošću prilagodbe uvjetima na različitim cestovnim mrežama. Korelacija WBV i HRV s indeksom IRI zadovoljava sve zadane uvjete.

Ahlin i Granlund [14] ističu da WBV proračun uključuje nekoliko pojednostavljenja s obzirom na stvarne uvjete vožnje. Jedno od njih odnosi se na primjenu dinamičkog modela četvrtine automobila koji nužno ne predstavlja trenutačno raspoloživi vrlo široki vozni park.

Shafizadeh i Mannering [19] naglašavaju kako je važno shvatiti da se njihovo razumijevanje ovih procjena još uvijek propitkuje. Između ostalog, starija verzija normi ISO 2631-1 [12] ima ograničenja za procjenu udobnosti vožnje koja se temelji na  $\alpha_{wz}$ . Međutim, radi poboljšanja razumijevanja složenosti ovog problema, sadašnju verziju norme ISO 2631-1 [13] predstavlja aneks "približnih naznaka mogućih reakcija na različite veličine vrijednosti cjelokupnih vibracija u javnom prijevozu". Problem je složen, a svaka korelacija ima ograničenja, tj. pojednostavljenja i pretpostavke koje se razlikuju od stvarnih uvjeta vožnje. Parametar kojim se definira kriterij mora biti objektivan, praktičan, primjenjiv, ekonomičan te usmjeren na krajnjeg korisnika. Stoga je zaključak ovog istraživanja da samo jedan pristup nije dovoljan u rješavanju toga kompleksnog fenomena, već je nužan cjelovit pristup. Dakle, za objektivno definiranje IRI kriterija prema PC-O cjelovitom pristupu primijenjene su korelacije parametara WBV i IRI zajedno s PM perspektivom.

#### 4.2.2. IRI kriteriji prema PM perspektivi

U perspektivi gospodarenja kolnicima (*Pavement Management Perspective* - PM perspektiva), IRI kriterij može biti objektivno definiran kao jedinstvena vrijednost ili skup takvih vrijednosti,

ovisno o tome je li kriterij definiran u kritičnoj fazi (slika 1.) ili u kritičnoj točki [26-28]. Odluka će ovisiti o pojedinom upravitelju gradskih prometnih sustava, tj. o njegovom opredjeljenju za više različitih razina IRI kriterija (npr. za upozorenje, intervenciju, kritični) ili o samo jednoj razini IRI kriterija. U svakom slučaju, PM perspektiva je u osnovi jednaka i primjenjiva za oba slučaja. Radi ilustracije, u ovom je radu kritična točka definirana sa zadanim faktorima kalibracije HDM-4 za tipične slučajeve JPCP-a. Oni odgovaraju uobičajenim karakteristikama čileanskih cesta gdje postoje značajne razlike u klimatskim uvjetima i prometnom opterećenju, izraženom s opterećenjem od ekvivalentne jednostruke osovine (eng. *Equivalent Single Axle Loads* - ESALs). Tablica 1. prikazuje sličnosti IRI vrijednosti, na kojima krivulja IRI ima oštar nagib. Za bilo koji slučaj u tablici 1. promjena na RUC krivulji se ponaša jednako kao i promjene IRI krivulje. Indeks IRI je pokazatelj općih uvjeta kolnika koji utječu na korisnike ceste.

#### 4.2.3. IRI<sub>city</sub> kriterij prema PC-O cjelovitom pristupu

Kvaliteta vožnje neće biti ista kada se vozilo brzinom 40 km/h kreće gradskom cestom, s vrijednosti indeksa IRI 2 m/km, i kada je brzina vozila 120 km/h na autocesti s istom vrijednosti indeksa IRI [50]. Korelacije koje su predstavili Cantisani i Loprencipe [15] te Zhang i suradnici [16] dopuštaju izračunavanje vrijednosti indeksa IRI pri različitim brzinama. Obje korelacije predstavljaju slične jednadžbe za  $\alpha_{wz}$ , a temelje se na graničnim vrijednostima koje su predložene normom ISO 2631-1 [13]. Zhang i suradnici [16] su dobili vezu HRV-a u ovisnosti s RMSSD. Rezultati istraživanja Zhanga i suradnika prikazani su jednadžbama (2) i (3) [16].

$$\alpha_{wz} = 0,121 \cdot IRI + 0,006 \cdot V - 0,189 \quad (2)$$

$$RMSSD = 6,7967 \cdot \alpha_{wz}^{-0,4122} \quad (3)$$

gdje je:

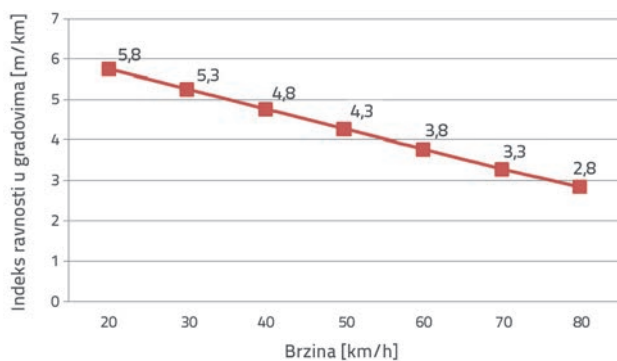
$\alpha_{wz}$  - efektivna vrijednost vertikalnih frekvencijskih vrednovanih ubrzanja [m/s<sup>2</sup>]

$V$  - brzina vozila [km/h]

$IRI$  - indeks ravnosti [m/km]

$RMSSD$  - korijen srednje vrijednosti kvadrata razlike uzastopnih R-R (srčanih) intervala [ms].

Proračun vrijednosti indeksa IRI za brzine različite od izvorne brzine (80 km/h) određen je, u ovom radu, pomoću indeksa  $IRI_{city}$ . Granična vrijednost  $\alpha_{wz}$  koja definira kraj kratke, za korisnike ceste, neudobne zone, prema normi ISO 2631-1 iznosi  $0,63 \text{ m/s}^2$ , dok je za tu graničnu vrijednost indeks IRI  $2,84 \text{ m/km}$  (vrijednost dobivena primjenom korelacije WBV-IRI u proračunima koje su proveli Cantisani i Loprencipe [15] te Zhang i suradnici [16]), što je vrlo slično vrijednostima dobivenima primjenom PM perspektive. Nadalje, primjenom jednadžbe 3, RMSSA povezan s granicom  $\alpha_{wz} = 0,63 \text{ m/s}^2$  odgovara vrijednosti od  $8,22 \text{ ms}$ , što je vrlo slično vrijednosti  $9,26 \text{ ms}$ , odnosno graničnoj vrijednosti RMSSD koju su definirali Liu i suradnici [51] pri kojoj se vozač osjeća neugodno (prema podacima iz medicinske literature). Stoga se za vrijednost IRI kriterija, određenog PC-O cjelovitim pristupom (WBV, HRV i PM perspektivom), može uzeti vrijednost  $2,8 \text{ m/km}$  za brzinu vozila od  $80 \text{ km/h}$ . Funkcionalni kriteriji temeljeni na indeksu  $IRI_{city}$  se mogu izračunati primjenom jednadžbe 2, za  $\alpha_{wz} = 0,63 \text{ m/s}^2$  i različite brzine uobičajene na gradskim cestama (slika 2.).



Slika 2.  $IRI_{city}$  kriteriji za različite brzine

Rezultati pokazuju da je moguće prihvatiti veće vrijednosti indeksa  $IRI_{city}$  za ceste s manjim dopuštenim brzinama.

## 5. Praktičnost i mogućnost primjene

Indeks  $IRI_{city}$  omogućava objektivno i praktično donošenje odluka pri planiranju zahvata u vezi s održavanjem kolničke konstrukcije, čak i onda ako nije poznato točno stanje kolnika.

## LITERATURA

- [1] CALTRANS: *Glossary of terms Caltrans division of maintenance - Appendix A-1*, California, USA.: California Department of Transportation, 2003.
- [2] Thenoux, G., Gaete, R.: Technical pavement evaluation and comparison of design method for reinforcement of asphalt layers, *Revista Ingeniería de Construcción*, 14, pp. 56-72, 1995., (in Spanish).
- [3] Haas, R., Hudson, W.R.: Defining and serving clients for pavements, *Transportation Research Record*, 1524, pp. 1-9, 1996., <http://dx.doi.org/10.3141/1524-01>
- [4] ISO 9000: *Quality management systems - Fundamentals and vocabulary*, International Organization for Standardization, Switzerland, 2005.

U Britanskoj Kolumbiji (Kanada) sredstva za održavanje kolnika vezana su uz indeks IRI. Granična vrijednost indeksa IRI iznosi  $3,5 \text{ m/km}$ , a općinama je dopušteno odstupanje do 15% od navedene vrijednosti za kolnike glavne gradske mreže. Takav princip financiranja promijenio je način održavanja cesta u tim općinama [47]. Štoviše, danas je sve veći broj javno-privatnih partnerstava, društva koja se temelje na performansama kolnika, ugovora za određenu razinu usluga, DBFM (eng. *Design, Build, Finance and Maintain*), različitih vrsta koncesija za ceste itd. U tom kontekstu predloženi  $IRI_{city}$  kriteriji omogućavaju planiranje, integralno projektiranje, nadzor i investiranje u gradske kolnike na objektivnan način. Danas postoji različita oprema za ekonomično određivanje indeksa  $IRI_{city}$ . Za potrebe održavanja gradskih kolnika čak se može primijeniti oprema klase 3 prema klasifikaciji Svjetske banke [6, 46]. Iako je u ovom radu predstavljena primjena PC-O cjelovitog pristupa s obzirom na JPCP, on se može primijeniti za različite vrste kolnika. Štoviše, zadnja verzija HDM-4 obuhvaća čak i kolnike izvedene od predgotovljenih betonskih ili sličnih elemenata.

## 6. Zaključak

Funkcionalni održivi kriteriji temeljeni na indeksu IRI definirani su primjenom PC-O cjelovitog pristupa. To znači da su potrebe korisnika gradskih prometnica i upravitelja gradskim prometnih sustavima razmotrene iz različitih perspektiva, kao što su WBV, HRV i PM. WBV je izračunan prema normi ISO 2631-1, HRV je određen primjenom RMSSD-a, a IRI kriterij je određen primjenom PM perspektive pomoću sustava HDM-4. Iz PC-O cjelovitog pristupa, IRI je određen kao optimalni praktični parametar kako bi se pojednostavnilo objektivno održivo projektiranje/održavanje gradske cestovne mreže (integrirano projektiranje i sustav održavanja kolnika). Zapravo, indeks IRI je objektivnan, lako se prikuplja, vremenski stabilan, precizan, prenosiv i ekonomičan pokazatelj učinka na gradskim prometnicama. Prema tome,  $IRI_{city}$  održiv kriterij predložen je za brzine dopuštene na gradskim prometnicama primjenom korelacije između IRI kriterija za brzinu od  $80 \text{ km/h}$  ( $2,8 \text{ m/km}$ ) i  $\alpha_{wz}$  koji je određen u skladu s normom ISO 263-1. Primjerice, na prometnicama gdje je brzina vožnje ograničena na  $50 \text{ km/h}$ , predložena vrijednost indeksa  $IRI_{city}$  iznosi  $4,3 \text{ m/km}$ .

- [5] Loizos, A., Plati, C.: An alternative approach to pavement roughness evaluation, *International Journal of Pavement Engineering*, 9(1), pp. 69-78, 2008., <http://dx.doi.org/10.1080/10298430600949894>
- [6] Feighan, K.: *Maintenance Standards and Strategies*, RIMES Report No. RO-97-SC 1085/1189 for EC-DG-VII RTD Programme, 1999.
- [7] Feighan, K.: Maintenance Standards - The Interface Between PMS and Maintenance Programs, *5<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements*, Seattle, pp. 13, 2001.
- [8] Sayers, M.W., Gillespie, T.D., Paterson, W.D.O.: *Guidelines for the conduct and calibration of road roughness measurements*, World Bank Technical Paper N° 46, 1986.
- [9] ERES: *Performance of Concrete Pavements, Volume III: Improving Concrete Pavement Performance*, FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration, 1995.
- [10] Dewan S.A., Smith R.E.: Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the San Francisco Bay Area, *Transportation Research Record*, 1816, pp. 65-72, 2002., <http://dx.doi.org/10.3141/1816-08>
- [11] Mactutis, J.A., Alavi, S.H., Ott, W.C.: Investigation of Relationship Between Roughness and Pavement Surface Distress Based on WesTrack Project, *Transportation Research Record*, 1699, pp. 107-113, 2000., <http://dx.doi.org/10.3141/1699-15>
- [12] ISO 2631-1: *Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements*, International Organization for Standardization, Switzerland, 1987.
- [13] ISO 2631-1: *Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements*, International Organization for Standardization, Switzerland, 1997.
- [14] Ahlin, K., Granlund, J.N.O.: Relating Road Roughness and Vehicle Speeds to Human Whole Body Vibration and Exposure Limits, *International Journal of Pavement Engineering*, 3 (4), pp. 207-216, 2002., <http://dx.doi.org/10.1080/10298430210001701>
- [15] Cantisani, G., Loprencipe, G.: Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits, *Journal of Transportation Engineering*, 136(9), pp. 818-826, 2010., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000143](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000143)
- [16] Zhang, J., Du, Y., Su, R.: Investigating the relationship between pavement roughness and heart rate variability by road driving test, *3<sup>rd</sup> International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, pp. 13, 2001.
- [17] Kerali, H.: *HDM-4 Highway Development & Management - Volume 1 Overview of HDM-4*, Paris: World Road Association, 2000.
- [18] AASHTO: *Guide for design of pavement structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1993.
- [19] Shafizadeh, K., Mannering, F.: Acceptability of Pavement Roughness on Urban Highways by the Driving Public, *Transportation Research Record*, 1860, pp. 187-193, 2003., <http://dx.doi.org/10.3141/1860-21>
- [20] Rens, K.L., Staley, B.: Rating City and County of Denver Urban Pavement Constructability Using a Profiler, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15(1), pp. 44-49, 2010., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000031](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000031)
- [21] Haas, R.: Reinventing the (pavement management) wheel, *5<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements*, Seattle, 2001.
- [22] Nahvi, H., Nor, M.J., Fouladi, M.H., Abdullah, S.: Evaluating Automobile Road Vibrations Using BS 6841 and ISO 2631 Comfort Criteria, *1<sup>st</sup> Regional Conference on Vehicle Engineering & Technology*, Kuala Lumpur, 2006.
- [23] Thébeau, D., Delisle, M.C., Cormier, B.: Québec's Experience with Smoothness Specifications on Concrete Pavements, *8<sup>th</sup> International Conference on Concrete Pavements*, Colorado Springs, pp. 718-732, 2005.
- [24] La Torre, F., Ballerini, L., Di Volo, N.: Correlation between longitudinal roughness and user perception in urban areas., *Transportation Research Record*, 1806, pp. 131-139, 2002.. <http://dx.doi.org/10.3141/1806-15>
- [25] Schliessler, A., Bull, A.: Roads - a new approach for road network management and conservation, 1993, <http://hdl.handle.net/11362/29995>, 31.12.2015.
- [26] Lee, D., Chatti, K.: Development of Roughness Thresholds for Preventive Maintenance Using PMS Data from In-Service Pavements, *5<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements*, Seattle, pp. 15, 2001.
- [27] Fernandes, A., Neves, J.: Threshold values of pavement surface properties for maintenance purposes based on accidents modelling, *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10), pp. 917-924, 2014., <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.893324>
- [28] Papageorgiou, G.P., Mouratidis A.: A mathematical approach to define threshold values of pavement characteristics, *Journal of Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 10(5), pp. 568-576, 2014.
- [29] Loizos, A., Plati, C.: Road roughness measured by profilograph in relation to user's perception and the need for repair: A case study, *International Conference on Pavement Evaluation*, Roanoke, pp. 16, 2002.
- [30] Shafizadeh, K., Mannering, F., Pierce, L.: *A statistical analysis of factors associated with driver-perceived road roughness on urban highways*, Research Report. Project T1803, Task 28 Highway Roughness, 2002.
- [31] Haas, R., Felio, G., Lounis, Z., Falls, L.C.: Measurable Performance Indicators for Roads: Canadian and International Practice, *2009 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Ottawa, pp. 22, 2009.
- [32] Wen, H., Chen, C.: Factors Affecting Initial Roughness of Concrete Pavement, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(6), pp. 459-464, 2007., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2007\)21:6\(459\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(459))
- [33] Lakušić, S., Brčić, D., Tkalčević V.: Analysis of Vehicle Vibrations - New Approach to Rating Pavement Condition of Urban Roads, *Journal Promet - Traffic & Transportation*, 23(6), pp. 485-494, 2011.
- [34] Tighe, S.L., McLeod, N.W., Juhasz, M.: Development of the new 2011 Canadian pavement asset design and management guide: a brief summary of Canadian state-of-the practice, *8<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets*, Santiago, pp 16, 2011.
- [35] Québec: *Intervention plan in local infrastructures - Guide of elaboration (in French)*. Gouvernement du Québec, Canada, 2014.
- [36] Sztukiewicz, R.J., Ryzewski, P.M.: The method of pavement sufficiency rating used in Poznan, *4<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements*, Dourban, pp. 542-551, 1998.
- [37] De Sá, S.A., Goretti, L.M., Barbosa, J.: Correlation between performance models in function of the irregularity in roadways of the state of Ceará (in Portuguese), *11<sup>st</sup> national encounter of roadway conservation*, Goiânia, 2006.
- [38] De Solminihaç, H., Lobo, E., Jimenez, N., Altamira, A.: Evaluation of a mechanism for urban road maintenance by level of service, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 156(1), pp. 9-15, 2003., <http://dx.doi.org/10.1680/tran.2003.156.1.9>

- [39] Arguelles, G., Velásquez, O.M., Fuentes, L.G., Celis, L.: A review of Bogota's pavement management system, *8<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets*, Santiago, pp. 13, 2011.
- [40] Li, S., Yuan, G., Xiao, Z.: Experimental Research on the Relation between Motor Vehicle Noise and Pavement Roughness of Urban Road, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 06, 2007.
- [41] Kumar, R.: Model Development of Urban Road Maintenance, *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 2(2), pp. 83-98, 2012.
- [42] Girimath, S.B., Chilukuri, V., Sitharam, T.G., Krishnamurthy, D.: Pavement management system for urban roads, *International Journal for Scientific Research & Development*, 2(3), pp. 282-284, 2014.
- [43] Cottrell, W.D., Lee, H., Nepstad, J., Crandall, M.: Efforts Toward Developing a Regional Pavement Management System in Utah, *Transportation Research Record*, 1524, pp. 48-57, 1996., <http://dx.doi.org/10.3141/1524-06>
- [44] Khattak, M.J., Baladi, G.Y., Zhang, Z., Said, I.: A review of the pavement management system of the state of Louisiana-Phase I, *Transportation Research Record*, 2084, pp. 18-27, 2008
- [45] FCNY: *How Smooth Are New York City's Streets?*, Fund for the City of New York: Centre on Municipal Government Performance, 2001., <http://dx.doi.org/10.3141/2084-03>
- [46] Caro, F., Peña, G.: Analysis and criteria to calculate the International Roughness Index (IRI) in Colombian urban roads which lead the development of a technical specification (in Spanish), *Revista Intekhnia*, 7(1), pp. 57-72, 2012.
- [47] Reggin, A., Shalaby, A., Emanuels, R., Michel, G.S.: Urban Considerations for Using Road Roughness to Manage Road Networks, *7<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets*, Calgary, pp. 8, 2008.
- [48] Pradena, M., Roco, V., Torres, S., Echaverugen, T., Guiñez, M.: Verification of the isolation of the effects of the geometric design in the measurement of IRI (in Spanish), *15<sup>th</sup> Argentinian Congress of Roads and Traffic*, Mar del Plata, pp. 37, 2009.
- [49] Barrera, E., de Solminihac, H., Hidalgo, P., Miranda, J.C.: *Recommendations for the use of HDM-4 (Highway Development and Management System) in Chile (in Spanish)*. Chilean Highway Agency, 2003.
- [50] Yu, J., Chou, E.Y.J., Yau, J.T.: Development of speed-related ride quality thresholds using International Roughness Index, *Transportation Research Record*, 1974, pp. 47-53, 2006., <http://dx.doi.org/10.3141/1974-08>
- [51] Liu, J., Cao, H., Zhan, Z., et al.: Heart rate variability (HRV) spectral analysis in healthy volunteers with different age, and the influence of lunch and mental arithmetic, *Chinese Journal of Applied Physiology*, 14(1), pp. 74-76, 1998.