

Primljen / Received: 15.10.2015.

Ispravljen / Corrected: 17.4.2017.

Prihvaćen / Accepted: 5.7.2017.

Dostupno online / Available online: 10.3.2018.

Izrada modela za ocjenu ravnosti na cestama s malim volumenom prometa

Autori:

**Makendran Chandrakasu**, dipl.ing.građ.Sveučilište Anna, Indija
Građevinski fakultet
makendran2006@gmail.comIzv.prof.dr.sc. **Murugasan Rajiah**, dipl.ing.građ.Sveučilište Anna, Indija
Građevinski fakultet
murugasandr@rediffmail.com

Stručni rad

Makendran Chandrakasu, Murugasan Rajiah

Izrada modela za ocjenu ravnosti na cestama s malim volumenom prometa

Ravnost vozne površine kolnika jedan je od osnovnih pokazatelja stanja kolnika koji se koriste u održavanju cesta. U okviru ovog istraživanja izrađen je model za određivanje ravnosti na temelju lako mjerljivih pokazatelja oštećenosti, a to su pukotina i udarnih rupa, na cestama s malim volumenom prometa u Indiji. Za izradu modela korišteni su podaci prikupljeni na 173 ceste s asfaltnim zastorom. Primjenom modela izrađenog u ovom radu može se posrednim putem, čak i bez primjene uređaja za mjerenje ravnosti, dobiti zadovoljavajuća vrijednost ravnosti na temelju podataka o pukotinama i udarnim rupama.

Ključne riječi:

ravnost, pukotine, udarne rupe, ceste s malim volumenom prometa, regresijska analiza

Professional paper

Makendran Chandrakasu, Murugasan Rajiah

Development of a roughness estimation model for low volume roads

Pavement roughness is one of essential performance indicators that are used in road maintenance. A model was developed in this study to obtain roughness value from easily measurable distress values, namely cracking and potholes, for low-volume roads in India. The data collected at 173 in-service flexible pavements were utilised for model development. Using the model developed in this study, a satisfactory roughness value can indirectly be obtained from the cracking and potholing data, even without the use of a roughness measuring device.

Key words:

roughness, cracks, potholes, low volume roads, regression analysis

Fachbericht

Makendran Chandrakasu, Murugasan Rajiah

Erstellung eines Modells für die Beurteilung der Ebenmäßigkeit von Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen

Die Ebenmäßigkeit der befahrbaren Fläche der Fahrbahn ist eine der grundlegenden Indikatoren für den Zustand der Fahrbahn, der bei der Instandhaltung der Straßen herangezogen wird. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Modell für die Bestimmung der Ebenmäßigkeit aufgrund leicht messbarer Beschädigungsindikatoren erstellt, und dies sind Risse und Schlaglöcher auf Landstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen in Indien. Für die Erstellung des Durch Anwendung des in dieser Abhandlung erstellten Modells ist es möglich auf indirektem Wege, sogar ohne Anwendung des Gerätes zur Messung der Ebenmäßigkeit, einen zufriedenstellenden Wert der Ebenmäßigkeit aufgrund der Daten über Risse und Schlaglöcher zu erhalten.

Schlüsselwörter:

Ebenmäßigkeit, Risse, Schlaglöcher, Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen, Regressionsanalyse

1. Uvod

Cestovna mreža izuzetno je značajna za ekonomski, društveni i kulturni razvoj, kao i za mogućnost povećanja zaposlenosti neke zemlje. Razvoj države temelji se na razvitku njezine cestovne mreže. Cestovna mreža po svojoj vrijednosti predstavlja značajan dio nacionalnog bogatstva i u Indiji je ukupne duljine gotovo 4,4 milijuna kilometara [1], što je čini drugom po veličini u svijetu. U Indiji su ceste razvrstane u pet kategorija: autoceste, državne ceste, regionalne ceste, općinske ceste i seoske ceste. U usporedbi s ostalim kategorijama, seoske se ceste ističu vrlo malim volumenom prometa (po njima prometuje manje od 150 gospodarskih vozila na dan). Sada se ukupna mreža cesta s malim volumenom prometa u Indiji prostire na otprilike 2.750.000 km [1]. Ceste s malim volumenom prometa međusobno povezuju seoske zajednice, a ujedno ostvaruju i vezu s prometnicama ostalih kategorija. Te ceste su izravno povezane s poljoprivrednim i proizvodnim sektorima. Siromaštvo je jedna od glavnih značajki seoskih sredina u Indiji, te se smatra da cestovne prometnice mogu bitno pridonijeti u rješavanju tog problema. Indijska vlada ulaže znatna sredstva u gradnju cesta s niskim volumenom prometa. Međutim, pokazalo se da je održavanje tih cesta izuzetno težak zadatak.

U mnogim su državama različite agencije i istraživači razvili modele ponašanja kolnika u svrhu planiranja, projektiranja, građenja i održavanja cestovnih prometnica. Ti su modeli međutim prikladni samo za određene lokacije te stoga imaju određena ograničenja primjene.

Godine 1962. provedeno je istraživanje AASHO (engl. *American Association of State Highway Officials - AASHO*) Road Test u gradu Ottawa, SAD od strane Odbora za cestovna istraživanja. U sklopu AASHO-vog modela određen je indeks vozne sposobnosti kolnika na temelju starosti i prometnog opterećenja za betonske i asfaltne kolnike [2].

U okviru razvojnog projekta Ujedinjenih naroda za Brazil, Querioz i Hudson [3] su u razdoblju od 1975. do 1981. razvijali modele propadanja asfaltnih kolnika. U sklopu te studije razvijeni su modeli pogoršanja ravnosti vozne površine, nastanka pukotina i širenja pukotina. Modelom koji se odnosi na nastanak pukotina određuje se broj ekvivalentan broju 80 kN jednostruke osovine potreban za nastanak pukotine širine 1 mm, pri čemu se modificirani strukturni broj koristi kao prediktor (nezavisna varijabla). Za širenje pukotina i pogoršanje ravnosti koriste se sljedeći prediktori: modificirani strukturni broj, starost kolnika, prometno opterećenje i defleksije površine kolnika.

Središnji indijski institut za istraživanje cestovnih prometnica razvio je 1994. godine četiri modela u vezi s predviđanjem stanja kolnika za indijske ceste, i to na osnovi sljedećih oštećenja: neravnost, pukotine, trošenje i udarne rupe. Ti su modeli bazirani na podacima prikupljenima na državnim i regionalnim cestama u indijskim državama Rajasthan, Gujarat, Uttar Pradesh i Haryana [4]. Model pogoršanja ravnosti sadrži sljedeće nezavisne varijable: starost kolnika, prometno opterećenje i strukturni broj. Model nastanka

pukotina sadrži sljedeće nezavisne varijable: strukturni broj i prometno opterećenje. Model nastanka udarnih rupa sadrži sljedeće nezavisne varijable: ukupna debljina slojeva kolničke konstrukcije, strukturni broj i prometno opterećenje. Model trošenja površine kolnika sadrži sljedeće nezavisne varijable: prometno opterećenje i kvaliteta izvođenja.

Bennet i William [5] razvili su modele za razvoj i upravljanje cestovnim prometnicama koji se baziraju na osam vrsta oštećenja: pukotine, trošenje, udarne rupe, pucanje rubova, kolotražnje, neravnost, dubina teksture i otpornost na klizanje. Pritom su korišteni podaci prikupljeni u 13 država: Kenija, Rumunjska, Indija, Tajland, Pakistan, Bangladeš, Brazil, Kosovo, Nepal, Meksiko, Vijetnam, Maroko i Kirgistan. Navedeni prediktivni modeli sastoje se od sljedećih značajnih nezavisnih varijabli:

- Značajne nezavisne varijable modela nastanka pukotina su: strukturni broj, debljina površinskih slojeva, indikator nedostataka tijekom izvođenja, prometno opterećenje te sporije širenje pukotina zbog radnji održavanja.
- Značajne nezavisne varijable modela trošenja su: starost kolnika, prometno opterećenje, faktori usporavanja trošenja zbog održavanja cesta te nedostaci tijekom izvođenja.
- Značajne nezavisne varijable modela nastanka udarnih rupa su: prometno opterećenje, ukupna debljina asfaltnog zastora, padaline i nedostaci tijekom izvođenja.
- Značajne nezavisne varijable modela pucanja rubova su: prometno opterećenje, visinska razlika između kolnika i bankine te padaline.
- Značajne nezavisne varijable modela kolotražnja su: strukturni broj, prometno opterećenje, ukupna debljina asfaltnog zastora i indikator nedostataka u izvođenju.
- Značajne nezavisne varijable modela neravnosti su: starost kolnika, strukturni broj, prometno opterećenje, debljina površinskih slojeva te uvjeti okoline u smislu promjena temperature i vlage.
- Značajne nezavisne varijable modela dubine teksture su: prometno opterećenje i početna dubina teksture.
- Značajne nezavisne varijable modela otpornosti na klizanje su: prometno opterećenje i prosječna godišnja dubina teksture.

Spomenuti modeli zahtijevaju nekoliko ulaznih varijabli koje su izrazito složene i dugotrajne u smislu provedbe proračuna. Model HDM-IV smatra se ekonomičnim sredstvom za analizu i donošenje odluka [5].

Ricardo i dr. [6] razvili su model za određivanje indeksa ravnosti koji se sastoji od sljedećih nezavisnih varijabli: posteljica, slojevi kolnika, cestovni promet i klimatski uvjeti. To je istraživanje provedeno na 204 cestovne dionice u SAD-u. Postignuti rezultati pokazuju da je uspostavljeni regresijski model dobar, jer je vrijednost dobivenog koeficijenta determinacije $R^2 = 0,93$.

Smith i Tighe [7] razvili su model za određivanje indeksa ravnosti asfaltnog zastora na cestama u Kanadi. Model je razvijen

na temelju podataka prikupljenih u Kanadi u sklopu projekta LTPP (eng. *Long Term Pavement Performance*), Istraživanjem su obuhvaćene 53 probne dionice, a podaci su prikupljeni tijekom otprilike 13 godina. Značajne varijable ovog modela su: debljina asfaltnog zastora, posteljica i klimatski uvjeti. Serdal [8] je razvio model određivanja vozne sposobnosti asfaltnih kolnika primjenjujući metodu umjetnih neuralnih mreža (engl. *artificial neural network* - ANN). U modelu se za izračun indeksa vozne sposobnosti koriste sljedeće varijable: uzdužne pukotine, dubina kolotruga, nastanak pukotina, promjena nagiba i zakrpe.

Ankit i dr. [9] izračunali su konstrukcijski i funkcionalni odgovor cesta s malim volumenom prometa za različite tipove terena i klimatske uvjete. U modelu je obrađeno trinaest ravničastih i pet brdskih dionica u raznim područjima država Uttar Pradesh i Uttarakhand u Indiji. Značajne nezavisne varijable modela su kalifornijski indeks nosivosti (CBR), starost kolnika, promet i ukupna debljina kolnika. Veza između tih varijabli i kvalitete vožnje ustanovljena je pomoću međunarodnog indeksa ravnosti (IRI).

Amarendra i dr. [10] razvili su model za određivanje međunarodnog indeksa ravnosti (IRI) kolnika. U istraživanju je korišteno pet značajnih prediktora: pukotine, udarne rupe, zakrpe, kolotrazi i trošenje. Podaci potrebni za realizaciju ovog istraživanja prikupljeni su na državnim, regionalnim i glavnim općinskim cestama.

Sugeng [11] je razvio model simulacije prometa u svrhu predviđanja nastanka i širenja pukotina na asfaltnim kolnicima. U tom su modelu korištene sljedeće nezavisne varijable: trenutačno stanje, nosivost kolnika, starost kolnika, utjecaj okoline i promet. Rajendra i dr. [12] razvili su vezu između ravnosti i vidljivih površinskih oštećenja kao što su pukotine, udarne rupe, zakrpe, kolotrazi, trošenje i oštećenje ruba kolnika. Podaci za to istraživanje prikupljeni su na seoskim cestama u općinama Jhunjhunu i Churu u državi Rajasthan u Indiji. Vandana i dr. [13] pokušali su modelirati propadanje kolnika na cestama s malim volumenom prometa primjenom regresijske analize. U modelu se indeks stanja kolnika (PCI) koristi kao zavisna varijabla, a kao nezavisne varijable u modelu se koriste: broj gospodarskih vozila na dan (CVPD), godišnja količina padalina i količina vlage u posteljici.

Satish i dr. [14] uspostavili su vezu između ravnosti i parametara oštećenja kolnika kao što su pukotine, zakrpe, trošenje, udarne rupe i dubina kolotruga. Tijekom istraživanja analizirano je 510 cestovnih dionica na državnim cestama diljem Indije. Na temelju prikazanoga pregleda literature mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Postoji vrlo malo modela za određivanje ponašanja kolnika na cestama s malim volumenom prometa.
- U svim se istraživanjima ravnost spominje kao značajan indikator ponašanja kolnika.
- Globalno je prihvaćeno da je međunarodni indeks ravnosti (IRI) značajan pokazatelj za ocjenu stanja kolnika.

- Na ravnost utječu druga oštećenja kao što su pukotine, udarne rupe itd.

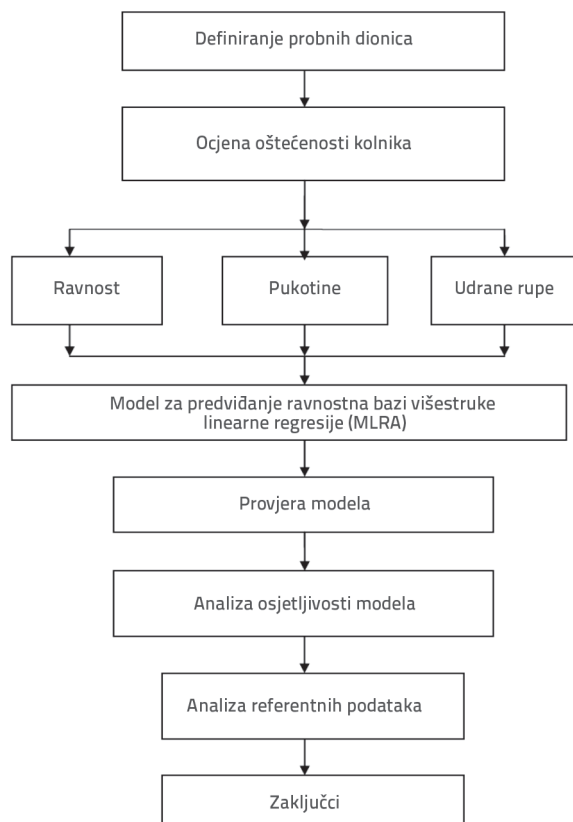
2. Područje analize i metodologija

Modeli za ocjenu ponašanja kolnika koji se koriste u Indiji mogu se primijeniti samo za ceste s velikim volumenom prometa. Kako ne postoje znanstveni modeli za predviđanje ponašanja cesta s malim volumenom prometa, u Indiji je održavanje takvih cesta vrlo zahtjevan zadatak. U nedostatku znanstvenih modela za ocjenu ponašanja, najbolja alternativa koju za kvantitativno ocjenjivanje stanja kolnika mogu koristiti timovi za održavanje jest mjerenje i određivanje vrijednosti ravnosti u m/km. Vrijednost ravnosti pokazuje kumulativnu neravnost površine u metrima, određena za svaki kilometar ceste. Stoga bi bilo vrlo korisno odrediti vrijednost ravnosti kolnika kao osnovu za donošenje utemeljenih odluka o najpovoljnijoj strategiji održavanja. U Indiji, uprave zadužene za održavanje cesta s malim volumenom prometa nemaju dovoljno kvalificirane radne snage, pa stoga teško mogu poduzimati potrebne mjere opreza pri definiranju vrijednosti ravnosti pomoću integratora neravnina. Osim toga, zbog nedostatka financijskih sredstava, te uprave nisu ni opremljene integratorima neravnina.

Kako podaci iz literature pokazuju da postoji dobra podudarnost između ravnosti i ostalih lako mjerljivih oštećenja, autori ovog rada pokušali su odrediti odnos između ravnosti i još dva vrlo česta oštećenja na slabo prometnim cestama, a to su pukotine i udarne rupe. Pukotine i udarne rupe mogu se mjeriti običnom mjernom vrpcom, a za to nije potrebna kvalificirana radna snaga. Ravnost se može odrediti posredno na temelju pukotina i udarnih rupa, pa se stoga može čak i izostaviti upotreba integratora neravnina kao sredstva za mjerenje ravnosti.

Za provođenje analize odabrana je općina Thiruvallur u indijskoj državi Tamil Nadu. Ta općina sa 820 sela obuhvaća područje od 3.422 kvadratna kilometra, a gustoća naseljenosti iznosi 1.100 stanovnika po kvadratnom kilometru. U dogovoru s upravom za izvangradske prometnice, za analizu cesta s malim volumenom prometa odabrane su 173 dionice duljine po 200 metara.

Rad na istraživanju podijeljen je u pet faza. U prvoj fazi su kao probne dionice odabrane 173 postojeće asfaltno ceste s malim volumenom prometa. U drugoj fazi, na definiranim dionicama izmjerena su značajna oštećenja kolnika kao što su pukotine, udarne rupe i neravnosti. U trećoj je fazi razvijen model ravnosti u funkciji ostalih oštećenja – pukotina i udarnih rupa – a za te potrebe je primijenjena višestruka linearna regresijska analiza (MLRA). U četvrtoj fazi obavljena je provjera modela i analiza osjetljivosti. Provjera točnosti referentnih podataka obavljena je u petoj fazi. I konačno, u šestoj fazi izvedeni su zaključci te su dane odgovarajuće preporuke. Metodologija je grafički prikazana na slici 1.



Slika 1. Grafički prikaz metodologije

2.1. Prometni uvjeti i karakteristike kolničke konstrukcije

Maksimalna i minimalna gustoća prometa izmjerena na 173 probne dionice iznosi 9 tj. 2 gospodarska vozila na dan (eng. *Commercial Vehicles Per Day* - CVPD). Kolnik ukupne debljine 295 mm projektiran je za opterećenje jednog kotača od 5,1 kN. Uprava za izvangradske ceste primijenila je postupke za projektiranje slojeva kolničke konstrukcije u skladu s preporukama Indijskog cestovnog kongresa za izvangradske ceste (IRC SP: 2002, Priručnik za izvangradske ceste). Kolnik se na svim probnim dionicama sastojao od tamponskog šljunčanog sloja debljine 125 mm, nosivog sloja od mehanički zbijenog drobljenog materijala debljine 150 mm te od prethodno miješanog bitumenskog zastora debljine 20 mm. Tijekom izvođenja tih probnih dionica primijenjene su odredbe o kvaliteti materijala i načinu izvođenja zadane u IRC SP-20: 2002 [15].

2.2. Odabir probnih dionica

Pri odabiru probnih dionica primijenjeni su sljedeći kriteriji:

- odabrane su seoske ceste s malim volumenom prometa (s manje od 150 gospodarskih vozila na dan)
- odabrane su seoske ceste različite starosti
- odabrane su ravne dionice i ravničast teren
- odabrane su dionice izvan naselja, bez križanja i poprečnih propusta

- kada god je to bilo moguće, odabrane su dionice sličnog uzdužnog i poprečnog presjeka tj. sličnog sastava, posteljice, odvodnje i površinskih uvjeta.

2.3. Prikupljanje podataka

Na 173 probne dionice slabo prometnih asfaltiranih seoskih cesta mjerena su oštećenja kao što su neravnost, pukotine i udarne rupe. Podaci su prikupljeni na 173 dionice različite starosti u veljači 2014. godine.

Ravnost

Ravnost je mjerena pomoću integratora neravnina na petom vučenom kotaču (MORTH 2004) koji se u Indiji standardno koristi za mjerenje ravnosti. Rezultat mjerenja tim uređajem iskazuje se u mm/km ili m/km. Rezultati su očitavani na vanjskom kotaču u oba smjera, na udaljenosti od 0,6 m od rubova kolnika. Svaki put se provode tri očitavanja i njihov se prosjek usvaja kao vrijednost ravnosti.

Tijekom mjerenja vodilo se računa da je brzina vozila konstantna i iznosila je 30 km/h \pm 2 km/h. Ta se brzina trebala postići prije dolaska na probnu dionicu, tj. ujednačena tražena brzina trebala se postići nešto prije dolaska na probnu dionicu.

Kako se u fazi prikupljanja podataka trebalo paziti na ujednačenost, na svim probnim dionicama korišten je isti integrator neravnina. U pogonu bez mjerenja, uređaj je bio postavljen na pogonski kotač. Integrator neravnina postavljen na petom vučenom kotaču povremeno je baždaren prije mjerenja, i to pomoću standardnog integratora neravnina koji je korišten isključivo za potrebe baždarenja [16].

Pukotine

Za potrebe mjerenja zajedno su povezane sve vrste pukotina, a zahvaćeno područje označeno je kvadratom ili pravokutnikom. Dužina i širina zahvaćenog područja izmjerena je mjernom vrpcom. U slučaju pojedinačnih uzdužnih i poprečnih pukotina, mjerena je dužina pukotine, a pretpostavljeno je da stvarna širina iznosi 300 mm. Za svaki je segment izračunana ukupna površina zahvaćena pukotinama, a dobivena je vrijednost unesena kao postotak površine segmenta [4].

Udarne rupe

Za potrebe mjerenja zajedno su povezane sve vrste udarnih rupa, a zahvaćeno područje označeno je kvadratom ili pravokutnikom. Dužina i širina zahvaćenog područja izmjerena je mjernom vrpcom. Za svaki je segment izračunana ukupna površina zahvaćena udarnim rupama, a dobivena je vrijednost unesena kao postotak površine segmenta [4].

Prikupljanje podataka o prometu

Podaci o prometu prikupljeni su kontinuirano sedam dana, 24 sata na dan, a za te je potrebe angažiran odgovarajući broj

brojača prometa. U okviru analize prometa, na svakoj dionici izbrojen je broj prolazaka gospodarskih vozila na dan, a dobiveni podaci korišteni su u modeliranju [17].

3. Izrada modela ravnosti

Prikaz podataka o oštećenjima koji su prikupljeni i korišteni u modeliranju dan je u tablici 1.

Tablica 1. Raspon vrijednosti oštećenja korištenih za razvoj i provjeru modela

Oštećenje	Oznaka	Jedinica	Minimum	Maksimum	Srednja vrijednost
Ravnost	ROU	[m/km]	3	9	6
Pukotine	CR	[%]	0	17	8,5
Udarne rupe	PH	[%]	0	27	13,5

Prikupljeni podaci nasumce su podijeljeni u dvije grupe. Prva je nazvana "analitički uzorak" a druga "kontrolni uzorak". Sto dvadeset probnih dionica uvršteno je u "analitički uzorak", a 53 probne dionice uvrštene su u "kontrolni uzorak". Kako bi se izbjegla subjektivna klasifikacija u te dvije grupe, dionice su nasumce razvrstane i podijeljene [18]. Analitički uzorak čini većinu podataka, a sastoji se od otprilike 70 % od ukupnog broja podataka. Taj je uzorak korišten za formiranje regresijskog modela. Preostalih 30 % podataka, koji se tretiraju kao "kontrolni uzorak", korišteno je za provjeru.

Ravnost je usvojena kao varijabla odgovora, a izmjereni parametri oštećenja kolnika, pukotine i udarne rupe, usvojeni su kao prediktori (nezavisne varijable). Ustanovljeno je da postoji korelacija između ravnosti i navedena dva prediktora. Uočeno je da značajniji utjecaj na ravnost imaju pukotine u odnosu na udarne rupe. Najbolji model dobiven višestrukom linearnom regresijom je:

$$\text{ROU (m/km)} = 3,232 + 0,250\text{CR} + 0,123\text{PH}$$

$$(R^2 = 0.814, SE = 1.027, N = 120)$$

3.1. Statistička valjanost modela

Kako bi se provjerila statistička valjanost modela i važnost varijabli, za svaku nezavisnu varijablu modela proveden je test

značajnosti i izračunate su vrijednosti t-statistike i p-vrijednost, tablica 2.

Tablica 2. Statistički podaci u modelu za predviđanje neravnosti

Zavisna varijabla	Nezavisna varijabla	Koeficijenti	t - statistika	p - vrijednost
Ravnost	Pukotine	0,249	5,208	0,000
	Udarne rupe	0,123	3,302	0,001

Prihvatljiva statistička vrijednosti t-statistike iznosi 1,645 za razinu pouzdanosti od 95 %. Iz tablice 2. vidimo da su vrijednosti t-statistike procijenjene za oba oštećenja veće od 1,645, što znači da varijabla odgovora prati normalnu distribuciju (Gaussovu distribuciju) s konstantnom varijacijom u razmatranom području. Te vrijednosti predstavljaju pouzdanost parametara modela u 95-postotnom intervalu pouzdanosti. Iz tablice 2. možemo vidjeti da su p-vrijednosti za oba parametra oštećenja manje od 0,05, pa su stoga sve varijable uključene u model prihvaćene i smatraju se značajnima za razvoj modela. U tablicama 3. i 4. prikazani su redom vrijednosti statistika dobivene regresijskom analizom i vrijednosti dobivene ANOVA-om. Iz tablice 3. vidimo da vrijednost koeficijenta višestruke regresije "R" za ravnost iznosi 0,902, što upućuje na postojanje veze između ravnosti i ostala dva oštećenja – pukotina i udarnih rupa.

Iz tablice 3. također vidimo da očekivana standardna pogreška kod mjerenih i predviđenih vrijednosti ravnosti iznosi 1,02 m/km. Rezultati ANOVA metode iz modela prikazanog u tablici 4. pokazuju da je vrijednost F-statistike manja od 0,05, što govori da je dobiveni model značajan.

Tablica 3. Regresijske statistike u modelu ravnosti

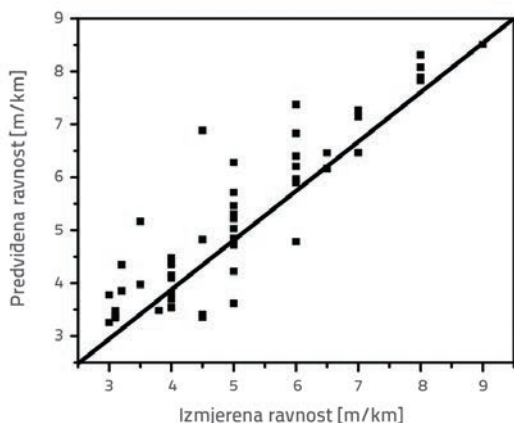
Regresijska statistika	Model ravnosti
Koeficijent višestruke regresije R	0,902
Koeficijent determinacije R ²	0,814
Korigirani R ²	0,810
Standardna pogreška	1,027
Broj opažanja	120

Tablica 4. ANOVA za model ravnosti

Model ravnosti					
Izvor varijabilnosti	Stupanj slobode (Df)	Zbroj kvadrata odstupanja (SS)	Srednje kvadratno odstupanje (MS)	F - statistika	Značajnost F - statistike
Zbog regresije	2	540,870	270,435	256,182	1,79 x 10 ⁻⁴³
Slučajna pogreška	117	123,509	1,055	–	–
Ukupno	119	664,379	–	–	–

3.2. Provjera modela

Da bi se objasnila pouzdanost modela izrađen je dijagram vrijednosti ravnosti očitanih na 53 probne dionice koje nisu bile uzete u obzir prilikom razvoja modela, i predviđenih vrijednosti ravnosti dobivenih modelom, kako je prikazano na slici 2. Razmještaj ucrtanih točaka duž pravca jednakosti (pravac $y = x$) pokazuje pouzdanost modela.

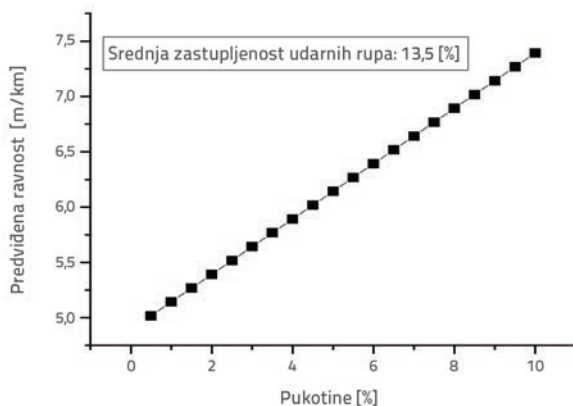


Slika 2. Usporedba predviđenih i očitanih (opaženih) vrijednosti ravnosti prema podacima iz kontrolnog uzorka

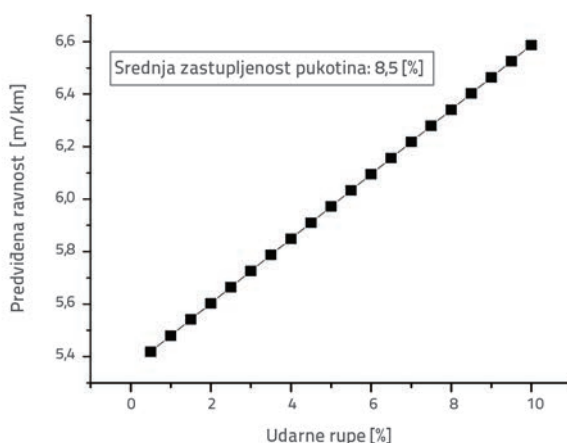
3.3. Analiza osjetljivosti modela ravnosti

U svrhu određivanja stupnja osjetljivosti međunarodnog indeksa ravnosti (IRI) na postotak zahvaćenosti površine segmenta pukotinama, izrađen je dijagram na kojem je prikazan odnos proizvoljnih postotaka zahvaćenosti površine pukotinama i odgovarajućih vrijednosti ravnosti dobivenih na temelju razvijenog modela, uzimajući u obzir srednju vrijednost postotka zahvaćenosti površine udarnim rupama na probnim dionicama koje su analizirane u ovom istraživanju (slika 3.). Na ovom dijagramu nagib pravca označava osjetljivost modela na čak i malu promjenu postotka zahvaćenosti površine pukotinama. Možemo uočiti da se vrijednost ravnosti poveća za 0,25 m/km ako se postotak zahvaćenosti površine pukotinama poveća za 1 %.

Da bi se odredio stupanj osjetljivosti međunarodnog indeksa ravnosti (IRI) na postotak zahvaćenost površine udarnim rupama, izrađen je dijagram na kojem je prikazan odnos proizvoljnih postotaka zahvaćenosti površine udarnim rupama i odgovarajućih vrijednosti ravnosti dobivenih na temelju razvijenog modela, uzimajući u obzir srednju vrijednost postotka zahvaćenosti površine pukotinama na probnim dionicama koje su analizirane u ovom istraživanju (slika 4.). Na ovom dijagramu nagib pravca označava osjetljivost modela čak i na malu promjenu postotka zahvaćenosti površine udarnim rupama. Možemo uočiti da se vrijednost ravnosti poveća za 0,123 m/km ako se postotak zahvaćenosti površine udarnim rupama poveća za 1 %.



Slika 3. Dijagram proizvoljnih postotaka zahvaćenosti površine pukotinama i odgovarajućih vrijednosti ravnosti za analizu osjetljivosti



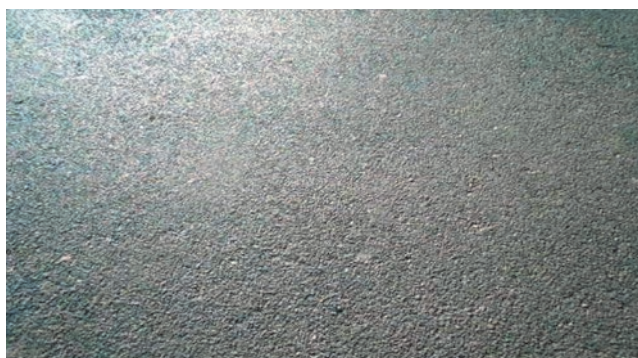
Slika 4. Dijagram proizvoljnih postotaka zahvaćenosti površine udarnim rupama i odgovarajućih vrijednosti ravnosti za analizu osjetljivosti

4. Analiza referentnih podataka

Na osamnaest cestovnih prometnica mjerena je ravnost u svrhu provjere referentnih podataka. Može se uočiti da su stvarne vrijednosti ravnosti bile gotovo jednake vrijednostima koje su dobivene pomoću modela, što upućuje na pouzdanost modela razvijenog u ovom radu. Informacije o starosti ceste, pukotinama (CR), udarnim rupama (PH) i ravnosti na odabranoj dionici prikazane su u tablici 5. Vrijednost ravnosti je zadržana na 3,0 m/km na svim novoizgrađenim cestama s nula posto pukotina i udarnih rupa. Vrijednost ravnosti za iste uvjete pukotina i udarnih rupa na modelu je iznosila 3,232 m/km. Prema tablici 5., izmjerena vrijednost ravnosti na cesti Pinjivakkam, koja je izgrađena u veljači 2014. godine, iznosila je 4,5 m/km, a predviđena vrijednost ravnosti iznosila je 4,3 potkraj listopada 2015. godine. Na isti je način iskazana i vrijednost ravnosti na ostalim dionicama. Slike 5. i 6. prikazuju izgled ceste Pinjivakkam neposredno nakon izgradnje u veljači 2014. i u listopadu 2015.

Tablica 5. Detalj usporedbe s referentnim podacima

Br.	Dionica s referentnim podacima	Mjesec i godina izgradnje ceste	Mjesec i godina usporedbe s referentnim podacima	Starost ceste [godine]	Pukotine [%]	Udarne rupe [%]	Modelom predviđena ravnost [m/km]	Ravnost izmjerena na terenu [m/km]
1	Cesta Pijivakkam	Veljača 2014.	Listopad 2015.	2,0	3,1	2,4	4,3	4,5
2	Cesta Naapalayam - Vellivoyal	Siječanj 2010.	Veljača 2013.	3,0	10	7	6,5	6,5
3	CT-Adhivaragapuram	Siječanj 2010.	Srpanj 2013.	3,5	5,5	9	5,7	5,5
4	Kolur - Puducherimedu	Listopad 2010.	Listopad 2014.	4,0	5,0	6,7	5,3	5,0
5	Thottimedu - Annamalaicheri	Listopad 2010.	Travanj 2015.	4,5	7,5	7,0	5,9	6,0
6	Poljoprivredna cesta Tirur	Travanj 2013	Travanj 2015.	2,0	2,0	4	4,2	4,1
7	Cesta R.K. Pet - Pallipet - sanankuppam	Studenj 2012.	Travanj 2015.	2,5	6,0	4	5,2	5,0
8	Cesta GNT - Vettukadu	Studenj 2012.	Svibanj 2015.	2,5	3,9	5	4,8	4,5
9	Cesta WS - Neeloth Balapuram	Studenj 2012.	Svibanj 2015.	2,5	4,0	6,5	5,0	5,0
10	Cesta Elavoor - Kokkupalayam	Travanj 2011.	Svibanj 2012.	1,0	1,0	0	3,4	3,4
11	Elambakkam - Koovam	Travanj 2013.	Prosinac 2014.	1,5	1,2	2	3,7	3,5
12	Ayyaneri - Rukmanipuram	Svibanj 2013.	Siječanj 2015.	1,5	1,4	2	3,8	3,8
13	Cesta MTR - Cesta Perumalpattu - Kottamedu	Svibanj 2013.	Veljača 2015.	1,5	1,0	3	3,8	3,5
14	Cesta Dunlop Nagar - Ayathur	Srpanj 2013.	Ožujak 2015.	1,8	1,7	4	4,1	4,0
15	Cesta GNT - sidaraja kandigai	Srpanj 2013.	Travanj 2015.	1,9	2,5	4,5	4,4	4,1
16	Cesta Kuppam Kandigai - Mosur	Siječanj 2014.	Lipanj 2015.	1,5	1,5	4	4,0	4,0
17	Cesta Vichoer - VCN Kandigai	Rujan 2013.	Rujan 2015.	2,0	1,5	6	4,3	4,2
18	Cesta Velur - Erupallikuppam	Listopad 2013.	Listopad 2015.	2,0	2,0	6	4,4	4,1



Slika 5. Novi cestovni zastor u veljači 2014.



Slika 6. Cestovni zastor u listopadu 2015.

5. Zaključak

Na temelju analize podataka prikupljenih na 173 probne dionice u općini Thiruvallur indijske države Tamil Nadu mogu se izvesti ovi zaključci:

- U istraživanju je zabilježen značajan odnos između ravnosti površine i oštećenja (pukotina i udarnih rupa), tj. vrijednost koeficijenta determinacije R^2 iznosila je 0,814.
- U okviru validacijskog postupka detaljno je ocijenjena djelotvornost modela razvijenog u ovom istraživanju, a točnost modela je naknadno ispitana kroz analizu referentnih vrijednosti.
- Pukotine i udarne rupe može jednostavno izmjeriti i nekvalificirano osoblje; vrijednost ravnosti može se odrediti posredno iz vrijednosti postotka zahvaćenosti površine

segmenta pukotinama i udarnim rupama, s tim da se pri mjerenju ravnosti može čak i izostaviti upotreba integratora neravnina.

- Nedostatak kvalificirane radne snage i nedostupnost uređaja za mjerenje ravnosti zbog nedostatka financijskih sredstava, značajni su problemi s kojima se suočavaju uprave zadužene za održavanje seoskih cesta s malim prometnim volumenom u Indiji. Model razvijen u ovom radu itekako će pomoći tim upravama u planiranju strategija održavanja baziranih na ravnosti kolnika.

Model predstavljen u ovom radu razvijen je za ceste na kojima promet varira između 2 i 9 gospodarskih vozila na dan. Stoga treba napomenuti da se taj model može djelotvorno primjenjivati samo za ceste s malim volumenom prometa.

LITERATURA

- [1] Makendran, C., Murugasan, R., Velmurugan, S.: Performance prediction modelling for flexible pavement on low volume roads using multiple linear regression analysis, *Journals of Applied Mathematics*, 192485 (2015), pp. 1-7, <https://doi.org/10.1155/2015/192485>
- [2] AASHO, Pavement Research, Highway Research Board, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington D.C., USA, AASHO Road Test Report No.5, 1962.
- [3] Queiroz, C.A.V., Hudson, W.R.: Improved pavement performance relationship in Brazil," Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proceedings, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1 (1982), pp.500-510.
- [4] CRRI.: Pavement performance study on existing sections, Project Sponsored by Ministry of Surface Transport, Government of India, Final Report, Submitted by Central Road Research Institute, New Delhi, 1994
- [5] Bennet, C.R., Paterson, W.D.O.: A guide to calibration and adaptation, HDM-4 Highway Development and Management, International study of highway development and management tool, the world road Association, Paris, France, 5 (2000).
- [6] Oliveira de Souza, R., Dantas Neto, S., Muniz de Farias, M.: Statistical analysis between roughness indices and roughness prediction model using neural networks, International contest on long term pavement performance sponsored by federal highway administration and the American society of civil engineers. pp. 1-19, 2004.
- [7] Smith, T.J., Tighe, L.S.: Assessment of overlay roughness in the LTPP-a Canadian case study International contest on long term pavement performance sponsored by federal highway administration and the American society of civil engineers, pp. 57-68, 2004.
- [8] Terzi, S.: Modeling the pavement serviceability ratio of flexible highway pavements by artificial neural networks, *Elsevier, Construction and Building Materials*, 21 (2006), pp.590-593, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.001>
- [9] Ankit, G., Praveen, K., Rajat, R.: Pavement deterioration and maintenance model for low volume roads, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4 (2011) 4, pp. 195-202
- [10] Amarendra, K.S., Ashoke, K.S.: Development of a model for estimating International Roughness Index from pavement distresses, *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, pp.1-10, 2012.
- [11] Sugeng, W.: The application of traffic simulation model to predict initiation and progression of crack for flexible pavements, *Elsevier, Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43 (2012), pp.813-818, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.156>
- [12] Vandana, T., Goliya, H.S., Bhatore, A., Kundan, M.: Pavement deterioration modelling for low volume roads, *Indian Highways*, 73 (2013) 4, pp. 67-81.
- [13] Prasad, P.J., Shalini, K., Pooja, N., Bhanegaonkar, S.A.K., Shriniwas, A.: Development of relationship between roughness (IRI) and visible surface distresses: A study on PMGSY roads, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104 (2013) 2, pp. 322-331.
- [14] Satish, C., Chalumuri, R.S., Anish, K.B., Kangadurai, B.: Relationship between Pavement Roughness and Distress Parameters for Indian Highways, *Journal of Transportation Engineering*, 139 (2013) 5, pp. 467-475.
- [15] IRC, SP 20-2002, Rural road manual, Indian Road Congress, New Delhi, India, 2002
- [16] MORTH, Specifications for road and bridge work, Ministry of Road Transport and Highways, New Delhi, India, 2001.
- [17] IRC, 9-1972, Traffic census on non-urban roads, Indian Road Congress, India. 1972.
- [18] Prozzi, J.A.: Modelling pavement performance by combining field and experimental data, Doctorate of Philosophy Dissertation, University of California, Berkeley. 2001.