

Primljen / Received: 28.2.2022.

Ispravljen / Corrected: 19.8.2022.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.5.2023.

Statističko modeliranje kolotražnja za ceste s malim volumenom prometa u Indiji

Autor:

Doc.dr.sc. **Chandrakasu Makendran**, dipl.ing.grad.Nacionalni institut za tehnologiju, Tiruchirappalli,
Tamil Nadu, Indija

Građevinski fakultet

makendran@nitt.edu

Autor za korespondenciju

Stručni rad

Chandrakasu Makendran

Statističko modeliranje kolotražnja za ceste s malim volumenom prometa u Indiji

U ovom se istraživanju ispituje model kolotražnja koji je prikladniji za savitljive kolničke konstrukcije na cestama s malim volumenom prometa u Indiji. Kolotrazi na cesti izravno utječu na različite aspekte kao što su svojstva kolnika, sigurnost, udobnost vožnje i trajanje putovanja. Sukladno tome, ovo je istraživanje provedeno na 173 probne dionice cesta s malim volumenom prometa, a matematički model kolotražnja razvijen je pomoću višestruke regresijske analize. U modelu je kolotražnje varijabla odgovora, a broj gospodarskih vozila po danu, oborine, nosivost posteljice (kao modificirani strukturni broj) i starost kolnika su eksplanatorne varijable. Model je statistički potvrđen i primijenjen za predviđanje kolotruga na cesti, a učinkovitost predviđanja je potvrđena. Pogreška između terenskih podataka i procijenjenih vrijednosti je unutar 5 %.

Ključne riječi:

kolotražnje, regresijska analiza, ceste s malim volumenom prometa, provjera točnosti referentnih podataka

Professional paper

Chandrakasu Makendran

Statistical modelling of rutting for low-volume roads in India

This study considers a road rutting model better-suited for the flexible pavements in the low-volume roads of India. The rutting on a road directly affects various aspects such as the pavement performance, safety, driving comfort, and travel time. Accordingly, this study is conducted on 173 test sections of low-volume roads, and a mathematical rutting model is developed using a multiple regression analysis. In the model, the rutting is the response variable, whereas the commercial vehicles per day, rainfall, subgrade strength (as a modified structural number), and pavement age are the explanatory variables. The model is statistically validated and used to forecast road rutting and the effectiveness of the rutting prediction is confirmed. The error between the field data and estimated values is within 5 %.

Key words:

rutting, regression analysis, low-volume roads, ground truth verification

1. Uvod

Indijska cestovna mreža druga je po veličini u svijetu, s duljinom od 5,6 milijuna kilometara. Sastoji se od sedam kategorija: brze ceste, nacionalne autoceste, državne autoceste (SH), gradske ceste, glavne okružne ceste (MDR), ostale okružne ceste (ODR) i seoske ceste (VR) (NHAI, 2022) [1]. Ukupna duljina seoskih cesta u Indiji iznosi približno 2,75 milijuna km i obuhvaća ceste postavljene u sklopu plana premijera Grama Sadaka Yojane (PMGSY). Unatoč tome, količina prometa na tim cestama vrlo je mala. Bez obzira na to, seoske ceste služe kao glavne arterije koje međusobno povezuju mala sela i druge kategorije cesta (uključujući glavne okružne ceste, ostale okružne ceste i državne autoceste) osiguravajući odgovarajuće prometne tokove. Te ceste izravno povezuju sektore poljoprivredne proizvodnje i omogućuju pristup bolnicama, školama, fakultetima i tržnicama za stanovništvo koje živi u selima [2]. Cestovna mreža jedno je od najvažnijih i najvrjednijih dobara Indije jer predstavlja komunikacijsku i gospodarsku infrastrukturu s najvećim potencijalom za rast. Ceste omogućuju jednostavno i sigurno kretanje ljudi i robe s jednog mjesta na drugo [3]. Stoga Vlada Indije godišnje ulaže goleme količine novca kako bi poboljšala povezanost među ruralnim naseljima izgradnjom cesta prema planu PMGSY [2]. Prema Makendranu i sur. [4, 5], većina cesta u ruralnim područjima izgrađene su kao savitljive kolničke konstrukcije, ali je održavanje PMGSY cesta u Indiji izazovan zadatak. Gaspar, L. i Bencze, Z. [6] proučavali su pristupe produljenja trajanja kolnika. Ceste pod prometom većinom traju 10 do 12 godina, ovisno o lokalnim uvjetima i ograničenjima. U tom razdoblju, drugi radovi na održavanju, kao što su krpanje i brtvljenje pukotina, mogu uzrokovati zatvaranje cesta i kašnjenje. Troškovi održavanja i rada tijekom uporabljivosti kolnika ponekad premašuju izvorne troškove izgradnje kolničke konstrukcije. Makendran i sur. [7] naveli su da najčešće tipove parametara oštećenosti opaženih na seoskim cestama s malim volumenom prometa uključuju pukotine, udarne jame, krunjenje i kolotražnje. Kolotražnje je jedan od važnih parametara za ceste s malim volumenom prometa jer izravno utječe na duljinu trajanja kolnika, trajanje putovanja, sigurnost, udobnost vožnje i operativne troškove vozila. Međutim, samo je nekoliko istraživača ispitalo kolotrage na cestama s malim volumenom prometa. Stoga je cilj ovog istraživanja razviti model predviđanja kolotruga za ceste s malim volumenom prometa.

Savitljive kolničke konstrukcije sastoje se od tri sloja: tamponskog sloja, nosivog sloja i zastora (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) [8]. Asfaltbeton je zastor sastavljen od drobljenog kamena različitih frakcija, drobljenog praha kao ispune i bitumena. U različitim uvjetima okoline asfaltbeton može djelovati kao plastičan, viskoelastičan i elastičan. Reologija (znanost o fluidnosti) najbolje opisuje ponašanje asfaltbetona [9]. Općenito su asfaltbetonski kolnici podložni pukotinama zbog zamora materijala i stvaranju kolotruga tijekom vremena.

Kolotrazi kod savitljive kolničke konstrukcije uzrokuju opasnosti u prometovanju i ugrožavaju sigurnost utječući u isto vrijeme

negativno na udobnost, uslugu, trajanje putovanja i kvalitetu iskustva putnika na cestama. Kolotrazi se mogu uočiti na svim cestama, a posebice na seoskim cestama manjeg volumena prometa. Kolotrazi su najčešći u blizini raskrižja, zavoja i područjima ograničenja na niske brzine s mnogo zaustavljanja i kretanja. Ali [10] navodi da kolotrazi ugrožavaju sigurnost na kolnicima kada dosegnu kritične dubine. Kolotrage se može preciznije definirati kao uzdužna udubljenja na savitljivim kolničkim konstrukcijama na mjestima prolaska kotača. U Indiji se velik broj teretnih vozila s punim opterećenjem kreće cestama tijekom ljetne sezone, osobito tijekom žetve poljoprivrednih proizvoda, utječući na površine cesta s malim volumenom prometa. Osim što uzrokuje probleme koji se tiču, npr. brzine i udobnosti, to u konačnici može dovesti i do oštećenja takvih cesta.

Rukavina T. i sur. [11] proučavali su tradicionalna rješenja sustava hidroizolacije i asfaltnih slojeva na mostovima i koji su uzroci pojave kolotruga na voznoj površini kolnika. Istraživanja su uključivala analizu postojećih sustava u uporabi, laboratorijska ispitivanja i mjerenja na mjestu relevantnih parametara sustava koji utječu na otpornost na kolotražnje. U istraživanju je zaključeno da se otpornost na kolotražnje povećala za faktor od približno 1,5 zbog uporabe veziva od polimerom modificiranog bitumenom. Roberts i sur. [12] ispitali su vruće mješavine bitumenskih materijala i konstrukciju. Zaključili su da se pri primjeni prometnih opterećenja, kolotrazi mogu razviti iz nekoliko razloga, uključujući nakupljanje deformacija u bilo kojem od asfaltnih slojeva kolnika i/ili bočne pomake materijala. Vorobjovas, V. i Vaitkus, A. [13] ispitali su lokalne agregate u asfaltbetonskim slojevima; svi uzorci imali su dubinu kolotruga ispod 5 %. Asfaltbeton visokih modula (HMAC) s lomljenim granitom i PMB 25/55-60 pokazao je najmanju vrijednost dubine kolotruga (1,3 %), odnosno 1,3 % – 4,5 % manju od vrijednosti asfaltbetona. Polimerom modificirani bitumen preporučuje se za HMAC nosive i vezne slojeve jer ima dobru otpornost na zamor i temperaturu. HMAC bi općenito trebao sadržavati 5 % bitumena. Niža koncentracija bitumena smanjuje otpornost na zamor i dugovječnost HMAC kolnika. Bertulieni i sur. [14] zaključili su da su uzroci kolotražnja na kolnicima s jednim prometnim trakom nedovoljna zbijenost, loše mješavine i neuzimanje u obzir navedenih uvjeta na slojevima zastora tijekom izgradnje ceste. Stijanovic i sur. [15] ispitali su pristupe stabilizaciji tla cementom, uključujući dodavanje do 30 % recikliranog asfaltnog kolnika kao zamjene za prirodni agregat i leteći pepeo i zamjenu 20 % ili 40 % portlandskog cementa u stabilizacijama tla cementom s 4 % i 6 % veziva. Proctorov postupak utvrđuje maksimalnu suhu gustoću i optimalan udio vlage za stabilizacije tla cementom. Rezultati opravdavaju upotrebu recikliranih materijala u kolničkim konstrukcijama. Shen i sur. [16] navode da kolotrazi izravno utječu na kolnike i smanjuju njihovu učinkovitost, vijek trajanje ceste, udobnost putovanja i sigurnost na cesti. Fang [17] tvrdi da se zbog oksidacije bitumena u habajućem sloju, savitljive kolničke konstrukcije pogoršavaju. Smanjenje povezanosti između

agregata u habajućem sloju također je jedan od razloga nastanka kolotruga.

Razne tvrtke, uključujući Central Road Research Institute (hrv. Središnji institut za istraživanje cestovnog prometa - CRRI [18]) razvile su računalni program kao što je HDM-4 [19] za pružanje modela predviđanja kolotražnja za gradske i međugradske ceste. Model HDM-4 nije prikladan za ceste s malim volumenom prometa jer zahtijeva dodatnu kalibraciju za dobivanje preciznijih rezultata.

Martin i Choummanivong [20] proveli su istraživanje u Australiji prikupljajući podatke o 140 koridora i razvili model kolotražnja pomoću regresijske analize. Pet eksplanatornih varijabli u modelu bile su nosivost kolnika, prometno opterećenje, klimatski uvjeti, održavanje kolnika i starost. Vrijednost valjanosti (R^2) iznosila je 0,44. Modelom se predviđa utjecaj kolotruga u slučaju povećanog prometnog opterećenja i male nosivosti posteljic. Martin i sur. [21] razvili su model kolotražnja temeljen na 500 probnih dionica pomoću linearne i nelinearne regresijske analize. Eksplanatorne varijable primijenjene za taj model uključivale su promet, starost, klimatske uvjete, održavanje cesta i nosivost kolnika. Azevedo i sur. [22] razvili su model kolotražnja pomoću regresijske analize uzimajući u obzir eksplanatorne varijable kao što su volumen prometa, priprema površine, udio veziva i udio šupljina. Za eksperimente je odabrano ukupno osam dionica u dužini od približno 150 m. Model je pokazao odličan koeficijent determinacije od 0,98. U istraživanju je zaključeno da deblji sloj ne poboljšava značajno otpornost na kolotražnje pod manjim prometnim opterećenjem. Sen [23] je razvio model kolotražnja pomoću višestruke linearne regresijske analize. U tom su se modelu primjenjivale neovisne varijable kao što su prometno opterećenje, tlo, klima, oborine, odvodnja i starost. U ovom se istraživanju razmatralo 10 dionica, pri čemu je svaka dionica bila duljine između 2,5 i 10 km, te je zaključeno da veće prometno opterećenje rezultira većim stopama progresije kolotruga. Starost kolnika jedna je od varijabli koje najviše doprinose stopi povećanja kolotruga. Gustafsson i sur. [24] otkrili su da na ravnost savitljive kolničke konstrukcije, upotrebljivost i brzinu vozila značajno utječu varijacije u dubini kolotruga. Medved i sur. [25] proveli su analizu modela konačnih elemenata nearmiranih kolničkih konstrukcija i kolničkih konstrukcija ojačanih geocelijama. Neovisne varijable bile su pozicije geocelija te nosivost i debljina kolnika. Geocelije značajno povećavaju nosivost asfaltnih slojeva u kolničkim konstrukcijama i smanjuju trajne deformacije asfalta. Reddy i Veeraragavan [26] zaključili su da povećanje gustoće prometa ubrzava stvaranje kolotruga na kolnicima. Archilla i Madanat [27] navode da je početno stvaranje kolotruga na kolniku dovelo do deformacija savitljivih slojeva kolničkih konstrukcija u putanjama kotača zbog ponavljajućih prometnih opterećenja. Ceste s malim volumenom prometa pokazuju značajne stope oštećenosti. Kolotrazi izravno utječu na kvalitetu vožnje i integritet cesta s malim volumenom prometa. Iz navedenoga se može primijetiti da se samo ograničen broj istraživanja usredotočio na kolotrage na cestama s malim volumenom prometa u Indiji. Stoga je u ovom istraživanju razvijen model predviđanja kolotruga za ceste

s malim volumenom prometa. Očekuje se da će ovo istraživanje pomoći graditeljima cesta u pružanju učinkovitog upravljanja kolnicima na cestama s malim volumenom prometa.

Područje istraživanja bila je država Tamil Nadu u Indiji koja se prostire na površini od 130.060 četvornih kilometara (km^2). Ukupan broj stanovnika je 76 417 030 (7,64 Crore), a gustoća naseljenosti je 587 po četvornom kilometru [28]. U dogovoru sa službenicima Odjela ruralnih cesta i sustava Panchayat Raj (eng. Rural Road and Panchayat Raj Department), za istraživanje su odabrane 173 probne dionice na cestama s malim volumenom prometa (svaka duljine 200 m).

2. Metodologija

U ovom je istraživanju predviđeno kolotražnje kolnika savitljivih kolničkih konstrukcija s malim volumenom prometa. Istraživanje se sastoji od četiri faze (slika 1.), a pojedinosti se opisuju u nastavku.

U prvoj su fazi za potrebe ispitivanja odabrane 173 ceste manjeg volumena prometa. Druga se faza sastojala od prikupljanja podataka tijekom kojeg se nije obračala pozornost na kvalitetu cesta. Prikupit će se podaci o cijeloj cesti kako bi se potvrdila oštećenost. Podaci o cesti uključivali su kolotrage, nosivost kolnika utvrđenu iz modificiranih strukturnih brojeva (engl. *modified structural numbers* - MSN) pomoću ispitivanja kalifornijskoga indeksa nosivosti (CBR), starost kolnika i broj gospodarskih vozila po danu (engl. *Commercial Vehicles per Day* - CVPD). Model kolotražnja razvijen je u trećoj fazi primjenom tehnike višestruke linearne regresije te je statistički potvrđen. U završnoj fazi ovog istraživanja iznose se zaključci i preporuke.

2.1. Kriteriji za odabir probnih dionica

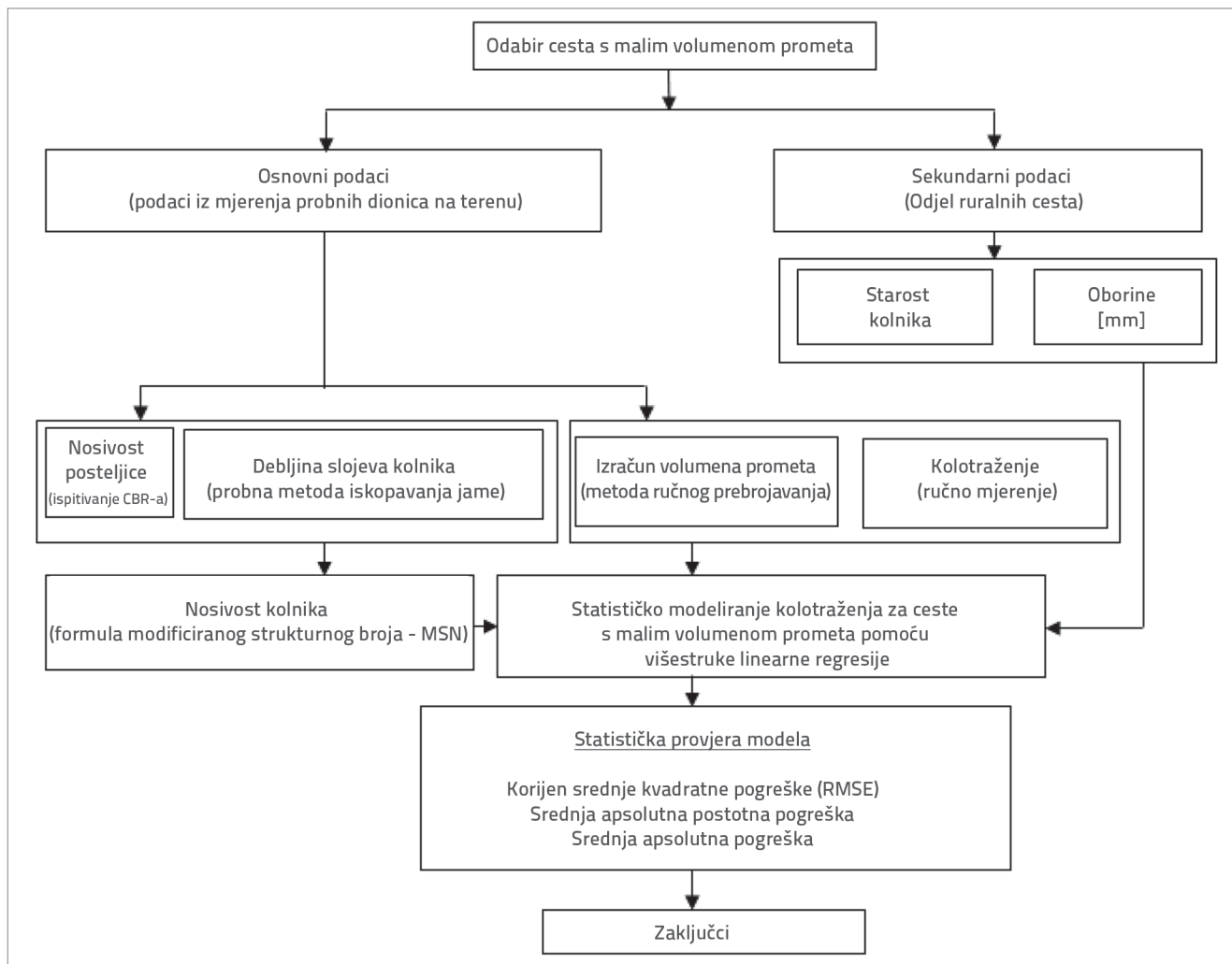
Kriteriji usvojeni za odabir probnih dionica bili su sljedeći.

- ceste s malim volumenom prometa s manje od 150 gospodarskih vozila po danu
- ravne probne dionice bez križanja ili T, X ili Y dionica
- probne dionice bez zavoja
- dionice sličnog uzdužnog profila i poprečnog presjeka u pogledu sastava i posteljice
- dobra odvodnja i najbolji mogući površinski uvjeti.

Navedeni kriteriji ispunjeni su za 173 probne dionice u dogovoru sa službenicima Odjela ruralnih cesta i sustava Panchayat Raj u Tamil Naduu. Dionice su podijeljene na manje segmente od 200 m, a kolotrag je ručno izmjeren mjernom trakom.

2.2. Prikupljanje podataka

U ovom su istraživanju prikupljeni podaci o količini prometa, istraživanju podtla i oštećenjima ceste na svim dionicama istraživanja, kao što je opisano u sljedećem odlomku. Slike 2a i 2b su fotografije cesta s malim volumenom prometa u Tamil Naduu.



Slika 1. Dijagram toka metodologije



Slika 2. a) i b) Fotografija dijela ceste

2.3. Podaci o prometu

Podaci o prometu kontinuirano su prikupljeni uzastopnim danima tijekom tri mjeseca pomoću metode ručnog prebrojavanja (Indian Road Congress (IRC) 9, 1972.) [29]. Prema podacima, maksimalni i minimalni volumen prometa za probne dionice iznosio je devet odnosno dva CVPD-a. Prema smjernicama IRC-a, vozilo čija je ukupna masa 3 tone ili više smatralo se gospodarskim vozilom.

2.4. Uzorci tla

Uzorci tla prikupljeni su iz ispitnih jama do razine posteljice za sve 173 probne dionice i provedena su CBR ispitivanja u laboratoriju u svrhu određivanja nosivosti posteljice (IS 2720-16, 1987) [30]. Debljina slojeva kolnika fizički je izmjerena u ispitnim jamama. Na svim probnim dionicama iskopane su jame veličine 1 m × 1 m. Probne jame su locirane ispod tragova kotača na udaljenosti od 0,5 m od ruba kolnika. Iskopane su do razine posteljice i točno su izmjerene debljine svakog sloja i ukupnog presjeka za sve 173 probne dionice.

2.5. Mjerenja kolotruga

Kolotruga su izmjereni na svakoj dionici; maksimalna dubina kolotruga izmjerena je u milimetar pomoću mjerene letve od 1,2 m. Ravni rub postavljen je preko kolotruga i odstupanje je mjereno pomoću čeličnog ravnala (John i sur. 2014. [31], CRR, 1994. [18], Makendran i sur. 2015.) [32].

2.6 Debljina kolnika

Sve ceste s manjim volumenom prometa izgrađene su s minimalnom debljinom slojeva kolničke konstrukcije; širina kolnika bila je 3 m prema IRC SP 20: 2002 [33]. Za projektiranje slojeva kolničke konstrukcije primijenjen je "Priručnik za izvangradske ceste". Pojednosti sloja ceste s malim volumenom prometa prikazane su na slici 3.

Kolnik je projektiran da podnese opterećenje jednog kotača od 5100 kg s ukupnom debljinom kolničke konstrukcije od 295 mm. Seoske ceste s malim volumenom prometa izgrađene su u tri glavna sloja preko sloja posteljice od šljunka. Prvi nosivi sloj probne dionice u ovom radu izgrađen je od mješavine šljunka



Slika 3. Poprečni presjek kolničke konstrukcije ceste malog volumena prometa

i pijeska (debljine 125 mm). Drugi, nosivi sloj, izgrađen je od makadama (debljine 150 mm).

Treći sloj činio je prethodno miješani bitumenski zastor (debljine 20 mm). Kvaliteta materijala i konstrukcijske odredbe navedene u IRC SP-20 (2002.) primijenjene su za izgradnju cesta manjeg volumena prometa [33].

2.7. Modificirani strukturni broj (MSN)

U ovom je radu primijenjen koncept strukturnog broja (SN), tj. pokazatelja nosivosti kolnika koji je razvila Američka udruga državnih službenika za autoceste i promet, a izražen je izrazom (1) [34].

$$SN = a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_2 + a_3 \cdot t_3 + \dots + a_n \cdot t_n = \sum_{i=1}^n a_i \cdot t_i \quad (1)$$

gdje $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ označavaju koeficijente nosivosti materijala za ceste koji se primjenjuju u različitim slojevima kolnika, a $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ označavaju odgovarajuće debljine u inčima. Nosivost kolnika izračunana je u smislu MSN-a na temelju izraza (2) koju su razvili Hodges i sur. [35]. U ovom su istraživanju upotrijebljeni koeficijenti nosivosti koje je predložio CRR [18] u New Delhiju za indijske uvjete i različite materijale. Kao što je navedeno, SN dobiven iz izraza (1) modificiran je u MSN izražen u izrazu (2).

$$MSN = SN + 3,51(\log_{10} CBR) - 0,85(\log_{10} CBR)^2 - 1,43 \quad (2)$$

Pojednosti o starosti kolnika za probne dionice prikupljene su od Odjela ruralnih cesta i sustava Panchayat Raj u Tamil Naduu u Indiji, koji je odgovoran za izgradnju i održavanje cesta s malim volumenom prometa. Detalji o izgradnji ceste prikupljeni su u razdoblju od 2014. do 2021. godine.

2.8. Oborine

Podaci o oborinama prikupljeni su od Indijskog meteorološkog zavoda za razdoblje od 2014. do 2021. [36].

3. Analize korelacije

Provedena je analiza korelacije kako bi se izmjerili stupnjevi odnosa između pet varijabli razmatranih u ovom istraživanju.

Primijenjena je metoda Pearsonovog koeficijenta korelacije. U ovom se pristupu procjena koeficijenta korelacije može razlikovati za svaku varijablu. Negativna MSN vrijednost predstavlja idealnu negativnu korelaciju, a pozitivna vrijednost označava idealnu pozitivnu korelaciju. Za vrijednost nulte korelacije ne postoji veza između dva faktora. Tablica 1. prikazuje značajne korelacije na razini 0,01 (dvostrane). Rezultati

Tablica 1. Koeficijenti korelacije među varijablama

Br.	Parametar modeliranja	Starost [godine]	Modificirani strukturni broj (MSN)	Broj gospodarskih vozila u danu (CVPD) [broj]	Oborine [mm]	Kolotraženje [mm]
1	Starost [godine]	1	-0,459**	0,518**	0,976**	0,846**
2	MSN [broj]	-0,459**	1	-0,457**	-0,462**	-0,427**
3	CVPD [broj]	0,518**	-0,457**	1	0,527**	0,536**
4	Oborine [mm]	0,976**	-0,462**	0,527**	1	0,834**
5	Kolotraženje [mm]	0,846**	-0,427**	0,536**	0,834**	1

** Korelacija je značajna na razini 0,01 (dvostrana)

pokazuju relativno dobre korelacije između svakog para atributa u poretku s najvećim stupnjem podudaranja (otprilike 84,6 %) između kolotruga i starosti kolnika, dok je najniža korelacija ona između nosivosti kolnika prema MSN-u i kolotruga (približno 42,7 %).

4. Razvoj modela kolotražnja

Višestruka linearna regresijska analiza primijenjena je za razvoj funkcionalnog odnosa između kolotruga i eksplanatornih varijabli. Funkcionalni odnos prikazan je u izrazu (3).

$$Rutting = a_0 + a_1 \cdot Age + a_2 \cdot MSN + a_3 \cdot CVPD + a_4 \cdot RN \quad (3)$$

pri čemu a_0 označava konstantu modela, a vrijednosti a_1 , a_2 , a_3 , i a_4 su koeficijenti starosti, MSN-a, CVPD-a i oborina za model kolotražnja. Koeficijenti modela kolotražnja sažeti su u tablici 2. Matematički izraz za model kolotražnja dan je u izrazu (4).

Tablica 2. Koeficijenti modela kolotražnja

Parametar modela	Koeficijenti	t-statistika	P-vrijednost
Križanje	5,108	2,512	0,012
Starost [godine]	1,171	3,676	0,000
MSN [broj]	-2,759	-3,116	0,002
CVPD [broj]	0,475	2,595	0,010
Oborine [mm]	0,000	0,410	0,681

$$Rutting = 5,108 + 1,171AGE - 2,759MSN + 0,475CVPD \quad (4)$$

Znak plus (+) za procijenjeni koeficijent modela za starost, CVPD i količinu oborina upućuje na mogući utjecaj na dubinu kolotruga. Znak minus (-) za koeficijent modela prema MSN-u označava negativan utjecaj na dubinu kolotruga. Vrijednosti t-statistike iznad 1,95 pokazuju da nezavisne varijable starosti, MSN-a i CVPD-a imaju statistički značajan utjecaj na dubinu kolotruga. Vrijednost t-statistike manja od 1,95 za količinu oborina znači da je statistički beznačajna za model dubine kolotruga.

Procijenjena R^2 vrijednost iznosi 0,74, što pokazuje da model kolotražnja može opravdati 74 % predviđanja dubine kolotruga. Valjanost razvijenog regresijskog modela utvrđuje se razmatranjem rezultata za (t-statistiku) t-test, izraz (5) i F-vrijednost, izraz (6). Procijenjene t-vrijednosti za koeficijente i F-vrijednost su značajne, pojačavajući prednosti primjene razvijenog modela za predviđanje kolotruga na dionicama ceste. Murray i Larry (1999.) [37] procijenili su statističku valjanost srednje vrijednosti između opaženih i procijenjenih vrijednosti. Modeli višestruke linearne regresijske analize razvijeni za podatke o cestama s malim volumenom prometa potvrđeni su ispitivanjem vrijednosti t-statistike i F-vrijednosti kako bi se utvrdilo postoje li značajne razlike između opaženih i modeliranih srednjih vrijednosti kolotruga primjenom izraza (5) i (6).

$$t = \frac{X_a - X_m}{\sqrt{\frac{s_a^2}{N_a} + \frac{s_m^2}{N_m}}} \quad (5)$$

U izrazu (5), X_a i X_m predstavljaju srednje vrijednosti opaženih i modeliranih vrijednosti kolotruga; s_a^2 i s_m^2 su njihove varijancije, a N_a i N_m su veličine njihovih uzoraka. Za F test potrebno je primijeniti izraz (6).

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (6)$$

gdje s_1^2 i s_2^2 označavaju dva veća i manja uzorka varijancije opaženih i modelnih vrijednosti kolotruga. Regresijska statistika i rezultati analize varijancije prikazani su u tablicama 3 i 4.

Tablica 3. Višestruka linearna regresijska statistika

Vrijednost koeficijenta višestruke regresije R	0,862
R^2 vrijednost	0,744
Korigirani R^2	0,738
Standardna pogreška	0,380
Ukupni broj uzoraka	173

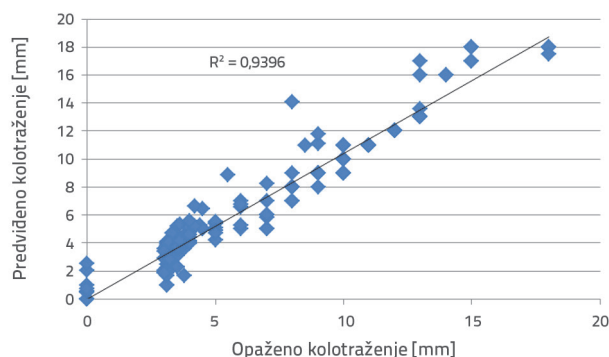
Tablica 3. pokazuje da vrijednost koeficijenta višestruke regresije R iznosi 0,862 za model predviđanja kolotražnja za ceste s

Tablica 4. Analiza varijancije (ANOVA)

ANOVA					
	Stupanj slobode (Df)	Zbroj kvadrata odstupanja (SS)	Srednje kvadratno odstupanje (MS)	F-statistika	Značajnost F-statistike
Regresija	4	5586,807	1396,702	122,1875	0,000
Rezidualna	168	1920,376	11,43081	---	---
Ukupno	172	7507,183	---	---	---

malim volumenom prometa. Naime, u tablici 3. standardna pogreška između podataka s terena i predviđene vrijednosti kolotražnja iznosi 0,38 %. Tablica 4. pokazuje da je vrijednost F-statistike manja od 0,05 za model kolotražnja, što pokazuje da je razvijeni model statistički prihvatljiv.

Model razvijen iz izraza (4) upotrijebljen je za predviđanje kolotraga na cestama s malim volumenom prometa. Ove predviđene vrijednosti kolotražnja uspoređuju se sa stvarnim opaženim vrijednostima na slici 4. kako bi se razjasnila prikladnost matematičkog modela. Položaj ucrtanih vrijednosti raspršenja duž crte jednakosti upućuje na najbolju prikladnost modela. Štoviše, visoka vrijednost R^2 (0,937) potvrđuje dobru prikladnost modela. Model je razvijen pomoću računalnog programa SPSS [38-39].



Slika 4. Vrijednosti predviđene putem modela kolotražnja i opažene vrijednosti

5. Statistička provjera modela

Regresijski model se procjenjuje za podatke o cestama s malim volumenom prometa. U procesu provjere primjenjuju se sljedeće mjere ponašanja:

a) srednja apsolutna pogreška (engl. *Mean Absolute Error* - MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|}{n} \quad (7)$$

gdje je y_i opažena vrijednost kolotražnja, a (\bar{y}_i) je vrijednost kolotražnja procijenjena iz regresijskog modela.

b) korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Squared Error* - RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|} \quad (8)$$

c) srednja apsolutna relativna pogreška (MARE)

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{y_i} \quad (9)$$

Relativne vrijednosti modela kolotražnja sažete su u tablici 5. Iz tablice 5. utvrđeno je da MAE modela iznosi 0,629 %, srednja apsolutna postotna pogreška 0,043 %, a RMSE 0,281 %. Zaključeno je da model višestruke regresijske analize poboljšava predviđanje kolotraga za indijske ceste s malim volumenom prometa.

Tablica 5. Statistička procjena modela kolotražnja

Br.	Relativne vrijednosti	Vrijednosti [%]
1	Korijen srednje kvadratne pogreške	0,281
2	Srednja apsolutna postotna pogreška	0,043
3	Srednja apsolutna pogreška	0,629

Za provjeru točnosti referentnih podataka za ceste s malim volumenom prometa, vrijednosti kolotražnja na 15 cesta ručno su izmjerene na terenu; početna vrijednost kolotražnja bila je 0,00 mm. U razvijeni model kolotražnja uključene su informacije o vrijednostima starosti, MSN-a i CVPD-a za odabrane ceste, kao što je prikazano u tablici 6. Na primjer, cesta Pinjivakkam izgrađena je u siječnju 2015.; izmjerena vrijednost kolotražnja bila je 3,6 mm, a predviđena vrijednost kolotražnja krajem lipnja 2017. bila je 3,81. Kao što je prikazano na slikama 5. i 6., vrijednosti kolotražnja izmjerene su na istoj cesti, točnije u vrijeme izgradnje i pri određenoj starosti.



Slika 5. Novoizgrađena cesta u siječnju 2015.

Tablica 6. Provjera točnosti referentnih podataka

Br.	Naziv ceste s malim volumenom prometa	Starost [godine]	MSN [broj]	CVPD [broj]	Vrijednost kolotražnja na terenu [mm]	Predviđeno kolotražnje [mm]
1	Sethilpakkam Anna Nagar	1,0	1,84	5	3,5	3,57
2	Elavor Marichetty Chatram	1,0	1,52	3	3,5	3,50
3	Karani	1,5	1,84	4	3,5	3,68
4	Koduveli	1,5	1,74	3	3,5	3,48
5	KBP - Madurvasal	2,0	1,88	6	5	5,11
6	Irulanjeri - Narasingapuram	2,0	1,88	6	5	5,11
7	Nungambakkam - Thandalam	10,5	1,52	7	18	16,52
8	Satharai - Satharai	10,5	1,52	7	18	16,52
9	Keelachery - Cheyyapakkam	10,5	1,64	7	18	16,19
10	Elambakkam - Koovam	0,5	1,52	4	3	3,39
11	AKM - Vellerithangal	10	2,03	8	18	15,00
12	Elambakkam - Koovam	2,0	2,23	5	3,5	3,67
13	Koovam - Pillaiyar Kuppam	2,0	2,03	4	3,2	3,74
14	Pinjivakkam	2,5	2,39	5	3,6	3,81
15	Thirupandiyur	2,5	1,84	4	4,2	4,85

Prikazane su i vrijednosti kolotražnja za preostale ceste. Iz tablice 6. može se zaključiti da je stvarna vrijednost kolotražnja puno bliža vrijednosti dobivenoj iz modela, što pokazuje da je pouzdanost modela razvijenog u ovom radu prihvatljiva.



Slika 6. Kolotrazi na površini ceste u lipnju 2017.

6. Zaključak

U ovom je istraživanju model kolotražnja razvijen primjenom višestruke linearne regresijske analize. Rezultati

ANOVA za višestruku linearnu regresijsku analizu pokazuju da starost kolničke konstrukcije, MSN i CVPD pokazuju visoke korelacije s kolotrazima na kolniku. Međutim, nijedna od gore navedenih eksplanatornih varijabli ne pokazuje međusobnu multikolinearnost. Vrijednosti t-statistike eksplanatornih varijabli veće su od kritične vrijednosti od 1,96, što pokazuje da je svaki parametar modela značajan u procjeni kolotražnja kolnika. P-vrijednost parametra "oborine" prelazi 0,05, što pokazuje da je beznačajna na razini značajnosti od 5 %. Nadalje, vrijednost t-statistike za "oborine" manja je od 1,96, što pokazuje da oborine nemaju značajan utjecaj na model kolotražnja. Nasuprot tome, "p-vrijednosti" za starost kolnika, MSN i CVPD manje su od 0,05. Gornje tri varijable uključene su u model. U ovom se istraživanju zaključuje da povećanje volumena prometa (tj. CVPD) i starost ubrzavaju stvaranje kolotruga na kolnicima. Nadalje, temeljito se procjenjuje djelotvornost modela predviđanja kolotruga usporedbom predviđenih vrijednosti sa stvarnim vrijednostima. Model kolotražnja je snažan znanstveni alat za predviđanje sustava upravljanja održavanjem savitljivih kolničkih konstrukcija s malim volumenom prometa u Indiji.

LITERATURA

- [1] National Highways Authority of India: www.nhai.com, 1.9.2022.
- [2] Chandrakasu, M., Rajiah, M.: Development of a roughness estimation model for low volume roads, *GRAĐEVINAR*, 70 (2018) 2, pp. 97-104, <https://doi.org/10.14256/JCE.1488.2015>
- [3] Chandrakasu, M., Suthandhiram, K., Garoma, S., Merea, B., Sethuraman, B.: Laboratory Study on the Water-Soluble Polymer as a Self-Curing Compound for Cement Concrete Roads, *Ethiopia Technologies*, 10 (2022) 4, pp. 80, <https://doi.org/10.3390/technologies10040080>
- [4] Makendran, C.: Performance modelling of low volume village roads in India, Ph.D. Thesis, Anna University, India, 2018.
- [5] Makendran, C., Vignesh Kumar, M., Mahalingam, B., Packialakshmi, S.: Roughness Prediction Models Based on Variable Distress Parameters using Neural Network and MLRA for PMGSY roads, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29 (2020) 7, pp. 2209-2218
- [6] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 6, pp. 515-522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>
- [7] Chandrakasu, M., Rajiah, M., Senathipathi, V., Ravi Sekhar, C.: Comparative Evaluation of Distress Prediction Modeling of Village Roads in India Using Regression and ANN Techniques, *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147 (2021) 3, 10.1061/JPEODX.0000287
- [8] American Association of State Highway & Transportation Officials: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1 (1993).
- [9] Huang, Y.H.: Pavement analysis and design, 1993.
- [10] Ali, B.: Numerical Model for the Mechanical Behavior of Pavement: Application to the Analysis of Rutting, Ph.D. Dissertation, University of Science and Technology Lille, France, 2006.
- [11] Rukavina, T., Dimter, S., Šimun, M.: Rutting resistance of waterproofing – asphalt pavement systems on bridges, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 10, pp. 879-886, <https://doi.org/10.14256/JCE.917.2013>
- [12] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W.: Hot mix asphalt materials, mixture design and construction, Research and Education Foundation, 2nd ed., Maryland, 1996.
- [13] Vorobjovas, V., Vaitkus, A.: Use of local aggregates in high modulus asphalt concrete layers, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 4, pp. 353-360, <https://doi.org/10.14256/JCE.886.2013>
- [14] Bertulienė, L., Oginskas, R., Bulevicius, M.: Research of rut depth in asphalt pavements reinforced with geosynthetic materials, *Proceedings of the 8th International Conference Environmental Engineering*, 2011.
- [15] Stijanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>
- [16] Shen, J.A, Li, F.J., Chen, J.: Asphalt pavement damage and countermeasures, China Communications Press, Beijing, 2004.
- [17] Fang, F.T.: The Handbook of Highway Engineering, Taylor and Francis, 2006.
- [18] Central Road Research Institute: Pavement Performance Study on Existing Sections, Final Report, Government of India, New Delhi, India, 1 (1994) 2.
- [19] Bennett, 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, World Road Association, Paris, 5 (2000).
- [20] Martin, T., Choummanivong, L.: Interim network-level functional road deterioration models, Sydney, 2010.
- [21] Martin, T., Choummanivong, L., Toole, T.: New pavement deterioration models for sealed low volume roads in Australia, *Proceedings of the 8th International conference on managing pavement assets*, Santiago, 2011.
- [22] Azevedo, J., Capitão, S., Rasteiro, D., Picado-Santos, L., Analysis of the evolution of flexible pavement conditions based on LTPP SPS-5 sections, *Proceedings of the 9th international conference on managing pavement assets*, Washington, DC, 2015.
- [23] Sen, R.: Impact of changes in fleet composition and axle loading on pavement profile characteristics, Master Thesis, Swinburne University of Technology, Cercina, 2012.
- [24] Gustafsson, M., Berglund, C., Forsberg, B.E.: Effector Avinterdäck – En Kunskapsöversikt, Technical report No. 543, VTI, 2006.
- [25] Medved, S.P., Žlender, B., Lenart, S.M.: Parametric study of geocell reinforced pavement, *GRAĐEVINAR*, 70 (2018) 6, pp. 497-508, <https://doi.org/10.14256/JCE.2038.2017>
- [26] Reddy, B.B., Veeraragavan, A.: Structural Performance of In-service Flexible Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, 123 (1997) 2, pp. 156-167, [org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1997\)123:2\(156\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:2(156)).
- [27] Archilla, A., Madanat, S.: Development of a pavement rutting model from experimental data, *Journal of Transportation Engineering*, 126 (2000), pp. 291-299, [org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:4\(291\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:4(291))
- [28] Census: Population Projection report, <https://www.findeasy.in/population-of-tamil-nadu-2021/>, 2011.
- [29] IRC: Traffic Census on Non-urban Roads, Indian Road Congress, India, 2001.
- [30] IS 2720-16: Methods of Test for Soils, Laboratory determination of California bearing Ratio, Indian standard, India, 1987.
- [31] John, S., Miller, M., Bellinger, W.Y.: Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fifth Revised Edition), 2014.
- [32] 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*, (2015), pp. 01-07, 10.1155/2015/192485
- [33] IRC: Rural Road Manual, Indian Road Congress, New Delhi, India, 2002.
- [34] AASHTO: The AASHTO road test report - Pavement Research, National Academy of Sciences-National Research Council, Highway Research Board, Washington DC, 1962.
- [35] Hodges, J.W., Rolt, J., Jones, T.E.: The Kenya road transport cost study: Research on road deterioration, Laboratory Report No. 673, Transport and Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1975.
- [36] Indian Meteorological Department: <https://mausam.imd.gov.in/chennai/>, 1.12.2020.
- [37] Murray, R.S., Larry, J.S.: Theory and problems of statistics: Schaum's outlines series - Third edition, McGraw-Hill, New York, 1999., pp. 216-237
- [38] SPSS Statistics: Base user's guide, Statistical Package for the Social Sciences, 17 (2010).
- [39] SPSS Statistics: Statistics brief guide, Statistical Package for the Social Sciences, 19 (2010), pp.1-171