

Primljen / Received: 17.7.2023.

Ispravljen / Corrected: 8.11.2023.

Prihvaćen / Accepted: 23.11.2023.

Dostupno online / Available online: 10.1.2024.

Optimalno određivanje prioriteta održavanja asfaltnih kolnika primjenom sive realcijske analize te analize troškova i koristi

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Yan Zhang**
455216108@qq.com



Mr.sc. **Hao-Chang Li**
347164293@qq.com
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Yu-Xin Zhang**
857328654@qq.com



Mr.sc. **Wen-Ke Zang**
3364410992@qq.com



Mr.sc. **Kai-Wen Yao**
1579786889@qq.com

Sveučilište Lanzhou Jiao Tong, Kina
Fakultet prometa i transporta

Izvorni znanstveni rad

[Yan Zhang, Hao-Chang Li, Yu-Xin Zhang, Wen-Ke Zang, Kai-Wen Yao](#)

Optimalno određivanje prioriteta održavanja asfaltnih kolnika primjenom sive realcijske analize te analize troškova i koristi

Određivanje prioriteta održavanja kolnika, što uzima u obzir i kvalitetu i cijenu, važan je problem u donošenju odluka. Uobičajeni pristup uključuje određivanje prioriteta popravaka na cesti s većim površinskim oštećenjima, ali to nije uvijek u skladu sa stvarnim potrebama popravka. Kako bi se to riješilo, uvedena je metoda temeljena na teoriji sive relacije za procjenu performansi kolnika. Tom se metodom određuje optimalno vrijeme održavanja asfaltnih kolnika. Nakon što je slijed postavljen, idealan raspored održavanja za dionice prije održavanja određen je pomoću modela troškova i koristi. Ova metoda procjene posebno je korisna za kvantitativne analize utjecaja starosti kolnika i prometnog opterećenja na parametre izvedbe kolnika. Rezultati pokazuju da primjena sive realcijske analize učinkovito prosuđuje čimbenike i rangira dijelove cesta koji zahtijevaju održavanje. Za procjenu održavanje dionica korišten je model analize troškova i koristi. Taj model može usmjeravati odluke u vezi s dionicama prije održavanja i procijeniti uvjete kolnika, što rezultira ishodima koji su bolje usklađeni sa situacijama u stvarnom svijetu i ljudskom prosudbom. Očekuje se da će ovi nalazi biti vrijedni za dugoročno održavanje asfaltnih kolnika.

Ključne riječi:

održavanje kolnika, siva relacijska analiza, indeks stanja kolnika, procjena kvalitete kolnika, model optimizacije

Original research paper

[Yan Zhang, Hao-Chang Li, Yu-Xin Zhang, Wen-Ke Zang, Kai-Wen Yao](#)

Optimal prioritisation of asphalt pavement maintenance using grey relation analysis and cost-benefit analysis

Pavement maintenance prioritisation, which considers both quality and cost, is an important decision-making problem. The common approach involves the prioritisation of road repairs with more extensive surface damages but this does not always align with the actual repair needs. To address this, a method based on the grey relation analysis theory was introduced to evaluate pavement performance. This method was employed to determine the optimal maintenance time for asphalt pavements. Once the sequence was established, the ideal maintenance schedule for the pre-maintenance sections was determined using a cost-benefit model. This evaluation method is particularly useful for quantitative analyses of the influences of pavement age and traffic volume on pavement performance parameters. The results demonstrate that grey relation sorting effectively weighs the factors and provides rankings for road segments requiring maintenance. A cost-benefit analysis model was used to assess the maintenance sections. This model can guide decisions regarding pre-maintenance sections and assess pavement conditions, thus resulting in outcomes that align better with real-world situations and human judgment. These findings are expected to be valuable for the long-term maintenance of asphalt pavements.

Key words:

pavement maintenance, grey relation analysis, pavement condition index, pavement quality evaluation, optimisation model

1. Uvod

Asfaltni kolnici u velikoj se mjeri primjenjuju tijekom izgradnje autocesta u mnogim zemljama zbog njihovog praktičnog održavanja i ugodne vožnje. Ako se želi održati brzi rast industrije održavanja kolnika, mora se izdvojiti odgovarajući proračun za održavanje kolnika u dobrom stanju; prema tome, nedostatak proračunskih sredstava glavna je prepreka u održavanju kolnika. Korištenje ograničenih sredstava za održavanje za optimizaciju cestovnih mreža postupno je postalo hitan problem odjela za upravljanje autocestama na svim razinama. Provode se brojni istraživački napori na predviđanju kolnika pomoću postojećeg indeksa stanja kolnika [1–3]. Međutim, ovisno o situaciji, održavanje obično obuhvaća samo prognostičke rezultate kao referencu. Odjel za održavanje obično odlučuje koje segmente ceste treba popraviti u sljedećoj godini na temelju dostupnih podataka. Ti odjeli često donose odluke o održavanju kolnika na temelju trenutanih normi i propisa. U procesu donošenja odluke zanemaruju se drugi utjecajni čimbenici, osim analize pokazatelja stanja kolnika, što za posljedicu ima godišnje održavanje i neispunjavanje očekivanja.

Nakon razvoja tehnologije održavanja cesta, razvijene su mnoge metode procjene performansi postojećih kolnika, uključujući metodu regresijskog modela [4], metodu procjene sustavne analize, metodu teorije atributa i algoritme neuronske mreže [5]. Metoda regresijskog modela koristi veliku količinu mjernih podataka za utvrđivanje odgovarajućih matematičkih modela koji predstavljaju različite vrste. Međutim, teško je točno izraziti složeni odnos između subjektivnih i objektivnih procjena kolnika. Korelacija između rezultata evaluacije i izmjerenih podataka bila je nezadovoljavajuća i ograničena geografskim uvjetima. Analitički hijerarhijski proces i sintetičko-neizravne metode evaluacije glavne su metode koje se koriste za sustavnu analizu i evaluaciju jer su jasne i teorijske. Rezultati stručnog istraživanja također se koriste u procjenama kolnika; međutim, njihovi nedostaci uključuju prisutnost prekomjernih umjetnih čimbenika. Međutim, ove dvije metode nisu relevantne, a teško je objektivno i pravedno procijeniti uvjete kolnika. Atributne teorije i metode algoritma neuronske mreže slične su svojoj metodi. Međutim, postojala je razlika između tri skupine. Izračun pomoću metode atributa je dosadan. Metodu neuronske mreže teško je modelirati zbog spore brzine konvergencije algoritma s povratnim prosljeđivanjem pogreške ili BP algoritma (engl. *Backpropagation algorithm*) i tendencije prema lokalnoj konvergenciji. Grayova teorija ne samo da sintetizira prednosti ovih metoda, već također izbjegava njihove nedostatke i postiže dobre rezultate u upravljanju održavanjem kolnika. Profesor Deng Julong predložio je teoriju sivih sustava godine 1982. [6]. Ta je teorija služila za proučavanje problema nesigurnosti s ograničenim podacima. Ona izvlači vrijedne informacije prije svega generiranjem i razvijanjem djelomično poznatih informacija. Osim toga, realizirali smo točan opis i učinkovito praćenje ponašanja sustava i evolucijskog zakona. Osnovna ideja ove teorije je u tome da je, bez obzira na složenost ciljanog

sustava, još uvijek povezana i uređena s globalnim funkcijama i podacima kao bihevioralnom karakteristikom sustava, uvijek podrazumijevajući određenu pravilnost. Siva teorija pogodna je za uspostavu modela odlučivanja o održavanju kolnika zbog navedenih prednosti.

Sada su dostupne brojne metode za procjenu održavanja kolnika. Feng je hijerarhijskom klusterskom metodom grupirao dionice cesta s istim prometnim uvjetima, strukturom površine ceste, kvalitetom gradnje tijekom razdoblja izgradnje, cestovnim okruženjem i stupnjem mikroskopskih oštećenja površine ceste u isti tip ceste. Odabrali su dionice cesta koje su ispunile uvjete održavanja kako bi se smanjili troškovi održavanja [7]. Wei je usvojio sveobuhvatnu metodu analize s više atributa kako bi donio odluke o mjerama održavanja asfaltnih kolnika. Najprije su detaljno analizirani osnovni atributi svake mjere održavanja. Šest osnovnih atributa, naime, odabrani su kao evaluacijski indeksi za donošenje odluka, a to su: vijek trajanja asfaltnog kolnika, maksimalna razlika između razmaka prije i nakon održavanja asfaltnog kolnika, stupanj težine konstrukcije tehnologije održavanja, trošak održavanja, stupanj održavanja u odnosu na prometno opterećenje te estetski izgled cestovne površine nakon održavanja [8]. Međutim, većina metoda procjene, predviđanja i odlučivanja ili modela temelji se na regresijskoj analizi, koja je neprimjenjiva i netočna u praktičnoj primjeni. Ipak, performanse kolnika i vanjsko okruženje stalno se mijenjaju; stoga nije znanstveno koristiti konstantne pokazatelje i ponderu u procesu evaluacije.

Siva relacijska analiza (engl. *Grey Relational Analysis - GRA*) povezana je sa širokim rasponom primjena u različitim industrijama, a mnogi ju znanstvenici koriste za izračun sličnosti i rangiranje. Na primjer, Chen i dr. upotrijebili su poboljšanu GRA temeljenu na entropiji za identificiranje i rangiranje kritičnih uzročnih čimbenika u zrakoplovnim nesrećama [9]. Na temelju rezultata GRA, Zhang i dr. istaknuli su davanje prioriteta debljini stijenke kao najvažnijem strukturnom čimbeniku u dizajnu filtra čestica dizelskog goriva [10]. Wang i dr. koristili su GRA za izračunavanje strategija financijskog trgovanja i donošenje odluka o tržišnom vremenu [11]. GRA metoda također ima primjenu u održavanju kolnika. Guo Rui je analizirao koeficijente korelacije sive entropije faktora parova koji utječu na deformaciju ruta i dinamičku stabilnost smjese na temelju teorije sive entropije [12]. Yu Jiangmiao je predložio i demonstrirao metodu procjene mikropovršinskih tretmana asfaltnih kolnika na temelju modeliranja sivog sustava i teorije relacijskog stupnja sive boje. Ta metoda može se uspješno primijeniti uz druge postupake održavanja kolnika ili bez njih [13]. Yuji i dr. predložili su poboljšani sivi model predviđanja koji je dobio interval predviđanja vremena usluge održavanja i koristio ga kao osnovu za donošenje odluka o aktivnoj usluzi održavanja [14].

Postoje brojna istraživanja o analizi isplativosti održavanja kolnika uporabom novih materijala. Mnogi istraživači nastojali su poboljšati kvalitetu održavanja i smanjiti troškove istražujući nove materijale [15]. Geçkil i dr. ispitali su utjecaj doziranja čeličnih vlakana na debljinu i cijenu betonskog kolnika. Njihovo istraživanje pokazalo je da se s povećanjem količine čeličnih

vlakana debljina betonskog kolnika smanjila za 4,35 %, tj. na 18,66 %, a troškovi su kolnika porasli za 56,50 %, tj. na 74,07 % [16]. Osim toga, istraživani su dostupnost i isplativ odnos betona koji sadrži trosku visoke peći u klima s nižom nosivošću za kolnike. Njihovi proračuni pokazali su da je dodavanje troske visoke peći smanjilo debljinu betonskog kolnika za 1,58 do 3,38 % i smanjilo troškove za 5,59 do 10,30 % [17]. Osim toga, neki su se znanstvenici usredotočili na predviđanje pogoršanja kvalitete kolnika proučavanjem deformacije kolnika koja je dovela do razvoja brojnih modela trajnih deformacija za predviđanje kolotražnja. Karadag i dr. proveli su ispitivanja rezonantnih stupova kako bi se procijenile deformacije nevezanih granuliranih materijala, čime se omogućuje predviđanje ukupne trajne deformacije koja se javlja na kolnicima tijekom specifičnih ciklusa opterećenja. Nakon toga, utvrđene su jednadžbe modela trajnih deformacija za različite kolničke profile primjenom pristupa prilagođavanja krivulje [18]. Unatoč opsežnim istraživanjima o troškovima održavanja kolnika, provedena su ograničena istraživanja o procjeni kvalitete kolnika.

Odluke o održavanju najvažnija su osnova proaktivnih strategija održavanja. U području odluka o održavanju, popularne tradicionalne metode odlučivanja o izvedbi kolnika uglavnom se usredotočuju na korištenje promatranih podataka nekoliko ključnih pokazatelja stanja kolnika. Osim toga, većina studija bavi se troškovima održavanja, a ne koristima održavanja [19]. Postoje neke uobičajene metode u području kvalitativne analize, ali neke od njih ne primjenjuju se na scenarij ovog rada, gdje su dostupni podaci ograničeni, poznate informacije su rijetke, a pojava neuspjeha je nepravilna. Markovljeva metoda ima ograničenje jer nije preduvjet za naknadno djelovanje. Primjena umjetnih neuronskih mreža i statističkih metoda nemoguća je bez dovoljnih podataka. Nasuprot tome, teorija sivih sustava omogućuje izradu prediktivnih modela s malom veličinom uzorka i nepravilnim podacima bez ikakvih pretpostavki [20].

U ovom radu, model optimizacije odlučivanja za ocjenu asfaltnih kolnika uspostavljen je metodom sivog relacijskog sortiranja, a na temelju rezultata ovog modela provedena je analiza troškova i koristi. Istraživan je odnos između neobuzdano ograničenih i diskretnih podataka detekcije autoceste. Analizom podataka o stanju cestovne površine pojedinih dijelova ceste uvedene su dinamičke varijable za izračun težine svake varijable i izračunan je sveobuhvatan rang. Nakon toga, određen je redoslijed prioriteta i optimalno vrijeme održavanja kolnika te su donesene odluke o održavanju i planovi održavanja kolnika.

2. Čimbenici koji utječu na odluku o održavanju kolnika autoceste

Mnogi čimbenici utječu na odluku o održavanju kolnika, a odnosi između njih su složeni. Ti čimbenici koji utječu na odluku o održavanju kolnika uglavnom uključuju oblikovanje, izgradnju i rad, a većina njih je neizvjesna. Općenito, odluke o održavanju kolnika moraju uzeti u obzir performanse kolnika, karakteristike kolničke konstrukcije, prometno opterećenje, starost kolnika, klimu i druge čimbenike.

a) Materijal za kolničke konstrukcije

U sekvenciranju održavanja kolnika teško je kvantificirati strukturne materijale kolnika. Ako se može koristiti vrsta gradacije bitumenske mješavine kolnika i stvarni parametri ispitivanja bitumenske mješavine, može se kvantificirati strukturni tip specifičnog kolnika. Na temelju nedavnih kvantitativnih istraživanja površinskih karakteristika asfaltnih kolnika na autocestama, računalni model može se izraziti na sljedeći način [21]:

$$PMC = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (1)$$

$$PSME = 27,37 \cdot PSC^{0,645} \quad (2)$$

gdje su a_1 , a_2 i a_3 koeficijenti materijala habajućeg veznog i nosivog sloja; D_1 , D_2 i D_3 su debljine habajućeg veznog i nosivog sloja kolnika; PMC je koeficijent materijala za kolnik, a PSME je indeks ocjenjivanja materijala za kolnik.

b) Starost kolnika

Starost kolnika je još jedan faktor koji utječe na odluke o održavanju kolnika. Početak starosti kolnika je godina završetka nove rekonstrukcije ili većih i srednjih popravaka. Stanje oštećenosti kolnika i nosivost kolničke konstrukcije usko su povezani s nastankom ceste. Kako se povećava starost ceste, povećava se vrijednost savijanja kolnika i smanjuje ukupna krutost, što dovodi do pojave zamora i postupnog starenja kolničkog materijala. Općenito, što je starija cesta i što je bliža svom kraju uporabe, to je važnije proći održavanje kolnika [22].

c) Prometno opterećenje

Vozila su primarni uslužni subjekti autoceste. Količina prometa izravni je uzrok oštećenja kolnika uslijed zamora. Opterećenje od vozila glavni je uzrok oštećenja donjeg ustroja autoceste i kolnika. Pod istim uvjetima, kako se povećava prometno opterećenje, povećava se stopa pogoršanja kolnika. Na brzim cestama ili autocestama visokog stupnja, prometno je opterećenje, koje se ovdje naziva godišnji prosječni dnevni promet, veće od onoga na općoj autocesti, a akumulativno djelovanje standardnog osovinskog opterećenja se povećava što dovodi do bržeg pada u izvedbi kolnika. Stoga se prometno opterećenje mora uzeti u obzir kad se odlučuje o održavanju kolnika.

d) Indeks kvalitete održavanja kolnika (PQI)

Indeks kvalitete održavanja kolnika korišten je za procjenu ukupne kvalitete kolnika. PQI je izražen na sljedeći način [21],

$$PQI = w_{PCI} PCI + w_{RQI} RQI + w_{RDI} RDI + w_{PBI} PBI + w_{SRI} SRI \quad (3)$$

gdje je funkcija PCI indeks stanja površine kolnika, RQI je indeks kvalitete vožnje kolnika, RDI je indeks dubine kolotraga, PBI je indeks valovitosti kolnika, SRI je indeks otpora kolnika na proklizavanje; w_{PCI} , w_{RQI} , w_{RDI} , w_{PBI} , w_{SRI} su težine odgovarajućih indeksa koje redom iznose: $w_{PCI} = 0,35$, $w_{RQI} = 0,30$, $w_{RDI} = 0,15$, $w_{PBI} = 0,10$ i $w_{SRI} = 0,10$.

e) Indeks čvrstoće kolničke konstrukcije (PSSI)

Konstruktivna čvrstoća kolnika procijenjena je indeksom čvrstoće kolničke konstrukcije (engl. *Pavement structure strength index* - PSSI). PSSI je izražen izrazima (4) i (5):

$$PSSI = \frac{100}{1 + a_0 \exp(a_1 PSSI)} \quad (4)$$

$$SSI = \frac{l_d}{l_0} \quad (5)$$

gdje je $a_0 = 15,71$, $a_1 = 5,19$, SSI indeks strukturne čvrstoće, l_d je otklon konstrukcije kolnika (mm), a l_0 je izmjereno odstupanje kolnika (mm).

f) Drugi utjecajni čimbenici

Osim toga, mnogi drugi čimbenici, kao što su kvaliteta gradnje, drenaža kolnika i razine održavanja, izravno ili neizravno utječu na razvoj performansi kolnika. Ipak, ti se čimbenici neizravno odražavaju na performanse kolnika. Analiza tih čimbenika pojedinačno je složena. U ovom radu ti se čimbenici nisu razmatrali odvojeno kao utjecajni čimbenici u odlukama o održavanju kolnika.

Ukratko, materijal kolničke konstrukcije, starost kolnika, prometno opterećenje, *PQI* i *PSSI* jest onih pet čimbenika koji su odabrani kao utjecajni čimbenici.

3. Uspostava optimizacijskog modela odlučivanja o kolniku autoceste

Rezultati su dobiveni na temelju metode sortiranja parametara vezanih uz izvedbu kolnika. Obično, što je veće odstupanje na kolniku, pogoršanja su progresivnija, a postoji povećana potreba za prioritetnim održavanjem [23]. Međutim, to nije bilo potpuno u skladu sa stvarnim radovima održavanja. Potrebno je u potpunosti razmotriti zajedničko djelovanje starosti kolnika i prometnog opterećenja, osobito u uvjetima ograničenih sredstava za održavanje. Političari bi trebali maksimizirati naša ograničena ulaganja i ne nužno najprije popraviti najgore ceste. U ovom radu dijelovi autoceste razvrstani su metodom sivih relacija, a dobiveni su dijelovi koji su zahtijevali najviše održavanja. Nakon toga provedena je analiza troškova i koristi kako bi se utvrdilo vrijeme održavanja kolnika.

3.1. Siva relacijska analiza (GRA)

Siva relacijska analiza (engl. *Grey Relational Analysis* - GRA) multifaktorska je statistička metoda analize. Na temelju podataka uzorka za svaki čimbenik, intenzitet, veličina i redoslijed svakog čimbenika opisani su stupnjem sive povezanosti [24]. Svrha je GRA-e otkriti razinu odnosa između različitih čimbenika. Konačno, usporedne sekvence su poredane prema stupnju korelacije. Cilj sveobuhvatne evaluacije može se smatrati i vrijednostima indeksa koje odgovaraju svakom

ocijenjenom objektu, a te vrijednosti indeksa često treba razvrstati. Redoslijed usporedbe sastojao se od vrijednosti indeksa ocijenjenih parametara [25–27].

U ovom istraživanju odabrani utjecajni čimbenici analizirani su metodom sivih relacija, a izvorni podaci su napravljeni bez dimenzija pomoću normalizacije raspona. Nakon sortiranja stupnja korelacije, normalizirana je korelacijska matrica, te je dobivena težina svakog utjecajnog čimbenika. Budući da su dimenzije svakog utjecajnog čimbenika bile različite, utjecajni čimbenik s velikim dimenzijama postaje glavni ili čak jedini utjecajni čimbenik ako se težina izravno pomnoži s podacima utjecajnog čimbenika. Stoga je konačni rezultat izračunan množenjem težina s nedimenzijskim matricama.

a) Cilj istraživanja za GRA

Stupac referentni podaci standardni je stupac podataka u metodi sive relacijske analize [28, 29] i označen je kao X_0 . Neka se prva vrijednost indikatora označava kao $X_0(1)$, druga vrijednost indikatora kao $X_0(2)$ i vrijednost k th indikatora kao $X_0(k)$. Drugim riječima, može se koristiti izraz (6):

$$X_0 = \{X_0(i) \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (6)$$

b) Bezdimenzijske varijable

Općenito, izvorni slijed varijabli ima različite dimenzije ili redoslijed veličine. Kako bi se osigurala pouzdanost rezultata analize, bio je potreban bezdimenzijski slijed varijabli. Nakon uvođenja bezdimenzijskih varijabli, oblikovana je slijedeće matrica:

$$(X_0, X_1, \dots, X_n) = \begin{pmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \dots & x_n(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \dots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(N) & x_1(N) & \dots & x_n(N) \end{pmatrix}_{N \times (n+1)} \quad (7)$$

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k) - x'_{i,\min}}{x'_{i,\max} - x'_{i,\min}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

gdje $x'_i(k)$ je k -ata izvorna podatkovna točka indeksa i , $x'_{i,\max}$ i $x'_{i,\min}$ su maksimalne i minimalne vrijednosti indeksa i .

c) Redoslijed razlika, maksimalne i minimalne razlike

Apsolutna razlika između prvog stupca (referentni niz) i ostalih stupaca (usporedni niz) u odgovarajućem razdoblju tvori sljedeću matricu apsolutne razlike:

$$D_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

Maksimalne i minimalne vrijednosti u matrici apsolutne razlike predstavljaju maksimalne i minimalne razlike.

$$\max \left\{ \Delta_{oi}(k) \right\} = \Delta(\max) \quad (10)$$

$$\min \left\{ \Delta_{oi}(k) \right\}^{\Delta} = \Delta(\min) \quad (11)$$

$1 \leq i \leq n$
 $1 \leq k \leq N$

d) Koeficijent korelacije

Kada je analiziran stupanj povezanosti referentnih i usporednih podatkovnih stupaca, najprije je analiziran stupanj povezanosti svakog pokazatelja, što je prikazano konceptom koeficijenta asocijacije. Jednadžbe koje se koriste za izračune su,

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta \min + \lambda \Delta \max}{\Delta_i(k) + \lambda \Delta \max} \quad (12)$$

$$\Delta_i(k) = |X_i(k) - X_0(k)| \quad (13)$$

$$\Delta_i(k) = |X_i(k) - X_0(k)| \quad (14)$$

$$\Delta \min = \min_i \min_k |X_i(k) - X_0(k)| \quad (15)$$

$$\Delta \max = \max_i \max_k |X_i(k) - X_0(k)| \quad (16)$$

gdje je $\eta_i(k)$ koeficijent korelacije indeksa k između X_i i X_0 , a λ je koeficijent rezolucije (obično u rasponu od 0 do 1). U ovom istraživanju, $\lambda = 0,5$.

e) Računski redoslijed udruživanja

Za svaki evaluacijski parametar (slijed usporedbe) izračunane su srednje vrijednosti koeficijenta korelacije svakog pokazatelja i pripadajućih elemenata referentnog niza kako bi se odrazila korelacija između svakog evaluacijskog objekta i referentnog slijeda, koji se naziva korelacijski slijed, te je označen kao

$$r_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_k \eta_i(k) \quad (17)$$

Svaki pokazatelj ima različitu ulogu u sveobuhvatnoj evaluaciji, a ponderirana prosječna vrijednost koeficijenta korelacije može se izračunati na sljedeći način,

$$r'_{ki} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_k \eta_i(k) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

3.2. Poboljšanje sive relacijske analize

Općenito, prilikom provođenja sive relacijske analize, metoda entropije težine i analitički hijerarhijski proces koriste se za dodjelu pondera svakom indeksu prema izvornim podacima. Bilo je previše umjetnih čimbenika u rezultatima izračunanim pomoću tih metoda koji su bili prilično različiti od stvarne situacije.

U ovom radu korišteni su podaci o korelacijskom redoslijedu dobiveni analizom sivih korelacija za normalizaciju indeksne težine. Tijesna povezanost između pokazatelja odražava važnost svakog pokazatelja, a izračunana težina je konzistentnija sa stvarnom situacijom.

a) Izračun težine

Normalizirana prema dobivenom korelacijskom redoslijedu, težina svakog pokazatelja dobivena je kako slijedi:

$$w_i = \frac{r'_{ki}}{\sum_{k=1}^m r'_{ki}} \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

gdje je težina $W = [w_0, w_1, \dots, w_n]$ za svaki indeks.

b) Procjena rezultata objekta

Prema težini W i nedimenzijskoj matrici dobivenoj u drugom koraku, rezultat svakog objekta ocjenjivanja dobiven je množenjem, kao što je prikazano u *jednadžbi 20*. Rezultati predmeta su zatim razvrstani.

$$Y = X * W^T = \begin{pmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \dots & x_n(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \dots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(N) & x_1(N) & \dots & x_n(N) \end{pmatrix}_{N \times (n+1)} \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.3. Analiza troškova i koristi

Nakon analize prioriteta održavanja svakog dijela ceste, analiziran je i cestovni dio najvećeg prioriteta, te je dobiveno optimalno vrijeme održavanja za ciljnu dionicu ceste. Kada se vrijeme održavanja kolnika određuje metodom troškova i koristi, prednost održavanja izražava se kao područje zatvoreno krivuljom performansi kolnika. Područje obuhvaćeno krivuljom opadanja performansi kolnika i baznom linijom prednosti gore-dolje naziva se zona eksponencijalne koristi. Nakon donošenja mjera održavanja, povećanje u području koristi naziva se područje koristi održavanja.

a) Najniža prihvatljiva razina indeksa performansi kolnika

Minimalni prihvatljivi pokazatelji performansi za mjera održavanja bili su ograničenja za pokazatelje performansi stanja kolnika u izračunu područja koristi. Minimalna prihvatljiva razina podijeljena je na gornje i donje granice prema trendovima propadanja indeksa performansi kolnika. Kada se indeks performansi kolnika smanjuje sa starošću vozila, minimalna prihvatljiva razina je donja granica. Minimalna prihvatljiva razina je gornja granica na kojoj se indeks performansi kolnika povećava s godinama. Bilo koji dio izračuna koristi koji premašuje minimalni prihvatljivi pokazatelj uspješnosti ne smatra se korisnim. U ovom projektu primjenjeni su indeksi oštećenja kolnika *PCI* i *RDI* kao indeksi proračuna koristi. Stoga je minimalna prihvatljiva razina bila donja vrijednost izračuna koristi, odnosno 80.

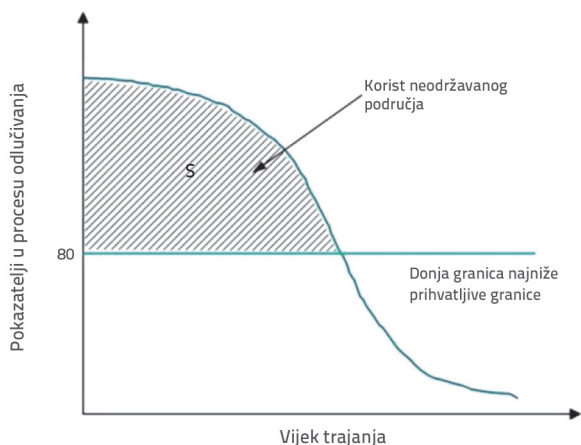
b) Izračun koristi održavanja

Nakon donošenja mjera održavanja, povećanje u području koristi naziva se područje koristi održavanja. Područje *S*, prikazano na slikama 1. i 2. je korist korištenja kolnika.

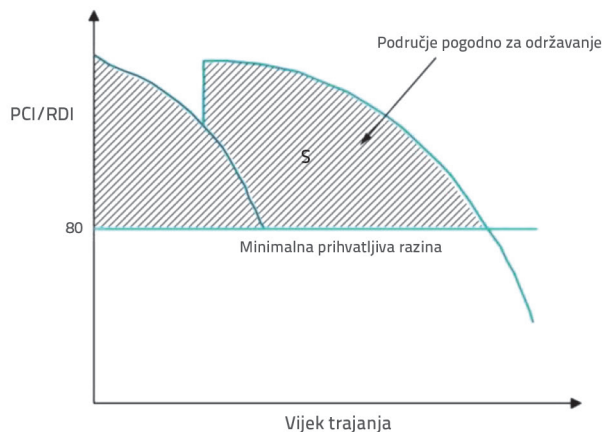
Sveobuhvatna korist održavanja izračunata je pomoću izraza (21).

$$S = K_1 S_{PCI} + K_2 S_{RDI} \tag{21}$$

gdje $K_1 = 0,6$ i $K_2 = 0,4$.



Slika 1. Korist neodržavanog područja



Slika 2. Područje održavanja

c) Određivanje vremena održavanja

Troškovi održavanja kolnika uključuju sadašnju vrijednost troškova održavanja kolnika i preostalu vrijednost cesta. Sadašnja vrijednost troškova uključuje troškove za vlasnika i

korisnika. Sadašnja vrijednost troškova izračunana je pomoću izraza (22).

$$PWC = \frac{C}{(1+i)^n} \tag{22}$$

gdje je PWC sadašnja vrijednost troškova i izdataka, C je trošak, i je diskontna stopa, a n je razdoblje izračuna. Rezidualna vrijednost kolnika udio je preostalog vijeka u njegovom vijeku trajanja, a preostala vrijednost kolnika izračunava se prema izrazu (23):

$$SV = (1 - \frac{L_A}{L_E}) C_r \tag{23}$$

gdje L_A predstavlja vrijeme od posljednje godine održavanja do kraja životnog ciklusa, L_E je vijek trajanja mjera održavanja, a C_r je trošak mjera očuvanja. Troškovi održavanja odnose se na izravne troškove održavanja kolnika i sastoje se od materijalnih i radnih troškova potrebnih za provedbu mjera održavanja. U skladu s omjerom troškova i koristi različitih shema očuvanja, kao najbolje vrijeme očuvanja utvrđena je shema vremena očuvanja s najvećim omjerom troškova i koristi.

4. Primjena modela

U održavanju kolnika prednost za održavanje i popravak imaju kolnici sa strukturnim oštećenjima. Za pravilno korištenje sredstava za održavanje i poboljšanje najbolje iskoristivosti površine ceste primijenjena je metoda sive relacijske razine za rangiranje prioriteta održavanja kolnika. Za analizu su korišteni podaci s autocesta. Izvorni podaci navedeni su u tablici 1. Pretpostavimo da je {starost kolnika, prometno opterećenje, PQI, PSME, PSSI} = X_i . Budući da izvorni slijed podataka ima različite dimenzije, potrebno je uvesti bezdimenzijske varijable u sustav. Može se vidjeti iz tablice da kako se kvaliteta kolnika pogoršava kako se indeks procjene kolnika smanjuje. Ovaj indeks treba razmotriti prije donošenja odluka o procjeni kolnika. Specifični proces postavljen je na 100, maksimalna vrijednost PQI, PSME i PSSI; naknadno, vrijednost od 100 te minus ove tri stavke korištena je prije uvođenja bezdimenzijskih varijabli u postupak. To je bilo zato što je bilo potrebno manje opsežnog održavanja kada su se povećale vrijednosti PQI-ja, PSME-a i

Tablica 1. Sirovi podaci o različitim čimbenicima utjecaja na različitim dionicama cesta

Cesta	Starost kolnika [godina]	Prometno opterećenje	Indeks kvalitete održavanja kolnika (PQI)	Indeks matrijala kolničke konstrukcije (PSME)	Indeks čvrstoće kolničke konstrukcije (PSSI)
A	12	7541	81,90	80,48	95,15
B	14	7456	80,10	76,18	91,45
C	15	12423	73,80	66,29	89,69
D	8	4536	84,60	78,55	97,02
E	13	5351	82,35	68,02	94,34

Tablica 2. Matrica incidencije

Matrica incidencije	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X1	1,00	0,6670	0,6547	0,6092	0,7434
X2	0,7003	1,00	0,8854	0,6859	0,7699
X3	0,6681	0,8716	1,00	0,6726	0,8318
X4	0,6516	0,6859	0,6974	1,00	0,6464
X5	0,7192	0,7123	0,8055	0,5693	1,00

Tablica 3. Rezultati završnih ocjena

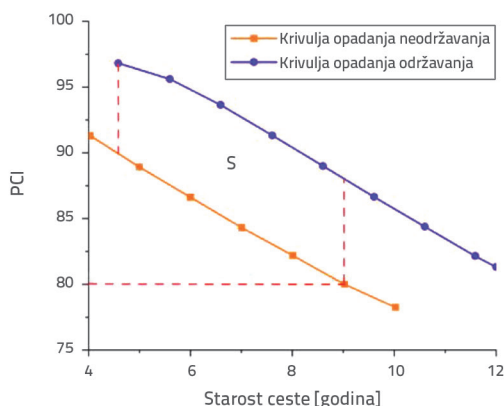
Rangiranje	Cesta	Starost kolnika [godina]	Prometno opterećenje	PQI	PSME	PSSI	Konačni rezultat
1	C	15	12.423	73,80	66,29	89,69	1,000
2	B	14	7.456	80,10	76,18	91,45	0,543
3	E	13	5.351	82,35	68,02	79,34	0,441
4	A	12	7.541	81,90	80,48	95,15	0,294
5	D	8	4.536	84,60	78,55	97,02	0,025

PSSI-ja. Ako bi se postupak analize provodio s bezdimenzijskim varijablama, rezultat bi dao prioritet održavanju kolnika s visokim vrijednostima tih triju indeksa. Rezultat uvođenja bezdimenzijskih varijabli u model prikazan je pomoću izraza (24).

$$X^* = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.38 & 0.25 & 0.00 & 0.26 \\ 0.86 & 0.37 & 0.42 & 0.30 & 0.76 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.14 & 0.00 \\ 0.71 & 0.10 & 0.21 & 0.88 & 0.37 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Matrica incidencije (teorija grafova) dobivena nakon analize podataka prikazana je u tablici 2. Nakon izračuna, težina svakog pokazatelja dobivena je na sljedeći način:

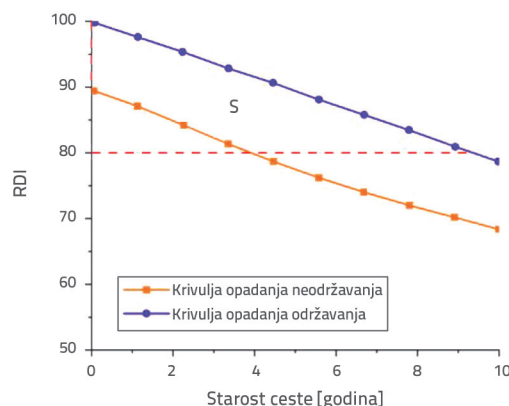
$$W = [0,194 \quad 0,205 \quad 0,210 \quad 0,184 \quad 0,207] \quad (25)$$



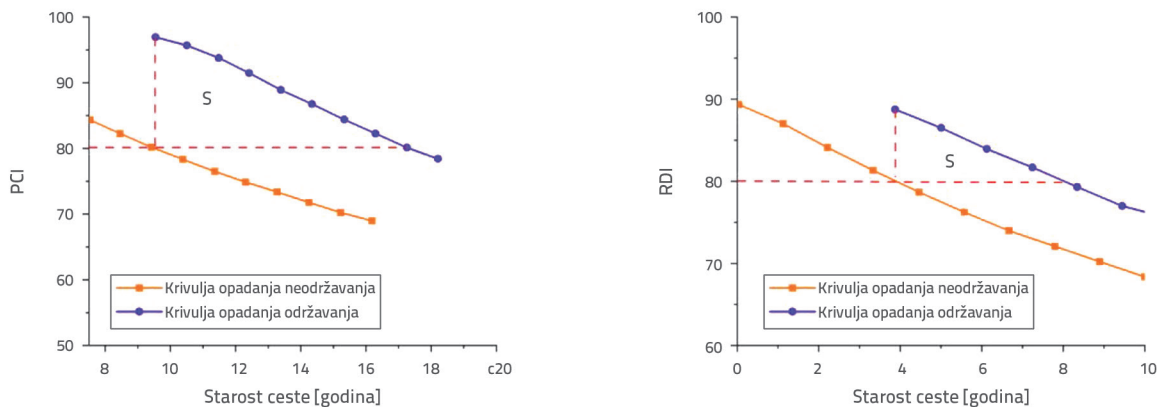
Konačni rezultat dobiven je množenjem svakog utjecajnog čimbenika s pripadajućim ponderom. Rezultati sortiranja navedeni su u tablici 3.

Kao što je prikazano u tablici 3., nakon sortiranja prema stupnju sive korelacije, cesta s najvećim rezultatom dobila je prioritet održavanja. Može se primijetiti da bi dionica C trebala biti prioritet za održavanje u područjima koja se ispituju. Iako indeks performansi kolnika još uvijek ima značajan utjecaj na donošenje odluka, više nije jedinstveni indeks procjene. Starost kolnika i prometno opterećenje također su imali ulogu u konačnom rezultatu.

Kao što je navedeno, dionici C treba dati prioritet održavanja, a optimalno vrijeme održavanja za dionicu C može se odrediti pomoću CBA. Na temelju prediktivnog modela krivulje Ma Weizhonga [30], model prigušenja preventivnog održavanja, srednjeg održavanja i remonta uspostavljen je upućivanjem na krivulju modela predviđanja. Odgovarajuće krivulje modela prikazane su na slikama 3. i 4. Područje u obliku slova S u



Slika 3. Shema izračuna koristi za PCI i RDI preventivno održavanje



Slika 4. Shema izračuna koristi održavanja PCI i RDI za velike i srednje popravke

Tablica 4. Izračun koristi održavanja

Priroda inženjerstva održavanja	Učinkovitost održavanja PCI-ja (S_{PCI})	Učinkovitost održavanja RDI-ja (S_{RDI})	Sveobuhvatne koristi S ($S = K_1 S_{PCI} + K_2 S_{RDI}$)
Preventivno održavanje (S_1)	35,09	67,79	48,17
Srednji popravak (S_2)	71,73	7,51	46,04
Veliki popravak (S_3)	71,73	7,51	46,04

Tablica 5. Rezultati izračuna omjera troškova i koristi

Godine	Prva godina	Druga godina	Treća godina
Omjer troškova i koristi	0,39	0,37	0,56

zatvorenim područjima na slici odnosi se na svaku korist održavanja, te je područje u obliku slova S nakon održavanja zatvoreno krivuljom propadanja. Krivulje raspada PCI i RDI nisu održavane; najniža prihvatljiva razina je indeksna prijelazna linija prije i nakon održavanja u godini održavanja. Površina područja izračunata je korištenjem integrala površine krivulje. Rezultati izračuna za naknade za uzdržavanje u ovom odjeljku navedeni su u tablici 4.

Kao što je prikazano na slikama 1. i 2., približni troškovi održavanja (od sljedeće godine do iduće tri godine) izvedeni su na temelju indeksa stanja površine ceste u ovom odjeljku posljednjih godina i odgovarajućih troškova održavanja. Osim toga, izračunan je omjer troškova i učinkovitosti mjera održavanja u alternativnim godinama; to jest, jedinica za održavanje mogla je odrediti troškove održavanja u skladu s predloženim mjerama održavanja. Rezultati izračuna navedeni su u tablici 5. Omjer troškova i koristi odabrane dionice ceste uzimao je u obzir redoslijed drugi < prvi < treći. Stoga je najbolje vrijeme za očuvanje određeno analizom troškova i koristi, bilo u drugoj godini.

5. Zaključak

Kao predmet ovog istraživanja odabrani su podaci detekcije s dijela od pet brzih cesta u provinciji Jiangsu, Kina. Dostupni

podaci o stanju kolnika prije svega su služili za procjenu stanja kolnika i određivanje vremena održavanja. Sinergijski učinci ovih čimbenika na performanse asfaltnog kolnika istraženi su uspostavljanjem poboljšanog modela razvrstavanja sivih relacija i analize koristi i troškova. U stvarnim radovima održavanja kvaliteta kolnika često se procjenjuje pomoću fiksnih pokazatelja i pondera. Analiza rezultata evaluacije također je prioritet za održavanje cestovnih površina sa strukturnim oštećenjima. Kako bi se uspostavio razumniji sustav procjene i poboljšala najbolja iskoristivost kolnika, dionica ceste je analizirana metodom stupnja sivog odnosa. Rezultati su pokazali da što je rezultat veći, to je viši prioritet održavanja. Iz ovog istraživanja izvučeni su sljedeći zaključci:

- Prometno opterećenje, starost kolnika i tehnički uvjeti kolnika odabrani su kao glavni utjecajni čimbenici. Kako bi se otkrila snaga odnosa između različitih čimbenika, provedena je analiza sivih relacija. Metoda sortiranja sivih relacija sveobuhvatno razmatra prostorni utjecaj cijelog indeksa čimbenika, posebno kada je veličina uzorka indeksa čimbenika mala i podaci su diskretni, čime bi se moglo izbjeći odstupanje u jednom smjeru i sveobuhvatno analizirao međusobni odnos između pokazatelja i odražavanja utjecaja cjelokupnog prostora indeksa čimbenika. Utvrđeno je da su rezultati rangiranja dobiveni ovim modelom bili konzistentniji sa stvarnom situacijom, a model je, također pružio razumnu

- osnovu za donositelje odluka. Osim toga, računalni napor znatno je smanjen.
- Performanse kolnika i vanjsko okruženje stalno se mijenjaju. Stoga nije znanstveno koristiti stalne indekse i pondere u procesu evaluacije. Prednost sivog modela sortiranja (koji se temelji na svojoj relacijskoj analizi) jest ta da se pokazatelji mogu odabrati prema stvarnoj situaciji, a ponderi se zatim mogu dodijeliti na temelju blizine odnosa između pokazatelja. Rezultati analize pokazali su da je težina dobivena ovom metodom fleksibilnija i usmjerena na cestovne površine pod različitim uvjetima.
 - Optimalno vrijeme održavanja asfaltnih kolnika autocesta određeno je metodom analize troškova i koristi. Ta je metoda primijenjena za analizu prediktivnog modela performansi za asfaltna kolnika i na taj način dobiveno je najbolje vrijeme održavanja. Donositelji odluka mogu analizirati kolnik za predodržavanje prema najboljem vremenu održavanja i proračunu prilikom donošenja odluka, te poduzeti određene mjere održavanja u kombinaciji s različitim čimbenicima kao što su proračunska ograničenja. Ova metoda omogućila je funkciju usmjeravanja.

LITERATURA

- [1] Alhasan, A., Ali, A., Offenbacher, D., et al.: Incorporating spatial variability of pavement foundation layers stiffness in reliability-based mechanistic-empirical pavement performance prediction, *Transportation Geotechnics*, 71 (2018), pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.001>
- [2] Yang, Y.H., Jiang, Y.H., Wang, X.C.: Pavement performance prediction methods and maintenance cost based on the structure load, *Procedia Engineering*, 137 (2016), pp. 41–48, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.232>
- [3] Pan, N.F., Ko, C.H., Yang, M.D., et al.: Pavement performance prediction through fuzzy regression, *Expert Systems with Applications*, 38 (2011) 8, pp. 10010–10017, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.007>
- [4] Pan, Y.Y., Shang, Y., Liu, G., et al.: Cost-effectiveness evaluation of pavement maintenance treatments using multiple regression and life-cycle cost analysis, *Construction and Building Materials*, 292 (2021), pp. 123461, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123461>
- [5] Roberts, C.A., Attoh-Okine, N.O.: A comparative analysis of two artificial neural networks using pavement performance prediction, *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13 (1998) 5, pp. 339–348, <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00112>
- [6] Deng, J.L.: Gray control system. *Journal Huazhong Central China University of Science and Technology*, 10 (1982) 3 pp. 9–18.
- [7] Zeng, F.: Study of decision method and technical application of asphalt pavement preventive maintenance. PhD thesis. Harbin Institute of Technology, China, (2009), <https://doi.org/10.7666/d.D257950>
- [8] Cao, W., Chen, C.: Preventive maintenance decision method based on the theory of multiple attributes *Journal of Transport Science and Engineering* 31 (2015) 4, pp. 71–76, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-599X.2015.04.013>
- [9] Chen, N.T., Sun, Y.C., Wang, Z.P., et al.: Identification of flight accident causative factors based on SHELLO and improved entropy grey correlation method, *Heliyon*, 9 (2023) 2, pp. e13534, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13534>
- [10] Zhang, Z.Q., Dong, R., Tan, D.L., et al.: Effect of structural parameters on diesel particulate filter trapping performance of heavy-duty diesel engines based on grey correlation analysis. *Energy*, 271 (2023), pp. 127025, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127025>
- [11] Wang, Z.K., Bouri, E., Ferreira, et al.: A grey-based correlation with multi-scale analysis: S&P 500 VIX and individual VIXs of large US company stocks. *Finance Research Letters*, 48 (2022), pp. 102872, <https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.102872>
- [12] Guo, R., Nian, T.: Analysis of factors influencing the anti-rutting performance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 254 (2020), 119237 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119237>
- [13] Yu, J.M., Zhang, X.N., Xiong, C.L.: A methodology for evaluating micro-surfacing treatment of asphalt pavement based on grey system models and grey rational degree theory. *Construction and Building Materials*, 150(2017), pp. 214–226, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.181>
- [14] Liu, Y.J., Hu, Y.G., Zhou, R., et al.: An approach based on improved grey model for predicting maintenance time of IPS2, *Procedia Cirp*, 47 (2016), pp. 204–209, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.047>
- [15] Gedik, A., Ozcan, O., Ozcanan, S.: Novel approaches and materials for healing asphalt cracks, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 9, pp. 907–917, <https://doi.org/10.14256/JCE.3721.2023>
- [16] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Investigation of use potential of fibre added concretes as road pavement on weak soils, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 7, pp. 665–678, <https://doi.org/10.14256/JCE.3619.2022>
- [17] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit–cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 23–37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>
- [18] Karadag, H., Fırat, S., Işık, N.S., Yılmaz, G.: Determination of permanent deformation of flexible pavements using finite element model, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 6, pp. 471–480, <https://doi.org/10.14256/JCE.2708.2019>
- [19] Liu, Y.Y., Shen, J.: Research on equipment predictive maintenance strategy based on big data technology, *Proceedings of the 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data, and Smart City*, 19–20 Dec. 2015, Halong Bay, Vietnam. 2015, pp. 641–644, <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2015.163>
- [20] Li, P.H., Yang, H.L., Sun, L.L., et al.: Application of gray prediction and time series model in spacecraft prognostic, *Computer Measurement & Control*, 19 (2011) 1, pp. 111–113, <https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2011.01.003>

- [21] Li, H.M.: Research on network-level decision-making of highway asphalt pavement maintenance based on matter-element model, Ph.D. thesis, Nanjing: Southeast University, China (2017), <https://doi.org/10.7666/d.Y3256217>
- [22] Chen, C.S.: Study on decay combination model of service performance of ordinary highway asphalt pavement. ME thesis. Guizhou University, China, (2021), <https://doi.org/10.27047/d.cnki.ggudu.2021.002932>
- [23] Yang, Y.H., Jin, M., Bai, Y., et al.: Study on optimisation of allocation method of highway maintenance fund, *Journal of China & Foreign Highway*, 35 (2015) 4, pp. 336–340, <https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2015.04.078>
- [24] Liu, Y.J., Yang, Y., Zhang, Y.S.: Optimisation method of hydraulic system reliability model based on improved grey relational degree, *Machine Tool & Hydraulics*, 46 (2018) 1, pp. 168–172, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3881.2018.01.035>
- [25] Acir, A., Canlı, M.E., Ata, İ., et al.: Parametric optimisation of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis, *Applied Thermal Engineering*, 122 (2017), pp. 330–338, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.018>
- [26] Liou, J.J., Hsu, C.C., Yeh, W.C., et al.: Using a modified grey relation method for improving airline service quality, *Tourism Management*, 32 (2011) 6, pp. 1381–1388, <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.01.013>
- [27] Fan, Y.B., Liu, C., Wang, J.B.: Prediction algorithm for springback of frame-rib parts in rubber forming process by incorporating Sobol within improved grey relation analysis *Journal of Materials Research and Technology*, 13 (2021), pp. 1955–1966, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.102>
- [28] Lv, H.L., Chen, X.Y., Wang, X.Y., et al.: A novel study on a micromixer with Cantor fractal obstacle through grey relational analysis, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183 (2022), pp. 122159, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122159>
- [29] Çinici, O.K., Canlı, M.E., Çakıroğlu, R., et al.: Optimisation of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis, *Journal of Energy Storage*, 47(2022), pp. 103671, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103671>
- [30] Ma, W.Z., Su, X.L., Zhang, X.J., et al.: Prediction of asphalt pavement performance of expressway in Hexi area of Gansu Province based on regression analysis, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 15 (2019) 2, pp. 12–15. <https://doi.org/10.33142/sca.v4i1.3559>