

MODELIRANJE PROPADANJA VERTIKALNE GEOMETRIJE KOLOSEKA

VERTICAL TRACK GEOMETRY DETERIORATION MODELLING



UDK: 625.173.08
Originalni naučni rad

Mr Leosava PUZAVAC, dipl. građ. inž.
Dr Zdenka POPOVIĆ, dipl. građ. inž.

REZIME

Kod koloseka u zastoru, propadanje geometrije je neizbežna pojava. Za uspešno predviđanje propadanja geometrije koloseka, neophodno je razumevanje kompleksnog mehanizma propadanja i opisivanje ovog mehanizma sa inženjerskim pristupom. Do sada su u svetu sprovedena mnogobrojna istraživanja na temu otkrivanja mehanizma propadanja i definisano je više različitih modela propadanja. U ovom radu su identifikovani uzroci propadanja, kao i svi parametri koji utiču na propadanje vertikalne geometrije koloseka. Dat je pregled jedanaest postojećih modela propadanja. Izvršene su klasifikacija i uporedna analiza postojećih modela. Definisani su kriterijumi za ocenu modela i analizirane su mogućnosti primene postojećih modela.

Ključne reči: železnica, kolosek u zastoru, propadanje geometrije, sleganje, modeli predviđanja, održavanje.

SUMMARY

Deterioration of the track geometry of ballasted tracks is unavoidable. In order to foresee the deterioration of the track, the phenomena have to be understood and described in an engineering way. Through the years a lot of research has been carried out and a lot of different models have been formulated. This paper contains the results of the analysis of the main causes and factors influencing the deterioration of the track. The literature survey resulted in description of 11 models for track geometry deterioration. The aims of this paper are to present a "state of the art" overview of existing track deterioration models and their properties, to classify the models, to make a comparative analysis of existing models, and to analyse possibilities of implementation of the models. Criteria for the evaluation of the models are defined.

Key words: railways, ballasted track, geometry deterioration, settlement, prediction models, track maintenance.

1. UVOD

Jedan od najbitnijih aspekata održavanja železničkih pruga predstavlja održavanje geometrije koloseka. Kvalitet geometrije koloseka osim što je ključni faktor koji određuje bezbednost i udobnost vožnje, utiče i na vek trajanja vozila i železničke pruge.

Svest o izuzetnom značaju poznavanja kvaliteta geometrije koloseka javila se sredinom XX veka, kada su u Evropi konstruisani prvi modeli mernih kola i postavljeni prvi standardi za ocenu geometrije. U početku se strategija održavanja geometrije koloseka zasnivala na principu korigovanja nakon što se merenjima utvrdi da greške u geometriji prevazilaze određene unapred ustanovljene vrednosti. Danas, za izbor optimalne strategije

je održavanja nije dovoljno samo merenje trenutnog kvaliteta parametara geometrije koloseka i utvrđivanje graničnih vrednosti za pojedine parametre, već je neophodno i poznavanje ponašanja parametara tokom vremena i uspostavljanje modela za predviđanje propadanja geometrije koloseka.

Geometrija koloseka se može podeliti na geometriju u vertikalnoj i geometriju u horizontalnoj ravni. Geometrija u vertikalnoj ravni se odnosi na odstupanja po profilu, nadvišenje i vitopernost koloseka, dok se geometrija u horizontalnoj ravni odnosi na širinu koloseka i odstupanja po pravcu. Navedeni pojmovi definisani su u [7, 8, 30, 36]. Predmet ovog rada je modeliranje propadanja vertikalne geometrije koloseka.

Do sada su u svetu sprovedena mnogobrojna istraživanja na temu otkrivanja mehanizama propadanja geometrije koloseka i uspostavljanja matematičke zavisnosti stanja koloseka od jedne, ili više promenljivih koje utiču na propadanje. U radu je dat pregled rezultata dosada-

Adresa autora: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 11000
Beograd Bulevar kralja Aleksandra 73
E-mail: leposava@grf.bg.ac.rs
E-mail: zdenka@grf.bg.ac.rs

šnjih istraživanja, kao i uporedna analiza postojećih modela propadanja vertikalne geometrije koloseka.

2. MEHANIZAM PROPADANJA VERTIKALNE GEOMETRIJE KOLOSEKA

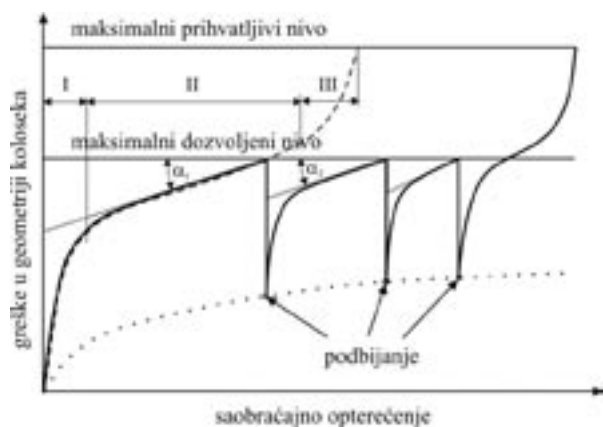
2.1. Tok propadanja geometrije koloseka

Tok propadanja geometrije koloseka šematski je prikazan na slici 1. Isprekidanom linijom predstavljen je tok propadanja geometrije koloseka u slučaju kada se ne sprovode radovi na održavanju. Mogu se uočiti tri faze [6]:

1. Faza I se odnosi na period neposredno nakon građenja, rekonstrukcije ili završetka radova na sanaciji. Karakteriše je brzo i izraženo propadanje geometrije izazvano inicijalnim sleganjem koloseka. Ovaj period se može znatno razlikovati od deonice do deonice. Veoma ga je teško modelirati i merenja geometrije vršena u ovom periodu se obično isključuju iz analize (puna siva linija). Trajanje ovog perioda je relativno kratko, što umanjuje posledice njegovog zanemarivanja.

2. U fazi II dolazi do stabilizacije i kolosek ima manje ili više linerano propadanje. Takvo ponašanje traje najduže i to je upravo period koji se najviše istražuje i na koga se odnosi većina postojećih modela propadanja geometrije koloseka.

3. Faza III se odnosi na period na kraju veka trajanja koloseka. Odlikuje se brzim, eksponencijalnim propadanjem geometrije. Ovo je faza koju ne bi trebalo dopustiti, jer može da ugrozi bezbednost saobraćaja. Zato se u prethodnoj fazi, pri dostizanju maksimalnog dozvoljenog nivoa, vrši korigovanje geometrije koloseka podbijanjem.



Slika 1. Tok propadanja geometrije koloseka [6]

Nakon dostizanja maksimalnog dozvoljenog nivoa gresaka u geometriji (granica komfora na prugama za putnički ili mešoviti saobraćaj) vrši se podbijanje i dolazi do poboljšanja kvaliteta geometrije koloseka. Nakon toga, proces propadanja geometrije koloseka ponovo počinje. Novi tok propadanja se uvek razlikuje od prethodnog. Efikasnost podbijanja opada (tačkasta kriva na slici 1), a menja se i brzina propadanja. Brzina propadanja predstavlja zapravo nagib krive propadanja (uglovi α_1 i

α_2 na slici 1, $\alpha_1 < \alpha_2$). Obe ove pojave dovode do promene potrebne učestalosti podbijanja, odnosno do skraćivanja perioda između dva uzastopna podbijanja. Konačno, učestalost podbijanja postaje tolika da dalje podbijanje nema smisla i neophodna je primena neke druge mere održavanja, kao na primer čišćenje, ili zamena zastora.

2.2. Parametri koji utiču na propadanje vertikalne geometrije koloseka

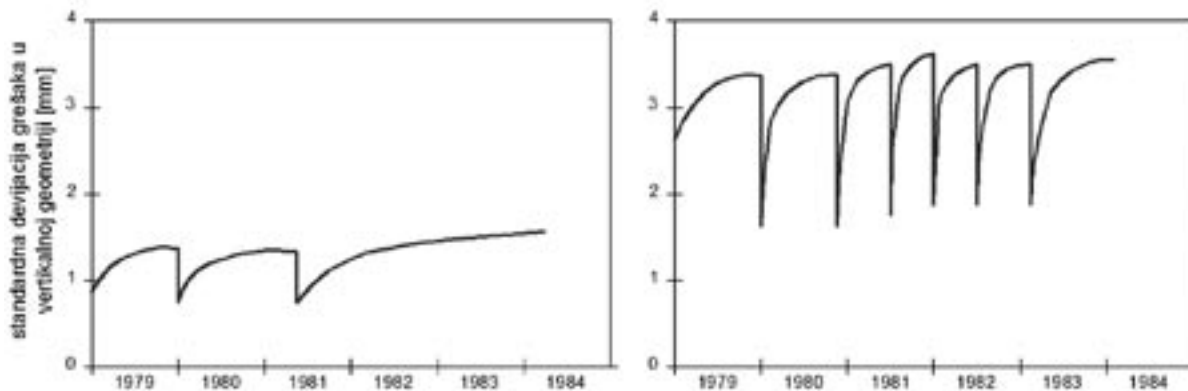
U magistarskoj tezi „Modeliranje propadanja geometrije koloseka“ su identifikovani sledeći parametri koju utiču na propadanje vertikalne geometrije koloseka:

1. Početni kvalitet geometrije koloseka;
 2. Parametri koloseka i kolosečne podloge:
 - tip šine,
 - karakteristike pričvrstnog pribora,
 - vrsta i dimenzije praga, osovinski razmak praga,
 - karakteristike zastornog materijala,
 - dimenzije, oblik i zbijenost tucaničke zastorne prizme,
 - kvalitet konstrukcije donjeg stroja (nosivost, stabilnost i kvalitet odvodnjavanja zemljanog trupa);
 3. Parametri vezani za eksploataciju:
 - osovinsko opterećenje od vozila,
 - godišnje saobraćajno opterećenje,
 - brzine vozila,
 - karakteristike vozila (odnos ogibljene i neogibljene mase, krutost i prigušenje),
 - struktura voznog parka;
 4. Faktori vezani za održavanje:
 - strategija i tehnologija održavanja;
 5. Klimatski faktori:
 - količina padavina,
 - temperatura,
 - ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja.
- Zaključeno je da su najznačajniji uzročnici propadanja vertikalne geometrije koloseka sledeći:
- nejednako dinamičko opterećenje duž koloseka,
 - neravnine površi glave šine u zoni dodira točak-šina, i
 - neadekvatna i neravnomerna krutost koloseka i kolosečne podloge.

Ovi uzročnici su u najvećoj meri posledica neadekvatnog početnog kvaliteta geometrije koloseka i kvaliteta kolosečne podloge, kao i međusobne neusklađenosti krutosti elemenata konstrukcije gornjeg i donjeg stroja pruge i neoptimalne krutosti šinskog oslonca.

Kvalitet geometrije koloseka tokom čitavog veka trajanja direktno zavisi od početnog kvaliteta geometrije nakon polaganja koloseka [19,20,27,33,37]. Početni kvalitet je uslovljen tehnologijom građenja i strategijom i tehnologijom brušenja šina. Početni kvalitet se ne može poboljšati kasnijim merama održavanja. Naprotiv, on određuje inherentni kvalitet geometrije koloseka [33] (slika 2).

Krutost šinskog oslonca je jedan od najznačajnijih i još uvek nedovoljno istraženih parametara koji utiču na



Slika 2. Intervali podbijanja kao funkcija inherentnog kvaliteta koloseka [33]

propadanje geometrije tokom čitavog veka trajanja koloseka [2,14,21,22,24,25,31,34]. U [30] je detaljno analiziran uticaj vrednosti ovog parametra na propadanje. Ukazano je na potrebu za izborom optimalne vrednosti krutosti svakog pojedinačnog elementa konstrukcije gornjeg i donjeg stroja, optimalne vrednosti ukupne krutosti, kao i međusobnog usklađivanja svih pojedinačnih krutosti.

Osnovni izvor propadanja vertikalne geometrije koloseka je tucanički zastor [27,33]. Iz tog razloga se većina postojećih modela bavi modeliranjem sleganja zastorne prizme. Osim kod novih pruga, sleganje slojeva donjeg stroja, usled dugotrajne izloženosti saobraćajnom opterećenju, odvija se veoma sporo. Dakle, po završetku konsolidacije zemljanog trupa, donji stroj ne bi trebalo da utiče na propadanje geometrije koloseka. Ipak, da bi tucanički zastor zaista bio osnovni izvor propadanja, neophodno je zadovoljiti sledeće uslove [18,35]:

- postojanje filterskog sloja između zastora i planuma,
- dovoljna nosivost slojeva donjeg stroja,
- ravnomerna i optimalna krutost planuma, i
- efikasno odvodnjavanje zemljanog trupa.

3. MODELI PROPADANJA VERTIKALNE GEOMETRIJE KOLOSEKA

3.1. Klasifikacija modela propadanja vertikalne geometrije koloseka

Propadanje vertikalne geometrije koloseka je posledica neravnomernih sleganja duž koloseka. Neophodno je razlikovati dve vrste sleganja koloseka: srednje i diferencijalno sleganje. Pri analiziranju mehanizma i modeliranju propadanja geometrije koloseka nije dovoljno poznavanje srednjeg sleganja, koje zapravo predstavlja prosečnu vrednost sleganja na određenoj deonici. Usled nehomogenosti opterećenja i nehomogenosti koloseka i kolosečne podloge, sleganje duž koloseka je neravnomerno. Upravo ta neravnomernost nepovoljno utiče na kvalitet geometrije koloseka i zato se uvodi pojam diferencijalnog sleganja [9,13,15,27].

U [30] je izvršena klasifikacija modela propadanja vertikalne geometrije koloseka, prema tipu izlazne veličine. Modeli su podeljeni na sledeće tipove:

- TIP A – modeli za predviđanje sleganja koloseka, koji se dalje dele na:
 - TIP A1 – modeli prosečnog sleganja, na deonici određene dužine,
 - TIP A2 – modeli diferencijalnog sleganja,
 - TIP B – modeli propadanja kvaliteta vertikalne geometrije koloseka, čije su izlazne veličine bezdimenzione.

3.2. Modeli prosečnog sleganja

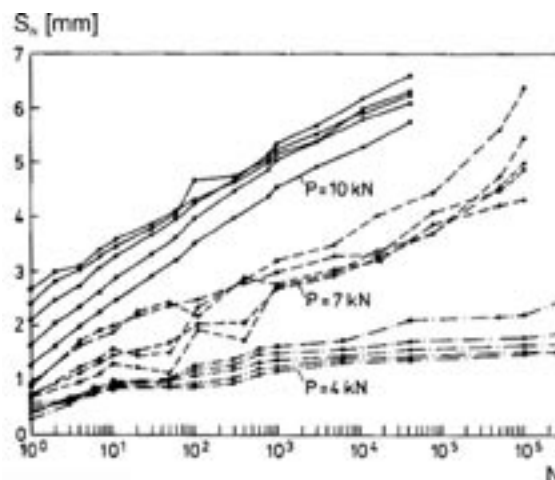
3.2.1. Model Hettler-a

Na Institutu za mehaniku tla i mehaniku stena na Univerzitetu Karlsruhe Hettler je 1984. godine istraživao trajna sleganja koloseka u zastoru, na modelu u smanjenoj razmeri (1:3) [12]. Na slici 3 prikazana su izmerena sleganja koloseka pri različitim osovinskim opterećenjima. Na osnovu dobijenih rezultata, Hettler je predložio sledeću jednačinu:

$$S_N = S_1 (1 + K_H \ln N) \quad (1)$$

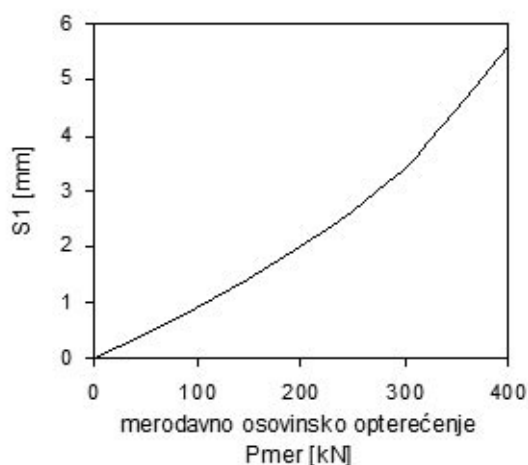
gde su:

S_N – trajno sleganje nakon N ciklusa opterećenja (mm),
 S_1 – sleganje nakon prvog ciklusa opterećenja (mm), i
 K_H – koeficijent (0.25-0.55, preporučuje se 0.43) (-).



Slika 3. Sleganja koloseka usled različitih osovinskih opterećenja [12]

Na osnovu merenja u modelu, utvrđena je zavisnost između početnog sleganja i opterećenja u stvarnom koloseku, prikazana na dijagramu na slici 4.



Slika 4. Zavisnost sleganja nakon prvog ciklusa od osovinskog opterećenja [12]

Merodavno osovinsko opterećenje u stvarnom koloseku se sračunava na osnovu ekvivalentnog statičkog osovinskog opterećenja i uticajnog faktora. Ovaj faktor zavisi od brzine vozila i njime se uzima u obzir uticaj dinamičkog opterećenja.

$$P_{mer} = K_v \cdot P_{ekv} \quad (2)$$

gde su:

P_{mer} – merodavno osovinsko opterećenje (kN),
 K_v – uticajni faktor dinamičkog opterećenja (-), i
 P_{ekv} – ekvivalentno statičko osovinsko opterećenje (kN).

Ekvivalentno statičko osovinsko opterećenje (P_{ekv}) Hettler definiše kao srednju vrednost različitih vrednosti statičkih osovinskih opterećenja ($P_{st,i}$):

$$P_{ekv} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{st,i} \quad (3)$$

3.2.2. Model Sato-a

1997. godine Sato predlaže dva modela sleganja koloseka [3,4,26]. Prvi model (jednačina 4a) pretpostavlja da postoji određena granična vrednost pritiska praga na zastor ispod koje ne dolazi do sleganja, dok prema drugom modelu (jednačina 4b) sleganje postoji za svaki nivo pritiska:

$$S_1 = \begin{cases} a_s (p_b - p_{b,gr})^w & \text{za } p_b > p_{b,gr} \\ 0 & \text{za } p_b \leq p_{b,gr} \end{cases} \quad (4a)$$

$$S_2 = \alpha_s p_b^w \quad (4b)$$

gde su:

S_1, S_2 – sleganje koloseka (mm/ciklusu opterećenja),
 a_s, α_s – koeficijenti sleganja,
 p_b – pritisak na kontaktu prag-zastor (Pa),
 $p_{b,gr}$ – granična vrednost pritiska praga na zastor (Pa),
 i – eksponent.

Vršena su istraživanja za vrednosti eksponenta do $w=4$ i došlo se do zaključka da je čak i ta vrednost niska. Sato je prilagođavao svoj model izmerenim vrednostima sleganja i došao je do sledećih jednakosti (slika 5a):

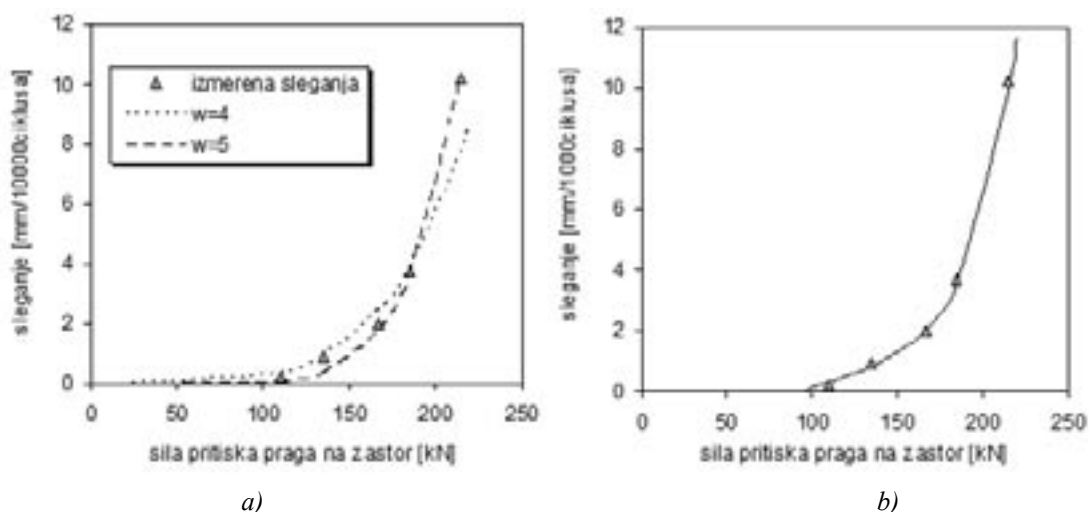
$$S = 5.87 \cdot 10^{-9} (P_b - 25)^4 \quad (5a)$$

i

$$S = 9.43 \cdot 10^{-11} (P_b - 54)^4 \quad (5b)$$

gde je: P_b – sila pritiska praga na zastor ($R_b = p_b \times$ oslonička površina praga) (kN).

Uočava se da, za više vrednosti sile pritiska, polinom petog stepena bolje odgovara izmerenim sleganjima.



Slika 5. Poređenje izmerenih sleganja sa : a) dva polinoma, četvrtog i petog stepena, (jednačine 5a i 5b); b) krivom koja sadrži linearan član i polinom petog stepena, (jednačina 6) [3]

Radi daljeg prilagođavanja izmerenim sleganjima pri nižim vrednostima sile na kontaktu praga i zastora, dodaje se linearni član i povećava vrednost granične sile pritiska (slika 5b):

$$S = 0.02 (P_b - 95) + 3 \cdot 10^{-10} (P_b - 95)^5 \quad (6)$$

Na slici 5b) uočavaju se tri područja. Pritisak koji je manji od granične vrednosti izaziva samo elastične ugi-be i ne dovodi do trajnih deformacija zastora, odnosno do sleganja. U slučaju pritiska koji su „nešto veći“ od granične vrednosti, postoji manje ili više linearna veza između pritiska i sleganja. Za veće vrednosti, dolazi do izrazito nelinearne zavisnosti. Ovo se može objasniti različitim mehanizmima propadanja zastora u različitim opsezima opterećenja. Pri nižim vrednostima opterećenja dolazi prvenstveno do preraspodele i abrazije zrna zastora, dok veća opterećenja izazivaju lomljenje zrna [30].

3.2.3. ORE D71 model

Istraživački timovi ORE (Biro za istraživanje i eksperimente Međunarodne železničke unije UIC) su 1970. godine u Velikoj Britaniji i Holandiji vršili laboratorijska i terenska istraživanja napona i deformacija elemenata konstrukcije gornjeg i donjeg stroja pruge pod cikličnim opterećenjem, u okviru ORE D71 [9,10,13,33]. Na osnovu rezultata laboratorijskih triaksijalnih opita došlo se do zaključka da se, pri kontrolisanim stanjima napona, trajna deformacija zastora može predvideti pomoću sledeće jednačine:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 (1 + C \log N), \quad (7)$$

gde su:

ε_N – trajna deformacija zastora nakon N ciklusa opterećenja,

ε_1 – trajna deformacija nakon prvog ciklusa opterećenja, i

C – konstanta (0.2-0.4).

Trajna deformacija nakon prvog ciklusa opterećenja se određuje na osnovu sledeće jednačine:

$$\varepsilon_1 = 8.52 \cdot 10^{-6} (100 n - 38.2) \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (8)$$

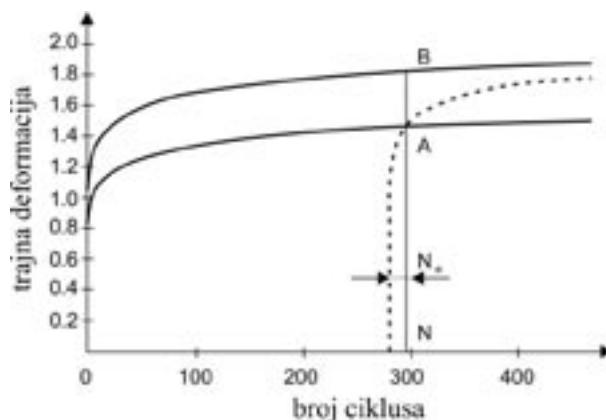
gde su:

n – inicijalna poroznost uzorka, i

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ – devijator napona (kPa).

Promene opterećenja se uzimaju u obzir menjanjem trajne deformacije nakon prvog ciklusa opterećenja i pretpostavlja se da konstanta C ne zavisi od opterećenja. Problem prilagođavanja modela promenljivom opterećenju je 1995. godine istraživao Ford [9] i prikazan je na slici 6.

Ako se, na primer, nakon N ciklusa opterećenje poveća, postavlja se pitanje kojom jednačinom treba opisati dalji rast trajne deformacije. Ukoliko bi se, nakon povećanja opterećenja, koristila vrednost ε_1 koja odgovara većem opterećenju, tok trajne deformacije bi sa krive A, preko AB prešao na krivu B i dalje bi se nastavio kao da je opterećenje od početka bilo veliko. Umesto toga, neophodno je pomeriti početak abscise nove krive, tako da seče krivu A na mestu promene opterećenja.



Slika 6. Prilagođavanje modela ORE D71 promeni opterećenja [9]

Da bi se definisala nova kriva, neophodno je utvrditi novu vrednost ε'_1 i vrednost N_e koja određuje početak krive. Vrednost N_e predstavlja ekvivalentni broj ciklusa uvećanog opterećenja koji bi izazvao istu trajnu deformaciju kao manje (početno) opterećenje nakon N ciklusa. N_e se može sračunati rešavanjem jednačine (7) po N:

$$N_e = 10 [(\varepsilon/\varepsilon'_1 - 1)/C] \quad (9)$$

Trajna deformacija ε'_1 se određuje na osnovu jednačine (8), zamenom vrednosti devijatora napona koja odgovara povećanom opterećenju. Međutim, to podrazumeva da je povećano opterećenje prvo koje je naneto na zastor, što ne odgovara stvarnosti u potpunosti.

3.2.4. ORE D117 model

U periodu od 1971. do 1983. godine u okviru ORE D117 vršena su istraživanja vezana za definisanje mogućnosti prilagođavanja konvencionalnih pruga budućem saobraćaju [20]. Pored ostalog, predmet istraživanja bilo je ponašanje koloseka pod saobraćajnim opterećenjem, tokom vremena.

Analiza rezultata merenja na probnim deonicama pokazala je da se zavisnost sleganja od saobraćajnog opterećenja T može predstaviti sledećom jednačinom:

$$S_e(T) = S_1 + b_s \log \left(\frac{T}{T_{ref}} \right), \quad (10)$$

gde su:

$S_e(T)$ – srednje sleganje deonice nakon saobraćajnog opterećenja T, (mm),

S_1 – srednje sleganje nakon referentnog opterećenja T_{ref} (mm),

b_s – stepen sleganja (mm),

T – saobraćajno opterećenje (t), i

T_{ref} – referentno saobraćajno opterećenje ($T_{ref} = 2 \times 10^6 t$).

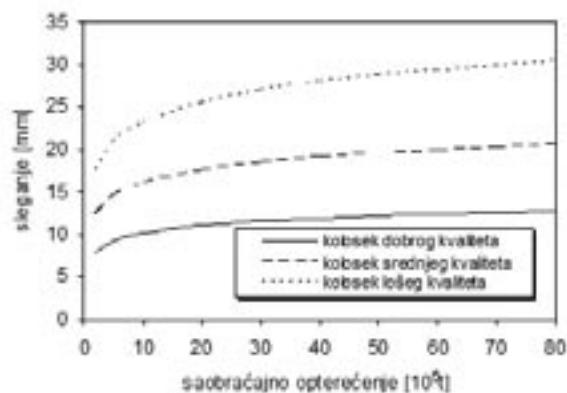
Stepen sleganja i srednje sleganje nakon referentnog opterećenja zavise od kvaliteta koloseka i kolosečne podloge (nosivosti, postojanja i kvaliteta zaštitnih slojeva ispod tucaničkog zastora, tipa šine, krutosti šinskih umetaka).

Opsezi njihovih vrednosti predstavljeni su u tabeli 1.

Tabela 1. Opsezi vrednosti stepena sleganja i sleganja nakon referentnog opterećenja [20]

Opis	b_s (mm)	S_1 (mm)
Kolosek dobrog kvaliteta	2-4	6-10
Kolosek srednjeg kvaliteta	4-6	10-15
Kolosek lošeg kvaliteta	6-10	15-20

Dijagram sleganja koloseka različitih kvaliteta u funkciji saobraćajnog opterećenja prikazan je na slici 7.



Slika 7. Dijagram zavisnosti sleganja od saobraćajnog opterećenja prema modelu ORE D117

Neuniformnost sleganja je modelirana pomoću standardne devijacije. Standardna devijacija sleganja je takođe predstavljena logaritamskom jednačinom:

$$\sigma_e(T) = \sigma_1 + b_\sigma \log\left(\frac{T}{T_{ref}}\right), \quad (11)$$

gde su:

$\sigma_e(T)$ – standardna devijacija sleganja nakon saobraćajnog opterećenja T (mm),

σ_1 – standardna devijacija sleganja nakon referentnog opterećenja T_{ref} (mm), i

b_σ – stepen standardne devijacije (mm).

Opsezi vrednosti standardne devijacije sleganja nakon referentnog opterećenja i stepena standardne devijacije predstavljani su u tabeli 2.

Tabela 2. Opsezi vrednosti stepena standardne devijacije i standardne devijacije sleganja nakon referentnog opterećenja [20]

Opis	b_σ (mm)	σ_1 (mm)
Kolosek dobrog kvaliteta	0.02-0.5	0.5-1
Kolosek srednjeg kvaliteta	0.5-0.8	1-1.5
Kolosek lošeg kvaliteta	0.8-2	1.5-5

3.3. Modeli diferencijalnog sleganja

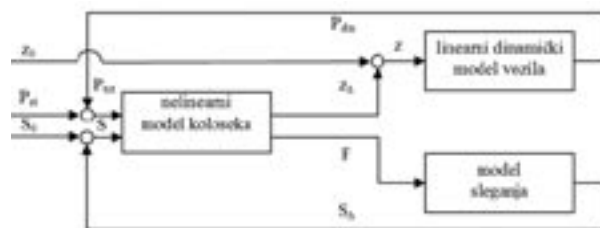
3.3.1. Interaktivni dinamički model sleganja – DSM model

U okviru istraživanja na Nemačkoj železnici, Schwab i Mauer su 1995. godine razvili model za predviđanje sleganja koloseka i rast grešaka u geometriji, za uslove dinamičkog opterećenja od ICE vozova [23].

Interaktivni dinamički model sleganja DSM sastoji se iz tri komponente:

- dinamičkog modela vozila,
- diskretnog, nelinearnog statičkog modela koloseka i
- modela sleganja koloseka.

Sve tri komponente povezane su međusobno preko dve povratne petlje (slika 8). Ulazni podaci za statički model koloseka su: inicijalno stanje neravnina podloge koloseka i statičko osovinsko opterećenje. U ovom modelu sračunavaju se sile pritiska pragova na zastor. Šina je modelirana kao Euler-Bernoulli-eva greda, a za sračunavanje matrice krutosti, koristi se metoda konačnih elemenata. Maksimalne sile pritiska na zastor tokom jednog prolaska vozila su ulaz za model sleganja. Osim toga, model koloseka daje i elastične ugibe šina usled opterećenja od vozila, koji su, uz inicijalne vertikalne neravnine duž koloseka, ulazni podaci za dinamički model vozila.



- z_0 – inicijalne vertikalne neravnine duž koloseka
- z_Δ – elastični ugib šine
- P_{st} – statičko osovinsko opterećenje
- P_{din} – dinamičko osovinsko opterećenje
- S_0 – inicijalne neravnine kolosečne podloge
- S_Δ – priraštaj sleganja
- F – sila pritiska praga na zastor
- P_{tot} – ukupno osovinsko opterećenje

Slika 8. Interaktivni dinamički model sleganja [23]

Rezultat simulacije prolaska vozila su dinamička osovinska opterećenja koja se dodaju statičkim opterećenjima, uvodeći tako ukupno osovinsko opterećenje u model koloseka. Nelinearni statički model koloseka daje nove sile pritiska pragova na zastor, priraštaje sleganja i ugibe šina kao funkcije pobude za sledeći prolazak vozila.

Schwab i Mauer su u modelu sleganja koristili Hettler-ovu jednačinu sleganja, ali se praktično može primeniti bilo koji model sleganja koji kao ulaznu veličinu ima pritisak praga na zastor.

3.3.2. Britanski model sleganja koloseka

Na osnovu laboratorijskih i terenskih ispitivanja na Britanskim železnicama, Shenton je 1984. godine predložio zakon sleganja po kome je sleganje proporcionalno petom korenu broja prelaza osovina (ili broja ciklusa opterećenja) [3,4,13,20]. Utvrđeno je da se tako sračunata sleganja slažu sa izmerenim vrednostima sleganja, za slučajeve kada je broj ciklusa manji od 10^6 . Da bi se zakon bolje prilagodio slučajevima većeg broja ciklusa opterećenja, dodat je linearni član, tako da jednačina ima sledeću formu:

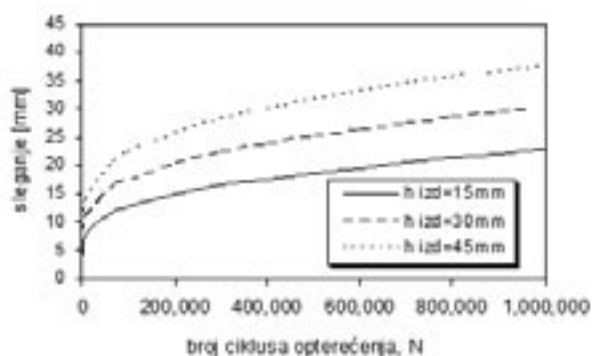
$$S = K_s \frac{P_e}{20g} \left[(0.69 + 0.028h_{\text{izd}}) \cdot N^{0.2} + 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot N \right] \quad (12)$$

gde su:

- S – sleganje koloseka (mm),
- K_s – koeficijent,
- P_e – ekvivalentno osovinsko opterećenje (kN),
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$,
- h_{izd} – izdizanje koloseka pri podbijanju (mm), i
- N – broj ciklusa opterećenja (-).

Koeficijent K_s zavisi od tipa pragova, karakteristika zastornog materijala i donjeg stroja. Uobičajena vrednost ovog koeficijenta u Engleskoj iznosi 1.1.

Na slici 9 prikazana je zavisnost sleganja od broja ciklusa opterećenja, za vrednost koeficijenta $K_s = 1.1$, ekvivalentno osovinsko opterećenje $P_e = 200 \text{ kN}$ i za različite vrednosti izdizanja koloseka pri podbijanju.



Slika 9. Dijagram zavisnosti sleganja od broja ciklusa opterećenja prema modelu Shenton-a (za $K_s = 1.1$ i $P_e = 200 \text{ kN}$)

Prema Shenton-u, osovinsko opterećenje je najznačajniji faktor koji utiče na sleganje. Ekvivalentno osovinsko opterećenje se računa prema sledećoj formuli:

$$P_e = \left(\frac{\sum P_{0,i}^5 \cdot N_i}{\sum N_i} \right)^{0.2}, \quad (13)$$

gde su:

- $P_{0,i}$ – statičko osovinsko opterećenje i (kN), i
- N_i – broj osovina tipa i .

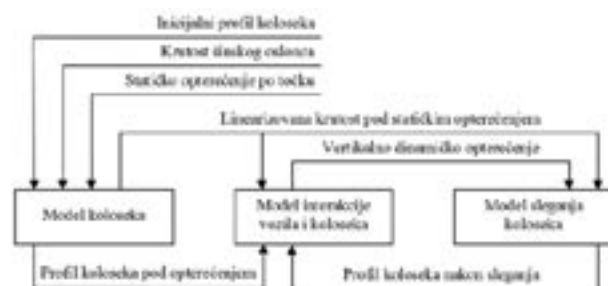
Ovaj model kao izlaznu veličinu daje diferencijalno sleganje samo ako se vrednost izdizanja koloseka pri po-

dbijanju ne uzima kao prosečna, već kao stvarna vrednost za svaki prag posebno.

3.3.3. Model Fröhling-a

Na osnovu merenja na deonici pruge za teški teretni saobraćaj u Južnoafričkoj Republici Fröhling je 1997. godine definisao model propadanja geometrije koloseka [10]. Algoritam za sračunavanje sleganja sastoji se iz sledećih koraka (slika 10):

1. Korišćenjem inicijalnog izmerenog profila neopterećenog koloseka, izmerenih krutosti i statičkog opterećenja po točku, računa se profil koloseka i linearizovana krutost pod datim statičkim opterećenjem;
2. Profil i linearizovana krutost se potom koriste kao ulaz za dinamički model interakcije vozila i koloseka, u kome se sračunava dinamičko opterećenje;
3. Tako sračunato dinamičko opterećenje, zajedno sa linearizovanom krutošću, predstavlja ulaz za model sleganja koloseka;
4. Dobijena vrednost sleganja se potom dodaje profilu koloseka koji se onda koristi kao novi ulaz za dinamički model interakcije vozila i koloseka.



Slika 10. Interaktivni dinamički model sleganja [10]

Veza između sleganja koloseka u određenom preseku i broja ciklusa opterećenja, predstavljena je sledećom jednačinom:

$$S_{Ni} = \left[\left[K_{F1} + K_{F2} \left(\frac{D_{2mi}}{K_{F3}} \right) \right] \frac{Q_{\text{tot}}}{Q_{\text{ref}}} \right]^w \log N, \quad (14)$$

gde su:

- S_{Ni} – sleganje koloseka u preseku i (mm),
- D_{2mi} – izmerena srednja krutost šinskog oslonca u preseku i (kN/m),
- K_{F1} – konstanta (kPa),
- K_{F2} – konstanta (m^{-1}),
- K_{F3} – konstanta pomoću koje se uzima u obzir razlika izmerene i sračunate krutosti u modelu koloseka ($K_{F3}=1.34$),
- Q_{tot} – ukupno opterećenje po točku (kN),
- Q_{ref} – referentno opterećenje po točku (kN),
- N – broj ciklusa opterećenja, i
- w – eksponent.

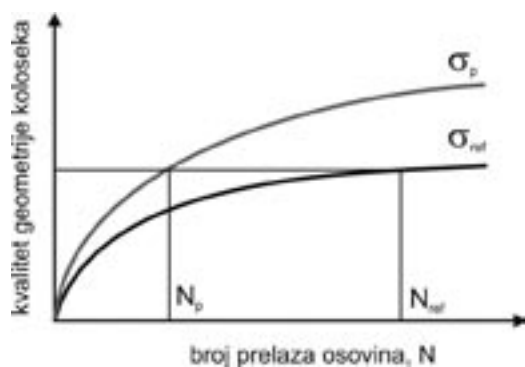
Referentno opterećenje po točku je statičko opterećenje i iznosi 130 kN. Za ispitivanu probnu deonicu, eksponent w iznosio je 0.3, konstanta K_{F1} je 194 kPa, a konstanta K_{F2} je $-1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Ove vrednosti zavise od ka-

rakteristika ispitivane deonice i na taj način se model sleganja koloseka može prilagođavati različitim uslovima.

3.4. Modeli propadanja kvaliteta vertikalne geometrije koloseka

3.4.1. Eksponecijalni model

Krajem pedesetih godina XX veka američko Udruženje za javne puteve AASHO (American Association of State Highway Officials) istraživalo je uticaje različitih osovinskih opterećenja na kolovoznu konstrukciju. Na Tehničkom Univerzitetu u Minhenu je 1978. godine, model koji je AASHO razvio za puteve, prilagođen prugama sa kolosekom u zastoru [5,26,29]. Definisani su sledeći, tzv. eksponecijalni model propadanja kvaliteta geometrije koloseka (slika 11):



Slika 11. Koncept eksponecijalnog modela [5]

$$\gamma = \frac{N_{ref}}{N_p} = \left[\frac{\sigma_p}{\sigma_{ref}} \right]^w, \quad (15)$$

gde su:

- γ – relativni faktor sleganja (-),
- N_{ref} – referentni broj prelaza osovina (-),
- N_p – ispitivani broj prelaza osovina (-),
- σ_{ref} – napon pritiska zastora na planum od referentnog broja prelaza osovina (N/cm^2),
- σ_p – napon pritiska zastora na planum od ispitivanog broja prelaza osovina (N/cm^2), i
- w – eksponent (-).

Eksponent w je u testovima koje su sprovodile različite železničke uprave, variran od 2 do 4. Francuske nacionalne železnice koriste eksponent 2 i 3, dok se na Nemačkim železnicama koristi eksponent 4. Ova razlika je opravdana, budući da su u Francuskoj pruge za putnički i teretni saobraćaj često odvojene, dok su nemačke pruge za mešoviti saobraćaj.

U slučaju neuniformnog saobraćaja (različitih osovinskih opterećenja) relativni faktor sleganja se sračunava na sledeći način [26]:

$$\gamma = \frac{\delta}{\delta_{ref}} \quad (16)$$

U zavisnosti od toga da li eksponent w iznosi 2 ili 4, koriste se sledeće jednakosti za određivanje δ :

$$\delta = \sum_i N_i \cdot \sigma_{0,i}^2 \cdot (1 + x_i^2) \quad \text{za } w = 2, \quad (17a)$$

$$\delta = \sum_i N_i \cdot \sigma_{0,i}^4 \cdot (1 + 6x_i^2 + 3x_i^4) \quad \text{za } w = 4, \quad (17b)$$

gde su:

- N_i – broj prelaza osovina tipa i ,
- $\sigma_{0,i}$ – napon pritiska zastora na planum od osovine tipa i ,
- x_i – koeficijent varijacije vertikalne sile pritiska točka na šinu.

Koeficijentom varijacije vertikalne sile pritiska točka na šinu uzima se u obzir uticaj neravnomernosti dinamičkog opterećenja. Ovaj koeficijent se sračunava kao količnik standardne devijacije i srednje vrednosti dinamičkih sila.

3.4.2. Modeliranje stepena propadanja geometrije koloseka

Hoshino je 1960. godine definisao stepen propadanja geometrije koloseka, Δ kao proizvod tri parametra [32]:

$$\Delta = L_H \cdot J \cdot Z, \quad (18)$$

gde su:

- L_H – faktor opterećenja, $L_H = \Sigma$ (statičko osovinsko opterećenje, P_{st}) x (faktor kola, K_F) x (brzina vozila, V),
- J – strukturni faktor, i
- Z – faktor stanja koloseka.

Faktor kola, K_F se određuje na osnovu sledeće jednakosti:

$$K_F = \frac{1}{1 - \xi \cdot \zeta}, \quad (19)$$

gde su:

- ξ – konstanta koja uzima u obzir karakteristike ogibljenja i iznosi 0.5 za teretna i 0.9 za putnička kola, i
- ζ – odnos između ogibljene i neogibljene mase.

Strukturni faktor, J direktno zavisi od maksimalnog pritiska praga na zastor, ubrzanja zastora i karakteristika šinskog profila. Određuje se na osnovu sledeće jednakosti:

$$J = P_b \cdot \ddot{y}_2 \cdot C_1 \quad (20)$$

gde su:

- P_b – maksimalni pritisak praga na zastor,
- \ddot{y}_2 – ubrzanje zastora, i
- C_1 – koeficijent udara,

Ubrzanje zastora i koeficijent udara definisani su na sledeći način:

$$\ddot{y}_2 \propto \sqrt{D_1} \frac{1}{\sqrt{m_s}}, \quad (21)$$

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{EID}}, \quad (22)$$

gde su:

D_1 – ekvivalentna krutost opruge između šine i srednje mase, i

m_s – srednja masa koja se sastoji od efektivne mase praga i zastora.

EI – krutost na savijanje šinskog traka, i

D – krutost šinskog oslonca po dužini.

Na osnovu jednačina (20), (21) i (22) strukturni faktor se može izraziti na sledeći način:

$$J \propto \frac{P_b \sqrt{D_1}}{\sqrt{m_s E I D}} \quad (23)$$

Faktor stanja koloseka, Z uzima u obzir neravnost površi glava šina i nehomogenost krutosti kolosečne podloge.

3.4.3. Model rasta grešaka u geometriji koloseka

Godine 1978. Sugiyama je ispitivao razvoj grešaka u vertikalnoj geometriji koloseka na različitim deonicama tokom perioda od 100 dana [32]. Utvrđen je prosečan rast srednjih vrednosti grešaka u granicama između 0.16 i 1.08 mm/100 dana. Na osnovu regresione analize, predložen je model rasta grešaka u vertikalnoj geometriji koloseka prema sledećoj jednačini:

$$\bar{S} = 2.09 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.31} \cdot V^{0.98} \cdot J^{1.10} \cdot R^{0.21} \cdot K_p^{0.26}, \quad (24)$$

gde su:

\bar{S} – prosečni rast grešaka na određenoj deonici (mm/100dana),

T – bruto godišnje saobraćajno opterećenje (10^6 brt/god),

V – prosečna brzina vozova (km/h),

J – strukturni faktor (definisan u poglavlju 3.4.2),

R – uticajni faktor za šine (1 za šine zavarene u duge trakove, 10 za šine spojene mehaničkim spojevima), i

K_p – faktor podloge (1 za dobru, 10 za lošu).

Na slici 12 prikazana je zavisnost prosečnog rasta grešaka u geometriji koloseka, od bruto godišnjeg saobraćajnog opterećenja, za kolosek na dobroj podlozi ($K_p=1$), dug šinski trak ($R=1$) i prosečnu brzinu vozova $V=120$ km/h.

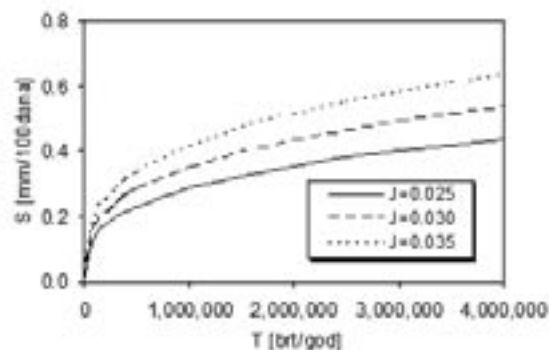
Sugiyama je vršio i ispitivanja uticaja učestanosti podbijanja na deonicama različitih nivoa kvaliteta koloseka, na rast grešaka u vertikalnoj geometriji. Nivo kvaliteta koloseka izražen je preko procenta grešaka u vertikalnoj geometriji koje prelaze vrednost od 3 mm. Potreban interval podbijanja se može odrediti pomoću sledeće jednačine:

$$P_{ir} = 31.7 \log \left(\frac{\bar{S}}{A_T} \right) + 31.6, \quad (25)$$

gde su:

P_{ir} – procenat grešaka u vertikalnoj geometriji koje prelaze vrednost od 3 mm, i

A_T – godišnji broj podbijanja.



Slika 12. Prosečni rast grešaka u vertikalnoj geometriji koloseka u funkciji bruto godišnjeg saobraćajnog opterećenja, prema modelu Sugiyama-e

3.4.4. ORE D141 model

Predmet proučavanja ORE D141 iz 1979. godine bile su posledice povećanja osovinskog opterećenja sa 20 t na 22 t [4,26-28]. Došlo se do zaključka da je propadanje geometrije koloseka proporcionalno trećem stepenu osovinskog opterećenja i ustanovljena je sledeća jednakost:

$$e = e_0 + K T^{\alpha} P_{tot}^{\beta} V^{\gamma}, \quad (26)$$

gde su:

e – indeks propadanja geometrije koloseka nakon saobraćajnog opterećenja T (-),

e_0 – indeks propadanja geometrije koloseka neposredno nakon podbijanja (-),

K – konstanta,

T – kumulativno saobraćajno opterećenje nakon podbijanja (t),

P_{tot} – ukupno osovinsko opterećenje (kN),

V – brzina (m/s), i

α, β, γ – koeficijenti.

Ukupno osovinsko opterećenje se računa prema sledećoj jednačini:

$$P_{tot} = 2Q_{tot} = 2(Q_{st} + Q_{din}) \quad (27)$$

gde su:

Q_{st} – statičko opterećenje po točku (kN), i

Q_{din} – dinamičko opterećenje po točku (kN).

Zaključak ORE istraživanja bio je da na nivo dinamičkog opterećenja najveći uticaj imaju kvalitet vertikalne geometrije koloseka i brzina vozila. Na osnovu rezultata merenja uspostavljena je korelacija između dinamičkog opterećenja i brzine, statičkog opterećenja i kvaliteta geometrije koloseka (izraženog preko standardne devijacije grešaka u vertikalnoj geometriji koloseka (odstupanja po profilu):

$$2Q_{din} = \left[1.201 + 0.060 \cdot \frac{2Q_{st}}{g} + 0.051 \cdot (V - 50) \cdot (s - 0.5) \right] \cdot g, \quad (28)$$

gde su:

g – ubrzanje zemljine teže (m/s^2), i

s – standardna devijacija grešaka u vetrikalnoj geometriji koloseka (mm).

Koeficijenti α , β i γ ocenjuju se na osnovu eksperimentalnih podataka. ORE preporučuje $\alpha = 1$ i $\beta = 3$ [28]. Budući da je uticaj brzine uzet u obzir pri određivanju dinamičkog opterećenja, koeficijent γ može biti 0.

4. UPOREDNA ANALIZA MODELA PROPADANJA VERTIKALNE GEOMETRIJE KOLOSEKA

4.1. Usporedna analiza opterećenja od vozila u postojećim modelima

Svi postojeći modeli propadanja geometrije koloseka su zasnovani na zavisnosti propadanja geometrije od opterećenja od vozila. Međutim, još uvek nije u potpunosti razjašnjeno da li na propadanje geometrije najveći uticaj imaju osovinska opterećenja i broj ciklusa opterećenja, da li je relevantno samo bruto godišnje opterećenje, ili je neophodno uzeti u obzir i uticaj dinamičkog opterećenja [11].

Na osnovu u [30] izvršene detaljne analize mehanizma propadanja geometrije koloseka i postojećih modela, izvode se sledeći zaključci vezani za opterećenja od vozila:

Tabela 3. Pregled opterećenja od vozila u modelima propadanja geometrije koloseka

Tip	Naziv modela	Statičko opterećenje	Dinamičko opterećenje	Broj ciklusa opterećenja	Uticaj različitih osovinskih opterećenja
Prosečno sleganje	Model Hettler-a	+	+	+	+
	Model Sato-a	+	+	+	+
	ORE D71 model	+	+	+	+
	ORE D117 model	+	-	+	-
Diferencijalno sleganje	DSM model	+	+	+	+
	Model Shenton-a	+	+	+	+
	Model Fröhling-a	+	+	+	+
Propadanje kvaliteta	Eksponecijalni	+	+	+	+
	Model Hoshino-a	+	+	+	+
	Model Sugiyama-e	+	+	+	+
	ORE D141 model	+	+	+	+

+ uzima se u obzir +* postoji mogućnost uzimanja u obzir
- ne uzima se u obzir

– uticaj dinamičkog opterećenja mora se uzeti u obzir, makar aproksimativno, množenjem intenziteta statičkog opterećenja odgovarajućim dinamičkim koeficijentom,

– svaki model koji uzima u obzir opterećenje od vozila (a ne samo saobraćajno opterećenje) je primenljiv za uticaje različitih osovinskih opterećenja, i

– s obzirom da veća osovinska opterećenja izazivaju neproporcionalno veće propadanje koloseka u odnosu na manja opterećenja, odnosno da postoji nelinearna veza između opterećenja i propadanja, uzimanje u obzir ove nelinearnosti u modelima propadanja je od suštinske važnosti.

Pregled opterećenja od vozila u modelima propadanja geometrije koloseka prikazan je u tabeli 3.

4.2. Usporedna analiza uticaja početnog kvaliteta geometrije koloseka i nehomogenosti kolosečne podloge u postojećim modelima

U poglavlju 2.2 početni kvalitet vertikalne geometrije koloseka i nehomogenost kolosečne podloge, koja se pre svega odnosi na podužnu neravnomernost krutosti šinskih oslonaca, identifikovani su kao jedni od osnovnih uzroka propadanja vertikalne geometrije koloseka. Iz tog razloga je njihovo uzimanje u obzir od izuzetnog značaja za modele propadanja.

Pregled postojećih modela prema kriterijumu uzimanja u obzir početnog kvaliteta geometrije koloseka i nehomogenosti kolosečne podloge prikazan je u tabeli 4.

Tabela 4. Uzimanje u obzir početnog kvaliteta geometrije koloseka i nehomogenosti kolosečne podloge

Tip	Naziv modela	Uzimanje u obzir početnog kvaliteta geometrije koloseka	Uzimanje u obzir nehomogenosti kolosečne podloge
Prosečno sleganje	Model Hettler-a	-	-
	Model Sato-a	+	+
	ORE D71 model	-	+
	ORE D117 model	-	-
Diferencijalno sleganje	DSM model	+	+
	Model Shenton-a	+	-
Propadanje kvaliteta	Model Fröhling-a	+	+
	Eksponecijalni	-	-
	Model Hoshino-a	+	+
	Model Sugiyama-e	+	+
	ORE D141 model	+	-

+ uzima se u obzir +* postoji mogućnost uzimanja u obzir
- ne uzima se u obzir

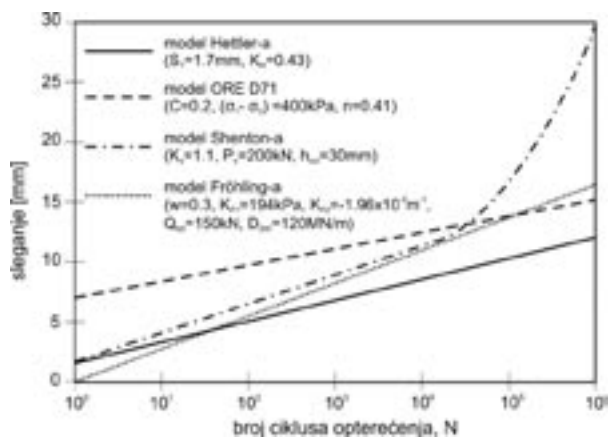
Karakteristike dinamičkog opterećenja od vozila (za definisane karakteristike vozila) i vrednosti pritiska praga na zastor su direktna posledica kvaliteta koloseka i kolosečne podloge. Prema tome, može se zaključiti da kod svih modela koji propadanje vertikalne geometrije daju u funkciji opterećenja od vozila i pritiska praga na zastor,

postoji mogućnost uzimanja u obzir početnog kvaliteta geometrije koloseka i nehomogenosti kolosečne podloge. Uslov za to je da se do vrednosti dinamičkih opterećenja i pritisaka dolazi merenjem, kontinualno duž koloseka. Pri tome ostaje otvoren problem utvrđivanja metodologije merenja na terenu.

4.3. Analiza oblika krivih propadanja geometrije koloseka u pojedinim modelima

Tok propadanja geometrije koloseka, odnosno zavisnost propadanja od saobraćajnog opterećenja (ili broja ciklusa opterećenja) prikazan je na slici 1. Oblici krivih postojećih modela, koje prikazuju sleganje zastora, odnosno koloseka, ili propadanja kvaliteta geometrije koloseka u funkciji broja ciklusa opterećenja, ili saobraćajnog opterećenja, generalno odgovaraju opštem obliku toka propadanja u prvoj i drugoj fazi [30]. Međutim, analizom krivih zavisnosti propadanja geometrije od broja ciklusa opterećenja u logaritamskoj razmeri, uočavaju se značajne razlike između pojedinih modela.

Na slici 13 su upoređeni neki od modela u kojima je sleganje dato u funkciji broja ciklusa opterećenja. Modeli Hettler-a, ORE D71 i Fröhling-a su logaritamski modeli i zavisnost sleganja od broja ciklusa opterećenja u logaritamskoj razmeri je očigledno linearna. Shenton je kritikovao logaritamske modele. Smatrao je da su oni podesni za relativno mali broj ciklusa ($N < 10^5$), ali da mogu značajno potceniti sleganje u slučaju velikog broja ciklusa.



Slika 13. Zavisnost sleganja zastora, odnosno koloseka od broja ciklusa opterećenja (u logaritamskoj razmeri) prema modelu Hettler-a, ORE D71, Shenton-a i Fröhling-a

U [16,17,33,38] analiziran je uticaj broja ciklusa opterećenja na trajne deformacije nevezanih materijala. Iako su rezultati većine do sada sprovedenih istraživanja pokazali da vrednost priraštaja plastične deformacije opada sa porastom broja ciklusa, pojedina istraživanja ukazala su na to da je nakon relativno velikog broja ciklusa moguća pojava naglog porasta trajne deformacije zastora i time povećanih sleganja. Zaključeno je da se razvoj trajne deformacije nevezanih materijala pod cikličnim opterećenjem ne može iskazati kao jednostavna funkcija, što donekle objašnjava navedene razlike oblika krivih sleganja u pojedinim modelima [30].

4.4. Mogućnosti primene postojećih modela u različitim uslovima

Postojeći modeli propadanja geometrije koloseka su empirijski i prema tome razvijeni su za specifične uslove. Specifičnost uslova čine: tehnologija građenja, tip i kvalitet ugrađenih elemenata konstrukcije gornjeg i donjeg stroja, kompatibilnost elemenata pomenutih konstrukcija, strategija i tehnologija održavanja pruge i vozila, klimatski i hidrološki uslovi, vozni park i osovinsko i saobraćajno opterećenje. Stoga je neophodno analizirati mogućnost primene modela u opštim okolnostima (tabela 5).

Uočava se da u svim modelima figurišu koeficijenti čije vrednosti zavise od lokalnih uslova. Ovi koeficijenti se utvrđuju empirijski, na osnovu ispitivanja na probnim deonicama na realnom koloseku, ili na osnovu laboratorijskih modela.

4.5. Predlog kriterijuma za ocenu modela propadanja geometrije koloseka

Na osnovu u [30] sprovedene sveobuhvatne analize mehanizma propadanja geometrije koloseka i postojećih modela za predviđanje propadanja vertikalne geometrije, predlažu se sledeći kriterijumi za ocenu modela:

1. Uzimanje u obzir karakteristika vozila

Osnovni parametri vozila koji utiču na sile koje se prenose na kolosek su: osovinska opterećenja, ogibljena i neogibljena masa i oslanjanje (krutost i prigušenje). Osim navedenih parametara, koji spadaju u konstruktivne karakteristike vozila, od značaja za propadanje geometrije koloseka je i stanje vozila u eksploataciji.

2. Uzimanje u obzir nelinearne veze između opterećenja i propadanja

Brojna istraživanja su pokazala da veća osovinska opterećenja izazivaju neproporcionalno veće propadanje koloseka u odnosu na manja opterećenja, odnosno da postoji nelinearna veza između opterećenja i propadanja. Stoga je uzimanje u obzir ove nelinearnosti u modelima propadanja od suštinske važnosti.

3. Uzimanje u obzir uticaja dinamičkog opterećenja

Kao što je već napomenuto, uticaj dinamičkog opterećenja se u modelima propadanja vertikalne geometrije koloseka mora uzeti u obzir. Dinamička komponenta ukupnog vertikalnog opterećenja se određuje ili na osnovu merenja, ili pomoću kompjuterskih simulacija na odgovarajućim modelima interakcije vozila i koloseka.

4. Uzimanje u obzir početnog kvaliteta geometrije koloseka

Početni kvalitet geometrije nakon polaganja koloseka je identifikovan kao ključni faktor od koga zavisi kvalitet vertikalne geometrije tokom čitavog veka trajanja. U modele propadanja se može uneti ili preko vrednosti od-

stupanja po profilu kontinualno duž ispitivane deonice, ili preko standardne devijacije odstupanja po profilu na deonicama određene dužine.

5. Uzimanje u obzir krutosti šinskog oslonca

Dosadašnja istraživanja nisu rešila problem kvantifikacije ukupne krutosti šinskih oslonaca duž ispitivanih deonica. Rešavanjem ovog problema bi se u model propadanja vertikalne geometrije koloseka unosile realne nehomogene vrednosti krutosti. Jedno od rešenja bilo bi utvrđivanje metodologije za merenje krutosti podloge, u presecima ispod pragova [1].

6. Mogućnost predviđanja diferencijalnog sleganja

Modeliranje samo prosečnog sleganja na nekoj deonici, bez mogućnosti uzimanja u obzir pomenutih nehomogenosti opterećenja i nehomogenosti krutosti kolosečne podloge, koje dovode do diferencijalnog sleganja koloseka, ne predstavlja relevantan podatak o stvarnom kvalitetu geometrije koloseka.

U tabeli 6 dat je pregled ispunjenosti predloženih kriterijuma, svih analiziranih modela propadanja vertikalne geometrije koloseka.

Uočava se da samo model Fröhling-a ispunjava sve navedene kriterijume. To je posledica toga što je kod ovog modela, model sleganja sastavni deo kompleksnog modela, koji sadrži i modele koloseka i vozila. Zahvaljujući tome, ulazni podaci za jednačine sleganja kolose-

ka obuhvataju nehomogenost opterećenja, početni kvalitet geometrije koloseka, kao i nehomogenost kolosečne podloge.

Izbor optimalnog modela direktno zavisi od potreba za koje se model koristi. Ocena modela po različitim kriterijumima uključuje definisanje optimalnih težina po svakom od kriterijuma, u zavisnosti od preferencije donosilaca odluke.

5. ZAKLJUČAK

Modeli propadanja vertikalne geometrije koloseka analizirani u ovom radu su empirijski. Nastali su na osnovu statističkih analiza rezultata istraživanja vršenih na realnom koloseku, ili na laboratorijskim modelima. Većina modela je zasnovana na zavisnosti propadanja geometrije od broja ciklusa opterećenja i osovinskih opterećenja. Lokalne osobenosti deonice se u modele unose preko empirijski utvrđenih koeficijenata.

Poznata je pojava da naizgled jednake deonice mogu imati različite brzine propadanja. Ovo ukazuje na izuzetnu složenost mehanizma propadanja vertikalne geometrije i predstavlja osnovnu prepreku stvaranju opšteg teorijskog modela za predviđanje propadanja geometrije koloseka. Nedostatak teorijskih modela je pre svega nemogućnost uzimanja u obzir realnog (nehomogenog) početnog kvaliteta koloseka i kolosečne podloge, kao ni uticaja različitih mera održavanja na brzinu propadanja [30].

Dakle, nemoguće je napraviti univerzalni model propadanja vertikalne geometrije koloseka, koji bi mo-

Tabela 5. Mogućnost prilagođavanja modela propadanja geometrije koloseka opštim okolnostima

Tip	Naziv modela	Mogućnost prilagođavanja modela opštim okolnostima
Prosečno sleganje	Model Hettler-a	Specifičnosti konstrukcije gornjeg stroja unose se preko koeficijenta K_H koja se dobija na osnovu eksperimentalnih ispitivanja.
	Model Sato-a	Koeficijenti sleganja a_s i α_s i eksponent w su rezultat statističke analize izmerenih sleganja. Karakteristike koloseka, zastora i slojeva donjeg stroja se uzimaju u obzir prilikom sračunavanja pritiska praga na zastor, p_p .
	ORE D71 model	Model je utvrđen na osnovu laboratorijskih testova. Konstanta C zavisi od vrste zastornog materijala, a uticaj inicijalne zbijenosti zastorne prizme se uzima u obzir preko poroznosti.
	ORE D117 model	Stepen sleganja, b_s i srednje sleganje nakon referentnog opterećenja, S_1 zavise od kvaliteta koloseka i kolosečne podloge i utvrđuju se na osnovu statističke analize merenja na probnim deonicama.
Diferencijalno sleganje	DSM model	Ulaz za model sleganja je sila pritiska praga na zastor koja se sračunava u teorijskom modelu koloseka, a na osnovu opterećenja iz modela vozila. Na taj način se uzimaju u obzir karakteristike konstrukcije vozila i koloseka.
	Model Shenton-a	Variranjem koeficijenta K_s koji zavisi od tipa pragova, karakteristika zastornog materijala i slojeva donjeg stroja, model se prilagođava različitim uslovima.
	Model Fröhling-a	Lokalne osobenosti pruge se u model unose variranjem koeficijenata K_{F1} , K_{F2} i eksponenta w .
Propadanje kvaliteta	Eksponencijalni model	Lokalne osobenosti pruge se u model unose variranjem eksponenta w . Karakteristike koloseka, zastora i slojeva donjeg stroja se uzimaju u obzir prilikom sračunavanja napona pritiska zastora na planum.
	Model Hoshino-a	Faktor opterećenja L_H uzima u obzir karakteristike vozila, strukturni faktor J karakteristike kolosečne konstrukcije, a faktor stanja koloseka Z u obzir uzima ravnost površi glave šina i nehomogenost kolosečne podloge.
	Model Sugiyama-e	Faktori J (iz modela Hoshino-a), R i K_p u model unose osobenosti koloseka i kolosečne podloge.
	ORE D141 model	Nema podataka o tome koja je funkcija konstante K . Prema nekim izvorima ([4], [26]), ovaj model ne uzima u obzir karakteristike koloseka i kolosečne podloge.

Tabela 6. Pregled ispunjenosti kriterijuma za ocenu modela propadanja geometrije koloseka

Tip	Naziv modela	Kriterijumi					
		Karakteristike vozila	Dinamičko opterećenje	Nelinearnost veze opterećenja i propadanja	Početni kvalitet geometrije	Krutost šinskog oslonca	Diferencijalno sleganje
Prosečno sleganje	Model Hettler-a	–	+	+*	–	+*	–
	Model Sato-a	–	+*	+*	+*	+*	+*
	ORE D71 model	–	+*	+*	–	+*	+*
Diferencijalno sleganje	ORE D117 model	–	–	–	–	–	–
	DSM model	+	+	+	+	+*	+
	Model Shenton-a	–	+*	+	+*	–	+
Propadanje kvaliteta	Model Fröhling-a	+	+	+	+	+	+
	Eksponecijalni	–	+	+*	–	+*	–
	Model Hoshino-a	+	+*	+*	+	+*	+
	Model Sygiama-e	–	+*	+*	+	+*	+
	ORE D141 model	–	+	+*	+	–	–

+ uzima se u obzir
– ne uzima se u obzir

+* postoji mogućnost uzimanja u obzir

gao da se koristi u opštem slučaju, za precizno predviđanje konkretnih aktivnosti i mera održavanja. Iz tog razloga, prednost treba dati modelima nastalim na osnovu merenja i statističke analize istorijskih podataka o ponašanju vertikalne geometrije koloseka na pravilno odabranim deonicama. Izbor deonice na kojoj se vrše merenja i odgovarajuće statističke analize, vezan je za uslove eksploatacije, karakteristike i stanje konstrukcije koloseka i kolosečne podloge, kao i strategiju održavanja.

Osim za potrebe predviđanja propadanja geometrije koloseka u cilju optimalnog planiranja i održavanja, modeli propadanja vertikalne geometrije koloseka se često koriste i u procesu donošenja generalnih odluka o izboru optimalnog tipa konstrukcije gornjeg i/ili donjeg stroja [5].

Takođe, modeli propadanja se mogu koristiti i pri utvrđivanju visina naknada za korišćenje železničke infrastrukture [30]. Različita vozila izazivaju različito propadanje geometrije. Komercijalizacija i privatizacija železničkog sistema, koja podrazumeva odvajanje infrastrukture od prevoznika, već je sprovedena u mnogim zemljama EU, a u planu je i u Republici Srbiji. Prema novom Zakonu o železnici Republike Srbije, kao jedan od kriterijuma za određivanje naknade za korišćenje železničke infrastrukture navode se troškovi održavanja. Za utvrđivanje ovih troškova neophodno je definisanje odgovarajućeg modela propadanja geometrije koloseka, koji u obzir uzima različite karakteristike železničkih vozničkih sredstava kojima korisnici konkretne zakupljene trase obavljaju prevoz.

LITERATURA

[1] Berggren, E.: „Dynamic Track Stiffness Measurement – A New tool for Condition Monitoring of

Track Substructure“, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology KTH, Stockholm, April 2005.

- [2] Crawford, S., Murray, M., Powell, J.: „Development of a Mechanistic Model for Determination of Track Modulus“, 7th International Heavy Haul Conference, Brisbane, Australia, 2001, Proceedings CD
- [3] Dahlberg, T.: “Railway track settlements – a literature review”, Report for the EU project SUPERTRACK, 2004.
- [4] Dahlberg, T.: “Some railroad settlement models – a critical review”, Proc. Institution of Mechanical Engineers, Vol. 215, Part F, 2001, pp.289-300.
- [5] Eisenmann, J., Rump, R.: “Ein Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeiten”, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 46 (Heft 3) 1997, S. 99-108.
- [6] Esveld, C.: “Modern Railway Track”, Second Edition, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands, 2001.
- [7] European Standard EN 13848-1 “Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 1: Characterisation of track geometry”, 2003.
- [8] European Standard EN 13848-5 “Railway applications – Track – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels”, 2008.
- [9] Ford, R.: “Differential Ballast Settlement and Consequent Undulations in Track, Caused by Vehicle-Track Interaction”, Vehicle System Dynamics, Supplement 24, 1995, pp. 222-233.
- [10] Fröhling, R.D.: “Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness”, PhD Thesis, University of Pretoria, October 1997
- [11] Hawari, M.H.: “Minimising Track Degradation through Managing Vehicle/Track Interaction”, PhD Thesis, Faculty of Built Environment and Engine-

- ering, School of Urban Development, Queensland University of Technology, February 2007.
- [12] Hettler, A.: "Bleibende Setzungen des Schotteroberbaues", Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 33 (Heft 11), 1984, S. 847-854.
- [13] Holtzendorff, K.: „Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Mai 2003.
- [14] Hunt, G.A.: "EUROBALT optimises ballasted track", Railway Gazette International, December 2000, pp.813-816
- [15] Iwnicki, S., Grassie, S., Kik, W.: "Track settlement prediction using computer simulation tools", Vehicle System Dynamics, Supplement 33, 2000, pp.2-12.
- [16] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A.: "State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates", Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No.1, January/February, 2000, pp.66-75.
- [17] Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A.: "State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates", Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No.1, January/February, 2000, pp.76-83.
- [18] Li, D., Selig, E.T.: "Evaluation of Railway Subgrade Problems", Transportation Research Record, Volume 1489, 1995, pp. 17-25.
- [19] Lichtberger, B.: "Schottergleisverhalten und Einflussparameter – der Versuch eines Überblicks – Teil 1: Die Suche nach der optimalen Schottergleiskonstruktion, Eisenbahningenieur-Kalender", VDEI, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2002, S. 3-16.
- [20] Lichtberger, B.: "Track Compendium", Eurailpress Tetzlaff-Hestra, Hamburg, 2005.
- [21] López Pita, A., Teixeira, P.F., Robusté, F.: "High speed and track deterioration: the role of vertical stiffness of the track", Proc. Instn Mech. Engrs, vol 218, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, pp.31-40.
- [22] López Pita, A.: "The importance of vertical stiffness of the track on high-speed lines", Transportation Research Board 81st Annual Meeting, January 13-17, Washington, DC, 2002. Proceedings CD
- [23] Mauer, L.: "An Interactive Track-Train Dynamic Model for Calculation of Track Error Growth", Vehicle System Dynamics, Supplement 24, 1995, pp. 209-221.
- [24] Müller-Boruttau, F. H., Breitsamter, N.: "Elastische Elemente verringern die Fahrwegbeanspruchung", Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 49 (Heft 11), 2000., S. 587-596.
- [25] Müller-Boruttau, F. H., Breitsamter, N.: "Zur Dimensionierung Elastischer Elemente des Oberbaues", Ing.-Büro Dr.-Ing Müller-Boruttau Beratende Ingenieure BYIK, 2006.
- [26] Öberg, J.: "Track Deterioration of Ballasted Tracks – Marginal Cost Models for different Railway Vehicles", Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology KTH, Stockholm, May 2006.
- [27] ORE D161 – Dynamic vehicle/track interaction phenomena, from the point of view of track maintenance, Report No.1: General conditions for the study of the evolution of track geometry based on historical information, Utrecht, April 1987.
- [28] ORE D161 – Dynamic vehicle/track interaction phenomena, from the point of view of track maintenance, Report No.3: Final report, Conclusions and recommendations, Utrecht, September 1988.
- [29] Popović, Z., Puzavac, L.: "Uticaj elastičnosti podloge na degradaciju geometrije koloseka", XXIV Kongres Društva za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Divčibare, zbornik radova, 2008., str. 429-438.
- [30] Puzavac, L.: "Modeliranje propadanja geometrije koloseka", Magistarska teza, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2009.
- [31] Rail Safety & Standards Board: "Review of the Effects of Track Stiffness on Track Performance", United Kingdom, February 2005.
- [32] Sato, Y.: "Japanese Studies on Deterioration of Ballasted Track", Vehicle System Dynamics, Supplement 24, 1995, pp.197-208.
- [33] Selig, E.T., Waters, J.M.: "Track Geotechnology and Substructure Management", Thomas Telford Ltd., 1994.
- [34] Sussmann, T.R., Ebersohn, W., Selig, E.T.: "Fundamental Non-Linear Track Load-Deflection Behavior for Condition Evaluation", Transportation Research Record, Volume 1742, 2001, pp. 61-67.
- [35] Tomičić-Torlaković, M.: "Održavanje železničkih pruga", Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [36] UIC Code 518: "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality", 3rd edition, October 2005.
- [37] Veit, P.: "Qualität im Gleis – Luxus oder Notwendigkeit?", Der Eisenbahningenieur (EI) 57, 12/2006, 2006., S. 32-37.
- [38] Wee, L.L.: "Mechanics of Railway Ballast Behaviour", PhD Thesis, University of Nottingham, May 2004.

ZAHVALNICA

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 16032: "Optimizacija upravljanja održavanjem magistralnih saobraćajnica".