

Primljen / Received: 8.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 2.4.2016.

Prihvaćen / Accepted: 17.7.2016.

Dostupno online / Available online: 10.1.2017.

Optimizacija održavanja i remonta željezničkih kolosijeka primjenom genetičkih algoritama

Autor:



Izv.prof.dr.sc. **Hakan Guler**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sakarya, Turska
Odjel za građevinarstvo
hguler@sakarya.edu.tr

Pregledni rad

Hakan Guler

Optimizacija održavanja i remonta željezničkih kolosijeka primjenom genetičkih algoritama

Rad opisuje novi pristup optimizaciji radova na održavanju i remontu željezničkih kolosijeka pomoću genetičkih algoritama. U istraživanju su primijenjeni sustavi za potporu u odlučivanju i genetički algoritmi radi optimizacije radova na održavanju i remontu željezničkih kolosijeka. Rezultati istraživanja su pokazali da je moguće razviti sustav za upravljanje radovima planskog održavanja i remonta te ga uspješno primijeniti umjesto korektivnih radova održavanja.

Ključne riječi:

održavanje kolosijeka, optimizacija, genetički algoritmi, sustavi podrške odlučivanju, ekspertni sustavi

Subject review

Hakan Guler

Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms

This paper describes a new approach to optimisation of railway track maintenance and renewal works via genetic algorithms. Decision support systems and genetic algorithms are used in this study to optimise railway track maintenance and renewal activities. The results obtained in the scope of this study show that planned maintenance and renewal management systems can be developed and successfully used instead of resorting to corrective maintenance activities.

Key words:

track maintenance, optimisation, genetic algorithms, decision support systems, expert systems

Übersichtsarbeit

Hakan Guler

Optimierung der Instandhaltung und Erneuerung von Eisenbahngleisen mit genetischen Algorithmen

Diese Arbeit beschreibt einen neuen Ansatz bei der Optimierung von Instandhaltungs- und Erneuerungsarbeiten von Eisenbahngleisen aufgrund genetischer Algorithmen. Bei den Untersuchungen wurden Systeme zur Entscheidungsunterstützung und genetische Algorithmen eingesetzt, um Instandhaltungs- und Erneuerungsarbeiten von Eisenbahngleisen zu optimieren. Die Resultate haben gezeigt, dass es möglich ist, ein System für die Verwaltung planmäßiger Instandhaltungs- und Erneuerungsarbeiten zu entwickeln und ihn erfolgreich als Ersatz für korrektive Instandhaltungsarbeiten anzuwenden.

Schlüsselwörter:

Instandhaltung von Gleisen, Optimierung, genetischer Algorithmus, Entscheidungsunterstützungssysteme, Expertensystem

1. Uvod

Svake godine, željezničke tvrtke izdvajaju značajna novčana sredstva na održavanje kolosijeka i njihov remont kako bi omogućile kvalitetno funkcioniranje željezničke mreže. Prema statistici, prosječni troškovi godišnjeg održavanja i remonta (eng. *maintenance and renewal*, M&R) po kilometru kolosijeka unutar zapadnoeuropske mreže iznose oko 50.000 eura. Radi održavanja zadovoljavajućeg stanja željezničke infrastrukture, nužno je dobro razumjeti ponašanje svakog njenog elementa [1]. Uobičajeno je da željezničke tvrtke primjenjuju različite M&R tehnike ovisno o tipu željezničkog podsustava. Općenito, postoje dvije vrste intervencija tijekom vijeka trajanja željezničkog sustava, a to su korektivno i preventivno održavanje. Željezničke tvrtke primjenjuju korektivno održavanje kada god se dogodi kvar, primjerice slom komponente željezničkog kolosijeka. Preventivno održavanje, primjerice rešetanje zastora ili integralni remont kolosijeka, primjenjuje se periodički, prema unaprijed utvrđenom rasporedu. Željezničke tvrtke češće se koriste tradicionalnim metodama održavanja koje su usmjerene prema korektivnom održavanju. Pri tome se obično promatraju geometrija kolosijeka i stanje kolosiječnih komponenti, koje se periodično mijenjaju ili obnavljaju kako bi zadovoljile potrebnu razinu kvalitete. Kao rezultat, ignorira se kvaliteta investicije u održavanje željeznica, što bi trebao biti jedini ključni čimbenik. Kvaliteta investicije i održavanja ovisi o mogućnosti identificiranja, raspoređivanja i planiranja kapitalnih radova te aktivnosti održavanja i remonta kolosijeka. Operator infrastrukture trebao bi uspostaviti učinkovitu implementaciju navedenih radova i aktivnosti. Pravovremeno održavanje kolosijeka i izvođenje remonta je ključno za realizaciju učinkovitih i optimiziranih M&R planova, čijom se provedbom produžuje vijek trajanja komponenti kolosijeka. Budući da troškovi održavanja i remonta rastu eksponencijalno tijekom uporabe kolosijeka, učinkovitost željezničkog sustava moguće je povećati smanjenjem tih troškova i boljom kontrolom procesa održavanja. Sustav upravljanja održavanjem moderne željezničke infrastrukture zahtijeva dijagnostički koncept, tj. pristup kolosijeku ovisno o njegovom stvarnom stanju, kao i analize kritičnosti i hitnoće svih ključnih infrastrukturnih komponenti. Željezničke tvrtke mogu postići učinkovito upravljanje radovima održavanja i remonta optimizacijom rasporeda njihova provođenja te osiguranjem prostorne i vremenske koherentnosti tih radova. Radi ostvarenja učinkovitijeg održavanja željezničkog sustava, moguće je primijeniti nekoliko matematičkih modela. Razvoj tehnologija aplikacijskih alata (uključujući podjednako i razvoj programske i računalne opreme) omogućio je razvoj sustava za potporu u odlučivanju (eng. *decision support systems*, DSS) koji uključuju nove računske modele optimizacije održavanja, poput genetičkih algoritama (GA). DSS su tehnologije koje pomažu pribaviti točno znanje za točno određene donosiocje odluka, u točno vrijeme te u točnim prikazima za točne troškove. DSS pomaže upraviteljima infrastrukture da donesu najbolje odluke u odnosu na financijska i ostala dominantna ograničenja u trenutku donošenja odluke [2]. DSS

je računalni sustav koji predstavlja i obrađuje informacije na način koji omogućava da donesene odluke budu produktivnije, agilnije, inovativnije i/ili renomiranije [3]. Tijekom godina, dokazano je da je proces donošenja odluke uglavnom temeljen na *If-then-else* pravilima, ovisno o prirodi DSS-a. Pravila su razvili stručnjaci, a radni proces sustava je izgrađen na ekspertnim sustavima. Kvaliteta DSS-a ovisi o kvaliteti ali i o količini informacija koje su u njega uvedene [4]. S vremenom su značajan napredak u razvoju sustava za planiranje M&R radova na željezničkim kolosijecima ostvarile ne samo željezničke tvrtke nego i specijalizirani instituti i sveučilišta na području SAD-a, Kanade, Japana i Europe. Detaljnije informacije se mogu naći u izvješću ERRI D 187/RP 1 [5, 6]. Uz to, Deluka-Tibljias i sur. [7] razmatrali su složeno pitanje donošenja odluka o prometnoj infrastrukturi urbanih područja. Analizirana je mogućnost primjene tehnika višekriterijskih analiza koje su uključivale planiranje, proračun, održavanje i rehabilitaciju prometne infrastrukture. Autori su prikazali zaključke o mogućnostima, prednostima i ograničenjima primjene metoda višekriterijske analize, s ciljem poboljšanja kvalitete pri donošenju odluka o prometnoj infrastrukturi u urbanim područjima.

Rješavanje nelinearnih mješovitih cjelobrojnih modela je izazovno te se u tu svrhu uobičajeno koriste programski izračuni. U ovom radu se predlaže primjena genetičkih algoritama (GA) za optimizaciju M&R radova na željezničkim sustavima. GA je strategija koja modelira mehaniku genetičke evolucije. Glavno obilježje GA se temelji na principima prilagodbe i preživljavanja najsposobnije jedinke [8]. Genetički algoritmi su vrsta algoritama za numeričku optimizaciju koji su inspirirani i prirodnom selekcijom i genetičkom rekombinacijom. Metodu je moguće primijeniti na vrlo široko područje. Algoritmi su jednostavni za razumijevanje, a potreban računalni kod je jednostavno napisati. Moguće rješenje problema tretira se kao jedinka. Jedinka je predstavljena računalnom strukturom podataka koja se naziva kromosomno kodiranje, a koristi predodređenu duljinu koda (abecede). Skup jedinki sa zajedničkim obilježjima čini vrstu, a vrste se grupiraju u niše koje čine glavne poddomene prostora istraživanja. Kroz poticanje formiranja vrsta i niša grupiranjem jedinki, GA mogu podržati veći broj optimalnih simultanih pretvorbi u višemodalnom prostoru istraživanja [9]. Literatura pokazuje da su planovi radova na održavanju kolosijeka uobičajeno temeljeni na determinističkim metodama. Postoji također i nekoliko primjera koji primjenjuju drugačije tehnike planiranja održavanja kolosijeka. Primjerice, Grimes [10] je planirao radove održavanja kolosijeka preko metoda GA i genetičkog programiranja (GP) s profitom kao zadanim kriterijem optimiranja. Grimes je usporedio rezultate s postojećom determinističkom tehnikom. Zaključeno je da je GP metoda dala najbolje rezultate, s time da je GA metoda dala dobre rezultate za kratku dionicu, a loše rezultate za dugu dionicu kolosijeka. Mijalic i sur. [11] opisali su metodologiju primjene GA u s ciljem optimizacije dodjele zadataka operatorima konstrukcijskih strojeva radi postizanja maksimalne učinkovitosti. Posebno je istaknut utjecaj ljudskog faktora (sposobnosti operatora) na učinkovitost sustava.

Ovaj rad opisuje optimizaciju M&R radova na željezničkim kolosijecima uz primjenu GA. Razvijeni sustav je, u osnovi, sustav uvjetovan stanjem kolosijeka koje je utvrđeno na temelju podataka mjerenja parametara kolosijeka. Sustav analizira kolosijek koristeći svoju bogatu bazu podataka, koja uključuje i pravila odlučivanja razvijena od stručnjaka specijaliziranih za kolosijeka. Razvijeni sustav je vrsta ekspertnog sustava koji za kontrolu, analizu i rješavanje problema koristi ljudske informacije i znanje pohranjeno unutar računala te učinkovito pomaže inženjerima u donošenju odluka.

Model predložen u ovom radu primijenjen je na željezničkoj pruzi u sklopu mreže turskih državnih željeznica (eng. *Turkish State Railways*, TCDD) između Arifiye i Eskisehira. Pruga duljine 180 km podijeljena je u 720 analitičkih segmenata (AS). Predloženi DSS temeljen na GA primijenjen je na pruzi kao optimizacijski alat, a njegovom su provedbom dobiveni pozitivni rezultati.

2. Pristup razvoju sustava

Opisuju se primjena i osnovne tehnike razvijenog sustava. Razvijeni sustav je sustav uvjetovan stanjem željezničke infrastrukture i služi kao potpora odlučivanju, a sadrži bogatu bazu podataka o M&R radovima s pravilima za odlučivanje koji i kakvi su M&R radovi potrebni za željezničke kolosijeka određenog stanja. U ovom istraživanju su razmatrani provedeni M&R radovi na kolosijecima TCDD-a. U slučajevima kada podaci o M&R radovima nisu bili dostupni, najvažniji M&R radovi definirani su na temelju znanja i iskustva stručnjaka turskih željeznica. Relevantni stručnjaci za željeznice iz TCDD-a koji su podijelili svoja znanja i iskustva za proračune i razvoj ovog sustava odabrani su iz glavne uprave TCDD-a te regionalnih podružnica, odjela i pododjela. Sudionici ispitivanja su bili miješana skupina inženjera i tehničkog osoblja, u najvećoj mjeri zaposlenih u Odjelu za kolosijeka pri TCDD-u. Na temelju njihovih odluka odabrane su aktivnosti održavanja i remonta na željeznici, što je prikazano

u tablici 1. Te su aktivnosti klasificirane kao "održavanje" i "remont" te im je pridružena pripadajuća pokratak.

Parametre za razvitak pravila pri odlučivanju kod svake M&R aktivnosti definirali su stručnjaci, a riječ je o: klasi kolosijeka, položaju kolosijeka, operativnim podacima poput brzine i osovinskog opterećenja, referentnim vrijednostima i ograničenjima, broju vlakova, opterećenjima i kumulativnim opterećenjima, starosti i vrsti materijala, stanju željezničkog donjeg ustroja, povijest M&R radova, mjerenjima geometrije kolosijeka, vibracija i buke, broju otkazivanja elemenata i oštećenih komponenti, indeksima stanja i usluge, standardnim devijacijama, statističkim distribucijama, troškovima itd.

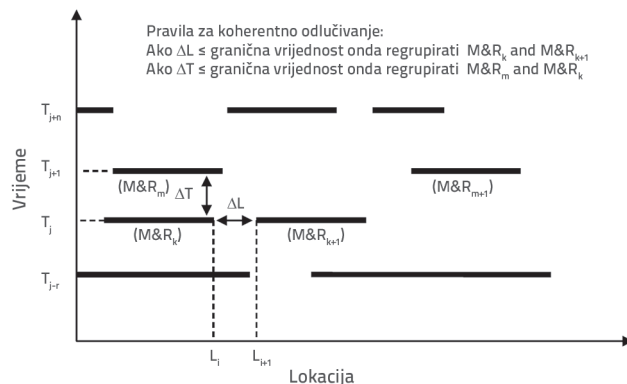
Razvijeni sustav pojedine navedene parametre na temelju analitičkih segmenata (AS) i segmenata održavanja (eng. *maintenance segments*, MS). Pri kreiranju analitičkih segmenata (AS) uzete su u obzir karakteristike željezničkih kolosijeka poput tipa tračnica, uzdužnih nagiba, brzine itd. Segmenti održavanja (MS) stvoreni su kombiniranjem serija analitičkih segmenata (AS). Ti su podaci, bilo uneseni ili proizvedeni, korišteni unutar M&R algoritama s pravilima o odlučivanju. Kroz ovaj su proces ponekad proizvedeni i daljnji posredni podaci. Tijekom procesa razvoja pravila o odlučivanju o provedbi radova, razmatrana su tri glavna stupnja: granica upozorenja (eng. *alert limit*, AL), granica intervencije (eng. *intervention limit*, IL) te granica neodgodive intervencije (eng. *immediate action limit*, IAL). Detaljnije informacije o graničnim vrijednostima koje definiraju navedene stupnjeve dane su u nastavku rada. Korištenjem mjerodavnih podataka definirana su jednostavna pravila za svaku vrstu M&R aktivnosti. Na primjer, AKO podaci o kolosijeku (1) \geq granična vrijednost (1) ILI podaci o kolosijeku (2) \geq granična vrijednost (2) ILI podaci o kolosijeku (3) \geq granična vrijednost (3) ... TADA vrsta aktivnosti, datum aktivnosti. Nesigurnosti koje se pojavljuju zbog nedostatka znanja o graničnim vrijednostima isključene su pomoću ekspertnog prosuđivanja [6]. Struktura razvijenog modela (DSSa) prikazana je na slici 1. Općenito, glavni je cilj njegova razvoja bio identificirati

Tablica 1. Klasifikacija aktivnosti održavanja i remonta kolosijeka

A) Održavanje kolosijeka		
Hrvatski	Engleski	Skraćenica
1. Podbijanje zastorne prizme (radi osiguranja propisane geometrije)	1. Ballast Tamping (Levelling and lining maintenance)	BT
2. Brušenje tračnice	2. Rail grinding maintenance	RG
3. Redovita mjerenja i pojedinačno održavanje	3. General measurements and spot maintenance	GC
4. Podmazivanje tračnica	4. Rail lubrication	RL
B) Remont kolosijeka		
1. Integralni remont	1. Integral renewal	IR
2. Zamjena tračnica	2. Rail renewal	RR
3. Zamjena pragova i pričvrstnog pribora	3. Sleepers and rail fastenings renewal	SFR
4. Zamjena tračnica, pragova i pričvrstnog pribora	4. Rails, sleepers and fasteners renewal	RSFR
5. Rešetanje zastora i/ili zamjena materijala	5. Ballast sieving and/or ballast renewal	BSR
6. Zamjena pragova, pričvrstnog pribora i zastora	6. Sleepers, fasteners and ballast renewal	SFBR

zahtjeve M&R radova kako bi ih se klasificiralo u odgovarajuće kategorije [5]. Razvijeni sustav omogućava analizu na pet razina. Na prvoj razini sustava podaci željezničke mreže se jednostavno vrednuju na temelju minimalnih podataka, a dionice kolosijeka se efektivno klasificiraju u četiri M&R klase.

- **M&R klasa I:** dionice ne zahtijevaju nikakve M&R radove jer su njihove granične vrijednosti ispod AL. Te se dionice ispituju na koherentnoj razini.
- **M&R klasa II:** dionice zahtijevaju redovite M&R radove jer su granične vrijednosti između AL i IL.
- **M&R klasa III:** dionice bi mogle zahtijevati operacije korektivnog održavanja i/ili remonta jer su im granične vrijednosti između IL i IAL. Te se dionice detaljno ispituju na drugoj razini.
- **M&R klasa IV:** Zabrana prometa na dionici. Dionice mogu zahtijevati operacije korektivnog održavanja i/ili remonta jer su granične vrijednosti veće od IAL. Te se dionice detaljno ispituju na drugoj razini.



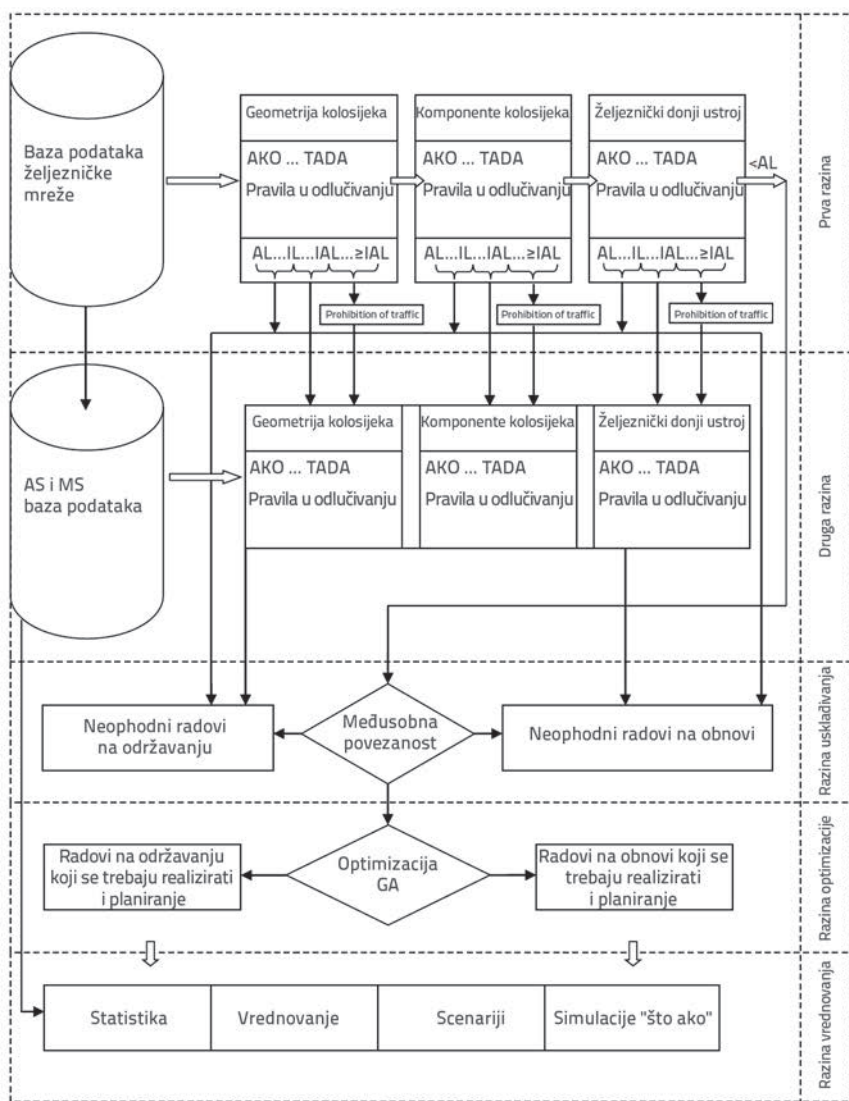
Slika 2. Procedura pravila koherencije

Na drugoj razini, ASI i MSI se sveobuhvatno analiziraju kako bi se odredili prijeko potrebni M&R radovi, uključujući i pripadajuće žurnosti. Ova razina je temeljena na detaljnim podacima

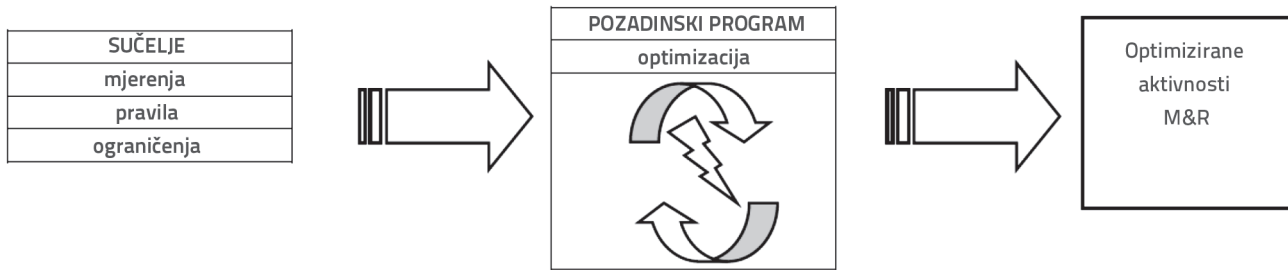
za granične vrijednosti, pravila odlučivanja i modele dotrajnosti te predviđa M&R radove za srednjoročno i dugoročno razdoblje. Razvoj pravila odlučivanja za komponente željezničkih kolosijeka predstavljen je u poglavlju 4.

Na trećoj razini sustava provode se analize koherentnosti na temelju pravila odlučivanja o vremenu i prostoru koherencije između M&R radova tijekom budućih i planiranih godina. Razmatrane su dvije glavne klase pravila koherencije, a to su pravila vezana za vrijeme i pravila vezana za lokaciju. Pravila vezana za vrijeme grupiraju radove na održavanju ili remontu i njihovu lokaciju. Pravila vezana za lokaciju grupiraju radove na održavanju ili remontu u ovisnosti o vremenu. Te dvije glavne klase pravila koherencije su prikazane na slici 2.

Četvrta razina sustava je razina optimizacije. Na toj se razini koriste genetički algoritmi za optimizaciju M&R radova. Ova razina uzima rezultate prethodne, razine koherentnosti, i ocjenjuje tehničku i ekonomsku izvodljivost M&R radova, uzimajući u obzir brojna ograničenja tijekom upravljanja i alociranja resursa. Ova razina omogućuje korisniku da prijeđe na konačno M&R planiranje koji uzima u obzir tehnička ograničenja (strojevi, osoblje i vrijeme) i ekonomska ograničenja (sredstva za M&R radove) koje im daje sustav. U ovom radu, predloženi sustav računa troškove radova prema jednadžbama koje se navode u potpoglavlju 4.5. Sustav je



Slika 1. Struktura sustava



Slika 3. Koncept optimizacijske razine

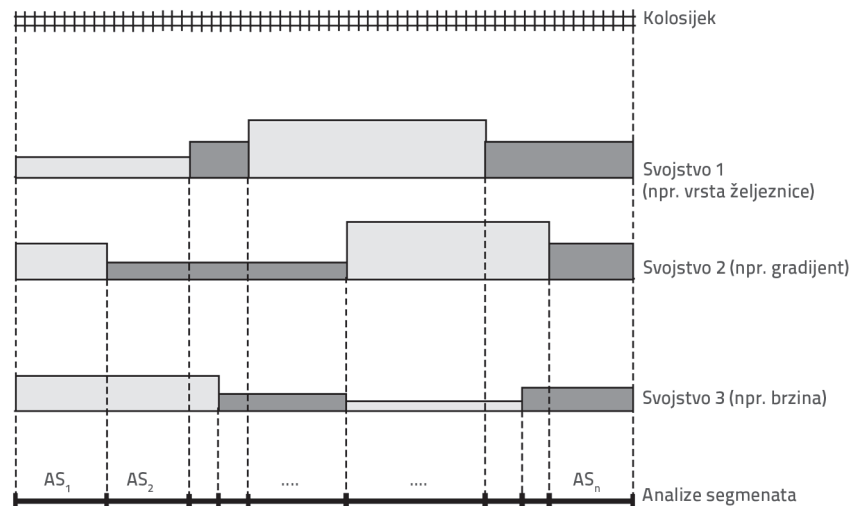
također sposoban napraviti kalkulacije na temelju metode diskontiranog novčanog toka. Tijekom optimizacije različite su vrste radova na održavanju i remontu regrupirane prema određenim ekonomskim ograničenjima (primjerice radovi na pragovima i pričvrstnom sustavu su regrupirani s remontom kolosijeka i obrnuto). Uz to, na ovoj se razini razmatraju i interakcije između M&R radova do kojih dolazi zbog određenih tehničkih ograničenja (poput pomicanja termina brušenja tračnica neposredno nakon radova na zamjenski pragova i pričvrstnog pribora). Koncept razine optimizacije prikazan je na slici 3. Detaljnija objašnjenja primjene genetičkih algoritama na razini optimizacije razvijelog sustava dana su u poglavlju 4.

Zadnja, peta razina sustava, jest razina evaluacije. Ta razina daje korisnicima podatke potrebne za ukupno upravljanje M&R aktivnostima na željezničkoj mreži. Na toj se razini optimizirani M&R radovi mogu usporediti s pripadajućim procijenjenim rizicima. Na evaluacijskoj razini moguće je ispitati učinkovitost djelovanja ili kapacitet željezničke organizacije. Analize scenarija, koje su integralni dio analize situacije i dugoročnog planiranja, omogućuju procjenu mogućih učinaka jedne ili više varijabli. Ova razina omogućuje primjenu statističkih analiza nad svim podacima o kolosijeku i dobivenim rezultatima, primjenu "Što ako?" simulacija na kvalitetu kolosijeka, određivanje cijene uporabnog ciklusa kolosijeka, proračuna održavanja, M&R strategije, itd.

3. Pravila odlučivanja za održavanje i remont kolosijeka

Pravila za odlučivanje o provođenju M&R radova razvijena su na temelju normi (BS EN 13848, BS EN 13450, UIC 719 i UIC 714), modela propadanja i odluka stručnjaka. Geometrija kolosijeka i komponente kolosijeka, poput tračnica, pragova i željezničkog donjeg ustroja, te granične vrijednosti za njihovo održavanje i/ili remont su opisane na temelju analitičkih segmenata (AS) kao osnovnih jedinica kolosiječnih dionica.

Proces segmentacije koji je korišten u ovom istraživanju objašnjen je slikom 4. Mjerna vozila snimaju i pohranjuju podatke



Slika 4. Proces segmentacije kolosijeka

duž kolosijeka nakon čega se ti podaci grupiraju u male dionice održavanja (eng. *maintenance sections*, MS). Za svaku MS su poznati rezultati mjerenja, provedenih inspekcija, izvedeni radovi i karakteristike infrastrukture. Ove informacije zahtijevaju daljnje agregiranje u duže dionice – rute kako bi se dobila procjena kvalitete kolosijeka na razini mreže i posljedične potrebe za M&R radovima [14].

3.1. Geometrija kolosijeka

Kvaliteta geometrije kolosijeka razmatra se kroz procjenu odstupanja od prosječnih ili projektiranih vrijednosti promatranih geometrijskih parametara u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini [14]. Geometrija kolosijeka utječe na sve komponente kolosijeka i njihovo vrijeme korištenja [15]. U ovom istraživanju su uzeta u obzir tri indikatora koji opisuju kvalitetu geometrije kolosijeka: ekstremne vrijednosti pojedinačnih, izoliranih oštećenja, standardna devijacija na definiranoj duljini (AS) i srednja vrijednost na AS.

Pokazatelji kvalitete kolosijeka koji se odnose na udobnost, pouzdanost i sigurnost moraju se najprije odrediti proračunom te ih je zatim potrebno usporediti s unaprijed definiranim graničnim vrijednostima. Svako prekoračenje tih graničnih vrijednosti mora rezultirati intervencijom. Tijekom procesa razvoja pravila razmatrane su tri osnovne razine vrijednosti pokazatelja kvali-

tete: granica upozorenja (eng. *alert limit*, AL), granica intervencije (eng. *intervention limit*, IL) te granica neodgodive intervencije (eng. *immediate action limit*, IAL).

- Granica upozorenja (AL): ako vrijednosti pokazatelja kvalitete premašuju AL, tada je potrebno analizirati stanje geometrije kolosijeka i razmatrati redovite planirane operacije njezinog održavanja.
- Granica intervencije (IL): ako vrijednosti pokazatelja kvalitete premašuju IL, tada je potrebno provesti korektivno održavanje kako se ne bi dostigla granica neodgodive intervencije prije sljedeće inspekcije.
- Granica neodgodive intervencije (IAL): ako vrijednosti pokazatelja kvalitete premašuju IAL, tada se poduzimaju nužne mjere kako bi se rizik od iskliznuća vlaka smanjio na prihvatljivu razinu.
- Tri pokazatelja kvalitete geometrije kolosijeka definirana su prema EN 13848-5 [16]. Osim parametara geometrije kolosijeka, u razvoju pravila za M&R razmatrani su i drugi parametri koji doprinose interakciji vozila s kolosijekom i kvaliteti vožnje. Vrijednosti tih parametara određene su izravnim mjerenjima ili su određeni posredno, na temelju rezultata izvedenih mjerenja.
- Parametri određeni izravnim mjerenjem: zakrivljenost osi kolosijeka (1/m), zakrivljenost nivelete kolosijeka (1/m), nagib nivelete kolosijeka (mm/m), ubrzanje (m/s²).
- Parametri određeni posredno, na temelju rezultata izvedenih mjerenja: promjena nagiba nivelete kolosijeka (mm/m), stupanj promjene nagiba nivelete kolosijeka (mm/m²), manjak nadvišenja (mm), stupanj promjene manjka nadvišenja (mm/s), varijacija manjka nadvišenja (mm), stopa promjene nadvišenja (mm/s), nagib rampe nadvišenja (mm/m), varijacija nadvišenja (mm), indeks vožnje.
- Dodatni razmatrani podaci: brzina (km/h), udaljenosti (m).

Ubrzanja postolja i sanduka vozila važan su podatak za donošenje odluke o brušenju ili zamjeni tračnica kao i za sigurnost vožnje i udobnost putovanja željezničkim vozilom. Tablica 2. prikazuje granične vrijednosti za ubrzanja koje su zasad na snazi u TCDD [17].

Tablica 2. Ubrzanja postolja i sanduka vozila

Ubrzanja	Jedinica	AL	IL	IAL
Poprečno ubrzanje postolja	m/s ²	5,00	7,50	10,00
Poprečno ubrzanje poda vlaka	m/s ²	2,50	3,25	3,75
Okomito ubrzanje poda vlaka	m/s ²	2,50	3,25	3,75

Da bi se moglo prikazati stanje geometrije kolosijeka, potrebno je numerički odrediti pokazatelje kvalitete. Pregled dostupne literature navodi da željezničke organizacije širom svijeta primjenjuju različite pristupe za razvoj pokazatelja kvalitete geometrije kolosijeka [18]. Na temelju detaljne inspekcije kolosijeka mjernim vozilom izračunani su glavni pokazatelji. U ovom ispitivanju, Q-vrijednost je izračunana kao u [17, 19] jednadžbom (1):

$$QI = 150 - \frac{100}{3} \cdot \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{HLim}} + 2 \cdot \frac{\sigma_I}{\sigma_{ILim}} \right] \quad (1)$$

gdje je:

- QI - pokazatelj stanja
- σ_H - prosječna standardna devijacija visine
- σ_I - prosječna standardna devijacija interakcije
- σ_{HLim} i σ_{ILim} - granice udobnosti za dani razred kolosijeka.

Standardna devijacija interakcije se računa kao kombinirani učinak nadvišenja i pozicije tračnice u poprečnom presjeku. C-vrijednost je izračunana za dulju dionicu kolosijeka te je izražena kao u [17, 19] jednadžbom (2):

$$C = \frac{\sum_i u_i}{TU} \cdot 100 \quad (2)$$

gdje je:

- C - indeks stanja
- TU - ukupna duljina razmatranog kolosijeka
- $\sum_i u_i$ - ukupna duljina kolosijeka na kojima su sve σ vrijednosti ispod granice udobnosti za dani razred kolosijeka [17].

Vrijednosti QI i C koeficijentata koje prelaze granicu intervencije prikazane su u tablici 3. Ti su pokazatelji stanja razmatrani tijekom razvoja pravila za M&R.

Tablica 3. Pokazatelji stanja

Indeksi situacije	AL	IL	IAL
QI	< 80	< 50	< 40
C	< 80	< 30	< 10

3.2. Tračnice

M&R aktivnosti na željezničkim kolosijecima uključuju remont tračnica zbog lomova ili oštećenja uslijed opterećenja, vremena i/ili oštećenja pri proizvodnji. Za potrebe promatranja ponašanja tračnica prikupljeni su sljedeći podaci: općenite informacije, precizna lokacija oštećenja tračnice u kolosijeku, datum, metoda određivanja oštećenja, karakteristike prometa i kolosijeka, karakteristike tračnica, zavarivanja ili navarivanja vozne površine, pri oštećenju, provedene radnje i opis zakazivanja.

Za opis stanja tračnica korištene su tri razine: oštećene tračnice, napuknute tračnice i slomljene tračnice, prema UIC 712 sustavu za kodiranje oštećenja kolosijeka [20]. Za M&R operacije korišteni su sljedeći izrazi kako bi osoblje za održavanje jednostavnije razumjelo preporuke:

- zadržati tračnicu pod promatranjem (AL)
- zamjena tračnice (IL)
- zabrana prometa i skora zamjena tračnice (IAL).

Vrijednosti izmjerenih oštećenja tračnica dobivene su iz različitih izvora, a njihove granične vrijednosti su prenesene u razvijenu DSS bazu podataka. To su: visinsko istrošenje glave tračnice (mm), bočno istrošenje glave tračnice (mm), profil tračnice, profil

voznog ruba glave tračnice, poprečni nagib tračnice, naboranost vozne površine (mm) i ekvivalentna koničnost.

S obzirom na metodu evaluacije (vizualno ispitivanje, ultrasonično ispitivanje itd.), granične vrijednosti otkazivanja tračnice definirane su prikladnim operacijskim intervencijama (ograničene brzine, operacijska ograničenja itd.) te prenesene u razvijenu DSS bazu podataka.

Prethodna istraživanja su pokazala da oštećenja tračnica uslijed zamora materijala slijede Weibullov zakon. Weibullova dvoparameterska distribucija primijenjena je u ovom istraživanju pri analizi podataka i radi predviđanja stope otkazivanja tračnica zato što ta metoda ima mogućnost podastrijeti prihvatljivo precizne analize otkazivanja i predviđanja [21, 22]:

$$F(M) = 1 - \exp\left[-(M/\eta)^\beta\right] \quad (3)$$

gdje je:

F(M) - kumulativna distribucija otkazivanja kolosijeka

M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)

h - parametar veličine

β - parametar oblika.

Parametar oblika β ima učinak na stopu otkazivanja komponente. Parametar veličine η je poznat i kao karakterističan vijek trajanja komponente. Razvijena pravila odlučivanja prema parametrima β i η prikazana su u tablici 4. [21].

Tablica 4. Weibullova distribucija parametara za kolosijeka

Parametar	Vrijednost	Odluka
Parametar oblika (β)	< 1	smrt u fazi dojenčeta
Parametar oblika (β)	1	nasumično otkazivanje
Parametar oblika (β)	> 1	faza zamora komponente
Parametar veličine (η)	≥ 1	više od 63,2 % jedinice je zakazalo

Podmazivanje ispusta vijenca kotača i voznog ruba glave tračnica je učinkovito rješenje za smanjenje trošenja tračnica i kotača, naročito u oštrim horizontalnim krivinama. Općenito, godišnja potrošnja maziva za podmazivanje kolosijeka iznosi od 0,7 do 2,5 kg/km. U ovom su istraživanju uzeti u obzir sljedeći parametri pri stvaranju pravila odlučivanja vezanih za podmazivanje kolosijeka: broj vlakova, horizontalna zakrivljenost kolosijeka, broj zakazivanja tračnica, kumulativno opterećenje, parametri Weibullove distribucije.

3.3. Pragovi

Odluke vezane za pragove su temeljene na podacima pohranjenim u bazi podataka (starost, vrsta, tonaža itd.), podacima mjerenja geometrije izvršenima mjernim vozilom te rezultatima vizualne procjene pragova. U Turskoj zasad pružni radnik ručno

pregledava željezničke pragove to jest, hoda duž kolosijeka i vizualno ocjenjuje svaki prag, [17, 23].

Dva najčešća oštećenja betonskih pragova su pucanje i površinska oštećenja (TCDD 2009.). Podaci o stanju drvenih i betonskih pragova na mreži TCDD-a prikazani su u tablicama 5. i 6. Istraživanja provedena na različitim konstrukcijama kolosijeka su pokazala da su istrošenja i oštećenja kod obiju vrsta pragova bila vrlo mala unutar relativno dugog perioda, ali da su rasla vrlo brzo u konačnom periodu. Stoga, ovaj fenomen je strogo nelinearan po svom ponašanju.

Eksponencijalna distribucija je često korištena distribucija kod sigurnosnog inženjerstva (eng. *reliability engineering*). Koristi se za modeliranje ponašanja jedinica koje imaju stabilnu stopu zakazivanja. Matematički, jednoparameterska eksponencijalna funkcija gustoće vjerojatnosti (eng. *probability density function*, pdf) je dana u [24] izrazom (4):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

gdje je:

f(t) - funkcija gustoće

λ - parametar veličine (stopa opasnosti)

t - vrijeme.

Jednoparameterska eksponencijalna kumulativna funkcija gustoće (F(t) ili cdf) dana je izrazom (5):

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Jednoparameterska eksponencijalna funkcija pouzdanosti (R(t)) dana je izrazom (6):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Općenito stanje pragova se može definirati trenutnim indeksom pružanja usluge (eng. Present Serviceability Index, PSI). U ovom je istraživanju jednoparameterska eksponencijalna funkcija cdf prepravljena te upotrijebljena jednadžba za određivanje PSI pragova [5, 17]:

$$PSI(M) = 1 - \exp\left[k_f \left(\frac{M}{M_L} - 1\right)\right] \quad (7)$$

gdje je:

M - kumulativno opterećenje ili vrijeme

M_L - granica kumulativnog opterećenja ili starosti

k_f - čimbenik prilagodbe starosti (ili kumulativnog opterećenja).

Vrijednosti PSI su također uzete u obzir tijekom M&R operacija za pragove. PSI vrijednosti su određene statističkim analizama i odlukama stručnjaka. Granične vrijednosti PSI su dane u tablici 7. koja uključuje i potrebne parametre za izračun PSI.

Tablica 5. Kriteriji nadgledavanja drvenih pragova

Stupanj oštećenosti	Status oštećenja	Odluka
1	Široke pukotine, čelična podložna ploča je uleknuta	Zamjena unutar 3 tjedna
2	Nema širokih pukotina, čelična podložna ploča je uleknuta	Zamjena unutar 12 tjedana
3	Prisutnost pukotina, čelična podložna ploča nije uleknuta	Promatranje stanja
4	Nema pukotina, čelična podložna ploča nije uleknuta	Bez akcije

Tablica 6. Kriteriji nadgledavanja betonskih pragova

Stupanj oštećenosti	Status oštećenja	Odluka
1	Značajno oštećenje (široke pukotine)	Zamjena unutar 3 tjedna
2	Značajno oštećenje (dugačke pukotine) <ul style="list-style-type: none"> • uzdužno ≥ 0,3 mm • pri trnu ≥ 0,1 mm • pri glavi ≥ 0,3 mm • poprečno ≥ 0,3 mm 	Zamjena unutar 12 tjedana
3	Oštećenje	Promatranje stanja
4	Lagano T površinsko oštećenje	Bez akcije

Tablica 7. Željeznički pragovi: PSI vrijednosti za tražene parametre

Vrsta pragova	Prometno opterećenje [MBT/god]	Koeficijent (k _p)	Vijek trajanja [godine]	Odluka (beton, tvrdo i meko drvo)
Beton	>15	5,2	35	0,6 < PSI ≤ 1,0: samo održavanje
Beton	≤15	5,2	40	
Tvrdo drvo	>15	5,2	25	0,4 < PSI ≤ 0,6: djelomična zamjena
Tvrdo drvo	≤15	5,2	30	
Meko drvo	>15	5,2	18	0,2 < PSI ≤ 0,4: planiranje remonta
Meko drvo	≤15	5,2	21	0,0 ≤ PSI ≤ 0,2: remont

3.4. Željeznički donji ustroj

Željeznički donji ustroj ima važnu ulogu u radnim svojstvima kolosijeka u odnosu na krutost podloge kolosijeka, održavanje geometrije kolosijeka i drenaže. Općenito, pojam željezničkog donjeg ustroja obuhvaća istovremeno i zastor i slojeve ispod zastora. Tijekom prikupljanja podataka uzeta je u obzir struktura kolosijeka prikazana na slici 5.

Pojmovi poput općenitog održavanja, remonta, rutinskog održavanja, radovi remedijacije, ojačanja i poboljšanja željezničkog donjeg ustroja služe kako bi definirali održavanje donjeg ustroja postojećih kolosijeka. Zemljani radovi su općenit pojam koji podrazumijeva usjeko, nasipe i prijelazne poprečne presjeke. U ovom je istraživanju željeznički donji ustroj klasificiran sljedećim terminima; geotehnička klasifikacija vrste tla, klasifikacija vrste tla prema nosivosti i podložnost tla smrzavanju [25]. Pouzdana zastorna prizma mora biti izvedena od materijala dobre granulacije, ali s vremenom prisutnost prašine i finih čestica u zastoru uzrokuje slijevanje kolosijeka i probleme pri dreniranju. Referentne vrijednosti za zastor i posteljicu su dane u tablici 8. Te vrijednosti su razmatrane tijekom M&R odluka. Uz to, pri razvoju pravila odlučivanja [26] uzeta je u obzir i norma za zastor željeznice EN 13450.

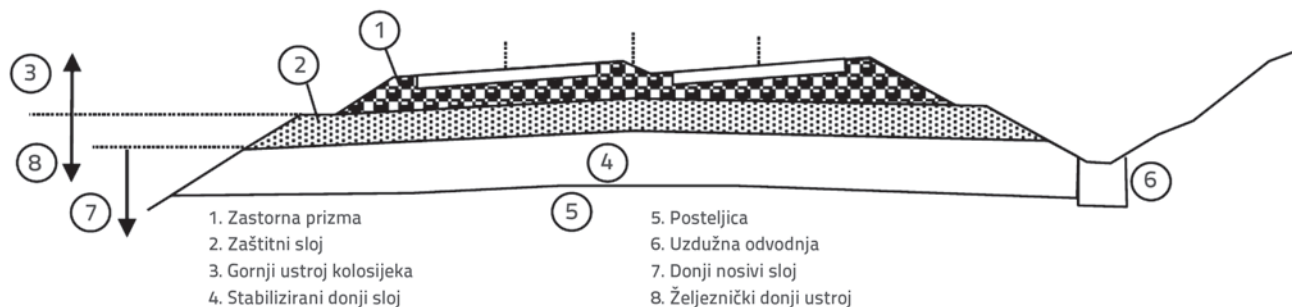
Tablica 8. Referentne vrijednosti za zastornu prizmu i posteljicu

Materijal	E [MPa]	v	c [MPa]	φ [°]	γ [kN/m ³]	Minimalna dubina [mm]
Zastor	130	0.2	0	45	15	300
Posteljica	120	0.3	0	35	19	150

Gdje je: E - modul elastičnosti, v - Poissonov koeficijent, c - kohezija, φ - kut trenja i γ - specifična težina.

Godišnji prosječni broj (l_m) radova podbijanja pragova može se statistički izračunati kao funkcija starosti kolosijeka za danu kategoriju prometa. Stoga se krivulja koja opisuje povećanje prosječnog godišnjeg broja tih radova tijekom vremena ($f(T)$) dobiva izrazom

$$l_m = f(T) \tag{8}$$



Slika 5. Shematski presjek željezničkog kolosijeka

Broj radova podbijanja (ℓ) za danu starost se može razlikovati od prosječnog godišnjeg broja (ℓ_m). U tom slučaju, za pojedinačnu dionicu kolosijeka, definira se koeficijent održavanja željezničkog donjeg ustroja (k) izrazom (9):

$$k = \frac{\ell}{\ell_m} \quad (9)$$

Kada ℓ premaši određenu graničnu vrijednost ($\ell_s = 6$), zahtijevana kvaliteta geometrije kolosijeka se više ne može u potpunosti održati. Tada je nužno provesti druge radove kako bi se pokušalo utjecati na smanjenje k vrijednosti [25, 27]. Koeficijent održavanja željezničkog donjeg ustroja k je poznat u svako vrijeme ako se vode redoviti zapisi o radovima održavanja rezine kolosijeka. Ako je temeljno tlo vrlo slabo, faktor k postiže visoke vrijednosti. U prosjeku, smatra se da vrijednost ovog koeficijenta iznosi 1. Ta vrijednost i druga zapažanja dobivena tijekom pregleda kolosijeka određuju mjere potrebne za: rutinsko održavanje, bilo koju lokaliziranu operaciju i remonte. Granične vrijednosti za k i pripadajuće odluke prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Koeficijent održavanja željezničkog donjeg ustroja

Granice [k]	Odluka
$k < 1$	Ispravni željeznički donji ustroj
$1 < k < 2,5$	Slojevi donjeg ustroja su neznatno poddimenzionirani
$2,5 < k < 5$	Poddimenzionirani slojevi donjeg ustroja, slojevi posteljice su loše kvalitete i odvodnja slabo funkcionira
$k > 5$	Poddimenzionirani slojevi donjeg ustroja, slojevi posteljice su loše kvalitete ili ne postoje i odvodnja slabo funkcionira

3.5. Troškovi životnog ciklusa

Troškovi životnog ciklusa (eng. *Life-cycle cost* ili LCC) obuhvaćaju sve troškove vezane za trajanje sustava, poput operativnih troškova, troškova održavanja, troškova energije i poreza izdvojenih iz kapitalnih troškova [28]. LCC je efektivan inženjerski alat koji pruža potporu izračunu, nabavi i održavanju komponenti glavnih sustava. Iz tih su razloga LCC analize uključene u razvoj ovog sustava.

U ovom su istraživanju horizontalne krivine različitih polumjera i inženjerski objekti (tuneli, mostovi, itd.) razmatrani kao pridruženi troškovi održavanja željezničkih kolosijeka. U horizontalnim krivinama kolosijeci su izloženi djelovanju bočnih sila. Zbog toga je stupanj propadanja kolosijeka veći u ostrim zavojima i duž njih se zamjena komponenti kolosijeka izvodi prečesto. Stoga su željeznički kolosijeci podijeljeni u različite dionice održavanja prema polumjeru horizontalne krivine, primjerice 0-200 m ($R_c = 1$), 200-400 m ($R_c = 2$), 400-600 m ($R_c = 3$) itd. Kolosijeci u horizontalnim krivinama polumjera većeg od 1800 m smatrani su kolosijecima u pravcu. Broj svake M&R aktivnosti unutar određenog perioda izračunan je prema kumulativnom prometnom opterećenju i in-

tervalnim vrijednostima koje odrede stručnjaci. Na primjer, M/M_{RGI} odgovara broju brušenja tračnica tijekom tog perioda. U ovoj jednadžbi M je kumulativno opterećenje (ili vrijeme), a je M_{RGI} interval brušenja i-tog zavoja u MBT. M_{RGI} je definiran parametrima poput geografske lokacije, vremenskih uvjeta, zavijenosti itd. koji imaju različite uloge unutar oblikovanja LCC jednadžbi.

Čak i kad su komponente kolosijeka u dobrom stanju, objekti mogu biti djelomično ili potpuno oštećeni iz različitih razloga primjerice zbog propuštanja vode, pucanja, zamora materijala i slično. U takvim situacijama nužno je popraviti oštećeni objekt tijekom potrebne M&R aktivnosti. To je i razlog zašto je ukupnim troškovima održavanja dodan i trošak održavanja objekata. Troškovi M&R aktivnosti određeni su pojednostavljenim TCDD izračunima [17, 28]:

Troškovi brušenja tračnica

$$RGC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{RGS} + (T_{RGI} \cdot C_L \cdot L_i \cdot n_{RGI}) + (T_{RGI} \cdot C_{ERG} \cdot L_i \cdot n_{RGI})) \cdot (M / M_{RGI})}{(1+r)^j} \quad (10)$$

gdje je:

- C_{RGS} - dodatni trošak brušenja zbog s-tog objekta, [TL]
- T_{RGI} - prosječno vrijeme brušenja tračnica u i-toj krivini, [h/km]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- n_{RGI} - broj prijelaza brušenja na i-toj krivini
- C_{ERG} - troškovi opreme za brušenje, [TL/h]
- M_{RGI} - interval za brušenje i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina

Troškovi podmazivanja tračnica

$$RLC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{RLS} + (T_{RLi} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{RLi} \cdot C_{ERL} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{RLi})}{(1+r)^j} \quad (11)$$

gdje je:

- C_{RLS} - dodatni trošak podmazivanja zbog s-tog objekta, [TL]
- T_{RLi} - prosječno vrijeme podmazivanja u i-toj krivini, [h/km]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{ERL} - troškovi opreme i materijala za premazivanje, [TL/h]
- M_{RLi} - interval za podmazivanje i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina

Troškovi zamjene tračnica

$$RRC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{RRS} + (C_R \cdot L_i) + (T_{RRi} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{RRi} \cdot C_{ERR} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{RRi})}{(1+r)^j} \quad (12)$$

gdje je:

- C_{RRS} - dodatni trošak zamjene zbog s-tog objekta, [TL]
- C_R - troškovi tračnica, [km/TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{ERR} - troškovi opreme za remont kolosijeka, [TL/h]
- T_{RRI} - prosječno vrijeme za remont kolosijeka i-te krivine, [h/km]
- M_{RRI} - interval za remont kolosijeka i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina.

Troškovi podbijanja pragova

$$TC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{TS} + (T_{Ti} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{Ti} \cdot C_{ET} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{Ti})}{(1+r)^j} \quad (13)$$

gdje je:

- C_{TS} - dodatni trošak podbijanja zbog s-tog objekta, [TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{ET} - troškovi opreme za podbijanje pragova, [TL/h]
- T_{Ti} - prosječno vrijeme za podbijanje pragova i-te krivine, [h/km]
- M_{Ti} - interval za podbijanje kolosijeka i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina

Troškovi zamjene zastora

$$BRC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{BRs} + (C_B \cdot L_i) + (T_{BRI} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{BRI} \cdot C_{EBR} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{BRI})}{(1+r)^j} \quad (14)$$

gdje je:

- C_{BRs} - dodatni trošak zamjene zastora zbog s-tog objekta, [TL]
- C_B - prosječni troškovi zastora, [km/TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{EBR} - troškovi opreme za remont zastora, [TL/h]
- T_{BRI} - prosječno vrijeme za remont zastora i-te krivine, [h/km]
- M_{BRI} - interval za remont zastora i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina

Troškovi rešetanja zastora

$$BCC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{BCs} + (T_{BCi} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{BCi} \cdot C_{EBC} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{BCi})}{(1+r)^j} \quad (15)$$

gdje je:

- C_{BCs} - dodatni trošak rešetanja zastora zbog s-tog objekta, [TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{EBC} - troškovi opreme za rešetanje zastora, [TL/h]
- T_{BCi} - prosječno vrijeme za čišćenje zastora i-te krivine, [h/km]
- M_{BCi} - interval za čišćenje zastora i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina

Troškovi zamjene pragova

$$SRC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{SRs} + (C_S \cdot L_i) + (T_{SRI} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{SRI} \cdot C_{ESR} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{SRI})}{(1+r)^j} \quad (16)$$

gdje je:

- C_{SRs} - dodatni trošak zamjene pragova zbog s-tog objekta, [TL]
- C_S - trošak pragova, [km/TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{ESR} - troškovi opreme za zamjenu pragova, [TL/h]
- T_{SRI} - prosječno vrijeme za zamjenu pragova i-te krivine, [h/km]
- M_{SRI} - interval za remont pragova i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina.

Troškovi zamjene pričvrstnog sustava

$$FRC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{FRs} + (C_F \cdot L_i) + (T_{FRI} \cdot C_L \cdot L_i) + (T_{FRI} \cdot C_{EFR} \cdot L_i)) \cdot (M / M_{FRI})}{(1+r)^j} \quad (17)$$

gdje je:

- C_{FRs} - dodatni trošak zamjene pričvrstnog sustava zbog s-tog objekta, [TL]
- C_F - trošak pričvrstnog sustava, [km/TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{EFR} - troškovi opreme za zamjenu pričvrstnog sustava, [TL/h]
- T_{FRI} - prosječno vrijeme za zamjenu pričvrstnog sustava i-te krivine, [h/km]
- M_{FRI} - interval za zamjenu pričvrstnog sustava i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina.

Troškovi inspekcije kolosijeka

$$TIC = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{TIs} + ((T_{Ti} \cdot C_L \cdot L) + (T_{Ti} \cdot C_{ETI} \cdot L)) \cdot (M / M_{Ti}))}{(1+r)^j} \quad (18)$$

gdje je:

- C_{Tis} - dodatni trošak inspekcije zbog s-tog objekta, [TL]
- C_L - prosječni troškovi rada, [TL/h]
- C_{ETI} - troškovi opreme za inspekciju kolosijeka, [TL/h]
- T_{Ti} - prosječno vrijeme za inspekciju kolosijeka i-te krivine, [h/km]
- M_{Ti} - interval za inspekciju kolosijeka i-te krivine, [MBT]
- M - kumulativno opterećenje (ili vrijeme)
- L_i - ukupna duljina dionice za održavanje, [km]
- r - diskontna stopa
- S - broj objekata
- R - broj klasa polumjera krivina
- N - uporabljivost tijekom godina.

4. Genetički algoritmi za održavanje i remont kolosijeka

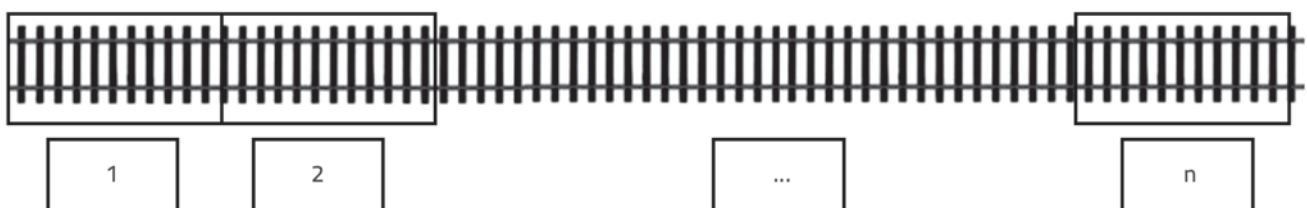
Kao što je prikazano u prethodnom dijelu, za potrebe izrade modela propadanja kolosiječne geometrije podijeljeni su željeznički kolosijeci u analitičke segmente (AS). Osim toga, ti su segmenti grupirani u dulje dionice koje se nazivaju dionice za održavanje. Analitički segmenti se promatraju kao gen, a dionice za održavanje se promatraju kao struktura kromosoma. Genetički algoritmi utvrđuju populaciju kromosoma koja predstavlja potencijalna rješenja optimizacijskog problema.

Struktura kromosoma je, u osnovi, apstraktno prikazivanje željezničke pruge. Svaka dionica pruge odgovara određenom genu (dijelu kromosoma) unutar strukture kromosoma (slika 6).

Za svaki analitički segment su prikupljeni sljedeći podaci: konstrukcija kolosijeka, karakteristike prometa, pružanje kolosijeka, okolišni čimbenici, geometrija kolosijeka te podaci o provedenom održavanju i remontu. Razvijeni sustav odredio je potrebne M&R aktivnosti za svaki analitički segment na temelju razvijenih pravila. Svaki se gen unutar kromosoma sastoji od popisa radova na održavanju ili remontu te sekcije. Kromosomi se sastoje od brojeva "1" i "0". Ako AS zahtijeva aktivnosti na održavanju ili remontu, pojavljuje se broj "1", a u suprotnom "0" (slika 7).

Dionica održavanja	Struktura kromosoma
1	[1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, ...]
2	[0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, ...]
3	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, ...]
4	[1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, ...]
...

Slika 7. Struktura kromosoma



Slika 6. Analitički segmenti (geni) i dionica održavanja (struktura kromosoma)

Optimizacija je proces prilagodbe ulaznih podataka karakteristikama naprave, matematičkog procesa ili eksperimenta kako bi se utvrdili minimalni ili maksimalni izlazni podaci ili rezultati (slika 8). Ulazni podaci se sastoje od parametara, a proces ili funkcija su poznati kao funkcija troška, funkcija cilja ili funkcija prikladnosti dok je izlazni rezultat trošak ili prikladnost.



Slika 8. Proces optimizacije

Prikladnost je definirana na način da visoko prikladni nizovi pojedinaca imaju visoke vrijednosti prikladnosti, a primjenjuje se kako bi se vrednovao svaki pojedinac unutar populacije. Važno je naglasiti da je prikladnost jedina poveznica između genetičkog algoritma i problema koji se rješava njegovom primjenom. Ona je mjera prema kojoj se odabire pojedinac za reprodukciju u sljedećoj generaciji [12, 13].

Kod problema maksimizacije ili dobivanja što veće vrijednosti primjerice profita ili funkcije korisnosti $u(x)$, ako $u(x) < 0$ za neki x , uvođenjem C_{min} koji ispunjava $u(x) + C_{min} > 0$, funkcije prikladnosti trebale bi se definirati kao $f(s) = u(x) + C_{min}$. No, ako vrijednost C_{min} nije unaprijed poznata, ona se može uzeti kao apsolutna vrijednost najmanje, do sada zapažene, vrijednosti $u(x)$ unutar postojeće populacije ili t generacija. Stoga, maksimizacijski problemi prikladnosti niza definiraju se kao u [12] sljedećim izrazom:

$$f(s) = \begin{cases} u(x) + C_{min}, & \text{if } u(x) + C_{min} > 0 \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (19)$$

gdje je:

- $f(s)$ - funkcija prikladnosti
- $u(x)$ - funkcija korisnosti
- C_{min} - funkcija troška.

Oblikovanje funkcije prikladnosti je provedeno s obzirom na udaljenost od stvarnog rješenja. Stvarno rješenje je izračunano prema prethodno opisanim mjerenim vrijednostima i pravilima. Mjerene vrijednosti su korištene kao ulazni podaci za pravila te je svako pravilo primijenjeno na svaku dionicu željezničke pruge kako bi se dobio stvarni rezultat. Dobiveni popis idealnih rješenja

je jedan od najvažnijih ulaznih podataka funkcije prikladnosti. Taj se popis koristi kako bi se usporedili pojedinačni kromosomi i izračunale razlike između stvarnog rješenja i nasumično generiranog kromosoma. Na slici 9. prikladnost (N_i) odgovara broju M&R radova.

Dionica održavanja	Struktura kromosoma	Prikladnost
1	[1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, ...]	N_1
2	[0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, ...]	N_2
3	[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, ...]	N_3
4	[1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, ...]	N_4
...

Slika 9. Funkcija prikladnosti

GA započinje sa skupinom kromosoma poznatih pod imenom populacija. Populacija je apstraktno predstavljanje prostora rješenja. Članovi populacije su nasumično popunjene strukture kromosoma. Provedena reprodukcija ili selekcija odabire pojedince unutar populacije koji će stvoriti potomke za sljedeću generaciju i utvrđuje koliko će potomaka svaki od njih stvoriti. Postoje brojne metode za implementaciju reprodukcije, a jedna od uobičajenih metoda je "roulette" odabir, koju je predložio Holland [13]. Osnovna je ideja odrediti vjerojatnost selekcije za svakog pojedinca proporcionalno vrijednosti prikladnosti. Naime, kod "roulette" odabira, izračunom prikladnosti $f_i (≥ 0)$, $i = 1, …, n$ za svakog pojedinca i i ukupne sume $\sum_{j=1}^n f_j$, vjerojatnost odabira ili vjerojatnost preživljavanja svakog pojedinca i je određena kao u [13] jednačbom

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \tag{20}$$

gdje je:

- p_i - vjerojatnost i -tog pojedinca
- f_i - i -ta vrijednost prikladnosti
- f_j - j -ta vrijednost prikladnosti
- n - broj pojedinaca.

Veličina populacije ima izravni učinak na rješenje i radnu učinkovitost sustava. Velika populacija daje preciznije rezultate, ali nisku učinkovitost. Ako se veličina populacije smanji, tada rezultat možda neće biti točan, ali se radna učinkovitost povećava. Postupak križanja koristi se kako bi se stvorile nove generacije iz postojećih pojedinaca. Tim se postupkom kombiniraju najbolja svojstva svakog gena u jednom kromosomu, najčešće zamjenom jednog ili više gena kromosoma. Postupak križanja je oblikovan tako da maksimizira vrijednost prikladnosti kromosoma potomka (slika 10.).

Kromosom	Križanje
[0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]	→ [0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]
[1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]	→ [1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]
[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1]	→ [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1]
[0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]	→ [0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1]

Slika 10. Postupak križanja

Nakon postupka križanja, na nastali kromosom potomka primjenjuje se funkcija prikladnosti. Izračunana vrijednost prikladnosti uspoređuje se s postojećim vrijednostima prikladnosti populacije. Ima li potomak nižu vrijednost prikladnosti od bilo kojeg drugog postojećeg kromosoma, tada se potomak izuzima iz populacije. U suprotnom slučaju, kromosom ostaje unutar populacije kako bi stvarao nove pojedince.

Postupak mutiranja se uvodi nakon postupka križanja. Cilj mu je promijeniti nasumično odabrana svojstva postojeće strukture kromosoma. Ovaj postupak nastoji spriječiti da se rješenje zatoči u lokalnim minimumima, odnosno najnižim ekstremnim vrijednostima funkcije. Taj se postupak ne primjenjuje na sve kromosome, a kromosomi za mutaciju se odabiru nasumično iz populacije.

Par se gena pojedinca, stvoren križanjem, mijenja kako bi se spriječio rezultat. Na slici 11 vidljivo je da se gen koji prolazi proces mutacije javio kao rezultat mutacije nasumično odabranih gena pojedinca stvorenog križanjem. Ovo oblikovanje služi kako bi se izbjegli rezultati koji navode na krivi zaključak i to na način da sprječavaju smanjenje do lokalnih minimuma populacija koje imaju veliki broj kromosoma. Proces mutiranja ne provodi se na svakom pojedinca, već je primijenjen nasumično na pojedinim kromosomima kako bi se spriječilo da svi pojedinci prođu proces mutacije.

Kromosomi	Mutacije
[0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0]	→ [0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0]
[1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]	→ [1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]
[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1]	→ [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1]
[0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1]	→ [0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1]

Slika 11. Postupak mutiranja

5. Studija slučaja

Razvijeni sustav je uspješno primijenjen na TCDD uz pomoć lokalnog osoblja. Potrebni podaci preneseni su u bazu podataka sustava iz postojećih baza i sustava za njihovo prikupljanje. Osnovna svojstva analiziranih željezničkih kolosijeka prikazana su u tablici 10.

Tablica 10. Svojstva analiziranog željezničkog kolosijeka

Svojstva kolosijeka	Arifiye-Eskisehir
Maksimalna brzina [km/h]	120
Ukupna duljina [km]	180
Minimalni polumjer horizontalne krivine [m]	256
Maksimalno osovinsko opterećenje [t]	22
Maksimalni nagib [%]	27,55
Tip tračnice	S49
Tip pragova	drveni i betonski
Spoj tračnica	sastavi i DTT



Slika 12. TCDD željeznička mreža i Arifiye-Eskisehir željeznička pruga

Sustav je primijenjen na željezničkoj pruzi između Arifiye i Eskisehira. To je konvencionalna pruga duljine oko 180 km (slika 12.). Kolosijek je podijeljen u 720 "analitičkih segmenata" (AS), duljine oko 250 m.

Korišteni su podaci o geometriji kolosijeka prikupljeni pomoću beskontaktnog i kontaktnog mjernog vlaka. Beskontaktni vlak, Piri Reis u vlasništvu TCDD-a, mjeri profil tračnica i ubrzanja kao i geometriju kolosijeka. Kao povijesni podaci o stanju geometrije

Tablica 11. Optimalni M&R radovi i rezultati genetičkog algoritma za svaki analitički segment (AS)

AS	Optimalni M&R	GA rješenje	AS	Optimalni M&R	GA rješenje	AS	Optimalni M&R	GA rješenje
1	BT	BT	31	GC	GC	61	RG	RG
2	BT	BT	32	GC	GC	62	RG	RG
3	BT	BT	33	GC	GC	63	RG	RG
4	BT	BT	34	GC	GC	64	RG	RG
5	BT	BT	35	GC	GC	65	RG	RG
6	BT	BT	36	GC	GC	66	RG	RG
7	BT	BT	37	GC	GC	67	RG	RG
8	BT	BT	38	GC	GC	68	IR	SFBR & GC
9	BT	BT	39	SFR	SFR	69	IR	SFBR & GC
10	BT	BT	40	SFR	SFR	70	IR	SFBR & GC
11	BT	BT	41	SFR	SFR	71	IR	SFBR & GC
12	BSR	BT	42	SFR	SFR	72	IR	SFBR & GC
13	BSR	BT	43	SFR	SFR	73	IR	SFBR & GC
14	BSR	BT	44	SFR	SFR	74	IR	SFBR & GC
15	IR	RSFR	45	SFR	SFR	75	IR	SFBR & GC
16	IR	RSFR	46	SFBR	SFBR	76	BT	BT
17	IR	RSFR	47	SFBR	SFBR	77	BT	BT
18	IR	RSFR	48	SFBR	SFBR	78	BT	BT
19	IR	RSFR	49	SFBR	SFBR	79	BT	BT
20	IR	RSFR	50	RL	RL	80	BT	BT

kolosijeka korišteni su podaci dobiveni mjerenjima beskontaktnog vlaka. Zabilježeni podaci o geometriji kolosijeka sadrže profile lijeve i desne tračnice, smjer njihova pružanja te vrijednosti zakrivljenosti ravnine kolosijeka i širine kolosijeka mjerenih svakih 25 cm s duljinom luka od 18,9 m. TCDD koristi i prijenosne mjerne uređaje kako bi prikupili podatke o tračnicama i pragovima. TCDD ima i geotehničke laboratorije za ispitivanje materijala slojeva željezničkog donjeg ustroja.

Tablica 11. objedinjuje rezultate analize s ulaznim podacima koji se sastoje od 80 analitičkih segmenata AS koji odgovaraju dionicama održavanja. Prvi stupac tablice predstavlja AS. Drugi stupac predstavlja optimalna (neograničena) rješenja dobivena putem interpretacije pravila odlučivanja o provedbi radova. Zadnji stupac predstavlja rješenja koja je predložio genetički algoritam GA.

Metoda optimizacije temeljena na GA je generirala M&R radove različite od optimalnih rješenja za približno 20 % od ukupnih dionica prikazanih u tablici 11. Također, metoda optimizacije temeljena na GA je proizvela različite M&R radove za ostale dionice. Ukupno, ta je metoda proizvela različite rezultate za približno 17 % od 720 analitičkih segmenata u odnosu na optimalno rješenje. GA metoda je koristila sve nužne podatke o željezničkim kolosijecima, opisane u prethodnim poglavljima, pravila vjerojatnosti promjene umjesto determinističkih pravila, kodirala je set parametara a ne same parametre, te je tražila unutar točaka populacije umjesto u pojedinačnoj točki. Posljedično, optimizacijska metoda na temelju GA je proizvela najbolja rješenja za dionice unutar danih ograničenja.

6. Zaključak

Predloženi sustav za potporu odlučivanju temeljen na genetičkom algoritmu za upravljanje M&R aktivnostima na željeznič-

kim kolosijecima primijenjen je kao alat za optimizaciju. Razvijeni sustav podupire sustav upravljanja M&R aktivnostima koji je temeljen na stanju kolosijeka, a koristi sve prijeko potrebne podatke. Sustav je u najvećoj mjeri ispunio očekivanja omogućujući rješavanje teškog problema održavanja stanja kolosijeka na potrebnoj razini uz minimalne troškove održavanja. Genetički su algoritmi, koji predstavljaju snažne prilagodljive metode optimizacije temeljene na biološkim principima, služili za pronalazjenje optimiziranih M&R radova na željezničkim kolosijecima. Genetički algoritmi su uspješno primijenjeni u ovom istraživanju, a dobiveni rezultati su prihvatljivi. Rezultati istraživanja su pokazali da se, s optimalnim odabirom veličine populacije i vremena, može utvrditi najbolje rješenje unutar danih ograničenja za potrebe provedbe M&R aktivnosti na kolosijecima. S povećanjem osjetljivosti referentnih podataka mogu se dobiti i preciznija rješenja. Razvoj optimizacijskog sustava ima sposobnost samoobnavljanja tijekom vremena. Korisnici imaju mogućnost promijeniti pojedina pravila ili uključiti nova kako bi prilagodili sustav stvarnom stanju.

U radu opisan sustav razvijen je za konvencionalne željezničke kolosijeka u zastornoj prizmi. Iako zahtijeva puno veće početne investicije, kolosijek na čvrstoj podlozi, zbog malih troškova M&R aktivnosti, povoljna je alternativa kolosijeku u zastornoj prizmi. Taj tip kolosijeka ima široku primjenu u Turskoj, na tramvajskim i metro sustavima te na sustavima lake željeznice. TCDD planira uvesti ovakve konstrukcije u željezničkim tunelima te na mostovima i vijaduktima konvencionalnih i brzih željezničkih linija. To će zahtijevati kombinirane M&R planove koji vode računa o različitim vrstama prometa (brze željeznice, laka gradska željeznica itd.) i različitim konstrukcijama željezničkog gornjeg ustroja (pločasti kolosijek itd.). Sve su to razlozi da će se razvijeni sustav donošenja odluka o održavanju željezničkih pruga morati prilagoditi novom okruženju.

LITERATURA

- [1] Jovanovic, S., Guler, H., Coko, B.: Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems, GRADEVINAR, 67 (2015) 3, pp. 247-258, <https://doi.org/10.14256/JCE.1194.2014>
- [2] Rashidi, M., Lemass, B., Gibson, P.: Decision support system for concrete bridge maintenance, ISCM II and EPMESC XII, PTS 1 and 2, AIP Conf. Proc., 1233 (2010), pp. 1372-1377, <https://doi.org/10.1063/1.3452105>
- [3] Burstein, F., Holsapple, C.W.: Handbook on Decision Support Systems 1, Springer-Verlag, Berlin, pp. 21-54, 2008, https://doi.org/10.1007/978-3-540-48713-5_2
- [4] Yehia, S., Abudayyeh, O., Fazal, I., Randolph, D.: A decision support system for concrete bridge deck maintenance. Adv. Eng. Software, 39 (2008) 3, pp. 202-210.
- [5] Decision Support System for Permanent Way Maintenance and Renewal (Specification for a prototype based on expert system), Report RP1, European Rail Research Institute (ERRI) - Specialist Committee D 187, Utrecht, The Netherlands, 1993.
- [6] Guler, H.: Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management, Journal of Computing in Civil Engineering, 27 (2013) 3, pp. 292-306.
- [7] Deluka-Tibljias, A., Karleusa, B., Dragicevic, N.: Review of multicriteria-analysis methods application in decision making about transport infrastructure, GRADEVINAR, 65 (2013) 7, pp. 619-631.
- [8] Taysi, N., Gogus, M.T., Ozakca, M.: Optimization of arches using genetic algorithm, Computational Optimization and Applications, 41 (2008) 3, pp. 377-394.

- [9] Lance, D.: The practical handbook of genetic algorithms: Applications, 2nd edition, CRC Press, New York, USA, 2001.
- [10] Grimes, C.: Application of Genetic Techniques to the Planning of Railway Track Maintenance Work, in A. Zalzal (ed.), First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Sheffield, UK, Conference Publication 414, IEE, University of Sheffield, UK, 1995, <https://doi.org/10.1049/cp:19951093>
- [11] Milajic, A., Beljakovic, D., Petronijevic, P.: Genetic algorithms for assigning tasks to construction machine operators, GRADEVINAR, 63 (2011) 8, pp. 749-755.
- [12] Sakawa, M.: Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA, 2002, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1519-7>
- [13] Holland, J. H. (1992). "Adaptation in Natural and Artificial Systems", 2nd edition, MIT Press, Cambridge, UK.
- [14] Guler, H., Jovanovic, S., Evren, G.: Modelling railway track geometry deterioration, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 164 (2011) 2, pp. 65 -75, <https://doi.org/10.1680/tran.2011.164.2.65>
- [15] Jovanovic, S., Bozovic, D., Tomicic-Torlakovic, M.: Railway infrastructure condition-monitoring and analysis as a basis for maintenance management, GRADEVINAR, 66 (2014) 4, pp. 347-358, <https://doi.org/10.14256/JCE.959.2013>
- [16] BSI British Standards. Railway applications. Track. Track geometry quality. Geometric quality levels, 2008, BS 13848: Part 5, London.
- [17] Turkish State Railways (TCDD). (2014). TCDD Annual Maintenance and Renewal Report, TCDD Permanent Way Department, Ankara, Turkey.
- [18] Sadeghi, J.: Development of Railway Track Geometry Indexes Based on Statistical Distribution of Geometry Data, Journal of Transportation Engineering, 136 (2010) 8, pp. 693-700, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2010\)136:8\(693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:8(693))
- [19] Patra, A.P., Söderholm, P., Kumar, U.: Uncertainty estimation in railway track life-cycle cost: A case study from Swedish National Rail Administration, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part F - Journal of Rail & Rapid Transit, 223 (2009) 3, pp. 285-293, <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT235>
- [20] International Union of Railways (UIC). UIC 712: Rail defects, 4th Ed., Paris, 2012.
- [21] Kumar, S.: A Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks, PhD thesis, Luleå University of Technology, Lulea, Sweden, 2006.
- [22] Evans, M., Hastings, N., Peacock, B.: Statistical Distributions, 3rd edn. John Wiley, New York, USA, 2000.
- [23] Yella, S., Dougherty, M., Narendra, K.G.: Condition monitoring of wooden railway sleepers, Transportation Research Part C, 17 (2009) 1, pp. 38-55, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.06.002>
- [24] O'Connor, A.N.: Probability Distributions Used in Reliability Engineering, the Reliability Information Analysis Center (RIAC), University of Maryland, College Park, Maryland, USA, 2011.
- [25] International Union of Railways (UIC). (2008). UIC 719: Earthworks and track bed for railway lines, UIC, 3rd Ed., Paris.
- [26] BSI British Standards. Aggregates for railway ballast, 2003, BS 13450, London.
- [27] International Union of Railways (UIC). (2009). UIC 714: Classification of lines for the purpose of track maintenance, UIC, 4th Ed., Paris.
- [28] Patra, A.P.; Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses, PhD thesis, Luleå University of Technology, Lulea, Sweden, 2009.