

Primljen / Received: 10.3.2014.

Ispravljen / Corrected: 4.8.2014.

Prihvaćen / Accepted: 4.9.2014.

Dostupno online / Available online: 10.11.2014.

Optimizacija i rangiranje tipova gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava

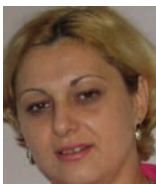
Autori:



Prof.dr.sc. **Mirjana Tomičić-Torlaković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
mtomicic@grf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. **Goran Ćirović**, dipl.ing.građ.
Visoka građevinsko-geodetska škola, Beograd
cirovic@sezampro.rs



Doc.dr.sc. **Snežana Mitrović**, dipl.ing.građ.
Visoka građevinsko-geodetska škola, Beograd
mitrozs@sezampro.rs



Mr.sc. **Vladan Branković**, dipl.ing.građ.
Ministartvo građevinarstva, saobraćaja i
infrastrukture, Beograd, Srbija
skak89@gmail.com

Pregledni rad

Mirjana Tomičić-Torlaković, Goran Ćirović, Snežana Mitrović, Vladan Branković

Optimizacija i rangiranje tipova gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava

U radu predloženi proces procjene ima cilj osigurati odluku o izboru najboljega gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava za sve zainteresirane, uzimajući u obzir okolnosti određenog grada. U tu svrhu istraživana su različita rješenja i rangirana su pomoću teorije višekriterijskog vrednovanja da bi se odredilo koji tip se može preporučiti. Autori nemaju namjere popularizirati niti laki tračnički sustav kao vrstu javnog putničkog prijevoza niti tip gornjeg ustroja.

Ključne riječi:

laki tračnički sustav, konstrukcija kolosijeka, kriterij procjene, alternative, proces optimizacije, rangiranje, teorije višekriterijskog vrednovanja

Subject review

Mirjana Tomičić-Torlaković, Goran Ćirović, Snežana Mitrović, Vladan Branković

Optimisation and ranking of permanent way types for light rail systems

The evaluation process proposed in the paper is aimed at enabling all interested parties to select the best permanent way type for light track systems, taking into account particular features of every urban area. To this effect, various solutions were studied and ranked by means of the multicriteria evaluation theory in order to determine which specific type can be recommended. The authors do not wish to favour neither the light rail system as a type of public passenger transport nor any particular type of permanent way.

Key words:

light rail system, track structure, evaluation criterion, alternatives, optimization process, ranking, multicriteria evaluation theory

Übersichtsarbeit

Mirjana Tomičić-Torlaković, Goran Ćirović, Snežana Mitrović, Vladan Branković

Optimierung und Einordnung von Oberbautypen leichter Eisenbahnsysteme

In der vorliegenden Arbeit wird ein Bewertungsverfahren vorgeschlagen, das anstrebt unter Berücksichtigung gegebener Stadtverhältnisse Entscheidungen bezüglich der Auswahl eines für alle Interessenten optimalen Oberbaus für leichte Eisenbahnsysteme zu ermöglichen. Dazu sind verschiedene Lösungen durch die Theorie der Multi-Kriterien-Analyse rangiert, um zu ermitteln, welcher Typ empfehlenswert ist. Die Autoren haben nicht die Absicht leichte Eisenbahnsysteme im öffentlichen Personenverkehr oder bestimmte Oberbautypen zu popularisieren.

Schlüsselwörter:

leichte Eisenbahnsysteme, Gleisstruktur, Bewertungskriterien, Alternative, Optimierungsprozess, Einordnung, Theorie der Multi-Kriterien-Analyse

1. Uvod

Laki tračnički sustav kao posebna vrsta javne gradske putničke željeznice sastavni je dio javnih transportnih sustava u mnogim gradovima. Kao hibridni tip javnog prijevoza, drugim riječima sinergična kombinacija aspekata gradskog tramvaja i konvencionalnog vlaka, teško se može definirati u jednoj rečenici. Najpogodnija definicija lakog tračničkog sustava dana je u literaturi [1]: *Laki tračnički sustav je oblik prijevoza manjeg kapaciteta koji uglavnom koristi zaseban koridor i električno napajana tračnička vozila sposobna za rad višedijelnih jedinica.*

Blizina susjednih zgrada, potreba za dijeljenjem trase s cestovnim prometom i problem zaštite okoline od vibracije i buke glavna su ograničenja za projekt kolosijeka i izgradnju [2].

Laki tračnički sustav je zapravo ili nova lokalna željeznica ili češće unaprijeđeni tramvajski sustav (slika 1.). Mnogi gradovi, primjenom novog termina "laki tračnički sustav", žele unaprijediti svoj prestiž i predočiti javnosti bolju sliku o svojem gradu i njegovoj politici [3].



Slika 1. Laki tračnički sustav razvijen od tramvaja u Beogradu

Projektiranje i građenje lakog tračničkog sustava je više-disciplinarno i međudisciplinarno. Izbor najboljeg tipa gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava je težak i složen zadatak zbog mnogo faktora koje treba razmatrati. Situacija je komplicirana jer ima mnogo različitih varijanti kolosiječnih sustava koji su trenutno dostupni na tržištu. Utjecajni faktori (kriteriji procjene ili atributi) mogu biti tehnički i odnositi se na projekt i gradnju, drugi su specifični za promet i održavanje, treći se odnose na zaštitu životne okoline, a neki pak na sigurnost. Svi ti faktori specifični su za svaki posebni skup okolnosti i treba ih procijeniti za njih. S druge strane, dostupnost je različita za svakog dobavljača gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava, ovisno o njihovim potrebama, prednostima, dostupnim novčanim sredstvima i lokalnoj situaciji. Svaki dobavljač teži najboljem rješenju što znači maksimum prednosti s većinom zadovoljenih kriterija u okviru raspoloživih sredstava. Zadatak je donijeti odluke za izbor najpovoljnijega rješenja konstrukcije gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava analizom više utjecajnih faktora. MaVT (multi-value attribute theory) teorija višekriterijskog vrednovanja za rješenje ovog višekriterijskog problema donošenja odluke izabrana je kao pogodna.

2. Trenutačno stanje u literaturi

Budući da je u zakonodavstvu još uvijek teško naći pravila, pa čak i dosljedne informacije o primijenjenom iskustvu projektiranja, mnogi su projekti lakog tračničkog sustava izvedeni primjenom različitih kriterija prikupljenih iz veoma različitih izvora. Projektanti lakog tračničkog sustava bili su prinuđeni oslanjati se na uhodanu praksu tramvaja (takve su BOStrab regulative u Njemačkoj) ili na teške tračničke sustave i konvencionalnu željeznicu, a to često ne odgovara lakim tračničkim sustavima. Posljedica je toga da su kriteriji za projektiranje u mnogim slučajevima nedosljedni. Štoviše, mnogi projekti koji su već izgrađeni imaju probleme u održavanju zbog neslaganja između konstrukcije kolosijeka i vozila koja se po tim kolosijecima trebaju kretati.

Priručnik za projektiranje kolosijeka za lake tračničke sustave, poznat kao "TCRP Report 57" iz godine 2000. i njegovo drugo izdanje, "TCRP Report 155" iz 2012. godine [4] daju jedinstven izvor informacija i suvremeni vodič za projektiranje lakih tračničkih sustava. Međutim, urednici naglašavaju da se svi prezentirani podaci i objašnjenja trebaju shvatiti samo informativno, a da korisnici moraju snositi svu odgovornost za izbor, projekt i gradnju prema preporukama.

Većina ostale literature, gotovo sva, koja je pregledana, bavila se ekonomskim ili prometnim analizama, a nijedna nije procjenjivala konstrukciju kolosiječnog gornjeg ustroja.

Gunduz, Ugur i Ozturk [5] razvili su modele za višekriterijsku regresiju i modele umjetnih neuronskih mreža za procjenu troškova radova izgradnje lakog tračničkog sustava u Turskoj, u fazi donošenja odluke o projektu.

Kim i drugi [6] obavili su istraživanje u kojemu su procjenjivali približne troškove izgradnje konstrukcija lakog tračničkog sustava (na primjer mostova, tunela itd.), a razvili su i sustav za analizu ekonomske izvodljivosti konstrukcija lakog tračničkog sustava da bi dali podršku racionalnom procesu odlučivanja.

De Bruijn i Veneman [7] prezentiraju proces donošenja odluke s više sudionika da bi se donijele ispravne odluke. Oni su pokazali da povezivanje lakih tračničkih sustava s različitim tehničkim sustavima povećava njihovu tehničku i društvenu kompliciranost. Izbor se može promijeniti tijekom vremena i ne postoji "jedinstveni pravi izbor".

De Bruker, Maharis i Vebeke [8] pokazali su da se višekriterijska analiza može korisno primijeniti u okviru procjene prometnog projekta više vlasnika. Hijerarhija odlučivanja o prednosti provodi se u više nivoa.

Litman [9] sumira nalaze jedne detaljne analize prometnih dobitaka. Li i Yin [10] daju osnove za točni proračun ukupnih troškova gradskog tračničkog prijevoza. Polazeći od teorije lanaca, interna cijena dijeli se na troškove preliminarnog planiranja i projekta, izgradnje i prometa. Eksterna cijena dijeli se na troškove zagađivanja zraka, prometnih nesreća i buke i svi su kvantificirani.

Huang i Xia [11] analiziraju socijalne i ekonomske značajke urbanog tračničkog prijevoza i upozoravaju na direktne i indirektne posljedice njegove izgradnje na privredni razvoj.

Jha i Samanta [12] za optimizaciju linija tračničkog prijevoza upotrebljavaju genetički algoritam i geografski informacijski sustav. Oni formuliraju dva tipa troškova: troškove operatera i korisnika.

Hobak [13] je napravio grubu procjenu izgradnje lakog tračničkog sustava, osnovanu samo na kilometraži i na tipu prioriteta prolaska. Ta je procjena služila kao indikator hoće li projekt ostati u okvirima proračuna.

Zhao i Wei [14] u svojoj studiji su razvili model upotrebljavajući metodu sveobuhvatne faze procjene u više nivoa. Usvajaju se sljedeći značajni ciljevi: privlačnost za putnike, zaštita životne okoline, izvodljivost projekta i promet. Da bi odredili koji će od ovih ciljeva imati koliko važnost oni upotrebljavaju metodu matrične analize. Rezultati pokazuju da je ovaj model upotrebljiv u procesu donošenja odluka s više varijabli na više nivoa, a to je korisno kad se planira gradski tračnički sustav.

Branković [15] i Tomičić-Torlaković i Branković [16] izveli su usporednu analizu lakih tračničkih konstrukcija sa stajališta tehničkih, ekonomskih, prometnih i ekoloških zahtjeva.

Na ovogodišnjem skupu TRB 2014, samo su dva rada obrađivala lake tračničke sustave, ali u vezi s prometnim problemima. Jha i drugi [17] razmatrali su raspoložive analitičke modele za optimizaciju trasa i za lociranje stanica, imajući na umu različita ograničenja projekta i prometa. Zlatković i Stevanović [18] ocjenjivali su kombinirane utjecaje povećane frekventnosti vozila lakog tračničkog sustava, kao i strategije predviđenih prioriteta prometa na koridoru i preporučenih mogućih poboljšanja na kritičnim lokacijama, upotrebom mikrosimulacijskog računalnog programa i prometnih kontrola.

Prema navedenoj literaturi, vidimo da ocjenjivanje i rangiranje kolosiječnih konstrukcija nisu tema niti jednog rada, nego se još uvijek zasnivaju na iskustvu i na empirijskim odnosima umjesto da se proučavaju pomoću tehnika numeričke optimizacije.

3. Opcije/alternative za gornji ustroj lakog tračničkog sustava

Proces procjenjivanja i optimizacije za odabir najbolje opcije za kolosijek lakog tračničkog sustava obavlja se za dvanaest tipova gornjeg ustroja. Odabrani su na osnovi učestalosti njihove primjene u europskim gradovima. Gornji ustroj za lake tračničke sustave može se podijeliti prema materijalu kolosiječne podloge:

- kolosijeci u zastoru i
- kolosijeci bez zastora ili tzv. kolosijeci na čvrstoj podlozi (beton ili asfalt).

Tipovi gornjeg ustroja bez zastora dijele se po načinu oslanjanja tračnice, na dvije vrste: na diskretnim osloncima i kontinuirano oslonjene, [15, 19, 20]. Razmatra se kao specijalno rješenje i takozvana konstrukcija s "ogibljenim masama" (eng. *mass-spring*). Tračnice s diskretnim osloncima

mogu biti s pragovima ili bez njih. Kolosijek s pragovima može se zasnivati:

- na kompaktnim rješenjima, gdje su pragovi ugrađeni u konstrukciju i
- na rješenju s osloncima, gdje se pragovi postavljaju odozgo na čvrstu podlogu.

Kolosijeci u zastoru se obilježavaju kao opcija 1, koja se obično koristi na onim trasama gdje je laki tračnički sustav razdvojen od cestovnog prometa (u prigradskim zonama).

Diskretno oslonjene tračnice s pragovima ugrađenim u beton (kompaktno tehničko rješenje) (opcije 2 do 4) uključuju sve "Rheda" tipove za kolosijeke lakog tračničkog sustava (Rheda City, Rheda NBS, Rheda City Berlin) [20] za koje je uobičajeno da se dvodijelni betonski pragovi ugrađuju u betonske nosive slojeve.

Diskretno oslonjene tračnice s pragovima položenih na čvrstu podlogu (opcije 5 i 6) uključuju ATD kolosijeke s dvodijelnim pragovima na asfaltnim slojevima, Stedef sustav s "obloženim" betonskim blokovima i slično.

Diskretno oslonjene tračnice bez pragova (opcije 7 do 9) obično se primjenjuju kod sustava s montažnim elementima kao što su BÖGL pločasti kolosiječni sustav, WSG kolosiječni sustav s prethodno izvedenim betonskim uzdužnim okvirima i INPLACE kolosiječni sustav s uzdužnim gredama, i tako dalje [20].

Kontinuirano oslonjene tračnice (opcije 10 i 11) zastupljene su u sustavima kao što su STRAILastik kolosiječni okviri, INFUNDO kolosijeci na pločama sa žljebovima, ORTEK kolosiječni sustav, PHOENIX kolosiječni sustav, CDM Cocon kolosijeci, i slično.

Specijalna rješenja za gornji ustroj lakog tračničkog sustava mogu biti raznovrsna, s ciljem da se zadovolje zahtjevi izolacije i udobnosti. Neki od njih su sustavi s "ogibljenim masama", i to tri razna tipa: puni površinski elastični sloj, linearni elastični oslonac, i diskretni elastični oslonac [21, 22].

4. Kriteriji/atributi za procjenu

Svi spomenuti sustavi kolosiječnog gornjeg ustroja za laki tračnički sustav moraju ispuniti različite kriterije/atribute za procjenu i zadovoljiti niz zahtjeva. Za uspoređivanje rješenja primjenjuje se dvadeset osam kriterija:

- tehnički/projektantski kriteriji;
- kriteriji vezani za promet i održavanje;
- kriteriji utjecaja na životnu okolinu i
- kriteriji vezani za sigurnost.

Svi kriteriji su samo indikativni i mogu se, ako je potrebno, izostavljati ili mijenjati. Možda se oni odnose samo na neke određene okolnosti i trebaju biti vrednovani ako takve okolnosti postoje. Svakom kriteriju dodjeljuje se određena težina na osnovi stupnja važnosti, tj. ovisno o važnosti tog kriterija za donošenje konačne odluke o izboru kolosiječnog sustava, a može se mijenjati ovisno o prednosti (preferenciji) sudionika. U ovom radu, u procesu optimizacije, uzimaju se u

obzir preferencije investitora, izvođača i putnika (tablica 2.). Vrednovanje po važnosti se kreće od 1 (nevažno),... preko 4 (manje važno),... i 7 (važno),... pa sve do 10 (veoma važno).

Troškovi izgradnje kolosiječnog sustava određenog tipa ovisit će o lokalnim uvjetima i o dužini kolosiječne dionice [23]. Prema sadašnjoj spoznaji svi tipovi kolosijeka na čvrstoj podlozi skuplji su za gradnju, i to od približno 1,2 puta (kolosijek bez pragova) do čak 2,6 puta, od kolosijeka u zastoru (500 eura po m² kolosijeka) s velikim rasipanjem [3]. Odstupanja u cijeni mogu se pripisati nekolicini faktora [23]:

- različiti cijena za različite vrste podloga (zemljani nasipi / mostovi / tuneli);
- specifičnosti troškova svakog projekta za radnu snagu i nabavu materijala, koja se razlikuje u pojedinim gradovima i logističkih uvjeta na svakom gradilištu;
- opcije izabrane od vlasnika infrastrukture naročito u pogledu zamjenjivih komponenti, podesivih pričvršćenja i zaštitne opreme protiv buke i vibracija.

Kolosijeci na čvrstoj podlozi više se isplate tijekom vremena, premda im je cijena viša, jer poboljšavaju kvalitetu i raspoloživost linija lakog tračničkog sustava.

Ako se faktori isplativosti uzmu u obzir kao važni, onda se za svaki pojedinačni kolosiječni sustav mora razmotriti koliki će biti ukupni troškovi za čitavo vrijeme njegove uporabljivosti (eng. *life-cycle costs* - LCCs). Često se dogodi da ono što je bilo najjeftinije za gradnju, poslije postane skuplje zbog visokih troškova održavanja.

Kod kolosijeka na čvrstoj podlozi, visoki troškovi ulaganja u gradnji poslije se nadoknade uštedama zbog manjih troškova održavanja i većih prihoda jer je veća dostupnost trase. Sustavi kolosijeka na čvrstoj podlozi ne zahtijevaju gotovo nikakvo održavanje. Kolosijeci bez zastora su ekonomičniji nego oni sa zastorom, jer su im godišnji troškovi manji [23]. Naravno, standardizacija projekta kolosijeka i radova na cijeloj trasi, kao i korištenje predgotovljenih i polupredgotovljenih komponenti, smanjuju troškove izgradnje.

Vrijeme trajanja gradnje izražava se u m² gornjeg ustroja kolosijeka, tijekom rada jedne smjene radnika na gradilištu. To je funkcija primijenjene mehanizirane metode gradnje. Dugotrajno iskustvo pokazalo je da, po tom kriteriju, klasični kolosiječni sustavi sa zastorom imaju prednost. No ovisit će i o tome gradi li se potpuno nova trasa ili se gradi nova na mjestu stare kao zamjena. U prvom slučaju, treba uzeti u obzir formiranje donjeg ustroja i druge pripremne radove. U drugom slučaju mora se imati u vidu koliko dugo će trasa biti izvan upotrebe. Ovaj kriterij povezan je s drugim kriterijima za projektiranje koji su također obrađeni u ovom radu.

Isporuka građevinskog materijala ovisi od tome koliko lako oni mogu biti isporučeni na gradilište. To ovisi od lokalnim izvorima i o lancima nabave materijala. Osim toga, prednost je ako se održava manje raspoloživog materijala jer je tada manji skladišni prostor potreban na samom gradilištu.

Uvjeti za pristup mehanizacije ovisit će o prometnim uvjetima na gradilištu kao i o metodi gradnje. Rad u urbanom okruženju nije isti kao rad unutar nekog ogradenog prostora ili u seoskom području. Zaštitne ograde mogu spriječiti izloženost opasnim aktivnostima i materijalima. Kad su posrijedi pruge u gradskoj jezgri, prostorna ograničenja često sprečavaju da odgovarajuća mehanizacija dođe na gradilište pa gradnja traje duže.

Osjetljivost na kvalitetu donjeg ustroja znači da je za gradnju kolosijeka na čvrstoj podlozi nužno osigurati podlogu bez slijevanja. S obzirom na to, za polaganje kolosijeka na čvrstoj podlozi pogodniji su tuneli, mostovi i vijadukti. Problematične lokacije otkrivene tijekom ispitivanja tla moraju biti poboljšane odgovarajućim geotehničkim metodama da bi se dovele u sklad s odgovarajućim zahtjevima. Prisutnost dugotrajnog slijevanja može učiniti da kolosijeci bez zastora, ako ih odaberemo, budu teško i skupo rješenje. Kolosijeci u zastoru imaju veliku sposobnost adaptacije na nekontrolirano i neujednačeno slijevanje podloge kao i prilagodljivost smjera i nivelete.

Jednostavnost sustava (broj komponenata) treba biti kriterij važan za čitavo vrijeme uporabe gornjeg ustroja, a osim toga, treba odgovarati svojoj svrsi. Ako je pruga u razini ceste i stalno izložena naprezanjima od tračničkog i cestovnog prometa, taj je kriterij naročito važan, jer uzima u obzir teškoće dostupnosti pri obavljanju radova na održavanju kolosijeka i potrebe za što manjim prekidanjem prometa.

Težina gornjeg ustroja kolosijeka po m² važan je kriterij za kolosijeka na mostovima i vijaduktima i na mjestima sa slabom podlogom. Manja težina konstrukcije ekonomski je opravdana na mostovima. Ako na mostove postavljamo kolosijeka sa zastorom, potrebne su dodatne mjere (npr. elastične podloge ispod zastorne prizme ili ogibljeni sustavi), a polaganje ploča bilo bi povoljnije.

Visina gornjeg ustroja kolosijeka je naročito važan kriterij u tunelima. U dužim tunelima (preko 500 m) kolosijek na čvrstoj podlozi je prihvaćen kao standardni gornji ustroj zato što bi radovi na održavanju kolosijeka sa zastorom bili teški i nesigurni. Niža konstrukcija (otprilike za 30 cm) kolosijeka na čvrstoj podlozi znači manji poprečni presjek tunela i smanjuje iskop pri gradnji. Rezultat je takav da zbroj troškova za gradnju kolosijeka i tunela nije veći kod kolosijeka s čvrstom podlogom nego kod kolosijeka u zastoru [3].

Metode ugradnje betona (kliznom oplatom, na gradilištu, predgotovljeno) mogu skratiti vrijeme gradnje jer građevinski radovi u gradskom okruženju ometaju promet. Da bi se ispravile tolerancije u izradi, za gornji ustroj na čvrstoj podlozi preporučuju se rješenja s polupredgotovljenim i potpuno predgotovljenim elementima, naročito kad se grade potpuno nove dionice lakog tračničkog sustava [23].

Prilagodljivost skretnicama i križanjima, dilatacijskim spravama, izoliranim spojevima, itd. ne izaziva neke posebne probleme u usporedbi s primjenom na ostalim dionicama pruge. Naravno, pojedine komponente kolosiječnog sustava (na primjer, pričvršćenja) moraju se prilagoditi.

Prilagodljivost prijelaznim konstrukcijama može se postići širokim rasponom različitih krutosti u kolosiječnoj konstrukciji, što uključuje i utjecaj konstrukcijskih elemenata (elastični slojevi, elementi pričvršćenja, itd.).

Geometrijsko ograničenje znači sposobnost konstrukcije da se dobro ponaša u krivinama s malim polumjerom i ako ne postoje nadvišenja u krivinama, što čini sustav privlačnim za putnike (visoka komercijalna brzina i visok nivo udobnosti).

Raspoloživost domaćih materijala i izvođača radova je ekonomski kriterij koji snižava troškove gradnje.

Mogućnost reguliranja geometrije kolosijeka tijekom gradnje označava prilagodljivost promjeni smjera i nivelete i sposobnost da se mijenja širina kolosijeka, nagib tračnice, visine pojedinih tračnica, itd. Najbolji način da se to postigne jest upotreba adekvatnih elemenata (podtračničke podloške, matice s ekscentričnim rupama, itd.).

Uklapanje u infrastrukturu ceste je važan kriterij kad se trase lakog tračničkog sustava grade na prometnicama s javnim prometom. Konvencionalni gornji ustroj sa zastorom ostaje najpovoljnije rješenje za sve pruge na nezavisnim trasama. Međutim, kad pruga ide duž gradskih ulica, prednost se daje kolosijecima na čvrstoj podlozi.

Učestalost i nivo kontrole daju prednost sustavima kojima je potrebno manje kontrole. Sustavi koji se mogu ispitivati ispitnim vlakovima pomoću CCD-a imaju prednost i smanjuju potrebu kvalificirane inspekcije kolosijeka pješice duž pruge.

Učestalost brušenja tračnica znači da se prioritet daje sustavu koji zahtijeva manje brušenja, kao sustavi s kontinuirano oslonjenim tračnicama. Kod kolosijeka bez zastora postiže se bolja kontrola krutosti oslonaca tračnice što može smanjiti naboranost tračnice i neke probleme u vezi s tim.

Očuvanje kvalitete kolosijeka može biti kriterij za projektiranje ili sigurnost, a odnosi se na sposobnost sustava da zadrži projektnu geometriju pruge. Radovi na održavanju geometrije kolosijeka tipični su za kolosijek sa zastorom. Tehnologije s kolosijecima na čvrstoj podlozi obećavaju da se napusti konvencionalna rutina "prilagodi i popravljaj" i da se prijeđe na ideju "prilagodi i zaboravi". Već je dokazano da se može postići trajno dobra kvaliteta kolosijeka i trajno stabilni položaj kolosijeka na čvrstoj podlozi sve do sada [22].

Uporabljivost komponenata / sustava treba biti dugog vijeka budući da je to prednost u vezi sa smanjenjem kontrola, intervencija, štednje materijala, sigurnosti, itd. Ovaj kriterij je važan s prometnog stajališta jer radovi na održavanju i obnovi mreže kolosijeka ometaju promet u gradu. Smatra se da bi uporabljivost kolosijeka na čvrstoj podlozi mogla biti oko 60 godina, ali zasad još nema dovoljno dugoročnih iskustava s ovakvim prugama, u užim gradskim zonama [23].

Razina buke i vibracija uvelike će se razlikovati na raznim mjestima duž kolosijeka i ovisit će o lokalnim propisima te o osjetljivosti i aktivnosti lokalnog stanovništva. Na taj će kriterij utjecati izbor tračnice, podzastornih tepiha, pritiskalice, ploča/pragovi, mjere poduzete protiv buke i vibracija, itd. Kvalitetna zaštita (komponente koje apsorbiraju zvuk, ogibljeni sustavi i akustične barijere) povećava investicijske troškove.

Vizualno uklapanje trase u gradsku okolinu označava bolje uklapanje u urbanu okolinu. Sve vrste kolosijeka na čvrstoj podlozi, a naročito takozvani "zeleni kolosijeci", znatno doprinose tome da stanovništvo prihvati nove linije.

Zauzimanje prostora u gradskoj zoni označava opseg u kojem kolosiječni sustav zauzima poprečni presjek, tj. do koje mjere zauzima postojeći prostor u gradu.

Zagađenje vode i degradacija tla je sposobnost sustava kolosijeka da se suprotstavi utjecajima vozila i putnika na životnu okolinu u gradu. Sve vrste konstrukcija na čvrstoj podlozi imaju prioritet.

Mogućnost evakuacije i pristup za održavanje pokriva područje osiguranja sigurnosti i lakoću pristupa mjestu nesreće ili mjestu obavljanja radova. Kolosiječni gornji ustroj, naročito kod nesreća u tunelima, mora biti dostupan za ulazak vozila za spašavanje, a u tome su povoljnije konstrukcije na čvrstoj podlozi.

Sigurnost sustava obuhvaća otpornost sustava na svakovrsna oštećenja, kao što su puknute tračnice, ispadanje podtračničkih podloški, itd. Kod kolosijeka bez zastora, bolja geometrija kolosijeka smanjuje dinamičke utjecaje između kolosijeka i vozila, bez plastičnih deformacija koje bi vodile do neprihvatljivih nepravilnosti i poremećaja.

Zaštita od iskakanja iz kolosijeka važna je zbog sigurnosti putnika, ali također i štiti kolosijeku na čvrstoj podlozi, pragove, pritiskalice, itd. od oštećenja.

Stabilnost kolosijeka pri visokim temperaturama u vezi je s kolosiječnim sustavom i prometnom sigurnošću. Mnogo je bolja kod konstrukcija kolosijeka na čvrstoj podlozi. Prioritet ovdje imaju sve vrste zatvorenih sustava kolosijeka na čvrstoj podlozi i obloženih tračničkih sustava. Kod kolosijeka u zastoru potrebne su neke dodatne mjere.

Lakoća obnavljanja u slučaju da se dogodila šteta na pruži ovisit će o metodama gradnje, o broju komponenti sustava i o tome koliko je teško ukloniti ih i zamijeniti. Obnavljanje konstrukcije na čvrstoj podlozi je veoma komplicirano i skupo, ali precizno se ne znaju troškovi takvog obnavljanja. Općenito rečeno, što je veća početna kvaliteta kolosijeka, to su i viši troškovi obnove, ako se uspoređuju s kolosijekom u zastoru. Među rješenjima prioritet se daje onima s predgotovljenim komponentama.

5. Proces rangiranja/procjene

Procedura za rangiranje/procjenu kolosiječnog gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava da bi se postigla optimalna kolosiječna konstrukcija prema raspoloživim opcijama/alternativama pod unaprijed definiranim kriterijima/atributima, sastoji se od nekoliko koraka. Proces procjene alternativa uglavnom pomoću višekriterijske analize MKA sastoji se od sljedeća četiri koraka:

- Definiranje opcija/alternativa koje treba međusobno rangirati,
- Izbor i definiranje kriterija/atributa,
- Procjena svake opcije/alternativa prema svakom od kriterija,
- Postupak optimizacije/rangiranja upotrebom MaVT.

5.1. Definiranje opcija/alternativa koje treba međusobno rangirati

Za procjenu je odabrano dvanaest najčešće korištenih opcija/alternativa. Namjera je da tijekom definiranja opcija kolosijeka na čvrstoj podlozi budu zastupljeni svi tipovi konstrukcija (opisani u poglavlju 3.).

5.2. Izbor i definiranje kriterija/atributa

Potrebno je odrediti sva pitanja o kojima ovisi odluka o izboru najbolje kolosiječne konstrukcije. Pri određivanju će se uzeti u obzir mišljenje svih zainteresiranih. Zainteresirani mogu biti, na primjer: putnici, lokalno stanovništvo, operateri lakog tračničkog sustava, upravitelji infrastrukture, izvođači radova, investitori, vlasti koje daju odobrenja za gradnju, itd. Svatko od njih ima drugačije razumijevanje situacije i prioritete kad su u pitanju razni kriteriji/atributi [24]. Ukupan broj kriterija/atributa proizlazi iz [16], a onda se grupiraju na način kako je spomenuto u poglavlju 4 i navedeno u tablici 1. Osim toga, težinsko vrednovanje važnosti svakog pojedinog kriterija sa stajališta preferencije investitora, izvođača radova i putnika uključuje se u analizu i može se vidjeti u tablici 2.

5.3. Procjena svake opcije/alternative prema svakom od kriterija

Opcije koje imaju novčanu vrijednost izražavaju se u novcu. Pojedine vrijednosti su uzete iz [23], a druge iz relevantnih izvora ili iz iskustva autora ovog rada. Sve ostale opcije uspoređivati će se na sljedeći način (tablica 1.):

1. preporučena vrijednost
2. zadovoljavajuća vrijednost
3. potrebno poboljšanje
4. nije primjenjivo na sustav.

5.4. Postupak optimizacije/rangiranja upotrebom MaVT

Prva tri koraka su identična u većini metoda MKA. Završni korak ovisi od tome koju ćemo metodu odabrati za donošenje multikriterijske odluke.

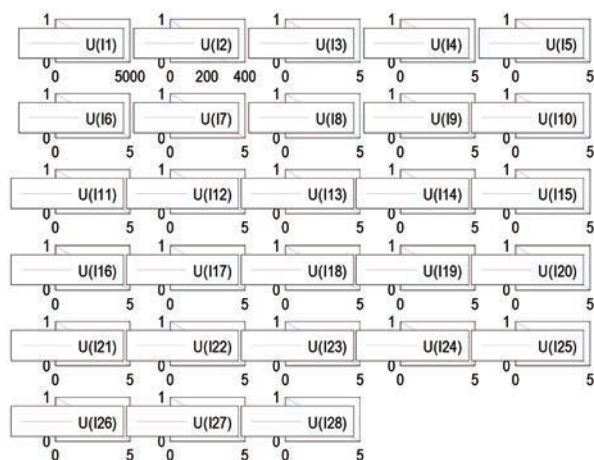
U društvu i privredi donošenje odluka uglavnom se i događa na osnovi više kriterija, naime postoji više činitelja ili interesnih grupa koje su zainteresirane za konačni izbor, a odluka se mora donijeti između nekoliko opcija. Često je veoma teško usporediti tehničko-tehnološke, ekološke i druge parametre [26]. U ovom slučaju zadatak je donijeti odluku o izboru najboljeg rješenja za izgradnju kolosiječnog gornjeg ustroja lakog tračničkog sustava na osnovi analize 28 parametara (kriterija). Karakter odabranih kriterija direktno utječe na to kakva će im se međusobna važnost pripisati. U nekom slučaju, smatrat će se da je kriterij cijene izgradnje iznimno važan pa će mu biti dodijeljena daleko veća važnost nego drugim parametrima. U drugom slučaju, osoblje za kontrolu kvalitete opredjeliti će

se za rokove, smanjujući vrijeme izgradnje, kvalitetu i trajnost pruge, tj. njenu uporabljivost.

MaVT (eng. *multi-value attribute theory*) teorija višekriterijskog vrednovanja prilagodljiva je za rješavanje problema kod kojih postoji konačni i diskretni skup opcija vrednovanih na osnovi različitih (često međusobno proturječnih) ciljeva. Svrha višekriterijskog vrednovanja je da pomogne donositelju odluke da se konačno opredijeli između raznih opcija. Drugim riječima, MaVT tehnike pomažu donositelju odluke da formuliра što smatra najboljim u okruženju gdje donošenje odluke nije jednostavno. Prednosti upotrebe MaVT vidimo u sljedećem:

- omogućuje da se problemu dodijeli jasna struktura, tj. da bi se problem uspješno riješio, preduvjet je da opcije, kriteriji i njihovo prilagođavanje budu pregledno klasificirani i da se različiti tipovi informacija mogu međusobno uspoređivati;
- osigurava način za razgovore i dogovore koji će prikazati prednosti i nedostatke pojedinih mogućnosti;
- postoje usavršena softverska rješenja u kojima je MaVT metoda integrirana s koeficijentima težine, tako da je moguće relativno jednostavno analizirati velike količine podataka i na dobivenim rješenjima obaviti analizu osjetljivosti.

Vrijednost nekog atributa gotovo uvijek je iskazana pomoću različitih mjernih skala (slika 2.). MaVT je tehnika za multikriterijsku analizu koja dopušta da neki kriteriji svojim povoljnim utjecajem nadoknade tj. kompenziraju slabosti nekog drugog kriterija, ako su im pripisane odgovarajuće težine kao u tablici 2. Ukupna vrijednost svih mogućnosti dobiva se na osnovi performansi svih kriterija.



Slika 2. Matrica ekološkog utjecaja m x n

Svrha primjene MaVT tehnike sastoji se u tome da se svakoj mogućnosti dodijeli po jedan realni broj na osnovi kojega se mogu one rangirati, što bi pomoglo donositelju odluke. Pretpostavka je da svakom problemu koji se pojavljuje u donošenju odluke možemo dodijeliti po jednu funkciju **U**, definiranu skupom realnih vrijednosti. Ta funkcija **U** upotrebljava se da bi se vrijednosti svih atributa jedne opcije mogle na kraju pretvoriti u samo jednu vrijednost.

Tablica 1. Kriteriji i atributi

Oznaka	Kriteriji / atributi	Opcije / alternative											
		Kolosijek sa zastorom	kolosijek bez zastora / kolosijek na čvrstoj podlozi										
			Diskretni oslonci s pragovima					Diskretni oslonci bez pragova	Kontinuirano oslanjanje	Specijalne konstrukcije			
			Rješenje s ugrađenim pragovima u betonsku podlogu		Rješenje s oslonjenim pragovima								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Projektne kriteriji													
A	Troškovi građenja gornjeg ustroja [€/m ²]	500	1200	1300	1200	1200	950	3000	3500	1300	2100	940	3500
B	Vrijeme građenja gornjeg ustroja [m ³ /po smjeni]	300	280	250	280	200	200	200	200	280	200	200	200
C	Uvjeti isporuke građevinskog materijala	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
D	Uvjeti za pristup mehanizacije na gradilište	3	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1
E	Osjetljivost na kvalitetu donjeg ustroja	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
F	Jednostavnost sustava (broj komponenti)	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
G	Težina gornjeg ustroja (mostovi)	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1	1
H	Visina gornjeg ustroja (tuneli)	3	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1
I	Metoda ugradnje betona	4	3	3	3	3	1	1	1	3	3	2	1
J	Prilagodljivost za skretnice i raskrižja	1	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3
K	Prilagodljivost prijelaznim konstrukcijama	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	1
L	Geometrijska ograničenja	2	1	1	1	1	1	2	2	1	3	3	2
M	Angažiranje domaćih materijala / izvođača	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4
N	Mogućnost reguliranja geometrije kolosijeka	1	1	1	1	2	2	1	2	2	3	3	2
O	Uklapanje u gradske ulice	4	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
Održavanje													
P	Učestalost i razina kontrole	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
Q	Učestalost brušenja tračnica	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
R	Očuvanje kvalitete kolosijeka	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S	Uporabljenost komponenata / sustava	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ekološki utjecaji													
T	Emisija buke i vibracija	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
U	Vizualno uklapanje trase u gradsku okolinu	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V	Zauzimanje prostora u gradskoj zoni	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W	Zagađivanje vode i degradacija tla	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Sigurnost													
X	Lakoća evakuacije i pristupa za održavanja	3	2	2	3	3	3	2	3	3	1	1	1
Y	Osiguranje sustava (puknuće tračnica, gubitak podloge)	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
Z	Zaštita od iskakanja iz kolosijeka	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
LJ	Stabilnost kolosijeka pri visokim temperaturama	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2
NJ	Lakoća obnove pruge	1	3	3	3	1	1	1	1	2	3	3	2

Tablica 2. Težine preferencija

Oznaka	Kriteriji / atributi	Težina na osnovi važnosti		
		Preferencija investitora	Preferencija izvođača radova	Preferencija putnika
A	Troškovi građenja gornjeg ustroja [€/m ¹]	10	8	4
B	Vrijeme građenja gornjeg ustroja [m ¹ /po smjeni]	10	8	8
C	Uvjeti isporuke građevnog materijala	6	10	5
D	Uvjeti za pristup mehanizacije na gradilište	5	10	4
E	Osjetljivost na kvalitetu donjeg ustroja	4	8	2
F	Jednostavnost sustava (broj komponenti)	6	10	6
G	Težina gornjeg ustroja (mostovi)	7	5	1
H	Visina gornjeg ustroja (tuneli)	9	5	1
I	Metoda ugradnje betona	1	6	1
J	Prilagodljivost za skretnice i raskrižja	5	5	2
K	Prilagodljivost prijelaznim konstrukcijama	5	5	2
L	Geometrijska ograničenja	5	2	3
M	Angažiranje domaćih materijala/izvođača	10	9	6
N	Mogućnost reguliranja geometrije kolosijeka	3	9	4
O	Uklapanje u gradske ulice	7	1	9
P	Učestalost i razina kontrole	5	3	8
Q	Učestalost brušenja tračnica	2	4	8
R	Očuvanje kvalitete kolosijeka	8	6	7
S	Trajanje komponenata/sustava	9	3	9
T	Emisija buke i vibracija	8	5	10
U	Vizualno uklapanje trase u gradsku okolinu	7	1	9
V	Zauzimanje prostora u gradskoj zoni	7	1	9
W	Zagađivanje vode i degradacija tla	7	4	9
X	Lakoća evakuacije i pristupa za održavanja	7	7	10
Y	Osiguranje sustava (puknuće tračnica, gubitak podloge, itd.)	7	4	10
Z	Zaštita od iskakanja iz kolosijeka	8	4	10
LJ	Stabilnost kolosijeka pri visokim temperaturama	8	3	8
NJ	Lakoća obnove pruge	8	8	9

MaVT se zasniva na pretpostavci da postoji realna funkcija **U** koja izražava želje donositelja odluke. Ona treba povezati svaku od alternativa a_j ($j = 1, 2, \dots, n$) s po jednim kriterijem C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) koji ulazi u razmatranje u danom problemu optimizacije. Upotrebom općeg oblika funkcije **U**, problemi se mogu definirati kao što slijedi:

Najbolja alternativa je ona za koju je

$$U(C_1(a), C_2(a), \dots, C_n(a)) = \max U(C_1(a_j), C_2(a_j), \dots, C_n(a_j)), j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

Kod MaVT sa n kriterija C_1, \dots, C_n ($n = A - NJ$), svaku alternativu zastupa vektor $a = (a_1, \dots, a_n)$, gdje je a_j (za $j = 1, 2, \dots, m = 12$) gruba mjera ili opis opipljivog ili neopipljivog utjecaja koji a vrši na kriterij C_j (na primjer, troškovi izgradnje gornjeg ustroja, vrijeme trajanja izgradnje gornjeg ustroja). Neka $S = \{a^1, \dots, a^n\}$ označava skup svih alternativa koje su uzete u razmatranje.

Može se pretpostaviti da je preferencija alternativa a_1, \dots, a_m u odnosu na samo jedan kriterij C_j potpuno poznata i da je eksplicitno izmjerena na intervalskoj skali ili na proporcionalnoj skali na kojoj se preferira da vrijednost bude što veća, a ne što manja.

Da bi se dobila najbolja alternativa, potrebno je definirati funkciju **U**, što je itekako težak i dugotrajan proces. Jedno od pravila za donošenje odluka po MaVT pravilima jest pravilo potpune nadoknade, a to znači da neki projekt, čak i ako je totalno loš po nekom kriteriju, može to nadoknaditi ako je odličan po nekim drugim kriterijima.

Metoda MaVT se primjenjuje kod donošenja mnogih odluka u javnom i privatnom sektoru. U većini slučajeva koristi se prošireni oblik metoda MaVT jer daje jednostavniju i jasniju podršku za odluke, tako da ga mnogo širi krug korisnika može primijeniti na raznovrsne probleme.

Važno je imati na umu da se ovim pristupom primjerice ako se razmotre i ekonomski faktori, ali i utjecaj na životnu okolinu može dovesti do velikih promjena u financiranju ekoloških pothvata. Najjednostavniji oblik funkcije U može se predstaviti ovako:

$$U = \sum_{i=1}^n V_i(x_i)w_i \quad (2)$$

gdje je:

V_i - vrijednost opcije x_i ,

w_i - težinski koeficijent.

U je ukupna vrijednost alternative x , $V_i(x_i)$ je vrijednosna funkcija jednog atributa koja odražava kako će alternativa x djelovati na atribut i , a w_i je dodijeljena težina koja odražava važnost atributa i . Za procjenu vrijednosnih funkcija atributa $V_i(x_i)$, primijenjena je metoda izravnog vrednovanja. To znači da je postavljeno pitanje sugovorniku da procijeni koliko su jake, na numeričkoj skali, njegove preferencije za različite stupnjeve atributa. Počinje se na taj način da onim značajkama koje su sugovorniku najvažnije dodijelimo vrijednost 10, a onim značajkama koje su mu najmanje važne dodijelimo vrijednost 0.

U rasponu koji preostaje između te dvije krajnje točke raporede se stupnjevi koji preostaju između njih. Razmak između stupnjeva atributa odražava jačinu preferiranja jednog stupnja u usporedbi s drugim. Različite tehnike za izračunavanje vrijednosti funkcije U mogu se naći u [27, 28].

6. Rezultati i analiza osjetljivosti procesa rangiranja

Glavni rezultat razmatranja prikazanih u ovom radu jest predložena procedura za nalaženje optimalnog rješenja za konstrukciju kolosiječnog gornjeg ustroja za laki tračnički sustav

u gradovima. Ona se može primijeniti za bilo koji drugi tip željeznice koristeći druge opcije i kriterije.

Za sve tri preferencije (investitor, izvođač radova, putnik) pomoću MaVT tehnike dobivena su sljedeća rangiranja predloženih opcija/alternativa:

- za preferencije investitora: [10, 11, 12, 6, 5, 7, 3, 2, 9, 4, 8, 1];
- za preferencije izvođača radova: [10, 11, 12, 7, 6, 5, 3, 2, 8, 9, 4, 1];
- za preferencije putnika: [10, 11, 12, 7, 6, 5, 3, 2, 9, 8, 4, 1].

Ovo znači da prema predloženim preferencijama, kolosiječni gornji ustroj bez zastora, a s kontinuiranim oslanjanjem tračnice i konstrukcije sa specijalnim zahtjevima za smanjenje buke i vibracija, ima prioritet kao konstrukcija kolosijeka za laki tračnički sustav. Sljedeća po rangiranju je grupa gornjih ustroja bez zastora s diskretnim oslanjanjem tračnica na pragove koji leže na krutoj podlozi, ali nisu integrirani u nju. Preostale opcije tipova kolosijeka mijenjaju svoja mjesta na listi ovisno o pojedinim preferencijama.

Kolosijek sa zastorom je na posljednjem mjestu za sve preferencije, ali treba napomenuti da je on ipak najpoželjnija alternativa u prigradskom prometu gdje je laki tračnički sustav odvojen od cestovnog prometa.

Da bi se ispitalo koliko je ovo rangiranje osjetljivo na promjene u važnosnim težinama investitora, izvođača radova i putnika u odnosu na trošak građenja, vrijeme potrebno za građenje te emisiju buke i vibracija prioriteti će se umnožiti nekoliko puta. Ove varijacije u dodijeljenoj težini, kada se pomnože sa 2, 4 i 8, daju rangiranja opcija/alternativa kao u tablici 3.

Ova analiza osjetljivosti pokazuje da čak i kad se težina važnosti dodijeljena cijeni građenja, što je investitoru najvažnije, pomnoži nekoliko puta, ni tada lista rangiranja ne pretrpi značajne promjene. Rangiranje još uvijek prioritet daje kolosiječnom

Tablica 3. Liste rangiranja za različite množitelje preferencija investitora, izvođača radova i putnika

Preferencija investitora (cijena građenja)	Liste rangiranja											
	10	11	12	6	5	7	3	2	9	4	8	1
Bez množitelja	10	11	12	6	5	7	3	2	9	4	8	1
Množitelj = 2	10	11	6	5	12	3	2	9	7	4	8	1
Množitelj = 4	11	10	6	5	3	2	9	4	12	7	1	8
Množitelj = 8	11	6	10	5	2	3	9	4	1	7	12	8
Preferencija izvođača radova (vrijeme trajanja građenja)	Liste rangiranja											
	10	11	12	7	6	5	3	2	8	9	4	1
Bez množitelja	10	11	12	7	6	5	3	2	8	9	4	1
Množitelj = 2	10	11	12	7	2	6	4	3	8	9	5	1
Množitelj = 4	10	11	12	7	2	6	8	4	3	9	5	1
Množitelj = 8	10	11	12	7	2	6	8	4	3	9	5	1
Preferencije putnika (emisija buke i vibracija)	Liste rangiranja											
	10	11	12	7	6	5	3	2	9	8	4	1
Bez množitelja	10	11	12	7	6	5	3	2	9	8	4	1
Množitelj = 2	11	12	10	7	2	4	6	3	8	9	5	1
Množitelj = 4	11	12	10	7	4	3	2	6	8	9	5	1
Množitelj = 8	11	12	10	7	4	3	2	6	8	9	5	1

gornjem ustroju bez zastora s kontinuiranim oslanjanjem tračnice i s diskretnim oslanjanjem tračnice na pragove koji nisu integrirani u podlogu. Ta dva gornja ustroja jedino su zamijenila mjesta na listama rangiranja. Međutim, specijalni gornji ustroji bez zastora i skupe opcije gornjeg ustroja bez zastora s diskretnim oslanjanjem tračnice bez pragova padaju niže na listi. Iz ovoga proizlazi da kolosijeci sa zastorom nisu uvijek na dnu rang-liste.

Kad se težina važnosti dodijeljena vremenu gradnje, što je izvođačima radova prioritet, umnoži nekoliko puta, rang-lista pretrpi samo male, nebitne promjene. Rangiranje opet daje prioritet kolosiječnom gornjem ustroju bez zastora, a s kontinuiranim oslanjanjem tračnice, ali već na sljedećem mjestu naći će se kolosijek bez pragova (opcija 7) i kolosijek s diskretnim oslanjanjem kompaktnog tehničkog rješenja (opcija 2). Opcije s kolosiječnim gornjim ustrojem bez zastora s diskretnim oslanjanjem tračnice na oslonce (pragove) padaju na listi (jedna opcija čak padne na pretposljednje mjesto). Kolosijek sa zastorom je uvijek posljednji na listi.

Kad nekoliko puta pomnožimo težinu važnosti za emisiju buke i vibracija kao prve preferencije za putnike, poslije kolosiječnog gornjeg ustroja bez zastora s kontinuiranim oslanjanjem tračnice, na drugom mjestu na rang listi javlja se kolosijek bez pragova (opcija 7) i s diskretnim oslanjanjem tračnice kompaktnog tehničkog rješenja (sve opcije). Opcije s kolosiječnim gornjim ustrojem bez zastora s diskretnim oslanjanjem tračnice na oslonce opet padaju niže na rang listi. Kolosijek sa zastorom je uvijek posljednji u rangiranju.

7. Zaključak

Istraživanje na temelju kojega je nastao ovaj rad bavi se specifičnim područjem gradske željeznice i izbora njenog gornjeg ustroja pomoću multikriterijske optimizacije. Rad

se razlikuje od drugih dostupnih u sadašnjoj literaturi po tome što uvodi u razmatranje velik broj opcija za konstrukciju gornjeg ustroja s velikim brojem utjecajnih faktora (kriterija) u optimizaciji kolosiječnog gornjeg ustroja i rješava je pomoću teorije višekriterijskog vrednovanja. Predložena procedura primjenjiva je ne samo na kolosijeke lakog tračničkog sustava nego i na razne druge vrste kolosijeka.

Procedura rangiranja pokazuje da je moguće provjeriti osjetljivost na promjene u samo jednom kriteriju, tj. u važnosti koja mu se pridaje, ali ona često nije od presudnog značenja za konačni izbor kolosiječnog gornjeg ustroja. Promjena u težini važnosti jednog kriterija rijetko kad utječe na ishod optimizacije, ali ipak zainteresirani sudionici mogu donekle utjecati na taj ishod. Međutim, mora se priznati da će rezultat procesa rangiranja biti samo onoliko dobar koliko su kompetentni i iskusni ljudi u timu koji trebaju zastupati potrebe svih sudionika u odlučivanju, a oni moraju biti dobro upoznati s raspoloživim rješenjima, tehnologijom i okolnostima koje postoje na toj određenoj lokaciji.

Ovaj rad nastoji identificirati zahtjeve gradskih kolosiječnih sustava, procjenjujući raspoložive opcije i optimizirajući izbor najboljeg kolosiječnog gornjeg ustroja pod posebnim lokalnim okolnostima. To je jedini način da se dođe do tehnički i ekonomski uravnoteženog rezultata kada se bira projekt za određenu dionicu pruge iz predloženih opcija i pri prihvaćenoj listi kriterija.

U budućem istraživanju mogla bi se primijeniti i neka druga multikriterijska tehnika te dobiveni rezultati usporediti.

Zahvala

Ovaj rad bio je dio projekta TR 36017 s financijskom podrškom Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Valley Metro, Light Rail Transit Projects, Design Criteria Manual, City of Phoenix, USA, <http://www.valleymetro.org>, 2007.
- [2] Vuchic, V.: Urban transit systems and technology, John Wiley and Sons., New York, USA, 2007.
- [3] Girnau, G., Müller-Hellmann, A., Blennemann, F. (Eds.): Light Rail in Germany, VDV, Düsseldorf, Germany, 2000.
- [4] Track Design Handbook for LRT, TCRP Report 155 (2nd edition), Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 2012.
- [5] Gunduz, M., Ugur, L.O., Ozturk, E.: Parametric cost estimation system for light rail transit and metro track works, Expert System with Applications, 38(3), pp. 2873- 2877, 2011.
- [6] Kim, G.T., Kim, K.T., Lee, D.H., Han, C.H., Kim, H.B., Jun, Y.T.: Development of a life cycle cost estimate system for structure of light rail, Automation in Construction, 19(3), pp. 308-325, 2010.
- [7] De Bruijn, H., Veeneman, W.: Decision-making for light rail, Transportation Research Part A, 43(4), pp. 349-359, 2009.
- [8] De Brucker, K., Macharis, C., Vebeke, A.: Multi-criteria analysis in transport project evaluation: an institutional approach, European Transport, 47, pp. 3-24, 2011.
- [9] Litman, T.: Evaluation rail transit benefits: A comment, Transport Policy, 14(1), pp. 94-97, 2007.
- [10] Li, W., Yin, S.: Analysis on Cost of Urban Rail Transit, Journal of Transportation systems Engineering and Information Technology, 12(2), pp. 9-14, 2012.
- [11] Huang, C.F., Xia, Y.: Research on the role of urban rail transit in promoting economic development, Procedia Engineering, 21, pp. 520-525, 2011.
- [12] Jha, M. K., Samanta, S.: Optimizing Rail Routes with Genetic Algorithms and Geographic Information System, Journal of Urban Planning and Development, 133(3), pp. 161-171, 2007.

- [13] Hoback, A.: Sensitivity Analysis of LTR Unit Capital costs, TRB Annual Meeting (CD-ROM), Washington D. S., USA, 2008.
- [14] Zhao, J.B., Deng, W.: Multilevel Fuzzy Decision Support Model for China's Urban Rail Transit Planning Schemes, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, pp. 218-226, 2011.
- [15] Branković, V.: Light rail track superstructures (in Serbian), master thesis, Civil Engineering Faculty University of Belgrade, Belgrade, Serbia, 2011.
- [16] Tomičić - Torlaković, M., Branković, V.: Light rail track structures comparative analysis, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure- CETRA 2012, Dubrovnik, Croatia, pp. 609-616, 2012.
- [17] Jha, M., Kang, M. W., Mishara, S., Samanta, S., Lyons, N.: Urban Rail Transit Planning and Design: Discussion of Practical Issues and Analytical Modeling Techniques, TRB Annual Meeting (CD-ROM), Washington D. S., USA, 2014.
- [18] Zlatković, M., Stevanović, A.: Assessment of Impacts of Increased Train Frequency and Predictive Transit Priority on a LRT Corridor in Salt Lake City, TRB Annual Meeting (CD-ROM), Washington D. S., USA, 2014.
- [19] Mörscher, J.: Schotterloser Oberbau im Netz der DB AG, ERRI Conference "Cost effectiveness and safety aspects of railway tracks", Paris, France, 1998.
- [20] Darr, E., Fiebig, W.: Feste Fahrbahn, Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Strassenbahn, Eurail press, Hamburg, Germany, 2006.
- [21] Tomičić - Torlaković, M., Puzavac, L.: Permanent way structure with mass - spring system (in Serbian), *Zeleznice*, 58(11- 12), pp. 349-360, 2002.
- [22] Tomičić - Torlaković, M., Budisa, M., Radjen, V.: Slab Track Mass-Spring System. *Transportation Research Record*, No. 2289, Washington D.C., pp. 64-69, 2012.
- [23] Girna, G., Krüger, F. (eds.): Local and Regional Railway Tracks in Germany, VDV, Düsseldorf, Germany, 2007.
- [24] INNOTRACK Project, Selection of a Railway Track System by Best Value Analysis, part D2.3.6., UIC France, Paris, France, <http://www.innotrack.net>, 2006.
- [25] Becker, S., Lier, K.H.: Bewertung und Varianten-vergleich von Bauarten der Festen Fahrbahn, *Zeitschrift des Verbandes Deutscher Eisenbahn-Ingenieure*, 50(2), s. 52-57, 1999.
- [26] Mavrotas, G., Trifillis, P.: Multicriteria decision analysis with minimum information: combining DEA with MaVT, *Computers and Operations Research*, 33, (8), pp. 2083-2098, 2006.
- [27] Choo, E., Schoner, B., Wedley, W.: Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. *Computers and Industrial Engineering*, 37(3), pp. 527-541, 1999.
- [28] Zhang, D., Yu, P.L., Wang, P.Z.: State-dependent weights in multicriteria value functions, *Journal of Optimization Theory and Applications*, 74(1), pp. 1-21, 1992.