

OPTIMIZACIJA RASKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM PROMETA

dr. sc. Hrvoje Pilko
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti,
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb, Hrvatska
tel: +38512457904
e-mail: hrvoje.pilko@fpz.hr
Prof. dr. sc. Ivan Legac
legac@fpz.hr
Prof. dr. sc. Sadko Mandžuka
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti,
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb, Hrvatska
tel: +385124579021
e-mail: sadko.mandzuka@fpz.hr

Sažetak: Iako se raskrižja s kružnim tokom prometa (kružna raskrižja, RKT) izvode kao sve povoljnija rješenja raskrižja, primjetna je razlikovnost izvedbe odnosno nedovoljno poznavanje bitnih zahtjeva oblikovnosti i sigurnosti prometa zbog slabe obučenosti korisnika te pojedinih projekatana. Rezultat toga je problematično stanje funkcionalne učinkovitosti, prometne sigurnosti i služnosti na nekim kružnim raskrižjima u urbanim sredinama, pa su to osnovni razlozi i poticaji da ih se sustavno istraži. Odabrana je odgovarajuća metoda za optimizaciju funkcionalne učinkovitosti i sigurnosti kružnih raskrižja, a sukladno nekim dosadašnjim rezultatima domaćih i stranih istraživanja učinkovitosti i prometne sigurnosti kružnih raskrižja, te važećim smjernicama. Metoda se temelji na upotrebi skupa metoda/pristupa višekriterijske optimizacije sa svrhom optimizacije osnovnih oblikovnih elemenata kružnog raskrižja. Za određivanje propusne moći kružnih raskrižja koristi se metoda prema Kimberu, preporuka HCM-a (ostalih prometnih parametara/razina usluge) te predviđanju broja prometnih nesreća prema Maycocku i Hall-u. U radu se osim predstavljanja potrebe za razvojem metode predstavlja struktura metode koja će se provjeriti na jednotračnom mini/malom kružnom raskrižju s četiri jednotračna privoza izvedenom u urbanoj sredini. Rezultati istraživanja i konačni zaključci biti će prikazani u narednim radovima.

Ključne riječi: raskrižje s kružnim tokom prometa, višekriterijska optimizacija, oblikovni elementi, prometni parametri

OPTIMIZATION OF ROUNDABOUT

Abstract: Although roundabouts are carried out as more favorable solution of intersections, there is noticeable distinctiveness in dimensioning and modeling caused by insufficient knowledge of the essential requirements for design and traffic safety due to poor education/training of users and some designers. The result is a problematic state of functional efficiency, traffic safety and level of service on some roundabouts in urban areas, and these are the main reasons and incentives to be systematically researched. According to some previous results of domestic and foreign researches of functional efficiency and traffic safety of roundabouts, and applicable guidelines, the appropriate method to optimize the functional efficiency and traffic safety of roundabouts was chosen. The method is based on the use of a set of methods/approaches of multi-criteria optimization with the aim of optimizing the basic

design elements of the roundabout. To determine the roundabout capacity Kimber method, recommendations of HCM (other traffic parameters/level of service) and predicting the number of traffic accidents by Maycock and Hall is used. The paper, in addition to presenting the need for development of method, represents the structure of the method that will be verified at the single-lane roundabout with four single-lane approaches carried out in an urban environment. Research results and final conclusions will be presented in future papers.

Key words: *roundabout, multi-criteria optimization, design elements, traffic parameters*

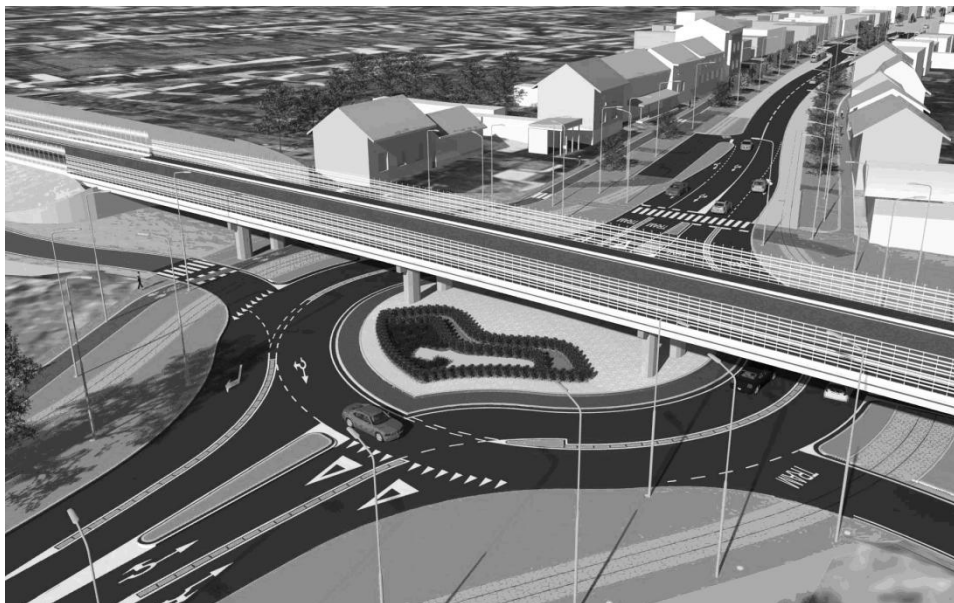
1. UVOD

Raskrižja s kružnim tokom prometa (RKT, tzv. kružna raskrižja) izvode se kao sve povoljnija rješenja presijecanja prometnih tokova unutar i izvan naselja. Uspoređujući kružna raskrižja s klasičnim semaforiziranim i nesemaforiziranim raskrižjima u razini istih značajki (broj privoza/prometnih trakova) izvedenim u urbanim sredinama, zaključuje se da ukoliko su kružna raskrižja pravilno primijenjena i oblikovana znatno doprinose povećanju propusne moći i razine usluge raskrižja [1, 2, 3]. Prilikom eksploatacije smanjuju ukupno vrijeme putovanja, vrijeme čekanja vozila na raskrižju, duljinu putovanja vozila i potrošnju goriva, te smanjuju štetne utjecaje na okoliš putem smanjenja ispušnih plinova motornih vozila [4, 5]. Također, izvedbom kružnih raskrižja postiže se povećanje stupnja prometne sigurnosti [6]. Procjenjuje se da je u Republici Hrvatskoj izvedeno oko 160 kružnih raskrižja, od čega je 100 (>60%) unutar ili na rubu naselja. Iza 1990.-tih izvedeno ih je preko 110, što čini oko 70% svih kružnih raskrižja u Hrvatskoj. Primjetna je razlikovnost izvedbe i nepridržavanje pojedinih načela oblikovanja kružnih raskrižja, a razlog tome je izvjesno neiskustvo i pomanjkanje osnovnih smjernica za projektiranje te normativi i pravila za korisnike. Također, u ruralnim područjima gdje kružna raskrižja nisu izvedena, primjetan je izostanak odgovarajuće edukacije i iskustva lokalnog stanovništva pri eksploataciji istih. Svi prikazani problemi rezultirali su povećanjem broja prometnih nesreća, te smanjenjem funkcionalne učinkovitosti odnosno služnosti kružnih raskrižja i stupnja sigurnosti prometa [7, 8]. S obzirom na navedeno, potrebno je razviti metodu za optimiziranje kružnih raskrižja koja se temelji na upotrebi skupa metoda/pristupa višekriterijske optimizacije sa svrhom optimizacije osnovnih oblikovnih elemenata kružnog raskrižja.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE RASKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM PROMETA

Prema [9, 10] raskrižje je s kružnim tokom prometa (RKT - tzv. kružno raskrižje) prometna građevina kružnoga oblika s nepovoznim, djelomično povoznim ili povoznim središnjim otokom i kružnim prometnim kolnikom na koji se vežu tri priključne ceste (privozi) ili više njih, i u kojem se promet odvija u smjeru suprotnom kretanju kazaljke na satu. Razvrstavanje kružnih raskrižja može se vršiti prema različitim mjerilima [9], a uobičajena je podjela po lokaciji i veličini, po broju privoza i prometnim trakovima, po svrsi ili namjeni i sl. Potrebno je spomenuti rješenja koja su u posljednje vrijeme sve više zastupljena kao oblikovne vrste kružnih raskrižja: montažno (privremeno), spiralno ili turbo, te kombinirana rješenja. *Montažno (privremeno) kružno raskrižje* predstavlja privremenu izvedbu kružnog raskrižja postavljenoga unutar dimenzija postojećega klasičnoga raskrižja u razini. Pri njegovoj izvedbi ne predviđaju se veliki građevinski zahvati na postojećem raskrižju (npr. zamjena kolnika, izmjena ili dogradnja razdjelnih otoka itd.) koji znatno povećavaju novčana

sredstva za rekonstrukciju. Velika je prednost ovakvih rješenja to što za njihovu izvedbu nije potrebna građevinska dozvola [11]. *Spiralno ili turbo kružno raskrižje* posebna je vrsta višetračnoga raskrižja gdje su neki usmjereni tokovi međusobno fizički odijeljeni [12]. Ideja je za takva rješenja nastala iz potrebe da se za slučajeve preopterećenih višetračnih kružnih raskrižja smanji broj konflikata na mjestima preplitanja (na kružnom kolniku) i križanja (uvoz i izvoz na kontaktu s privoznim kolnicima). Na Slici 1. prikazano je buduće prvo turbo kružno raskrižje (razina 0) u Hrvatskoj koje će biti izvedeno u gradu Osijeku.



Slika 1. Prikaz budućega prvoga turbo kružnoga raskrižja u Hrvatskoj, Osijek [13]

Kombinirana rješenja kružnih raskrižja posebni su modaliteti i kombinacije kružnih raskrižja koji se pojavljuju kao posljedica terenske konfiguracije, prometnih tokova, ciljanoga prometnoga režima ili drugih zahtjeva. Pojedine vrste su: bliska/tandem mini kružna raskrižja (engl. *H-dual*), lančana odnosno verižna rješenja, elipsasta izdužena raskrižja, „Dumb-bell” raskrižja u dvije razine, kombinirana rješenja s dvjema (ili trima razinama), rješenje s prolazom tramvajske pruge itd. [9].

3. OPTIMIZACIJA RASKRIŽJA S KRUŽNIM TOKOM PROMETA

3.1. Optimizacija funkcionalne učinkovitosti i prometne sigurnosti raskrižja s kružnim tokom prometa

U zadnjih 40-tak godina intenzivirala su se istraživanja u pogledu propusne moći odnosno **funkcionalne učinkovitosti** i razine prometne usluge kružnih raskrižja koja su rezultirala razvojem matematskih metoda prilagođenim prema specifičnostima promatranih područja istraživanja. Takve matematske metode ugrađene su u razne simulacijske programe za modeliranje propusne moći i ostalih osobitosti kružnih raskrižja, kao što su npr. SIDRA, ARCADY, RODEL, KREISEL, PTV VISSIM i dr. Prema [8, 9, 10], austrijska, britanska (Kimber) i američka (HCM2010) metoda za proračun funkcionalne učinkovitosti kružnih raskrižja, a koje se temelje se parametrima oblikovnih elemenata i prometnog opterećenja, predstavljaju osnovne metode za definiranje optimizacije funkcionalne učinkovitosti kružnih

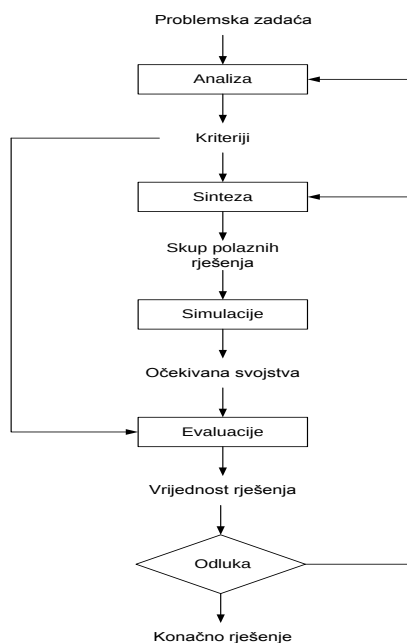
raskrižja. S obzirom da u Republici Hrvatskoj ne postoje dugogodišnja sustavna istraživanja funkcionalne učinkovitosti i ostalih osobitosti kružnih raskrižja, nije moguće preporučiti u kojoj mjeri se određena metoda i/ili simulacijski program može koristiti prilikom određivanja funkcionalne učinkovitosti i stupnja služnosti kružnih raskrižja.

Sigurnost prometa, stupanj sigurnosti prometa ili učinkovitost sigurnosti prometa kružnog raskrižja (eng. *safety performance*) može se kvantificirati kroz poboljšanje sigurnosti raskrižja pomoću smanjenja konfliktne površine i konfliktnih točaka, broja i stope prometnih nesreća, te brzine oko/u raskrižja [14, 15]. Ipak, najčešći oblik kvantificiranja sigurnosti prometa kružnih raskrižja uglavnom se prikazuje kao broj prometnih nesreća nastalih u promatranom vremenskom razdoblju ili se određuje putem odgovarajućih matematskih modela za predviđanje prometnih nesreća. Za potrebe rada i definiranje metode optimizacije prometne sigurnosti kružnih raskrižja, prema [8] navode se britanska (Maycock i Hall), novozelandska (Turner) i američka (HCM2010) metoda za određivanje/predviđanje broja i vrsti prometnih nesreća temeljene na osnovnim oblikovnim elementima kružnog raskrižja. U Republici Hrvatskoj za određivanje sigurnosti prometa kružnih raskrižja uglavnom se koriste podaci o broju i vrsti prometnih nesreća nastalih za promatrano vremensko razdoblje.

3.2. Višekriterijska optimizacija kružnog raskrižja

Dimenzioniranje i oblikovanje kružnog raskrižja u funkciji optimizacije učinkovitosti i prometne sigurnosti je tipični zadatak višekriterijske optimizacije. Općenito, zadatak optimizacije u inženjerstvu i sličnim djelatnostima je izvršiti izbor najbolje varijante (rješenja) iz skupa mogućih varijanti, a u smislu usvojenog kriterija (funkcije cilja). Takva najbolja varijanta naziva se optimalno rješenje zadatka optimizacije. Kriterij optimizacije se obično izražava kriterijskom funkcijom koja za najbolju varijantu (rješenje) treba dostići svoj ekstrem, a s obzirom na ograničenja koja uvjetuju mogućnost postizanja cilja optimizacije. Matematički gledano, problem optimizacije se svodi na određivanje ekstremalnih točaka kriterijske funkcije u području definiranih ograničenja (prostornih, procesnih, tehnoloških i sl.). Kod projektiranja u inženjerstvu (pa tako i u prometnom inženjerstvu) najčešće se radi o više kriterijskih funkcija te se taj slučaj označava kao višekriterijska optimizacija. Najčešće, funkcije cilja su međusobno suprotstavljene (na primjer u ovom slučaju zahtjev za učinkovitost (efikasnost) i zahtjev za sigurnost prometa) te generalno ne postoji jedinstveno rješenje, koje je optimalno za sve funkcije cilja. Osim toga, svaka realna zadaća optimizacije ima u praksi višestapni karakter. U slučaju višekriterijske zadaće to još postoje očiglednije, kako je prikazano na Slici 2., [16]. Povijest primjene višekriterijske optimizacije ima bogato iskustvo u inženjerstvu [17, 18, 19, 20, 21].

U posljednje vrijeme sve je više zastupljena interaktivna optimizacija. Jedna od ideja interaktivne optimizacije je zasnovana na elementima postoptimalne analize kod poboljšanja pojedinog rješenja odluke. Na početku se zadaje neko dopustivo rješenje, a nakon toga se ispituje okolina tog rješenja. Ispitivanje se može provoditi na različite načine, a jedan od zatupljenijih postupaka je primjena varijacije (osjetljivosti) pojedinih vrijednosti funkcija cilja prema najmanje važnoj funkciji cilja. Koristeći se tim podatkom prelazi se na povoljnije rješenje. Procedura može biti obogaćena čitavim nizom novih klasifikacijskih elemenata (pitanja donosiocu odluke), inteligentnim računarskim sučeljem i dr. U nastavku rada planira se korištenje ovog postupka u kombinaciji s metodom ograničavanja funkcije cilja. Kao dodatni klasifikacijski element može se koristiti veličina prikrivene cijene (eng. *shadow price*) kao dodatni kriterij prihvaćanja pojedinog rješenja [22].



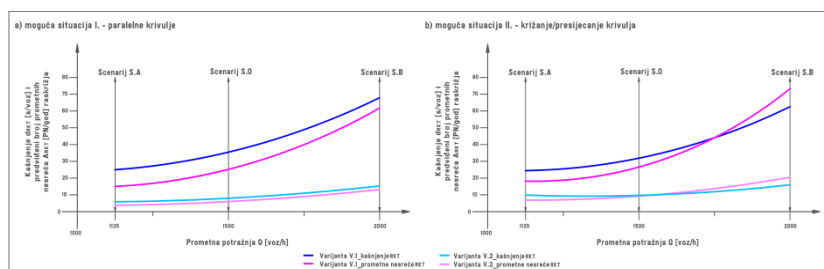
Slika 2. Višestapni proces dobivanja optimalnog rješenja [8]

4. ANALIZA OSJETLJIVOSTI – VALIDACIJA I VERIFIKACIJA MODELA

Analiza osjetljivosti studija je variranja ulaznih parametara modela unutar dopuštenoga područja i promatranje zavisnih promjena u rješenju modela. Proučava kako se promjene u izlaznim podacima modela mogu kvalitativno i kvantitativno dodijeliti različitim izvorima promjena. Primjena je AO popularna u novčanim aplikacijama, analizi rizika, neuralnim mrežama te u svim ostalim područjima u kojima se razvijaju matematski modeli [23].

Kako je namjena predloženoga modela optimiziranje funkcionalne učinkovitosti i prometne sigurnosti kružnoga raskrižja prema mjerodavnom prometnom opterećenju i oblikovnim elementima, validacija i verifikacija modela biti će provedena kroz AO putem variranja prometne potražnje, odnosno intenziteta prometa po privozima. U tu svrhu predložilo bi se nekoliko varijantnih rješenja (npr. Varijanta V.1. i Varijanta V.2) kružnog raskrižja s ciljem provedbe simulacije i AO. Prema navedenome, postavlja se pitanje: Koje je varijantno rješenje „robusnije”, odnosno koje će rješenje biti manje osjetljivo za varijacije prometne potražnje i za te uvjete omogućiti zadovoljavajuću razinu usluge i prometne sigurnosti kružnoga raskrižja? Temeljem je navedenoga potrebno simulirati ponašanje predloženih varijantnih rješenja ponajprije prema nominalnom scenariju odnosno srednje očekivanom (Scenarij S.0), te potom prema manje (Scenarij S.B) i više očekivanom (Scenarij S.A), odnosno manje i vrlo vjerojatnom scenariju.

Kao rezultat prikazana su rješenja za navedene scenarije na Slici 3. Rezultati takvih analiza u kombinaciji s postupcima višekriterijske optimizacije omogućuju/potvrđuju donošenje odluke o optimalnom varijantnom rješenju.



Slika 3. Prikaz vrijednosti kašnjenja i predviđenoga broja prometnih nesreća kružnoga raskrižja za varijantna rješenja u ovisnosti o prometnoj potražnji; moguće situacije: a) I. paralelne krivulje i b) II. križanje/presijecanje krivulja

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

S obzirom na prednosti koje ostvaraju pravilno primjenjena, oblikovana i dimenzionirana kružna raskrižja u pogledu funkcionalne učinkovitosti, služnosti i stupnja prometne sigurnosti potrebno je postojeća problematična raskrižja optimizirati razvojem i primjenom određene prihvatljive metode optimiziranja. Temeljem provedenih terenskih istraživanja na 30-tak postojećih kružnih raskrižja na području Grada Zagreba [7, 8] utvrđen je znatan uzročno-posljedični odnos oblikovnosti na učinkovitost i rizik nastanka prometnih nesreća. Stoga, potrebno je razviti metodu koja bi se temeljila na upotrebi skupa metoda/pristupa višekriterijske optimizacije sa svrhom optimizacije osnovnih oblikovnih elemenata kružnog raskrižja. Za potrebe istraživanja optimizacijskog odnosa utjecajnosti glavnih oblikovnih elemenata na funkcionalnu učinkovitost i sigurnost kružnih raskrižja navedene su prikladne metode. Nakon analize prikladnih metoda, odabira metoda, te definiranja metode, uslijedila bi provjera metode izradom simulacija za prijedlog rekonstrukcije postojećih problematičnih kružnih raskrižja s ciljem optimiziranja njihove funkcionalne učinkovitosti i sigurnosti, te za pravilno projektiranje novih kružnih raskrižja. Metoda bi se provjerila na urbanom jednotračnom mini/malom kružnom raskrižju s četiri jednotračna privoza, a rezultati istraživanja će biti prikazani u narednim radovima.

Provedena istraživanja trebala bi poslužiti kao temelj za daljnja sustavna i opsežna istraživanja korelacijskog odnosa oblikovnih elemenata, prometne potražnje (značajki i strukture prometnih tokova), te ostalih utjecajnih čimbenika s ciljem određivanja zadovoljavajuće razine funkcionalne učinkovitosti i stupnja prometne sigurnosti kružnih raskrižja. Istraživanja bi trebala obuhvatiti veći broj istovrsnih kružnih raskrižja s većim brojem mjernih uzoraka, te posebno dovesti u vezu rezultate prometnih parametara sa stupnjem sigurnosti, analizirajući prometne nesreće i nezgode po vrstama i uzrocima.

LITERATURA

- [1] Ištoka Otković, I. & Dadić, I. (2009): „Comparison of Delays at Signal-controlled Intersection and Roundabout“, *Promet - Traffic & Transportation*, 21(3), pp. 157-165.
- [2] NCHRP - National Cooperative Highway Research Program (2010): *Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition*, Report No. 672, Transportation Research Board, Washington D.C.

- [3] Šubić, M., Legac, I., Pilko, H. (2012): „Analysis of Capacity of Roundabouts in the City of Zagreb According to HCM-C–2006 and Ning Wu Methods“, *Technical Gazzete*, 19(2), pp. 451-457.
- [4] Hyden, C. & Varheyli, A. (2000): „The Effects on Safety, Time Consumption and Environment of Large Scale Use of Roundabouts in an Urban Area: A Case Study“, *Accident Analysis and Prevention*, 32, pp. 11-23.
- [5] Varheyli, A. (2002): „The Effects of Small Roundabout on Emissions and Fuel Consumption: A Case Study“, *Transportation Research Part D-Transport and Environement*, 7, pp. 65-71.
- [6] Sacchi, E., Bassani, M., Persaud, B. (2011): Comparison of Safety Performance Models for Urban Roundabouts in Italy and Other Countries, *Transportation Research Record*, 2265, pp. 253-259.
- [7] Prometna analiza i unapređenje sigurnosti i protočnosti raskrižja s kružnim tokom prometa (2009), studija, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [8] Pilko, H. (2014): *Optimiziranje oblikovne i sigurnosne komponente raskrižja s kružnim tokom prometa*, doktorski rad, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [9] Legac, I. i dr. (2011): *Gradske prometnice*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [10] Smjernice za projektiranje i opremanje raskrižja kružnog oblika – rotora (2002), Institut prometa i veza, Zagreb.
- [11] Benigar, M., Glad, M., Karuza, E. (2012): „Kružna raskrižja na cestama Primorsko-goranske županije - Teorijski principi primjene i konkretna rješenja“, *Zbornik radova Šestoga hrvatskoga savjetovanja o održavanju cesta*, Šibenik, pp. 235-244.
- [12] Tollazzi, T. (2007): *Kružna raskrižja*, IQ plus, Rijeka.
- [13] Rekonstrukcija raskrižja u Strossmayerovoj ulici s krakovima petlje zapadne obilaznice grada Osijeka u kružni tok – Glavni projekt (2013), Rencon d.o.o. Osijek, Osijek.
- [14] FHWA – Federal Highway Administration (2000): *Roundabouts: An Informational Guide*, Publication No. FHWA-RD-00-067, Kittelson & Associates, Inc. Portland, Oregon, USA.
- [15] Kenjić, Z. (2009): *Priručnik za planiranje i projektovanje kružnih raskrsnica – rotora*, IPISA Institut Sarajevo, Sarajevo.
- [16] Marler, R. T. & Arora, J. S. (2004): „Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering“, *Struct Multidisc Optim*, 26, pp. 369-395.
- [17] Andersson J. (2000): *A Survey of Multi-objective Optimization in Engineering Design*, Technical Report LiTH-IKP-R-1097, Department of Mechanical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden.
- [18] Eschenauer, H., Koski, J., Osyczka, A. (1990): *Multicriteria Design Optimization*, Berlin, Springer-Verlag.
- [19] Hwang, C., Paidy, S., Yoon, K. (1980): „Mathematical Programming with Multiple Objectives: A Tutorial“, *Computers & Operations Research*, 7, 1980, pp. 5-31.
- [20] Ringuest, J. (1992): *Multiobjective Optimization: Behavioral and Computational Considerations*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- [21] Steuer, R. (1986): *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [22] Mandžuka, S., Bošnjak, I., Šimunovic, Lj. (2009): „Intelligent Sea Transportation System Postoptimal Analysis“, *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, 8(7), pp. 803-813.
- [23] <http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/index.php?id=759#c2710> (1.6.2013.)