

Upravljanje saobraćajem na kružnim raskrscima – iznuđeno rešenje

Nikola Čelar, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.celar@sf.bg.ac.rs

Jelena Kajalić, Saobraćajni fakultet, Beograd, j.kajalic@sf.bg.ac.rs

Stamenka Stanković, Saobraćajni fakultet, Beograd, s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: Raskrsnice predstavljaju kritične elemente saobraćajne mreže, u kojima dolazi do ukrštanja saobraćajnih tokova. U urbanim sredinama, kružne raskrsnice su često favorizovane zbog percepcije da pružaju veću bezbednost i kapacitet u odnosu na direktne raskrsnice. Ovaj rad analizira navedene stavove kroz komparaciju semaforisanih i kružnih raskrsnica, sa aspekta kapaciteta, nivoa bezbednosti i efikasnosti u različitim saobraćajnim uslovima. Rezultati ukazuju da kružne raskrsnice ne predstavljaju univerzalni tip ukrštanja, posebno u uslovima visokog stepena zasićenja, u kojima semaforisane raskrsnice zbog prirode procesa opsluživanja i fleksibilnosti načina upravljanja mogu obezbediti veću efikasnost saobraćajnog procesa. Rad, dodatno, istražuje mogućnosti primene svetlosnih signala na kružnim raskrscima kao rešenje u uslovima visokog saobraćajnog opterećenja. Konačno, cilj rada je da ukaže da izbor između kružnih i semaforisanih raskrsnica zavisi od funkcije elemenata mreže i zahteva pažljivu analizu ciljeva upravljanja, karakteristika saobraćajnih tokova i specifičnih uslova saobraćaja i okruženja.

Ključne reči: kružna raskrsnica, semaforisana kružna raskrsnica, kapacitet raskrsnice

1 UVODNA RAZMATRANJA

Raskrsnica, kao kritičan element saobraćajne mreže, predstavlja mesto ukrštanja ili spajanja javnih puteva na kome dolazi do presecanja, ulivanja, izlivanja i preplitanja saobraćajnih tokova. Zadatak regulisanja i upravljanja saobraćajem na raskrscima je obezbeđivanje efikasnog i bezbednog transfera svih kategorija korisnika uz minimalan broj konflikata i minimalne vremenske gubitke, odnosno maksimalan kapacitet, zavisno od uspostavljenog cilja upravljanja. Na urbanoj mreži, ukrštanja su dominantno izvedena u istom nivou, tako da svi saobraćajni tokovi koriste jedinstvenu saobraćajnu površinu. Površinske raskrsnice se prema načinu kretanja vozila kroz raskrsnicu mogu podeliti na direktne i indirektno (kružne). Kružna raskrsnica je površinska raskrsnica sa jednosmernim kružnim kretanjem oko centralnog ostrva na kojoj je preraspodela prioriteta regulisana na način da vozila koja se kreću kružnim delom raskrsnice imaju prednost u odnosu na tokove sa prilaza. Režim saobraćaja na kružnim raskrscima je baziran na ravnopravnom tretmanu svih saobraćajnica koje čine raskrsnicu. Međusobni odnosi tokova su svedeni na konflikte usled manevra ulivanja, izlivanja i preplitanja.

Kao ključne prednosti kružnih raskrsnica u literaturi se navode veća bezbednost i veći kapacitet u odnosu na ekvivalentne direktne raskrsnice. Veća bezbednost, odnosno smanjeni rizik od nastanka saobraćajne nezgode, obrazlaže se kroz dalje navedene razloge: redukcije brzine kretanja na prilazima i unutar raskrsnice i manjeg broja konfliktnih tačaka

i prisustva lakših tipova konflikata u odnosu na direktne površinske raskrsnice. Veći kapacitet kružne raskrsnice rezultat je efikasnijeg iskorišćenja konfliktne površine raskrsnice u datom periodu vremena, imajući u vidu da je prihvatljiv interval sleđenja za manevar ulivanja niži u odnosu na prihvatljiv interval sleđenja za manevar presecanja na direktnim nesemaforisanim raskrsnicama. S druge strane, kao razlog ostvarivanja većeg kapaciteta u odnosu na direktne semaforisane raskrsnice obično se navodi da, na kružnim raskrsnicama ne postoje periodi vremena u kome ni jedan saobraćajni tok nema pravo korišćenja raskrsnice, kao i da u nezasićenim stanjima određeni deo zelenog vremena ne biva iskorišćen zbog nepostojanja saobraćajnog zahteva na nekom od prilaza koji pripadaju aktivnom signalnom stanju. Upravo iz navedenih razloga u stručnoj javnosti, ali i u inženjersku praksu u projektima novogradnje, kao i projektima rekonstrukcije, favorizuje se primena indirektnih raskrsnica, često i neselektivno, nezavisno od primenjenog načina upravljanja u uticajnoj zoni raskrsnice, ranga i funkcije puteva ili ulica koje se ukrštaju i karakteristika saobraćajnih tokova na konkretnoj lokaciji. U praksi su česti slučajevi da se u urbanim sredinama postojeće direktne raskrsnice upravljane svetlosnim signalima, apriori transformišu u višetračne kružne raskrsnice. U tom smislu otvara se dilema po pitanju efikasnosti primene kružnih u odnosu na ekvivalentne semaforisane raskrsnice.

Koncept indirektnih raskrsnica i njihova primena započela je početkom 20. veka, neretko kao posledica rešavanja problema neadekvatnih ukrasnih uglova ili većeg broja saobraćajnica (više od četiri) koje formiraju raskrsnicu. Prvobitni način regulisanja saobraćaja je bio formiran tako da su pravo prvenstva prolaza imala vozila koja se ulivaju u kružnu raskrsnicu. Geometrijske karakteristike prvobitnih kružnih raskrsnica bile su koncipirane tako da obezbede ulivanje tokova relativno visokim brzinama i bez zaustavljanja. Porast saobraćajnog zahteva i povećanje broja nezgoda na kružnim raskrsnicama uslovlilo je promenu koncepta prioriteta raskrsnicama, te je usvojeno pravilo po kome vozila u kružnom toku imaju prioritet u opsluživanju. Jasnim definisanjem osnovnih principa formiranja kružnih raskrsnica i njihovih projektnih elemenata nastale su moderne tj. savremene kružne raskrsnice. Iako su kružne raskrsnice, izvorno i po pravilu, regulisane saobraćajnim znakovima, u određenim okolnostima neophodna je primena svetlosnih signala (semafora). Generalno, svetlosni signali se primenjuju na kružnim raskrsnicama u situacijama kada regulativne i građevinske mere ne mogu dovesti do povećanja nivoa usluge, odnosno ukupnog kapaciteta raskrsnice. U tom smislu, uvođenje svetlosnih signala razmatra se kao poslednja opcija u životnom ciklusu kružne raskrsnice, pre razmatranja mogućnosti transformacije u standardnu četvorokraku raskrsnicu. Otuda je u ovom radu dat pregled mogućnosti upravljanja kružnim raskrsnicama primenom svetlosnih signala.

Cilj rada je da se sagleda aspekt efikasnosti i bezbednosti semaforisanih raskrsnica u poređenju sa kružnim raskrsnicama u urbanim sredinama, sa fokusom na identifikaciju situacija u kojima kružne raskrsnice pokazuju inferiornost u odnosu na ekvivalentne direktne raskrsnice. Rad se bavi sagledavanjem svih aspekata funkcionisanja navedenih konkurentskih tipova raskrsnica, kapaciteta, rizika od saobraćajnih nezgoda, vremenskih gubitaka, uzimajući u obzir sve kategorije učesnika u saobraćaju, sa ciljem da se pokaže da kružne raskrsnice ne predstavljaju uvek optimalno rešenje u odnosu na semaforisane raskrsnice, posebno u složenim gradskim sistemima i uslovima visokog stepena zasićenja.

2 „PREDNOSTI“ KRUŽNIH RASKRSNICA

Široko rasprostranjen stav da kružna raskrsnica ima manji broj konfliktnih tačaka od ekvivalentne direktne se može prihvatiti samo ukoliko se porede nesemaforisana direktna raskrsnica sa punim režimom saobraćaja i jednotračna kružna raskrsnica, što se najčešće i koristi kao ilustracija odnosa broja konflikata [1]. Međutim, stvari postaju dijametralno suprotne ukoliko se, na primer, porede višetračna četvorokraka semaforisana raskrsnica sa zaštićenim levim skretanjima (ukupno 4 konfliktna tačke) i ekvivalentna višetračna kružna raskrsnica, sa uslovno beskonačnim brojem konfliktnih tačaka u kružnom delu kolovoza, kao posledica postojanja manevra preplitanja. U prilog navedenom govori i činjenica da se u cilju eliminacije konflikata u manevarima preplitanja savremene višetračne kružne raskrsnice sve češće zamenjuju turbo kružnim raskrsnicama.

S druge strane, foskula da kružne raskrsnice imaju veći kapacitet od ekvivalentne, optimalno upravljane semaforisane raskrsnice, nema nikakvog naučnog, a ni stručnog utemeljenja [2]. Činjenica da zbog nepostojanja prekida u opsluživanju tokova kružnom raskrsnicom može proći veći broj vozila tokom određenog perioda važi samo ukoliko su intenziteti tokova na prilazima, odnosno u kružnom delu kolovoza, takvi da postoje konstantne realizacije prihvatljivih intervala sleđenja za realizaciju manevra ulivanja. Dodatno, u uslovima realizacije visokih vrednosti stepena zasićenja, vidno se pokazuju epiteti „neupravljivosti“ kružnih raskrsnica kroz manifestacije ometanja ili potpunog odsustva neometanog procesa pražnjenja, za razliku od semaforisane raskrsnice, koja je značajno otpornija na realizaciju saobraćajnog procesa u uslovima visokih vrednosti stepena zasićenja. U prilog navedenom je i činjenica da se u uslovima nedostatka kapaciteta na standardnim kružnim raskrsnicama primenuju svetlosni signali.

3 SEMAFORISANJE KRUŽNIH RASKRSNICA

Kao najčešći razlozi regulisanja saobraćaja semaforima na kružnim raskrsnicama navode se:

- nedovoljan kapacitet raskrsnice,
- intenzivni tokovi u levom skretanju, i
- veliki vremenski gubici i/ili dužina reda na jednom ili više prilaza.

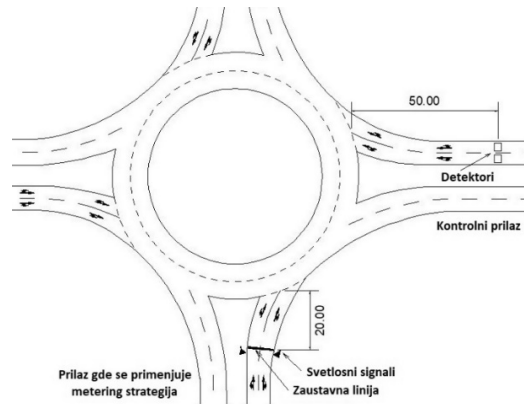
U upravljačkom smislu, u zavisnosti od saobraćajnih karakteristika i specifičnosti problema, primenjuju se dva koncepta upravljanja kružnom raskrsnicom primenom svetlosnih signala i to:

- delimično upravljanje svetlosnim signalima, odnosno primena metering strategije (strategija kontrole pristupa na pojedinačnom prilazu), i
- potpuno upravljanje svetlosnim signalima.

3.1 Metering strategija upravljanja

Osnovna ideja metering strategije upravljanja kružnom raskrsnicom je eliminacija neprihvatljivo visokih vrednosti vremenskih gubitaka i dužine reda na pojedinačnom, kritičnom prilazu kružne raskrsnice. Navedena situacija je po pravilu posledica visoke vrednosti konfliktnog toka i konstantnog nepostojanja prihvatljivog intervala sleđenja za realizaciju manevra ulivanja tokom određenog perioda funkcionisanja raskrsnice.

Metering strategija najčešće se primenjuje tokom vršnog časa, kao i u okolnostima izražene neravnomernosti odnosa intenziteta saobraćajnih tokova na raskrsnici. Suština logike rada zasniva se na prekidanju toka visokog intenziteta (kontrolisani prilaz, prilaz gde se primenjuje metering) u svrhu obezbeđivanja praznjenja reda sa kritičnog prilaza (tzv. kontrolni prilaz). Ograničavajuća okolnost za primenu ovog koncepta upravljanja je postojanje određene „rezerve“ kapaciteta na kontrolisanom prilazu u periodu primene metering strategije [3].

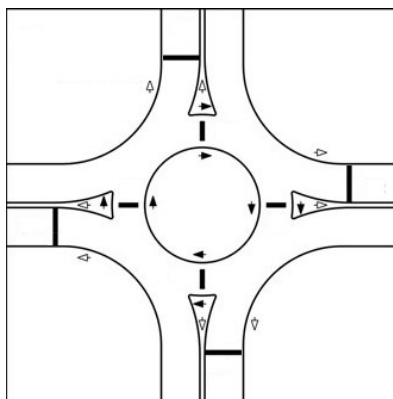


Slika 1: Dispozicija signala kod metering strategije upravljanja kružom raskrsnicom

U okviru ove strategije predmetni saobraćajni tokovi se opslužuju u dve faze, a parametri rada signala se utvrđuju na osnovu aktuelnih saobraćajnih podataka. Trajanje faze u kojoj se opslužuju tokovi sa kontrolisanog prilaza definisano je vrednostima minimalnog i maksimalnog zelenog vremena za posmatrani prilaz. Nakon isteka minimalnog zelenog predmetne faze ista se može produžavati do maksimalnog, ukoliko je vrednost intervala sleđenja manja od unapred definisane kritične vrednosti. U suprotnom, ukoliko se pojave veći intervali sleđenja od kritičnog, uz uslov da je došlo i do detekcije odgovarajuće dužine reda na kontrolnom prilazu, dolazi do promene faze. Vreme trajanja faze u kojoj se opslužuju tokovi na kontrolnom prilazu, definisano je na osnovu vremena potrebnog za praznjenje reda i ovo vreme, takođe, može biti produženo do definisane maksimalne vrednosti trajanja faze.

3.2 Potpuno upravljanje svetlosnim signalima

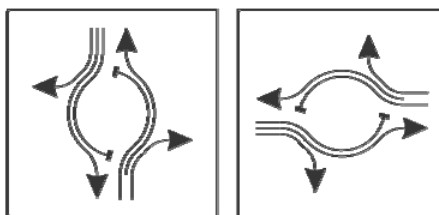
Potpuno upravljanje saobraćajnim tokovima na kružnoj raskrsnici podrazumeva primenu svetlosnih signala na svim prilazima raskrsnici kao i u kružnom delu kolovoza ispred svakog prilaza (Slika 2).



Slika 2: Dispozicija signala kod potpunog upravljanja svetlosnim signalima na kružnoj raskrsnici

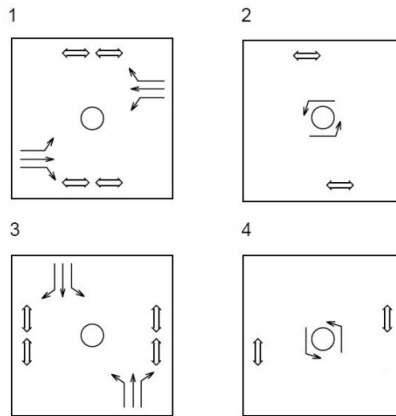
Strategijom potpune semaforizacije kružne raskrsnice ostvaruje se mogućnost optimalne vremenske raspodele korišćenja kružne raskrsnice. Na ostvarenu vrednost kapaciteta pored dužine ciklusa, značajno utiču i geometrijske karakteristike raskrsnice, poput raspoloživog prostora za smeštaj vozila u levom skretanju u kružnom toku, prečnika centralnog ostrva i broja saobraćajnih traka. U osnovnom konceptu ove strategije rad svetlosnih signala je baziran na primeni fiksnih signalnih programa [4].

Opsluživanje saobraćajnih tokova na raskrsnici se u osnovnom konceptu realizuje u dve faze, po pravcima. Tokovi pravo i desno se opslužuju bez zaustavljanja u kružnom toku, dok se tokovi u levom skretanju prekidaju u kružnom toku. U tom smislu, neophodno je obezbediti dovoljno prostora za formiranje reda vozila u levom skretanju. U okolnostima postojanja velikih zahteva za levim skretanjem primenjeni plan faza može biti neadekvatan, odnosno može uzrokovati blokadu raskrsnice.



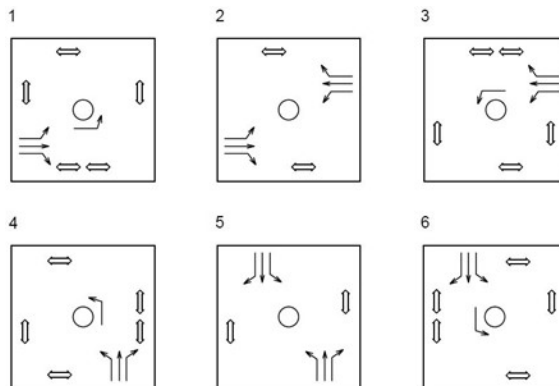
Slika 3: Plan faza osnovnog koncepta semaforizacije kružne raskrsnice

Pored dvofaznog, na kružnim raskrsnicama se primenjuje i složeniji koncept, odnosno četvorofazni plan opsluživanja tokova, naročito u konceptu upravljanja u realnom vremenu. Razlika u odnosu na dvofazni plan faza je što se vozila koja su zaustavljena u kružnom toku opslužuju u okviru posebnih, prelaznih faza koje su namenjene pražnjenju konfliktne površine raskrsnice. Primena ovakvog plana faza je podesna na kružnim raskrsnicama velikog prečnika sa intenzivnim tokovima u levom skretanju.



Slika 4: Plan faza složenog koncepta semaforizacije kružne raskrsnice

Iako retko, na raskrsnicama na kojima postoji dominantan, intenzivan zahtev za levim skretanjem, plan opsluživanja tokova se može formirati u šest faza. Ovakav plan faza kapacitativno favorizuje leva skretanja sa svih prilaza, a na uštrb svih ostalih tokova na raskrsnici. Potrebno je napomenuti da se primenom ovakvog plana faza, značajno skraćuje dužina trajanja pojedinačnih faza, obzirom na sistemski ograničenu dužinu ciklusa, što posledično dovodi do povećanja vremenskih gubitaka.

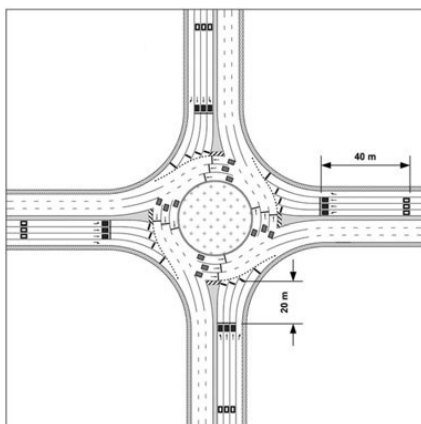


Slika 5: Plan faza u slučaju favorizovanja levih skretanja

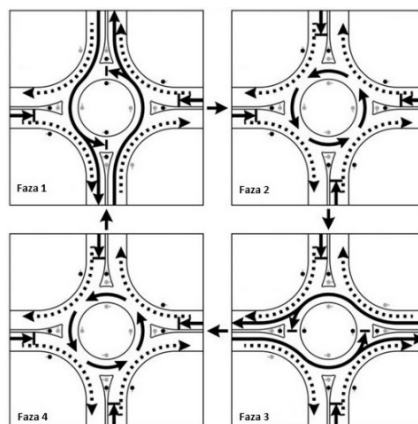
Pored režima rada sa fiksnim parametrima rada signala u praksi je prisutan i koncept rada signala u realnom vremenu, u zavisnosti od aktualnih saobraćajnih parametara. Osnovna ideja „hibridnog“ regulisanja saobraćaja na kružnoj raskrsnici je da se tokom vanvršnog perioda raskrsnica reguliše na klasičan način (saobraćajnim znakovima), a da se tokom vršnih perioda upravlja pomoću svetlosnih signala.

U režimu klasičnog regulisanja saobraćaja svi svetlosni signali na raskrsnici se nalaze u statusu trepćućeg žutog signalnog pojma. Na raskrsnici se vrši konstantno praćenje vrednosti intervala sleđenja i vremena zauzetosti svih detektora. Detektori su pozicionirani u svim saobraćajnim trakama na linijama zaustavljanja i na prilazima raskrsnici, kao i u svim trakama u zonama svetlosnih signala u kružnom toku (Slika 6).

Ukoliko je jednovremeno na najmanje jednom detektoru na liniji zaustavljanja na najmanje tri prilaza ili na najmanje tri detektora u kružnom toku vreme zauzetosti detektora veće od unapred definisane granične vrednosti, dolazi do promene režima regulisanja, odnosno do „aktiviranja” svetlosnih signala. Svetlosni signali rade u četiri definisane faze (složeni koncept upravljanja) sa fiksnim redosledom faza, ali sa promenjivim parametrima rada, zavisno od aktuelnih vrednosti saobraćajnih pokazatelja (Slika 7).



Slika 6: Pozicije detektora za upravljanje u realnom vremenu



Slika 7: Plan faza za upravljanje u realnom vremenu

Generalno posmatrano, plan faza je suštinski koncipiran sa dve faze u kojima se opslužuju tokovi duž pravaca (faza 1 i 3), odnosno faze opsluživanja ulaznih tokova. Između ovih osnovnih faza se nalaze faze namenjene pražnjenju raskrsnice, tokom kojih se opslužuju svi tokovi unutar kružne raskrsnice (faza 2 i 4), tzv. faze opsluživanja tokova unutar kružne raskrsnice.

Nakon isteka minimalnog vremena, do dostizanja maksimalnog zelenog vremena za faze u kojima se opslužuju tokovi duž pravaca utvrđuju se naredni parametri, odnosno ispituju se uslovi koji se odnose na odgovarajuće kombinacije narednih parametara:

- intervali sleđenja na svim detektorima na linijama zaustavljanja i na prilazima za pravac koji ima pravo prolaska raskrsnicom,
- vremena zauzetosti detektora na prilazima koji u aktuelnoj fazi nemaju pravo prolaska raskrsnicom, i
- vremena zauzetosti detektora koji se nalaze u kružnom toku.

Za faze u kojima se opslužuju svi tokovi unutar kružne raskrsnice, nakon isteka minimalnog zelenog vremena, ispituju se uslovi koji se odnose na odgovarajuće kombinacije narednih parametara:

- intervali sleđenja na svim detektorima unutar kružne raskrsnice, i
- vremena zauzetosti detektora na linijama zaustavljanja i na prilazima.

4 DISKUSIJA

Evolucija upravljanja saobraćajem dovela je do određenih apsurdnih situacija i značajnih rasprava o efikasnosti kružnih raskrsnica u poređenju sa semaforisanim raskrsnicama. Na početku, kružne raskrsnice su bezrezervno hvaljene zbog svoje sposobnosti da efikasno opsluže saobraćajne tokove, naročito u uslovima niskog stepena zasićenja, kada je omogućavaju realizacije većih vrednosti protoka i smanjuju vremenske gubitke u poređenju sa direktnim signalisanim raskrsnicama.

Međutim, trend pretvaranja semaforisanih raskrsnica u kružne ne daje uvek pozitivne rezultate. Ova transformacija može biti štetna, posebno u urbanim sredinama u uslovima velikog intenziteta tokova sa izraženim neravnomernostima. Kao jedno od rešenja, trend se nastavio uvođenjem turbo kružnih raskrsnica, koje su projektovane na način da omoguće realizaciju većeg intenziteta saobraćaja eliminacijom manevara preplitanja. Međutim, i ovaj koncept nije odgovorio na izazove u uslovima velikog saobraćajnog opterećenja, što je dovelo do razmatranja primene svetlosnih signala i na ovom tipu raskrsnica. Na ovaj način dolazi do degradiranja pozitivnih efekata, naročito kapaciteta kružnih raskrsnica, koji su bili i motiv za njihovo prethodno uvođenje.

Potrebno je uvek imati u vidu činjenicu da kapacitet kružne raskrsnice direktno zavisi od intenziteta konfliktnih tokova, odnosno protoka i njegove distribucije. Sa druge strane, kapacitet semaforisanih raskrsnica ne zavisi od navedenih veličina, i karakteriše ih fleksibilnost u pogledu preraspodele ukupnog kapaciteta raskrsnice po signalnim grupama. Ova zavisnost kod kružnih raskrsnica postaje još izraženija prisustvom pešaka i biciklista, koji dodatno utiču na njihovo kapacitet i efikasnost.

Svakako, kružne raskrsnice imaju svoju ulogu u sistemu upravljanja saobraćajem, naročito u funkciji smirivanja saobraćaja, u zonama 30, na urbanoj mreži nižeg ranga, na mestima kontakta vangradske i gradske mreža i sl. Takođe, njihova primena je opravdana na vangradskoj mreži na ukrštanjima državnih puteva istog ili sličnog ranga, kao sekundarni autoputski čvorovi i sl.

Kružne raskrsnice mogu biti efikasno primenjene kao pojedinačni, izolovani elementi u određenim saobraćajnim uslovima, ali njihova upotreba na primarnoj mreži treba da bude pažljivo analizirana, kako se ne bi narušila heterogenost upravljanja na koridorima ili u zonama. Naime, iako kružne raskrsnice mogu pružiti prednosti u specifičnim situacijama, njihov koncept samoupravljalivosti gubi na značaju sa povećanjem protoka saobraćaja. Kada se protok znatno poveća, kružne raskrsnice često ne mogu održati efikasnost i nivo usluge koje pružaju semaforisane raskrsnice, naročito one sa upravljanjem u realnom vremenu. Stoga, iako kružne raskrsnice imaju svoje mesto u saobraćajnom sistemu, njihova primena na ključnim gradskim koridorima mora biti pažljivo evaluirana u kontekstu sveobuhvatnog sistema upravljanja saobraćajem u gradovima.

Nijedan tip raskrsnice nije apriori bolji ili lošiji od drugih, svaki ima svoje specifične prednosti i nedostatke, te svoje mesto primene u zavisnosti od saobraćajnih uslova i zahteva. Kružne raskrsnice, sa svojom sposobnošću da povećaju kapacitet u uslovima niskog saobraćajnog zasićenja, efikasno funkcionišu u određenim kontekstima, kao što su lokalna mreža ili zone smirenog saobraćaja. S druge strane, semaforisane raskrsnice mogu pružiti bolju kontrolu i kapacitet u uslovima visokog saobraćajnog opterećenja. Ključ uspešnog upravljanja saobraćajem leži u pažljivom odabiru odgovarajućeg tipa raskrsnice na osnovu jasnih kriterijuma primene i specifičnih potreba saobraćajnog sistema.

LITERATURA

- [1] Čelar, Nikola., Kajalić, Jelena., Stanković, Stamenka. 2021. Regulisanje saobraćajnih tokova. Beograd: Saobraćajni Fakultet
- [2] Tan, J. Comparison of capacity between roundabout design and signalised junction design, 1 st Swiss Transport Research Conference Monte Verità / Ascona, March 1.-3. 2001
- [3] Murat, Y. S., and Guo, R. (2021). Signalized Roundabouts. In International Encyclopedia of Transportation(pp. 227–237). Elsevier.
- [4] H. Xu, K. Zhang, and D. Zhang, “Multi-level traffic control at large four-leg roundabouts,” J. Adv. Transp., vol. 50, no. 6, pp. 988–1007, Oct. 2016

SUMMARY

Traffic Management at Roundabouts - A Compelled Solution

Abstract: Intersections represent critical elements of the traffic network, where various traffic flows intersect and merge. In urban areas, roundabouts are often favored due to the perception that they offer greater safety and capacity compared to direct, especially signalized, intersections. This paper analyzes these views through a detailed comparison of signalized and roundabout intersections, focusing on their capacity, safety levels, and efficiency in different traffic conditions. The results indicate that roundabouts are not always superior, especially in saturated traffic conditions, where signalized intersections can provide better control and efficiency. Therefore, the paper explores the potential application of traffic signals at roundabouts as a solution in conditions of high traffic volume. The aim of the paper is to show that the choice between roundabouts and signalized intersections is situation-dependent and requires careful analysis of specific traffic conditions.

Key words: roundabout, signalized roundabout, intersection capacity