

Optimizacija rada semaforizovanih raskrsnica u širem području oko zone radova⁴

Aleksandra Obradović, Yunex Traffic, Beograd,

aleksandra.obradovic.ext@yunextraffic.com

Katarina Tadić, Yunex Traffic, Beograd, katarina.tadic@yunextraffic.com

Ivana Drešević, Yunex Traffic, Beograd, ivana.dresevic@yunextraffic.com

Rezime: Upravljanje saobraćajem na semaforizovanim raskrsnicama u širem području oko zone radova predstavlja značajan izazov usled promena uslova saobraćaja. Prisustvo radova na putu, odnosno potpuno zatvaranje dela saobraćajnice, dovodi do promena u raspodeli saobraćajnih tokova na mreži, što se manifestuje kroz promenu uobičajnih ruta kretanja vozila i povećano opterećenje u širem području oko zone radova. Savremeni pristupi upravljanju saobraćajem na raskrsnicama omogućava prilagođavanje signalnih planova u skladu sa promenljivim uslovima u saobraćajnom toku. Poseban značaj ima pravovremeno prepoznavanje promena u opterećenju i njihovo uvažavanje prilikom donošenja upravljačkih odluka, čime se doprinosi unapređenju ukupnih performansi sistema.

Ključne reči: upravljanje saobraćajem, zona radova, signalni planovi, saobraćajni tokovi

1 UVOD

U urbanim saobraćajnim mrežama zone radova predstavljaju jedan od najčešćih uzroka privremenih izmena saobraćaja. Zatvaranje ili ograničavanje kapaciteta pojedinih saobraćajnica i raskrsnica dovodi do promene uobičajenih ruta kretanja vozila i preraspodele saobraćajnih tokova na okolnu mrežu. Posledice ovakvih promena najčešće se ogledaju kroz povećano opterećenje pojedinih raskrsnica, duža vremena putovanja i promene u radu sistema upravljanja saobraćajem. Poseban izazov predstavlja pravovremeno prilagođavanje rada semaforizovanih raskrsnica novonastalim uslovima. Savremeni sistemi upravljanja saobraćajem koriste podatke sa detektora kako bi prepoznali promene u opterećenju i prilagodili signalne programe stvarnim potrebama saobraćajnog toka. Predmet ovog rada jeste analiza uticaja zatvaranja raskrsnice Antifašističke brobe – pešački prelaz kod železničke stanice "Novi Beograd" (R3) na funkcionisanje okolne mreže semaforizovanih raskrsnica. Posebna pažnja posvećena je promenama protoka vozila, okupiranosti detektorskih petlji i dodeljenog zelenog vremena na raskrsnici Nikole Dobrovića – Omladinskih brigada (R1) koja predstavlja jednu od značajnijih raskrsnica u zoni uticaja radova. Analiza je zasnovana na podacima prikupljenim sa detektorskih petlji pre i nakon zatvaranja raskrsnice. Cilj rada je da se utvrdi na koji način promene saobraćajnih tokova izazvane zonom radova utiču na rad

⁴ CC-BY licenca

adaptivnog sistema upravljanja, kao i da se proceni sposobnost sistema da kroz promenu signalnih parametara odgovori na novonastale uslove saobraćaja.

2 OSNOVE UPRAVLJANJA SAOBRAĆAJEM NA SEMAFORIZOVANIM RASKRSNICAMA

Upravljanje saobraćajem na semaforizovanim raskrsnicama predstavlja jedan od ključnih elemenata organizacije saobraćaja u urbanim sredinama, sa ciljem obezbeđivanja efikasnog i bezbednog saobraćajnog toka. Funkcionisanje semaforizovanih raskrsnica zasniva se na primeni signalnih planova kojima se definišu trajanje ciklusa, raspodela zelenih vremena i redosled signalnih faza. Ovi parametri određuju način raspodele raspoloživog kapaciteta između različitih saobraćajnih tokova i imaju značajan uticaj na performanse raskrsnice (Webster, 1958). Analiza rada raskrsnica zasniva se na parametrima saobraćajnog toka, kao što su protok, brzina i gustina, kao i na pokazateljima poput vremena čekanja i vremena putovanja. Njihovom primenom moguće je proceniti nivo usluge i identifikovati potencijalne probleme u funkcionisanju saobraćajnog sistema (Čelar et al., 2020). U zavisnosti od načina upravljanja razlikuju se fiksni i adaptivni režimi rada. Fiksni režimi zasnivaju se na unapred definisanim signalnim planovima, dok adaptivni sistemi koriste podatke prikupljene u realnom vremenu kako bi automatski prilagođavali signalne parametre promenljivim uslovima saobraćaja. Zahvaljujući mogućnosti prilagođavanja trenutnom opterećenju, adaptivni sistemi omogućavaju efikasnije korišćenje raspoloživog kapaciteta i posebno su pogodni za primenu u privremenim uslovima saobraćaja i promena u raspodeli tokova (Papageorgiou et al., 2003). Pored upravljanja pojedinačnim raskrsnicama, značajan aspekt predstavlja i koordinacija rada više raskrsnica u okviru jedinstvene saobraćajne mreže. Koordinisano upravljanje omogućava ostvarivanje kontinuiteta saobraćajnog toka kroz koridore sa većim opterećenjem i doprinosi smanjenju zadržavanja vozila.

3 UTICAJ ZONE RADOVA NA SAOBRAĆAJNI TOK

Zone radova predstavljaju značajan izvor promene u funkcionisanju saobraćajne mreže, naročito u urbanim sredinama sa visokim intenzitetom saobraćaja. Ograničavanje ili zatvaranje pojedinih saobraćajnica i raskrsnica menja raspoloživi kapacitet mreže i dovodi do preraspodele saobraćajnih tokova na alternativne pravce kretanja (FHWA, 2004). Povećan intenzitet saobraćaja može izazvati produženje vremena putovanja, povećanje dužine kolona i veću iskorišćenost kapaciteta infrastrukture. Raskrsnice predstavljaju najosetljivije tačke saobraćajne mreže u uslovima promena tokova, jer se upravo na njima najdirektnije manifestuju efekti povećanog opterećenja (Eom & Kim, 2020). Promene u intenzitetu i strukturi saobraćajnih tokova neposredno utiču na rad semaforizovanih raskrsnica. Signalni planovi koji su projektovani za uobičajene uslove saobraćaja često postaju neadekvatni u uslovima poremećaja, što može dovesti do povećanja kašnjenja, smanjenja brzine kretanja i povećanja broja zaustavljanja vozila (Qadri et al., 2020). Dodatno, povećano opterećenje jedne raskrsnice može proizvesti lančane efekte na susedne raskrsnice, zbog čega se analiza sve češće sprovodi na nivou cele mreže umesto na nivou pojedinačnih lokacija (Gao et al., 2020). U ovakvim uslovima poseban značaj imaju sistemi adaptivnog upravljanja koji koriste podatke prikupljene sa detektora za prilagođavanje signalnih planova u realnom vremenu.

Optimizacija zelenih vremena i koordinacija rada više raskrsnica omogućavaju efikasnije korišćenje raspoloživog kapaciteta mreže i predstavljaju jednu od najefikasnijih mera za ublažavanje posledica zona radova (Qadri et al., 2020). Savremena istraživanja pokazuju da dinamičko upravljanje signalizacijom ostvaruje bolje rezultate od fiksnih signalnih planova u uslovima promenljivog opterećenja i poremećaja izazvanih radovima na putnoj mreži (Høye et al., 2024).

4 ANALIZA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Istraživanje je sprovedeno sa ciljem analize uticaja zatvaranja jedne semaforizovane raskrsnice na raspodelu saobraćajnih tokova i rad sistema upravljanja saobraćajem u okolnoj mreži raskrsnica. Analiza je obuhvatila četiri semaforizovane raskrsnice i to:

1. Nikole Dobrovića – Omladinskih brigada (R1),
2. Bulevar Heroja sa Košara – Bulevar Crvene Armije (R2),
3. Antifašističke brobe – pešački prelaz kod železničke stanice "Novi Beograd" (R3) i
4. Vladimira Popovića – Milutina Milankovića – Jurija Gagarina (R4).

Ulazni podaci korišćeni u istraživanju prikupljeni su putem detektorskih petlji postavljenih na analiziranim raskrsnicama. U periodu od 15.01.2026. godine došlo je do zatvaranja deonice Antifašističke borbe, od ulice Jurija Gagarina do ulice Milutina Milankovića. Za potrebe analize, posmatrana su dva vremenska perioda:

- 14.01.2026. godine, kao period pre zatvaranja raskrsnice;
- 21.01.2026. godine, kao period nakon zatvaranja raskrsnice usled izvođenja radova.

Važno je naglasiti da je raskrsnica R1 u oba analizirana perioda funkcionisala u adaptivnom režimu upravljanja. Prema tome, poređenje stanja pre i nakon zatvaranja raskrsnice R3 ne predstavlja poređenje različitih režima upravljanja, već analizu reakcije istog adaptivnog sistema na promenu saobraćajnog zahteva. Zatvaranje raskrsnice R3 dovelo je do preraspodele saobraćajnih tokova u mreži, dok je adaptivni sistem na raskrsnici R1, na osnovu podataka sa detektora, reagovao prilagođavanjem signalnih parametara registrovanim promenama opterećenja. Analiza je sprovedena na osnovu celodnevnih podataka kako bi bile obuhvaćene promene saobraćajnih tokova tokom vršnih i vanvršnih perioda opterećenja. Ovakav pristup omogućava realniju procenu uticaja zatvaranja raskrsnice, kao i celog isključenja sa mosta na Adi ka R3, na funkcionisanje saobraćajne mreže u odnosu na analizu zasnovanu isključivo na jednom časovnom intervalu. Posebna pažnja posvećena je promenama intenziteta saobraćajnih tokova na prilazima raskrsnica, kao i načinu na koji je sistem upravljanja reagovao na novonastale uslove. Analizirano je dodeljeno vreme zelenog signala po signalnim grupama, odnosno promene signalnih programa nastale kao odgovor na preraspodelu saobraćajnih tokova nakon zatvaranja raskrsnice. Na osnovu registrovanih protoka vozila izvršena je identifikacija pravaca koji su preuzeli najveći deo preusmerenog saobraćaja. Zatim su analizirane promene u radu signalizacije kroz korekcije trajanja zelenog vremena i promene u raspodeli signalnog ciklusa između pojedinih prilaza. Na taj način sagledana je sposobnost sistema da se adaptira promenjenim uslovima saobraćaja i obezbedi efikasnije korišćenje raspoloživog kapaciteta mreže.

4.1 Rezultati istraživanja

Analiza prikupljenih podataka (Tabela 1) pokazala je da je zatvaranje posmatrane raskrsnice uticalo na promenu raspodele saobraćajnih tokova u širem području zone radova. Na svim analiziranim raskrsnicama registrovane su promene intenziteta saobraćaja, pri čemu je deo vozila preusmeren na alternativne pravce kretanja. Intenzitet promena nije bio jednak na svim lokacijama, već je zavisio od položaja raskrsnice u mreži i njene uloge u prihvatanju preusmerenih tokova.

Tabela 1 Protok vozila (voz/dan) pre i tokom izvođenja zone radova na raskrsnici R3

Naziv signalne grupe Broj raskrsnice	Pre zone radova				Nakon zone radova			
	SG10	SG20	SG30	SG40	SG10	SG20	SG30	SG40
R1	21.191	16.387	15.262	18.477	23.895	17.833	16.803	23.872
R2	/ ⁵	19.995	4.216	18.892	/	23.294	5.193	24.769
R4	13.366	21.224	8.057	13.366	14.554	24.791	12.150	14.554

Poređenjem podataka pre i nakon zatvaranja raskrsnice uočene su promene opterećenja na okolnim raskrsnicama, što ukazuje na prostiranje efekata zone radova kroz širu saobraćajnu mrežu. Za detaljnu analizu odabrana je raskrsnica R1, koja predstavlja jednu od ključnih raskrsnica u posmatranom području, sa značajnom ulogom u distribuciji saobraćajnih tokova i povezivanju glavnih saobraćajnih pravaca. Zbog svoje funkcionalne važnosti i visokog stepena opterećenja, ova raskrsnica je pogodna za analizu uticaja promena saobraćajnih tokova na rad adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem.

4.2 Analiza raskrsnice Nikole Dobrovića – Omladinskih brigada (R1)

Za raskrsnicu Nikole Dobrovića – Omladinskih brigada (R1) analizirani su podaci o protoku vozila, okupiranosti detektorskih petlji i maksimalno dodeljenom zelenom vremenu. Analiza je izvršena za karakteristične periode dnevnog opterećenja:

- jutarnji vršni period od 07:00 do 09:00 h,
- podnevni period od 11:00 do 13:00 h,
- popodnevni vršni period od 16:00 do 18:00 h.

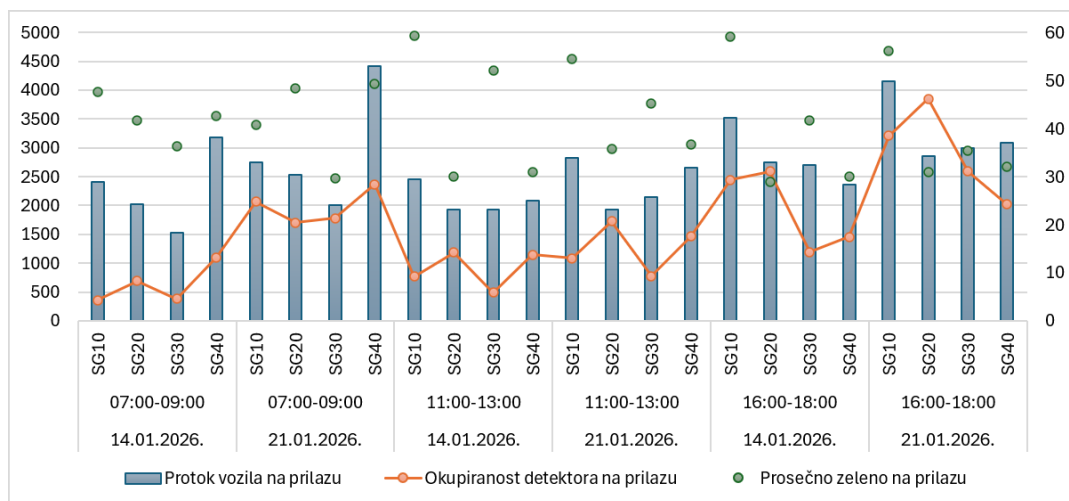
Posmatrani pokazatelji analizirani su za period pre zatvaranja raskrsnice Antifašističke brobe – pešački prelaz kod železničke stanice "Novi Beograd" i za period nakon uvođenja zone radova. Na slici 1 prikazana je situacioni plan raskrsnice Nikole Dobrovića – Omladinskih brigada (R1).

⁵ Signalna grupa SG10 na raskrsnici R2 nije uključena u analizu jer je predmetni prilaz zatvoren za saobraćaj



Slika 1 Situacioni plan raskrsnice Nikole Dobrovića – Omladinskih brigade (R1)

Na grafikonu 1 prikazani su protok vozila, okupiranost detektora i prosečno dodeljeno zeleno vreme za signalne grupe SG10, SG20, SG30 i SG40 u periodima 07:00-09:00 h, 11:00-13:00 h i 16:00-18:00 h, za stanje pre zatvaranja raskrsnice (14.01.2026.) i nakon zatvaranja raskrsnice (21.01.2026.).

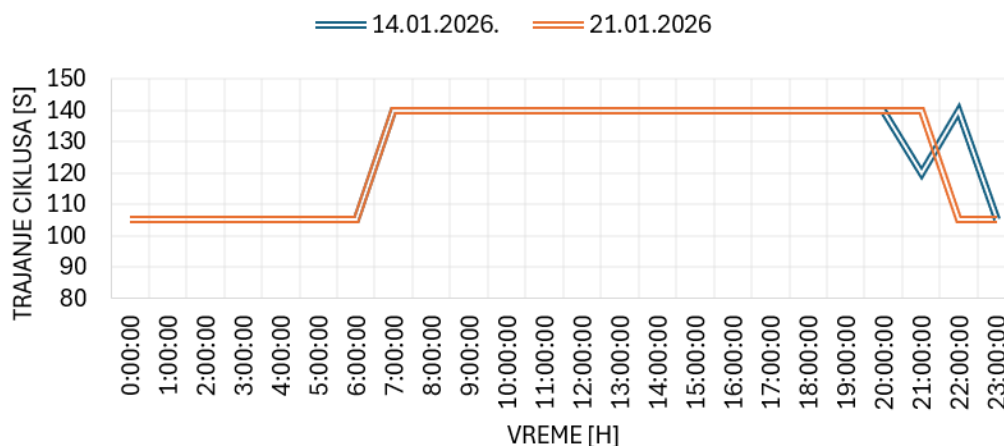


Grafikon 1 Poređenje protoka vozila, okupiranosti detektora i prosečnog zelenog vremena na raskrsnici R1 u uslovima pre i nakon zatvaranja raskrsnice R3

Analizom rezultata utvrđeno je da je zatvaranje raskrsnice R3 izazvalo promene u raspodeli saobraćajnih tokova na okolnoj mreži, što se posebno odrazilo na rad raskrsnice R1. Nakon uvođenja zone radova registrovano je povećanje protoka vozila na više signalnih grupa, pri čemu su najizraženije promene zabeležene tokom jutarnjeg i popodnevog vršnog perioda. Najveći porast protoka registrovan je na signalnoj grupi SG40 u jutarnjem periodu od 07:00 do 09:00 časova (+39%), dok su značajna povećanja zabeležena i na signalnim grupama SG30 (+31%) i SG20 (+25%). U popodnevnom vršnom

periodu od 16:00 do 18:00 časova povećanje protoka bilo je posebno izraženo na signalnoj grupi SG40 (+30%), što ukazuje da je deo saobraćaja preusmerenog zbog zatvaranja raskrsnice R3 koristio upravo pravce koji prolaze kroz raskrsnicu R1. Povećanje protoka praćeno je povećanjem okupiranosti detektorskih petlji na gotovo svim analiziranim prilazima. Najveća promena registrovana je na signalnoj grupi SG10 u jutarnjem periodu, gde je okupiranost povećana sa 4% na 25%. Iako je ovako veliki procenat posledica relativno male početne vrednosti, dobijeni rezultati jasno ukazuju na značajno povećanje prisustva vozila u zoni detekcije nakon zatvaranja raskrsnice R3. Tokom popodnevno vršnog perioda okupiranost je na pojedinim prilazima prelazila 40%, što potvrđuje da je raskrsnica R1 preuzela povećano opterećenje u analiziranom periodu. Istovremeno je uočena reakcija adaptivnog sistema upravljanja saobraćajem kroz promene dodeljenog zelenog vremena. Na prilazima sa povećanim opterećenjem sistem je prilagođavao signalne parametre kako bi omogućio propuštanje većeg broja vozila tokom signalnog ciklusa. Najveće povećanje prosečnog zelenog vremena registrovano je na signalnoj grupi SG20 u periodu od 11:00 do 13:00 časova (+20%), dok je na signalnoj grupi SG40 u istom periodu povećanje iznosilo 19,4%. Ovakvo ponašanje ukazuje da je sistem uspešno registrovao promene u opterećenju putem detektorskih petlji i prilagodio rad signalizacije novonastalim uslovima.

Na prilazima sa povećanim opterećenjem sistem je reagovao preraspodelom dodeljenog zelenog vremena između signalnih grupa u okviru nepromenjenog trajanja ciklusa u analiziranim periodima. Najveće povećanje prosečnog zelenog vremena registrovano je na signalnoj grupi SG20 u periodu od 11:00 do 13:00 časova (+20%), dok je na signalnoj grupi SG40 u istom periodu povećanje iznosilo 19,4%. Ovakvo ponašanje ukazuje da je sistem uspešno registrovao promene u opterećenju putem detektorskih petlji i prilagodio rad signalizacije novonastalim uslovima.



Grafikon 2 Poređenje trajanja signalnog ciklusa na raskrsnici R1 pre i nakon zatvaranja raskrsnice R3

Pored promene dodeljenog zelenog vremena, analizirano je i trajanje signalnog ciklusa, kako bi se utvrdilo da li je reakcija adaptivnog sistema na promenu saobraćajnog zahteva ostvarena promenom ukupnog trajanja ciklusa ili preraspodelom raspoloživog

zelenog vremena između signalnih grupa. Kao što je prikazano na Grafikonu 2, tokom sva tri karakteristična perioda obuhvaćena detaljnom analizom (07:00–09:00 h, 11:00–13:00 h i 16:00–18:00 h), trajanje ciklusa iznosilo je 140 s i pre i nakon zatvaranja raskrsnice R3.

Dobijeni rezultati pokazuju da se reakcija adaptivnog sistema u analiziranim periodima nije manifestovala kroz promenu trajanja ciklusa, već kroz preraspodelu zelenog vremena između signalnih grupa u okviru ciklusa nepromenjenog trajanja. Budući da je trajanje ciklusa ostalo nepromenjeno, promene dodeljenog zelenog vremena istovremeno predstavljaju promene relativnog udela zelenog vremena pojedinih signalnih grupa u ciklusu. Povećanje ovog odnosa povećava raspoloživi deo ciklusa namenjen opsluživanju odgovarajuće signalne grupe

5 ZAKLJUČAK

Zone radova predstavljaju značajan izvor poremećaja u funkcionisanju urbanih saobraćajnih mreža, jer dovode do promene uobičajenih ruta kretanja vozila i preraspodele saobraćajnih tokova na okolne saobraćajnice i raskrsnice. U okviru ovog rada analiziran je uticaj zatvaranja raskrsnice R3 na funkcionisanje okolne mreže, sa posebnim osvrtom na raskrsnicu R1 kao jednu od ključnih raskrsnica u zoni uticaja radova. Analiza podataka prikupljenih sa detektorskih petlji pokazala je da je nakon zatvaranja raskrsnice R3 došlo do povećanja opterećenja na pojedinim prilazima raskrsnice R1. Najveće povećanje protoka vozila registrovano je na signalnoj grupi SG40 u jutarnjem vršnom periodu (07:00–09:00 h) i iznosilo je 39%, dok je na signalnoj grupi SG30 povećanje iznosilo 31%. Istovremeno je zabeležen porast okupiranosti detektorskih petlji na svim posmatranim prilazima, pri čemu je najveća promena registrovana na signalnoj grupi SG10, gde je okupiranost povećana sa 4% na 25%. Rezultati takođe pokazuju da je sistem upravljanja saobraćajem prepoznao promene u opterećenju i reagovao prilagođavanjem signalnih parametara. Najveće povećanje prosečnog zelenog vremena registrovano je na signalnoj grupi SG20 u periodu od 11:00 do 13:00 časova i iznosilo je 20%, dok je na signalnoj grupi SG40 povećanje iznosilo 19,4%. Promene dodeljenog zelenog vremena ukazuju na adaptivnu reakciju sistema u cilju efikasnijeg opsluživanja povećanih saobraćajnih zahteva. Dobijeni rezultati potvrđuju da se efekti zatvaranja raskrsnice R3 ne zadržavaju samo na neposrednoj lokaciji izvođenja radova, već utiču na funkcionisanje šire saobraćajne mreže. Istovremeno, analiza pokazuje da adaptivni sistem upravljanja saobraćajem omogućava pravovremenu reakciju na promene saobraćajnih tokova i doprinosi efikasnijem korišćenju raspoloživog kapaciteta raskrsnice R1 u uslovima poremećaja izazvanih zonom radova.

LITERATURA

- [1] Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings. Road Research Technical Paper No. 39.
- [2] Čelar, Nikola, Stanković, Stamenka, Kajalić, Jelena. 2020. Osnove upravljanja svetlosnim signalima. Beograd: Saobraćajni fakultet.
- [3] Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V. (2003). Review of road traffic control strategies. Proceedings of the IEEE, 91 (12), 2043-2067.
- [4] FHWA (2004). Work Zone Safety and Mobility Rule. Federal Highway Administration.
- [5] Eom, M., & Kim, B.-I. (2020). The traffic signal control problem for intersections: A review. European Transport Research Review, 12(1), 62.
- [6] Gao, K., Huang, S., Xie, J., Xiong, N. N., & Du, R. (2020). A review of research on intersection

control based on connected vehicles and data-driven intelligent approaches. Electronics, 9(6), 885.

- [7] Qadri, S. S. S. M., Gökçe, M. A., & Öner, E. (2020). State-of-art review of traffic signal control methods: Challenges and opportunities. European Transport Research Review, 12(1), 55.
- [8] Høye, A., Bjørnskau, T., & Hesjevoll, I. S. (2024). Efficiency of dynamic traffic signal control in work zones with shuttle traffic. European Transport Research Review, 16

SUMMARY

Optimization of signalized intersections in the wider area surrounding a work zone

Abstract: Traffic management at signalized intersections in the wider area surrounding a work zone represents a significant challenge due to changes in traffic conditions. The presence of roadworks, particularly the complete closure of a road segment, leads to a redistribution of traffic flows within the network. This is reflected in changes to typical vehicle routes and increased traffic demand in the broader area around the work zone. Modern approaches to traffic management at intersections enable the adjustment of signal plans in accordance with varying traffic conditions. Timely identification of changes in traffic demand and their consideration in the decision-making process play a crucial role in improving overall system performance.

Key words: traffic management, work zones, signal control plans, traffic flow