

OPTIMALNI MODEL KOORDINACIJE SVETLOBNIH SIGNALNIH NAPRAV V RAZCEPNEM DIAMANTNEM KRIŽIŠČU NA PROMETNI MREŽI

OPTIMAL TRAFFIC SIGNAL COORDINATION MODEL FOR ROAD NETWORK WITH A DIVERGING DIAMOND INTERCHANGE

Luka Trček, mag. inž. grad.

luka.trcek@fgg.uni-lj.si

dr. Rok Marsetič, univ. dipl. inž. grad.

rok.marsetic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 656.11:625.711.1(497.4)

Povzetek | V članku proučujemo sistem križišč v omrežju z razcepnim diamantnim križiščem, kjer so križišča opremljena s prometno odvisnimi svetlobno signalnimi napravami. Vzpostavitev optimalnega modela koordinacije na cestni mreži z razcepnim diamantnim križiščem zahteva drugačen pristop kot pri klasičnih križiščih. Zasnova tovrstnega diamantnega križišča namreč ne omogoča klasične izvedbe krmilnih programov, kjer bi se promet v isti fazi vodil sočasno v obeh glavnih smereh, kar otežuje koordinacijo prometnega toka v glavnih prometnih smereh. Zanima nas, kako z različnimi modeli koordinacije med svetlobnimi signalnimi napravami povečamo kapaciteto omrežja in zmanjšamo zamude vozil. Predpostavili smo dve različni izvorno ciljni matriki in štiri koordinacijske modele. Za vsak model in izvorno ciljno matriko smo določili optimalno dolžino cikla in dolžine zelenih faz ter določili nekatere indikatorje prometnega toka v omrežju (povprečna zamuda vozil, stopnja nasičenosti, stopnja zaustavljanja). Pokazali smo, da lahko z različnimi modeli koordinacije dosegamo različne nivoje uslug prometnega toka. Izkaže se namreč, da se kapacitete omrežja z različnimi modeli koordinacije precej razlikujejo in da višja kapaciteta omrežja ne pomeni nujno manjših povprečnih zamud vozil v omrežju. Rezultati so pokazali, da je vzpostavitev koordinacije z vidika zmanjšanja zamud vozil smiselna, ko prometne obremenitve dosežejo vsaj približno 80 % kapacitete nekoordiniranega omrežja. Določili smo model koordinacije, ki je za spreminjanje izvorno ciljnih matrik in odstopanje le-teh od predvidenih najmanj občutljiv.

Ključne besede: razcepno diamantno križišče, koordinacija, povprečna zamuda vozil, kapaciteta omrežja

Summary | This article presents an unconventional approach to traffic signal coordination on a road network with a diverging diamond interchange with traffic actuated signals. While this novel design can significantly improve the efficiency of an interchange, it introduces difficulties in coordinating with other traffic signals due to non-classical traffic signal operation, as the two main directions cannot be managed in the same phase. We compare different traffic signals coordination models in terms of increasing network capacity and reducing vehicle delays. Two different origin-destination matrices and four di-

fferent coordination models were studied. We determined the optimal cycle length and the optimal split for each coordination model and each origin-destination matrix and calculated three performance parameters, namely average delay, degree of saturation and stop rate. The results show different performances of the four coordination models, resulting in significant differences in network capacities. Interestingly, higher network capacity does not necessarily lead to lower average delay in the network. Additionally, we have shown, that traffic signal coordination on a road network with diverge diamond interchange with the aim of reducing vehicle delays is beneficial when traffic volumes reach 80 % of the capacity of uncoordinated road network. Finally, we determined a coordination model that is least sensitive to changes in origin-destination matrix to account for normal variations in traffic volumes.

Key words: diverging diamond interchange, coordination, average delay, network capacity

1 • UVOD

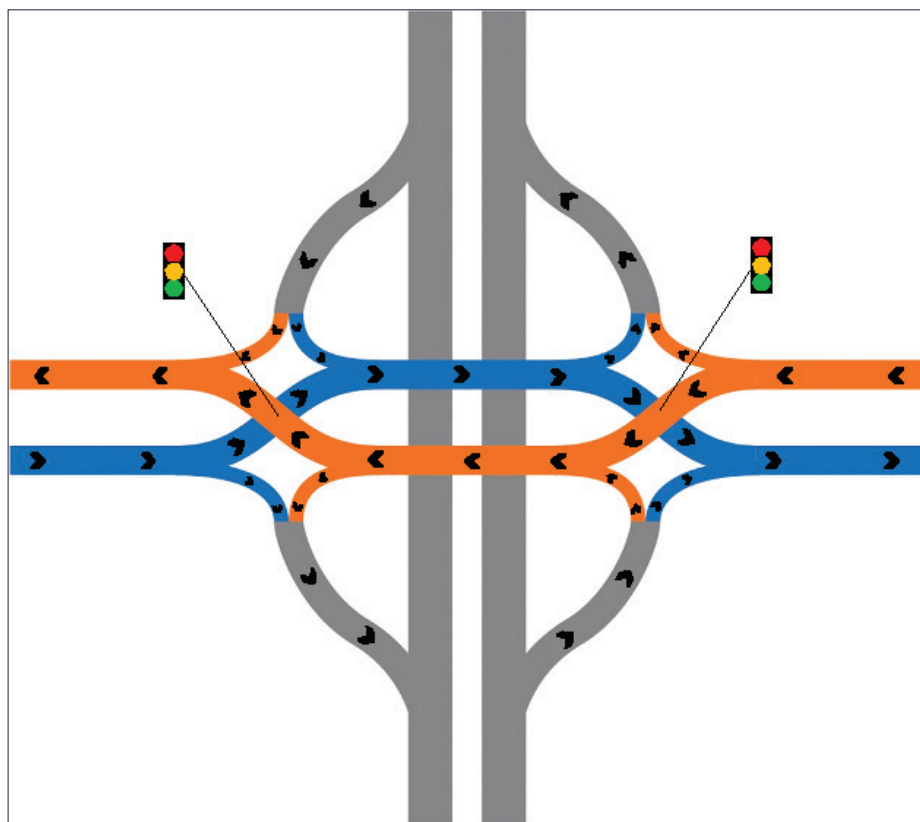
Po svetu se ponekod vedno bolj uveljavljajo inovativna nekonvencionalna križišča, ki v primerjavi z obstoječimi omogočajo bolj učinkovito vodenje prometa na prometno obremenjenih odsekih. Med njimi so tudi tako imenovana razcepna diamantna križišča (angl.: diverging diamond interchange – DDI ali tudi double crossover diamonds – DCD), ki so na področju prometnega inženirstva pogosto predmet raziskav ((Day, 2016a), (Alzoubaidi, 2021), (Cheng, 2018), (Warchol, 2017), (Pang, 2016), (Almoshaogeh, 2020)). Shema takega križišča je prikazana na sliki 1. Taka križišča so se po svetu začela širše uveljavljati šele v zadnjem desetletju, čeprav so v Franciji obstajala že od 70. let prejšnjega stoletja. Glavna prednost tovrstnih križišč je v tem, da vozila, ki zavijajo levo, ne prečkajo nasprotno glavne smeri in zato ne potrebujejo svoje faze v krmilnem programu svetlobnih signalnih naprav. Zaradi specifičnega vodenja prometnega toka skozi križišče se kapaciteta za leve zavijalce lahko poveča tudi dvakrat v primerjavi z vodenjem prometnega toka v klasičnem diamantnem križišču, kjer je za leve zavijalce običajno treba nameniti svojo fazo. Razcepna diamantna križišča so zato pogosto boljša alternativa klasičnim diamantnim križiščem, kar na podlagi kapacitetnih analiz s pomočjo mikrosimulacij prometnega toka dokazuje tudi avtor v raziskavi (Chlewicki, 2011).

Največje prednosti razcepnega diamantnega križišča pred klasičnim diamantnim križiščem so povezane z njegovo geometrijo, ki omogoča izvedbo dvofaznih krmilnih programov semaforjev s krajšim ciklom, kar pomembno prispeva k zmanjšanju zamud vozil. Poleg tega imajo manj konfliktnih točk v primerjavi

s klasičnim diamantnim križiščem in krožnim križiščem, zato so lahko bolj prometno varna. Za slabost razcepnega diamantnega križišča se lahko pokaže nezkušenost voznikov pri vožnji skozi križišča takega tipa (MDOT, 2010). V raziskavi (Hunter, 2019) ugotavljajo, da so klasična diamantna križišča primerna na tistih lokacijah, kjer pričakujemo, da bo prometno povpraševanje precej nižje od kapacitete in delež vozil na glavni smeri, ki zavijajo levo (npr. na avtocestni priključek), pod 30 %, sicer

se z vidika kapacitete za bolj primerno izkaže razcepno diamantno križišče.

Kot omenjajo avtorji raziskave (Day, 2016a) vodenje prometa skozi razcepno diamantno križišče najpogosteje poteka s pomočjo dvofaznega krmilnega programa, ki ima enako dolg cikel kot sosednja križišča. Ob tem pa obstajajo različne analize in raziskave, ki potrjujejo, da tako vodenje ni nujno najbolj optimalno (Day, 2016a). Skozi razcepno diamantno križišče lahko prometni tok vodimo z dvema krmilnima programoma na vsakem križišču ali pa z enim krmilnim programom, ki je obema križiščema v sklopu razcepnega diamantnega



Slika 1 • Shematični prikaz razcepnega diamantnega križišča.

križišča skupen. V primeru dvojnega krmilnika je za učinkovito prometno rešitev pozornost treba usmeriti predvsem dimenzioniranju optimalne dolžine cikla in dolžini zelenih faz na posameznih križiščih, določiti primernega časovnega razmaka med obema križiščema ter dimenzioniranju optimalne razdalje med obema križiščema, da zagotovimo zadostno zaježitevno dolžino za vozila (Cheng, 2018).

Izziv pri načrtovanju krmilnih programov za svetlobne signalne naprave v omrežju, kjer se nahaja razcepno diamantno križišče, je vzpostavitev medsebojne optimalne koordinacije. Geometrija križišč v sklopu tovrstnih križišč namreč ne omogoča, da bi se glavni prometni tok območju križišča odvijal v obe smeri hkrati. Namen koordinacije je zagotoviti dovolj veliko kapaciteto omrežja in minimizirati povprečno zamudo vozil v omrežju, tako da so vrednosti stopnje nasičenosti med kritičnimi pasovi križišč v mreži čim bolj podobne (in nikjer ne presegajo vrednosti 1, če je mogoče). Na področju koordinacije križišč v sklopu razcepnih diamantnih križišč s sosednjimi križišči zasledimo le malo raziskav in študij. Med njimi velja omeniti študijo (Yang, 2014), v okviru

katere so predlagali optimizacijski model, ki z optimalno dolžino cikla, dolžino zelenih faz in zamiki maksimizira kapaciteto razcepnega diamantnega križišča pod različnimi geometrijskimi pogoji (s sosednjimi križišči ali brez sosednjih križišč). Pri tem model koordinacije temelji na shemi časovno odvisnih krmilnih programih in dvojnem krmilniku na razcepnem diamantnem križišču. Iskanje maksimalne kapacitete razcepnega diamantnega križišča je smiselno, ko le-to predstavlja ozko grlo v omrežju, sicer z vidika zamud vozil tako osnovan model ne bo nujno optimalen. V okviru študij (Day, 2016b) in (Kim, 2016) sta bila analizirana različna cestna odsek z več križišči (v prvi študiji pet, v drugi pa štiri, kjer sta križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča vodeni z enim krmilnikom). Pri tem so avtorji prve študije za križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča uporabili polovično dolžino cikla v primerjavi s sosednjimi križišči, v drugi študiji pa enako dolžino cikla kot pri sosednjih križiščih. Alternativnih možnosti pri tem niso raziskali. Krmiljenje svetlobnih signalnih naprav na križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča je običajno dvofazno, krmiljenje svetlobnih sig-

nalnih naprav na ostalih običajnih štirikrakah križiščih pa lahko zaradi vodenja levih zavijalcev poteka v več fazah, kar pomeni, da je cikel pri teh križiščih lahko relativno dolg (lahko tudi več kot 120 sekund). V primeru dolgih ciklov v križiščih vzdolž vpadnice lahko v razcepnem diamantnem križišču uporabimo polovično dolžino cikla. Kot alternativa se lahko na tovrstnih križiščih vzpostavi tudi trifazno krmiljenje, kot ga predlaga Hainen (Hainen, 2015).

V splošnem ugotavljamo, da raziskave na tem področju potrjujejo, da so razcepna diamantna križišča lahko zelo dobra rešitev tako z vidika kapacitete kot z vidika prometne varnosti. Ob tem pa se raziskovalci soočajo z izzivom, kako izvesti optimalno koordinacijo krmilnih programov na cestni mreži, kjer se nahajajo taka diamantna križišča.

V članku obravnavamo del cestnega omrežja, v katerem je razcepno diamantno križišče. Raziskali smo, kako na prometne parametre vplivajo časovni zamiki med križišči, dolžine ciklov križišč in dolžine zelenih faz. Za različna scenarija prometnih obremenitev smo predlagali koordinacijski model za optimizacijo krmilnih programov.

križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča:

- model A: krmilni program z izmeničnim vodenjem prometnega toka v glavni smeri (slika 3) s ciklom enake dolžine kot na vpadnici;
- model B: krmilni program z izmeničnim vodenjem prometnega toka v glavni smeri (slika 3) s polovičnim ciklom glede na cikel na vpadnici;
- model C: krmilni program s konceptom polnjenja in praznjenja (slika 4) s ciklom enake dolžine kot na vpadnici;
- model D: krmilni program s konceptom polnjenja in praznjenja (slika 4) s polovičnim ciklom glede na cikel na vpadnici.

2 • METODOLOGIJA

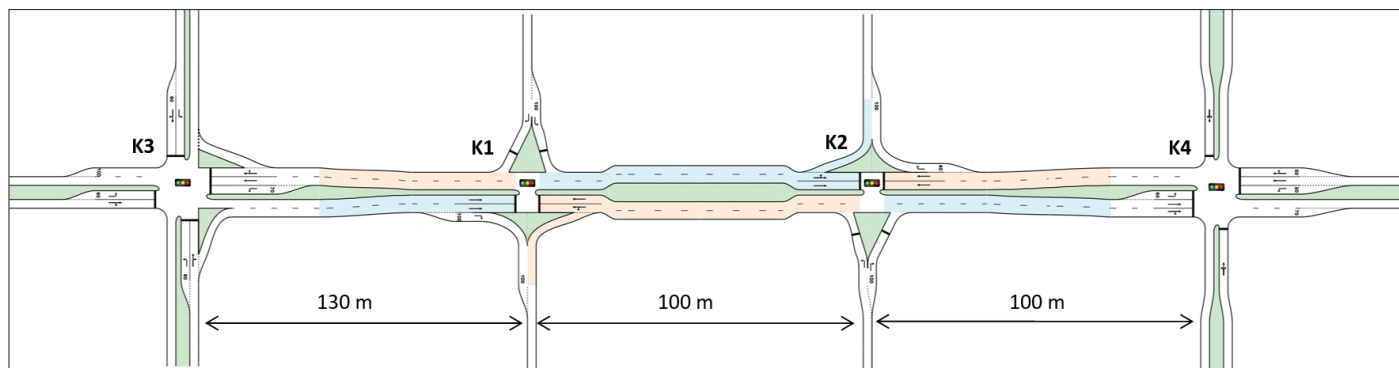
V raziskavi ugotavljamo, kako s posameznimi modeli koordinacije svetlobnih signalnih naprav v sklopu razcepnega diamantnega križišča vplivamo na prometne parametre na cestni mreži. Za različni izvorno ciljni matriki (scenarija prometnih obremenitev) smo za posamezne koordinacijske modele določili optimalne sheme prometno odvisnih krmilnih programov zaporednih semaforiziranih križišč. Za vsak koordinacijski model smo določili kapaciteto omrežja in občutljivost za odstopanje od predvidenih scenarijev prometnih

obremenitev. Analizo smo izvedli s pomočjo analitičnega programa Sidra Intersection 9.1.

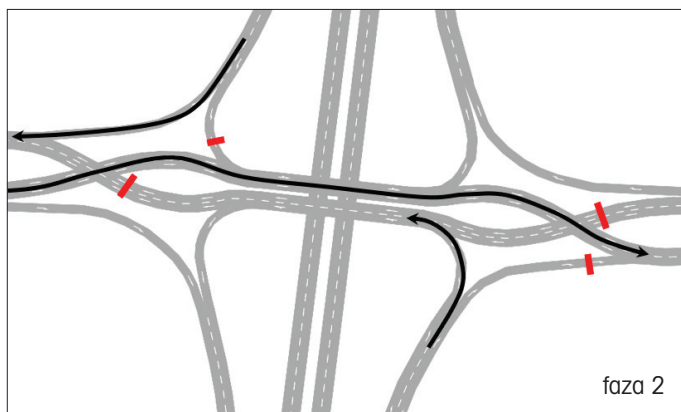
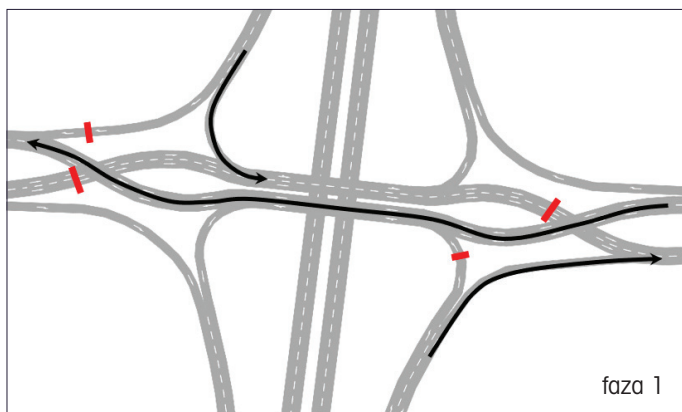
2.1 Modeli koordinacije

Shema obravnavane cestne mreže je prikazana na sliki 2. V članku obravnavamo sistem štirih semaforiziranih križišč, od katerih sta dve v sklopu razcepnega diamantnega križišča (križišči K1 in K2 na sliki 2), preostali dve pa sta klasični štirikraki križišči.

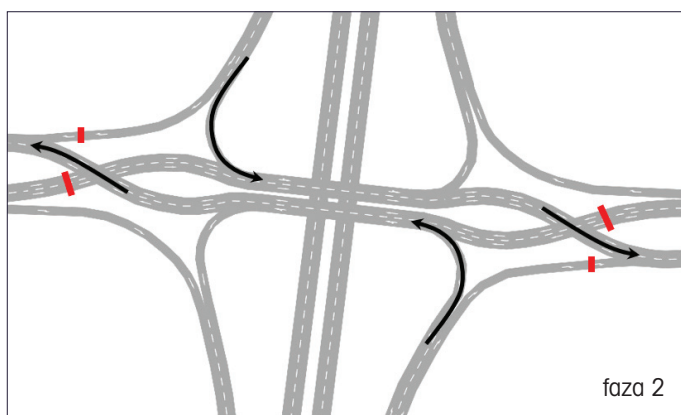
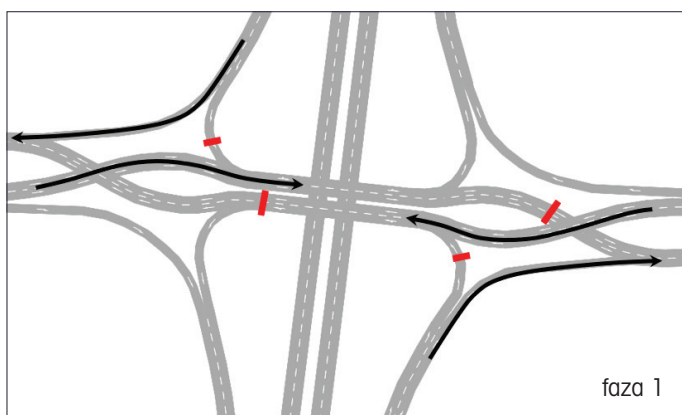
Raziskali smo štiri različne zasnove koordinacije prometno odvisnih krmilnih programov na



Slika 2 • Shematski prikaz obravnavane cestne mreže z barvnim prikazom smeri vožnje.



Slika 3 • Primer vodenja prometa skozi križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča, kjer se prometni tok v glavni smeri vodi izmenično – v vsaki fazi v eno smer (modela A in B).



Slika 4 • Primer vodenja prometa skozi križišči v sklopu razcepnega diamantnega križišča, kjer se prometni tok v glavni smeri vodi sočasno v obeh smereh – v prvi fazi se izkoristi zaježitvena dolžina za kolono vozil med obema križanjema znotraj sklopa, v drugi fazi pa se kolona vozil med obema križanjema izprazni (modela C in D).

Poleg koordiniranih modelov smo analizirali še model E: med seboj nekoordinirano delovanje svetlobno signalnih naprav na cestnem omrežju, ki so le prometno odvisna.

Križišči K3 in K4 sta v vseh petih variantah krmiljeni po enakem vzorcu, pri čemer se pri križišču K3 predvideva dvofazno krmiljenje s podaljšano fazo za leve zavijalce v glavni smeri, na K4 pa dvofazno krmiljenje.

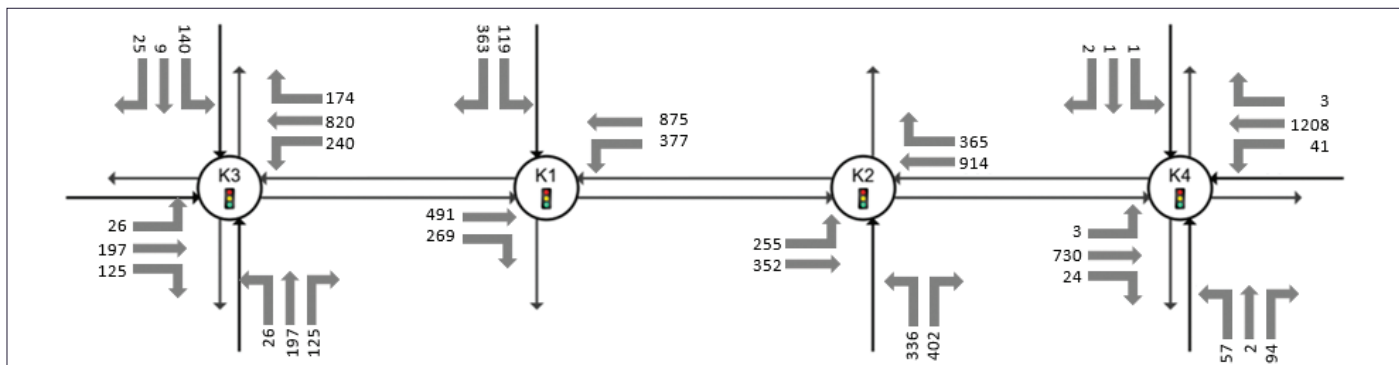
Na sliki 3 je grafičen prikaz način vodenja prometnega toka, ki je predviden po modelih

koordinacij A in B. Glavni prometni tok se preko razcepnega diamantnega križišča vodi izmenično – v prvi fazi v eno smer, v drugi fazi pa v drugo smer. Na sliki 4 je prikazan način vodenja prometnega toka skozi sklop križišč, ki je predviden po modelih C in D. V prvi fazi se glavni prometni tok preko obeh križišč v tem primeru vodi sočasno z obeh strani diamantnega križišča. Pri tem se izkoristi zaježitvena dolžina med obema križanjema (K1 in K2) znotraj sklopa križišča – faza polnjenja. V

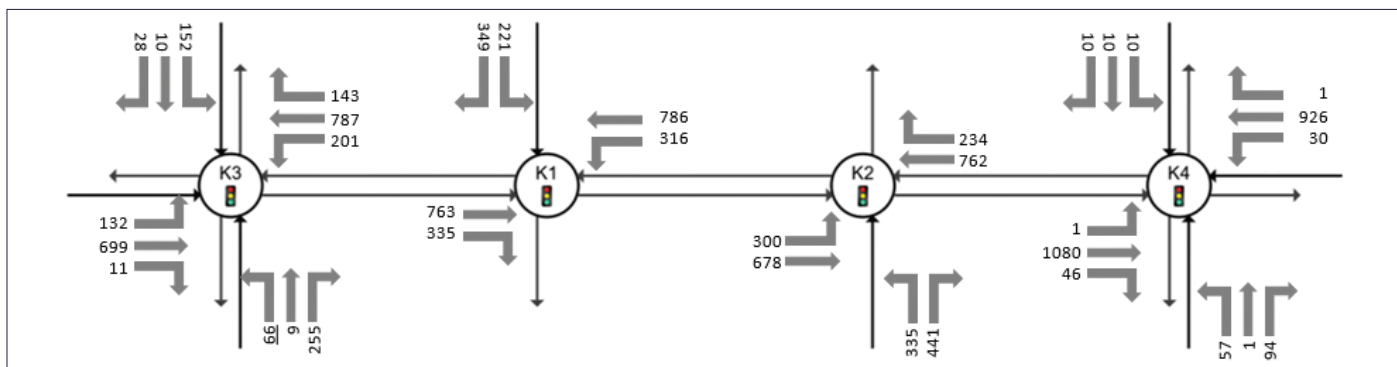
drugi fazi se glavni prometni tok sočasno vodi preko obeh križanj v smeri iz sklopa razcepnega diamantnega križišča – faza praznjenja. Pri vseh modelih koordinacije se obe križišči K1 in K2 vodita preko skupnega krmilnika, zato med njima ni časovnega zamika.

2.2 Prometno povpraševanje

Predvideli smo dva scenarija izvorno ciljnih matrik. V scenariju 1 (slika 5) je prometno povpraševanje izrazičnejše v eni od glavnih



Slika 5 • Prometno povpraševanje, predvideno po scenariju 1 (vozil/h).



Slika 6 • Prometno povpraševanje, predvideno po scenariju 2 (vozil/h).

smeri (približno 60 % vozil v eno smer, 40 % v drugo smer), levih zavijalcev na razcepnem diamantnem križišču je med 30 % in 40 %. Na stranskih uvoznih krakih križišč K1 in K2 je prometnega povpraševanja za približno 40 % manj kot v glavni smeri. V scenariju 2 (slika 6) je prometno povpraševanje v obeh glavnih smereh približno enako, ostala razmerja v prometnem povpraševanju pa so podobna kot pri scenariju 1.

2.3 Optimizacija krmilnih programov

Za vsak model koordinacije in scenarij prometnega povpraševanja smo določili optimalne dolžine ciklov krmilnih programov v omrežju, dolžine zelenih faz in primerne časovne zamike med krmilnimi programi posameznih križišč. S spreminjanjem prometnega povpraševanja po določenem scenariju smo analizirali, kako občutljivi so posamezni modeli koordinacije za odstopanje od predvidenih prometnih obremenitev.

Optimalno shemo krmilnih programov svetlobno signalnih naprav v cestni mreži smo za posamezne modele koordinacije določili z minimizacijo namenske funkcije, ki definira povprečno zamudo vozil v omrežju.

Pri tem smo dolžino cikla omejili od 40 sekund do 150 sekund. Parametri krmilnih programov (dolžine zelenih faz, dolžine ciklov) so pri tem izračunani po metodi enakomerne stopnje nasičenosti. Uporaba te metode je primerna tudi za modeliranje koordiniranih prometno odvisnih križišč, za katere je sicer značilno, da se dolžina cikla in zelenih časov s prometnim povpraševanjem spreminja. Izračunane vrednosti zelenih faz in dolžin ciklov je treba v tem primeru razumeti kot povprečne vrednosti v obdobju, ki ga zajema analiza (npr. obdobje prometne konice).

Prometne parametre smo določili po metodologiji HCM 6 za semaforizirana križišča, ki

zajema naslednje korake: določitev geometrije križišč in njihove konfiguracije po smereh (pasovi); določitev pretokov po smereh in po prometnih pasovih in določitev kapacitete, stopnje nasičenosti in ostalih količin: zamude vozil, nivo usluge, dolžine kolon ...

Kapaciteta prometnih pasov za posamezne smeri je po HCM-metodologiji definirana z enačbo:

$$c = N s \frac{g}{C}, \quad (1)$$

kjer so: c kapaciteta (vozil/h);
 N število prometnih pasov;
 s pretok prilagojenega nasičenega prometnega toka (vozil/h);
 g efektivni zeleni čas (s);
 C dolžina cikla (s).

Stopnja nasičenosti X je definirana z razmerjem med prometnim povpraševanjem in kapaciteto:

$$X = \frac{v}{c}, \quad (2)$$

kjer so: X stopnja nasičenosti;
 v prometno povpraševanje (vozil/h);
 c kapaciteta (vozil/h).

Zamude vozil, ki nastanejo zaradi križišč in z njim povezanih motenj v prometnem toku, po metodologiji HCM določimo z naslednjo enačbo:

$$d = d_1 + d_2 + d_3, \quad (3)$$

kjer so: d zamuda vozil (s/vozilo);
 d_1 enotna zamuda (s/vozilo);
 d_2 slučajne zamude (s/vozilo);
 d_3 zamuda zaradi začetne kolone vozil (s/vozilo).

Enotna zamuda vozil v križišču na prednostni smeri je ocenjena z naslednjo enačbo:

$$d_1 = PF \frac{0,5 C (1 - g/C)^2}{1 - [\min(1, X) g/C]}, \quad (4)$$

kjer sta:

$$PF = \frac{1 - P}{1 - g/C} \frac{1 - y}{1 - \min[1, X] P} [1 + y \frac{1 - P C/g}{1 - g/C}] \quad (5)$$

$$y = \min(1, X) \frac{g}{C}, \quad (6)$$

kjer so: PF faktor prilagoditve zaradi koordinacije;
 y pretok vozil (vozil/h);
 P delež vozil, ki do križišča prispejo med zelenim časom;
 g efektivni zeleni čas (s) in
 C dolžina cikla (s).

Slučajno zamudo izračunamo z naslednjo enačbo:

$$d_2 = 900 T \left[(X_A - 1) + \sqrt{(X_A - 1)^2 + \frac{8 k I X_A}{c_A T}} \right], \quad (7)$$

kjer je $X_A = v/c_A$,

kjer sta: X_A povprečno razmerje med prometnim povpraševanjem in kapaciteto;

c_A povprečna kapaciteta (vozil/h).

Če v začetku analiziranega obdobja ni kolone vozil na nobenem prometnem pasu v križišču, je zamuda zaradi začetne kolone vozil enaka nič. Do zamude zaradi začetne kolone vozil pride, če prometno povpraševanje presega vrednost kapacitete iz obdobja pred analiziranim časovnim odsekom. Ta ne vključuje tistih zamud, ki nastanejo zaradi slučajnosti prometnega toka in nihanja prometnih obremenitev v času analiziranega obdobja.

3 • REZULTATI

V tem delu prikazujemo rezultate optimizacije krmilnih programov po obeh scenarijih prometnih obremenitev. V drugem delu smo za posamezne modele koordinacije prikazali, kako se v primeru odstopanja od predvidenih scenarijev spreminjajo povprečne zamude vozil v mreži.

žena, če za vsak prometni pas v omrežju velja, da je stopnja nasičenosti manjša od 1 ($X \leq 1$). Prometni pas z najvišjo stopnjo nasičenosti imenujemo kritični prometni pas. Kapaciteto omrežja v splošnem ni mogoče enolično določiti, saj je ta odvisna tudi od izvorno ciljne matrike potovanj. V raziskavi

opisuje prometno povpraševanje v scenariju 2. Odstopanje prometnega povpraševanja od določenega scenarija lahko opišemo na naslednji način:

$$[D] = f \cdot [D_{\text{scenarij}}], \quad (8)$$

kjer so: $[D]$ dejanska izvorno ciljna matrika,
 (D_{scenarij}) izvorno ciljna matrika scenarija,
 f faktor odstopanja.

Za vsako vrednost faktorja f na območju od $f=0,5$ do $f=1,5$ s korakom $\Delta f=0,01$ smo določili povprečno zamudo vozil v omrežju in povprečno zamudo vozil na kritičnem prometnem pasu. Občutljivost koordinacijskega modela za nihanje prometnega povpraševanja po scenariju 1 ali 2 smo ocenili na podlagi porazdelitve vrednosti povprečnih zamud. S tako analizo je mogoče oceniti tudi kapaciteto omrežja za vsak model koordinacije. Vrednosti faktorja f pri doseženi kapaciteti posameznih modelov koordinacije povzema mo v preglednici 2.

V primeru scenarija 1 ima največjo kapaciteto model A ($f_c=1,11$), najmanjšo pa model E, ki ne predvideva koordinacije ($f_c=1,02$). V

Preglednica 1 • Optimalne vrednosti parametrov posameznih modelov koordinacije za predvidena scenarija.

V preglednici 1 so za vsak model koordinacije in scenarij prikazane optimalne dolžine ciklov ter pripadajoče vrednosti nekaterih indikatorjev. Vsi modeli koordinacije so sposobni prevzeti predvidene prometne obremenitve, saj kapaciteta omrežja ni presežena v nobenem primeru. V primeru prometnega povpraševanja po scenariju 1 lahko najmanjše zamude pričakujemo pri modelu A, največje pa pri modelu E. Po scenariju 2 so vrednosti povprečnih zamud med modeli zelo podobne – najmanjšo zamudo pričakujemo pri modelu D, največjo pa pri modelu C. Večje razlike v zamudah lahko pričakujemo na najbolj nasičenem prometnem pasu v omrežju. V primeru scenarija 1 so zamude na kritičnem pasu najmanjše pri modelu C, največje pa pri modelu E, ki ne predvideva koordinacije. V primeru scenarija 2 so kritične zamude med modeli A, C in E enake, največje kritične zamude pa lahko pričakujemo pri modelu koordinacije D.

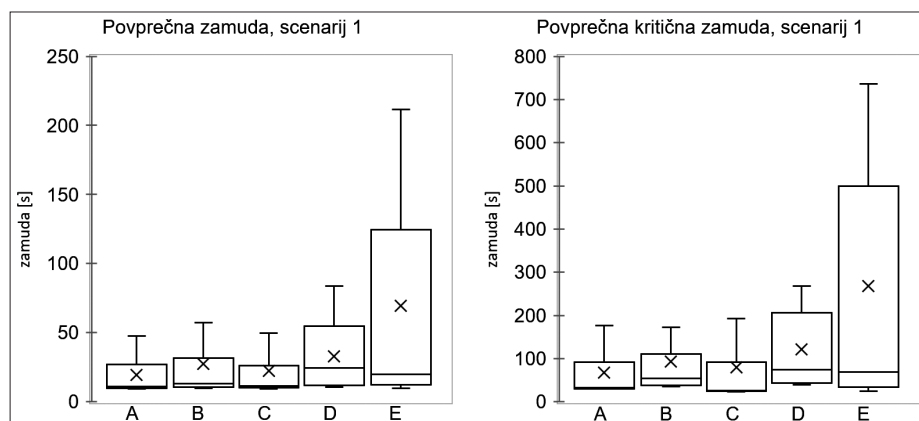
Na osnovi rezultatov kapacitetne analize v preglednici 1 modele koordinacije med seboj težko primerjamo, saj so rezultati med nekaterimi modeli zelo podobni. V drugem delu smo zato za posamezne modele koordinacije ocenili kapaciteto omrežja in občutljivost modelov za spreminjanje izvorno ciljnih matrik. Kapaciteta omrežja ni prese-

model	A	B	C	D	E
f_{c1} , scenarij 1	1,11	1,05	1,07	1,03	1,02
f_{c1} , scenarij 2	1,15	1,16	1,14	1,12	1,03
Razmerje $\frac{f_{c1}}{f_{c2}}$	0,97	0,91	0,94	0,92	0,99

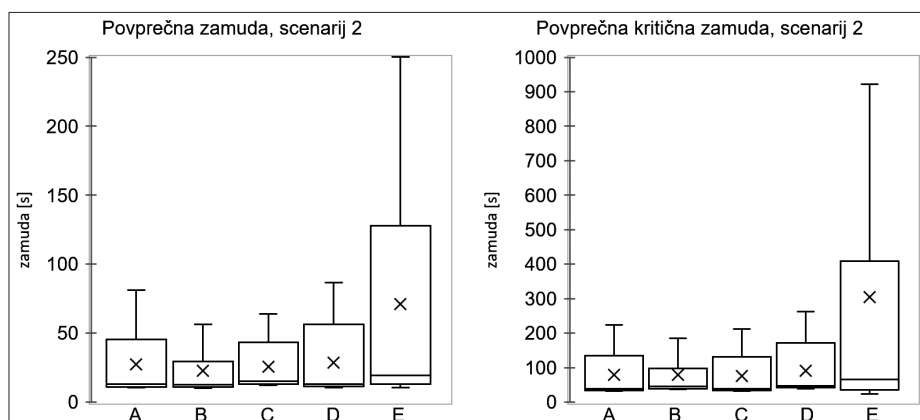
Preglednica 2 • Vrednosti faktorjev f_c ob doseženi kapaciteti omrežja pri posameznih modelih koordinacije.

smo obravnavali dve osnovni izvorno ciljni matriki, in sicer matriko, ki opisuje prometno povpraševanje v scenariju 1, in matriko, ki

primeru scenarija 2 ima največjo kapaciteto model B ($f_c=1,16$), najmanjšo pa model E ($f_c=1,03$). Višja vrednost kapacitete pa



Slika 7a in 7b • Porazdelitev povprečne zamude vseh vozil v omrežju in povprečne zamude vozil na kritičnem prometnem pasu ob različnih koordinacijskih modelih v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1 ($0,5 \leq f \leq 1,5, \Delta f=0,01$).



Slika 8a in 8b • Porazdelitev povprečne zamude vseh vozil v omrežju in povprečne zamude vozil na kritičnem prometnem pasu ob različnih koordinacijskih modelih v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1 ($0,5 \leq f \leq 1,5, \Delta f = 0,01$).

v praksi ne pomeni nujno najbolj ugodne rešitve, saj so modeli koordinacije lahko različno občutljivi za spremembo scenarijev in za odstopanje od predvidenih scenarijev (izvirno ciljnih matrik). Če izvajamo nekoordinirani model E, je za spremembo scenarijev najbolj občutljiv model B, najmanj pa model A.

vozil v omrežju v primeru spreminjanja izvirno ciljne matrike po scenariju 1 je prikazana na slikah 7a in 7b, v primeru spreminjanja izvirno ciljne matrike po scenariju 2 pa na slikah 8a in 8b.

Najširšo porazdelitev povprečnih zamud zavzame omrežje z nekoordiniranimi prometno

tljiva modela A in C, za spreminjanje povpraševanja po scenariju 2 pa je najmanj občutljiv model B. Vrednosti zamud vozil v omrežju so za nekatere vrednosti faktorjev f prikazane v preglednicah 3 in 4.

Za odstopanja na območju $f \in [0,5; 1,5]$, kjer $\Delta f = 0,01$ so prikazane povprečne vrednosti povprečne zamude $\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ in standardni odklon povprečnih zamud $\sigma(d_{avg})$. Vrednosti $d_{f=0,75}$ in $d_{f=1,25}$ sta spodnja in zgornja meja zamud pri 25-% odstopanju od predvidenih scenarijev, vrednosti $d_{f=0,9}$ in $d_{f=1,1}$ pa spodnja in zgornja meja zamud pri 10-% odstopanju od predvidenih scenarijev. Občutljivost posameznih modelov koordinacije za zamude in stopnjo nasičenosti na kritičnem prometnem pasu je v primeru 10-% odstopanja od predvidenih scenarijev grafično prikazana na sliki 9. Modela A in C se v obeh scenarijih izkažeta za najbolj stabilna, B in D, ki predvidevata polovično dolžino ciklov na razcepem diamantnem križišču, pa sta stabilna le v primeru scenarija 2. Pri modelu koordinacije A je odstopanje povprečnih zamud na kritičnem pasu med obema scenarijema najmanjše.

koordinacijski model	Povprečna zamuda vseh vozil v omrežju					Povprečna zamuda vozil na kritičnem prometnem pasu				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
$\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ [s]	19,2	27,2	22,3	32,8	69,6	68,0	92,8	80,0	121,7	267,8
$\sigma(d_{avg})$ [s]	13,1	26,9	18,3	22,4	65,1	54,7	82,1	95,5	86,2	248,9
$d_{f=0,75}$ [s]	9,7	10,8	10,1	12,0	13,0	30,2	38,6	24,1	43,8	38,3
$d_{f=1,25}$ [s]	26,1	31,6	25,5	54,5	122,3	91,8	102,1	86,2	198,5	490,6
$d_{f=0,9}$ [s]	10,2	11,8	10,7	12,8	16,7	31,3	42,3	24,9	49,6	59,1
$d_{f=1,1}$ [s]	12,4	15,6	14,2	43,2	84,4	35,2	78,5	27,8	148,6	397,3

Preglednica 3 • Povprečna zamuda vozil v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 1.

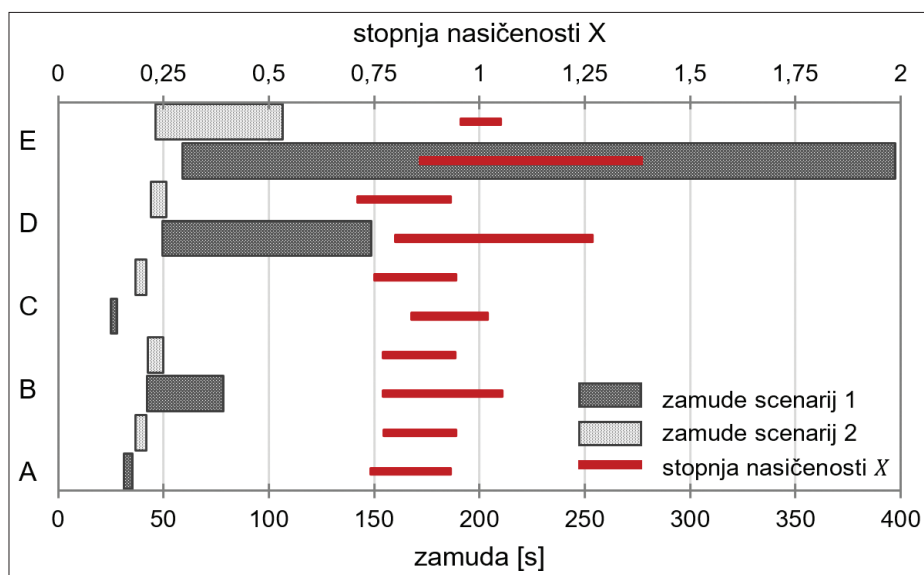
Rezultate analize občutljivosti posameznih modelov koordinacije za spreminjanje izvirno ciljne matrike po enačbi (8) povzemamo v nadaljevanju. Porazdelitev povprečnih zamud

odvisnimi krmlilnimi programi (model omrežja E na slikah 7a, 7b, 8a in 8b). Na intervalu $0,5 \leq f \leq 1,5$ sta na spreminjanje prometnega povpraševanja po scenariju 1 najmanj obč-

Model E, ki med križišči ne predvideva koordinacije, je najmanj stabilen v obeh scenarijih, saj je kapaciteta omrežja v tem primeru skoraj dosežena že pri predvidenih scenarijih.

koordinacijski model	Povprečna zamuda vseh vozil v omrežju					Povprečna zamuda vozil na kritičnem prometnem pasu				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
$\bar{d}_{avg(0,5-1,5)}$ [s]	27,3	22,6	25,8	28,5	70,9	80,1	79,6	76,5	91,8	304,3
$\sigma(d_{avg})$ [s]	22,3	17,7	17,5	23,0	76,8	63,0	63,7	60,1	68,0	397,9
$d_{f=0,75}$ [s]	11,3	10,9	13,0	11,5	13,4	33,7	39,9	33,7	41,8	35,9
$d_{f=1,25}$ [s]	42,8	29,4	41,1	55,6	121,7	132,6	95,3	128,2	161,4	406,7
$d_{f=0,9}$ [s]	12,0	11,5	13,7	11,8	16,4	36,6	42,5	36,6	44,2	46,2
$d_{f=1,1}$ [s]	15,7	14,6	17,5	15,9	27,5	41,7	50,0	41,7	51,3	106,7

Preglednica 4 • Povprečna zamuda vozil v primeru nihanja prometnega povpraševanja po scenariju 2.



Slika 9 • Grafični prikaz območja povprečne zamude in stopnje nasičenosti na kritičnem prometnem pasu v primeru do 10% odstopanja od predvidenih scenarijev.

4 • SKLEP

Razcepno diamantno križišče ima dovolj veliko kapaciteto, da v omrežju ne predstavlja ozkega grla, zato med posameznimi modeli koordinacije v primeru predvidenega prometnega povpraševanja ni velikih razlik, čeprav so prometne obremenitve blizu kapacitete omrežja. Ugotavljamo, da je vzpostavitev koordinacije v primeru visokih prometnih obremenitev (prometne obremenitve presegajo približno 80 % kapacitete nekoordiniranega omrežja) smiselna. V primeru nižjih prometnih obremenitev je model z nekoordiniranimi prometno odvisnimi semaforji v obeh scenarijih primerljiv z ostalimi modeli, kjer je med prometno odvisnimi krmilnimi programi vzpostavljena koordinacija. Izbira optimalnega modela koordinacije je odvisna od predvidene izvorno ciljne matrike. Pri stabilnem modelu koordinacije pričakujemo, da manjša odstopanja od predvidenih scenarijev prometnih obremenitev ne povzročijo večjih odstopanj v povprečnih zamudah vozil v

omrežju. Model koordinacije, ki je najmanj občutljiv za spremembo izvorno ciljne matrike, je model A (model na razcepnem diamantnem križišču predvideva enako dolg cikel kot sosednja križišča, vodenje prometnega toka pa poteka izmenično v glavnih smereh), najbolj občutljiv za spremembo izvorno ciljne matrike pa je model C (model predvideva na križiščih v sklopu razcepnega diamantnega križišča enako dolg cikel kot sosednja križišča, vodenje prometnega toka v glavni smeri pa poteka s polnjenjem in praznjenjem zajezičene dolžine med obema križiščema v sklopu razcepnega diamantnega križišča). Pri tem je treba poudariti, da v omrežju, ki je koordinirano po modelu C, pričakujemo najmanjše zamude na kritičnem prometnem pasu v obeh scenarijih. Najmanj občutljiva za odstopanja od predvidenih scenarijev sta modela koordinacije A in C. Stabilnosti omrežja z določenim modelom koordinacije ne moremo opisati le s kapaciteto, saj je

občutljivost koordinacijskih modelov za spreminjanje prometnega povpraševanja različna. Za nekatere modele se namreč izkaže, da so kljub manjši kapaciteti sposobni prevzeti enake prometne obremenitve z manjšimi povprečnimi zamudami. Čeprav ima model B v scenariju 2 najvišjo kapaciteto, je razpon kritičnih zamud pri 10% odstopanju pri tej višji kot pri modelih A in C, povprečna zamuda vozil po predvidenem scenariju pa je višja kot pri modelu D.

Na izbiro optimalnega koordinacijskega modela poleg izvorno ciljnih matrik vpliva tudi geometrijska zasnova omrežja in razcepnega diamantnega križišča. Pri slednjem je to predvsem dolžina zajezičene razdalje med obema križanjema. V nadaljnjem raziskovalnem delu bi bilo smiselno preučiti, kako geometrijska zasnova razcepnega diamantnega križišča pod različnimi izvorno ciljnim matrikami vpliva na izbiro optimalnega koordinacijskega modela in kako pri tem rezultati mikrosimulacijskih modelov prometnega toka odstopajo od analitičnih izračunov.

5 • LITERATURA

- Almoshaogeh M., Abou-Senna H., Radwan E., Haider H., Sustainable design of diverging diamond interchange: Development of warrants for improving operational performance, Sustainability, MDPI, 12, 14, 1–15, 2020.
- Alzoubaidi M., Molan A. M., Ksaibati K., Comparing the efficiency of the super diverging diamond interchange to other innovative interchanges, Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier, 106, 1, 1–13, 2021.

- Cheng Y., Chang G. L., Rahwanji S., Concurrent optimization of signal progression and crossover spacing for diverging diamond interchanges, *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, ASCE, 144, 3, 2–10, 2018.
- Chlewicki G., Should the diverging diamond interchange always be considered a diamond interchange form?, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2223, 88–95, 2011.
- Day C. M., Bullock D. M., Cycle-length strategies for a diverging diamond interchange in a coordinated arterial, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 142, 12, 1–11, 2016a.
- Day C. M., Lavrenz S., Stevens A., Miller E. E., Bullock D., Extending Link Pivot Offset Optimization to Arterials with Single Controller Diverging Diamond Interchange, *Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications*, Purdue University Libraries, 25, 1–22, 2016b.
- Hainen A. M., Stevens A. L., Day C. M., Li H., Mackey J., Luker M., Taylor M., Sturdevant J. R., Bullock D. M., Performance measures for optimizing diverging interchanges and outcome assessment with drone video, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2487, 31–43, 2015.
- Hunter M., Guin A., Anderson J., Park S. J., Operating Performance of Diverging Diamond Interchanges, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2673, 11, 801–812, 2019.
- Kim S. K., Warchol S., Schroeder B. J., Cunningham C., Innovative method for remotely fine-tuning offsets along a diverging diamond interchange corridor, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2557, 33–43, 2016.
- MoDOT, Missouri's Experience with a Diverging Diamond Interchange - Lessons Learned, tehnično poročilo, Missouri Department of Transportation, Organizational Results, Missouri Department of Transportation, št. poročila OR 10 – 021, 2010.
- Pang B., Liu H., Xu H., Calculating Approach Capacity of Diverging Diamond Interchanges with Consideration of Internal Queue Effects, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2553, 63–71, 2016.
- Warchol S., Chase T., Cunningham C., Use of microsimulation to evaluate signal-phasing schemes at diverging diamond interchanges, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, SAGE, 2620, 10–19, 2017.
- Yang X., Chang G. L., Rahwanji S., Development of a signal optimization model for diverging diamond interchange, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 140, 5, 1–9, 2014.