Analiza mogućnosti smanjenja redova čekanja na čvoru Lučko

Močnik, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:796743

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Ivan Močnik

ANALIZA MOGUĆNOSTI SMANJENJA REDOVA ČEKANJA NA ČVORU LUČKO

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA MOGUĆNOSTI SMANJENJA REDOVA ČEKANJA NA ČVORU LUČKO

ANALYSIS OF QUEUE LENGTH REDUCTION AT INTERCHANGE LUČKO

Mentor: dr. sc. Luka Novačko

Student: Ivan Močnik
JMBAG: 0036378047

Zagreb, rujan 2016.

SAŽETAK

Čvor Lučko značajni je interregionalni čvor na kojem se križaju zagrebačka obilaznica i Jadranska avenija na koju se nakon čvora Lučko nastavlja autocesta A1/A6 (Zagreb – Karlovac – Split/Rijeka). Čvor karakterizira veliko prometno opterećenje koje je posebno izraženo u ljetnim mjesecima kada predstavlja poveznicu turističkog prometa kontinentalne Hrvatske te srednje i istočne Europe sa jadranskom obalom. Dodatna otežana okolnost je to što je 500 metara nakon čvora naplatna postaja Lučko za ulazak na autocestu A1, koja u vršnim prometnim opterećenjima uzrokuje formiranje redova čekanja koji se protežu i na zagrebačku obilaznicu narušavajući time funkcioniranje lokalnog prometa. U radu će se raščlambom na jednostavnije segmente detaljno analizirati uloga čvora Lučko u mreži, njegovi konstrukcijski elementi koji utječu na propusnu moć i sigurnost prometa, odnos ponude i potražnje te poveznica problematike čvora Lučko sa naplatnom postajom Lučko. Potom će se dati prijedlozi rješenja, te isti evaluirati simulacijskim modeliranjem u programskom alatu PTV Vissim.

KLJUČNE RIJEČI: raskrižje izvan razine; razina usluge; naplatna postaja; red čekanja

SUMMARY

Node Lučko is a significant inter-regional interchange on which the Zagreb bypass and Adriatic avenue are crossed and after which continues motorway A1 / A6 (Zagreb - Karlovac - Split / Rijeka). A node is characterized by a large traffic volume, which is particularly evident in the summer months when it represents a link of turist traffic from continental Croatia and Central and Eastern Europe to the Adriatic coast. Additional aggravated circumstance is that 500 meters after the junction is toll plaza, which in peak traffic flows causes the formation of queues that stretch on the Zagreb bypass and reduce quality of local traffic. The thesis with analysis of the junction segments analyzes in detail the role of node Lučko in the network, design elements that affect capacity and traffic safety, supply and demand relation and problems with Lučko toll plazas. Then proposals for solution, and evaluation with simulation modeling in the program tool PTV Vissim will be given.

KEYWORDS: freeway intersection; level of service; toll plaza; queue length

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PREGLED PROMETNIH PARAMETARA ZA ANALIZU RASKRIŽJA 3
2.1. Pojam, elementi i teorijska osnova analize raskrižja izvan razine 5
2.2. Analiza postojećeg stanja čvora Lučko 7
2.2.1. Analiza geoprometnog položaja 8
2.2.2. Analiza postojeće infrastrukture i opreme raskrižja 10
2.2.3. Analiza sigurnosti odvijanja prometa 18
3. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA PROMETA NA ČVORU LUČKO 21
3.1. Analiza postojećeg stanja prometnih tokova na čvoru Lučko 22
3.2. Prognoza prometa 27
3.3. Proračun propusne moći i razine usluge čvora Lučko 31
3.3.1. Osnovni segmenti autoceste 32
3.3.2. Segment preplitanja 44
3.3.3. Segment uplitanja/isplitanja 52
3.4. Utvrđivanje propusne moći naplatne postaje Lučko 58
3.4.1. Propusna moć ulazne naplatne postaje Lučko 62
3.4.2. Propusna moć izlaznih naplatnih postaja Lučko i Demerje 66
3.4.3. Utvrđivanje prometne potražnje na čvoru Lučko 71
3.5. Utvrđena problematika analiziranog područja 74
4. PRIJEDLOZI MJERA POBOLJŠANJA POSTOJEĆEG STANJA 76
4.1. V1: nova zagrebačka obilaznica – „zagrebački prsten“ 78
4.2. V2: proširenje naplatne postaje Demerje i uklanjanje ulazne naplatne postaje Lučko 81
4.3. V3: dogradnja dionice Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne autoceste 81
4.4. V4: infrastrukturne promjene na čvoru Lučko i zagrebačkoj obilaznici 82
5. SIMULACIJA VARIJANTNIH PRIJEDLOGA RJEŠENJA SMANJENJA REDOVA ČEKANJA NA ČVORU LUČKO 85
6. ZAKLJUČAK 90
Literatura 91
Popis slika 93
Popis tablica 95
Popis grafikona 97

1. UVOD

Raskrižja u cestovnoj mreži često predstavljaju ograničavajući faktor iskorištenja kapaciteta prometnica odnosno intenziteta prometnih tokova koji se u njima spajaju, razdvajaju, križaju ili prepliću. Naime, konflikti prometnih tokova koji se na njima događaju te poseban način regulacije i vođenja prometa unutar raskrižja uvjetuju smanjenje propusne moći i razine sigurnosti. Stoga su raskrižja od posebnog interesa istraživanja prometnih inženjera, koji nastoje analizom prometa na raskrižjima, upotrebom odgovarajućih geometrijskih elemenata prilikom njihovog projektiranja i kreiranjem optimalnog načina vođenja prometa poboljšati uvjete prometa na raskrižju, a time i performanse cijele cestovne mreže.

Čvorište Lučko raskrižje je izvan razine na zapadnom dijelu zagrebačke obilaznice koje ima značajnu ulogu u prometnoj mreži grada Zagreba, ali i puno šire. Detektirani prometni uvjeti sa zagušenjima prometa, prvenstveno u ljetnom (sezonskom) razdoblju, uzrokovali su interes za analizom čvora i rješavanjem njegove problematike. Svrha ovog diplomskog rada je dakle provesti detaljnu analizu cestovnog čvorišta Lučko, i to u prostornom, funkcionalnom, oblikovnom i prometnom smislu, a kako bi se na temelju toga formirala varijantna rješenja te ista evaluirala analitičkim ili simulacijskim alatima.

U neposrednoj blizini čvora Lučko nalazi se i naplatna postaja Lučko za ulazak i izlazak vozila sa autoceste A1. Kako je sam čvor Lučko već analitički zahtjevan, a uz to valja razlučiti i poveznicu problematike čvora i obližnje naplatne postaje, metodologija ovog rada bazira se na raščlanjivanju navedenih prometnih infrastrukturnih objekata i problematike na jednostavnije elemente koje je potom moguće pojedinačno analizirati.

Primarni ciljevi prometne analize čvora Lučko su njegova uloga u prometnom sustavu, dobivanje relevantnih informacija o stanju prometne infrastrukture i regulacije tokova te uspostava poveznice između prometne ponude i potražnje. Jedan od ciljeva je i definiranje stanja sigurnosti na promatranom području kao i razina usluge na čvoru i njegovim segmentima. Završno, ciljevi rada su i analiza organizacije rada i propusne moći naplatne postaje Lučko, te kreiranje varijantnih rješenja utvrđene prometne problematike analiziranog područja.

Rad je koncipiran na način da se u svakom poglavlju kratko iznosi teoretski dio vezan za analiziranu tematiku, a potom na temelju toga ocjenjuje stanje čvora Lučko ili nekog drugog infrastrukturnog elementa koji se obrađuje. Ukupno je šest poglavlja, i to kako slijedi:

1. Uvod
2. Pregled prometnih parametara za analizu raskrižja
3. Analiza postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko
4. Prijedlozi mjera poboljšanja postojećeg stanja
5. Simulacija varijantnih prijedloga rješenja smanjenja redova čekanja na čvoru Lučko
6. Zaključak

U drugom poglavlju definiran je pojam raskrižja, i to iz prometnog i građevinskog aspekta, te je opisana uloga raskrižja u mreži. Nadalje, s obzirom da je čvor Lučko raskrižje izvan razine, detaljno su navedeni elementi i općenito teorijska osnova raskrižja izvan razine. U istom poglavlju dana je i analiza postojećeg stanja čvora Lučko i to sa aspekta geoprometnog položaja, postojeće infrastrukture i opreme čvorišta te sigurnosti odvijanja prometa na čvorištu.

Budući da su redovi čekanja posljedica nepovoljnog odnosa prometne ponude i prometne potražnje na određenom dijelu mreže, vrlo je bitno odraditi analizu postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko. Ta analiza, koja čini najznačajniji dio ovog rada, iznesena je u trećem poglavlju na način da je detaljno po segmentima čvora odrađen proračun propusne moći i razine usluge. Na temelju poznatih podataka satnog broja posluživanja vozila izračunata je i grafički prikazana propusna moć naplatnih postaja Lučko i Demerje. Svi dobiveni podaci omogućili su proračun prometne potražnje čvora Lučko, te je na kraju i iznesena utvrđena problematika analiziranog područja.

Varijantna rješenja utvrđene problematike analiziranog područja određena su i opisana u četvrtom poglavlju. Veliki je broj mogućih rješenja, a ona zasebno determinirane probleme rješavaju samo djelomično. Stoga su moguće, pa čak i poželjne, kombinacije različitih rješenja, što posljedično dovodi do kvalitetnijeg i cjelovitijeg rješavanja utvrđene problematike, ali i do kompleksnosti u samom odabiru optimalne kombinacije rješenja. Zbog opsega ovog rada, ali i činjenice da je težište rada stavljeno na analizu postojećeg stanja, izabrana je jedna kombinacija varijantnih rješenja koja je obrađena simulacijom u programskom alatu PTV Vissim, a dobiveni rezultati evaluacije prikazani su u sklopu petog poglavlja. Završno je još iznesen sažeti zaključak cijelog rada.

2. PREGLED PROMETNIH PARAMETARA ZA ANALIZU RASKRIŽJA

Raskrižja su prometni objekti koji omogućuju povezivanje cestovne mreže u jedinstvenu cjelinu. Preciznije, raskrižja se mogu definirati kao točke u cestovnoj mreži u kojima se povezuju dvije ili više prometnica, a prometni tokovi se u njima spajaju, razdvajaju, križaju ili prepliću. Uslijed niza navedenih prometnih radnji koje se na njima obavljaju, na raskrižjima se stvaraju situacije koje su bitno različite od onih na otvorenim dijelovima prometnice, te su zbog toga na njima prvenstveno naglašeni problemi propusne moći i sigurnosti prometa [1] [2].

Već iz navedenih definicija jasno je kako raskrižja imaju veliki značaj u cestovnoj mreži, a on proizlazi iz njihove ključne uloge u povezivanju, ali i mogućem ograničavanju značajki cestovne mreže. Upravo stoga, važno je u koncipiranju novih i analizi postojećih raskrižja primijeniti holistički pristup uzimajući u obzir šire područje raskrižja i koristeći suvremene znanstvene spoznaje prvenstveno iz područja prometa i građevinarstva, a potom i ostalih područja kao što su ekonomija, ekologija i dr.

Područje čvorišta može se definirati građevinski i prometno. Građevinsko područje čvorišta započinje na svakom privozu promjenom poprečnog presjeka cestovne prometnice, tj. u presjecima gdje počinje izvoz ili završava uvoz rampe. S druge strane, prometno područje čvorišta počinje na privozima znakovima vertikalne signalizacije koji najavljuju čvorište, a na izlazima završava znakovima potvrde smjera kretanja, odnosno znakom prestanka ograničenja brzine. Ova granica područja je dinamička, jer ovisi o dužinama i opsegu preplitanja, o prometnom opterećenju kao i o odlučnosti i ponašanju vozača [2].

Mjesto i način koncipiranja raskrižja neophodno je analizirati za svaki slučaj zasebno. Rješenje se, s obzirom na mnogobrojne moguće varijante, odabire uz pomoć definiranih općih zahtjeva za raskrižje, a to su ponajprije: sigurnost prometa, kvaliteta odvijanja prometa, utjecaj na okoliš i ekonomičnost rješenja. Svaki od njih ima svoju ulogu u postupku kreiranja novih rješenja ili analizi postojećih. S druge strane, kako je već navedeno, u području cestovnih raskrižja znatno su složeniji prometni postupci i događanja od sličnih na otvorenim dijelovima trase, pa su načini kretanja vozila predmet posebnog proučavanja. Oni su načelno u području raskrižja određeni prometno-oblikovnim parametrima, kao što su [1]:

- vrsta ili tip raskrižja
- način upravljanja prometom
- oblik trasiranja i presjek prometnica
- smjer i intenzitet prometnih tokova
- brzina vozila u raskrižju
- veličina preglednosti i dr.

Kompleksnost ovog područja upotpunjuje činjenica da uz navedene opće zahtjeve za raskrižje te prometno-oblikovne parametre, cestovna raskrižja moraju zadovoljiti i četiri načela optimalnosti [1]:

- minimum investicija u izgradnji
- maksimum funkcionalnosti u korištenju
- maksimum prikladnosti u održavanju
- maksimum izvodljivosti u rekonstrukciji.

Kod analize raskrižja, ključni parametri su propusna moć i razina usluge. Oni naime proizlaze iz ostalih parametara prometnog toka kao što su veličina prometne potražnje i njezina neravnomjernost, struktura prometnog toka, način upravljanja prometom, brzina i gustoća prometa u raskrižju, struktura vozačke populacije, geometrijski elementi raskrižja, značajke terena i mnogi drugi. S druge strane, ti ključni parametri indirektno ukazuju i na stanje sigurnosti prometa te na ekonomsku opravdanost raskrižja.

Različitost izvedbe raskrižja može se analizirati prema raznim mjerilima kao što su *prometno–planerska*, *prometno–tehnička* ili *prometno–građevinska*. Čimbenici koji karakteriziraju analizu po svakom mjerilu su u osnovi isti, a odnose se prvenstveno na svojstva prometnog toka (prekinuti, neprekinuti), njegovu strukturu, režim upravljanja prometom, propusnu moć i razinu usluge te sigurnost prometa. U obzir se također još uzimaju obilježja terena i okoliša, geometrijski odnosi privoza, brzine vožnje, preglednost, prisutnost nemotoriziranog prometa, struktura i navike vozača i dr. Prema svojstvima prometnog toka, odnosno prema razinama razdjeljivanja toka prihvaća se vjerovatno najsvrsishodnija podjela cestovnih raskrižja, i to na [1]:

1) raskrižja u razini (RuR)
    a) klasična površinska raskrižja
    b) raskrižja s kružnim tokom prometa
2) raskrižja izvan razine (RiR)
3) kombinirana i posebna raskrižja.

Čvor Lučko pripada skupini raskrižja izvan razine (RiR) te se u nastavku rada, prije detaljne analize samog čvora, koristeći priznatu literaturu iz ovog područja ukazuje na teorijsku osnovu analize raskrižja izvan razine. To obuhvaća definiranje potrebnih parametara analize, ali i razmatranje dosadašnjih znanstvenih spoznaja, metodoloških principa, zakonske legislative i terminologije, potrebnih za potpuno razumijevanje ovog rada.

2.1. Pojam, elementi i teorijska osnova analize raskrižja izvan razine

Raskrižja izvan razine su prometne građevine koje omogućuju povezivanje konfliktnih prometnih tokova uz najviši stupanj sigurnosti i protočnosti. To su prometne građevine za organizirano povezivanje dvaju cestovnih pravaca pod uvjetom održavanja režima neprekinutih tokova. Prostornim razdvajanjem konfliktnih tokova eliminiraju se njihove točke presijecanja ili križanja te postiže propusna moć svojstvena slobodnim dionicama trase. Primjenjuju se na javnim prometnicama najvišeg ranga, a osnovne karakteristike takvog raskrižja su [1]:

- veliko zauzeće površine
- velika propusna moć
- velika sigurnost prometa
- visoki troškovi investicije.

Potreba za ovakvim raskrižjima visokog učinka se u načelu pojavljuje na čvornim mjestima cestovne mreže gdje ukupna prometna opterećenja glavnog i sporednog pravca prelaze 12 000 voz/dan, a sa stajališta gospodarske opravdanosti trebalo bi se kao minimalno uzeti opterećenje od PGDP > 3 000 (4 000) voz/dan [1]. Čvor Lučko u potpunosti zadovoljava postavljenim kriterijima, a ta tvrdnja se kasnije u radu detaljno obrazlaže.

Za razliku od raskrižja u razini, gdje je oblikovanje posljedično na geometrijsku provoznost mjerodavnih vozila, u raskrižjima izvan razine su za oblikovanje i sigurnost prometa mjerodavni voznodinamički zahtjevi. Oni podrazumijevaju visoke sigurnosne standarde pri odabiru bitnih parametara: projektne brzine, glavnog prometnog pravca (kolnika) te samog položaja raskrižja i razmaka među susjednim raskrižjima u mreži [1]. U nekim slučajevima, naravno, nije moguće udovoljiti svim postavljenim zahtjevima. Primjerice u urbanim sredinama, ili u njihovoj neposrednoj blizini (gdje se nalazi i čvor Lučko), često nije lako zadovoljiti zahtjevima položaja raskrižja i njegovog razmaka od susjednih raskrižja. Ipak, u tim slučajevima se pažljivim odabirom geometrijskih elemenata i pogodnim načinom vođenja prometa nastoje anulirati spomenuti nedostaci.

Način vođenja prometnih tokova u području raskrižja najbitniji je činitelj koji determinira različitost u prometnim radnjama. Prometni tokovi se razlikuju po svojoj prirodi odvijanja i općenito se u zoni raskrižja dijele na:

- neprekinute prometne tokove
- prekidane prometne tokove.

Čvor Lučko, kao raskrižje izvan razine visoke funkcionalne kategorije, podrazumijeva vođenje prometnih tokova u neprekinutom režimu. To implicira uvjete vožnje pod kojima se vozilo u prijelazu dionice ceste ili prometnog traka mora zaustaviti samo zbog čimbenika unutar prometnog toka, a prometni tokovi se dijele ili sjedinjuju s podjednakim brzinama, pod oštrim kutom i bez zaustavljanja. U slučajevima ovakvih prometnih tokova povećavaju se zahtjevi u pogledu obučenosti i sposobnosti vozača, ali su općenito omogućene višestruko veće brzine, propusna moć i sigurnost prometa.

Ovisno o rangu prometnica i njihove uloge u mreži proizlazi veličina, značaj i projektno rješenje raskrižja izvan razina. Najviša razina prometne usluge predviđa se od raskrižja dviju autocesta, odnosno brzih cesta, koja će omogućiti neprekinute tokove u svim svojim zonama. Gradacija značenja i veličine raskrižja u pet funkcionalnih razina u rasponu od A do E mogu se, dakle, predočiti u zavisnosti od prometnog opterećenja i razreda ceste. Također treba naglasiti da o funkcionalnoj razini ovise prometni parametri raskrižja, kao na primjer normalni poprečni presjek glavnih prometnica i spojnih rampi [1].

Moguća podjela prema navedenim odrednicama vidljiva je iz *Tablice 1.*, pri čemu se čvor Lučko može svrstati u funkcionalnu razinu A, koja se sažeto može opisati kao raskrižje cesta vrlo velikog učinka sa svojstvima autoceste, za povezivanje međuregionalnih područja i samo za motorni promet.

Tablica 1. *Opća razvrstanost cesta i raskrižja,* [1]

Položaj	***Prostorna izgrađenost***	***Mjerodavna funkcija***	***Funkcionalna kategorija***	***Vrsta raskrižja***	***Pripadna regulativa***
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
izvan naselja	neigrađeno	povezivanje (šire)	**A** - daljinska cesta (autocesta AC)	izvan razine (RiR)	Pravilnik (NN 110/01)
unutar naselja	neizgrađeno	povezivanje	**B** - glavna cesta (brza cesta BC)	izvan razine (RiR) / u razini (RuR)	
	izgrađeno	povezivanje	**C** - vezna cesta	u razini (RuR)	
		sabiranje i priključivanje	**D** - sabirna cesta (priključna cesta)		Smjernice za gradska raskrižja (PGZ, 2004.)
		pristupanje	**E** - pristupna cesta		

Iz tablice se također vidi da je važeća zakonska regulativa propisana *Pravilnikom o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa* (NN 110/01).

Upravo navedenim Pravilnikom [3] propisano je da se proračun propusne moći vrši u pravilu prema HCM-u (engl. *Highway Capacity Manual*) [4], a upotrebu drugih metoda treba posebno obrazložiti. Naime, osnovna zadaća raskrižja je mogućnost sigurnog i kvalitetnog prolaska zadanog broja vozila kroz raskrižje. Osnovna veličina za tu procjenu je propusna moć raskrižja, a češće se koristi podatak o propusnoj moći pojedinog privoza. Propusna moć pokazuje koliki broj vozila, s obzirom na prostornu razdiobu prometnih tokova, može proći privozom ili cijelim raskrižjem u jedinici vremena. Propusnu moć raskrižja, osim njegovih građevinsko-geometrijskih karakteristika, određuju i uvjeti koji vladaju na njemu, kako je već navedeno ranije. Obično se djelovanjem na te uvjete mogu čak postići kvalitetniji, a ekonomsko povoljniji rezultati od obične intervencije u građevinskom smislu [1]. I u ovom radu će se proračun propusne moći čvora Lučko, kao i razina usluge, obraditi metodologijom iz HCM-a 2010.

U ovom dijelu valja još spomenuti teorijsku osnovu vezanu za osnovne elemente raskrižja izvan razine. Prostorna rješenja takvih raskrižja komponiraju se iz grupe funkcionalnih elemenata, u koje spadaju [1]:

1) vođenje osnovnih trasa kroz raskrižje
2) područja isplitanja i uplitanja
3) spojne ceste, odnosno rampe.

Pod vođenjem osnovnih trasa podrazumijeva se tlocrtno i visinsko vođenje, a ono ovisi o širem kontekstu čimbenika kao što su prometna mreža, značajke terena, prometni tokovi, okolna izgrađenost i slično. Ipak, sigurnost prometa je uvijek dominantan zahtjev u trasiranju. Područja uplitanja i isplitanja su pak najdelikatniji elementi raskrižja izvan razine u pogledu sigurnosti. Njima se stoga daje osobita pozornost prilikom konstrukcije ili analize. Spojne ceste (rampe) vrlo su bitan segment raskrižja izvan razine. Predstavljaju samostalne prometnice koje povezuju osnovne pravce te omogućuju izmjene smjerova prometnih tokova. Detaljnije o svima opisuje se u nastavku rada prilikom analize postojećeg stanja i proračuna propusne moći i razine usluge čvora Lučko.

2.2. Analiza postojećeg stanja čvora Lučko

Pod analizom postojećeg stanja podrazumijeva se analiza svih elemenata relevantnih za odvijanje prometnih procesa na čvoru Lučko. Bitna je kako bi se dobio uvid u stvarno trenutno stanje na čvoru, te na temelju toga odredila moguća rješenja u cilju poboljšanja istih [5].

Čvor Lučko nazvan je prema naselju u neposrednoj blizini Zagreba u kojem se i nalazi. Prostorni obuhvat ovog rada ne temelji se samo na užim granicama čvora Lučko ili naselja Lučko, već se zbog uloge čvora u povezivanju širih prostora analiziraju svi povoljni i nepovoljni utjecaji šireg područja na čvor Lučko. Pritom posebno valja napomenuti nepovoljni utjecaj obližnje naplatne postaje Lučko koji se kasnije u radu detaljno analizira. *Slika 1* prikazuje uže granice čvora Lučko.



Slika 1. *Čvor Lučko – zračna snimka*
Izvor kartografske podloge: Google Earth

U ovom poglavlju analizira se geoprometni položaj, postojeća infrastruktura i oprema raskrižja te stanje sigurnosti na čvoru Lučko. Prometno opterećenje, propusna moć i razina usluge čvora, zbog svog opsega i dodatne važnosti za ovaj rad, analiziraju se zasebno u sljedećem poglavlju.

2.2.1. Analiza geoprometnog položaja

Analizom geoprometnog položaja čvora Lučko utvrđuje se njegova uloga u mreži s obzirom na glavne prometne pravce i koridore užeg i šireg područja. Šire gledano, glavna snaga prometnog sektora u Republici Hrvatskoj proizlazi iz njezinog geostrateškog položaja kao prirodnog pristupa Balkanu te područja prirodnog izlaza Europe prema istoku [6]. U tom smislu treba definirati i čvor Lučko kao sastavni dio tog strateškog koridora.

Čvor Lučko nalazi se na autocesti A3 Bregana – Zagreb – Lipovac, na dionici zagrebačke obilaznice (stacionaža: km 19+503). Od susjednih čvorova Jankomir i Buzin udaljen je 5,173 km, odnosno 7,442 km. To je interregionalni čvor smješten u jugozapadnom dijelu grada Zagreba koji direktno povezuje autocestu A1/A6 Zagreb – Karlovac – Split/Rijeka s autocestom A3 Bregana – Zagreb – Lipovac, a preko obilaznice Zagreba povezuje cijelu Hrvatsku: smjerove za Zagreb, Split (A1), Rijeku (A6), Lipovac (A3), Goričan (A4), Macelj (A2) i Sisak (A11), što se vidi na *Slici 2.* koja pokazuje autocestovnu mrežu RH. Također, čvor Lučko predstavlja i raskrižje europskih ruta:

- *E65*: Malmö (Švedska) – Goričan – Zagreb – Dubrovnik - Chania (Grčka)
- *E70*: A Coruña (Španjolska) – Bregana – Zagreb – Lipovac – Poti (Gruzija)
- *E71*: Košice (Slovačka) – Goričan – Zagreb – Split.



Slika 2. *Autocestovna mreža Republike Hrvatske,* [7]

Čvor Lučko prometno je najopterećeniji i najznačajniji čvor obilaznice grada Zagreba. Nalazi se na smjeru najvažnijih prometnih, robnih i putničkih prometnih tokova, koji iz sjeverozapadne i srednje Europe, preko zagrebačkog prometnog čvora vode prema jugoistoku Europe i Jadranu. Posebnu ulogu ima upravo u sezonskom turističkom prometu kada predstavlja poveznicu kontinentalne Hrvatske te srednje i istočne Europe sa jadranskim turističkim odredištima. U lokalnom prometu, zagrebačka obilaznica sve više sudjeluje u snabdijevanju gradskog prometa, a u stalnom porastu je i dnevni migracijski promet Karlovac – Zagreb koji se ostvaruje preko čvora Lučko. Prema dostupnim podacima, u 2007. godini je 60 % prometa kroz čvor Lučko činio tranzitni promet [1]. U novije vrijeme, procjena je da oko 70 % prometa tog dijela zagrebačke obilaznice čini gradski promet grada Zagreba [8].

Povezivanje osnovne mreže prometne infrastrukture s transeuropskim mrežama i koridorima (engl. *Trans – European Network*, TEN-T) jedan je od osnovnih ciljeva i važan preduvjet za razvoj Republike Hrvatske unutar EU. TEN-T mreža se sastoji od *sveobuhvatne mreže* i *osnovne mreže*. Sveobuhvatna mreža predstavlja opći sloj TEN-T-a i uključuje svu postojeću i planiranu infrastrukturu koja udovoljava zahtjevima smjernica Europske unije. Osnovna mreža uključuje samo one dijelove sveobuhvatne mreže koji su strateški najznačajniji. Odlukom Europske komisije iz 2013. godine, definirano je devet koridora osnovne prometne mreže EU kao okosnica za spajanje 94 glavne europske luke i 38 ključnih zračnih luka sa željeznicom i cestama u glavnim gradovima europskih zemalja (Luka Rijeka i Međunarodna zračna luka Zagreb su među njima) [9].

Hrvatska se nalazi na dva koridora osnovne prometne mreže, na Mediteranskom koridoru i na Rajna-Dunav koridoru (riječni pravac, raniji VII koridor). Čvor Lučko nalazi se na Mediteranskom koridoru, tj. cestovnom i željezničkom koridoru čiji je sastavni dio i pravac Rijeka – Zagreb – Budimpešta (raniji Vb koridor). Na *Slici 3.* prikazani su koridori osnovne prometne mreže kroz Republiku Hrvatsku i susjedne zemlje.

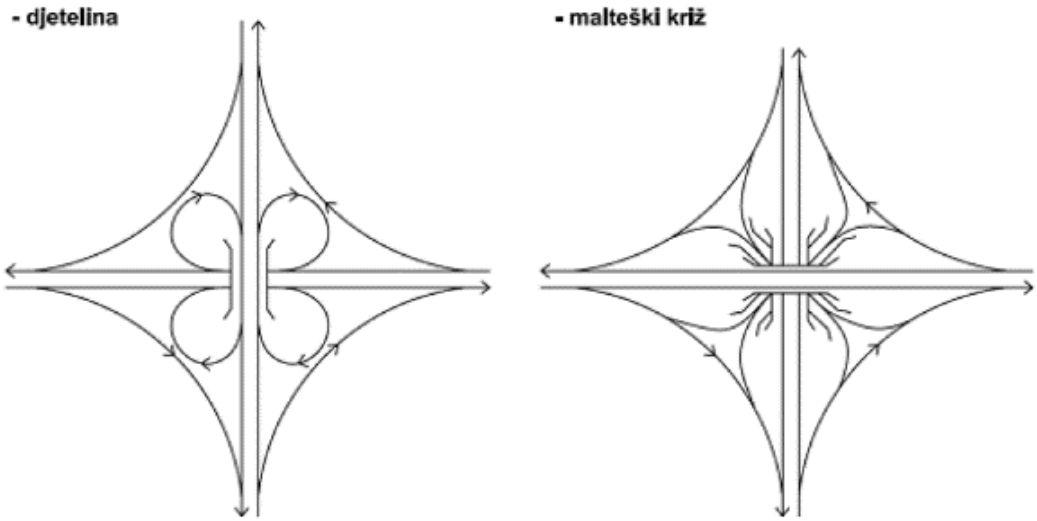


Slika 3. *TEN-T Osnovna prometna mreža kroz RH i susjedne zemlje*, [10]

Iz navedenog se može zaključiti kako čvor Lučko uistinu ima važnu i lokalnu i regionalnu ulogu u povezivanju cestovne prometne mreže. Potrebno je stoga detaljnije analizirati njegove infrastrukturne elemente, stanje sigurnosti, prometno opterećenje i način vođenja prometa kako bi se determinirala eventualna problematika raskrižja, te odabranim rješenjima osigurala dugoročno stabilna razina usluge prometovanja, prikladna važnosti čvora.

2.2.2. Analiza postojeće infrastrukture i opreme raskrižja

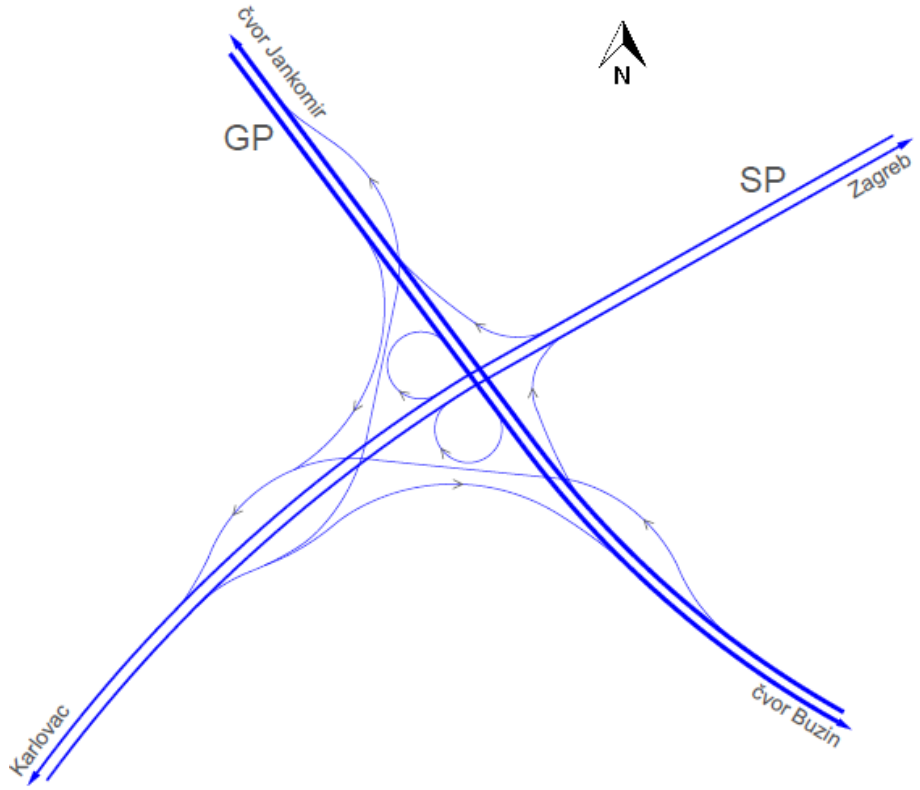
Čvor Lučko raskrižje je izvan razine s četiri privoza. Činjenica je da svako raskrižje u postupku koncipiranja ima svoja svojstva i zahtjeve koje treba analizirati na skoro unikatan način. Literatura navodi oko 110 osnovnih oblika i modaliteta raskrižja izvan razina [1] [11], od kojih su najosnovniji oblici djeteline i malteškog križa (*Slika 4.*).



Slika 4. *Osnovni modaliteti raskrižja izvan razine s četiri privoza,* [1]

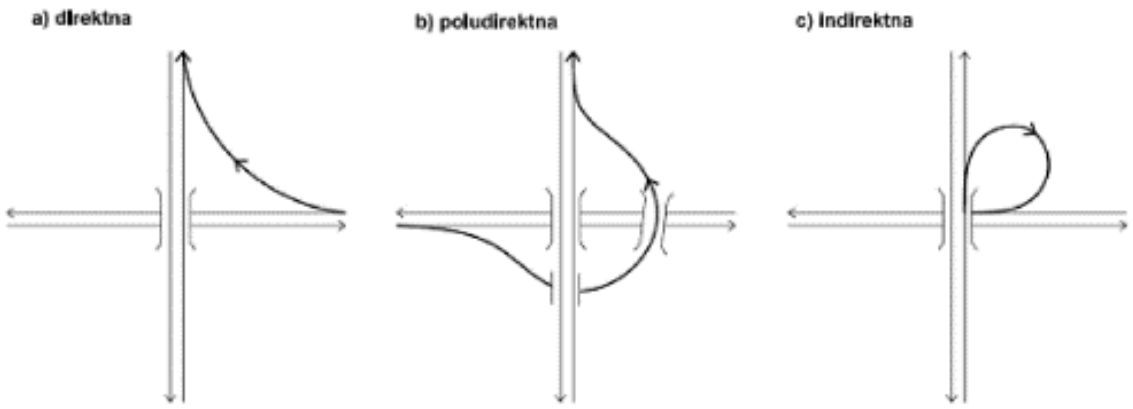
Kako je već teoretski navedeno, svi oblici, odnosno modaliteti izvedeni su od nekoliko osnovnih segmenata, a to su: glavni prolazni kolnici, spojne rampe te područja izljeva i uljeva. Njihova geometrijska izvedba, koja je prvenstveno ovisna o zahtijevanoj funkcionalnoj razini, željenim brzinama u raskrižju, prometnom opterećenju privoza, lokaciji i značajkama terena te udaljenosti od susjednih raskrižja, formira prometne tokove koji se kreću kroz raskrižje čineći radnje isplitanja, uplitanja, preplitanja i križanja.

Glavni prolazni kolnici u pravilu se vode pravocrtno, iako nisu iznimka ni slučajevi u kojima glavni prometni tok iziskuje drugačija rješenja. Kod čvora Lučko, glavni prometni tok (GP) čini zagrebačka obilaznica (SZ – JI) zbog dominantnog prometnog opterećenja. Način vođenja kroz raskrižje je pravocrtni, i to postavljen okomito na sporedni prometni tok (SP) Jadranske avenije (SI - JZ). *Slika 5.* prikazuje središnje osi kolnika svih segmenata čvora Lučko s naznakom glavnog i sporednog pravca.



Slika 5. *Središnje osi kolnika svih segmenata čvora Lučko*

Povezivanje prometnih struja s osnovnih pravaca (GP i SP) unutar raskrižja izvan razina, obavlja se preko spojnih cesta odnosno rampi. Spojne rampe predstavljaju samostalne ceste namijenjene isključivo prometnim tokovima koji na raskrižju mijenjaju usmjerenje i pravac. Prema funkcionalnoj klasifikaciji razlikuju se dvije vrste rampi: *priključne* i *vezne*. Priključne su one koje omogućuju priključenje SP-GP i obratno posredstvom sekundarnog raskrižja u razini (funkcionalna razina C-D). Vezne rampe su svojstvene raskrižjima s potpunim programom veza (funkcionalna razina A i B), a opslužuju samo jednu prometnu struju na relaciji izljev-uljev [1]. Osnovni oblici ovakvih rampi su: *direktna, poludirektna* i *indirektna* (*Slika 6.*).



Slika 6. *Osnovni oblici spojnih rampi*, [1]

Projektno-oblikovni elementi spojnih rampi najuvjerljivije se mogu predočiti uz pomoć njihovih tlocrtnih i visinskih projekcija te njihovim poprečnim presjekom. U oblikovanju rampi koriste se *pravac*, *kružni luk* i *klotoida* kao tri osnovna geometrijska elementa, a u praksi su prisutne i slobodnije kombinacije geometrijskih elemenata [1]. Za sve spojne rampe je mjerodavna projektna brzina (V_p), te su na temelju nje u *Tablici 2.* dane granične vrijednosti projektnih elemenata spojnih rampi.

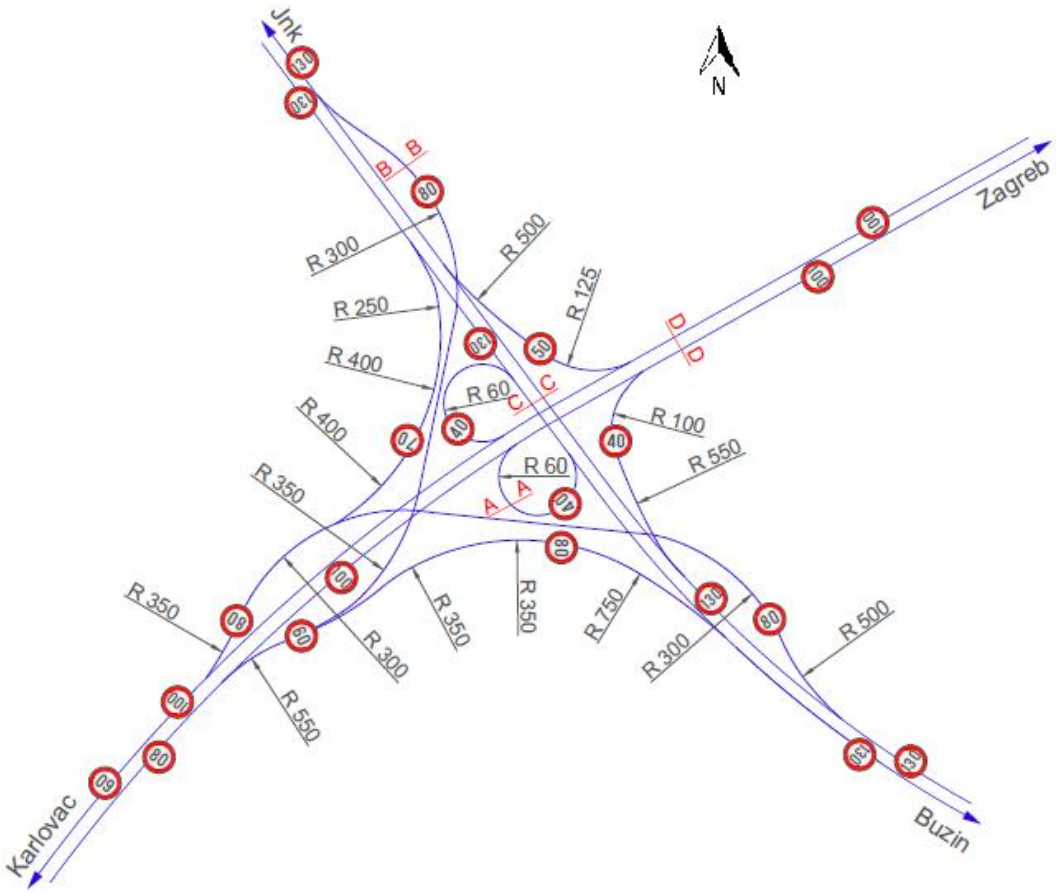
Tablica 2. *Granične vrijednosti projektnih elemenata spojnih rampi*, [1]

Projektni element		Oznaka	Granične vrijednosti projektnog elementa za V_p [km/h]					
			30	40	50	60	70	80
Najmanji polumjer zavoja		R_{min} [m]	25	45	75	120	175	250
Najveći uzdužni nagib	uspon	+ s [%]	6,0					
	pad	- s [%]	7,0					
Najmanji konveksni polumjer		R_{min} [m]	500	1000	1500	2000	2800	4000
Najmanji konkavni polumjer		R_{min} [m]	250	500	750	1000	1400	2000
Najmanji poprečni nagib		q_p [%]	2,5					
Najveći poprečni nagib		q_R [%]	6,0					
Najmanji nagib vitoperenja		Δs_{min} [%]	0,1 * a (a = odmak ruba od osi vitoperenja [m])					
Najmanja duljina zaustavljanja		L_z [m]	25	30	40	60	85	115

Čvor Lučko ima oblik modificirane djeteline u tri razine, s dvije poludirektne i direktne vezne rampe za dominantna lijeva skretanja. *Slika 7.* prikazuje središnje osi glavnih tokova i spojnih rampi na čvoru Lučko, s upisanim polumjerima zavoja i dopuštenim brzinama kretanja. Oblikovni elementi spojnih rampi na čvoru Lučko izvedeni su primjereno pozitivnoj regulativi, što se za polumjere zavoja može utvrditi uspoređujući primijenjene vrijednosti (*Slika 7.*) s granično dopuštenim vrijednostima iz *Tablice 2.*

Također, u svrhu provjere vertikalnih zaobljenja treba navesti kako je čvor Lučko izgrađen na ravničarskom terenu, a oblikovnost privoza je kako slijedi [1]:

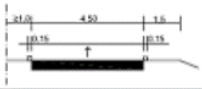
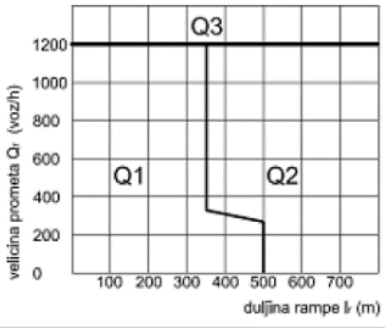
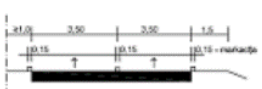
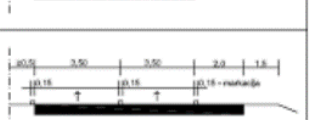
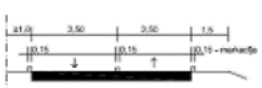
- smjer Jankomir: $R = 2\,500\ m,\ \widehat{R} = 40\,000\ m$
- smjer Buzin: $R = 3\,200\ m,\ \check{R} = 25\,000\ m$
- smjer Zagreb: $R = 4\,000\ m,\ s = 0\%$
- smjer Karlovac: $R = \infty,\ \check{R} = 60\,000\ m.$



Slika 7. *Prikaz oblikovnih elemenata i dopuštenih brzina segmenata čvora Lučko*
Izvor: [1]

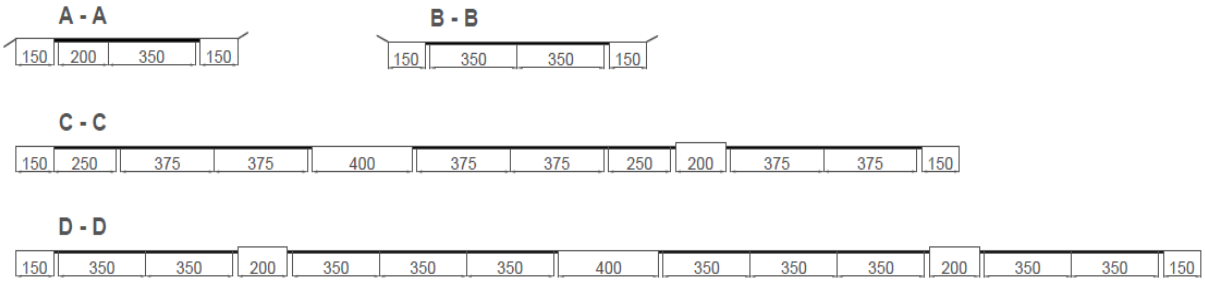
.

Poprečni presjek ili profil spojne rampe određuje se prema prometnom opterećenju i duljini vožnje. Karakteristični su tipovi presjeka jednosmjernih rampi (Q1-Q3) i dvosmjerne rampe (Q4) prikazani na *Slici 8.*, gdje se vidi i granično područje primjene pojedinih oblika poprečnog presjeka.

poprečni presjek		dimenzije (m)	granice primjene
oznaka	opis presjeka		
Q1	jednotračni presjek s proširenim prometnim trakom		
Q2	dvotračni poprečni presjek		
Q3	dvotračni presjek sa zaustavnim trakom		
Q4	dvotračni presjek s dvosmjernim prometom		duljina poteza s dvosmjernim prometom > 125m

Slika 8. *Dimenzije i granično područje primjene spojnih rampi*, [1]

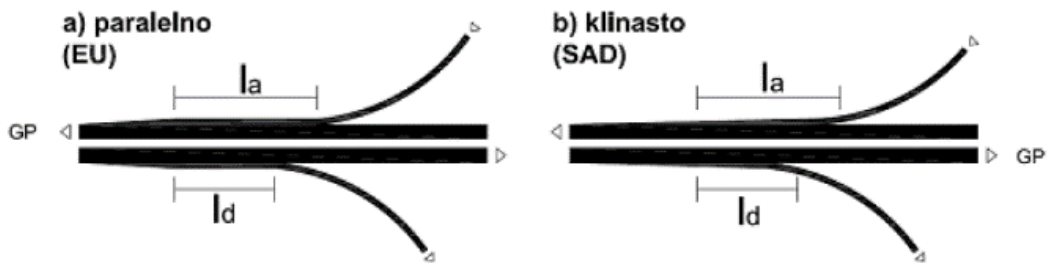
Na čvoru Lučko, poprečni presjeci poludirektnih i dominantnih direktnih rampi izvedeni su prema tipu Q2 (presjek B-B), dok su indirektne rampe izvedene modificiranim tipom Q1 (presjek A-A). Na *Slici 9.* prikazani su poprečni presjeci spojnih rampi i osnovnih trasa (C-C i D-D), označenih ranije na *Slici 7.*



Slika 9. *Poprečni presjeci spojnih rampi i osnovnih kolnika na čvoru Lučko*
Izvor: [1]

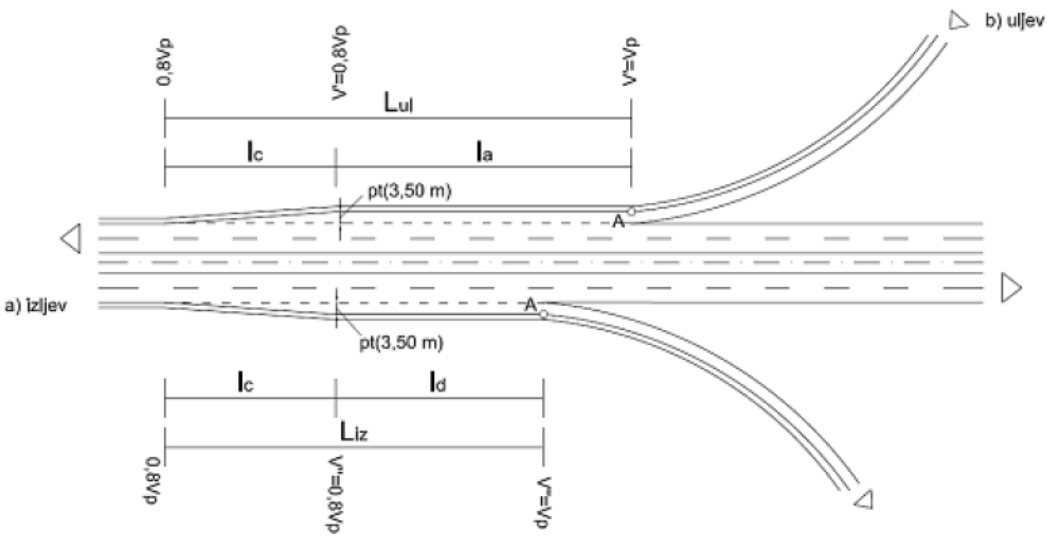
Iz slike se vidi da glavni prometni tok (zagrebačka obilaznica, presjek C-C) ima dvije prometne trake u svakom smjeru širine 3,75 m. Razdjelni pojas na području raskrižja je 4,0 m. Sporedni prometni tok (presjek D-D) je šesterotračna prometnica (tri trake u svakom smjeru) širine promenih traka 3,50 m, a i glavni i sporedni tok imaju zaustavne trakove širine 2,50 m. Direktne i poludirektne spojne rampe su dvotračne, sa širinom prometnih traka 3,50 m. Na temelju korištenih geometrijskih elemenata može se zaključiti kako je čvor Lučko projektiran i izveden za velika prometna opterećenja, a detaljna analiza propusne moći i razine usluge prikazana je u nastavku rada.

Nakon analiziranih glavnih pravaca i spojnih rampi, u ovom poglavlju potrebno je još kratko teorijski opisati i praktično analizirati područja uplitanja i isplitanja na čvoru, te opremu raskrižja. Prometne radnje isplitanja i uplitanja podrazumijevaju promjenu prometnog traka uz prilagođavanje brzine vožnje. Kod isplitanja je prisutno izdvajanje iz osnovnog prometnog pravca s usporavanjem vožnje, a kod uplitanja se radi o ubrzavanju s ulaskom u osnovni prometni tok. Pri obje radnje ne smije se remetiti ustaljeni prometni režim, pa je neophodno mjesta isplitanja i uplitanja građevinski prikladno urediti te opremiti odgovarajućom signalizacijom [1]. Općenito se razlikuju dva načina izvedbe područja isplitanja i uplitanja: *paralelno* i *klinasto* (*Slika 10.*).



Slika 10. *Osnovni oblici izljevno-uljevnih trakova,* [1]

Na čvoru Lučko primijenjeno je paralelno (europsko) rješenje, gdje je protočni dio kolnika u području isplitanja ili uplitanja proširen za dodatni prometni trak koji se proteže duž puta usporavanja (l_d), odnosno ubrzavanja (l_a), a proširuje se ili suzuje na duljini razvlačenja (l_c). Detaljno se takva izvedba vidi na *Slici 11*.



Slika 11. *Osnovni elementi za dimenzioniranje paralelnog načina izvedbe izljeva i uljeva,* [1]

Potrebna duljina traka za usporavanje kod isplitanja računa se prema izrazu:

$$\boldsymbol{L_{is} = l_c + l_d = \frac{t \cdot V'}{3{,}6} + \frac{(V')^2 - (V'')^2}{26 \cdot d} \quad [m]} \tag{1}$$

gdje je:

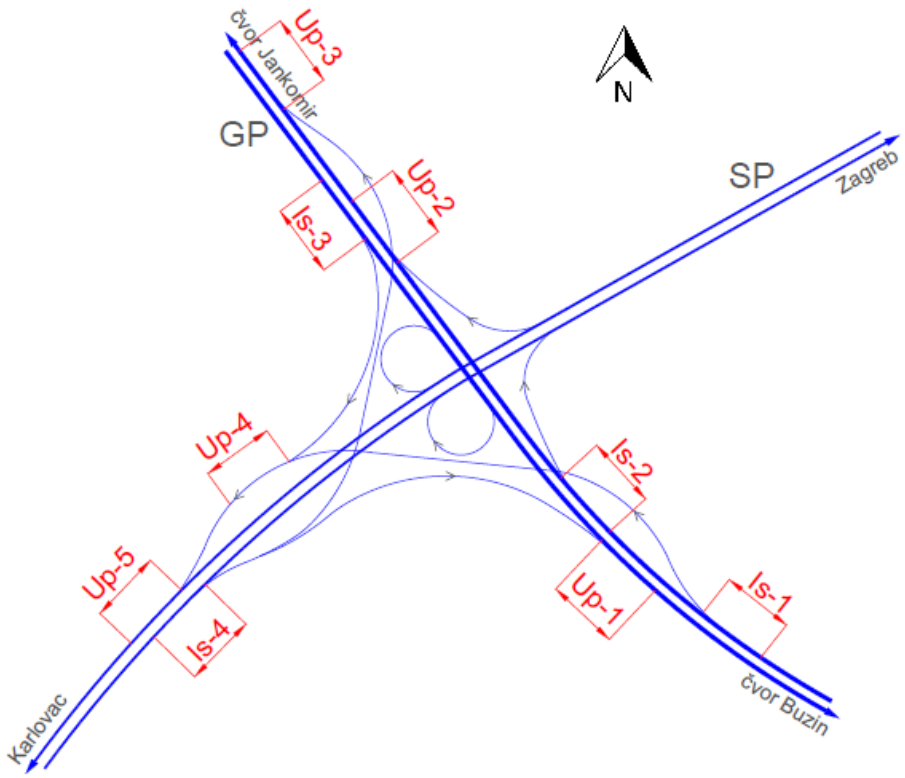
l_c – duljina razvlačenja (m)
l_d – duljina traka za usporavanje (m)
t – vrijeme skretanja s osnovnog kolnika i prolaska duljine l_c (uzima se 3 s)
V' – prilagođena brzina isplitanja (km/h), $V' = 0{,}8 \cdot V^{GP}$
V" – brzina na kraju trake za usporavanje (km/h) (brzina na rampi)
d – vrijednost usporenja, d = 1,2 – 1,5 m/s^2.

Duljina traka za ubrzavanje načelno se računa prema istom izrazu (1), osim što se umjesto vrijednosti usporenja (d) uzima vrijednost ubrzanja vozila (a), koja uobičajeno iznosi između 0,8 m/s^2 i 1,0 m/s^2 [1]. Zbog niže vrijednosti ostvarenih ubrzanja vozila od usporenja, te zbog činjenice da je uplitanje složenija radnja od isplitanja, duljina traka za ubrzavanje redovito je veća od one za usporavanje. U *Tablici 3.* dane su okvirne vrijednosti duljine traka za ubrzanje/usporenje u zavisnosti o brzini vozila na osnovnom pravcu i spojnoj rampi.

Tablica 3. *Duljine traka za ubrzanje/usporenje u zavisnosti o brzini,* [1]

V_0^{GP}	$V' = 0{,}8\ V_0^{GP}$	l_c	Duljine l_d i l_a za brzine na spojnoj rampi V'' (*km/h*)						
km/h	*km/h*	*m*	l_a / l_d	30	40	50	60	70	80
80	64	55	l_d	80	65	60	60	-	-
			l_a	120	100	90	90		
90	72	60	l_d	110	90	70	60	60	-
			l_a	165	135	105	90	90	
100	80	65	l_d	140	125	100	70	60	60
			l_a	210	185	150	105	90	90
110	88	75	l_d	175	160	135	105	75	60
			l_a	265	240	200	160	110	90
120	96	80	l_d	215	195	170	145	110	70
			l_a	320	290	260	215	165	105

Na čvoru Lučko direktne i poludirektne rampe imaju ograničenje brzine u rasponu 40 – 80 km/h, dok su na osnovnim pravcima ograničenja brzine 130 km/h (GP) i 100 (80) km/h (SP). Prema tome, zahtijevane duljine traka za ubrzavanje i usporavanje se razlikuju za pojedina isplitanja/uplitanja na čvoru Lučko. Na *Slici 12.* su označene lokacije dodatnih traka za isplitanje i uplitanje za koje se u nastavku ispituje ispunjavanje kriterija potrebne duljine.



Slika 12. *Prikaz lokacija dodatnih traka za uplitanje i isplitanje koje se ispituju s aspekta potrebne duljine*

S obzirom da u *Tablici 3.* nisu dane vrijednosti za brzine na osnovnom kolniku od 130 km/h, iste je potrebno izračunati prema izrazu (1). U nastavku je prikazan primjer izračuna za jedno isplitanje i jedno uplitanje, a u *Tablici 4.* su navedene sve vrijednosti duljina dodatnih prometnih traka za isplitanje ili uplitanje (izmjerene i proračunate) te ocjena ispunjavanja kriterija.

$$L_{is_1} = \frac{3 \cdot 0{,}8 \cdot 130}{3{,}6} + \frac{(0{,}8 \cdot 130)^2 - (80)^2}{26 \cdot 1{,}5} = 86{,}7 + 113{,}2 = 199{,}9\ m \quad \approx \quad 200\ m$$

$$L_{up_1} = \frac{3 \cdot 0{,}8 \cdot 130}{3{,}6} + \frac{(0{,}8 \cdot 130)^2 - (80)^2}{26 \cdot 1{,}0} = 86{,}7 + 169{,}8 = 256{,}5\ m \quad \approx \quad 257\ m$$

Tablica 4. *Pregled ispunjavanja kriterija potrebne duljine dodatnih traka za isplitanje ili uplitanje na čvoru Lučko*

Oznaka (*Slika 12.*)	Brzina na spojnoj rampi	Brzina na osnovnom kolniku	Radnja	Ubrzanje vozila (a)	Usporenje vozila (d)	Izmjerene duljine L_{is} ili L_{up} (Google Earth)	Potrebne duljine (L_{is} ili L_{up}) (proračun)	Ispunjavanje kriterija potrebne duljine dodatnog traka
-	*[km/h]*	*[km/h]*	-	*[m/s²]*	*[m/s²]*	*[m]*	*[m]*	-
Is-1	80	130	isplitanje	-	1,5	300	200	✓
Is-2	40	130	isplitanje	-	1,5	250	323	✗
Is-3	70	130	isplitanje	-	1,5	250	238	✓
Is-4	60	80	isplitanje	-	1,5	470	115	✓
Up-1	80	130	uplitanje	1,0	-	400	257	✓
Up-2	50	130	uplitanje	1,0	-	250	407	✗
Up-3	80	130	uplitanje	1,0	-	360	257	✓
Up-4	70	80	uplitanje	1,0	-	210	-	✓
Up-5	80	100	uplitanje	1,0	-	330	125	✓

Prema *Tablici 4.* se može zaključiti da duljine dodatnih prometnih traka za jedno isplitanje i jedno uplitanje ne zadovoljavaju postavljene kriterije vezane za dinamiku vožnje. Radi se o direktnim spojnim rampama na kojima je dopuštena brzina 40 km/h i 50 km/h, pa velika razlika s obzirom na dopuštenu brzinu na osnovnom kolniku autoceste (130 km/h) uvjetuje velike duljine dodatnih traka za ubrzanje ili usporenje vozila. Dopuštene brzine na tim spojnim rampama se ne mogu povećati zbog primjenjenih polumjera zavoja, a isto vrijedi i za duljine dodatnih traka zbog prostornih ograničenja, pa se stoga ovaj problem može riješiti smanjenjem dopuštene brzine na osnovnom kolniku autoceste na 100 km/h. Ipak, to bi narušilo ustaljeni prometni režim autoceste pa je potrebno dodatno analizirati ovu mogućnost. Ostale analizirane dodatne trake, koje su bitnije za ovaj rad jer spadaju u koridore koji vode prema/iz autoceste A1, zadovoljavaju kriterij potrebne duljine, tj. geometrijske uvjete za obavljanje radnji uplitanja ili isplitanja.

Prometna oprema predstavlja izravnu poveznicu između korisnika i raskrižja, a opremu raskrižja u širem smislu čine [1]:

- prometni znakovi, signalizacija i oprema na cestama
- rasvjeta
- krajobrazno uređenje (udaljenost okolnih objekata)
- ostala oprema.

Problematika iz ovog područja pretežito se rješava uz pomoć *Pravilnika o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama* (NN 33/05 i NN 155/05). Treba naglasiti kako je prometna oprema također bitna sastavnica cjelovite izvedbe raskrižja izvan razine. Na čvoru Lučko je prometna oprema i rasvjeta *postavljena prema pozitivnim propisima* [1], a ograničenja brzine iz postavljene vertikalne prometne signalizacije, što je bitno za ovaj rad, prikazana su ranije na *Slici 7*.

2.2.3. Analiza sigurnosti odvijanja prometa

Sigurnost odvijanja prometa jedan je od četiri osnovna zahtjeva za raskrižje. Prema općenitoj definiciji, sigurnost predstavlja stanje neizloženosti riziku, odnosno stanje sa prihvatljivom razinom rizika od nesreća, oštećenja ili drugih opasnosti [13]. Na raskrižjima, stanje rizika prvenstveno ovisi o elementima kao što su broj i vrsta konfliktnih točaka, brzine u raskrižju, zaustavna preglednost, položaj raskrižja i stanje kolničkog zastora. Može se ustvrditi da će dobro koncipirana raskrižja udovoljiti uvjetima sigurne vožnje ako u cijelosti ili pretežito udovoljavaju sljedećim bitnim zahtjevima [1]:

- *pravovremena prepoznatljivost*, koja mora biti omogućena sa svih privoza, a vozači trebaju biti pripremljeni i spremni za sve prometne situacije koje su pred njima;
- *preglednost raskrižja*, što podrazumijeva dobro i pravovremeno uočavanje najbitnijih oblikovnih detalja/elemenata te raskrižja u cjelini;
- *shvatljivost*, koja će biti zadovoljena u uvjetima kada je svim učesnicima jasno na koju stranu skrenuti, tko i kako se treba razvrstati, gdje su mogući konflikti i sl., te
- *dostatna provoznost*, koja podrazumijeva ona rješenja raskrižja u kojima su oblikovna svojstva usklađena s voznodinamičkim, odnosno voznogeometrijskim osobinama vozila.

Brzine vozila su od posebnog značenja za sigurnost prometa o kojima ovise moguća ponašanja i posljedice, pa je osnovna pretpostavka za postizanje zadovoljavajuće razine sigurnosti na raskrižjima izvan razine jasno razjašnjenje odnosa poželjne brzine i prometnih događanja, a ne smije se zahtjevati ni očekivati od učesnika u prometu više od dvije istovremene mogućnosti odlučivanja [1].

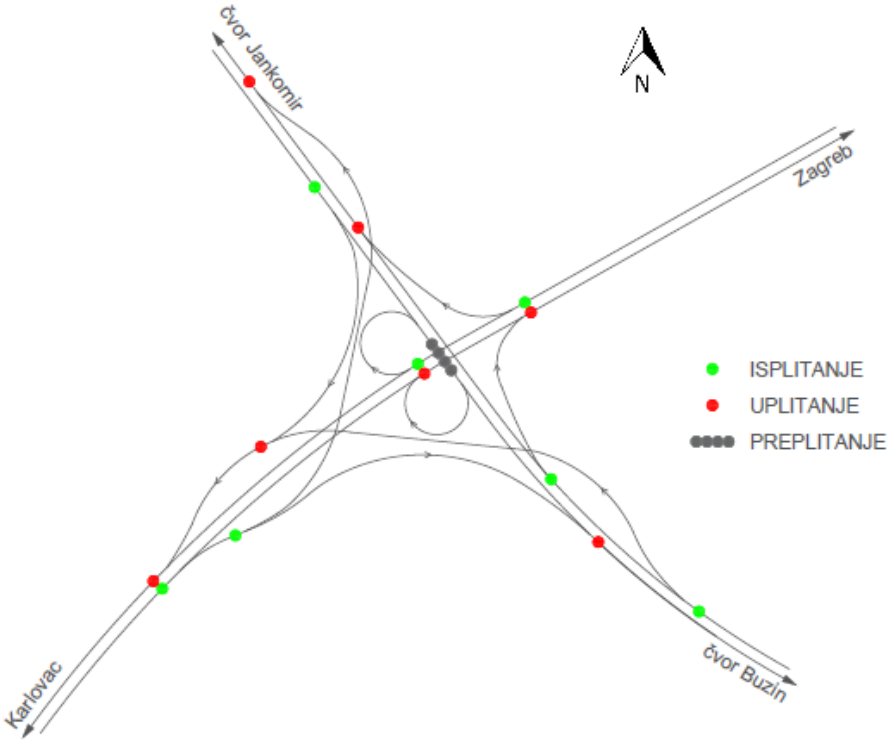
Konfliktna situacija se može definirati kao zbroj svih konfliktnih točaka koje su uzrokovane prometnim radnjama isplitanja, uplitanja, preplitanja i križanja prometnih tokova na površini raskrižja. Broj konfliktnih točaka ovisi samo o vrsti/tipu i obliku raskrižja, a stvaran broj konflikata u znatnoj mjeri ovisan je o geometrijskom oblikovanju, slobodnoj vidljivosti,

prometnom opterećenju i slično [1]. Raskrižja izvan razine visoke razine funkcionalnosti, kao što je čvor Lučko, ne sadrže najopasnije radnje križanja, zbog čega u pravilu osiguravaju visoku razinu sigurnosti. Također, optimalno uređenje prometnih tokova i razrješenja konfliktnih situacija postiže se postupcima razdjeljivanja prometnih tokova, a razlikuju se vremensko i prostorno razdjeljivanje (*Slika 13.*).



Slika 13. *Načini razdjeljivanja prometnih tokova u raskrižjima*, [1]

Prema obilježju radnje te utjecaju na propusnu moć i sigurnost prometa, sa sigurnošću se može ocijeniti da je isplitanje najlakša radnja, a križanje najteža. Uplitanje je složenija prometna radnja od isplitanja jer traži od vozača veće sposobnosti i iskustvo kako bi ispravno procijenili brzinu i vremenske praznine u glavnom prometnom toku. Preplitanje je najsloženija radnja na raskrižjima izvan razine jer se sastoji i od uplitanja i od isplitanja, na određenom, dovoljno dugom potezu ceste. Zbog toga kod izbora vrste čvorišta, ali i kod analize postojećih čvorišta, težina prometnih radnji mjerodavno utječe na donošenje odluka [2]. Čvor Lučko sadrži 7 segmenata isplitanja i 7 segmenata uplitanja, te jedno preplitanje (*Slika 14.*).



Slika 14. *Prikaz konfliktnih točaka na čvoru Lučko*

Zaustavna preglednost također je obvezujući element sigurnosti prometa na raskrižju. Prema Pravilniku [3], dužina zaustavne preglednosti jednaka je dužini zaustavnog puta, te ona mora biti osigurana na svim dijelovima ceste u horizontalnom i vertikalnom smislu za oba smjera vožnje. Vrijednosti zaustavne preglednosti u ovisnosti o računskoj brzini, pri uzdužnom nagibu od 0 %, dane su u *Tablici 5*.

Tablica 5. *Zaustavna preglednost u ovisnosti o računskoj brzini,* [3]

Računska brzina	v_r *(km/h)*	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Zaustavna preglednost	P_z *(m)*	25	35	50	70	90 (80)	120 (100)	150 (120)	190 (150)	230 (170)	280 (200)	340 (250)

Veličine preglednosti potrebno je terenski izmjeriti na samom raskrižju i potom rezultate usporediti sa vrijednostima u *Tablici 5*. Budući autor ovog rada nije bio u mogućnosti to odraditi uslijed ograničenja pristupa samom čvoru, ispunjenje ovog uvjeta potvrdit će se prema [1], gdje je za preglednost u području čvora Lučko navedeno: „*Dobra vidljivost u svim ključnim dijelovima, doglednost barem 200 – 250 m.*“.

Završni čimbenik sigurnosti prometa na rakrižjima koji je potrebno spomenuti je položaj raskrižja. Taj čimbenik je ustvari izrazito vezan za preglednost u raskrižju, a time i na dopuštene brzine u raskrižju. Najvažnija opća načela i preporuke u pogledu položaja raskrižja su [1]:

- vrhovi uvoza i izvoza raskrižja trebaju biti na ispruženom dijelu trase;
- usmjeriti pažnju na tlocrtno vođenje trase, posebno uvoze u uskim desnim zavojima treba izbjegavati zbog smanjene preglednosti;
- dobra preglednost bit će povoljnija na mjestima konkavnih vertikalnih zaobljenja nivelete;
- izvorne rampe u usponu i uvozne u padu su povoljne u voznodinamičkom pogledu.

Navedena načela i preporuke su same po sebi iznimno logične i intuitivno jasne. Općenito se može zaključiti kako čvor Lučko uistinu zadovoljava sve navedene, visoko postavljene sigurnosne standarde i potvrđuje ranije navedenu činjenicu kako raskrižja izvan razine, naravno ukoliko su pravilno izvedena, osiguravaju visoki stupanj sigurnosti prometa. Kao dokaz tome može se iznijeti podatak o broju prometnih nesreća na raskrižjima u RH tijekom 2015. godine (*Tablica 6.*). Iako nema zasebnih podataka samo za čvor Lučko, sasvim je dovoljan podatak da se od ukupno 9 841 prometne nesreće koje su se dogodile na raskrižjima, samo njih 18 (0,18 %) dogodilo na raskrižjima izvan razine. Pritom niti jedna osoba nije smrtno stradala [15].

Tablica 6. *Prometne nesreće i posljedice u RH (2015.) prema vrsti raskrižja*

Vrsta raskrižja	Prometne nesreće		Poginuli		Ozlijeđeni	
	Broj	*Stopa*	Broj	*Stopa*	Broj	*Stopa*
T - križanje	4.324	*43,94%*	17	*38,64%*	2.110	*41,1%*
Y - križanje	726	*7,38%*	1	*2,27%*	317	*6,2%*
četverokrako križanje	3.791	*38,52%*	22	*50,00%*	2.395	*46,7%*
kružni tok	533	*5,42%*	1	*2,27%*	171	*3,3%*
ostala križanja	449	*4,56%*	3	*6,82%*	136	*2,7%*
čvor u više razina	18	*0,18%*	0	*0,00%*	1	*0,02%*
Ukupno	**9.841**	***100,0%***	**44**	***100,0%***	**5.130**	***100,0%***

Izvor: [14]

3. ANALIZA POSTOJEĆEG STANJA PROMETA NA ČVORU LUČKO

Analiza formiranja redova čekanja na čvoru Lučko, te mogućnost njihova razrješenja osnovna je svrha ovog rada. Budući da se redovi čekanja formiraju kao posljedica nepovoljnog odnosa prometne ponude i potražnje na analiziranom području, vrlo važno je dati pregled prometnog opterećenja čvora Lučko i šire okolice, te odrediti njegova kapacitivna ograničenja. Ovo poglavlje čini stoga vjerovatno i ključni dio cijelog rada.

Budući da se u neposrednoj blizini čvora Lučko nalazi i naplatna postaja Lučko, potrebno je i njezin utjecaj uključiti u analizu, te tako cjelovitim razmatranjem determinirati uzroke nepovoljnih prometnih situacija na čvoru Lučko. Analiza postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko se stoga sastoji od slijedećih sastavnica:

- analize postojećih stanja prometnih tokova na čvoru Lučko
- prognoze prometa
- proračuna propusne moći i razine usluge svih segmenata na čvoru Lučko
- utvrđivanja propusne moći naplatne postaje Lučko (i Demerje).

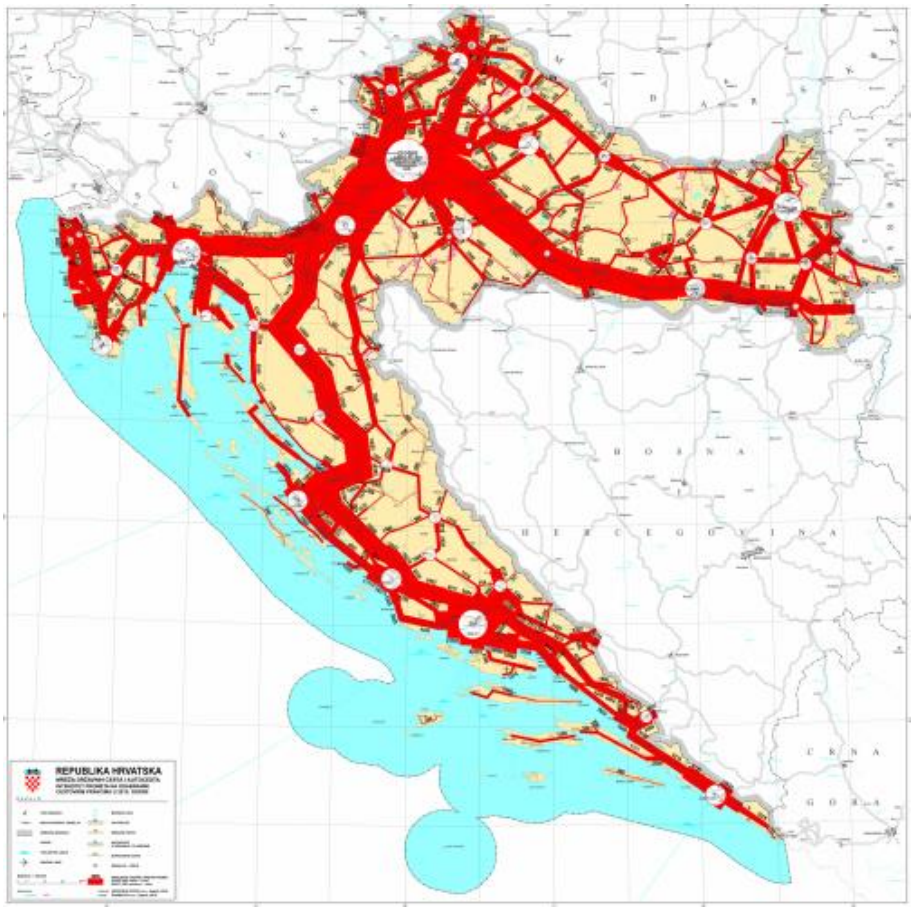
Na temelju tih sastavnica odredit će se problematika čvora Lučko, što je temelj za kreiranje varijantnih rješenja te potom i njihovu evaluaciju.

Prije početka, potrebno je samo još teorijski potvrditi ispravnost izlaganja prometnih veličina koje se navode u radu, ali još važnije, shvatiti njihovu ograničenost u percepciji prometne situacije koja vlada na čvoru. Naime, u radu se prilikom navođenja podataka iz odgovarajuće literature, te prilikom raznih proračuna, uglavnom koriste podaci prometnog opterećenja izraženog prosječnim godišnjim dnevnim prometom (PGDP) ili prosječnim ljetnim dnevnim prometom (PLDP). Iako je taj podatak nužan u percepciji stvarnog stanja prometnog toka na analiziranom području, često nije i dovoljan.

Razlog tomu je što se potpuna informacija o stvarnom stanju prometnog toka na raskrižju ne može dobiti bez analize odnosa fundamentalnih varijabli prometnog toka: *protoka, brzine toka* i *gustoće toka*, koje zajedno definiraju stvarne uvjete toka prometa [15]. Također, ključno je razumjeti da promet nije stalan ni u vremenu, ni u prostoru, pa prometni podaci dobiveni uprosjećivanjem dnevno mjerenih vrijednosti prometnih opterećenja, kao što su PGDP ili PLDP, upitno zamjenjuju, uza sve precizne proračunske aproksimacije, stvarne podatke vršnog sata dobivene brojanjem prometa u ispodsatnim vremenskim intervalima.

3.1. Analiza postojećeg stanja prometnih tokova na čvoru Lučko

Bez sumnje, čvor Lučko jedno je od prometno najopterećenijih raskrižja u Republici Hrvatskoj. Ta tvrdnja ne vrijedi samo u sezonskim prometnim opterećenjima, već kroz cijelu godinu, što je posljedica već navedenih razloga kao što su važni geoprometni položaj (u državnim, ali i europskim razmjerima) i sve veći udio gradskog prometa. Kao dokaz tome služe grafički prikaz intenziteta prometa u 2015. godini (*Slika 15.*) i tablični prikaz brojačkih mjesta s najvećim PGDP-om i PLDP-om u 2015. godini (*Tablica 7.*).



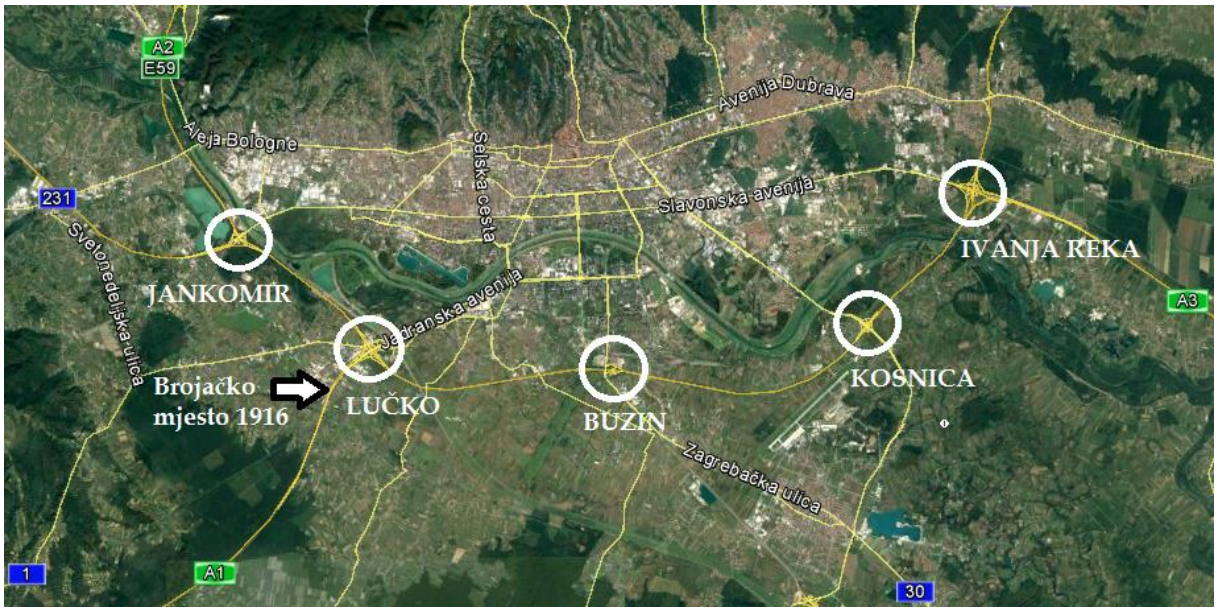
Slika 15. *Intenzitet prometa na odabranim cestovnim pravcima u 2015. godini*, [16]

Tablica 7. *Prikaz brojačkih mjesta s najvećim PGDP-om i PLDP-om u 2015. godini*, [16]

Cesta	Oznaka brojačkog mjesta	Brojačko mjesto	PGDP 2015	PLDP 2015
D8	5422	Stobreč	52.273	63.200
D8	5423	Solin	41.707	48.561
A1	**1916**	**Lučko - jug**	**31.822**	**57.858**
ner.	2014	Velika Mlaka	31.458	30.114
A1	1931	Zdenčina - jug	31.247	57.988
A1	1920	Jastrebarsko - jug	29.183	56.529
A7	2823	Rujevica - zapad	26.814	33.714

Kako bi se utvrdilo prometno opterećenje svih segmenata čvora Lučko, potrebno je prikazati prometna opterećenja na brojačkim mjestima zagrebačke obilaznice i Jadranske avenije, odnosno na sva četiri privoza čvora Lučko. Budući da nema dostupnih podataka brojanja prometa na Jadranskoj aveniji prije čvora Lučko iz smjera Zagreba, prikazati će se prometna opterećenja (PGDP) samo preostala tri privoza, odnosno dionice:

- čvor Jankomir – čvor Lučko
- čvor Lučko – čvor Buzin
- čvor Lučko – čvor Donja Zdenčina (A1).



Slika 16. *Lokacije čvorišta na zagrebačkoj obilaznici*
Izvor kartografske podloge: Google Earth

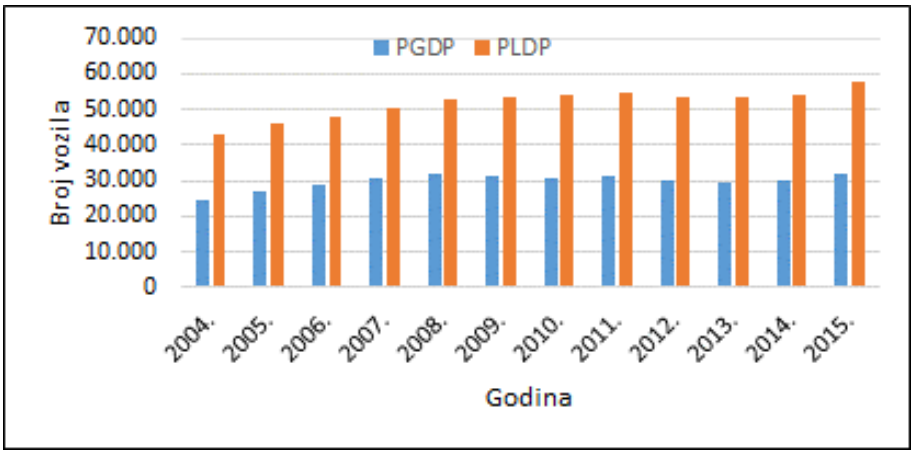
Prikaz postojeće zagrebačke obilaznice s najznačajnijim čvorištima dan je na *Slici 16*. Sva označena čvorišta dio su autoceste A3 Bregana – Zagreb – Lipovac. Na slici je prikazana i lokacija brojačkog mjesta 1916 koje se u radu koristi za dobivanje prometnog opterećenja čvora Lučko i autoceste A1 (dionice čvor Lučko – čvor Donja Zdenčina).

Kretanje PGDP-a i PLDP-a na autocesti A1 neposredno nakon naplatne postaje Lučko, u periodu od 2004. do 2015. godine, prikazano je u *Tablici 8.* i pripadajućem *Grafikonu 1*. Pritom su u tablici radi lakše percepcije bojano prikazane godišnje stope promjene prometnog opterećenja. Jasno je da je na smanjenje prometa u periodu 2009.-2013. utjecala globalna ekonomska kriza, što se negativno odrazilo na stupanj motorizacije stanovništva i platežnu sposobnost turističkih aktivnosti.

Tablica 8. *Podaci brojanja prometa (PGDP i PLDP) na brojačkom mjestu A1 – Lučko jug*

Brojanje prometa: A1 - Lučko jug (BM 1916)					Odnos
Godina	PGDP	% promjene	PLDP	% promjene	PLDP/PGDP
2004.	24.577	-	42.889	-	1,75
2005.	26.684	8,57%	46.171	7,65%	1,73
2006.	28.828	8,03%	48.061	4,09%	1,67
2007.	30.510	5,83%	50.170	4,39%	1,64
2008.	32.146	5,36%	52.568	4,78%	1,64
2009.	31.432	-2,22%	53.216	1,23%	1,69
2010.	30.357	-3,42%	54.166	1,79%	1,78
2011.	31.301	3,11%	54.930	1,41%	1,75
2012.	30.235	-3,41%	53.658	-2,32%	1,77
2013.	29.628	-2,01%	53.296	-0,67%	1,80
2014.	30.037	1,38%	53.967	1,26%	1,80
2015.	31.822	5,94%	57.858	7,21%	1,82

Izvor: [16]



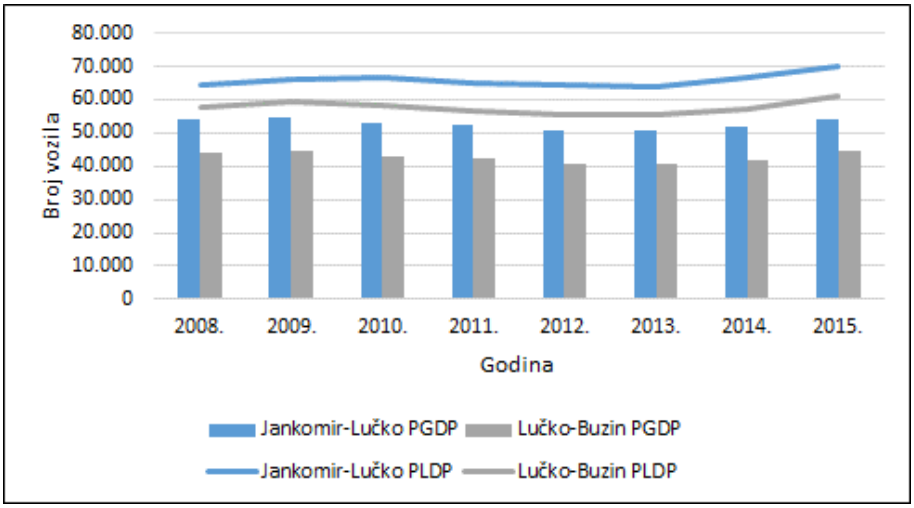
Grafikon 1. *Prometno opterećenje (PGDP i PLDP) na brojačkom mjestu A1 – Lučko jug*
Izvor: [16]

Kretanje PGDP-a i PLDP-a na brojačkim mjestima na zagrebačkoj obilaznici, koja su u neposrednoj blizini čvora Lučko (te time predstavljaju i promet na čvoru Lučko), u periodu od 2008. do 2015. godine, prikazano je u *Tablici 9.* i pripadajućem *Grafikonu 2.*

Tablica 9. *Podaci brojanja prometa (PGDP i PLDP) na dionicama zagrebačke obilaznice*

Dionica / Godina	Jankomir-Lučko				Odnos	Lučko-Buzin				Odnos
	PGDP	%	PLDP	%	PLDP/PGDP	PGDP	%	PLDP	%	PLDP/PGDP
2008.	54.222	-	64.210	-	1,18	43.992	-	57.938	-	1,32
2009.	54.542	0,59%	66.399	3,41%	1,22	44.733	1,68%	59.383	2,49%	1,33
2010.	52.801	-3,19%	66.557	0,24%	1,26	43.188	-3,45%	58.478	-1,52%	1,35
2011.	52.586	-0,41%	65.174	-2,08%	1,24	42.607	-1,35%	56.404	-3,55%	1,32
2012.	50.513	-3,94%	64.605	-0,87%	1,28	40.933	-3,93%	55.761	-1,14%	1,36
2013.	50.789	0,55%	63.759	-1,31%	1,26	40.760	-0,42%	55.372	-0,70%	1,36
2014.	52.026	2,44%	66.944	5,00%	1,29	41.926	2,86%	56.971	2,89%	1,36
2015.	54.317	4,40%	70.074	4,68%	1,29	44.782	6,81%	61.125	7,29%	1,36

Izvor: [17]



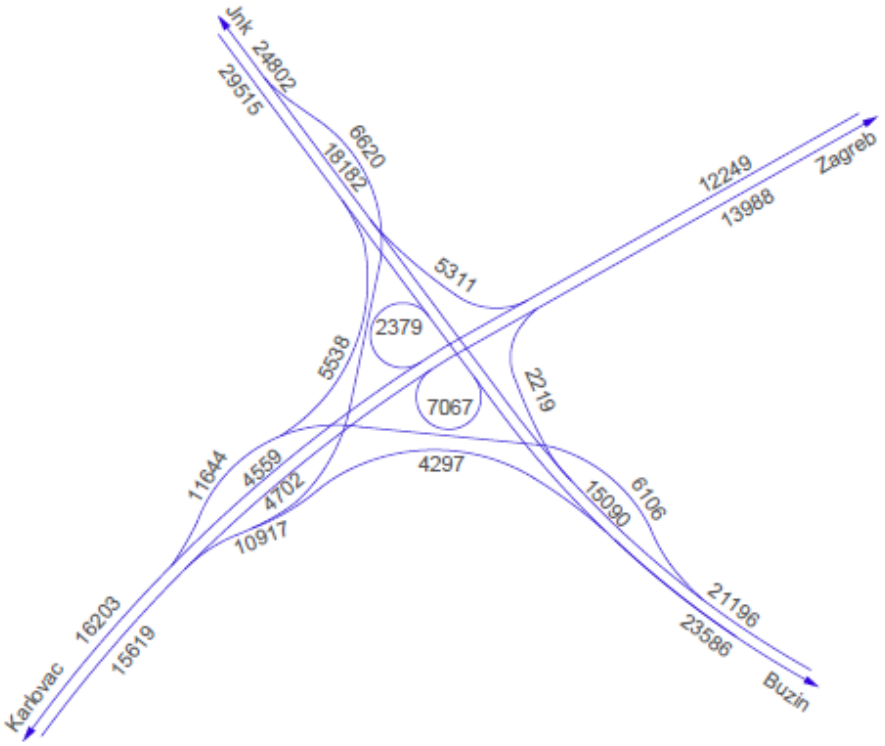
Grafikon 2. *Prometno opterećenje (PGDP i PLDP) dionica zagrebačke obilaznice*
Izvor: [17]

Iz navednih tablica i grafikona moguće je izvesti sljedeće važne zaključke:

- PGDP je na sva 3 brojačka mjesta u 2015. godini zapravo isti kao i u predkriznoj 2008. godini;
- PLDP je bio pod manjim negativnim utjecajima globalne ekonomske krize;
- čvor Lučko ima jaki utjecaj sezonskog prometa, što se osobito odnosi na spojne rampe koje povezuju zagrebačku obilaznicu s Jadranskom avenijom u smjeru Karlovca (Jadrana);
- ukupna veličina prometnog opterećenja čvora Lučko u 2015. godini bila je prosječno veća od 75 000 voz/dan (PGDP).

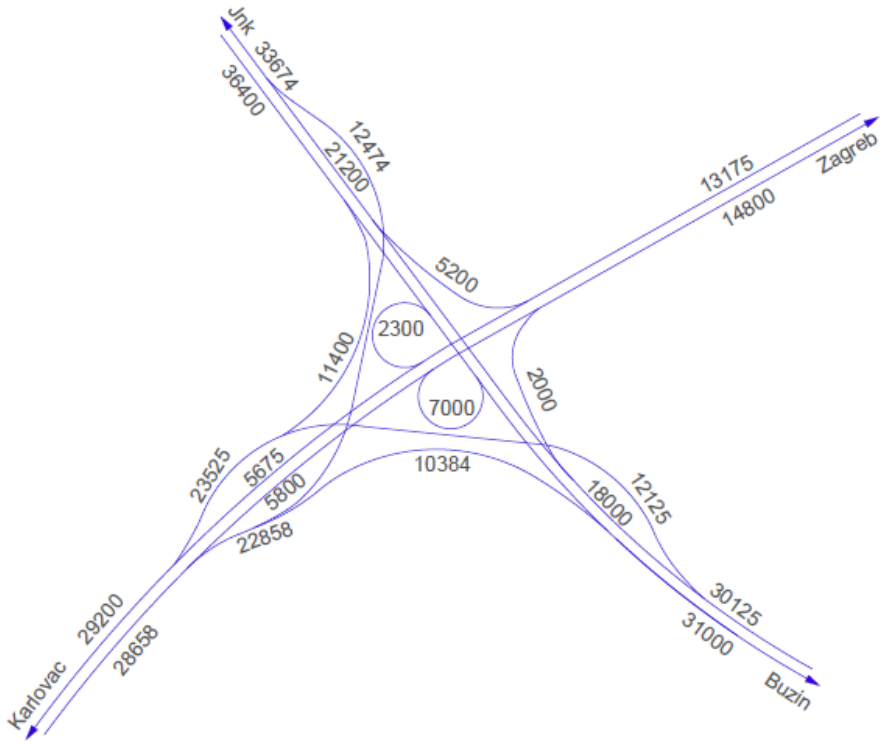
Također, na temelju navedenih podataka, i podataka iz [1], moguće je sa dovoljnom preciznošću procijeniti prometna opterećenja (PGDP) svih segmenata čvora Lučko, što je za potrebe ovog rada izuzetno značajno. Na *Slici 17.* prikazane su te vrijednosti prema podacima iz 2015. godine.

Isto je moguće napraviti i za sezonsko opterećenje (PLDP), ali sa znakovito manjom sigurnošću u točnost podataka u odnosu na cjelogodišnji promet (PGDP). Razlog tome je što dostupna literatura ne navodi takve podatke, pa su procijenjeni isključivo temeljem tabličnih vrijednosti prikazanih ranije, a to ostavlja mogućnost dosta varijabilnih rješenja. Podaci su prikazani na *Slici 18.*, a u nastavku rada se ti podaci uzimaju sa velikom rezervom i u minimalnoj količini.



Slika 17. *Procijenjene vrijednosti prometnog opterećenja (**PGDP**) čvora Lučko u 2015. godini*

Izvor: [1] [16]



Slika 18. *Procijenjene vrijednosti prometnog opterećenja (**PLDP**) čvora Lučko u 2015. godini*

Izvor: [16]

3.2. Prognoza prometa

Iako prognoza prometa ne pripada u područje analize postojećeg stanja prometnih tokova na čvoru Lučko, bitno ju je ovdje ukratko obraditi kako bi se na temelju dobivenih rezultata mogli sagledavati i razumjeti dobiveni rezultati proračuna propusne moći i razine usluge.

Prognoza prometa je predviđanje budućih prometnih zahtjeva, što se odnosi na intenzitet, strukturu i raspodjelu prometnih tokova na analiziranom području [5]. Iz činjenice da ulaganje u prometnu infrastrukturu najčešće zahtjeva iznimno visoke investicijske troškove proizlazi važnost prognoze prometa, jer se na temelju nje dobivaju mjerodavna prometna opterećenja pomoću kojih se onda vrši dimenzioniranje prometnih infrastrukturnih objekata. Prognoze su stoga neophodne za svako planiranje investicija u prometu (i ne samo u prometu), te o njima ovisi učinkovitost i profitabilnost prometnog sustava.

S obzirom da se rade u sadašnjosti, a odnose se na budućnost, prognoze prometa visoko su rizične [18]. Zapravo se može reći da je važnost prognoze prometa upravo obrnuto proporcionalna pouzdanosti njezinih rezultata, ma kako detaljno pristupili njezinoj izradi. Naime, iako ova tvrdnja i nije u potpunosti točna, njome se želi naglasiti kompleksnost izrade valjane prognoze prometa. Moguće varijabilnosti temeljnih parametara za izradu prometne prognoze, pri čemu se prvenstveno misli na stupanj motorizacije, ekonomsku analizu i razvoj aktivnosti na utjecajnom području, ne mogu se u mnogim slučajevima procijeniti sa dovoljnom preciznošću, što onda često dovodi do pogrešnih prognoza, osobito u duljim razdobljima. Ključno je stoga prilikom izrade prometnih prognoza zapravo biti svjestan navedene složenosti i mogućih pogrešaka.

U praksi su razvijeni mnogi matematički, statistički i ekspertni modeli za izradu prognoze prometa [5]. Ipak, opseg ovog rada ne uključuje njihovu analizu i upotrebu. Prognoza prometa se stoga ovdje procjenjuje isključivo na temelju uočene promjene prometnog intenziteta analiziranog čvorišta u proteklim godinama. Osnova za to su *Tablica 8.* i *Tablica 9.*, dane u prethodnom poglavlju, u kojima je navedeno kretanje PGDP-a i PLDP-a na zagrebačkoj obilaznici i autocesti A1, sve u neposrednoj blizini čvora Lučko.

U navedenim tablicama proračunat je i postotak promjene PGDP-a i PLDP-a po godinama, što predstavlja osnovu za procjenu daljnje stope promjene prometne potražnje, odnosno osnovu za prognozu prometa. Veliki problem u tome predstavlja varijabilnost izračunatih postotaka promjene, što je posljedica ekonomske krize koja se dogodila u periodu od 2009. do 2013. godine. Ipak, iz navedenih tablica može se izvući nekoliko zaključaka koji će olakšati procjenu stope rasta/pada za izradu prometne prognoze:

- veći postotni rast bilježi prometno opterećenje na autocesti A1 nego na zagrebačkoj obilaznici. Preciznije, prosječne stope godišnjeg rasta prometa na autocesti A1 su oko 6 %, a na zagrebačkoj obilaznici, na oba mjerna mjesta, oko 4 %. Mogući razlozi tomu su:
    - manje ukupne vrijednosti prometa na autocesti A1 od zagrebačke obilaznice, pa jednako povećanje prometa uzrokuje različite postotne iznose;

- povećani promet prema autocesti A1 iz smjera Jadranske avenije;
- činjenica da se tokovi na obilaznici iz smjera Buzina i iz smjera Jankomira spajaju na čvoru Lučko u smjeru autoceste A1;

- znakovito je za prognozu prometa da, kako je navedeno i ranije, prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) na sva tri analizirana brojačka mjesta u 2015. godini ima zapravo iste vrijednosti kao i u predkriznoj 2008. godini. To za sobom povlači zaključak da bi se stope rasta prometa mogle nastaviti prema uzorku koji je vladao do 2009. godine;

- PLDP je veći od PGDP-a na sva tri brojačka mjesta. Ipak, ta razlika na autocesti A1 je u posljednjim godinama prosječno čak 80 %, na dionici Lučko – Buzin 36 %, a na dionici Jankomir – Lučko samo 28 %. To s jedne strane zapravo govori u prilog tomu da dionica Jankomir – Lučko ima najveći udio gradskog prometa, a s druge strane da sezonski turistički promet ima najveći utjecaj na krak čvora Lučko prema naplatnoj postaji Lučko i autocesti A1. Taj zaključak nikako nije neočekivan, već potvrđuje početna razmišljanja vezana za raspodjelu prometnih tokova na čvoru Lučko;

- odnos PGDP-a na autocesti A1 i PGDP-a na dionici Jankomir – Lučko u svim analiziranim godinama (2008. - 2015.) zadržava gotovo identičnu vrijednost i iznosi 58,5 %, dok je odnos PGDP-a na autocesti A1 i PGDP-a na dionici Lučko – Buzin također konstantan i iznosi 72 %. Ista ujednačenost vrijedi i kod odnosa PLDP-a, a vrijednosti su 82 %, odnosno 94 %. Ovo je vrlo znakovito i implicira daljnji nastavak istih odnosa.

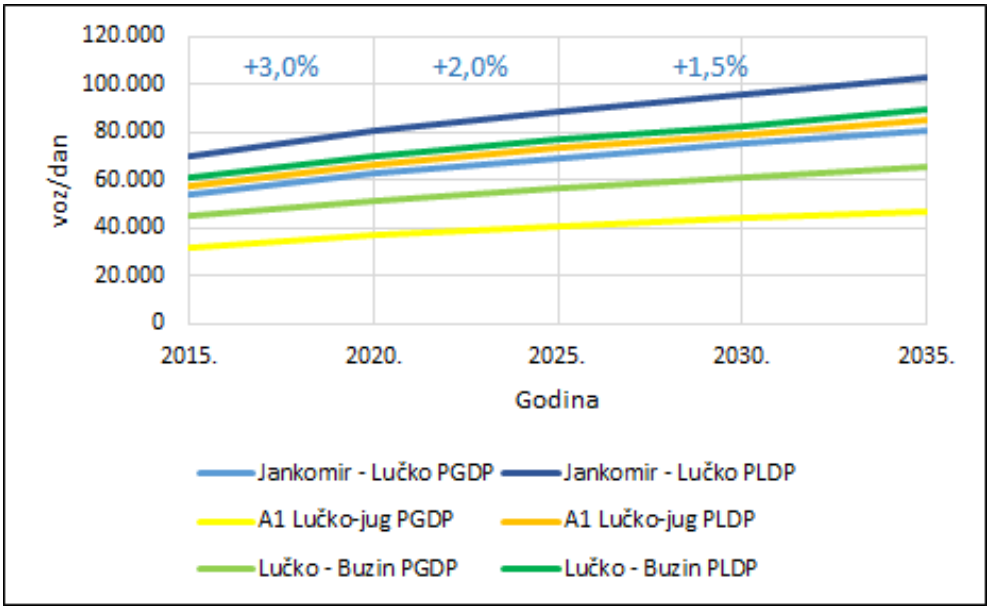
Iz navedenog, procjenjuje se porast prometne potražnje na zagrebačkoj obilaznici (dionica Jankomir – Lučko) za:

- 3,0 % godišnje u prvih 5 godina (razdoblje 2016. – 2020.)
- 2,0 % godišnje u slijedećih 5 godina (razdoblje 2021. – 2025.)
- 1,5 % godišnje u narednih 10 godina (razdoblje 2026. – 2035.).

Prometna potražnja ostala dva brojačka mjesta proračunat će se iz potražnje dionice Jankomir – Lučko preko uvjeta da zadrže isti odnos kao i u razdoblju od 2008. do 2015. godine. U *Tablici 10.* i *Grafikonu 3.* navedene su i grafički prikazane proračunate vrijednosti prognoze prometne potražnje prema postavljenim uvjetima.

Tablica 10. *Prognoza prometa za razdoblje od 2020. do 2035. godine*

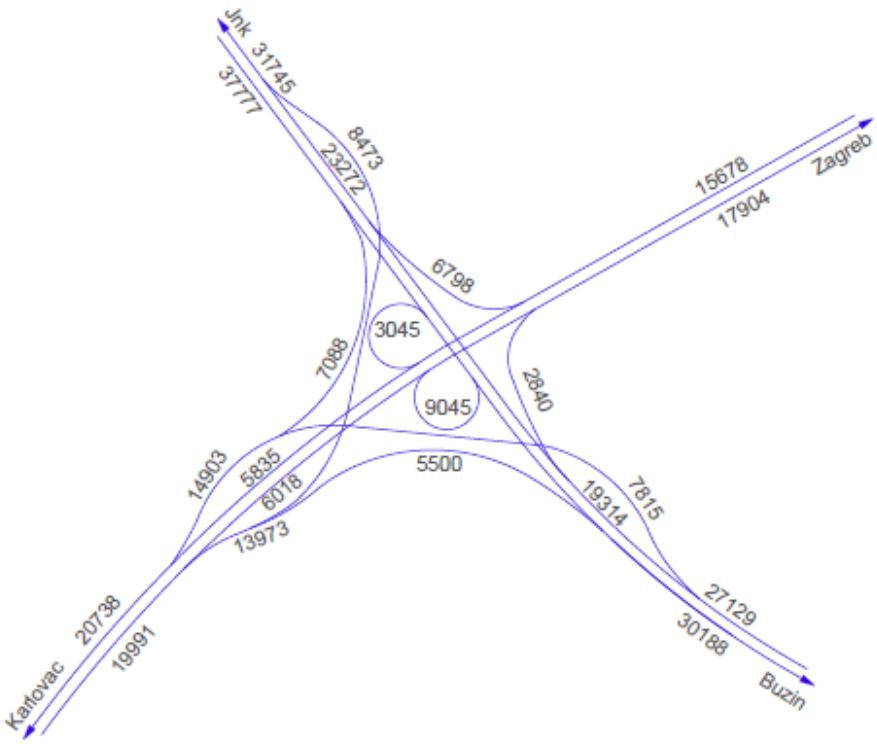
Dionica / Godina	Jankomir - Lučko		A1 Lučko-jug		Lučko - Buzin		Porast prometa u odnosu na 2015.
	PGDP	PLDP	PGDP	PLDP	PGDP	PLDP	
2015.	54.317	70.074	31.822	57.858	44.782	61.125	-
2020.	62.968	80.599	36.836	66.306	51.162	69.580	**15,9%**
2025.	69.522	88.988	40.670	73.207	56.487	76.822	**28,0%**
2030.	74.895	95.866	43.814	78.864	60.852	82.759	**37,9%**
2035.	80.683	103.275	47.200	84.959	65.555	89.155	**48,5%**



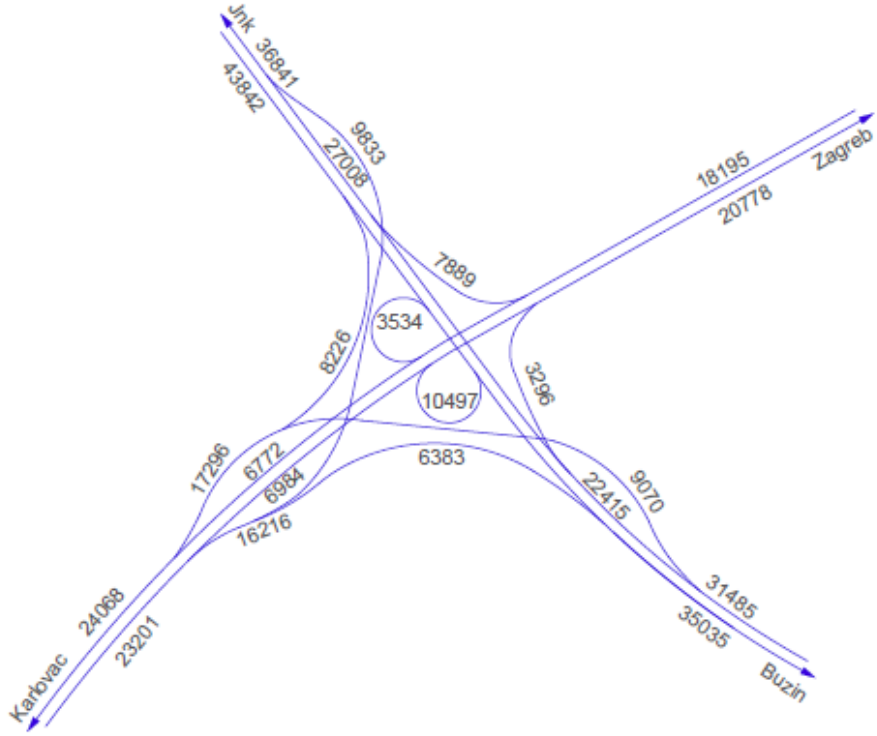
Grafikon 3. *Prikaz prognoze prometa za razdoblje od 2015. do 2035. godine*

Unatoč činjenici da se radi o relativno pesimističnoj prognozi prometa, iz *Tablice 10.* i *Grafikona 3.* može se vidjeti da je prognozirana prometna potražnja analiziranih dionica u 2020. godini veća za 15,9 %, u 2025. veća za 28,0 %, u 2030. veća za 37,9 %, a na kraju prognoziranog razdoblja, nakon 20 godina, veća za gotovo 50 % (preciznije, 48,5 %). Tako će najveći iznos PGDP-a, koji se postiže na dionici Jankomir – Lučko, biti veći od 80 000 voz/dan, dok će na istoj dionici vrijednost PLDP-a prijeći granicu od 100 000 voz/dan. Već intuitivno je jasno da te količine prometa neće moći biti kvalitetno opslužene s postojećom prometnom infrastrukturom tih dionica. U nastavku rada se stoga analizom propusne moći i razine usluge pojedinih segmenata čvora Lučko utvrđuje trenutno stanje, a na temelju dane prognoze i procjenjuje buduće.

Uz pretpostavku jednake raspodjele prometnog opterećenja po segmentima čvora Lučko kao i u 2015. godini, može se ponovo kreirati prikaz prometnog opterećenja po segmentima, sada za vrijednosti u 2025. godini (*Slika 19.*) i 2035. godini (*Slika 20.*).



Slika 19. *Prognozirano prometno opterećenje čvora Lučko u* ***2025.*** *godini (PGDP)*



Slika 20. *Prognozirano prometno opterećenje čvora Lučko u* ***2035.*** *godini (PGDP)*

3.3. Proračun propusne moći i razine usluge čvora Lučko

Prema Pravilniku [3], propusna moć autoceste predstavlja broj vozila koji može proći pojedinim kolnikom u određenoj vremenskoj jedinici. Bolje je ipak naglasiti da je to *najveći* broj vozila koji u jedinici vremena može proći kroz promatrani presjek ceste. Općenito, propusna moć ceste osnovni je pokazatelj za racionalnu i smišljenu politiku građenja, održavanja i eksploatacije cesta. Osim što izravno utječe na odabir tlocrtno-visinskih elemenata ceste i njezina poprečnog presjeka, utječe i na operativne troškove vozila primjenom odgovarajućih rješenja pristupnih cesta, uklanjanja bočnih smetnji i sl. Nadalje, propusna moć cesta vrlo je značajan planerski alat pri pronalasku odgovarajućih kriterija, s pomoću kojih bi se na osnovi programiranih količina prometa odredila optimalna vršna satna količina prometa mjerodavna za dimenzioniranje poprečnog presjeka ceste [19].

Razina usluge predstavlja kvalitativnu mjeru uvjeta vožnje u pojedinom trenutku na određenoj cesti ili prometnom traku pri različitim prometnim opterećenjima. Kao mjera, razina usluge inkorporira brzinu, vrijeme putovanja, prekide prometa, sigurnost, udobnost i pogodnost vožnje, operativne troškove i slično [19]. Razlikuje se šest osnovnih stupnjeva razine usluge, označenih od A do F. Pritom, razina usluge A podrazumijeva uvjete potpuno slobodnog toka i pune slobode manevriranja vozila, dok razinu usluge F karakteriziraju najveće gustoće prometa i izrazito nestabilan prometni tok, s većom vrijednošću prometne potražnje od prometne ponude. Ostale razine usluge gradacijski označavaju uvjete toka između granično navedenih.

Proračun propusne moći i razine usluge čvora Lučko u ovom radu odrađuje se prema HCM-u iz 2010. godine [4]. Kako je već navedeno, to je i propisano Pravilnikom [3], ali svakako treba prilikom interpretiranja dobivenih rezultata računati na moguće nepravilnosti prouzročene korištenjem metodologije razvijene u drugim uvjetima prometa. *Svi daljnji postupci proračuna ovog poglavlja definirani su, dakle, priručnikom HCM 2010.*

Prilikom proračuna propusne moći i razine usluge autocesta i čvorova na autocesti, potrebno je razlikovati tri osnovna segmenta:

1) *segment uplitanja i isplitanja* – područja gdje se dva ili više prometna toka spajaju u jedan (uplitanje), odnosno gdje se jedan prometni tok razdvaja na dva ili više prometna toka (isplitanje);
2) *segment preplitanja (razvučenog križanja)* – područje gdje segment isplitanja neposredno slijedi segment uplitanja (udaljenost vrhova isplitanja i uplitanja manja od 900 m);
3) *osnovni segmenti autoceste* – ovdje pripadaju svi dijelovi autoceste koji nisu uplitanje, isplitanje ili preplitanje.

Za svaki od navedenih segmenata razvijena je posebna metodologija proračuna propusne moći i razine usluge unutar HCM-a. Te metodologije većinski pokrivaju i sve moguće konstrukcijske varijacije koje se mogu javiti unutar svakog segmenta. U radu se u nastavku, obrnutim redoslijedom od navedenog, teorijski kratko obrađuju metodologije proračuna za svaki od segmenata, te se iste i praktično provode za izabrane segmente čvora Lučko.

3.3.1. Osnovni segmenti autoceste

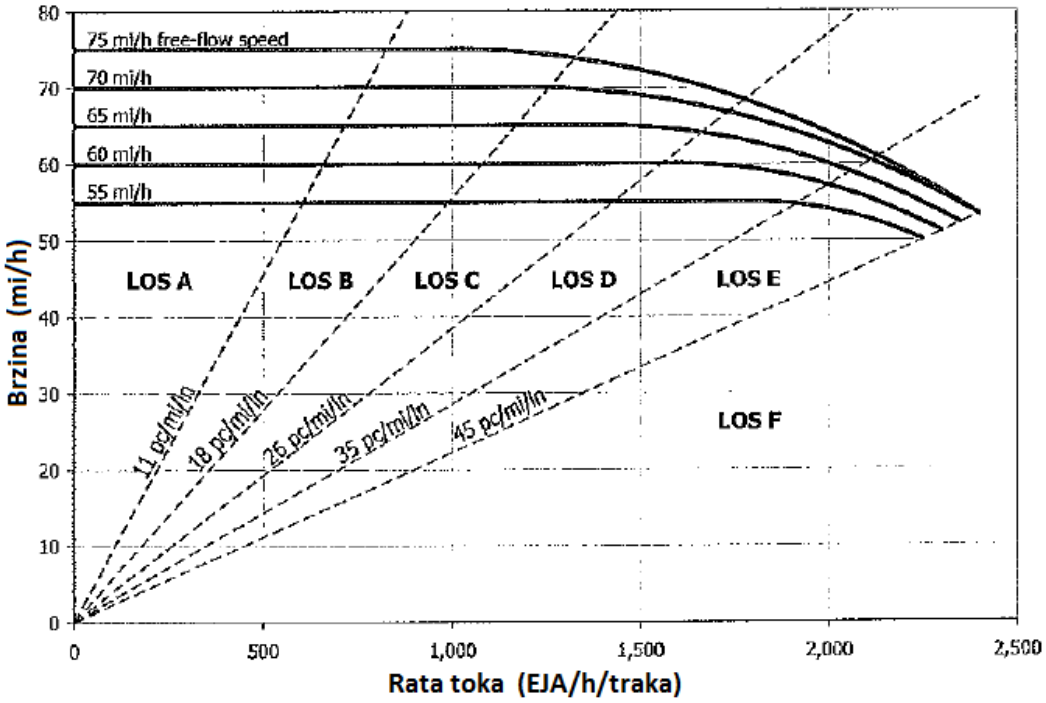
Pod pojmom osnovni segmenti autoceste podrazumijevaju se oni segmenti autoceste koji nisu pod utjecajem područja uplitanja, isplitanja i preplitanja. Općenito, to znači da su promjene prometnih traka vozača u tim segmentima isključivo rezultat njihove želje za optimiziranjem vožnje i obavljanja radnji pretjecanja. Prema definiranim uvjetima u HCM-u, utjecaj područja uplitanja na prolazni prometni tok autoceste proteže se 450 m nakon završetka ulazne rampe, utjecaj područja isplitanja počinje 450 m prije početka izlazne rampe, a utjecaj područja preplitanja uključuje duljinu od 150 m prije i poslije samog područja preplitanja. Svi ostali dijelovi autoceste se, dakle, smatraju osnovnim segmentima autoceste.

U ovom poglavlju se analizira propusna moć i razina usluge autoceste A3, odnosno zagrebačke obilaznice prije i poslije čvora Lučko, što je važno za određivanje maksimalne količine vozila koja prilazi čvoru Lučko, odnosno količine vozila koju čvor Lučko mora propustiti. Također, ovaj proračun se u radu naknadno koristi prilikom određivanja propusne moći, razine usluge i potrebnog broja prometnih traka autoceste A1 (dionice Zagreb – Karlovac) nakon naplatne postaje Lučko.

Osnovni uvjeti prometa pri kojima može biti ostvarena maksimalna propusna moć osnovnih segmenata autoceste podrazumijevaju dobro vrijeme, dobru vidljivost, nepostojanje prometnih incidenata, nesreća ili radova na prometnici te dobro stanje prometne površine (kolnika). Dodatno, osnovni uvjeti također uključuju da je prometni tok sastavljen samo od osobnih vozila (nema teških teretnih vozila i autobusa), da je vozačka populacija sastavljena od redovitih korisnika prometnice, te da je minimalna širina prometnih trakova 3,6 m, a udaljenost bočnih smetnji veća od 1,8 m.

Za opisane osnovne uvjete prometnog toka definirane su maksimalne propusne moći (kapaciteti) prometnih traka na autocesti u ovisnosti o brzini slobodnog prometnog toka (engl. *Free Flow Speed* – FFS) koja prevladava na analiziranom dijelu autoceste (*Grafikon 4.*). Brzine su u rasponu od 55 mi/h do 75 mi/h, odnosno kako slijedi:

- 55 mi/h $\approx$ 88 km/h
- 60 mi/h $\approx$ 96 km/h
- 65 mi/h $\approx$ 104 km/h
- 70 mi/h $\approx$ 112 km/h
- 75 mi/h $\approx$ 120 km/h.



Grafikon 4. *Propusna moć i razina usluge autoceste pri osnovnim uvjetima prometa s obzirom na brzinu slobodnog toka (krivulja brzina – protok),* [4]

Iz *Grafikona 4.* vidljivo je da se maksimalna propusna moć od 2 400 EJA/h/traku postiže za brzine slobodnog toka od 112 km/h i 120 km/h. Također, vidljivo je da se krivulje po pojedinim brzinama sastoje od dva segmenta: prvog segmenta konstantne brzine do određene količine protoka, što znači da je brzina prometnog toka u tom dijelu jednaka brzini slobodnog toka, te drugog segmenta padajuće krivulje brzine prometnog toka za veće količine protoka. Tako na primjer za brzinu slobodnog toka od 88 km/h (55 mi/h) se postiže protok od čak 1 800 EJA/h/traku, što odgovara gotovo razini usluge E, bez smanjenja brzine. Maksimalne propusne moći (kapacitet, C) autocesta s manjim brzinama slobodnog toka su:

- C = 2 350 EJA/h/traku za FFS = 104 km/h
- C = 2 300 EJA/h/traku za FFS = 96 km/h
- C = 2 250 EJA/h/traku za FFS = 88 km/h.

Navedene vrijednosti kapaciteta prometnih traka se realno ne ostvaruju jer prevladavajući uvjeti na autocestama u pravilu ne odgovaraju ranije definiranim osnovnim uvjetima prometa. Odnosno, što više uvjeti prometa odstupaju od idealnih, to je manji kapacitet autoceste. I u ovom radu, prilikom proračuna propusne moći i razine usluge pojedinih segmenata autoceste, uzeti su u obzir realniji uvjeti prometa, osobito u dijelu strukture prometnog toka (udio teških teretnih vozila) i nehomogenosti vozačke populacije (što je posebno istaknuto u sezonskom turističkom prometu).

U *Grafikonu 4.* jasno su prikazane i razine usluge za pojedine vrijednosti protoka po pojedinim brzinama slobodnog toka. Razina usluge osnovnih segmenata autoceste općenito može biti određena na temelju jednog od tri parametra: *gustoća prometa*, *srednja (prostorna) brzina* i *stupanj zasićenja*. Ipak, najpogodniji parametar ovdje je gustoća prometa, te su u

Tablici 11. navedene granične vrijednosti gustoće prometa za pojedinu razinu usluge. Iz te tablice vidljivo je da se maksimalna propusna moć, koja se ostvaruje pri razini usluge E, postiže za gustoću prometa od 28 voz/km, što znači da je prosječni razmak između vozila (razmak slijeđenja) tada najmanje 35,7 m. Za razinu usluge A razmak slijeđenja je veći ili jednak od 147 m.

Tablica 11. *Određivanje razine usluge na temelju gustoće prometa,* [4]

Razina usluge	Gustoća prometa		Razmak slijeđenja
	[EJA/mi/traka]	*[EJA/km/traka]*	*[m/voz]*
A	≤ 11	≤ 6,8	≥ 147,1
B	> 11 - 18	> 6,8 - 11,2	≥ 89,3
C	> 18 - 26	> 11,2 - 16,2	≥ 61,7
D	> 26 - 35	> 16,2 - 21,7	≥ 46,1
E	> 35 - 45	> 21,7 - 28	≥ 35,7
F	> 45	> 28	< 35,7

Prije samog proračuna, potrebno je još definirati potrebne ulazne podatke, te samu metodologiju proračuna. Ulazni podaci vezani su za geometrijske značajke autoceste te za značajke prometne potražnje dijela autoceste koji se analizira. U ovom dijelu potrebni ulazni podaci samo su navedeni, a kasnije prilikom proračuna su i detaljnije objašnjeni.

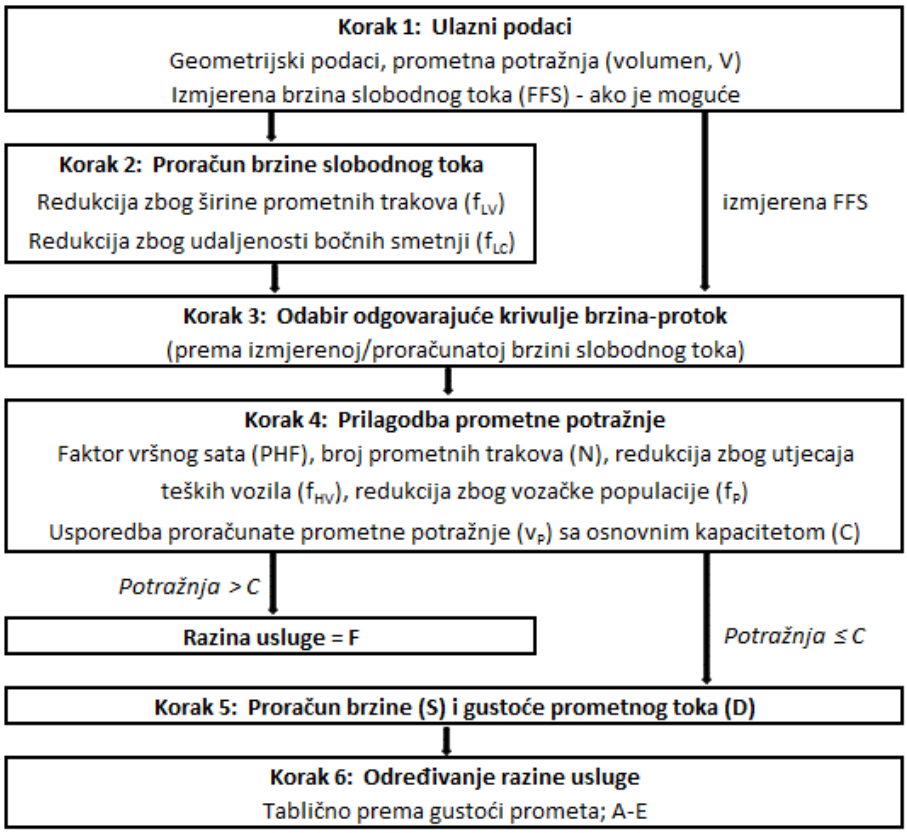
Potrebni geometrijski podaci:

- brzina slobodnog toka (engl. *Free Flow Speed* - FFS)
- broj prometnih traka u jednom smjeru (N)
- širina prometnih traka (engl. *Lane Width* - LW)
- udaljenost bočnih smetnji (engl. *Lateral Clearance* - LC)
- gustoća ulaznih/izlaznih rampi na analiziranoj dionici (engl. *Total Ramp Density* – TRD)
- značajke terena (ravničarski, brdoviti, planinski).

Potrebni podaci prometne potražnje:

- prometna potražnja tijekom analiziranog sata ili PGDP (PLDP), te K i D faktori
- udio teških teretnih vozila u ukupnom prometnom toku (P_T, P_R)
- faktor vršnog sata (engl. *Peak-Hour Factor* – PHF)
- faktor vozačke populacije (f_p).

Metodologija proračuna razine usluge s obzirom na osnovni kapacitet prikazana je na *Slici 21*. Istu metodologiju moguće je primijeniti i za određivanje broja prometnih traka potrebnih za postizanje željene razine usluge pri zadanoj prometnoj potražnji.



Slika 21. *Metodologija proračuna razine usluge za osnovne segmente autoceste*

Izvor: [4]

Iznesena metodologija proračuna u ovom radu primijenjuje se za određivanje propusne moći i razine usluge autoceste A3 (zagrebačke obilaznice) na dionici Jankomir – Lučko. Za ostale dionice koje pripadaju osnovnim segmentima autoceste samo su tablično u nastavku prikazani konačni rezultati. Zadatak je, dakle, odrediti propusnu moć i razinu usluge četverotračne autoceste tijekom najopterećenijih 15 minuta unutar vršnog sata.

Korak 1 – Ulazni podaci:

- *Brzina slobodnog toka:* nije terenski mjerena te je potrebno izvršiti procjenu proračunom u koraku 2;
- *Broj prometnih traka:* N = 2 prometna traka u svakom smjeru;
- *Širina prometnih trakova:* LW = 3,75 m;
- *Udaljenost bočnih smetnji:* LC > 1,8 m;
- *Gustoća ulaznih/izlaznih rampi (TRD):* 2 raskrižja izvan razine oblika modificiranih djetelina te jedno odmorište na ukupnoj duljini od 9,6 km;
- *Značajke terena:* ravničarski teren (prema definiciji podrazumijeva eventualne kraće dionice uzdužnog nagiba do 2 %);
- *Prometna potražnja:* nisu poznati podaci vršnog satnog opterećenja, PGDP = 54 317 voz/dan (2015.); K = 0,10, D = 0,55;

- *Udio teških teretnih vozila:* nisu poznati podaci, procjena P_T = 8 % zbog određenog tranzitnog prometa, a za udio kamp-vozila uzima se P_R = 0 %;
- *Faktor vršnog sata:* nisu poznati podaci; prema preporukama, vrijednosti faktora vršnog sata na autocestama kreću se u rasponu 0,85 – 0,98, pri čemu niže vrijednosti odgovaraju autocestama sa nižim prometnim opterećenjem. Stoga se uzima: PHF = 0,95;
- *Vozačka populacija:* kako zagrebačka obilaznica sve više sudjeluje u opsluživanju gradskog prometa, većinu vozača čine stalni korisnici. Ipak, postoji određena količina tranzitnog prometa, pa se za vrijednost faktora vozačke populacije, koji može biti u granicama 0,85 – 1,00, uzima: f_p = 0,98.

Budući da je prometna potražnja, odnosno prometno opterećenje, dano kao prosječni godišnji dnevni promet (PGDP), potrebno je isti konvertirati u vršni satni promet jednog smjera pomoću izraza:

$$\boldsymbol{V = PGDP \cdot K \cdot D} \quad [\boldsymbol{voz/h}] \tag{2}$$

gdje je:

V – prometna potražnja (opterećenje) „jačeg“ smjera u vršnom satu (voz/h)
K – udio mjerodavnog vršnog sata u ukupnom PGDP-u
D – udio prometa vršnim smjerom unutar vršnog sata.

Na urbanim autocestama tipične vrijednosti faktora K kreću se u rasponu od 0,08 do 0,10, dok su na ruralnim autocestama vrijednosti od 0,09 do 0,13. Prosječne vrijednosti faktora K ovise i o vrijednosti PGDP-a, pa se tako u HCM-u navode vrijednosti od K = 0,107 za PGDP u rasponu od 20 000 do 50 000 voz/dan, te K = 0,091 za PGDP u rasponu 50 000 do 100 000 voz/dan. Zbog toga se u ovom proračunu za vrijednost K faktora uzima K = 0,10. Za faktor D se najčešće, i u urbanim i u ruralnim područjima, uzima vrijednost 0,55, pa sa tako odabranim parametrima vrijednost prometnog opterećenja (prometne potražnje) „jačeg“ smjera u vršnom satu iznosi:

$$V = 54\,317 \cdot 0{,}10 \cdot 0{,}55 = 2\,987\ voz/h$$

Korak 2 – Proračun brzine slobodnog toka

Brzina slobodnog toka općenito je u rasponu od 88 do 120 km/h (55 – 75 mi/h). Najpreciznije je ako je moguće direktno ju izmjeriti na analiziranoj dionici autoceste, pazeći pritom da se mjerenje odvija pri protoku manjem od 1 000 voz/h, u uzorku od najmanje 100 vozila. Ako to nije moguće, brzina slobodnog toka procjenjuje se koristeći izraz:

$$\boldsymbol{FFS = 75{,}4 - f_{LV} - f_{LC} - 3{,}22 \cdot TRD^{0{,}84}} \quad [\boldsymbol{mi/h}] \tag{3}$$

gdje je:

FFS – brzina slobodnog toka (mi/h)
f_{LV} – redukcija zbog širine prometnih traka (mi/h)

f_{LC} – redukcija zbog bočnih smetnji (mi/h)
TRD (engl. *Total Ramp Density*) – gustoća ulaznih/izlaznih rampi (rampi/mi).

Širina prometnih traka i udaljenost bočnih smetnji psihološki djeluju na vozača prilikom odabira ugodne brzine vožnje u slučaju slobodnog prometnog toka. Stoga se prilikom proračuna brzine slobodnog toka koristi redukcija s obzirom na ta dva parametra kako je to prikazano u *Tablici 12.* i *Tablici 13.*

Tablica 12. *Redukcija brzine slobodnog toka zbog širine prometnih traka,* [4]

Širina prometnog traka		Redukcija brzine slobodnog toka
[ft]	*[m]*	f_{LV} *[mi/h]*
≥ 12	≥ 3,6	0,0
≥ 11 - 12	≥ 3,3 - 3,6	1,9
≥ 10 - 11	≥ 3,0 - 3,3	6,6

Tablica 13. *Redukcija brzine slobodnog toka zbog utjecaja bočnih smetnji,* [4]

Udaljenost bočne smetnje		Redukcija brzine slobodnog toka (f_{LC})			
		Broj trakova u jednom smjeru autoceste			
[ft]	*[m]*	*2*	*3*	*4*	*≥ 5*
≥ 6	≥ 1,8	0,0	0,0	0,0	0,0
5	1,5	0,6	0,4	0,2	0,1
4	1,2	1,2	0,8	0,4	0,2
3	0,9	1,8	1,2	0,6	0,3
2	0,6	2,4	1,6	0,8	0,4
1	0,3	3,0	2,0	1,0	0,5
0	0,0	3,6	2,4	1,2	0,6

Prema danim tablicama i postavljenim geometrijskim značajkama analizirane dionice autoceste, proizlazi da je $f_{LV} = f_{LC} = 0{,}0$.

Gustoća ulaznih/izlaznih rampi definirana je kao broj rampi u jednom smjeru na dionici dugačkoj otprilike 4,8 km (3 mi) na obje strane od mjesta gdje se analizira propusna moć i razina usluge, podijeljen sa tom udaljenosti (9,6 km). To je zapravo mjera utjecaja prometnih radnji uplitanja i isplitanja šireg poteza analizirane autoceste na proračun brzine slobodnog prometnog toka. Ovaj parametar ima najveći utjecaj na veličinu brzine slobodnog toka.

Zbog izraza (3) za brzinu slobodnog toka, koji uključuje potenciranje vrijednosti gustoće ulaznih/izlaznih rampi konstantnom vrijednosti 0,84, ovaj koeficijent, kao i brzina slobodnog toka, u ovom radu prvotno se izračunavaju u angloameričkim mjernim jedinicama, te potom preračunavaju u mjerne jedinice SI sustava.

$$\boldsymbol{TRD = \frac{broj\ ulaznih\ i\ izlaznih\ rampi\ na\ duljini\ 6\ milja}{6\ milja}} \quad [\boldsymbol{rampi/mi}] \qquad (4)$$

Budući da se na navedenom potezu od šest milja (9,6 km) nalaze dva raskrižja izvan razine oblika modificiranih djetelina (čvor Jankomir i čvor Lučko), te jedno odmorište („Odmorište Plitvice“) koje također utječe na brzinu slobodnog toka, ukupni broj ulaznih/izlaznih rampi sa autoceste u jednom smjeru je 10. Stoga je:

$$TRD = \frac{10}{6} = 1{,}67 \;\; rampi/mi$$

Brzina slobodnog prometnog toka sada je:

$$FFS = 75{,}4 - 0{,}0 - 0{,}0 - 3{,}22 \cdot 1{,}67^{0{,}84} = 70{,}4 \approx 70 \; mi/h$$

$$FFS = 112 \; km/h$$

Korak 3 – Odabir odgovarajuće krivulje brzina-protok

Kako je proračunata brzina od 70,4 mi/h u intervalu 67,5 – 72,5 mi/h, uzima se za daljnju analizu krivulja brzina-protok od 70 mi/h (*Grafikon 4.)*. Ovime je određena maksimalna propusna moć (kapacitet) analizirane dionice Jankomir – Lučko, koja iznosi:

$$\boldsymbol{C_{Jnk-Lučko} = 2\,400} \;\; \textbf{\textit{EJA/h/traka}}$$

Naravno, taj kapacitet vrijedi samo za ranije definirane osnovne uvjete (dobro vrijeme, dobra vidljivost i dr.). Potrebno je još naglasiti da se prema HCM-u ne predviđaju nikakvi redukcijski faktori za kapacitet u slučaju većeg broja prometnih traka. Stoga je kapacitet jednog smjera dionice Jankomir – Lučko jednak C = 4 800 voz/h/smjeru.

Korak 4 – Prilagodba prometne potražnje

U ovom koraku vrijednost prometne potražnje (volumen, V) izražena u broju vozila po smjeru mora biti konvertirana u vrijednost prometne potražnje izraženu u ekvivalentnim jedinicama osobnih vozila (EJA) po jednoj prometnoj traci u vršnih 15 minuta (rata toka, v_p). U tu svrhu koristi se izraz:

$$\boldsymbol{v_p = \frac{V}{PHF \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_p}} \quad \textbf{\textit{[EJA/h/traka]}} \qquad (5)$$

gdje je:

PHF – faktor vršnog sata, odabrano PHF = 0,95
N – broj prometnih trakova u jednom smjeru, N = 2
f_{HV} – faktor utjecaja teških vozila
f_p – faktor vozačke populacije, odabrano f_p = 0,98.

Većina elemenata je definirana u *koraku 1*, a potrebno je jedino proračunati faktor utjecaja teških vozila, s obzirom na procijenjeni udio teških vozila od 8 %, prema izrazu:

$$f_{HV} = \frac{1}{1+P_T \cdot (E_T - 1) + P_R \cdot (E_R - 1)} \quad (6)$$

gdje je:

P_T – udio teških vozila (kamiona i autobusa) u prometnom toku
E_T – faktor pretvorbe teških vozila u ekvivalentne jedinice osobnih vozila
P_R – udio rekreacijskih vozila (kamp-vozila) u prometnom toku
E_R – faktor pretvorbe kamp-vozila u ekvivalentne jedinice osobnih vozila.

Faktori pretvorbe E_T i E_R ovise o značajkama terena na kojem se nalazi autocesta (ravničarski, brdoviti ili planinski), a njihove vrijednosti navedene su u *Tablici 14*.

Tablica 14. *Faktori pretvorbe teških vozila u ekvivalentne jedinice osobnih vozila,* [4]

Vrsta vozila	Faktor	Faktori pretvorbe prema vrsti terena		
		Ravničarski	*Brdoviti*	*Planinski*
Kamioni i autobusi	E_T	1,5	2,5	4,5
Kamp-vozila	E_R	1,2	2,0	4,0

Faktor utjecaja teških vozila sada je:

$$f_{HV} = \frac{1}{1+0{,}08 \cdot (1{,}5-1) + 0 \cdot (1{,}2-1)} = 0{,}9615\,,$$

a prometno opterećenje jedne prometne trake u vršnih 15 minuta:

$$v_p = \frac{2\,987}{0{,}95 \cdot 2 \cdot 0{,}9615 \cdot 0{,}98} = 1\,668 \quad \textit{EJA/h/traka}$$

Prema definiranoj metodologiji (*Slika 21.*), dobivena vrijednost uspoređuje se sa osnovnim kapacitetom koji proizlazi iz odabrane krivulje brzina-protok. Kako je za brzinu slobodnog toka od 70 mi/h određen osnovni kapacitet od 2 400 EJA/h/traka, može se zaključiti kako proračunato prometno opterećenje ne uzrokuje razinu usluge F (jer nije $v_p > C$), pa se proračun nastavlja završnim koracima 5 i 6.

Korak 5 – Proračun brzine i gustoće prometnog toka

Brzina prometnog toka može se odrediti na dva načina:

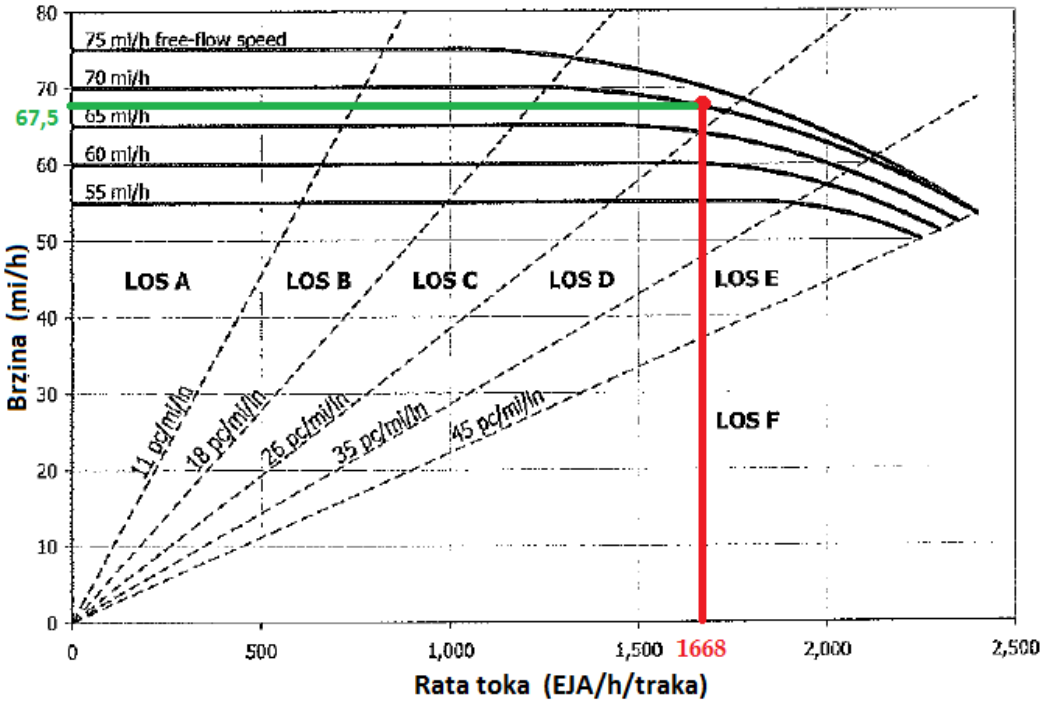
1) očitavanjem iz grafikona brzina-protok (*Grafikon 4.*), što se najčešće i radi ukoliko proračunati protok (v_p) u *koraku 4* ima vrijednost za koju je brzina prometnog toka jednaka brzini slobodnog toka (odnosno nalazi se u prvom segmentu gdje krivulja brzine ima još oblik pravca), ili
2) proračunom preko definiranih izraza u HCM-u.

U ovom slučaju, očitavanje brzine prometnog toka (S) iz *Grafikona 4.* nije sasvim precizno budući da je proračunati protok (rata toka, v_p) u padajućem dijelu krivulje brzina-gustoća. Ipak, greške u očitavanju ne mogu biti presudne pa *Grafikon 5.* prikazuje prvi način određivanja brzine prometnog toka, a drugi način vrši se proračunom preko izraza:

$$\boldsymbol{S = 70 - 0,00001160 \cdot \left(v_p - 1200\right)^2 \quad [mi/h]} \tag{7}$$

$$S = 70 - 0{,}00001160 \cdot (1668 - 1200)^2 = 67{,}5 \ \ mi/h$$

$$S = 108{,}6 \ \ km/h$$



Grafikon 5. *Očitavanje brzine prometnog toka i razine usluge na temelju proračunate rate toka*, [4]

Gustoća prometnog toka, potrebna za računsko određivanje razine usluge, proračunava se prema izrazu:

$$\boldsymbol{D = \frac{v_p}{S} \quad [EJA/km/traka]} \tag{8}$$

gdje je:

D – gustoća prometnog toka (EJA/km/traka)
v_p – prometna potražnja (rata toka) (EJA/h/traka)
S – srednja brzina prometnog toka (km/h).

$$D = \frac{1668}{108{,}6} = 15{,}4 \quad EJA/km/traka$$

Korak 6 – Određivanje razine usluge

Kako je ranije navedeno, glavni parametar za određivanje razine usluge je gustoća prometnog toka. Prema proračunatoj gustoći (D = 15,4 EJA/km/traka), iz tablice (*Tablica 11.*) očitava se razina usluge analiziranog dijela autoceste:

$$Razina\ usluge\ dionice\ Jankomir - Lučko = \boldsymbol{C}$$

Isto se moglo odrediti i iz *Grafikona 5.*, gdje su linijski odijeljeni segmenti pojedine razine usluge. Iz toga se vidi i da je proračunata razina usluge C gotovo na svojoj gornjoj granici, pa s obzirom na više procijenjenih ulaznih veličina ovaj rezultat treba uzimati s malom rezervom. Osobitu osjetljivost proračun pokazuje za promjene udjela mjerodavnog vršnog sata u ukupnom PGDP-u (K-faktor) i udjela prometa vršnim smjerom unutar vršnog sata (D-faktor). Tako primjerice malo povećanje D-faktora (sa uzetih 0,55 na 0,58) donosi povećanje gustoće prometa na 16,5 EJA/km/traci, što pripada razini usluge D.

Unutar ovog dijela, istim proračunom izračunata je i razina usluge iste dionice autoceste, ali za prometno opterećenje u ljetnim mjesecima, koristeći za tu dionicu poznati prosječni ljetni dnevni promet (PLDP). Neki ulazni podaci pritom su izmijenjeni u odnosnu na prethodni proračun:

- *prometna potražnja:* PLDP = 70 074 voz/dan (2015.), K = 0,10, D = 0,60. Faktor D ovdje je povećan sa 0,55 na 0,60 zbog izrazitije usmjerenih opterećenja tijekom sezonskih mjeseci nego tijekom ostalih mjeseci. Primjer za to je izmjena turističkih gostiju tijekom vikenda, kada su posebno izraženi vremenski periodi vršnog opterećenja prema čvoru Lučko (petak poslijepodne, subota ujutro) od onih prema čvoru Jankomir (subota i nedjelja poslijepodne);
- *udio teških teretnih vozila:* P_T = 6 %; udio kamp-vozila P_R = 1 %. Zbog izrazitog povećanja broja osobnih vozila, udio teretnih vozila mora pasti, iako u ukupnom iznosu ostaje nepromijenjen. Također, dodana su i kamp-vozila u udjelu od 1 %;
- *faktor vozačke populacije:* f_p = 0,92. Faktor vozačke populacije ovisi o odnosu stalnih korisnika prometnice od onih novih. Kako su u ljetnim mjesecima inozemna vozila (i vozila iz drugih dijelova RH) prevladavajuća na analiziranom dijelu autoceste, faktor vozačke populacije je procijenjen na 0,92.

Uz navedene promjene dijela ulaznih podataka, koje su bile potrebne kako bi se preciznije opisala prometna potražnja u ljetnim mjesecima, i korištenje iste metodologije proračuna kao i ranije, dobiva se prometno opterećenje jedne prometne trake u vršnih 15 minuta od v_p = 2 482 EJA/h/traci, što je veće od definiranog osnovnog kapaciteta od 2 400 EJA/h/traci. Pri takvim uvjetima, na analiziranoj dionici autoceste u vršnom prometnom opterećenju (PLDP) dolazi do zagušenja prometa (stupanj zasićenja je veći od 1), te je razina usluge F.

Istom metodologijom proračunate su propusne moći i razine usluge dionica Lučko – Buzin i NP Lučko – Donja Zdenčina (autocesta A1). Svi rezultati prikazani su u *Tablici 15*.

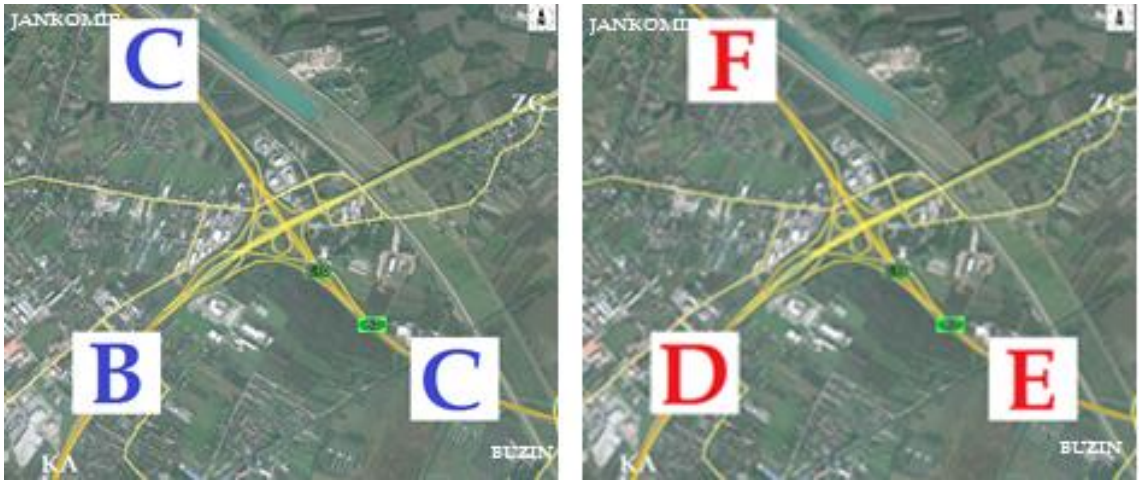
Tablica 15. *Razine usluge za osnovne segmente autoceste prema prometnom opterećenju (PGDP i PLDP) za 2015. godinu*

Naziv parametra	Oznaka	Mjerna jedinica	A3 Jankomir - Lučko		A3 Lučko - Buzin		A1 Lučko - D.Zdenčina	
			PGDP	PLDP	PGDP	PLDP	PGDP	PLDP
Prometno opterećenje	PGDP/PLDP	*voz/dan*	54.317	70.074	44.782	61.125	31.822	57.858
K faktor	K	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
D faktor	D	-	0,55	0,60	0,55	0,60	0,55	0,60
Broj prometnih traka	N	*kom*	2	2	2	2	2	2
Širina prometnih traka	LW	*m*	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Udaljenost bočnih smetnji	LC	*m*	> 1,8	> 1,8	> 1,8	> 1,8	> 1,8	> 1,8
Gustoća rampi	TRD	*rampi/mi*	1,67	1,67	1,67	1,67	1,00	1,00
Značajke terena	-	-	ravničarski					
Udio teških vozila	P_T	*%*	8%	6%	8%	6%	11%	7%
Udio kamp-vozila	P_R	*%*	0%	1%	0%	1%	0%	1%
Faktor vršnog sata	PHF	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Faktor vozačke populacije	f_p	-	0,98	0,92	0,98	0,92	0,99	0,95
Brzina slobodnog toka	FFS	*km/h*	112	112	112	112	112	112
Kapacitet prometnice	C	*EJA/h/traka*	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400
Rata toka	v_p	*EJA/h/traka*	1668	2.482	1.376	2.166	981	1.994
Srednja brzina	S	*km/h*	108,6	-	112,0	95,2	111,8	100,9
Gustoća prometa	D	*voz/km/traka*	15,4	-	12,3	22,8	8,8	19,8
Razina usluge	RU	*A - F*	C	F	C	E	B	D

Prema rezultatima prikazanih u *Tablici 15.* može se zaključiti kako je razina usluge za cjelogodišnje prometno opterećenje (PGDP) na zadovoljavajućoj razini. Ipak, zbog iznimnog povećanja prometne potražnje na analiziranim dionicama tijekom ljetnih mjeseci (PLDP), u vršnim prometnim opterećenjima dolazi do zagušenja na dionici Jankomir – Lučko (razina usluge F), dok je na dionici Lučko – Buzin prometni tok na razini kapaciteta (razina usluge E).

Na autocesti A1, odnosno na analiziranoj dionici od naplatne postaje Lučko do Donje Zdenčine, razina usluge u vršnim opterećenjima ljetnih mjeseci je D, što je trenutačno zadovoljavajuće, ali može uslijed planiranog povećanja prometne potražnje kroz nekoliko godina uzrokovati probleme u prometu tijekom srpnja i kolovoza. Međutim, ovdje je potrebno naglasiti da se i pri ovoj razini usluge na dionici povremeno događaju zastoji u prometu. Uzrok tome je veliki utjecaj prometa koji na autocestu ulazi na čvoru Donja Zdenčina, kao i na ostalim čvorovima autoceste A1 prema Karlovcu. Dodatno, kratkoročne uvjete nestabilnog prometnog toka i šok valove pri takvoj razini usluge mogu uzrokovati čak i odmorišta uz autocestu, zbog utjecaja radnji vozila koja se izdvajaju iz prometnog toka prije odmorišta, odnosno vozila koja se spajaju na glavni prometni tok pri izlasku iz odmorišta.

Ovdje još treba naglasiti da količina vozila koja ulaze na autocestu A1 ovisi o propusnoj moći naplatne postaje Lučko, ali taj dio se detaljnije obrađuje u nastavku rada. Radi boljeg razumijevanja, proračunate razine usluge navedene u *Tablici 15.* prikazane su i na *Slici 22.*



Slika 22. *Prikaz razine usluge prema PGDP-u (lijevo) i PLDP-u (desno) za 2015. godinu*
Izvor kartografske podloge: Google Earth

Istom metodologijom, ali obrnutom postavljenim zadatkom, ovdje se još prikazuju rezultati proračuna potrebnog broja prometnih traka po smjeru na autocesti A1 (Zagreb – Karlovac) za željenu razinu usluge, prema prognoziranom prometnom opterećenju za 2035. godinu (PGDP i PLDP). Ovo je zanimljiv način pristupa koji omogućava donošenje odluke o potrebnoj rekonstrukciji (nadogradnji) dionice autoceste. Ovdje je proračun napravljen samo za prometno opterećenje zadnje prognozirane godine (2035.), međutim isto je naravno moguće učiniti i za ostala razdoblja, što bi dodatno omogućilo vremensko planiranje rekonstrukcije. Rezultati tog proračuna, koji u radu nije iterativno prikazan, dani su u *Tablici 16.*

Tablica 16. *Potrebni broj prometnih traka za željenu razinu usluge na dionici Zagreb-Karlovac prema prometnom opterećenju (PGDP i PLDP) u 2035. godini*

Postavljeni prometni uvjeti	PHF	0,95	PHF	0,95
	P_T	11%	P_T	7%
	P_R	0%	P_R	1%
	f_p	0,99	f_p	0,95
	K	0,1	K	0,1
	D	0,55	D	0,6
	PGDP (2035.):	**47.200**	**PLDP (2035.):**	**84.959**
Razina usluge	Potrebni broj traka (N)		Potrebni broj traka (N)	
	Proračunato	Stvarno	*Proračunato*	Stvarno
A	*3,80*	4	*7,65*	8
B	*2,31*	3	*4,64*	5
C	*1,67*	2	*3,35*	4
D	*1,39*	2	*2,80*	3
E	*1,22*	2	*2,45*	3

U tablici se navode i prometni uvjeti za koje je proračun odrađen, posebno za PGDP i posebno za PLDP, a oni se ne razlikuju od onih korištenih u prethodnim proračunima ovoga poglavlja. Udio teških vozila u PGDP-u od 11 % jedini je podatak koji nije procijenjena veličina, već je isti preuzet iz [20]. Također treba napomenuti da je u tablici svjesno ostavljen i decimalni prikaz potrebnog broja prometnih traka (izravni rezultat proračuna), kako bi se iz istog moglo uvidjeti koliko je blizu (ili daleko) granica promjene potrebnog broja prometnih traka za željenu razinu usluge.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da, uslijed velike razlike u prometnom opterećenju sezonskog prometa u odnosu na ostali dio godine, broj potrebnih prometnih traka značajno varira. Tako je primjerice za ostvarenje razine usluge C u 2035. godini, u sezoni potrebno četiri prometne trake, dok su u ostalom dijelu godine potrebne samo dvije. Prema [1], pri planiranju razine usluge kod rekonstrukcije potrebno je na kraju planiranog vremena eksploatacije u vršnim vremenskim razdobljima ostvariti razinu uslužnosti D/E ili bolju. Gledajući dakle razinu usluge D, kroz godinu su dvije prometne trake i više nego dovoljne (1,39), dok su u ljetnim mjesecima tri prometne trake gotovo na gornjoj granici dostatnosti (2,80). Za donošenje konačne odluke o potrebi eventualne rekonstrukcije (nadogradnje), i vremenu njezine izvedbe, treba ipak u obzir uzeti i utjecajni čimbenik naplatne postaje Lučko.

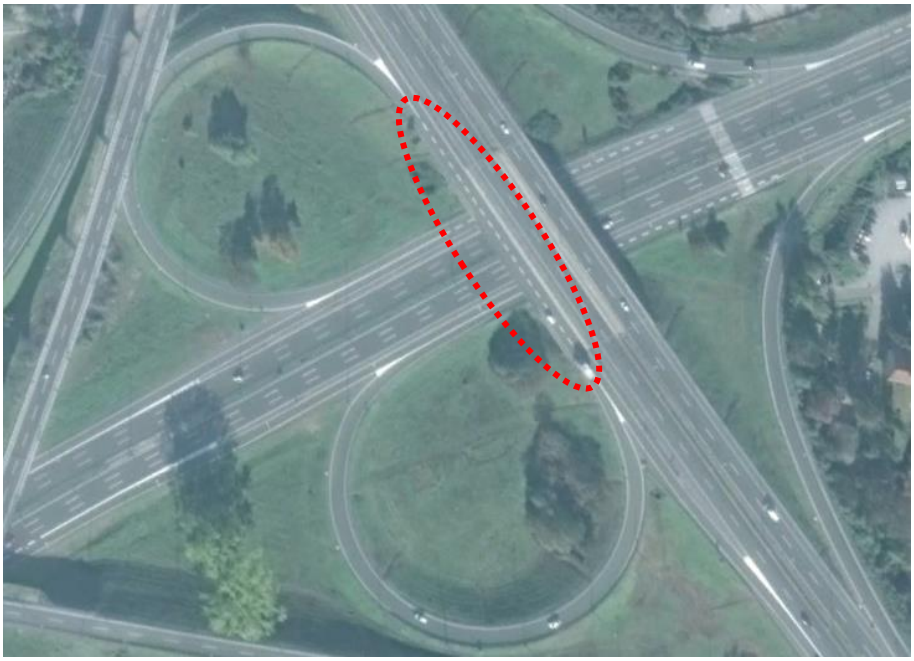
3.3.2. Segment preplitanja

Preplitanje je razvučeno križanje neprekinutih tokova s dva ili više prometnih traka na dovoljno dugoj dionici jednosmjerne vožnje [1]. Preplitanje se formira kada nakon uplitanja slijedi segment isplitanja, i to na udaljenosti kraćoj od one na kojoj bi ta dva segmenta mogla funkcionirati nezavisno.

Osnovu segmenta preplitanja čini radnja promjene prometne trake, ili više njih. Tri geometrijske značajke utječu na radnju preplitanja:

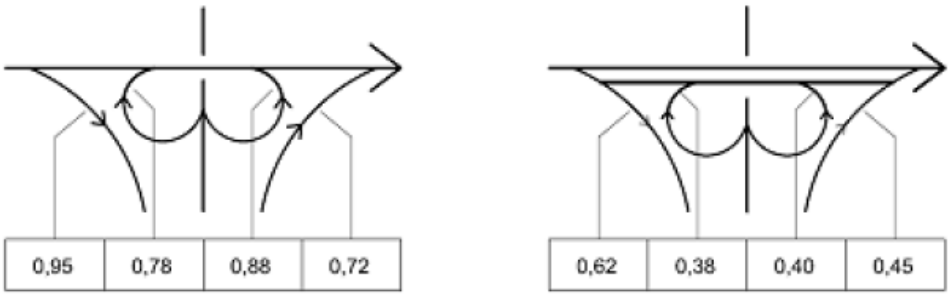
- *duljina preplitanja* – općenito je to udaljenost između segmenta uplitanja i segmenta isplitanja. Ima izniman utjecaj na intenzitet promjene prometnih traka;
- *širina preplitanja* – odnosi se na broj prometnih traka unutar zone preplitanja;
- *konfiguracija preplitanja* – određena je geometrijskom izvedbom ulaznih i izlaznih traka u zoni preplitanja. Konfiguracijom je određeno koliko prometnih traka je potrebno promjeniti kako bi se uspješno izvela radnja preplitanja.

S obzirom na navedene značajke razlikuje se više vrsta preplitanja, no one se ovdje neće posebno opisivati i analizirati. Razlog tomu je činjenica što čvor Lučko, iako ima 3 segmenata preplitanja u svojoj izvedbi (dva su na izdvojenom dijelu koji se u ovom radu ne obrađuje), nema značajnijih prometnih tokova u tim područjima, pa detaljno ispitivanje tih segmenata ne bi doprinijelo kvaliteti rada. Ipak, ukratko se opisuje postupak i prikazuje proračun razine usluge segmenta preplitanja unutar čvora Lučko za koji su poznati podaci prometnog opterećenja (PGDP). Preplitanje koje se analizira prikazano je na *Slici 23*.



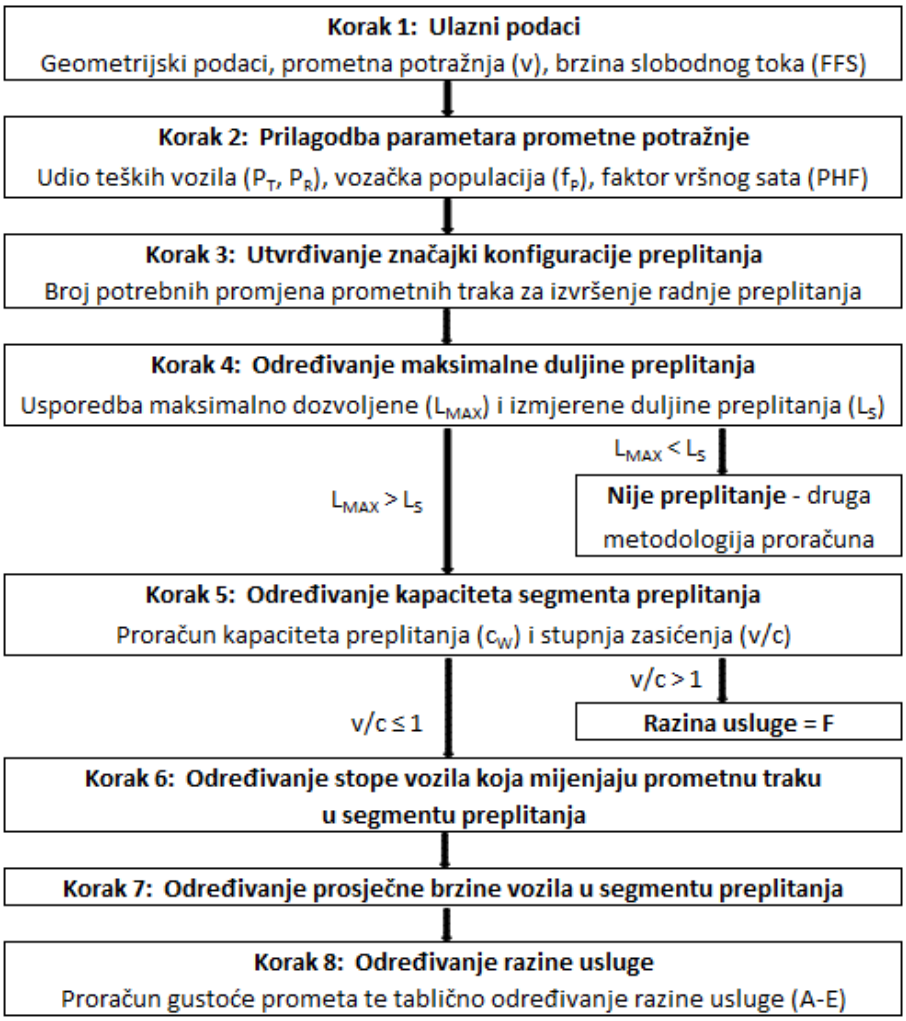
Slika 23. *Segment preplitanja na čvoru Lučko*
Izvor kartografske podloge: Google Earth

Takva vrsta preplitanja česta je na raskrižjima izvan razine oblika djeteline, te je vrlo jednostavna za analizu propusne moći i razine usluge. Preplitanje se odvija na kolniku za razvrstavanje, tj. na rampi usporednoj sa prolaznim (glavnim) kolnikom. Na taj način preplitanje ne utječe na promet prolaznog kolnika što je sa aspekta propusne moći povoljno rješenje. Takvo rješenje povoljnije je i sa aspekta sigurnosti prometa, pa se prema *Slici 24.* vidi da je broj prometnih nesreća u slučaju rješenja preplitanja sa izdvojenim kolnikom za razvrstavanje za više od 50 % manji nego u slučaju rješenja bez izdvojenog kolnika za razvrstavanje.



Slika 24. *Broj nesreća na milijun vozila u ovisnosti o konstrukcijskom rješenju raskrižja,* [1]

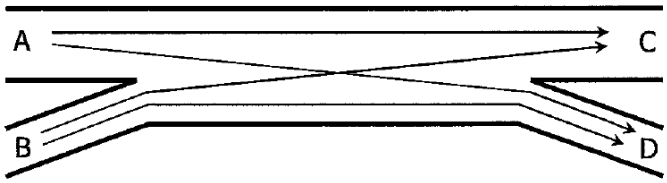
Metodologija proračuna propusne moći i razine usluge segmenta preplitanja prema HCM-u dana je na *Slici 25*.



Slika 25. *Metodologija proračuna razine usluge za segmente preplitanja*
Izvor: [4]

Korak 1 – Ulazni podaci:

Prema prikazu prometnog opterećenja čvora Lučko (*Slika 17.*) jednostavno se može utvrditi količina prometa na području analiziranog preplitanja, a indeksi prometnih opterećenja su označeni prema *Slici 26.*



Slika 26. *Prikaz prometnih tokova u području preplitanja,* [4]

- Prometna potražnja:

$$\left.\begin{aligned} V_{AC} &= 0\ voz/dan \\ V_{AD} &= 7\,067\ voz/dan \\ V_{BC} &= 2\,379\ voz/dan \\ V_{BD} &= 0\ voz/dan \end{aligned}\right\} \quad V_{uk} = 9\,446\ voz/dan$$

Ostali ulazni podaci (procjena):

- *Faktor vršnog sata:* PHF = 0,95
- *K-faktor:* K = 0,10
- *D-faktor:* D= 1,0 (na preplitanju ima samo jedan smjer)
- *Udio teških vozila:* P_T = 1 %, P_R = 0 %
- *Faktor vozačke populacije:* f_p = 1,0
- *Brzina slobodnog toka:* FFS = 55 mi/h = 88 km/h
- *Kapacitet osnovnog segmenta autoceste uz preplitanje*: c_{IFL} = 2 250 EJA/h
- *Gustoća čvorova* (engl. *Interchange Density*, ID): ID = 0,33 in/mi
- *Značajke terena:* ravničarski
- *Duljina segmenta preplitanja* (L_S): L_S = 130 m (mora biti minimalno 90 m).

Korak 2 – Prilagodba parametara prometne potražnje

Navedena prometna opterećenja (PGDP) potrebno je pretvoriti u broj ekvivalentnih jedinica osobnih vozila po satu (rata toka, v_p), kako je to napravljeno i u proračunu osnovnih segmenata autoceste. Pri tome se formule (2) i (5) objedinjuju, pa se koristi izraz:

$$\boldsymbol{v_p = \frac{PGDP \cdot K \cdot D}{PHF \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_p}} \quad \boldsymbol{[EJA/h]} \tag{9}$$

Za izračun su poznati svi parametri osim faktora utjecaja teških vozila (f_{HV}), za koji se prema ranije objašnjenom izrazu (6) i definiranim ulaznim podacima dobiva vrijednost:

$$f_{HV} = 0{,}9950$$

Upotrebom izraza (9) dobivaju se slijedeća prometna opterećenja:

$$v_{AC} = 0\ \ EJA/h$$

$$v_{AD} = 748\ \ EJA/h$$

$$v_{BC} = 252\ \ EJA/h$$

$$v_{BD} = 0\ \ EJA/h$$

Budući da se radi o „izoliranom“ preplitanju (nije u dodiru s prolaznim kolnikom autoceste), sva vozila koja dolaze u područje preplitanja mijenjaju prometnu traku, odnosno, prepliću se. To znači da je udio vozila koji se prepliće (engl. *Volume Ratio*, VR) maksimalan i iznosi 1,0 jer nema vozila koja prolaze područje preplitanja nastavljajući vožnju u istom prometnom traku (v_{NW} = 0 EJA/h). Dakle, vrijedi:

$$v_W = v_{AD} + v_{BC} = 1\,000\ EJA/h$$

$$v_{NW} = v_{AC} + v_{BD} = 0\ EJA/h$$

$$v = v_W + v_{NW} = 1\,000\ EJA/h$$

$$VR = \frac{v_W}{v} = \frac{1000}{1000} = 1{,}0$$

Iako je sam po sebi logičan i jednostavan, ovaj zaključak važan je za razumijevanje metodologije proračuna propusne moći i razine usluge segmenta preplitanja. Također, već ovdje treba naglasiti da, iako još proračunom nije do kraja potkrijepljeno, vrijednost vršnog opterećenja ovog segmenta preplitanja na čvoru Lučko (v = 1 000 EJA/h) ukazuje na visoku razinu udobnosti prometovanja, odnosno visoku razinu usluge.

Korak 3 – Utvrđivanje značajki konfiguracije preplitanja

U ovom jednostavnom slučaju preplitanja, gdje osim činjenica da se radi o tzv. jednostranom preplitanju i da ulazne/izlazne rampe imaju samo po jedan prometni trak, još dodatno pojednostavljenje čini i konfiguracija rješenja sa kolnikom za razvrstavanje, bitno je zaključiti da za potrebe preplitanja vozila u oba slučaja (dolazak vozila kolnikom za razvrstavanje ili ulaznom rampom) moraju učiniti samo jednu promjenu prometnog traka (LC_{AD} = LC_{BC} = 1). Minimalna stopa promjene prometnih traka koja obuhvaća sva vozila u jednom satu (LC_{MIN}) sada se računa prema izrazu:

$$\boldsymbol{LC_{MIN} = (LC_{AD} \cdot v_{AD}) + (LC_{BC} \cdot v_{BC})} \quad [\boldsymbol{promjena\ traka/h}] \tag{10}$$

$$LC_{MIN} = (1 \cdot 748) + (1 \cdot 252) = 1\,000\ pt/h$$

Korak 4 – Određivanje maksimalne duljine preplitanja

Maksimalna duljina preplitanja (L_{MAX}) je granična duljina za koju radnje preplitanja vozila više ne bi imale učinak na ostali promet. To znači kako ovaj korak zapravo služi potvrđivanju da je udaljenost vrhova uplitanja i isplitanja uistinu takva da oni zajedno čine preplitanje, kako bi se potvrdila ispravnost korištenja ove metodologije proračuna, a ne one za uplitanje ili isplitanje zasebno. Uvjet je, dakle, da izračunata maksimalna duljina preplitanja prema izrazu (11) bude veća od izmjerene duljine preplitanja, koja je u ovom slučaju L_S = 130 m.

$$\boldsymbol{L_{MAX} = \{[5728 \cdot (1 + VR)^{1,6}] - (1566 \cdot N_{WL})\} \cdot 0,3048} \quad [\boldsymbol{m}] \tag{11}$$

gdje je:

N_{WL} – broj prometnih trakova iz kojih radnja preplitanja može biti realizirana sa jednom ili nijednom promjenom prometne trake (kod jednostranih preplitanja ovaj parametar je jednak 2 ili 3; u ovom slučaju N_{WL} = 2).

U ovom slučaju ovu veličinu nije potrebno računati budući da se radi o preplitanju izoliranom od prolaznog prometa autoceste. Činjenica da je izmjerena duljina preplitanja manja od 900 metara ovdje je dovoljan dokaz da je ispravno koristiti metodologiju proračuna za preplitanje.

Korak 5 – Određivanje kapaciteta segmenta preplitanja

Kapacitet segmenta preplitanja računa se preko dva ograničavajuća faktora:

1) gustoća prometa jednaka 27 EJA/h/traci;

$$\boldsymbol{c_{WD} = \{c_{IFL} - [438,2 \cdot (1 + VR)^{1,6}] + (0,0765 \cdot L_S) + (119,8 \cdot N_{WL})\} \cdot N} \quad (12)$$

gdje je:

c_{WD} – kapacitet segmenta preplitanja u idealnim uvjetima uz uvjet granične vrijednosti gustoće prometa (EJA/h)
N – broj prometnih traka u segmentu preplitanja
L_S – duljina segmenta preplitanja (ft), L_S = 130 m = 426,5 ft.

$$c_{WD} = \{2250 - [438{,}2 \cdot (1 + 1)^{1{,}6}] + (0{,}0765 \cdot 426{,}5) + (119{,}8 \cdot 2)\} \cdot 2$$

$$c_{WD} = 2388 \ EJA/h$$

2) prometna potražnja ima vrijednost 2 250 EJA/h/traci (za FFS = 88 km/h).

$$\boldsymbol{c_{Wv} = \frac{2400}{VR} \ \ [EJA/h]} \quad (13)$$

gdje je:

c_{Wv} – kapacitet segmenta preplitanja u idealnim uvjetima uz graničnu vrijednost prometne potražnje (EJA/h).

$$c_{Wv} = \frac{2400}{1} = 2\,400 \ EJA/h$$

Manja od vrijednosti dobivenih proračunima preko izraza (12) i (13) uzima se kao kapacitet segmenta preplitanja, te isti mora biti veći od prometne potražnje kako razina usluge ne bi bila F. Kapacitet analiziranog segmenta preplitanja na čvoru Lučko je stoga:

$$\boldsymbol{c_W = \min(c_{WD}, c_{Wv}) = 2388 \ EJA/h} \ ,$$

pa je stupanj zasićenja:

$$\frac{v}{c} = \frac{1000}{2388} = 0{,}42 \quad < \quad 1$$

Korak 6 – Određivanje stope vozila koja mijenjaju prometnu traku u segmentu preplitanja

U slučajevima preplitanja uz prolazni kolnik autoceste potrebno je prilikom proračuna uzeti u obzir i ponašanje vozača, odnosno kretanje vozila koja se ne prepliću. Budući da to na analiziranom preplitanju nije slučaj, jednostavno je zaključiti kako sva vozila koja koja dolaze na segment preplitanja uistinu vrše radnju preplitanja, pa je LC_{ALL} = v = 1 000 EJA/h.

Korak 7 – Određivanje prosječne brzine vozila u segmentu preplitanja

Prosječna brzina vozila u analiziranom segmentu preplitanja računa se prema izrazu:

$$\boldsymbol{S = 15 + \left(\frac{FFS - 15}{1 + W}\right)} \quad \textit{[mi/h]} \tag{14}$$

gdje je:

S – prosječna brzina vozila u segmentu preplitanja (mi/h)
W – faktor intenziteta preplitanja.

Faktor intenziteta preplitanja ovisi o broju vozila u satu koja se prepliću, te o duljini segmenta preplitanja. Računa se prema izrazu:

$$\boldsymbol{W = 0{,}226 \cdot \left(\frac{LC_{ALL}}{L_s}\right)^{0{,}789}} \tag{15}$$

S obzirom da su sve veličine poznate, dobiva se:

$$W = 0{,}226 \cdot \left(\frac{1000}{426{,}5}\right)^{0{,}789} = 0{,}4427$$

$$S = 15 + \left(\frac{55 - 15}{1 + 0{,}4427}\right) = 42{,}7\ mi/h \ \approx \ 68{,}8\ km/h$$

Korak 8 – Određivanje razine usluge segmenta preplitanja

U posljednjem koraku tablično se određuje razina usluge na temelju gustoće prometa u segmentu preplitanja. Gustoća prometa računa se prema izrazu:

$$\boldsymbol{D = \frac{v}{N \cdot S}} \quad [\boldsymbol{EJA/km}] \tag{16}$$

pri čemu su sve veličine već ranije definirane i poznate.

$$D = \frac{1000}{2 \cdot 68{,}8} = 7{,}27 \ \ EJA/km$$

Tablica 17. *Razina usluge segmenta preplitanja na temelju gustoće prometa*, [4]

Razina usluge	Gustoća prometa	
	[EJA/mi/traka]	*[EJA/km/traka]*
A	0 - 10	0 - 6,2
B	> 10 - 20	> 6,2 - 12,4
C	> 20 - 28	> 12,4 - 17,4
D	> 28 - 35	> 17,4 - 21,7
E	> 35	> 21,7
F	v/c > 1	

Na temelju izračunate vrijednosti gustoće prometa na segmentu preplitanja te *Tablice 17.*, zaključuje se:

$$Razina\ usluge\ segmenta\ preplitanja = \boldsymbol{B}$$

Dobivena razina usluge ukazuje na vrlo povoljne uvjete prometovanja na segmentu preplitanja čvora Lučko, što znači zadržavanje brzine slobodnog prometnog toka i minimalne restrikcije u slobodi manevriranja. Prema procijenjenom sezonskom prometnom opterećenju (*Slika 18.*) vidi se da segment preplitanja na čvoru Lučko nije pod utjecajem turističkog prometa, te i u ljetnim mjesecima zadržava visoku razinu usluge.

Da bi se to potvrdilo i za buduću potražnju, proračunate su razine usluge istog segmenta preplitanja za prognozirana prometna opterećenja do 2035. godine. Rezultati su dani u *Tablici 18.*

Tablica 18. *Razina usluge preplitanja na čvoru Lučko za razdoblje 2020. – 2035.*

Naziv parametra	Oznaka	Mjerna jedinica	2015.	**2020.**	**2025.**	**2030.**	**2035.**
Prometno opterećenje	PGDP	*voz/dan*	9.446	10.950	12.090	13.025	14.031
	v	*EJA/h*	1.000	1.158	1.279	1.378	1.484
Prosječna brzina	S	*voz/h*	68,8	67,1	66,0	65,1	64,3
Gustoća prometa	D	*voz/km/traka*	7,27	8,62	9,69	10,58	11,55
Razina usluge	RU	*A-F*	B	**B**	**B**	**B**	**B**

Iz tablice je vidljivo da prema prognozi prometa, koja u 2035. godini predviđa 48,5 % veće prometno opterećenje nego u 2015. godini, razina usluge ostaje na istoj razini (B). Zbog male količine prometa i činjenice da je razina usluge B u 2015. godini bila na svojoj donjoj granici (vrlo blizu razini usluge A), niti tako veliki porast prometa ne mijenja visoku kvalitetu prometnog toka na segmentu preplitanja čvora Lučko.

3.3.3. Segment uplitanja/isplitanja

Segmenti uplitanja i isplitanja su područja gdje se dva ili više prometna toka spajaju u jedan (uplitanje), odnosno gdje se jedan prometni tok razdvaja na dva ili više prometna toka (isplitanje). Karakteristični su za neprekinute prometne tokove kakvi se prvenstveno javljaju na raskrižjima izvan razine prometnica visoke razine uslužnosti (kao npr. autoceste i brze ceste).

Svi ulasci i izlasci s autocesta, kao i njihova križanja, izvedena su pomoću spojnih rampi koje omogućuju radnje uplitanja i isplitanja pri relativno visokim brzinama. Spojne rampe su u osnovi sastavljene od tri elementa, prometnice i dva spoja, koji mogu biti uplitanje, isplitanje ili križanje, ovisno o kategoriji prometnice na koju se spaja. Geometrijske značajke spoja rampe i autoceste mogu biti raznovrsne, a glavni parametri koji ga opisuju su: duljina i tip (paralelni, klinasti) trake za ubrzavanje/usporavanje, brzine slobodnog toka na rampi i autocesti, udaljenost od drugih spojnih rampi te ostali elementi koji utječu na radnje uplitanja ili isplitanja [1].

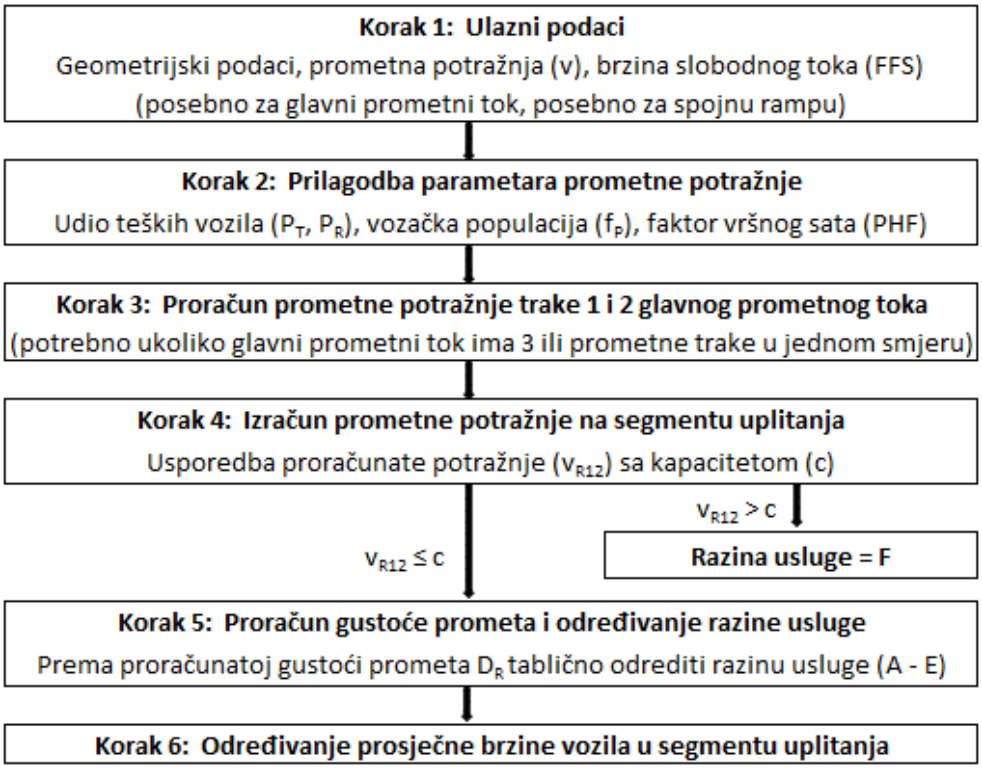
Propusna moć spojnih rampi najčešće nije osobito važan parametar. Naime, u velikoj većini slučajeva na broj vozila koja prolaze rampom ili spojnom cestom utječu uvjeti za uplitanje i isplitanje u prometnom toku. Zbog toga je ovo poglavlje ponajprije usmjereno na određivanje uvjetne količine prometa i propusne moći segmenata uplitanja i isplitanja.

Čvor Lučko ima ukupno 7 segmenata uplitanja i 7 segmenata isplitanja. S obzirom na procijenjena prometna opterećenja (PGDP) svih segmenata čvora Lučko (*Slika 17.*) i njihove geometrijske značajke, može se sa velikom vjerojatnošću pretpostaviti da je ključni ograničavajući segment uplitanje prometnog toka izlazne rampe iz smjera čvora Jankomir na spojnu rampu prema naplatnoj postaji Lučko iz smjera Buzina (prikazano na *Slici 27.*). To uplitanje je ključno jer u njemu dolazi do spajanja dva prometna toka koja u sezonskim mjesecima imaju znatno veće opterećenje nego kroz ostatak godine.



Slika 27. *Prikazi lokacije uplitanja na čvoru Lučko izabrano za proračun*
Izvori: slika lijevo Google Earth; slika desno [12]

Iako se radi o uplitanju jedne spojne rampe na drugu spojnu rampu, može se primijeniti metodologija proračuna uplitanja spojne rampe na glavni prometni tok autoceste jer u načelu sadrže iste elemente. Stoga će se u nastavku, prema metodologiji proračuna iz HCM-a *(Slika 28.*), odrediti propusna moć i razina usluge spomenutog uplitanja.



Slika 28. *Metodologija proračuna razine usluge za segment uplitanja*

Izvor: [4]

Korak 1 – Ulazni podaci

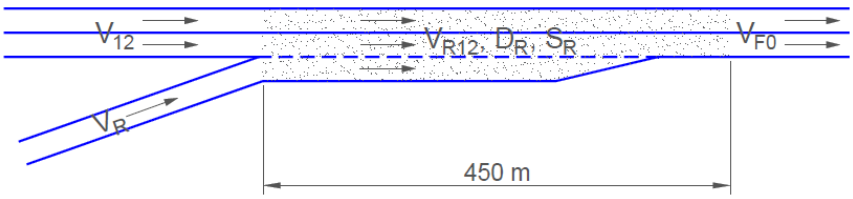
Ovdje se razlikuju dvije vrste ulaznih podataka. Jedni se odnose na glavni prometni tok, koji se u ovom slučaju odnosi na dvotračnu poludirektnu spojnu rampu između zagrebačke obilaznice iz smjera Buzina i Jadranske avenije prema naplatnoj postaji Lučko i autocesti A1. Druga vrsta ulaznih podataka odnosi se na parametre prometnog toka jednotračne direktne spojne rampe iz smjera Jankomira koja se upliće u glavni prometni tok.

Ulazni podaci glavnog prometnog toka:

- *Brzina slobodnog toka:* FFS = 55 mi/h = 88 km/h
- *Broj prometnih traka:* $N_F = 2$
- *Značajke terena:* ravničarski
- *Udio teških vozila:* $P_T = 11$ %, $P_R = 0$ %
- *Prometno opterećenje:* $PGDP_{12} = 6\,106$ voz/dan, K = 0,1, D = 1
- *Faktor vršnog sata:* PHF = 0,95
- *Faktor vozačke populacije:* $f_P = 0{,}98$.

Ulazni podaci prometnog toka koji se upliće:

- *Tip rampe:* uplitanje s desne strane
- *Broj prometnih traka na rampi:* $N_{R1} = 2$
- *Broj prometnih traka na rampi pri uplitanju*: $N_{R2} = 1$
- *Duljina trake za ubrzavanje (mjeri se do vrha otoka):* $L_A = 210$ m
- *Brzina slobodnog toka na rampi:* $FFS_R = 55$ mi/h = 88 km/h
- *Značajke terena:* ravničarski
- *Prometna potražnja:* $PGDP_R = 5\ 538$ voz/dan, K = 0,1, D = 1
- *Udio teških vozila:* $P_T = 11$ %, $P_R = 0$ %
- *Faktor vršnog sata:* PHF = 0,95
- *Faktor vozačke populacije:* $f_P = 0,98$.



Slika 29. *Ključne varijable segmenta uplitanja,* [4]

Korak 2 – Prilagodba parametara prometne potražnje

Kako je već i primijenjeno u ranijim proračunima u ovom radu, početni korak sastoji se od pretvorbe prometne potražnje izražene PGDP-om u broj ekvivalentnih jedinica osobnih vozila po satu (rata toka, v). Prema izrazu (6) prvo je potrebno izračunati faktor utjecaja teških vozila:

$$f_{HV} = \frac{1}{1+P_T\cdot(E_T-1)+P_R\cdot(E_R-1)} = \frac{1}{1+0,11\cdot(1,5-1)+0\cdot(1,2-1)} = 0,9479\ ,$$

a zatim se prema izrazu (9) dobiju rate toka posebno za glavni prometni tok (v_{12}), a posebno za ulaznu spojnu rampu (v_R):

$$v_{12} = \frac{PGDP_{12}\cdot K\cdot D}{PHF\cdot f_{HV}\cdot f_P} = \frac{6\ 106\cdot 0,1\cdot 1}{0,95\cdot 0,9479\cdot 0,98} = 692\ \ EJA/h$$

$$v_R = \frac{PGDP_R\cdot K\cdot D}{PHF\cdot f_{HV}\cdot f_P} = \frac{5\ 538\cdot 0,1\cdot 1}{0,95\cdot 0,9479\cdot 0,98} = 628\ \ EJA/h$$

Korak 3 – Proračun prometne potražnje trake 1 i 2 glavnog prometnog toka

Ovaj korak primjenjuje se u slučajevima kada glavni prometni tok (najčešće autocesta) ima tri ili više prometnih traka u jednom smjeru. Naime, prema HCM-u, prometni tok koji se upliće ima utjecaj samo na prve dvije prometne trake glavnog prometnog toka. U slučaju većeg broja prometnih traka autoceste (tri ili više) potrebno je složenim proračunskim postupkom odrediti prometno opterećenje samo prvih dviju traka, tj. onih na koje utječe nadolazeće uplitanje. Budući da u analiziranom slučaju glavni prometni tok ima dvije prometne trake, ovaj proračun ovdje nije potreban.

Korak 4 – Izračun prometne potražnje na segmentu uplitanja i usporedba sa kapacitetom

Za jednotračne spojne rampe, kakva je u analiziranom slučaju, prema izrazu (17) jednostavno se izračuna prometno opterećenje segmenta uplitanja (v_{R12}):

$$\boldsymbol{v_{R12} = v_R + v_{12}} \quad \boldsymbol{[EJA/h]} \tag{17}$$

$$v_{R12} = 628 + 692 = 1\,320 \;\; EJA/h$$

U nastavku se dobiveno prometno opterećenje segmenta uplitanja, kao i ranije dobiveno prometno opterećenje spojne rampe, uspoređuju sa kapacitetima tih segmenata danih u *Tablici 19.* i *Tablici 20.*

Tablica 19. *Utvrđivanje kapaciteta glavnog toka nakon područja uplitanja,* [4]

Brzina slobodnog toka		Kapacitet glavnog toka nakon područja uplitanja (c_{F0})				Maksimalna poželjna rata toka područja uplitanja
FFS_{F0}		Broj prometnih traka glavnog toka				
[mi/h]	*[km/h]*	*2*	*3*	*4*	*> 4*	v_{R12} *[EJA/h]*
≥ 70	≥ 112	4.800	7.200	9.600	2.400/traka	4.600
65	104	4.700	7.050	9.400	2.350/traka	4.600
60	96	4.600	6.900	9.200	2.300/traka	4.600
55	88	4.500	6.750	9.000	2.250/traka	4.600

Tablica 20. *Utvrđivanje kapaciteta spojne rampe,* [4]

Brzina slobodnog toka spojne rampe		Kapacitet spojne rampe (c_R)	
FFS_R		jednotračna	dvotračna
[mi/h]	*[km/h]*	*[EJA/h]*	*[EJA/h]*
> 50	> 80	2.200	4.400
> 40 - 50	> 64 - 80	2.100	4.200
> 30 - 40	> 48 - 64	2.000	4.000
> 20 - 30	> 32 - 48	1.900	3.800
< 20	< 32	1.800	3.600

Iz *Tablice 19.* vidi se da je kapacitet dvotračnog glavnog toka nakon područja uplitanja, za brzinu slobodnog toka od 88 km/h, jednak 4 500 EJA/h. Budući da je prometno opterećenje vršnih 15 minuta (vršnog sata u danu) segmenta uplitanja (v_{R12}) svega 1 320 EJA/h, može se zaključiti kako je kapacitet veći od potražnje i razina usluge nije F. Također, prometno opterećenje spojne rampe (v_R = 628 EJA/h) manje je od kapaciteta rampe koji, prema *Tablici 20.*, iznosi 2 200 EJA/h, pa i u tom dijelu ne dolazi do formiranja reda čekanja.

Korak 5 – Proračun gustoće prometa i određivanje razine usluge segmenta uplitanja

Kao i kod ostalih segmenata autoceste, i kod uplitanja (i isplitanja) se razina usluge određuje na temelju gustoće prometa na tom analiziranom segmentu. Gustoća prometa segmenta uplitanja (D_R) računa se prema slijedećem izrazu:

$$\boldsymbol{D_R = 5,475 + 0,00734 \cdot v_R + 0,0078 v_{12} - 0,00627 \cdot L_A \quad [EJA/mi/traka]} \qquad (18)$$

gdje je:

D_R – gustoća prometa na segmentu uplitanja (EJA/mi/traka)
L_A – duljina trake za ubrzavanje (ft). L_A = 210 m = 688,98 ft.

Formula je sama po sebi logična: gustoća se povećava s povećanjem prometnog opterećenja spojne rampe i glavnog prometnog toka (autoceste), a smanjuje s povećanjem duljine trake za ubrzavanje. Dobiva se stoga:

$$D_R = 5{,}475 + 0{,}00734 \cdot 628 + 0{,}0078 \cdot 692 - 0{,}00627 \cdot 688{,}98$$

$$D_R = 11{,}16\ EJA/mi/traci = 6{,}94\ EJA/km/traci$$

Prema *Tablici 21.*, za dobivenu vrijednost gustoće prometa očitava se:

$$Razina\ usluge\ segmenta\ uplitanja\ (PGDP,\ 2015.) = \boldsymbol{B}$$

Tablica 21. *Razina usluge segmenta uplitanja na temelju gustoće prometa,* [4]

Razina usluge	Gustoća prometa	
	[EJA/mi/traka]	*[EJA/km/traka]*
A	0 - 10	0 - 6,2
B	> 10 - 20	> 6,2 - 12,4
C	> 20 - 28	> 12,4 - 17,4
D	> 28 - 35	> 17,4 - 21,7
E	> 35	> 21,7
F	v/c > 1	

Dobiveni rezultat pokazuje kako su uvjeti prometnog toka na analiziranom segmentu uplitanja stabilni. Dapače, ustanovljena razina usluge B zapravo je na svojoj donjoj granici. Problem bi ipak mogao nastati pri sezonskom opterećenju koje je puno veće i radi kojeg je i izabran ovaj segment za analizu. Naime, u vršnim ljetnim opterećenjima na čvoru Lučko

stvaraju se redovi čekanja. Izvjesno je da su ta zagušenja posljedica čekanja na naplatnoj postaji Lučko koja se nalazi svega 700 metara od analiziranog uplitanja. Pitanje je stoga da li redovi čekanja koje stvara naplatna postaja Lučko prikrivaju činjenicu da i analizirano uplitanje pri tom opterećenju izaziva zagušenje prometa?

Da bi se dao odgovor na ovo vrlo važno pitanje za tematiku ovog rada, potrebno je imati precizne podatke vršnog sezonskog prometnog opterećenja svih segmenata čvora Lučko. Kako ti podaci nisu dostupni, primijenjuju se procijenjene vrijednosti PLDP-a (*Slika 18.*) te iz njih proračunom aproksimira mjerodavno 15-minutno sezonsko opterećenje analiziranog uplitanja. Pritom je potrebno izmijeniti i neke druge ulazne podatke za proračun, budući da se struktura prometnog toka u sezonskom prometu na čvoru Lučko mijenja. Izmijenjeni ulazni podaci su:

- *Prometno opterećenje:* $PLDP_{12}$ = 12 125 voz/dan, $PLDP_R$ = 11 400 voz/dan
- *Udio teških vozila:* P_T = 7 %, P_R = 1 % (umjesto P_T = 11 %, P_R = 0 %)
- *Faktor vozačke populacije:* f_P = 0,92 (umjesto f_P = 0,98).

Prema tako uzetim podacima i korištenjem iste metodologije proračuna, dobiva se gustoća prometa:

$$D_R = 13{,}87 \;\; EJA/km/traci \;,$$

što prema *Tablici 21.* implicira razinu usluge:

$$Razina\ usluge\ segmenta\ uplitanja\ (PLDP, 2015.) = \boldsymbol{C}$$

Čak i kad bi se u proračun uzelo prognozirano opterećenje (PLDP) za 2035. godinu, što čini povećanje od 48,5 %, dobivena razina usluge segmenta uplitanja bila bi na granici D/E. To znači da ovaj segment uplitanja, koji je označen kao kritični na cijelom čvoru Lučko, ne predstavlja uzrok zagušenja i stvaranja redova čekanja čak i pri najvećim prometnim opterećenjima.

Na temelju odrađenih proračuna propusne moći i razine usluge osnovnih segmenata autoceste, segmenta preplitanja i segmenata uplitanja/isplitanja, treba zaključiti kako ***čvor Lučko ne predstavlja kapacitivna ograničenja u snabdijevanju vršnih prometnih opterećenja***. Redovi čekanja koji se javljaju u vršnim ljetnim opterećenjima (uslijed pojačanog turističkog prometa) posljedica su, sada je to potpuno jasno, nedovoljnog kapaciteta naplatne postaje Lučko ili autoceste A1 nakon naplatne postaje Lučko. U nastavku rada se stoga detaljno analizira način funkcioniranja i propusna moć naplatne postaje Lučko, za oba prometna smjera.

3.4. Utvrđivanje propusne moći naplatne postaje Lučko

Naplatne postaje na autocestama i ostalim prometnicama na kojima se obavlja izravna naplata naknade za korištenje predstavljaju posebne objekte prometne infrastrukture. Promatrajući proces odvijanja prometa na takvim prometnicama, jasno je da naplatne postaje unose određene poremećaje u prometni tok. Osnovni utjecaj koji naplatne postaje imaju na prometni tok je smanjivanje brzine kretanja vozila, odnosno povećanje trajanja putovanja. Uz to, važan je i sigurnosni aspekt budući da na području naplate može nastati niz konfliktnih točaka prilikom dolaska vozila, kao i u trenucima ponovnog ulijevanja vozila nakon plaćanja naknade [21].

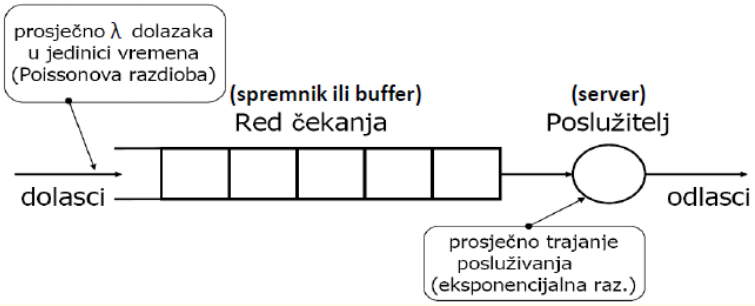
Naplatna postaja Lučko udaljena je otprilike 500 metara od samog čvora Lučko, te zbog toga ima izniman utjecaj na kvalitetu prometnih zbivanja na njemu. Taj utjecaj je posebno izražen u sezonskom periodu kada su prometna opterećenja naplatne postaje znatno veća zbog vozila koja iz srednje i istočne Europe, te kontinentalne Hrvatske putuju prema jadranskim turističkim odredištima. S obzirom na zaključke iz prethodnog poglavlja, ovdje se odrađuje nužna detaljna analiza načina rada i kapaciteta naplatne postaje Lučko.



Slika 30. *Prikaz položaja NP Lučko i čvora Lučko*
Izvor kartografske podloge: Google Earth

Prilikom analiziranja propusne moći i vremena koje vozila provedu na području naplatne postaje koristi se *Teorija redova čekanja*. Teorija redova, odnosno masovnog posluživanja, jedna je od metoda operacijskih istraživanja koja proučava procese posluživanja slučajno pristiglih jedinica koristeći se pritom matematičkim modelima pomoću kojih se ustanovljava međuzavisnost između dolazaka jedinica, njihovog čekanja na uslugu, posluživanja, te na kraju izlaska jedinica iz sustava. Cilj teorije redova je postizanje

maksimalnih ekonomskih učinaka, tj. donošenje optimalnih odluka, a u pravilu je karakterizira izuzetno velika matematička složenost [22]. Pojednostavljeni prikaz strukture modela čekanja prikazan je na *Slici 31*.



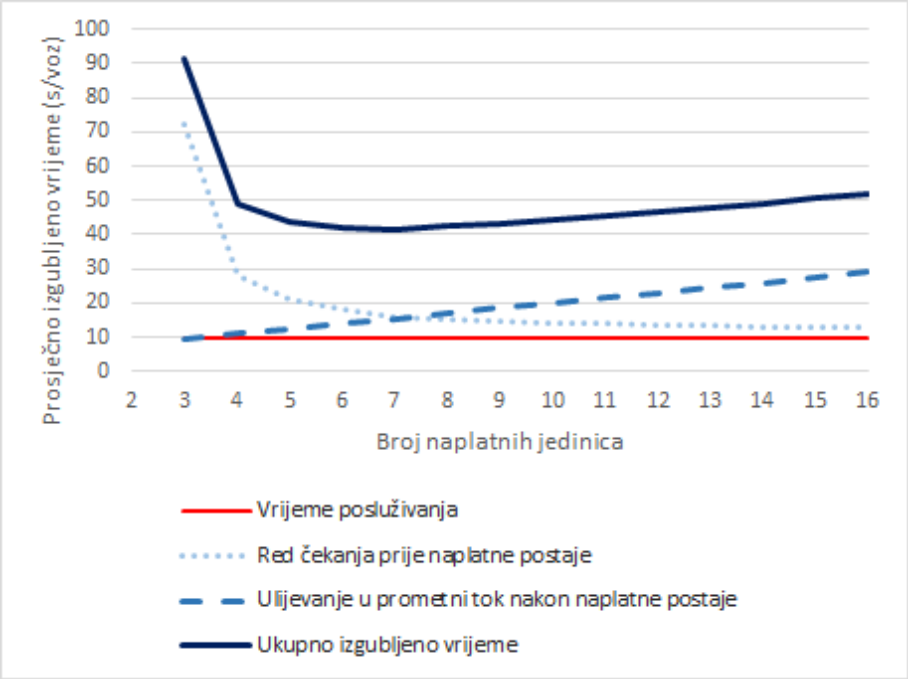
Slika 31. *Pojednostavljeni prikaz strukture modela čekanja*, [22]

Već i prema *Slici 31.* je jasno da tri segmenta određuju ukupno vrijeme koje vozila provedu na području naplate, odnosno na području ulaza na autocestu. To su [21][23]:

1) duljina reda čekanja pred naplatnom postajom (čekanje na posluživanje)
2) vrijeme posluživanja
3) vrijeme potrebno za ponovno ulijevanje u prometni tok.

Vrijeme čekanja na posluživanje ovisi o veličini prometnog toka i o broju aktivnih poslužiteljskih mjesta, dok je vrijeme posluživanja relativno konstantna veličina. Vrijeme potrebno za ponovno ulijevanje u prometni tok se odnosi na činjenicu da je u zoni naplatne postaje ukupni broj prometnih traka jednak broju naplatnih jedinica, a nakon toga se, na određenoj duljini prometnice, broj prometnih traka smanjuje tj. izjednačava s onim od autoceste koja se nadovezuje na naplatnu postaju. Iako se na prvu čini da taj segment ne može imati značajan utjecaj na propusnu moć naplatne postaje, pri većem broju naplatnih jedinica i uz kratko vrijeme posluživanja vozila na naplatnoj jedinici, taj segment postaje dominantan u ukupnom izgubljenom vremenu vozila na naplatnoj postaji.

Grafikon 6. prikazuje način određivanja optimalnog broja naplatnih jedinica za određeni konkretni slučaj, međutim ovdje je bitno iz njega uvidjeti odnose krivulja (izgubljenog vremena) po pojedinom segmentu. Može se zaključiti da nakon određenog broja naplatnih jedinica, segment ulijevanja u prometni tok nakon naplatne postaje ima veći utjecaj na količinu izgubljenog vremena od reda čekanja prije naplatne postaje. Stoga se za optimalan broj naplatnih jedinica uzima vrijednost sa najnižom ukupnom vrijednosti prosječnog izgubljenog vremena, što se u pravilu javlja oko sjecišta krivulja ova dva utjecajna segmenta (za prikazani slučaj optimalni broj naplatnih jedinica je 7).



Grafikon 6. *Grafički prikaz prosječno izgubljenog vremena vozila na naplatnoj postaji*
Izvor: [23]

Uz primijenjene razne pretpostavke kako bi se smanjila kompleksnost problema, te koristeći proračun vezan za teoriju redova čekanja, u navedenoj literaturi iznašao se model odabira optimalnog broja naplatnih jedinica s obzirom na prometno opterećenje naplatne postaje i broj prometnih traka prije naplatne postaje. Rezultati su prikazani u *Tablici 22*.

Tablica 22. *Određivanje optimalnog broja naplatnih jedinica,* [23]

Prom. opterećenje	Broj prometnih traka					
v *(voz/h/traka)*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
100	7	7	8	8	9	10
200	7	7	8	8	9	10
300	7	7	7	8	9	9
400	7	7	7	7	9	9
500	7	7	6	7	-	-
600	7	6	-	-	-	-
700	7	5	-	-	-	-
800	7	-	-	-	-	-
900	7	-	-	-	-	-
1000	7	-	-	-	-	-
1100	6	-	-	-	-	-
1200	-	-	-	-	-	-

Primijenjeni proračun nije upotrebljiv u uvjetima zasićenog prometnog toka. Upravo stoga određivanje optimalnog broja naplatnih jedinica ovom metodom nije moguće za veća prometna opterećenja koja se javljaju na čvoru Lučko u ljetnom periodu. Ipak, iz tablice je

znakovito da broj naplatnih jedinica ne prelazi vrijednost 10, čak ni u slučaju šesterotračnih autocesta, što daje određenu percepciju koja se može iskoristiti u nastavku rada pri obradi parametara na naplatnoj postaji Lučko. Također, u tablici je vidljivo da se povećanjem prometnog opterećenja optimalni broj naplatnih postaja smanjuje, što je dokaz velikog utjecaja segmenta ulijevanja u prometni tok nakon posluživanja u ukupnom izgubljenom vremenu na naplatnoj postaji.

Za vršno vansezonsko prometno opterećenje čvora Lučko, prema danoj Tablici 22. optimalan broj naplatnih jedinica bio bi šest. Dobra je metoda organizacije imati više naplatnih jedinica, ali koje mogu opsluživati oba prometna pravca. Tada se, ovisno o potražnji pojedinog pravca, može regulirati broj aktivnih naplatnih jedinica po pojedinom smjeru što onda garantira najbolju prometnu i ekonomsku učinkovitost naplatne postaje.

Naplatna postaja Lučko ima 10 naplatnih jedinica (poslužiteljskih mjesta) koje se mogu koristiti za prolaz vozila iz oba prometna pravca. Pritom se naplatne jedinice za vozila koja dolaze iz smjera Karlovca koriste za gotovinsku naplatu cestarine, dok se za vozila koja dolaze iz smjera Zagreba koriste za automatsko uzimanje naplatnih kartica. Naravno, broj naplatnih jedinica za pojedini smjer nije uvijek konstantan te ovisi prvenstveno o prometnoj potražnji pojedinog smjera u određenom trenutku. Za ulazak vozila na autocestu A1 (iz smjera Zagreba) postoje još i tri dodatna poslužiteljska mjesta koja se uglavnom primijenjuju za vozila koja koriste elektronski način naplate cestarine (ENC), a za izlazak s autoceste A1 koristi se i naplatna postaja Demerje koja se nalazi oko 3 km prije naplatne postaje Lučko.

Tijekom vršnih prometnih opterećenja naplatne postaje Lučko, koja se javljaju u sezonskom periodu godine (osobito tijekom vikenda), režim funkcioniranja naplatne postaje odvija se prema određenoj vrsti *izvanredne regulacije*. Pritom se misli na:

- operativnost svih naplatnih jedinica u 24-satnom režimu rada;
- mogućnost česte izmjene broja naplatnih jedinica za pojedini smjer prolaska vozila;
- skraćivanje vremena posluživanja vozila koja ulaze na autocestu A1 ručnom podjelom naplatnih kartica od strane privremeno zaposlenog, najčešće studentskog, osoblja;
- korištenje ENC poslužiteljskih mjesta za ulazak vozila na autocestu koja inače ne koriste taj oblik naplate cestarine.

Analiza naplatne postaje Lučko za potrebe ovog rada odrađuje se samo za period vršnog sezonskog prometnog opterećenja, i to prema podacima iz razdoblja od petka 29.07.2016. do nedjelje 31.07.2016. Kako je u tom razdoblju veliko prometno opterećenje oba prometna pravca, a u tim uvjetima vrši se izvanredna regulacija rada naplatne postaje Lučko, pretpostavit će se da u sklopu naplatne postaje funkcionira 13 istovrsnih naplatnih jedinica (zanemaruje se naplata preko ENC uređaja), od kojih u svakom trenutku za pojedini smjer mora biti operativno barem njih tri. Također, nužne su i pretpostavke da se promjene smjera operativnosti pojedinih naplatnih jedinica vrše u vremenu punog sata, te da se uslijed velikog prometnog opterećenja ne može primjenjivati računski postupak teorije redova čekanja. Navedene pretpostavke definitivno će utjecati na dobivene rezultate analize, ali utjecaj ne bi trebao biti toliki da značajno naruši kvalitetu izvedenih zaključaka.

Potrebno je još navesti da duljina analiziranog perioda (60 sati, od petka 29.07. u 00:00 do nedjelje 31.07.u 12:00) zahtjeva značajan opseg tabličnih prikaza koje onda nije praktično navoditi u radu. Upravo stoga oni ovdje nisu prikazani (već samo na temelju njih proizašli grafikoni), ali su dostupni u elektronskom obliku (CD) na završnim koricama ovog rada.

3.4.1. Propusna moć ulazne naplatne postaje Lučko

Propusna moć ulazne naplatne postaje direktno ovisi o broju aktivnih poslužiteljskih jedinica za smjer ulaza na autocestu A1. Budući da se taj broj često mijenja kroz analizirani period nezgodno je koristiti izraz: *propusna moć naplatne postaje*. Primjerenije je stoga analizirati vrijeme posluživanja vozila na naplatnoj jedinici, odnosno propusnu moć naplatne jedinice.

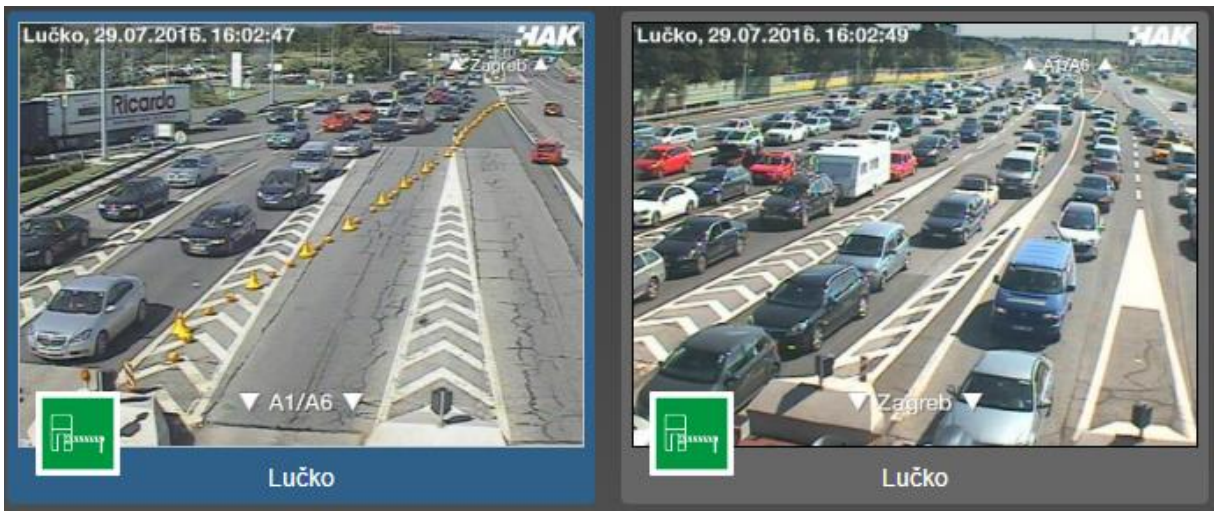
Od tvrtke Autocesta Rijeka-Zagreb d.d., koja upravlja prometom na naplatnoj postaji Lučko, dobiveni su egzaktni podaci satnog broja vozila koja su prometovala autocestom A1/A6 u periodu od 29.07.2016. (petak, 00:00) do 31.07.2016. (nedjelja, 17:00). Preciznije, satna vremena odnose se na vrijeme izlaska vozila sa autoceste na svim njenim čvorištima. Budući da je ovdje potrebno ulazno vrijeme na autocestu kroz NP Lučko, potrebno je isto dobiti kroz procjenu vremena putovanja vozila do izlaznog čvorišta. Procijenjena prosječna vremena putovanja koja su korištena u daljnjoj analizi navedena su u *Tablici 23*.

Tablica 23. *Procijenjena vremena putovanja od NP Lučko do ostalih čvorišta na AC A1/A6*

Izlazno čvorište autoceste A1/A6	Procijenjeno vrijeme putovanja od NP Lučko (h)
Donja Zdenčina, Jastrebarsko	*0*
Karlovac, Novigrad, Bosiljevo I	*1*
Brinje, Žuta Lokva, Otočac, Vrbovsko, Ravna Gora, Delnice, Vrata	*2*
Perušić, Gospić, Gornja Ploča, Sveti Rok, Maslenica, Posedarje, Oštrovica, Rijeka	*3*
Zadar I, Zadar II, Benkovac, Pirovac, Skradin, Šibenik, Vrpolje	*4*
Prgomet, Dugopolje, Vučevica, Bisko, Blato na Cetini, Šestanovac	*5*
Zagvozd, Ravča, Vrgorac	*6*

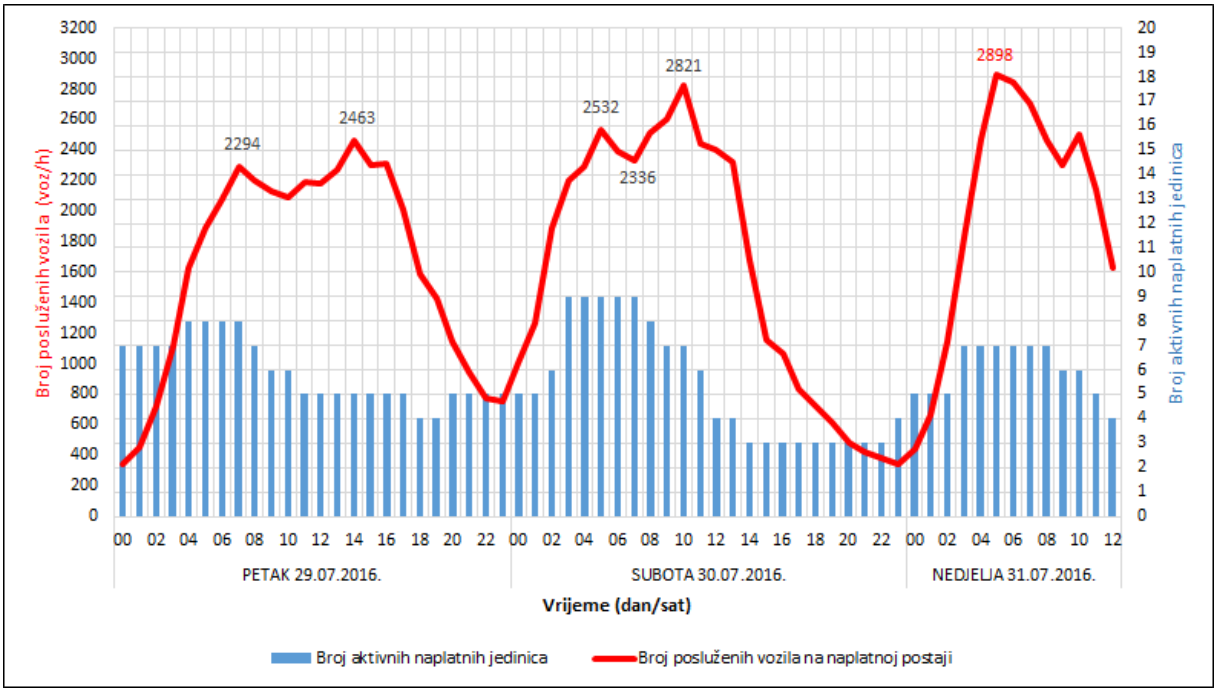
Treba naglasiti kako procijenjena vremena putovanja nisu rezultat nikakve opsežnije analize već samo prostorne udaljenosti čvorišta i subjektivne procjene autora. Uzeta vremena veća su od stvarno potrebnih zbog utjecaja prometnog opterećenja u analiziranom periodu i pretpostavke mogućih zaustavljanja na pratećim uslužnim objektima autoceste zbog odmora putnika i vozača te nužnog opsluživanja prometnog sredstva pogonskim gorivom i ostalim sredstvima.

Na temelju tako postavljene metodologije, dobiven je satni protok vozila kroz NP Lučko u analiziranom periodu. Kako bi se iz satnog protoka dobilo prosječno vrijeme posluživanja vozila na naplatnoj jedinici, a iz toga i kapacitet naplatne jedinice, potrebno je znati i broj aktivnih naplatnih jedinica ulaznog smjera u pojedinom satu. Isti je dobiven satnim praćenjem informativnih kamera hrvatskog autokluba (HAK) koje prikazuju stvarno trenutno stanje na prometnicama na više lokacija u RH i javno su dostupne na mrežnim stranicama [23]. *Slika 32.* prikazuje primjer kako se broj aktivnih naplatnih jedinica po pojedinom smjeru na NP Lučko može vidjeti iz informativnih kamera HAK-a.

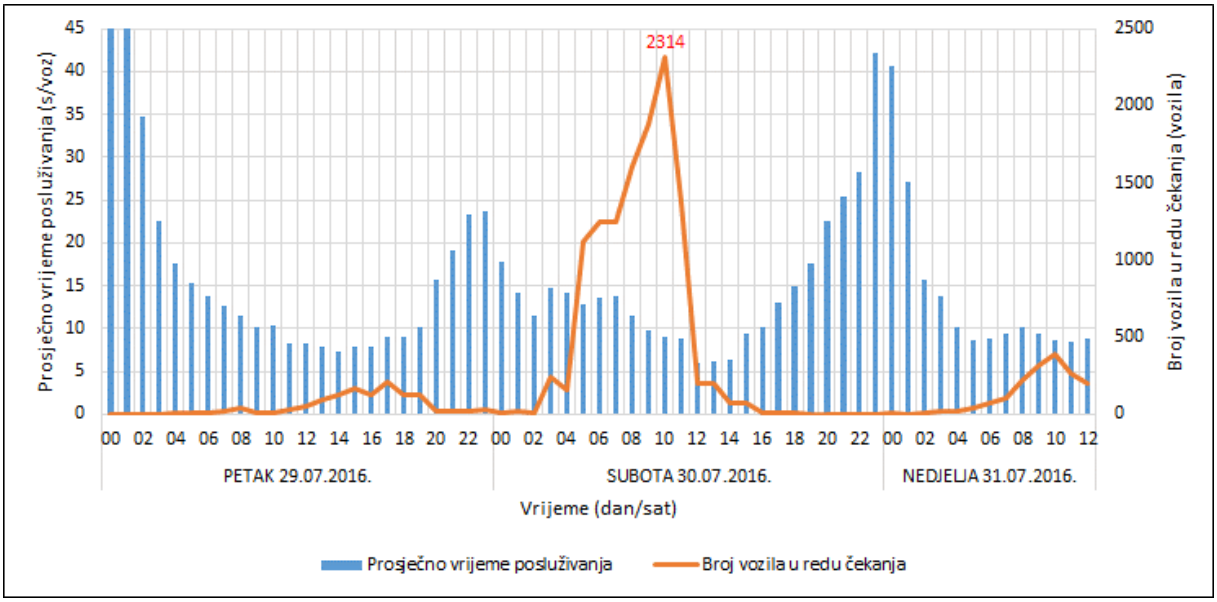


Slika 32. *Primjer slike informativnih kamera HAK-a na naplatnoj postaji Lučko,* [24]

U konkretnom primjeru sa *Slike 32.*, pet naplatnih jedinica opslužuje ulazni smjer na autocestu A1, a preostalih osam izlazni smjer. Na temelju svega navedenog, dobiveni su *Grafikon 7.* i *Grafikon 8.* koji prikazuju opterećenje ulaznog smjera NP Lučko u vrijeme vršnih prometnih dana u godini, proračunati red čekanja i prosječno vrijeme posluživanja vozila.



Grafikon 7. *Broj posluženih vozila prilikom ulaska na autocestu A1 na NP Lučko*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.



Grafikon 8. *Prosječno vrijeme posluživanja na NP Lučko pri ulasku na autocestu A1*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.

Oba grafikona generalno prikazuju očekivane linije kretanja analiziranih veličina, ali daju i uvid o njihovim vrijednostima u pojedinom satu, te je iz njih moguće izvući više zaključaka od kojih valja izdvojiti tri najvažnija:

- iz *Grafikona 7.* vidi se da je najviše 2 898 vozila u jednom satu prošlo kroz ulazni smjer NP Lučko, i to kroz 7 radnih naplatnih jedinica. Također se vidi da u vrijeme najvećih opterećenja, a to je subotnje jutro u vremenu od 5h do 14h, pri radu 9 naplatnih jedinica

za ulazni smjer, dolazi do fluktuacija u broju vozila koja su poslužena i općenito je taj broj manji nego navedna maksimalna vrijednost koja je ostvarena u nedjelju u 5h ujutro, što nikako nije logično. Razloge treba tražiti u prometnoj situaciji na autocesti A1 koja varira ovisno o brojnim incidentnim situacijama i koja je u konačnici limitirana i svojim kapacitetom. *Slika 33.* prikazuje stanje zagušenja na autocesti A1 odmah nakon NP Lučko (subota, oko 6h ujutro) i to daje odgovor na spomenutu nelogičnost, ali nameće i zaključak o maksimalnom broju vozila za koji uopće treba dimenzionirati naplatnu postaju. Zbog činjenice da ju slijedi autocesta s dva prometna traka, ***maksimalni kapacitet NP Lučko za ulazni smjer ne treba biti veći od 2 800 voz/h****;*



Slika 33. *Prikaz zagušenja prometa na autocesti A1 odmah nakon NP Lučko*
Izvor: [24]

- činjenica da je vrijednost od 2 898 voz/h ostvarena sa 7 naplatnih jedinica nameće vrlo važan zaključak da je ***kapacitet ulazne naplatne jedinice jednak otprilike 400 voz/h***. Dokaz tome je *i Grafikon 8.* iz kojeg se vidi da je u vrijeme kada postoji red čekanja (što je uvjet za mjerenje kapaciteta naplatne jedinice) prosječno vrijeme posluživanja vozila 9 sekundi, što opet znači:

$$C_{NJ\ Lučko-ulaz} = \frac{3600\left[\frac{s}{h}\right]}{9\left[\frac{s}{voz}\right]} = 400\ voz/h\ ;$$

- duljina reda čekanja pred ulaznom naplatnom postajom bilježena je prema izvještajima stanja na cestama za svaki pojedinačni sat analiziranog perioda. Na temelju tih podataka, ali i detaljnim razlaganjem prostora čekanja na segmente s različitim brojem prometnih traka proračunat je broj vozila u redu čekanja (za prosječnu duljinu zauzimanja vozila uzeto je 8 m/voz). ***Najveći broj vozila u redu čekanja, prema Grafikonu 8., javlja se u subotu u 10h ujutro i iznosi 2 314 vozila***. U tom trenutku duljina reda čekanja proteže se preko čvora Lučko i iznosi 5 km u smjeru čvora Jankomir i 8 km u smjeru čvora Buzin. Jasno je da su time značajno narušeni lokalni prometni tokovi, ali i svi ostali tranzitni prometni tokovi koji prolaze zagrebačkom obilaznicom i čvorom Lučko.

Navedeni zaključci izuzetno su značajni za ovaj rad jer se direktno odnose na izvornu problematiku koju rad obrađuje, a to je analiza redova čekanja na čvoru Lučko. Utvrđeni kapacitet naplatne postaje prilagođen je kapacitetu autoceste A1, međutim to nije dovoljno za opsluživanje vršne sezonske prometne potražnje. Zbog toga nastaju veliki redovi čekanja koji narušavaju kvalitetu i sigurnost ostalih prometnih tokova na čvoru Lučko, te produljuju vrijeme putovanja, smanjuju udobnost putovanja, a značajno povećavaju i onečišćenje okoliša.

3.4.2. Propusna moć izlaznih naplatnih postaja Lučko i Demerje

Vozila koja dolaze iz smjera Karlovca nemaju negativni utjecaj na čvor Lučko. Razlog tome je naplatna postaja Lučko koja predstavlja usko grlo prometa, a u tom smjeru nalazi se prije čvora Lučko. Sam čvor i prometnica koja povezuje naplatnu postaju sa čvorom moraju zapravo biti projektirani za prometno opterećenje koje je jednako kapacitetu izlazne naplatne postaje, a taj kapacitet je zbog duljeg prosječnog vremena posluživanja vozila značajno manji nego onaj ulazni koji je obrađen ranije.

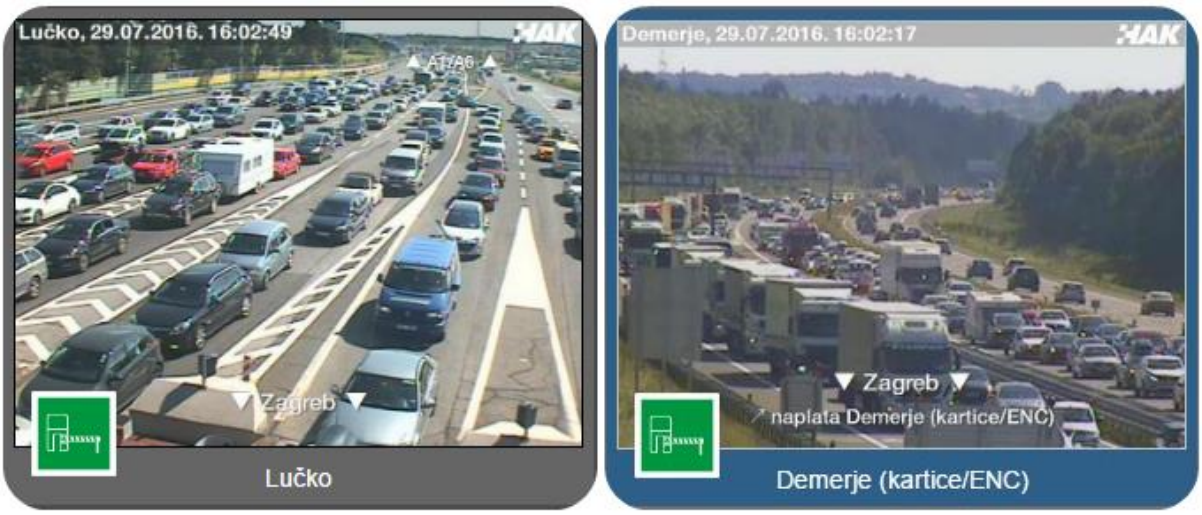
Naplata cestarine obavlja se na dvije naplatne postaje: NP Lučko i NP Demerje. Projekt izgradnje NP Demerje tri kilometra prije NP Lučko iz smjera Karlovca realiziran je 2009. godine, a namijenjen je bezgotovinskoj naplati cestarine, dok NP Lučko zadržava samo funkciju gotovinske naplate. Zona odrađene rekonstrukcije ukupne je duljine 4 557 metara. Uz postojeći kolnik autoceste (smjer Karlovac – Zagreb) dograđena su dva vozna traka širine 2 × 3,75 m, zaustavni trak širine 2,50 m te bankina širine 1,50 m. Plato NP Demerje sastoji se od ukupno 10 naplatnih jedinica, od čega su dvije isključivo vezane za elektronsku naplatu cestarine (ENC, bez zaustavljanja), dok je 8 prolaza namijenjeno potrebama beskontaktne kartične naplate. Postojeća NP Lučko koristi se i dalje za gotovinsko plaćanje cestarine, a sudionici u prometu, koji u sklopu NP Demerje obave bezgotovinsku naplatu cestarine, neometano prometuju kroz zonu naplate Lučko i to putem dva prolaza širine 3,50 m, razmaknuta uzdignutim otokom širine 2,00 m [25].

Prema dostupnim podacima [25], rekonstruirana NP Lučko ima izlazni kapacitet 1 750 voz/h, dok NP Demerje ima izlazni kapacitet 9 400 voz/h. To znači da je ukupni izlazni kapacitet s autoceste na NP Lučko i NP Demerje 11 150 voz/h. Navedni podaci prikazani su u *Tablici 24*.

Tablica 24. *Teorijski izlazni kapacitet naplatnih postaja Lučko i Demerje*, [25]

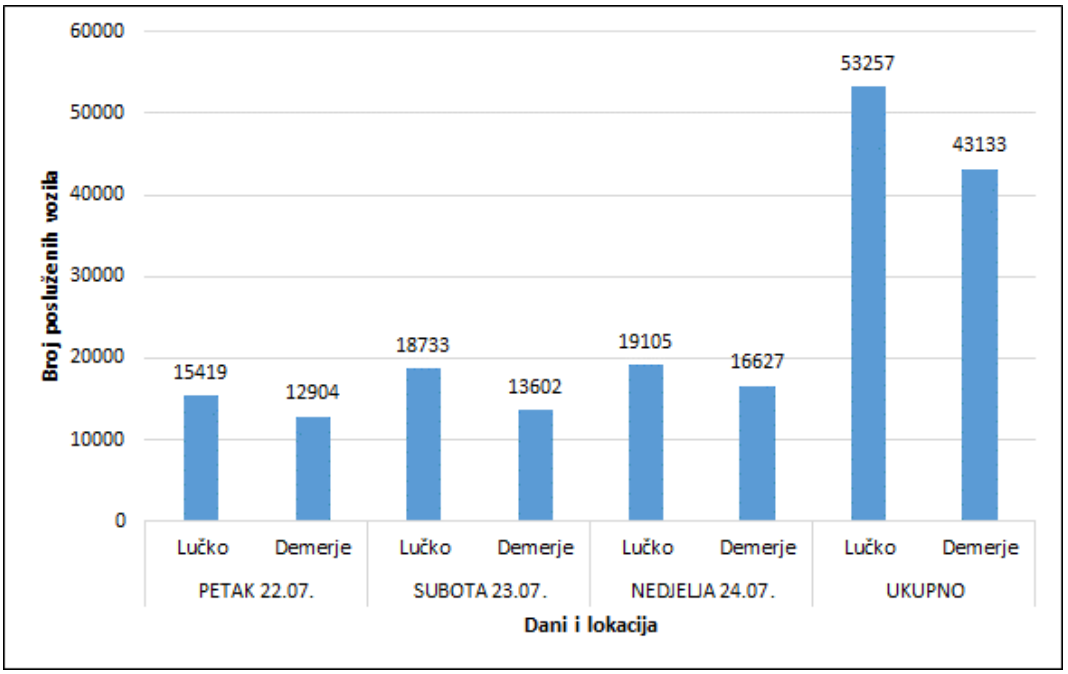
Lokacija naplatne postaje	Sustavi naplate cestarine	Broj prolaza	Kapacitet prolaza	Ukupno izlazni kapacitet
			[voz/h]	*[voz/h]*
DEMERJE	**ENC** (bez zaustavljanja, prolazna brzina 40-60 km/h; 900 - 1100 voz/h)	2	1.100	2.200
	Bezkontaktna kartična naplata (700 - 900 voz/h)	8	900	7.200
	Ukupno NP Demerje	10		9.400
LUČKO	**Ručna naplata**	10	175	1.750
UKUPNO	**NP Demerje + NP Lučko**	20		11.150

Navedeni podaci jednostavno ne mogu biti točni, jer da je tomu tako nikada se ne bi stvarali redovi čekanja pred NP Lučko ili NP Demerje. Naime, kako je pokazano ranije u proračunu propusne moći čvora Lučko, prema HCM-u je maksimalna propusna moć dvotračne prometnice 4 800 EJA/h. Budući da od Karlovca prema NP Demerje i Lučko vodi autocesta s dva prometna traka, navedeni kapacitet naplatnih postaja višestruko premašuje maksimalno moguću prometnu potražnju. Upečatljivije je možda navesti da navedeni kapacitet naplatne jedinice na NP Demerje (900 voz/h) podrazumijeva prosječno vrijeme posluživanja vozila od svega 4 sekunde, što je apsolutno nemoguće postići. *Slika 34.* prikazuje kilometarske kolone pred naplatnim postajama Lučko i Demerje, što nije rijetkost u vrijeme turističke sezone.



Slika 34. *Redovi čekanja za izlaz sa autoceste A1 pred NP Lučko i NP Demerje*
Izvor: [24]

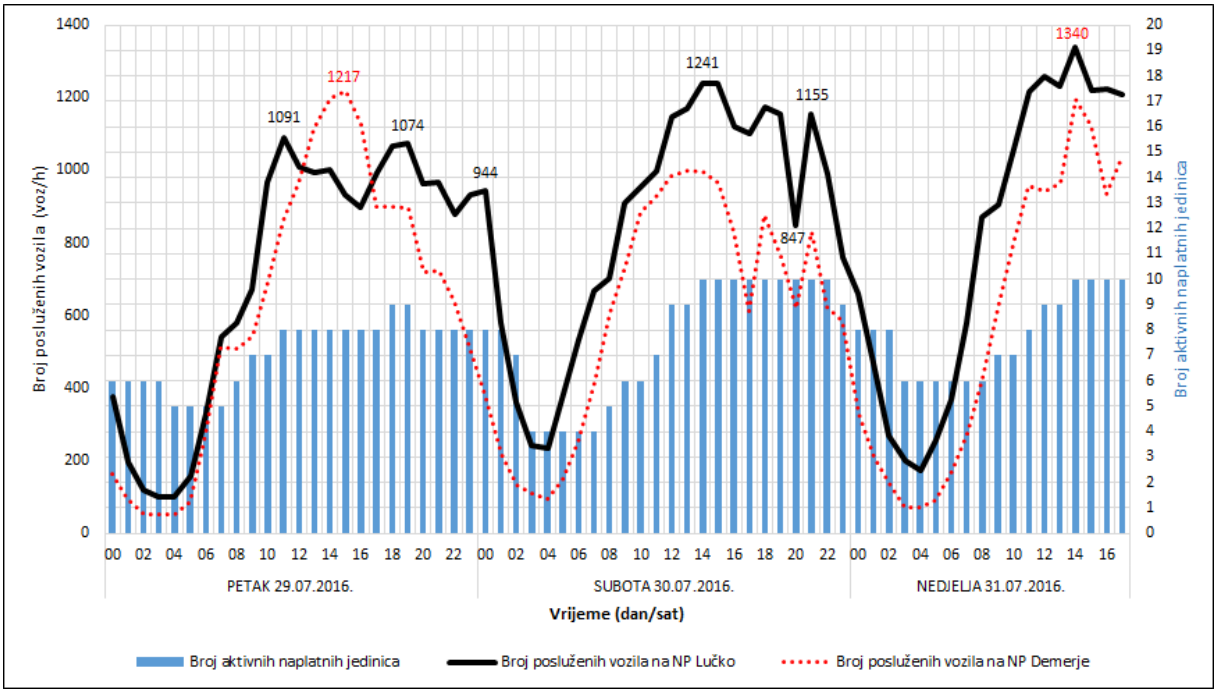
Zanimljivo je vidjeti i odnos prometnog opterećenja NP Lučko i NP Demerje. Ono je na Demerju manje, i to za otprilike 20 % u odnosu na NP Lučko (*Grafikon 9.*). Važna je i činjenica da je prosječno vrijeme bezgotovinske naplate po vozilu na NP Demerje ustvari jednako prosječnom vremenu gotovinske naplate na NP Lučko (dokazano kasnije u radu). Redovi čekanja na NP Lučko značajno su veći nego na NP Demerje, a to je dakle posljedica samo veće prometne potražnje. ***Ovo navodi na zaključak kako je NP Demerje zapravo nedovoljno iskorištena.***



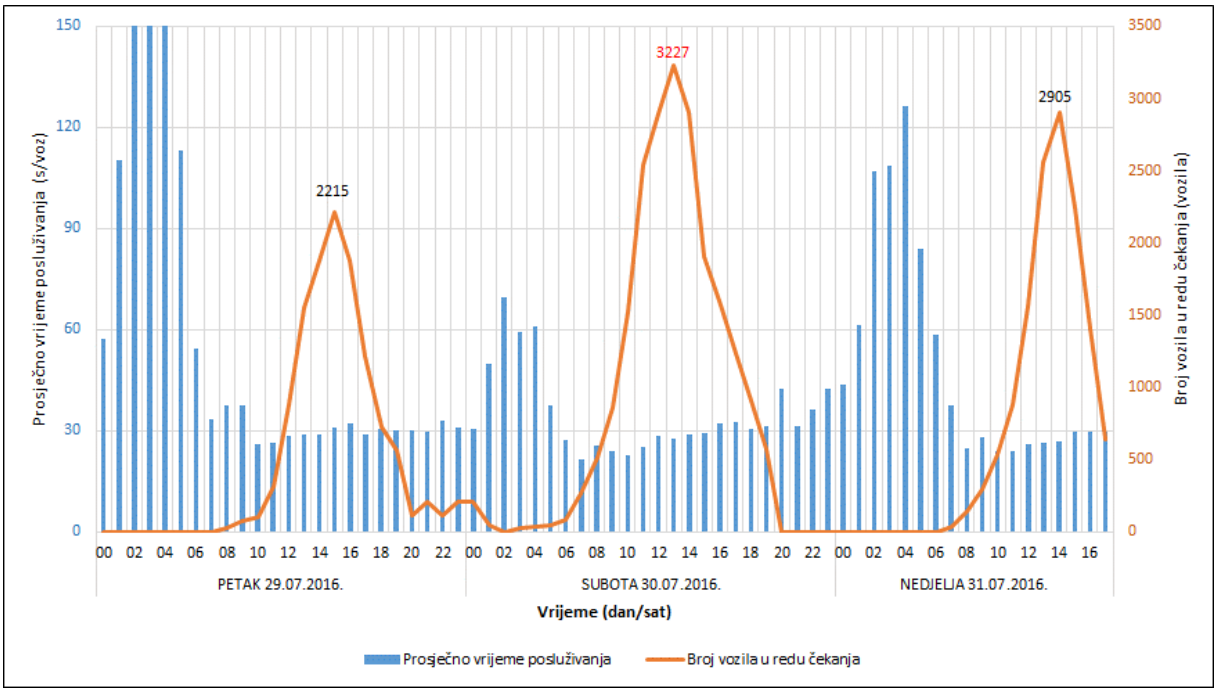
Grafikon 9. *Odnos broja posluženih vozila izlaznog smjera na NP Lučko i NP Demerje*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.

Kao i u prethodnom poglavlju, i ovdje su u nastavku priloženi grafikoni (*Grafikon 10.* i *Grafikon 11.*) koji su dobiveni na temelju dostupnih podataka (ustupljeni od ARZ d.d.), a prikazuju:

- satni broj posluženih vozila na NP Lučko i NP Demerje
- broj aktivnih naplatnih jedinica na NP Lučko
- prosječno vrijeme posluživanja vozila na NP Lučko i
- broj vozila u redu čekanja ispred NP Lučko.



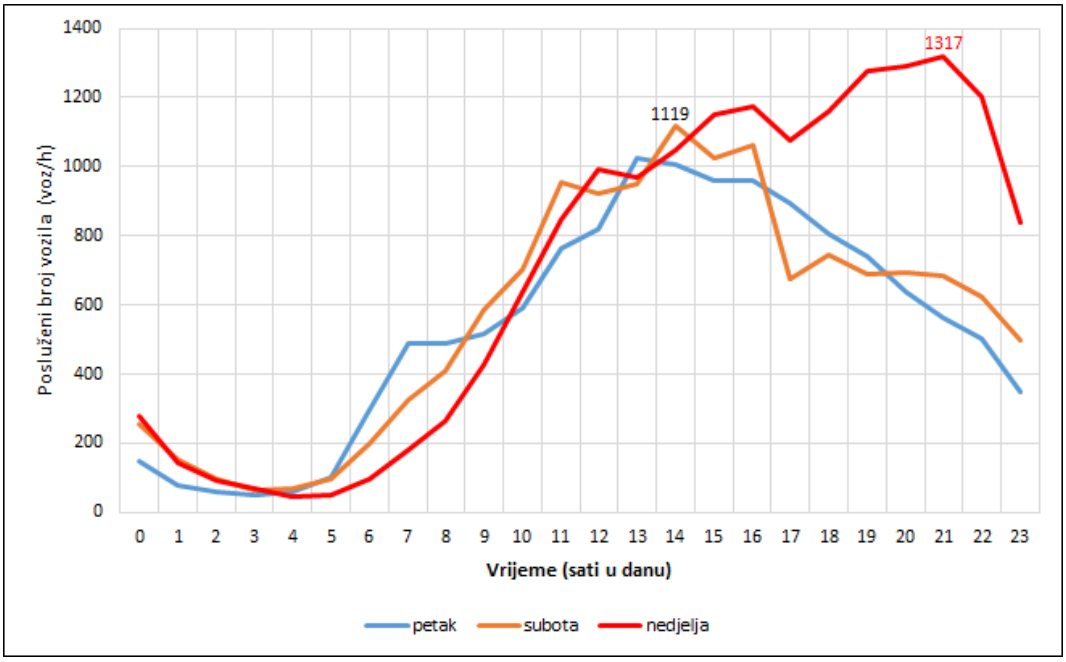
Grafikon 10. *Broj posluženih vozila prilikom izlaska s autoceste A1 na NP Lučko i Demerje*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.



Grafikon 11. *Prosječno vrijeme posluživanja na NP Lučko pri izlasku s autoceste A1*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.

Iz priloženih grafikona može se izdvojiti par važnih zaključaka:

- maksimalna zabilježena vrijednost broja posluženih vozila na NP Lučko iznosi 1 340 voz/h, i to pri 10 radnih naplatnih jedinica. S obzirom i na ostale zabilježene vrijednosti, ***može se zaključiti da je kapacitet naplatne jedinice izlaznog smjera (uz isključivo gotovinsku naplatu) na NP Lučko jednak 130 voz/h***. Ta vrijednost je 25 % niža od teorijske vrijednosti navedene u *Tablici 24.* (175 voz/h), i trostruko niža od kapaciteta naplatne jedinice ulaznog smjera;
- maksimalna zabilježena vrijednost broja posluženih vozila na NP Demerje iznosi 1 217 voz/h. Upravo je nevjerojatno da je u *Tablici 24.* navedena teorijska vrijednost od 9 400 voz/h, a stvarni kapacitet je dakle 87 % manji od toga. ***Ukupno dakle, NP Lučko i NP Demerje praktično mogu poslužiti najviše 2 557 voz/*h** (a ne 11 150 voz/h kako je navedeno u *Tablici 24.*);
- prometnica iza NP Lučko ima tri prometne trake koje se ubrzo razdvajaju ovisno o željenim smjerovima kretanja vozila. ***Može se okvirno zaključiti da bi optimalni kapacitet za koji bi NP Lučko i NP Demerje trebali biti dimenzionirani bio oko 3 500 voz/h.*** To bi značilo da ukoliko NP Demerje ostane nepromijenjeno (10 naplatnih jedinica), na NP Lučko bi moglo biti 17 aktivnih naplatnih jedinica, a da se ne stvaraju zagušenja iza naplatne postaje. Ovime se nikako ne preporuča izgradnja dodatnih naplatnih jedinica, već se samo proučavaju moguće granične vrijednosti što će kasnije olakšati donošenje prijedloga optimalne regulacije;
- redovi čekanja pred NP Lučko stvaraju se sva tri analizirana dana u velikoj količini, a maksimalna proračunata vrijednost je 3 227 vozila (pri čemu je za prosječnu duljinu zauzimanja vozila ovdje uzeto 6 m/voz). Duljina reda čekanja u tom razdoblju bila je 9 km gledajući od NP Lučko;
- iz *Grafikona 11.* vidi se da prosječno vrijeme posluživanja vozila na NP Lučko (u vrijeme kada postoji red čekanja što je uvjet za analizu) poprima vrijednosti u intervalu 22 – 34 s/voz. ***Može se okvirno zaključiti da je prosječno vrijeme posluživanja izlazne NP Lučko 28 s/voz.*** S obzirom na izmjereni maksimalni kapacitet NP Demerje od 1 217 voz/h na 10 naplatnih jedinica, dobiva se da je prosječno vrijeme posluživanja na NP Demerje jednako 29,6 s/voz. Ipak, prema dostupnim podacima za razdoblje 22.07. – 24.07.2016., vidi se da NP Demerje svoj kapacitet postiže nedjeljom navečer kada autocestom većinski prolaze „domaći“ vozači (*Grafikon 12.*). Tada je izmjereno posluženih 1 317 voz/h, ***što daje prosječno vrijeme posluživanja NP Demerje od također 28 s/voz.***



Grafikon 12. *Posluženi satni broj vozila na NP Demerje u razdoblju 22.07.-24.07.2016.*
Izvor: ARZ d.d., 07.2016.

3.4.3. Utvrđivanje prometne potražnje na čvoru Lučko

U ovom radu više puta se poistovjećivala upotreba veličina prometnog optrećenja i prometne potražnje. Iako te dvije veličine nikako nisu istoznačnice, stvar je u tome da su u slučaju stabilnog prometnog toka te dvije veličine jednake. Ova tvrdnja također predstavlja određeno pojednostavljenje u definiranju odnosa te dvije veličine, ali slijedi logiku razmišljanja da ukoliko je prometna potražnja manja od kapaciteta prometnice (ili bilo kojeg infrastrukturnog elementa), sva vozila koja žele njome proći u određenom vremenu će to i ostvariti.

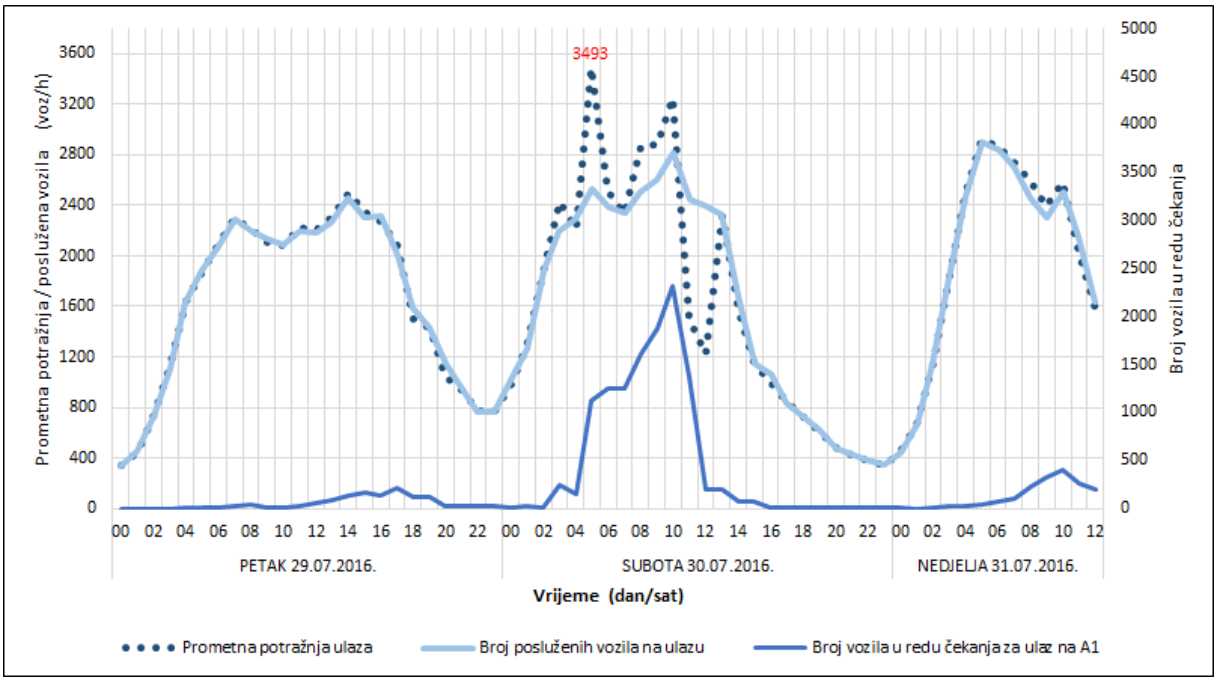
U slučaju naplatne postaje Lučko, kako je to pokazano ranije, u vršnim prometnim opterećenjima nikako ne vladaju uvjeti stabilnog prometnog toka. To onda znači da broj vozila koja su poslužena na naplatnoj postaji (prikazano *Grafikonom 7.* i *Grafikonom 10.*) samo odražavaju ograničenost kapaciteta, a nisu izraz stvarne potražnje. Prema [1], prometna potražnja, odnosno mjerodavni promet određuje se dinamičkim brojanjem prometa pri čemu se obuhvaćaju:

1) vozila koja su prošla infrastrukturnim objektom u mjerenom periodu
2) vozila u repu čekanja na kraju mjerenog perioda.

Budući da su u ovom slučaju poznate obje potrebne veličine, može se odrediti prometna potražnja naplatne postaje Lučko, zasebno za oba smjera, u analiziranom periodu (29.07.2016. – 31.07.2016.). Treba još jednom napomenuti da se za potrebe ovog rada do broja vozila u repu čekanja nije došlo brojanjem, već praćenjem i bilježenjem izvještaja o stanju prometa na

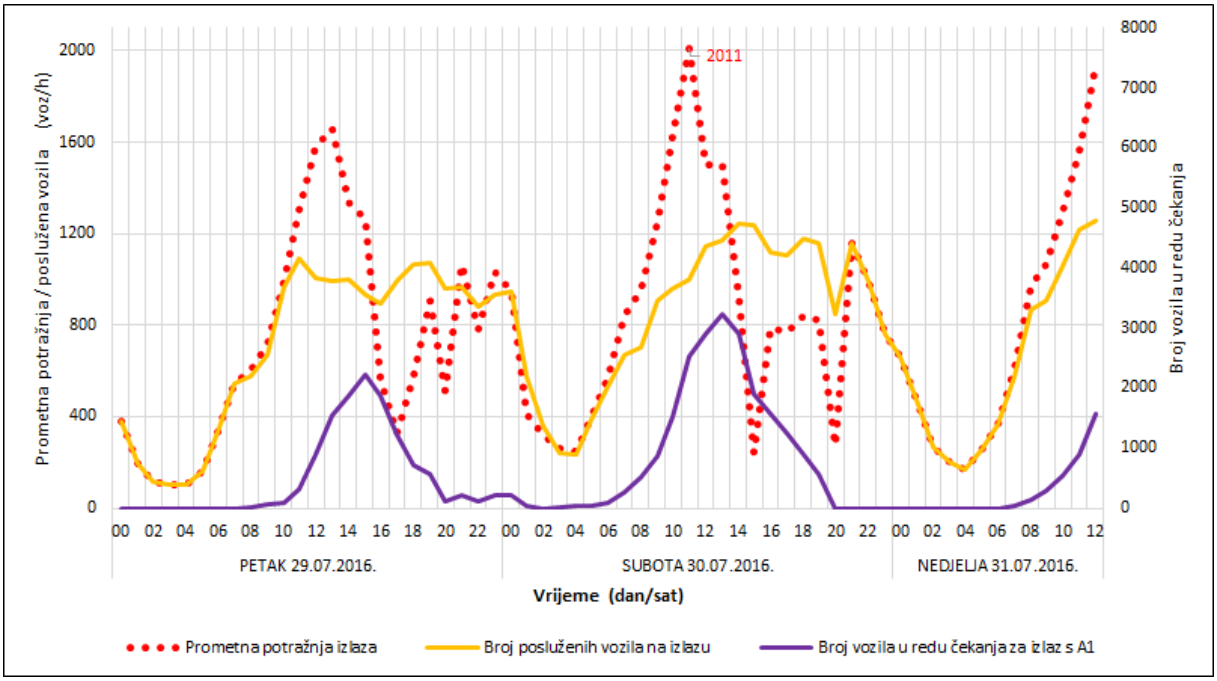
cestama [26]. Ta metodologija će zasigurno značajno utjecati na dobivene rezultate, međutim općenite značajke dobivenih krivulja ne bi trebale biti narušene.

Na *Grafikonu 13.* prikazana je krivulja potražnje ulaza na autocestu A1 na naplatnoj postaji Lučko. Radi kvalitetnije analize prikazane su i krivulja broja posluženih vozila po satu te krivulja broja vozila u redu čekanja. Iz grafikona se vidi da se krivulja prometne potražnje u potpunosti poklapa sa krivuljom broja posluženih vozila u periodu kada nije formiran red čekanja pred naplatnom postajom. Najveća prometna potražnja javlja se u jutarnjim satima subote kada prema izračunu iznosi 3 493 voz/h. Zanimljivo je primijetiti da se redovi čekanja u nekim trenucima formiraju pri prometnoj potražnji od 2 400 voz/h, dok ima slučajeva kada ni potražnja od 2 900 voz/h ne uzrokuje redove čekanja. Kako je već ranije navedeno, razlog leži u trenutnom aktivnom broju naplatnih jedinica, kao i u prometnoj situaciji na autocesti A1.



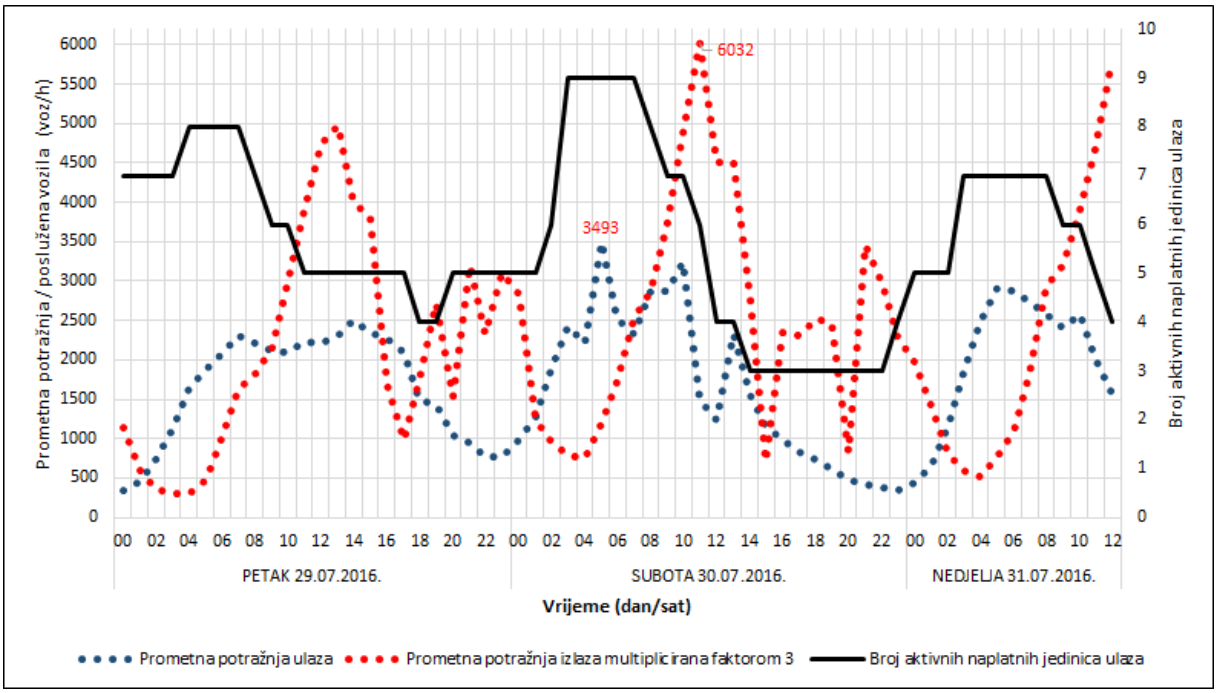
Grafikon 13. *Prometna potražnja ulaznog smjera NP Lučko*

Na *Grafikonu 14.* prikazane su iste veličine, samo za izlazni smjer autoceste A1 na naplatnoj postaji Lučko. Krivulje ne uključuju naplatnu postaju Demerje zbog činjenice da nije bilo moguće bilježiti red čekanja na istoj. Naime, kamere HAK-a ne pokrivaju precizno taj dio autoceste, a i na izvještajima stanja na cestama nema potrebnih podataka. Zaključci se ne razlikuju u odnosu na prethodni grafikon, osim činjenice da se javljaju veće oscilacije krivulje prometne potražnje, te da je maksimalna proračunata vrijednost prometne potražnje manja, što je logično budući da je vrijeme posluživanja izlaza višestruko veće od onog na ulaznom dijelu naplatne postaje.



Grafikon 14. *Prometna potražnja izlaznog smjera na NP Lučko*

Zanimljivo je još usporediti krivulje prometne potražnje ulaza i izlaza naplatne postaje Lučko na istom grafikonu (*Grafikon 15*). Budući da broj aktivnih naplatnih jedinica po pojedinom smjeru ovisi o njihovoj prometnoj potražnji, takav grafikon pokazuje razinu kvalitete organizacije naplatne postaje Lučko, odnosno pravovremenost donošenja odluka o promjeni broja aktivnih naplatnih jedinica po smjeru rada.



Grafikon 15. *Analiza pravovremenosti donošenja odluka o promjeni broja aktivnih naplatnih jedinica po smjeru rada na NP Lučko*

Kako je vrijeme posluživanja vozila za izlazni smjer trostruko veće od onog na ulaznom smjeru, radi lakšeg razumijevanja prometna potražnja izlaznog smjera multiplicirana je faktorom 3. Iz *Grafikona 15.* se vidi kako broj aktivnih naplatnih jedinica ulaznog smjera prati kretanje prometne potražnje istog smjera. To je dokaz pravilne organizacije rada na naplatnoj postaji Lučko.

3.5. Utvrđena problematika analiziranog područja

Na temelju detaljno odrađene analize čvora Lučko i naplatnih postaja Lučko i Demerje, potrebno je prije određivanja prijedloga mjera poboljšanja navesti determiniranu problematiku cjelokupnog analiziranog područja.

Početna razmišljanja svakako su nametala uzroke nepovoljnih prometnih prilika na čvoru Lučko u vidu nedovoljne propusne moći naplatne postaje Lučko, ali i u vidu kapacitivnih ograničenja određenih infrastrukturnih elemenata čvora Lučko. Međutim, analiza postojećeg stanja infrastrukturnih elemenata, kao i analiza propusne moći i razine usluge čvora Lučko pokazala je da čvor u potpunosti udovoljava Pravilnikom [3] propisanim projektnim parametrima kao i zahtjevima prometne potražnje. Također je pokazano da i buduća prometna potražnja (do 2035. godine) neće nadmašiti kapacitete analiziranih ključnih segmenata čvora Lučko. Stoga se kao problematični elementi analiziranog područja obuhvata prioritetnim redom s obzirom na temu rada navode:

1) zagušenja čvora Lučko i obilaznice grada Zagreba koja nastaju kao posljedica formiranja redova čekanja na naplatnoj postaji Lučko u vrijeme vršne sezonske prometne potražnje;
2) nedovoljna propusna moć obilaznice grada Zagreba (osobito dionice Jankomir – Lučko) u vrijeme vršnih sezonskih prometnih opterećenja, ali sve više i u ostalim razdobljima kroz godinu;
3) velika razlika u prometnom opterećenju autoceste A1 (dionice Zagreb – Karlovac) u sezonskom dijelu godine za razliku od ostatka godine što znatno otežava određivanje potrebnog broja prometnih traka na dionici;
4) benzinska postaja (PUO Stupnik) na autocesti A1 neposredno nakon naplatne postaje Lučko koja ima negativan utjecaj na prolazni prometni tok autoceste i posljedično smanjenje propusne moći naplatne postaje Lučko;
5) nedovoljna iskorištenost naplatne postaje Demerje;
6) kapacitivno predimenzionirana prometnica nakon naplatne postaje Lučko u smjeru Zagreba;
7) utjecaj vozila koja neposredno prije naplatne postaje Lučko u smjeru Karlovca unatoč zabrani obavljaju radnju lijevog skretanja (na Jadransku aveniju prema Zagrebu) narušavajući time propusnu moć i osobito sigurnost prometa na prilaznoj prometnici naplatne postaje Lučko.

Konkretno navedeni problematični elementi, koji su proizašli iz analize postojećeg stanja područja obuhvata, uzrokuju negativne posljedice koje se općenito mogu izraziti kao:

- smanjenje sigurnosti prometa na analiziranom području;
- povećanje negativnih ekoloških pokazatelja kao što su količina ispušnih plinova i buka prometa;
- smanjena učinkovitost prometnog sustava (povećanje vremena putovanja, potrošnje pogonskog goriva, broja radnih sati prometnog osoblja i dr.).

4. PRIJEDLOZI MJERA POBOLJŠANJA POSTOJEĆEG STANJA

Na temelju odrađene analize postojećeg stanja i detektiranja problematike analiziranog područja, potrebno je donijeti odgovarajuće mjere odnosno prijedloge s ciljem otklanjanja istih i stvaranja pogodnih uvjeta prometa. Mogućih prijedloga rješenja može biti više, a oni ne moraju nužno biti međusobno kompatibilni. Daljnjom njihovom obradom deskriptivnim, analitičkim i simulacijskim alatima, izabire se ono najbolje. Ipak, potrebno je naglasiti da su zbog opsega ovog rada prijedlozi rješenja i njihova analiza obrađeni u skromnijem obliku, odnosno, već postojeća rješenja ove problematike kratko će se opisati te usporediti sa rezultatima analize postojećeg stanja iz ovog rada. Detaljnija analiza mogućih rješenja može predstavljati zanimljivu tematiku nekom drugom radu kojem će teorijska osnova raskrižja izvan razine i analiza postojećeg stanja čvora i naplatne postaje Lučko, obrađene u ovom radu, poslužiti kao jedan od literaturnih izvora.

Varijacije prometa na autocestama i ostalim turističkim prometnicama su velike (sezona, van sezone), te je u takvim slučajevima posebno osjetljivo odabrati optimalno rješenje. Stoga je posebno važno u kreiranju rješenja takvih problematika situaciju promatrati sustavno. To zapravo znači da je optimalno ono rješenje (ili kombinacija rješenja) koje zadovoljava potrebe prometne potražnje u sezonskim mjesecima, a istodobno ne predstavlja kapacitivnu predimenzioniranost infrastrukturnih objekata i višak ljudske radne snage u ostalom dijelu godine. Također je važno i da odabrano rješenje osigura razvoj i ostvarenje potencijala lokalne zajednice. Na taj način, i jedino na taj način, rješenja će biti ekonomski isplativa i društveno korisna, uz nužan uvjet ekološke prihvatljivosti.

Za analiziranu problematiku već su ranije kreirana određena rješenja te je čak i pokrenuta njihova realizacija. Na temelju *Zakona o cestama* (NN broj 84/2011, 22/2013, 54/2013 i 148/2013) Vlada Republike Hrvatske je u prosincu 2013. godine donijela *Program građenja i održavanja javnih cesta za razdoblje od 2013. do 2016. godine*. Navedeni Program temelji se na *Strategiji prometnog razvitka Republike Hrvatske*, gdje su jasno utvrđeni ciljevi prometnog razvitka te je kao takva temelj za donošenje svih planskih, zakonskih i normativnih akata u području prometa.

Ovaj četverogodišnji Program građenja i održavanja javnih cesta nastavak je prethodnih programa, u kojima su realizirane i neke investicije važne za tematiku ovog rada. Tako je, na osnovi *Programa građenja i održavanja za razdoblje od 2009. do 2012. godine*, završena rekonstrukcija naplatne postaje Lučko i novoizgrađena naplatna postaja Demerje, koja je i puštena u promet u lipnju 2009. godine. Također, u studenom 2010. godine pušten je u promet čvor Donja Zdenčina koji je udaljen od naplatne postaje Lučko 14,25 km. Čvor Donja Zdenčina predstavlja prvi mogući ulaz/izlaz sa autoceste A1 od naplatne postaje Lučko, te time može imati ulogu u smanjenju prometnog opterećenja naplatnih postaja Lučko i Demerje u vršnim ljetnim prometnim opterećenjima.

Novim Programom predviđale su se aktivnosti vezane za sanaciju postojeće četverotračne dionice autoceste Zagreb – Karlovac, dogradnju iste dionice na razinu šesterotračne autoceste, proširenje naplatne postaje Demerje i uklanjanje naplatne postaje Lučko, te aktivnosti projektiranja na novoj obilaznici grada Zagreba. Detaljan opis planiranih investicija, vezanih za tematiku ovog rada, dan je u *Tablici 25*.

Tablica 25. *Planirana ulaganja u izgradnju autocesta za razdoblje od 2013. do 2016. godine*

	NAZIV PLANIRANE AKTIVNOSTI	PLANIRANA FINANCIJSKA SREDSTVA 2013.-2016.	2013.	2014.	2015.	2016.
1.	*Glavni i izvedbeni (idejni projekt) i građevinska (lokacijska) dozvola - dogradnja dionice Zagreb - Karlovac na šesterotračnu autocestu*	16,6	0,0	6,0	10,6	0,0
2.	*Dogradnja dionice Zagreb - Karlovac na šesterotračnu autocestu*	290,0	0,0	0,0	0,0	290,0
3.	*Projekt sanacije postojeće četverotračne dionice Zagreb - Karlovac*	4,8	0,0	2,5	2,3	0,0
4.	*Sanacija postojeće četveroračne dionice Zagreb - Karlovac*	80,0	0,0	0,0	0,0	80,0
5.	*Proširenje naplatne postaje Demerje (lokacijska i građevinska) i uklanjanje NP Lučko*	1,6	0,0	0,8	0,8	0,0
6.	*Proširenje naplatne postaje Demerje i uklanjanje NP Lučko*	30,0	0,0	0,0	0,0	30,0
7.	***NOVA OBILAZNICA ZAGREB (ukupno)***	34,0	4,0	10,0	10,0	10,0
	Luka(A2) – Gradna(A3)	6,7	0,7	2,0	2,0	2,0
	Gradna(A3) – Horvati(A1)	6,7	0,7	2,0	2,0	2,0
	Horvati(A1) – Mraclin(A11)	6,8	0,8	2,0	2,0	2,0
	Mraclin(A11) – Ivanić Grad(A3)	6,8	0,8	2,0	2,0	2,0
	Ivanić Grad(A3) – Zelina(A4)	7,0	1,0	2,0	2,0	2,0

Iznosi su u milijunima kuna
Izvor: [27]

Iz *Tablice 25.* vidljivo je da su tijekom 2014. i 2015. godine bili planirani izrada potrebne dokumentacije i odgovarajućih dozvola (lokacijska, građevinska), a u 2016. godini građevinski radovi dogradnje dionice Zagreb – Karlovac na šesterotračnu autocestu, odnosno proširenja naplatne postaje Demerje i uklanjanja naplatne postaje Lučko. Iako spomenute investicije nisu odrađene (svakako ne građevinski dio), jasno je vidljiv način kako je planirano riješiti problematiku preopterećenja naplatne postaje ulaska na autocestu A1 i protoka na dionici Zagreb – Karlovac.

Također, u *Tablici 25.* vidljivo je i planirano ulaganje u projektne aktivnosti nove obilaznice grada Zagreba. Nova obilaznica, odnosno zagrebački prsten, ima također značajnu ulogu u rješavanju problematike čvora i naplatne postaje Lučko. Međutim, radi se o financijski vrlo zahtjevnom projektu za koji, barem trenutno, nema dostupnih sredstava. Dokaz tome je i donošenje *Izmjena i dopuna programa građenja i održavanja javnih cesta u razdoblju od 2013. do 2016. godine*. Između ostalog, izmjene se odnose i na smanjenje planiranih sredstava ulaganja u projektnu dokumentaciju izgradnje nove obilaznice grada Zagreba, kako je navedeno u *Tablici 26*.

Tablica 26. *Izmjena planiranih ulaganja za razdoblje od 2013. do 2016. godine*

NAZIV PLANIRANE AKTIVNOSTI	PLANIRANA FINANCIJSKA SREDSTVA 2013.-2016.	2013.	2014.	2015.	2016.
NOVA OBILAZNICA ZAGREB (ukupno)	4,3	4,3	0,0	0,0	0,0
Luka(A2) – Gradna(A3)	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0
Gradna(A3) – Horvati(A1)	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0
Horvati(A1) – Mraclin(A11)	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0
Mraclin(A11) – Ivanić Grad(A3)	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0
Ivanić Grad(A3) – Zelina(A4)	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0

Izvor: [28]

Iako realizacija rješenja ne prati formirane rokove, može se zaključiti da su rješenja zapravo poznata i da odgovaraju postavljenoj tezi sustavnog promatranja i iznalaženja cjelokupnog rješenja. Ipak, prijedlozi će biti upotpunjeni dodatnim rješenjem koje se odnosi na infrastrukturne promjene pojedinih segmenata samog čvora Lučko, ali i postojeće zagrebačke obilaznice. Prijedlozi rješenja su stoga slijedeći:

V1) izgradnja nove zagrebačke obilaznice (tzv. zagrebačkog prstena)
V2) proširenje naplatne postaje Demerje i uklanjanje ulazne naplatne postaje Lučko
V3) dogradnja dionice Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne autoceste
V4) infrastrukturne promjene na čvoru Lučko i postojećoj zagrebačkoj obilaznici.

Svakako da osim navedenih prijedloga rješenja postoje i druge opcije koje bi znakovito utjecale na problematiku analiziranog područja. U prvom redu tu svakako pripada:

- uvođenje drugačijeg sustava naplate cestarine (vinjete, GPS tehnologija)
- izgradnja brze ceste Kutina – Sisak – Karlovac
- rješenja bazirana na inteligentnim transportnim sustavima (ITS)
- proširenje postojeće zagrebačke obilaznice na razinu šesterotračne prometnice itd.

Kako je već navedeno, zbog opsega ovog rada ta rješenja neće biti razmatrana, a u nastavku rada opisno su obrađeni prvotno navedeni prijedlozi, a pogodna se i simulacijski analiziraju i evaluiraju programskim alatom PTV Vissim.

4.1. V1: nova zagrebačka obilaznica – „zagrebački prsten“

Zagreb kao najvažnije i najveće prometno križanje u Hrvatskoj ishodište je i odredište mnogim prometnim putovanjima koja se ostvaruju preko šest autocestovnih pravaca. Svi oni završavaju, ili započinju, na obodnoj južnoj prometnici – postojećoj zagrebačkoj obilaznici. Kako je i ranije navedeno, uz prometno opterećenje tranzitnim prometom, obilaznica preuzima i velik dio unutrašnjeg i izvorišno-ciljnog prometa Zagreba, pri čemu su neki dijelovi obilaznice već danas postali gradskom prometnicom (posebno dionica Jankomir – Lučko i čvor Lučko). S obzirom na rezultate izrađene prognoze prometa za sljedećih 20 godina, očekuje se zadržavanje

stope rasta prometnog opterećenja što vodi k uvjetima odvijanja prometa neprimjerenima prometnicama visoke kategorije.

Primarni cilj nove zagrebačke obilaznice (zagrebačkog prstena) je odvajanje tranzitnog prometa od gradskog prometa i njegovo preusmjeravanje oko Zagreba. Također, vrlo važna je i činjenica da bi buduća nova obilaznica bila unutar sustava naplate što bi omogućilo kontinuitet vožnje tranzitnih tokova. Na budućim čvorištima vršila bi se naplata na bočnim cestarinskim prolazima, a tranzitnom prometu se omogućuje nesmetan prolaz čime bi se izbjeglo stvaranje redova čekanja na čeonim naplatnim postajama pri ulazu i izlazu iz grada Zagreba. Planirana trasa nove zagrebačke obilaznice sa nazivima planiranih čvorišta prikazana je na *Slici 35*.



Slika 35. *Planirana trasa nove zagrebačke obilaznice (prstena),* [29]

Početak odvajanja, a ujedno i početak južnog koridora zagrebačke obilaznice, predviđen je u čvorištu *Luka (Pojatno)*, gdje bi se tranzitni promet odvajao od autoceste A2, a onaj sa ciljem u Zagrebu bi nastavio postojećom autocestom A2 na naplatu. Nakon toga, koridor prolazi zapadno od Zaprešića, te preko predviđenih čvorišta *Pušća* i *Šibice*, prelazeći Savu dolazi do interregionalnog čvorišta *Gradna* gdje se križa sa autocestom A3. Dalje trasa, nastavlja na jug, te prolazeći tunelom Molvice ispod Svete Nedelje, stiže do *Rakovog Potoka*, gdje skreće na jugoistok i presijeca se sa autocestom A1 (A6) u interregionalnom čvorištu *Horvati*. Preko predviđenih novih čvorišta *Dragonožec* i *Markuševec Turopoljski*, nastavlja prema interregionalnom čvorištu *Mraclin* u kojem se križa s autocestom A11. Iza čvorišta Mraclin, trasa skreće na sjeveroistok prema *Rakitovcu* i trima mostovima prelazi kanal Sava-Odra, rijeku Odru i rijeku Savu, da bi došla do interregionalnog čvorišta u *Ivanić Gradu* kojim se ponovno

povezuje sa autocestom A3. Dalje, nastavlja na sjever do *Sv. Helene* i križanja sa autocestom A4 [29].

Ukupna duljina cijele trase iznosi približno 100 km, a predviđena je kao autocesta sa po dva vozna traka širine 3,75 m, i zaustavnim trakom širine 2,50 m, u svakom smjeru. Kolnici su međusobno odijeljeni razdjelnim pojasom širine 4,00 m. Izgradnjom „prstena“ došlo bi do rasterećenja prometa na postojećoj obilaznici, a istovremeno, na novoj obilaznici bi se zadržala visoka razina uslužnosti. Prema već zastarjelim prognozama iz *Prostorno-prometne studije cestovno-željezničkog sustava šireg područja grada Zagreba* [29], da je izgrađena nova zagrebačka obilaznica PGDP bi u 2018. godini iznosio 53 711 voz/dan na postojećoj obilaznici i 19 616 voz/dan na novoj obilaznici grada Zagreba.

Ukratko, glavne koristi ovog rješenja su:

- bolja prometna povezanost šireg područja grada Zagreba i pretpostavka za njegov brži gospodarski razvoj;
- rasterećenje postojeće zagrebačke obilaznice od tranzitnog prometa odnosno izbjegavanje velikog volumena gradskog prometa na međugradskim koridorima;
- kontinuitet vožnje tranzitnog prometa unutar sustava naplate što ima za posljedicu smanjenje prometnog opterećenja naplatnih postaja Zaprešić, Lučko, Ivanja Reka i Sv. Helena.

Najveći nedostatak ovog rješenja svakako su veliki financijski troškovi otkupa zemljišta i izgradnje. Etapna realizacija projekta stoga se nameće kao imperativ, a prioriteti izgradnje okvirno bi trebali biti postavljeni na slijedeći način:

1) Pojatno (A2) – Gradna (A3) – Horvati (A1)
2) Horvati (A1) – Mraclin (A11) – Ivanić Grad (A3)
3) Ivanić Grad (A3) – Sv. Helena (A4).

Logika postavljenih prioriteta prati veličinu prometnog opterećenja dionica postojeće zagrebačke obilaznice, a optimalni raspored svakako treba donijeti na temelju detaljne analize tranzitnih prometnih tokova koji prometuju zagrebačkom obilaznicom te usklađivanjem sa ostalim planiranim projektima u području obuhvata.

Potrebno je još navesti da ovo rješenje, sa aspekta tematike ovog rada, svakako može biti upotpunjeno dogradnjom autoceste Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne prometnice. Tom kombinacijom rješenja razriješila bi se u potpunosti problematika stvaranja redova čekanja u vršnim sezonskim prometnim opterećenjima, a time i utjecaj na ostale tranzitne i lokalne prometne tokove.

4.2. V2: proširenje naplatne postaje Demerje i uklanjanje ulazne naplatne postaje Lučko

Naplatna postaja Lučko nalazi se u području istoimenog naselja čime značajno utječe na životne uvjete lokalnog stanovništva. Posebno se to odnosi na razinu buke i ekološke pokazatelje kao što je stupanj zagađenosti zraka ispušnim plinovima iz vozila. U uvjetima zagušenja prometa, taj aspekt je još i dodatno naglašen. Ovo rješenje podrazumijeva pomicanje (premještaj) ulazne čeone naplatne postaje sa sadašnje lokacije u Lučkom na lokaciju Demerje (3 km u smjeru Karlovca). Samim pomicanjem naplatnih jedinica redovi čekanja vezani uz turistički promet ne bi bili smanjeni, ali bi se ostvarili drugi pozitivni učinci kao što su:

- smanjenje buke prometa i zagađenja zraka na području naselja Lučko;
- rješenje problematike utjecaja redova čekanja na ostale tranzitne prometne tokove i lokalne prometne tokove koji prolaze zagrebačkom obilaznicom i čvorom Lučko;
- uklanjanje problematike vezane za benzinsku postaju (PUO Stupnik) koja je smještena neposredno nakon postojeće naplatne postaje u Lučkom.

Dodatne mogućnosti unutar ovog rješenja svakako su i:

- optimiziranje broja naplatnih jedinica što nije bilo moguće na lokaciji Lučko zbog prostorne ograničenosti (ovime se mogu i smanjiti redovi čekanja);
- veća propusna moć izlazne naplatne postaje Lučko koja bi u ovom slučaju samostalno funkcionirala na postojećoj lokaciji;
- kompatibilnost sa svim ostalim prijedlozima rješenja;
- mogućnost premještaja i izlazne naplatne postaje Lučko na lokaciju Demerje.

Ovo rješenje svakako pripada u skupinu financijski povoljnijih rješenja, međutim društveno-ekonomsku razinu opravdanosti tek bi trebalo ustanoviti. Potrebno je još samo napomenuti da premještaj, odnosno nova lokacija ne mora nužno biti na području Demerja (koja se navodi u [27]), već je potrebno istražiti mogućnost i drugih lokacija (sve do čvora Donja Zdenčina) ovisno o kriterijima cijene, utjecaja na okoliš, katastarskih uvjeta, prostornim planovima, sigurnosti i slično.

4.3. V3: dogradnja dionice Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne autoceste

Sve veći dnevni migracijski promet između Karlovca i Zagreba, a posebno turistički promet u ljetnim mjesecima uvjetuju razmatranje prijedloga rješenja u vidu dogradnje dionice Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne autoceste (tri vozne trake i zaustavna traka u svakom smjeru). U sklopu tog rješenja izgradila bi se i dva nova čvorišta: Kupinečki Kraljevec i Desinec.

Velika razlika u prometnom opterećenju sezonskog prometa od onog kroz ostatak godine predstavlja najveći problem u određivanju potrebnog broja prometnih traka na ovoj dionici. Kako je prikazano prilikom analize u radu (*Tablica 16.*), za prognozirano prometno

opterećenje u 2035. godini u sezoni su potrebne tri prometne trake dok su u ostalom razdoblju dvije prometne trake sasvim dovoljne. Ipak, razlozi za dogradnju treće prometne trake leže u činjenicama da se taj cestovni koridor zbog svoje važnosti nalazi na osnovnoj mreži europskih prometnica (što može osigurati sufinanciranje dogradnje od strane Europske unije), te da se isto rješenje navodi i u Strategiji prometnog razvoja RH (*cestovni promet, mjera Ro.12*). Tamo je preciznije navedeno kako se planira: „*povećanje kapaciteta dionice Zagreb – Karlovac izgradnjom namjenske trake za javni prijevoz*".

Ovo rješenje implicira i povećanje broja naplatnih jedinica na ulaznoj naplatnoj postaji jer je to nužan uvjet za iskorištenje kapaciteta nove autoceste s tri prometna traka u tom smjeru. S obzirom da je utvrđeno kako je sedam naplatnih jedinica dovoljno za propuštanje 2 800 voz/h, što odgovara kapacitetu autoceste sa dva prometna traka, može se zaključiti da je za autocestu s tri prometna traka potrebno osigurati 11 ulaznih naplatnih jedinica. Time bi se uspješno posluživala i najveća proračunata sezonska prometna potražnja koja je u 2016. godini iznosila oko 3 500 voz/h.

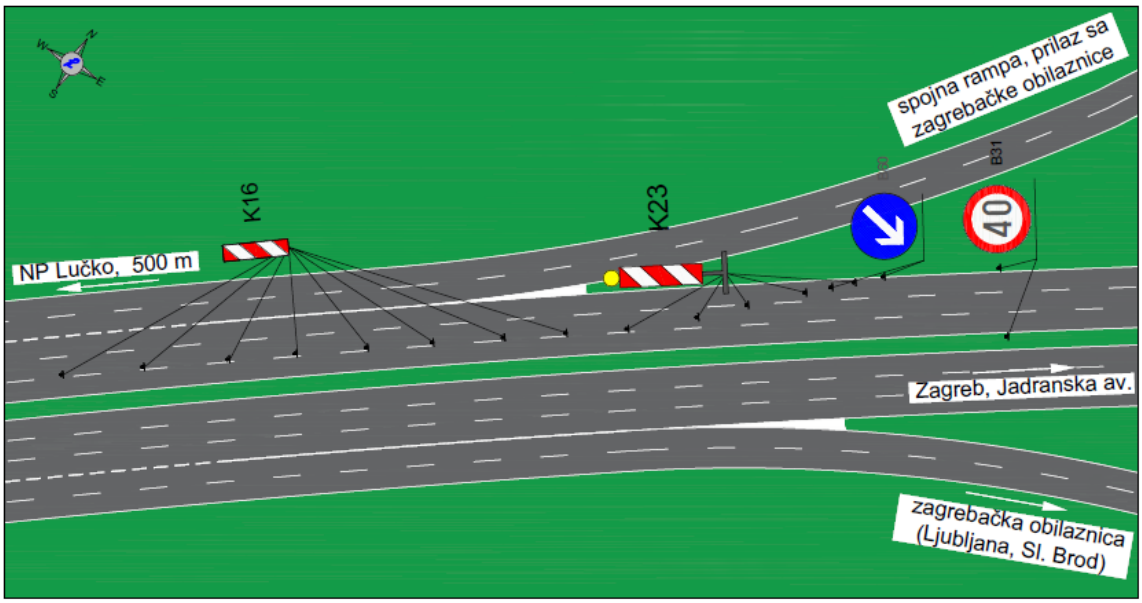
4.4. V4: infrastrukturne promjene na čvoru Lučko i zagrebačkoj obilaznici

Infrastrukturne promjene predložene u ovoj varijanti rješenja podrazumijevaju:

- dogradnju treće vozne trake na dionici zagrebačke obilaznice čvor Jankomir – čvor Lučko i to samo u smjeru Lučkog (moguće je i proširenje samo na skraćenoj dionici PUO Plitvice – čvor Lučko). Ovime bi se povećala razina usluge prometovanja na toj dionici za koju je u radu utvrđeno da u vršnom sezonskom prometnom opterećenju ima razinu usluge F. Također, time bi se i smanjio utjecaj reda čekanja za naplatnu postaju Lučko na ostale tranzitne prometne tokove i lokalne prometne tokove koji prolaze zagrebačkom obilaznicom;
- produženje područja isplitanja na zagrebačkoj obilaznici iz smjera Buzina prema naplatnoj postaji Lučko sa postojećih 300 m na barem 800 m, ili dogradnja treće vozne trake na istoj dionici. Ovo rješenje ima iste učinke kao i prethodno;
- na čvoru Lučko, prema analizi postojećeg stanja prometnih tokova, nema kapacitivno ili sigurnosno problematičnih segmenata. Ipak, na određenim segmentima koji nisu detaljno analizirani u radu može se, prvenstveno kanaliziranjem određenih prometnih tokova, povećati razina usluge i sigurnost prometa. Primjer za to je uplitanje spojne rampe iz smjera zagrebačke obilaznice na Jadransku aveniju u smjeru naplatne postaje Lučko, jer je na tom uplitanju znatno veće prometno opterećenje spojne rampe od glavnog prometnog toka. Na *Slici 36.* prikazano je postojeće stanje, a na *Slici 37.* primjer mogućeg rješenja u vrijeme vršnih sezonskih opterećenja.



Slika 36. *Prikaz uplitanja spojne rampe sa zagrebačke obilaznice prema NP Lučko,* [12]



Slika 37. *Primjer kanaliziranja prometnog toka prometnom signalizacijom u svrhu povećanja kapaciteta uplitanja i sigurnosti prometa*

Rješenje sa *Slike 37.* samo je privremenog karaktera te ne predstavlja dugoročno rješenje problematike, ali istovremeno je jednostavno za implementaciju i može koristiti do odabira i izvedbe trajne varijante rješenja. Činjenica je i da navedena rješenja vezana za zagrebačku obilaznicu uglavnom nisu kompatibilna niti sa jednim od prethodno navedenih, ali pripadaju u moguće rješenje koje se ovdje ne razmatra, a to je proširenje zagrebačke obilaznice na razinu šesterotračne prometnice. To rješenje navodi se u Strategiji prometnog razvoja RH (*cestovni promet, mjera Ro.13*) u smislu nadogradnje postojeće zagrebačke obilaznice namjenskom

trakom za javni prijevoz. Također, u Strategiji se naglašava isključivost ovog rješenja sa rješenjem izgradnje nove zagrebačke obilaznice (zagrebačkog prstena).

Osobito pogodnom se čini opcija određenog oblika prenamjene postojeće zagrebačke obilaznice u gradsku prometnicu. Ta opcija podrazumijeva izgradnju zagrebačkog prstena koji bi preuzeo tranzitne prometne tokove, a na postojećoj zagrebačkoj obilaznici bi se izgradnjom novih čvorišta (Donji Jarek, Novaki, Ježdovec, Čehi, Sveta Klara, Jakuševac, Mlaka, Šćitarjevo i Jelkovec) ta prometnica u potpunosti uključila u snabdijevanje gradskog prometa grada Zagreba.

5. SIMULACIJA VARIJANTNIH PRIJEDLOGA RJEŠENJA SMANJENJA REDOVA ČEKANJA NA ČVORU LUČKO

U prethodnom poglavlju navedena su i opisana moguća rješenja problematike koju ovaj rad obrađuje. Rješenja se razlikuju prema svome opsegu u financijskom i građevinskom smislu, ali i u smislu njihova djelovanja na uređenost prometnog sustava ne samo analiziranog područja, već i mnogo šire. Za odabir optimalnog rješenja potrebno je kvalitetno procijeniti rezultate njihova djelovanja, a za to se koriste postupci modeliranja i simulacije.

Modeliranje je postupak izrade modela koji omogućuju istraživanje pojava i procesa, a na temelju rezultata istraživanja donose se zaključci o zakonitostima koje vladaju u realnom sustavu. Modeliranje ima posebno značenje u prometnom inženjerstvu i to pri definiranju i istraživanju novih rješenja koja se često na drugi način ne mogu ispitati. Osnovni problem pri modeliranju složenih realnih sustava je stvaranje modela koji će vjerodostojno oponašati realan sustav [30].

Izrada modela odabranog rješenja i simulacijsko istraživanje njegovih učinaka za potrebe ovog rada odrađuje se u programskom alatu PTV Vissim. To je mikroskopski simulacijski alat za modeliranje gradske prometne mreže i operacija javnoga gradskoga prijevoza te tokova pješaka. Točnost i vjerodostojnost simulacijskog modela najviše ovisi o kvaliteti modeliranja ponašanja vozila u simuliranoj prometnoj mreži. PTV Vissim koristi psihofizički model ponašanja vozača kojeg je razvio Rainer Wiedemann 1974. godine na Sveučilištu u Karlsruheu. Simulaciju prometnog toka program vrši pomicanjem jedinica „čovjek-vozilo“ kroz definiranu prometnu mrežu. Svaki vozač u mreži sa svojim specifičnim karakteristikama ponašanja dodijeljen je određenom vozilu, te se poštuju i prethodno definirane tehničke mogućnosti određenog vozila kao što su primjerice maksimalna brzina vozila, maksimalno ubrzanje i usporenje i slično [31].

Potrebno je još odrediti koje rješenje, ili više njih, treba ispitati u svrhu ovog rada. Neka rješenja, kao što je izgradnja nove zagrebačke obilaznice, nije praktično ispitati izabranim simulacijskim alatom. Zbog velike prostorne, građevinske i utjecajne vrijednosti tog prijedloga pogodnije bi bilo ispitivanje nekim makrosimulacijskim alatom (kao što je primjerice PTV Visum). Problem je i drugih predloženih rješenja to što su moguće i mnoge njihove kombinacije, a prilikom detaljnog proučavanja potrebno bi bilo odraditi znatan broj simulacijskih postupaka i na temelju toga odrediti optimalno rješenje.

Zbog pojednostavljenja postupka, a opet u cilju prezentacije mogućnosti simulacijskog alata PTV Vissim, u ovom radu odrađena je simulacija postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko u vrijeme vršnog sezonskog prometnog opterećenja, te simulacija jednog varijantnog prijedloga rješenja sljedećih karakteristika:

- premještena ulazna naplatna postaja Lučko na lokaciju Demerje uz postavljenih 10 naplatnih jedinica za klasični sustav ulaska na autocestu (automatsko uzimanje ulaznih kartica od strane vozača), te dvije naplatne jedinice za ENC sustav;

- na postojećoj naplatnoj postaji Lučko vrši se samo izlaz s autoceste i to gotovinskim plaćanjem na 10 naplatnih jedinica;
- dogradnja dionice Zagreb – Demerje (smjer Demerje) na prometnicu sa tri prometna traka i zaustavnim trakom;
- trajanje simulacije je 60 minuta, i to u vremenu vršne prometne potražnje ulazne naplatne postaje (subota, 05:00 – 06:00);
- trajanje posluživanja na naplatnim postajama i vrijednosti prometne potražnje pojedinih prometnih tokova postavljene su prema dobivenim prosječnim vrijednostima prilikom analize u radu.

Ovako postavljeno rješenje temelji se na predloženoj *varijanti 2*, uz dodatak vezan za proširenje jednog smjera autoceste sa dva na tri prometna traka, i to na duljini od oko 3 km. Naime, premještanje ulazne naplatne postaje ima za cilj pomaknuti redove čekanja koji se javljaju u vršnim sezonskim opterećenjima kako ne bi utjecali na ostale prometne tokove zagrebačke obilaznice, a proširenje autoceste je nužno jer dvije trake ne bi bile dovoljne za osiguranje stabilnih uvjeta prometnog toka na toj dionici.

Postojeće stanje prometa na čvoru Lučko u vrijeme vršnih prometnih opterećenja karakteriziraju redovi čekanja nastali zbog, kako je utvrđeno u radu, nedovoljnih kapacitivnih mogućnosti ulazne naplatne postaje Lučko i autoceste A1 (osobito dionice Zagreb – Karlovac). *Slika 38.* prikazuje postojeće stanje prometnih tokova na čvoru Lučko na kraju vršnog sata dobiveno simulacijom u programskom alatu PTV Vissim. Iz slike je vidljivo kako su formirani redovi čekanja na spojnim rampama koje vode prema naplatnoj postaji Lučko.



Slika 38. *Prikaz postojećeg stanja prometnih tokova na čvoru Lučko nakon simulacije prometnog opterećenja vršnog sata u programskom alatu PTV Vissim*

Analitički rezultati simulacije postojećeg stanja navedeni su u *Tablici 27.* i *Tablici 28.*, a pokazuju duljinu formiranog reda čekanja na četiri mjerne točke (prikazane lokacijom i smjerom strelica na *Slici 39.*), ukupni broj zaustavljanja vozila u redu čekanja (stani-kreni

vožnja) te prosječno vrijeme putovanja i prosječnu brzinu vozila između odabranih točaka na privozima čvora Lučko.

Tablica 27. *Prikaz rezultata mjerenja redova čekanja postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko iz programskog alata PTV Vissim*

Vrijeme mjerenja	Lokacije mjerenja duljine reda čekanja (početna točka mjerenja)		Prosječna duljina reda čekanja	Najveća duljina reda čekanja	Broj zaustavljanja vozila
			[m]	*[m]*	
subota 30.07.2016. 05:00-06:00	**1**	ulazna NP Lučko	2.028,4	2.331,4	42.990
	2	prije isplitanja Jankomir - NP Lučko	211,5	905,3	3.911
	3	prije isplitanja Buzin - NP Lučko	0,0	0,0	0
	4	prilaz iz Zagreba prema NP Lučko	0,0	0,0	0



Slika 39. *Prikaz lokacija mjerenja redova čekanja prilikom simulacije postojećeg stanja*

Izvor kartografske podloge: Google Maps

Tablica 28. *Prikaz rezultata mjerenja prosječnog vremena putovanja i brzine vozila u postojećem stanju prometa iz programskog alata PTV Vissim*

Vrijeme mjerenja	Dionice mjerenja			Udaljenost	Ukupni broj vozila	Prosječno vrijeme putovanja	Prosječna brzina vozila
60 min	R.br.	od	do	*[m]*	*[vozila]*	*[min]*	*[km/h]*
subota 30.07.2016. 05:00-06:00	1	čvor Jankomir	Demerje	10.260,0	755	32,1	19,2
	2	Demerje	čvor Jankomir	10.350,0	258	7,3	85,3
	3	čvor Lučko (privoz Buzin)	Demerje	9.282,0	665	30,6	18,2
	4	Demerje	čvor Lučko (privoz Buzin)	9.155,0	181	6,6	83,9

Iz prikazanih tablica se vidi da najveća duljina reda čekanja pred naplatnom postajom Lučko iznosi više od 2,3 km, pri čemu je ključan podatak da se od toga više od 900 m proteže po zagrebačkoj obilaznici u smjeru čvora Jankomir, narušavajući tako sigurnost i protok ostalih tranzitnih ili lokalnih prometnih tokova. Isto se u stvarnosti događa i na zagrebačkoj obilaznici u smjeru čvora Buzin, ali zbog kraćeg trajanja u simulaciji (60 minuta) do toga nije došlo.

Iz *Tablice 28.* se vidi da je prosječna brzina vožnje zbog redova čekanja smanjena na vrijednost ispod 20 km/h, dok je na izlaznom smjeru s autoceste A1 prema zagrebačkoj obilaznici (gdje u simulacijskom razdoblju nema redova čekanja) prosječna brzina vozila veća od 80 km/h (brzina slobodnog prometnog toka).

U nastavku, na *Slici 40.* te u *Tablici 29.* i *Tablici 30.*, istim pokazateljima prikazano je „novo“ stanje, odnosno stanje prometnih tokova u modelu izabranog varijantnog rješenja sa premještenom ulaznom naplatnom postajom na lokaciju Demerje i proširenom dionicom prometnice čvor Lučko – Demerje na tri prometna traka. Već sa *Slike 40.* je jasno kakav je učinak primijenjenog varijantnog rješenja jer se vidi da nema nikakvih redova čekanja, tj. da vladaju uvjeti gotovo slobodnog prometnog toka.



Slika 40. *Prikaz stanja prometa na čvoru Lučko nakon implementacije odabranog varijantnog rješenja u programskom alatu PTV Vissim*

Tablica 29. *Prikaz rezultata mjerenja redova čekanja na čvoru Lučko za odabrano varijantno rješenje iz simulacijskog programa PTV Vissim*

Vrijeme mjerenja	Lokacije mjerenja duljine reda čekanja (početna točka mjerenja)		Prosječna duljina reda čekanja [m]	Najveća duljina reda čekanja [m]	Broj zaustavljanja vozila
subota 30.07.2016. 05:00-06:00	5	ulazna (nova) NP Demerje	0,8	70,0	44
	2	prije isplitanja Jankomir - NP Lučko	0,0	0,0	0
	3	prije isplitanja Buzin - NP Lučko	0,0	0,0	0
	4	prilaz iz Zagreba prema NP Lučko	0,0	0,0	0

Tablica 30. *Prikaz rezultata mjerenja prosječnog vremena putovanja i brzine vozila za odabrano varijantno rješenje iz programskog alata PTV Vissim*

Vrijeme mjerenja	Dionice mjerenja			Udaljenost	Ukupni broj vozila	Prosječno vrijeme putovanja	Prosječna brzina vozila
60 min	R.br.	od	do	*[m]*	*[vozila]*	*[min]*	*[km/h]*
subota 30.07.2016. 05:00-06:00	1	čvor Jankomir	Demerje	10.252,5	1471	7,3	84,3
	2	Demerje	čvor Jankomir	10.343,9	262	7,1	87,4
	3	čvor Lučko (privoz Buzin)	Demerje	9.285,1	1613	6,8	81,9
	4	Demerje	čvor Lučko (privoz Buzin)	9.154,3	189	6,5	84,5

Iz *Tablice 29.* vidi se da su implementacijom odabranog varijantnog rješenja redovi čekanja na čvoru Lučko svedeni na minimalnu razinu ili ih uopće nema, a *Tablica 30.* prikazuje vrijednosti prosječnih vremena putovanja i brzine vozila koje su za kritične tokove porasli gotovo na razinu vrijednosti slobodnog prometnog toka.

Iz prezentiranih vrijednosti ključnih parametara prometnog toka jasno je da odabrano varijantno rješenje donosi značajan pomak u kvaliteti odvijanja prometnih tokova na analiziranom području. To se i dodatno potvrđuje usporedbom rezultata mjerenja postojećeg i novog stanja prikazanih u *Tablici 31.*, a koje vrijede za sve prometne tokove, ali samo na segmentima unutar čvora Lučko. Posebno tu treba istaknuti ekološke pokazatelje koji su odabranim rješenjem smanjeni na razinu od 35,55 % od vrijednosti u postojećem stanju, te ukupni broj vozila koji je uvećan za više od 25 %.

Tablica 31. *Usporedba postojećeg stanja i odabranog varijantnog rješenja pokazateljima iz programskog alata PTV Vissim*

ČVOR LUČKO subota 30.07.2016. 05:00-06:00	Prosječna duljina reda čekanja	Najveća duljina reda čekanja	Ukupni broj posluženih vozila	Prosječno vrijeme kašnjenja	Emisije ugljikovog monoksida (CO)	Emisije dušikovih oksida (NO_x)	Emisije hlapivih organskih spojeva	Prosječni broj zaustavljanja vozila
	[m]	*[m]*	*[vozila]*	*[s]*	*[mg]*	*[mg]*	*[mg]*	
Postojeće stanje - ulazna NP Lučko	85,9	912,4	4.201	332,8	232.241,8	45.185,8	53.824,3	15,7
Novo stanje - ulazna NP Demerje	0,0	0,0	5.275	12,3	82.553,8	16.062,0	19.135,2	0,3
Postotak od početnog stanja	-	-	**125,57%**	**3,70%**	**35,55%**	**35,55%**	**35,55%**	**2,04%**

U ovom poglavlju prikazano je kako simulacijskim programom PTV Vissim pokazati na koji način odabrano varijantno rješenje utječe na promjenu ključnih parametara prometnog toka na analiziranom području, te time znatno olakšava donošenje odluke o investicijskom ulaganju. Simulacija je odrađena samo za jedno varijantno rješenje i jasno je kako se na temelju toga ne može donijeti konačna odluka o optimalnom rješenju za smanjenje redova čekanja na čvoru Lučko. Čak i da su simulirane sve varijante rješenja i njihove moguće kombinacije, što svakako je uvjet za potpuno razumijevanje njihovih učinaka, to bi bio samo dio postupka donošenja konačne odluke o investiciji u prometni sustav. Naime, kod ovako opsežnih i financijski zahtjevnih prometnih rješenja ključnu ulogu u odabiru na kraju imaju strateški ciljevi, ekonomska moć te naravno politička i društvena svijest.

6. ZAKLJUČAK

Zagreb je glavno industrijsko i prometno središte zemlje i kao takvo njegova cestovna mreža mora biti organizirana na način da zadovolji potrebe za mobilnošću. Pritom se to odnosi na stanovnike grada i okolnih naselja, ali i na tranzitni promet koji je posljedica povoljnog geoprometnog položaja grada Zagreba. Ta činjenica je u radu dokazana prikazom prometnih opterećenja zagrebačke obilaznice i čvora Lučko, te su utvrđeni znatni godišnji porasti u intenzitetu prometa i velika razlika između sezonske i ukupne godišnje količine prometa koji tuda prolazi. To saznanje predstavlja posebnu problematiku u određivanju optimalnog rješenja koje će zadovoljiti prometnu potražnju, ali i kriterije učinkovitosti i ekonomske isplativosti istog.

Početna razmišljanja o nedovoljnim infrastrukturnim kapacitetima čvora Lučko u radu su proračunom propusne moći i razine usluge pojedinih segmenata čvora pobijena. Štoviše, pokazano je i da prognozirana prometna opterećenja za sljedećih 20 godina, koja za gotovo 50 % premašuju sadašnja, mogu uspješno biti poslužena na čvoru Lučko. Osim toga, usporedbom sa važećim propisima i teorijskim saznanjima uvidjelo se da svi infrastrukturni elementi (polumjeri zavoja, širine promentnih traka, uzdužni i poprečni nagibi, poprečni presjeci, duljine dodatnih traka pri uplitanju i isplitanju i sl.) i prometna oprema čvora Lučko zadovoljavaju visoke standarde sigurnosti i propusne moći koje, kao raskrižje izvan razine, mora poštivati.

Naplatna postaja Lučko nalazi se u neposrednoj blizini čvora Lučko te već sama ta činjenica daje naznaku njihovog negativnog međusobnog utjecaja. Analizom naplatne postaje i autoceste A1 koja nakon nje počinje, na temelju dobivenih podataka satnog broja posluživanja vozila i same organizacije rada naplatne postaje, ustanovljena je njihova nedovoljna propusna moć za vršna sezonska prometna opterećenja. Time je otkriven uzrok formiranja redova čekanja koji se u određenim situacijama protežu preko čvora Lučko sve do zagrebačke obilaznice uzrokujući znantno smanjenje sigurnosti prometa, zagušenje ostalih tranzitnih i lokalnih prometnih tokova koji tuda prolaze, te negativan ekološki utjecaj.

Rješenja navedene osnovne problematike, kao i općeniti razvoj prometne infrastrukture treba zasnivati ponajprije na analizi potražnje za prometnim uslugama. Proračunom prometne potražnje u ovom radu dokazano je zapravo da samo veći infrastrukturni zahvati šireg područja mogu uspješno i trajno riješiti utvrđenu problematiku. Neka od tih rješenja, kao što su izgradnja zagrebačkog prstena, nadogradnja dionice autoceste Zagreb – Karlovac na razinu šesterotračne prometnice i premještanje naplatne postaje Lučko već su formirana, te zakonskim programima i strategijom potvrđena. I ostala moguća rješenja koja su spomenuta u radu, kao što su promjena sustava naplate cestarine, definitivno jesu u skladu s ciljevima prometne i socijalne politike, ekonomskog razvitka i zaštite okoliša, a tek trebaju biti potvrđena, te kroz izvjesno vrijeme i realizirana.

Literatura

[1] Legac, I.: *Raskrižja javnih cesta – Cestovne prometnice II*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.

[2] Klemenčić, A.: *Oblikovanje cestovnih čvorišta izvan razine*. Građevinski institut/Liber, Zagreb, 1982.

[3] *Pravilnik o osnovnim uvjetima kojima javne ceste izvan naselja i njihovi elementi moraju udovoljavati sa stajališta sigurnosti prometa*. (NN 110/2001).

[4] *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2010.

[5] Dadić, I., Šoštarić, M., Brlek, P.: *Prometno tehnološko projektiranje – autorizirana predavanja*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.

[6] *Strategija prometnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje od 2014. do 2030. godine*. Ministarstvo pomorstva, prometa i infrastrukture, Zagreb, 2014.

[7] Crnjak, M., Puž, G.: *Kapitalna prometna infrastruktura Republike Hrvatske*. Hrvatske autoceste d.o.o., 2007.

[8] URL: http://hac.hr/odnosi-s-javnoscu/informacije-i-obavijesti/nova-obilaznica-grada-zagreba, 08.2016.

[9] URL: http://www.promet-eufondovi.hr/eu-prometni-koridori-i-ten-t, 08.2016.

[10] URL: http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/index_en.htm, 08.2016.

[11] Klemenčić, A.: *Doprinos teoriji geometrijskog oblikovanja silazno-ulaznih rampi kod čvorišta cesta izvan razine*. FAGG, Ljubljana, 1980.

[12] Google Street view, URL: https://www.google.hr/maps/, 08.2016.

[13] Bukljaš Skočibušić, M., Bukljaš, Z.: *Zaštita u prometu*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

[14] *Statistički pregled temeljnih sigurnosnih pokazatelja i rezultata rada u 2015. godini*. Ministarstvo unutarnjih poslova, Služba za strateško planiranje, analitiku i razvoj, Zagreb, siječanj 2016.
URL: http://www.mup.hr/UserDocsImages/statistika/2016/Statistika_2015, 08.2016.

[15] Rožić, P.: *Utjecaj prometnog opterećenja na gospodarenje cestovnim sustavom*. GRAĐEVINAR 57, 2005. (10)

[16] *Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske – za godine 2004. - 2015.* Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, 2016., URL: http://www.hrvatske-ceste.hr/default.aspx?id=46, 08.2016.

[17] URL: http://hac.hr/promet-i-sigurnost/promet/brojanje-prometa, 08.2016.

[18] Barić, D.: *Planiranje projekata – autorizirane prezentacije iz kolegija Vrednovanje cestovnih projekata*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, ak. god. 2015./2016.

[19] Horvat, R.: *Modeli proračuna propusne moći cestovnih prometnica u Republici Hrvatskoj – doktorski rad*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.

[20] *Izvještaj o poslovanju za 2015. godinu*. Autocesta Rijeka-Zagreb d.d., Društvo za građenje i gospodarenje autocestom. 2016.

[21] Matulin, M., Mrvelj, Š., Gold, H.: *Upotreba fuzzy upravljača u određivanju kapaciteta naplatnih postaja na autocestama.* KoREMA, 2011.

[22] Bošnjak, I., Badanjak, D.: *Osnove prometnog inženjerstva*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.

[23] *Modeling Toll Plaza Behavior Using Queuing Theory*. URL: http://www.math.washington.edu/~morrow/mcm/cary05.pdf, 07.2016.

[24] HAK videozid, URL: http://www.hak.hr/info/kamere/, 07.2016.

[25] Hrvatska udruga koncesionara za autoceste s naplatom cestarine, *Bilten 11.2008*. URL: http://www.huka.hr/v2/objekti/publikacije/hr/2008_15.pdf, 08.2016.

[26] URL: http://www.hak.hr/info/stanje-na-cestama/, 07.2016.

[27] *Program građenja i održavanja javnih cesta za razdoblje od 2013. do 2016. godine* (NN 1/2014).

[28] *Izmjene i dopune programa građenja i održavanja javnih cesta za razdoblje od 2013. do 2016. godine* (NN 151/2014).

[29] *Prostorno-prometna studija cestovno-željezničkog sustava šireg područja grada Zagreba – sažetak*. Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zagreb, 2009. URL: http://www.igh.hr/upload/tbl_projekti/pps-zagreba-sazetak_143339.pdf, 07.2016.

[30] Barić, D.: *Uvod u prometno modeliranje – opći pojmovi, terminologija – autorizirana predavanja iz kolegija Modeliranje i planiranje u cestovnom prometu.* Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, ak. god. 2014./2015.

[31] Vujić, M., Dedić, L.: *Priručnik za izradu osnovnog modela semaforiziranog raskrižja korištenjem mikrosimulacijskog alata PTV Vissim*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

Popis slika

Slika 1. *Čvor Lučko – zračna snimka* 7
Slika 2. *Autocestovna mreža Republike Hrvatske* 8
Slika 3. *TEN-T Osnovna prometna mreža kroz RH i susjedne zemlje* 9
Slika 4. *Osnovni modaliteti raskrižja izvan razine s četiri privoza* 10
Slika 5. *Središnje osi kolnika svih segmenata čvora Lučko* 11
Slika 6. *Osnovni oblici spojnih rampi* 11
Slika 7. *Prikaz oblikovnih elemenata i dopuštenih brzina segmenata čvora Lučko* 13
Slika 8. *Dimenzije i granično područje primjene spojnih rampi* 13
Slika 9. *Poprečni presjeci spojnih rampi i osnovnih kolnika na čvoru Lučko* 14
Slika 10. *Osnovni oblici izljevno-uljevnih trakova* 14
Slika 11. *Osnovni elementi za dimenzioniranje paralelnog načina izvedbe izljeva i uljeva* .. 15
Slika 12. *Prikaz lokacija dodatnih traka za uplitanje i isplitanje koje se ispituju s aspekta potrebne duljine* 16
Slika 13. *Načini razdjeljivanja prometnih tokova u raskrižjima* 19
Slika 14. *Prikaz konfliktnih točaka na čvoru Lučko* 19
Slika 15. *Intenzitet prometa na odabranim cestovnim pravcima u 2015. godini* 22
Slika 16. *Lokacije čvorišta na zagrebačkoj obilaznici* 23
Slika 17. *Procijenjene vrijednosti prometnog opterećenja (PGDP) čvora Lučko u 2015. g.* . 26
Slika 18. *Procijenjene vrijednosti prometnog opterećenja (PLDP) čvora Lučko u 2015. g.* . 26
Slika 19. *Prognozirano prometno opterećenje čvora Lučko u 2025. godini (PGDP)* 30
Slika 20. *Prognozirano prometno opterećenje čvora Lučko u 2035. godini (PGDP)* 30
Slika 21. *Metodologija proračuna razine usluge za osnovne segmente autoceste* 35
Slika 22. *Prikaz razine usluge prema PGDP-u (lijevo) i PLDP-u (desno) za 2015. godinu* .. 43
Slika 23. *Segment preplitanja na čvoru Lučko* 45
Slika 24. *Broj nesreća na milijun vozila u ovisnosti o konstrukcijskom rješenju raskrižja* 45
Slika 25. *Metodologija proračuna razine usluge za segmente preplitanja* 46
Slika 26. *Prikaz prometnih tokova u području preplitanja* 46
Slika 27. *Prikazi lokacije uplitanja na čvoru Lučko izabrano za proračun* 52
Slika 28. *Metodologija proračuna razine usluge za segment uplitanja* 53
Slika 29. *Ključne varijable segmenta uplitanja* 54
Slika 30. *Prikaz položaja NP Lučko i čvora Lučko* 58
Slika 31. *Pojednostavljeni prikaz strukture modela čekanja* 59

Slika 32. *Primjer slike informativnih kamera HAK-a na naplatnoj postaji Lučko*..... 63

Slika 33. *Prikaz zagušenja prometa na autocesti A1 odmah nakon NP Lučko* 65

Slika 34. *Redovi čekanja za izlaz sa autoceste A1 pred NP Lučko i NP Demerje*..... 67

Slika 35. *Planirana trasa nove zagrebačke obilaznice (prstena)* 79

Slika 36. *Prikaz uplitanja spojne rampe sa zagrebačke obilaznice prema NP Lučko*..... 83

Slika 37. *Primjer kanaliziranja prometnog toka prometnom signalizacijom u svrhu povećanja kapaciteta uplitanja i sigurnosti prometa* 83

Slika 38. *Prikaz postojećeg stanja prometnih tokova na čvoru Lučko nakon simulacije prometnog opterećenja vršnog sata u programskom alatu PTV Vissim* 86

Slika 39. *Prikaz lokacija mjerenja redova čekanja prilikom simulacije postojećeg stanja* ... 87

Slika 40. *Prikaz stanja prometa na čvoru Lučko nakon implementacije odabranog varijantnog rješenja u programskom alatu PTV Vissim*..... 88

Popis tablica

Tablica 1. *Opća razvrstanost cesta i raskrižja* 6

Tablica 2. *Granične vrijednosti projektnih elemenata spojnih rampi* 12

Tablica 3. *Duljine traka za ubrzanje/usporenje u zavisnosti o brzini* 16

Tablica 4. *Pregled ispunjavanja kriterija potrebne duljine dodatnih traka za isplitanje ili uplitanje na čvoru Lučko* 17

Tablica 5. *Zaustavna preglednost u ovisnosti o računskoj brzini* 20

Tablica 6. *Prometne nesreće i posljedice u RH (2015.) prema vrsti raskrižja* 20

Tablica 7. *Prikaz brojačkih mjesta s najvećim PGDP-om i PLDP-om u 2015. godini* 22

Tablica 8. *Podaci brojanja prometa (PGDP i PLDP) na brojačkom mjestu A1 – Lučko jug* 24

Tablica 9. *Podaci brojanja prometa (PGDP i PLDP) na dionicama zagrebačke obilaznice* 24

Tablica 10. *Prognoza prometa za razdoblje od 2020. do 2035. godine* 28

Tablica 11. *Određivanje razine usluge na temelju gustoće prometa* 34

Tablica 12. *Redukcija brzine slobodnog toka zbog širine prometnih traka* 37

Tablica 13. *Redukcija brzine slobodnog toka zbog utjecaja bočnih smetnji* 37

Tablica 14. *Faktori pretvorbe teških vozila u ekvivalentne jedinice osobnih vozila* 39

Tablica 15. *Razine usluge za osnovne segmente autoceste prema prometnom opterećenju (PGDP i PLDP) za 2015. godinu* 42

Tablica 16. *Potrebni broj prometnih traka za željenu razinu usluge na dionici Zagreb-Karlovac prema prometnom opterećenju (PGDP i PLDP) u 2035. godini* 43

Tablica 17. *Razina usluge segmenta preplitanja na temelju gustoće prometa* 51

Tablica 18. *Razina usluge preplitanja na čvoru Lučko za razdoblje 2020. – 2035.* 51

Tablica 19. *Utvrđivanje kapaciteta glavnog toka nakon područja uplitanja* 55

Tablica 20. *Utvrđivanje kapaciteta spojne rampe* 55

Tablica 21. *Razina usluge segmenta uplitanja na temelju gustoće prometa* 56

Tablica 22. *Određivanje optimalnog broja naplatnih jedinica* 60

Tablica 23. *Procijenjena vremena putovanja od NP Lučko do ostalih čv. na AC A1/A6* 62

Tablica 24. *Teorijski izlazni kapacitet naplatnih postaja Lučko i Demerje* 67

Tablica 25. *Planirana ulaganja u izgradnju autocesta za razdoblje od 2013. do 2016. g.* 77

Tablica 26. *Izmjena planiranih ulaganja za razdoblje od 2013. do 2016. godine* 78

Tablica 27. *Prikaz rezultata mjerenja redova čekanja postojećeg stanja prometa na čvoru Lučko iz programskog alata PTV Vissim* 87

Tablica 28. *Prikaz rezultata mjerenja prosječnog vremena putovanja i brzine vozila u postojećem stanju prometa iz programskog alata PTV Vissim* 87

Tablica 29. *Prikaz rezultata mjerenja redova čekanja na čvoru Lučko za odabrano varijantno rješenje iz simulacijskog programa PTV Vissim* 88

Tablica 30. *Prikaz rezultata mjerenja prosječnog vremena putovanja i brzine vozila za odabrano varijantno rješenje iz programskog alata PTV Vissim* 89

Tablica 31. *Usporedba postojećeg stanja i odabranog varijantnog rješenja pokazateljima iz programskog alata PTV Vissim*..... 89

Popis grafikona

Grafikon 1. *Prometno opterećenje (PGDP i PLDP) na brojačkom mjestu A1 – Lučko jug* .. 24

Grafikon 2. *Prometno opterećenje (PGDP i PLDP) dionica zagrebačke obilaznice* 25

Grafikon 3. *Prikaz prognoze prometa za razdoblje od 2015. do 2035. godine*..... 29

Grafikon 4. *Propusna moć i razina usluge autoceste pri osnovnim uvjetima prometa s obzirom na brzinu slobodnog toka (krivulja brzina – protok)* 33

Grafikon 5. *Očitavanje brzine prom. toka i razine usluge na temelju proračunate rate toka* 40

Grafikon 6. *Grafički prikaz prosječno izgubljenog vremena vozila na naplatnoj postaji*..... 60

Grafikon 7. *Broj posluženih vozila prilikom ulaska na autocestu A1 na NP Lučko* 64

Grafikon 8. *Prosječno vrijeme posluživanja na NP Lučko pri ulasku na autocestu A1*..... 64

Grafikon 9. *Odnos broja posluženih vozila izlaznog smjera na NP Lučko i NP Demerje* 68

Grafikon 10. *Broj posluženih vozila prilikom izlaska s AC A1 na NP Lučko i Demerje* 69

Grafikon 11. *Prosječno vrijeme posluživanja na NP Lučko pri izlasku s autoceste A1*..... 69

Grafikon 12. *Poslužen satni broj vozila na NP Demerje u razdoblju 22.07.-24.07.2016.*..... 71

Grafikon 13. *Prometna potražnja ulaznog smjera NP Lučko* 72

Grafikon 14. *Prometna potražnja izlaznog smjera na NP Lučko*..... 73

Grafikon 15. *Analiza pravovremenosti donošenja odluka o promjeni broja aktivnih naplatnih jedinica po smjeru rada na NP Lučko*..... 73