

Primljen / Received: 29.12.2024.

Ispravljen / Corrected: 26.5.2025.

Prihvaćen / Accepted: 29.5.2025.

Dostupno online / Available online: 10.6.2025.

Algoritam za definiranje biciklističke infrastrukture na postojećim gradskim prometnicama

Autori:



Mr.sc. **Dušan Kocić**, dipl.ing.građ.
Akademija tehničko-obrazovnih strukovnih studija, Odsjek Niš
Katedra za civilno inženjerstvo
dusan.kocic@akademijanis.edu.rs
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Miloš Šešlija**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka
Odjel za građevinarstvo i geodeziju
sele@usn.ac.rs



Mr.sc. **Panta Krstić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu
Fakultet tehničkih nauka
Odjel za građevinarstvo i geodeziju
panta.krstic@uns.ac.rs



Doc.dr.sc. **Nenad Stojković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
Odjel za ceste
nenad.stojkovic@gaf.ni.ac.rs

Stručni rad

Dušan Kocić, Miloš Šešlija, Panta Krstić, Nenad Stojković

Algoritam za definiranje biciklističke infrastrukture na postojećim gradskim prometnicama

Nedostatak prostora unutar postojećega profila ceste uzrokovao je nedostatak biciklističke infrastrukture i sve češće miješanje biciklističkoga prometa i prometa motornih vozila. Promet je sve veći problem u suvremenim gradovima zbog velikoga broja motornih vozila. Sa stajališta zdravlja, ekologije i smanjenja prometnih gužva treba pronaći održivo rješenje za upravljanje prometom u velikim gradovima. U radu je prikazan algoritam za definiranje biciklističkih prometnica u gradskim uvjetima. Nakon definiranja algoritma na primjeru je grada Niša provjeren cjelokupni algoritam i njegov principa za daljnju uporabu. Za analizu su uzeti svi tipovi prometnica, odnosno analizirane su magistralne, pristupne i sabirne ceste. Algoritam je podijeljen u određene dijelove kako bi obuhvatio sve potrebne elemente za planiranje biciklističke prometnice, kako u tlocrtnom i visinskom prikazu te poprečnom presjeku, tako i u pogledu funkcionalnosti biciklističke prometnice. Na temelju izloženoga autori su zaključili da algoritam obuhvaća sve elemente koji su potrebni i da se može primijeniti u većini gradovima kod nas i u Europi.

Ključne riječi:

gradske prometnice, biciklistička infrastruktura, geometrija prometnice, projektiranje ceste

Professional paper

Dušan Kocić, Miloš Šešlija, Panta Krstić, Nenad Stojković

Algorithm for defining bicycle infrastructures on existing city roads

The lack of space within the existing road profile has led to a lack of cycling infrastructure and the increasing mixing of cycling and motor vehicle traffic. A growing problem in modern cities is traffic due to the large number of motor vehicles. From the perspective of health, ecology and reducing traffic congestion, it is necessary to find a sustainable solution for traffic management in large cities. This paper presents an algorithm for defining bicycle paths in urban conditions. After the defined algorithm, the example of the city of Niš was taken as a check of the entire algorithm and its principle for further use. All types of traffic roads were analyzed, i.e., main, access, and collecting roads. The algorithm is divided into specific parts to include all the necessary elements for planning the bicycle path, both in the geometry design and in terms of the functionality of the bicycle path itself. Based on everything presented, the authors concluded that the algorithm includes all the necessary elements and can be applied in most cities, both here and in Europe.

Key words:

city roads, bicycle infrastructure, road geometry, road design

1. Uvod

Zaštita životne sredine kao i metode rješavanja sve većih ekoloških problema postaju vrlo aktualnim i izazovnim temama u području tehničkih znanosti. Zagađenje zraka postalo je problemom cijele Europe. Jedno je od mogućih rješenja težnja k ekološki održivim oblicima kretanja, kao i smanjenje broja vozila koja rabe fosilna goriva. Autori rada [1] predlažu optimizaciju pristupa projektiranju biciklističke infrastrukture radi povećanja ekoloških, zdravstvenih i vremenskih koristi. Izrađen je matematički model koji definira probleme i ograničenja pri projektiranju biciklističke infrastrukture. Model uzima u obzir emisiju zagađenja, zdravlje biciklista i interakciju s drugim vrstama prometa. Rezultati pokazuju da je pravilnim i optimalnim postavljanjem biciklističke infrastrukture moguće smanjiti negativne utjecaje prometa i poboljšati javno zdravlje. Značajan indirektni korak načinjen je tijekom pandemije Covida kad se ustrajavalo na primjeni bicikala kao prijevoznih sredstava. Primijećena je pozitivna težnja povećanju broja korisnika bicikala i biciklističke infrastrukture. Pandemija Covid-19 potaknula je razvoj biciklističke infrastrukture u urbanim područjima. Autori rada [2] predlažu metodologiju koja prepoznaje/pronalazi moguće lokacije za poboljšanje biciklističke infrastrukture u Parizu. Primijenjene su dvije metode, od kojih prva pronalazi moguće lokacije na razini ulice, dok druga analizira mogućnosti na razini grada, uzimajući u obzir važna odredišta. Autori su analizom rezultata istraživanja potvrdili da razvijena metodologija daje pouzdane rezultate s gledišta procjene biciklističke infrastrukture i prikladnosti za biciklizam. Jedan je od novonastalih problema djelomice ili potpuno nerazvijena biciklistička infrastruktura. Autori rada [3] analiziraju ponašanje biciklista prilikom odabira optimalne trase kretanja, u okviru postojeće biciklističke infrastrukture, u gradu Vortleru u Kanadi. Da bi se procijenili ključni čimbenici prilikom izbora optimalne trase upotrijebljene su dvije logit analize i podaci o postojećim trasama, kao što su konfiguracija terena, postojanje biciklističkih prometnica, duljina puta i brzina vožnje automobila. Modeli rada [3] zasnovani su na GPS podacima koji mogu biti vrlo korisni prilikom planiranja i određivanja položaja biciklističke infrastrukture. U radu [4] autori se bave određivanjem najbolje trase za izgradnju biciklističke infrastrukture u gradu Širaza u Iranu. Primijenjen je analitički hijerarhijski proces radi rangiranja i ocjene trasa, a upotrijebljena su tri kriterija: privlačnost, sigurnost i mobilnost. Rezultati pokazuju da su najbitniji čimbenici uzdužni nagib i ograničenje brzine. Najvažniji su kriteriji sigurnost (75 %), privlačnost (15 %), a mobilnost ima vrlo malu ulogu prilikom izbora položaja biciklističke infrastrukture. Oblikovanjem i optimalnim položajem biciklističke infrastrukture vršeno je istraživanje na oglednoj mreži autora rada [5]. Osnovni cilj istraživanja autora bio je način optimizacije biciklističke infrastrukture u urbanom području, uz minimizaciju troškova izgradnje biciklističke infrastrukture i troškova njezinih korisnika. Primijenjen je matematički model radi određivanja optimalnoga tipa biciklističke infrastrukture. Taj je model utemeljen na

troškovima investicije i korisnika. Matematički model koji se temelji na učinkovitom projektiranju biciklističke infrastrukture, a radi povećanja sigurnosti korisnika, primijenjen je u radu [6]. Autori rada istražuju kako, primjenom algoritma, oblikovati učinkovitu biciklističku mrežu koja bi povećala sigurnost biciklista i smanjila duljinu koju treba prijeći u gradu Malaga. Kao ključni parametri algoritma upotrebljavaju se podaci analize geometrijskih ograničenja, kao što su širine pješačkih prometnica, prometnih traka, razdjelnih pojava itd. Analizom literature uočena je težnja za uvođenjem i optimizacijom biciklističke infrastrukture u okviru postojećih profila prometnica [7]. Osim oblikovanja i smještaja, posebna je pozornost posvećena povezivanju ključnih točaka jednoga urbanog područja, čime se povećava i mobilnost grada. Autori rada [8] istražuju koliko je biciklistička infrastruktura prilagođena korisnicima, analizirajući koliko biciklisti moraju skretati s najkraće trase zbog loše povezanosti staza. Uporabom GPS podataka iz različitih urbanih sredina autori su otkrili velike razlike u kvaliteti biciklističke mreže gradova. Pokazalo se da loše planirane trase prisiljavaju bicikliste na dulje i manje praktične putanje, što smanjuje atraktivnost biciklizma kao oblika prijevoza. U radu [9] analizira se funkcionalnost biciklističke mreže u Montrealu, s naglaskom na povezanost i direktnost trasa. Autori [9] upozoravaju da sama duljina staza nije dovoljna ako nisu dobro povezane i prilagođene potrebama biciklista. Mnogi biciklisti izbjegavaju postojeće staze zbog loše povezanosti, što upućuje na nedostatke u planiranju. Bolja integracija i optimizacija mreže mogu znatno poboljšati biciklizam kao održiv način prijevoza u gradovima. Osim dobre povezanosti sigurnost biciklista, ali i ostalih sudionika u prometu, mora biti prioritet. Autori rada [10] uporabom biciklističkoga simulatora za analizu različitih prometnih uvjeta istražuju kako oblikovanje biciklističke infrastrukture utječe na sigurnost vozača bicikala. Rezultati pokazuju da jasnije odvojene biciklističke staze i bolja signalizacija mogu znatno smanjiti rizik od nesreća. Studija naglašava važnost simulacija u testiranju sigurnosnih rješenja te nudi preporuke za poboljšanje biciklističke infrastrukture u gradovima. U ovome je radu predstavljen algoritam za pronalaženje i smještanje biciklističke infrastrukture u postojećem profilu gradske prometnice. Spomenuti algoritam dolazi do optimalnoga rješenja i daje prijedlog položaja biciklističke infrastrukture u ovisnosti o rangu gradske prometnice, njezinom poprečnom presjeku, lokaciji trgovačkih i gospodarskih centara, prostora za rekreaciju i kulturu, kao i mnogih drugih karakteristika jednoga suvremenog grada koje imaju važnu ulogu prilikom projektiranja prometne infrastrukture.

2. Opći pojmovi

2.1. Biciklistička infrastruktura

Radi boljega definiranja, analiziranja i rješavanja problema biciklističke infrastrukture u urbanim područjima neophodno

je definirati opće pojmove biciklističke infrastrukture. Pod pojmom biciklističke infrastrukture podrazumijevaju se površina namijenjena odvijanju biciklističkoga prometa, signalizacija i prostor za odlaganje bicikala. Tijekom vožnje, biciklist je osoba koja održava ravnotežu, vozač i radnik istovremeno. Bicikl je nesigurno, ali i vrlo praktično prijevozno sredstvo. Biciklistički se promet svrstava u spori promet, ali u gradovima može biti najbrži oblik kretanja [11]. Tehnički oblici biciklističke infrastrukture, obrađeni u ovome radu, mogu se podijeliti na:

- biciklističke puteve,
- biciklističke prometnice,
- biciklističke trakove,
- bicikliste na kolniku.

Biciklistički put je put koji je propisno obilježen horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom i ponajprije namijenjen biciklističkom prometu. Određenim pravilima cestovnoga prometa na pojedinim se mjestima može rabiti kao mješovita ili zajednička površina biciklista i drugih korisnika. Biciklistički put primjenjuje se uglavnom za dionice izvan urbanih područja [11].

Biciklistička prometnica je dio prometne površine koji nije u istoj razini s kolnikom ili je od njega odvojen na neki drugi način, a namijenjen je kretanju bicikala i bicikala sa motorom. U naseljenim mjestima biciklistička prometnica od kolnika može biti odvojena samo rubnjakom, dok se izvan naselja odvaja čeličnom zaštitnom ogradom [11].

Biciklistički trak je uzdužni dio kolnika koji je obilježen razdjelnom linijom i namijenjen je kretanju bicikala i bicikala sa motorom. Biciklistički trak nije deniveliran u odnosu na

kolnik i iz sigurnosnih razloga njegova je površina crvene boje [11].

Biciklisti na kolniku koncepcija su vođenja biciklističkoga prometa na kolniku zajedno s motornim vozilima, uz uporabu propisne prometne signalizacije. Ta se koncepcija primjenjuje u urbanim sredinama kada iz prostornih razloga nije moguće napraviti samostalnu biciklističku površinu. Također, bitno je napomenuti da su prometnice s nižom frekvencijom prometa motornih vozila pogodnije za primjenjivanje ove metode vođenja biciklističkog prometa [11]. U tablici 1. prikazani su ključni kriteriji za projektiranje biciklističkih prometnica u urbanim sredinama. Granične vrijednosti dnevnoga prometnog opterećenja motornih vozila Q_{dn} , vršno satno opterećenje Q_h i vršno satno opterećenje biciklista Q_{bh} utječu na pravilan izbor tipa biciklističke infrastrukture. Osim navedenih parametara, s gledišta sigurnosti, jako bitnu ulogu ima maksimalna brzina kretanja motornih vozila prikazana u tablici 1.

Vođenje trase i granične vrijednosti tlocrtnih i visinskih elemenata predstavljaju jako bitan dio analize i određivanja pozicije buduće biciklističke infrastrukture. Pod tim pojmom razlikujemo tlocrtne i visinske geometrijske elemente trase. Tlocrtne elemente čine pravci i kružni lukovi. Definirani su minimalni polumjeri biciklističke prometnice ovisno o projektnoj brzini i prikazani su u tablici 1.

Visinski elementi prikazani su niveletom biciklističke prometnice. Ako je promjena uzdužnog nagiba manja od 5 % nije potrebno izvesti zaobljenje. Preporuča se izvesti zaobljenje polumjerom većim od 4 m. Ako je promjena nagiba nivelete veća od 5 %, minimalni je polumjer konveksnog zaobljenja $R_{kn, min} = 30$ m, minimalni je polumjer konkavnog zaobljenja $R_{kv, min} = 10$ m.

Tablica 1. Uvjeti za projektiranje biciklističkih prometnica [12]

Kriterij	Biciklisti dijele kolnik	Biciklističke trake (t_b)	Biciklističke staze (b_s)
Tip	Biciklisti voze kolnikom s motornim vozilima	Jednosmjerne, uz desni rub kolnika	Dvosmjerne, fizički odvojene od kolnika
Dnevno opterećenje (Q_{dn})	≤ 1500 vozila/dan	1500 – 4000 vozila/dan	> 4000 vozila/dan
Vršno satno opterećenje (Q_h)	≤ 150 vozila/sat	150 – 400 vozila/sat	> 400 vozila/sat
Vršno satno opterećenje biciklista (Q_{bh})	≤ 20 biciklista/sat	20 – 50 biciklista/sat	> 50 biciklista/sat
Maksimalna brzina motornih vozila (V_p)	≤ 30 km/h (fizički regulirano)	≤ 50 km/h	> 50 km/h
Intenzitet javnoga prijevoza (Q_{jp})	Nije značajan	≤ 10 autobusa/sat	> 10 autobusa/sat
Minimalna širina	Nije definirano	1,25 m	2,00 m
Polumjer horizontalne krivine	Prilagođen vozilu	10 – 40 m	> 2 m u zonama raskrižja
Obilježavanje	Prometni znakovi	Horizontalna signalizacija, boja ili različita podloga	Fizičke barijere (rubnjaci, razdjelne trake)
Zaštita od prometa	Nema zaštite	Nije fizički odvojena	Potpuno odvojena od kolnika
Maksimalni uzdužni nagib	Do 6 %	Do 5 % (preporučeno)	Do 6 % (kraće dionice), do 3 % na duljim dionicama
Preporučena širina u uvjetima velike frekvencije	Nije definirano	1,50 m	2,50 – 3,00 m

Maksimalne duljine uspona za prosječnoga biciklista prikazane su u tablici 2.

Neophodno je napomenuti da je vertikalni tok biciklističke površine uvjetovan vertikalnim tokom prometnice uzduž koje se prostire.

Tablica 2. Maksimalna duljina uspona [11]

Uzdužni nagib [%]	Maksimalna duljina uspona [m]
10	20
6	65
5	120
4	250
3	250

2.2. Prometno opterećenje

Prometno opterećenje ima vrlo važnu ulogu pri projektiranju prometnica, dimenzioniranju kolničkih konstrukcija i upravljanju prometom. Ukupno ekvivalentno prometno opterećenje proračunska je vrijednost ukupnoga broja standardnih osovina tijekom projektnoga razdoblja na mjerodavnoj prometnoj traci za dimenzioniranje [13].

Standardna osovina jednostruka je osovina vozila opterećena silom od 82 kN. Treba naglasiti da se pri izračunavanju ukupnoga ekvivalentnog prometnog opterećenja analizom ne obuhvaćaju putnička vozila, zbog neznatnog utjecaja na kolničke konstrukcije. Primjenom faktora ekvivalencije izračunava se broj standardnih osovina, opterećenih silom od 82 kN, koje prolaze mjerodavnim trakom za dimenzioniranje. Također, pri izračunavanju ekvivalentnoga prometnog opterećenja uzimaju se u obzir i sljedeći čimbenici:

- prosječna godišnja stopa rasta prometa,
- raspodjela prometnoga opterećenja po voznim trakovima,
- prosječna nosivost i iskorištenost teških teretnih vozila,
- osovinsko opterećenje reprezentativnih vrsta vozila,
- prosječan godišnji dnevni broj teških teretnih vozila u početnoj godini eksploatacije.

Tablica 3. Podjela prometnoga opterećenja prema standardu SRPS U.C4.010 [13]

Grupa prometnog opterećenja	Ukupno ekvivalentno osovinsko opterećenje od 82 kN u projektnom razdoblju
Vrlo teško	$> 7 \cdot 10^6$
Teško	$2 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^6$
Srednje	$7 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$
Lako	$2 \cdot 10^5 - 7 \cdot 10^5$
Vrlo lako	$< 2 \cdot 10^5$

Klasifikacija prometnoga opterećenja koju algoritam primjenjuje temelji se na klasifikaciji danoj u standardu SRPS U.C4.010. Prema tom standardu prometno se opterećenje može podijeliti u pet skupina. U tablici 3. prikazana je podjela prometnoga opterećenja po skupinama i broju standardnih osovina.

3. Funkcionalna klasifikacija gradskih prometnica

Cestovna mreža grada dijeli se u dvije funkcionalne skupine [14]:

- **primarna gradska mreža** koja ima funkciju prometne povezanosti gradskih cjelina i namijenjena je različitim vrstama vozila (javni gradski prijevoz, osobni automobili, teretna vozila, pješaci, biciklisti),
- **sekundarna lokalna mreža** kojoj je funkcija pristupanje lokacijama i sadržajima neposredno uz dionicu ulice. Ponajprije opslužuje automobile, pješake i bicikliste.

Gradsku cestovnu mrežu čini splet ulica koje se mogu, prema svojoj funkciji, podijeliti u tri skupine:

- pristupne ulice,
- sabirne ulice,
- magistralne ulice.

Pristupne ulice najbrojnija su kategorija gradskih prometnica. Mogu se podijeliti na osnovni i mješoviti tip. Mješoviti tip ima funkciju sabiranja vozila manje urbanističke cjeline ili nekoga njezinog dijela, dok osnovni tip opslužuje samo lokacije, odnosno rubne sadržaje. U okviru profila pristupnih ulica mogu se organizirati površine uličnoga parkiranja motornih vozila.

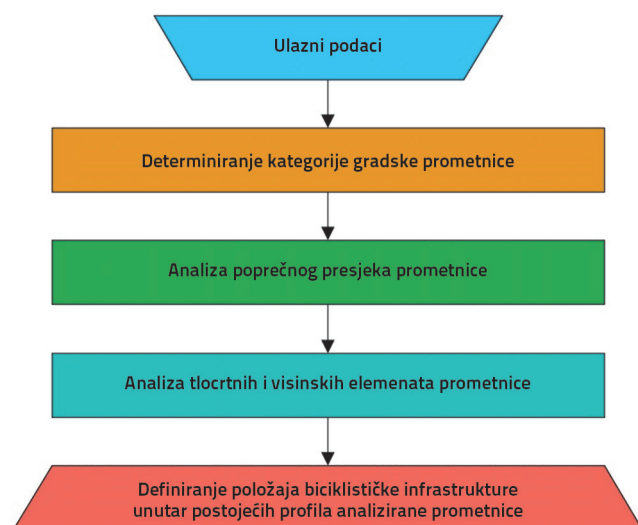
Sabirne ulice ostvaruju vezu između primarne i sekundarne cestovne mreže. Ako sabirna ulica ima primarnu funkciju opsluživanja lokacije, u odnosu na povezivanje prometa, onda spada u lokalnu cestovnu mrežu i pripada mješovitom tipu.

Magistralne ulice pripadaju primarnoj cestovnoj mreži, imaju funkciju povezivanja pojedinih gradskih cjelina s određenim središtima aktivnosti i mogu se povezivati s regionalnim cestama. To su prometnice visokoga kapaciteta i namijenjene su javnom i individualnom putničkom prometu. Sadrže po jedan kolnički trak za svaki smjer kretanja vozila, odvojen razdjelnim pojasom ili razdjelnim trakom.

4. Opis algoritma

Algoritam za pronalaženje i smještanje biciklističke infrastrukture u okviru postojećega profila prometnice podijeljen je u pet ključnih faza. Svaka će faza biti opisana u nastavku rada. Slika 1. prikazuje podjelu algoritma po spomenutim fazama. Svaka faza podijeljena je na niz jasno definiranih koraka. Algoritam je vrlo opsežan i izrađen je u skladu s ključnim zahtjevima i problemima koji su otkriveni analizom biciklističkoga prometa na razini urbanoga područja, odnosno grada. S obzirom na opseg, broj i kompleksnost problema i zahtjeva, a radi optimalnijih i sveobuhvatnijih

rješenja, kao što je prije rečeno, algoritam je podijeljen u pet faza. Ta je podjela bila neophodna radi sagledavanja i razumijevanja većine izazova biciklističkih prometnica, urbanoga područja, ali i kompatibilnosti niza predloženih rješenja i mjera za prevladavanje mogućih problema te njihovo predviđanje i zaštitu od njih.



Slika 1. Prikaz algoritma po fazama

4.1. Faza I: Unos podataka

Radi rješavanja kompleksnoga problem kao što je biciklistička infrastruktura neophodno je jasno definirati trenutne i potencijalne uzroke, kao i njihovu povezanost i potencijalnu međusobnu uzročnost. Ulazni parametri predmetnoga algoritma mogu se podijeliti u dvije skupine, i to:

- parametri poprečnog presjeka (broj i širina prometnih i kolničkih traka, širina pješačkih prometnica, postojanje i širina zelenoga razdjelnog pojasa između kolničkih trakova, postojanje drvoreda itd.),
- prometni parametri (kategorija gradske prometnice, je li prometnica jednosmjerna ili dvosmjerna, prometni protok itd.).

Prva faza algoritma izbor je i prepoznavanje svih relevantnih elemenata prometnoga i slobodnoga profila prometnice koji na neposredan i posredan način utječu na biciklističke

prometnice, pa time i na njezin položaj i geometriju biciklističke infrastrukture.

4.2. Faza II: Određivanje kategorije gradske prometnice

Druga je faza detaljna analiza podataka i parametara unesenih u prethodnoj fazi algoritma. U ovom dijelu algoritma ključni je dio klasifikacija analizirane prometnice po kriteriju kategorije. S obzirom na to da je riječ o gradskoj prometnoj infrastrukturi, prometnice mogu biti pristupne, sabirne ili magistralne. Nakon prve faze i unosa podataka, počinje druga faza analize. Za učinkovitije funkcioniranje i klasifikaciju ulica primijenjena je varijabla i , ovisno o kategoriji, varijabla i može imati vrijednost 1 za glavne ceste, 2 za sabirne ceste ili 3 za pristupne ceste. Vrijednosti su promjenjive i određuju daljnji tok algoritma. Od ove faze algoritam kreće u grananje u tri velike grane. S obzirom na to da su kategorije gradskih prometnica različite, i njihov je poprečni presjek, gustoća prometa i intenzitet prometa drukčiji. Shodno tome, bilo je neophodno izvršiti spomenuto grananje. Svaka od navedenih kategorija gradskih prometnica ima svoju specifičnost, kao i različite prioritete koje je bilo neophodno analizirati. Na slici 2. prikazan je dio algoritma u kojem se javlja grananje prema kriteriju kategorije prometnice, kao što je opisano u tekstu.

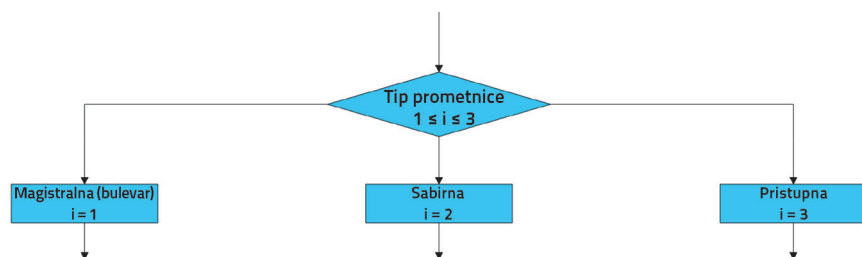
4.3. Faza III: Analiza poprečnog presjeka prometnice

Treća faza algoritma analizira elemente prometnoga i slobodnoga profila promatrane gradske prometnice. To podrazumijeva širine kolničkih i prometnih trakova, kao i širine pješačkih prometnica. Svaka razina gradske prometnice ima svoje posebnosti i prioritete.

Primjerice, kod magistralnih prometnica jako je bitno povezati centre u koje gravitira veliki broj ljudi, kao što su trgovački centri, prostori za rekreaciju, objekti kulture itd. Taj kriterij nije od velike važnosti za pristupne i sabirne ulice. Mnogi kriteriji imaju indirektnu vezu sa sigurnošću sudionika u prometu, a posebno biciklista. Ako u prometnom profilu postoji trak za javni gradski prijevoz, nije moguće izvesti biciklistički trak na kolniku, pa je neophodno tražiti optimalno rješenje položaja biciklističke prometnice. Taj kriterij postoji kako bi se povećala sigurnost biciklista. Prometni trak javnoga prijevoza i biciklističke staze

u pravilu se nalaze uz desni rub kolnika, pa se tijekom odvijanja prometa mogu pojaviti konfliktne točke.

Treća faza algoritma može se smatrati ključnom fazom. Po završetku ove faze dobiva se preliminarno rješenje položaja biciklističke infrastrukture, kao biciklističke prometnice, traka ili mješovitoga profila. Neophodno je napomenuti da, ima li gradska



Slika 2. Grafički prikaz druge faze algoritma

prometnica varijabilnu širinu elemenata poprečnoga presjeka (ponajprije pješačkih prometnica), treba izvršiti analizu po dionicama. U tom slučaju dionice koje će biti podvrgnute analizi moraju biti odabrane tako da, uzduž cijele duljine, širina elemenata poprečnog presjeka ne odstupa više od ± 15 cm.

Ti potencijalni problemi nastaju kao posljedica devijacije regulacijske linije. Navedeni uzrok izaziva sistemske probleme, kao što je prije rečeno. Rješenje je toga problema u domeni urbanizma i urbanističkih procedura i nije predmet analize algoritma.

U ovom je radu provedena analiza po jedne prometnice iz svake kategorije, uz izvještaj s konačnim prijedlogom mjera za smještanje biciklističke infrastrukture. Algoritam se može podijeliti u tri dijela ili tri grane na temelju kategorije gradske prometnice, kao što je opisano u fazi II. Kod magistralnih prometnica, analizirani podaci su sljedeći:

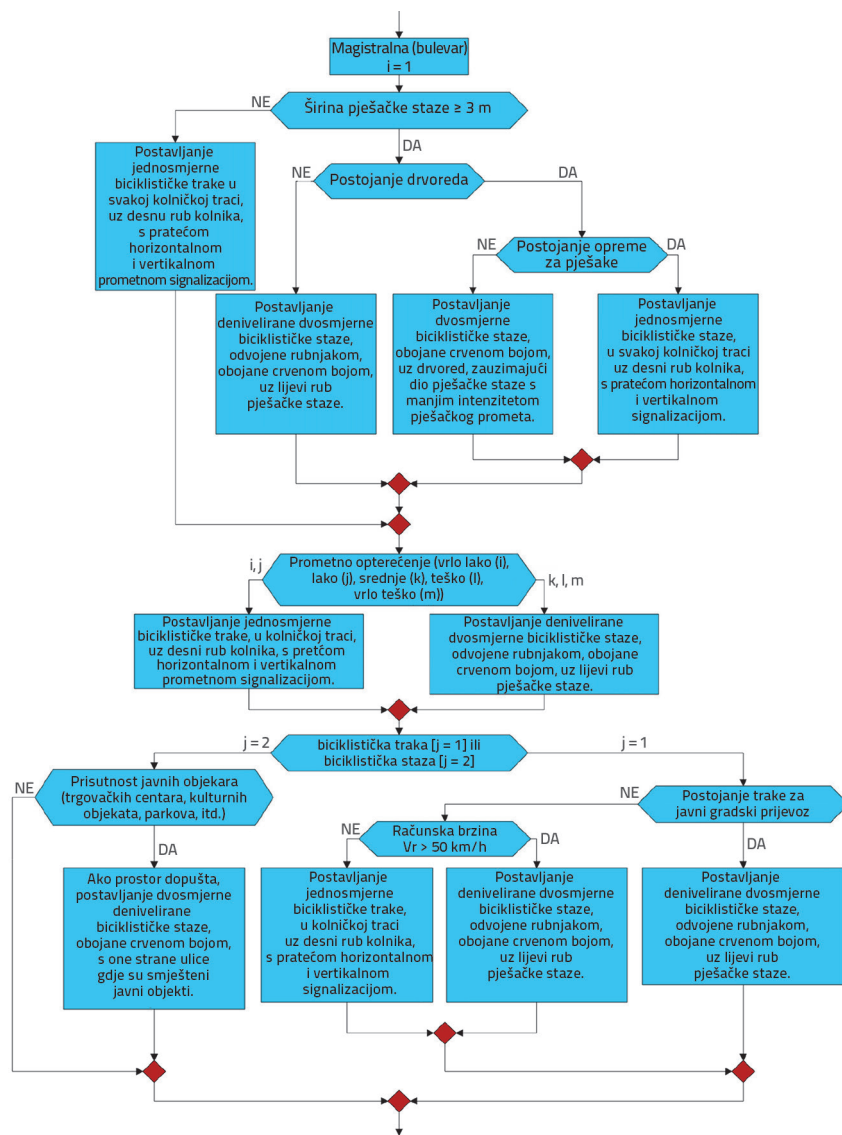
- širina pješačke prometnice,
- postojanje drvoreda,
- postojanje opreme za pješake,
- postojanje traka za javni gradski prijevoz,
- prisutnost javnih objekata (tržnih centara, objekata kulture, parkova, itd.).

U slučaju magistralne ceste varijabla i ima vrijednost 1. Zatim slijedi upit kojim se provjerava je li širina pješačke staze veća od 3 metra. Ako nije, algoritam daje preliminarno rješenje koje predlaže postavljanje jednosmjerne biciklističke staze u svaki kolnički trak. Ako je postavljeni uvjet ispunjen, sljedeći upit provjerava postoji li drvored. Ako nema drvoreda, predlaže se rješenje koje predviđa postavljanje dvosmjerne, degradirane biciklističke staze. Ako algoritam na temelju unesenih podataka utvrdi postojanje drvoreda, dalje provjerava prisutnost pješačke opreme na dijelu pješačkih staza. Ako oprema ne postoji, algoritam predlaže postavljanje dvosmjerne biciklističke staze obojene crvenom bojom na dijelu pješačke staze sa slabijim intenzitetom pješačkoga prometa. Inače, predlaže se postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka u svakom kolniku, uz desni rubnjak. Nakon toga slijedi ispitivanje intenziteta prometnoga opterećenja. Prometno opterećenje koje se analizira za magistralne ceste može biti vrlo lako, lako, srednje, teško i vrlo teško [13]. Kako bi algoritam radio učinkovitije,

opterećenjima se dodjeljuju sljedeće oznake:

- i - vrlo lako prometno opterećenje,
- j - lako prometno opterećenje,
- k - srednje prometno opterećenje,
- l - teško prometno opterećenje,
- m - vrlo teško prometno opterećenje.

Ako je prometno opterećenje magistralne ceste lako ili vrlo lako (i ili j), algoritam predlaže postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na kolniku s pripadajućom horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom. U suprotnom, ako je prometno opterećenje srednje, teško ili vrlo teško (k , l ili m), algoritam predviđa postavljanje dvosmjerne biciklističke staze, odvojene rubnjakom i obojane crvenom bojom, uz lijevi rub pješačke staze. Zatim ulazimo u sljedeći uvjet koji se koristi varijablom j . Ta varijabla može imati vrijednost 1 ili 2, ovisno o tome je li predloženo rješenje biciklistička staza ili staza, redom. Ako



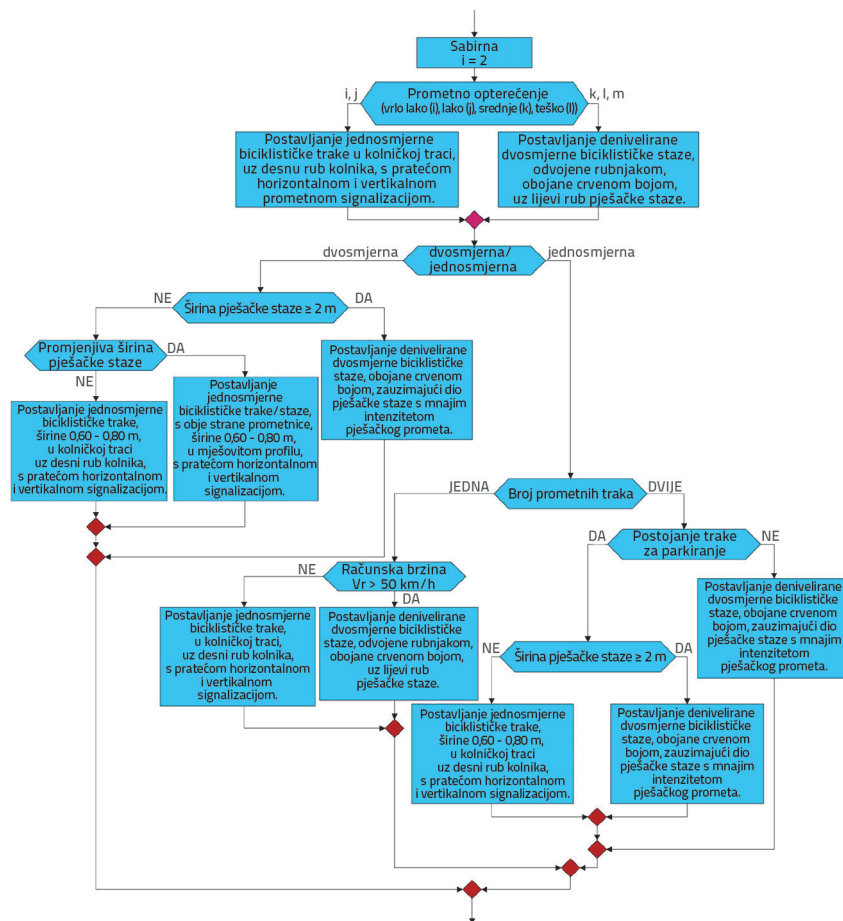
Slika 3. Analiza poprečnog presjeka magistralne prometnice

varijabla j ima vrijednost 1, tj. ako je predviđena biciklistička staza, algoritam ulazi u sljedeći upit koji provjerava postoji li trak namijenjen javnom gradskom prijevozu. Ako je uvjet ispunjen, idejnim rješenjem ove faze predviđeno je postavljanje denivelirane biciklističke staze, odvojene rubnjakom, koja se postavlja uz lijevi rub pješačke staze. U suprotnom, algoritam provjerava je li projektna brzina veća od 50 km/h. Ako jest, predlaže se izgradnja denivelirane dvosmjerne biciklističke staze, odvojene rubnjakom i obojene crvenom bojom, uz lijevi rub pješačke staze. Ako je računaska brzina manja ili jednaka 50 km/h, predlaže se postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolničkoga traka, uz desni rub kolnika, uz pripadajuću horizontalnu i vertikalnu prometnu signalizaciju. Zatim, ako varijabla j ima vrijednost 2, algoritam provjerava postojanje javnih objekata koji su povezani s glavnom cestom. Ako je to slučaj i ako ima dovoljno prostora, predlaže se idejno rješenje kojim se na dijelu pješačke staze, na strani ceste na kojoj se nalaze javni sadržaji, postavlja dvosmjerna, denivelirana biciklistička staza.

Na slikama 3., 4. i 5., prikazan je dio algoritma redom za glavnu, sabirnu i pristupnu prometnicu. U dijelu algoritma koji analizira sabirne ulice postoje određene razlike u skladu s razlikama između profila sabirne i magistralne ulice. Ako ulica pripada kategoriji sabirnih, slijedi da je $i = 2$. Prvi je korak u analizi sabirnih ulica analiza prometnoga opterećenja. Ovisno o intenzitetu, prometnom opterećenju dodijeljene su sljedeće oznake:

- i - vrlo lako prometno opterećenje,
- j - lako prometno opterećenje,
- k - srednje prometno opterećenje,
- l - teško prometno opterećenje,

Ako je prometno opterećenje lako ili vrlo lako (i ili j), upit predlaže postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolničkoga traka, uz desni rub kolnika, s pripadajućom horizontalnom i vertikalnom signalizacijom. U suprotnom, ako je prometno opterećenje srednje ili teško (k ili l), predlaže se postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze obojene crvenom bojom, uz lijevi rub pješačke staze. Nakon toga slijedi upit koji provjerava je li sabirna ulica jednosmjerna ili dvosmjerna. Ako je jednosmjerna, algoritam provjerava postoji li jedan ili dva prometna traka. Ako postoji jedan, slijedi upit koji provjerava je li projektna brzina veća od 50 km/h. Ako je uvjet zadovoljen,



Slika 4. Analiza geometrijskih elemenata profila sabirne prometnice

algoritam predviđa postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze, u protivnom se predlaže postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolnika, uz desni rubnjak kolnika. Ako postoje dva prometna traka, slijedi uvjet kojim se provjerava postoji li parkirni trak. Ako je uvjet ispunjen i trak postoji, slijedi prethodno opisana kontrola širine pješačkih staza. Ako parkirni trak ne postoji, algoritam predlaže postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze na dijelu pješačke staze sa slabijim intenzitetom pješačkoga prometa. Ako je sabirna ulica dvosmjerna, postoji uvjet kojim se provjerava je li širina pješačke staze veća od 2 m. Ako je uvjet zadovoljen, algoritam kao rješenje predlaže postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze, na dijelu pješačke staze sa slabijim intenzitetom pješačkog prometa. U suprotnom, slijedi upit kojim se provjerava je li širina pješačke staze promjenjiva i, ako jest, planira se postavljanje jednosmjerne biciklističke staze/staze s obje strane ceste, u mješovitom profilu. Ako širina pješačkih staza nije promjenjiva, predlaže se postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolnika, uz desni rub kolnika.

U dijelu koji se bavi analizom pristupnih ulica, prvi upit ispituje je li prometno opterećenje lako, vrlo lako ili srednje. Prometna opterećenja označena su sljedećim oznakama:

- i - vrlo lako prometno opterećenje,
- j - lako prometno opterećenje,
- k - srednje prometno opterećenje.

Ako je prometno opterećenje vrlo lako ili lako (i ili j), predlaže se postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolničke trake, uz desni rub kolnika, s pripadajućom horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom. U slučaju da je prometno opterećenje srednje (k), predlaže se postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze obojene crvenom bojom, uz lijevi rub pješačke staze.

Sljedeći je kriterij određivanje je li ulica jednosmjerna ili dvosmjerna. Ako je jednosmjerna, algoritam provjerava ima li jedan ili dva prometna traka. Ako postoji samo jedan prometni trak, slijedi upit koji provjerava je li širina pješačke staze veća ili jednaka širini od 2 m. Ako jest, algoritam predviđa postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze na dijelu pješačke staze s manjim intenzitetom pješačkoga prometa, u suprotnom predviđa postavljanje jednosmjerne denivelirane biciklističke staze na dijelu pješačkih staza, sa obje strane kolnika. Ova kontrola širine pješačkih staza sa svojim ishodima ponavlja se više puta u dijelu algoritma koji analizira pristupne prometnice. U slučaju da jednosmjerna pristupna prometnica ima dva prometna traka, algoritam prvo provjerava ima li trak za parkiranje. Ako ima, slijedi upit

koji provjerava je li širina pješačkih staza veća ili jednaka širini od 2 m, kao što je prije opisano. Ako trak za parkiranje ne postoji, algoritam predviđa postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolničkoga traka, uz desnu ivicu kolnika.

Ako je ulica dvosmjerna, algoritam provjerava je li širina pješačkih staza veća ili jednaka širini od 2 m. Ako jest, algoritam predviđa postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke staze obojene crvenom bojom, zauzimajući dio pješačke staze s manjim intenzitetom pješačkoga prometa. U suprotnom, predlaže se postavljanje jednosmjernoga biciklističkog traka na dijelu kolničkoga traka, uz desni rub kolnika, s pripadajućom horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom.

4.4. Faza IV: Analiza tlocrtnih i visinskih elemenata prometnice

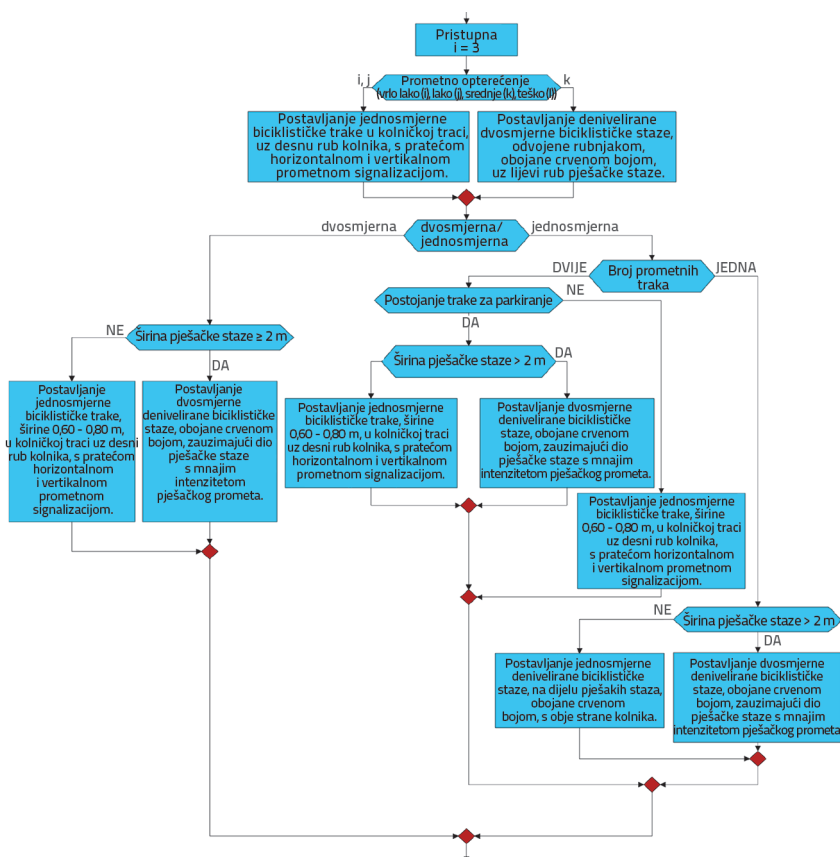
Četvrta, i ujedno završna, faza algoritma polazi od preliminarnoga rješenja smještanja biciklističke infrastrukture iz prethodne faze. U skladu s time, vrši se analiza geometrijskih elemenata. Četvrta se faza može podijeliti u tri cjeline (podfaze) prema vrsti provedene analize, i to:

- analiza horizontalne geometrije,
- analiza vertikalne geometrije,
- analiza poprečnih nagiba.

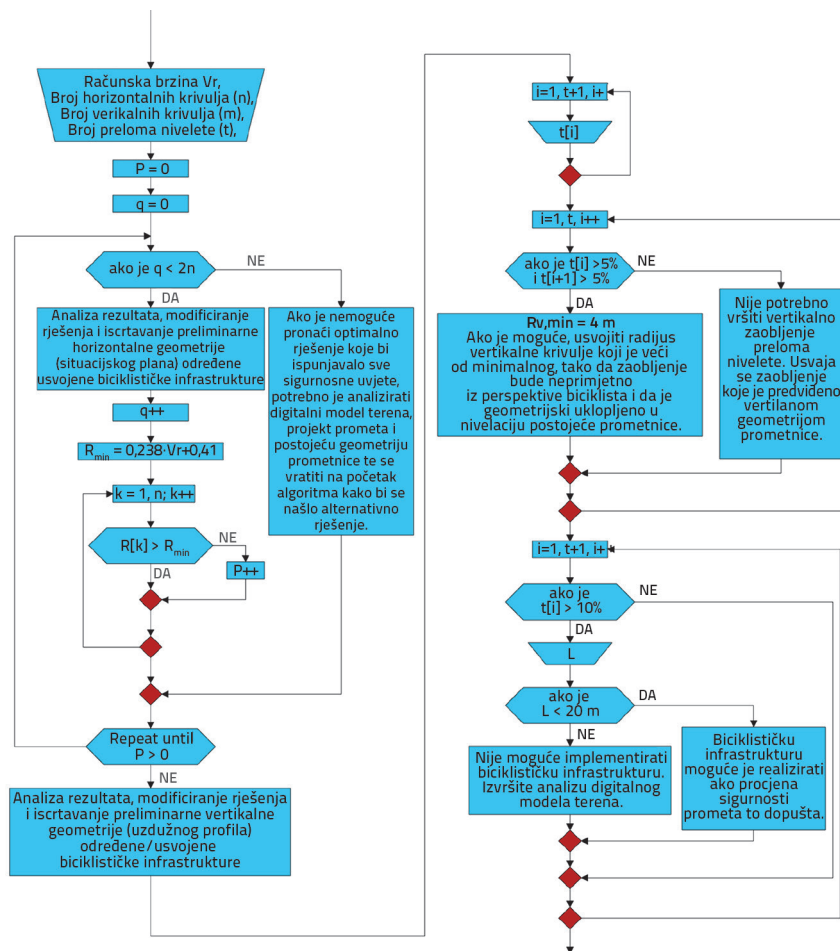
S obzirom na to da postoji preliminarno rješenje smještanja biciklističke infrastrukture, u ovoj se fazi vrši unos broja geometrijskih elemenata. Prilikom analize, ulazni su parametri broj horizontalnih i vertikalnih krivina, projektna brzina, broj lomova nivelete. Na slici 6. prikazan je unos ulaznih parametara, kao i dio algoritma koji je četvrta faza.

Svaki od navedenih unesenih parametara određen je svojom oznakom, kao što je prikazano na slici 6. Da bi se analizirala geometrija svake krivulja pojedinačno, uvedene su petlje *while* i *repeat until*. S obzirom na složenost problema, a radi optimizacije vremena, uvedeni su određeni brojači. Brojači imaju funkciju sprečavanja pojave beskonačne petlje, tj. moguću situaciju u kojoj je uvjet uvijek ispunjen za ulazak u petlju.

U ovoj fazi unos i analiza geometrijskih elemenata riješena je primjenom niza, odnosno formiranjem niza elemenata iste vrste (npr. niz elemenata radijusa horizontalnih krivina). Svi kriteriji horizontalne i vertikalne geometrije, koji su primjenjivani prilikom izrade



Slika 5. Analiza geometrijskih elemenata profila pristupne prometnice



Slika 6. Faza IV - analiza horizontalne i vertikalne geometrije

algoritma, preuzeti su iz priručnika o projektiranju prometnica u Republici Srbiji [11]. Na taj je način izvršena sinkronizacija algoritma s važećim propisima i standardima. Ulazni podaci ove faze su:

- projektne brzina (V_r),
- broj horizontalnih krivina (n),
- broj vertikalnih krivina (m),
- broj lomova nivelete (t).

Također, uvedeni su sljedeći parametri:

- P - broj horizontalnih krivina s polumjerom manjim od minimalnog,
- q - broj iteracija petlje.

Početne vrijednosti parametara P i q imaju vrijednost 0. Prvi je dio ove faze analiza horizontalne geometrije prometnice. Ovu fazu čini jedan *repeat-until* petlja kojoj je uvjet da se analiza provodi sve dok parametar P ima vrijednost veću od 0. Na početku petlje, prvi je korak provjera je li broj iteracija (q) manji od dvostrukoga broja horizontalnih krivina ($2n$) (slika 6.). Ako taj uvjet nije ispunjen, onda nije moguće naći optimalno rješenje prometnice, pa algoritam predlaže dodatnu analizu

digitalnoga modela terena, projekta prometa, geometriju prometnice itd. U suprotnom se analizira, modifikira i iscrta preliminarno rješenje, dano u prethodnoj fazi, nakon čega se vrijednost parametra q povećava za 1. Potom, algoritam, sukladno Smjernicama [15], računa minimalni polumjer biciklističke infrastrukture, prema formuli:

$$R_{\min} = 0,238 \cdot V_r + 0,41$$

Zatim slijedi petlja *for* koja se kreće u rasponu od 1 do n i uspoređuje vrijednost svakog polumjera horizontalne krivine pojedinačno s prije izračunatom minimalnom vrijednošću. Ako postoji polumjer vrijednost kojega nije veća od minimalne, parametar P povećava svoju vrijednost za 1. Ovaj je parametar sadržan u uvjetu glavne petlje i omogućava njezin rad. S obzirom na to da može doći do slučaja beskonačne petlje, uveden je parametar q koji bi prekinuo petlju kada broj iteracija prijeđe dvostruki broj horizontalnih krivina. Nakon ovoga se dijela ponovno analiziraju rezultati i iscrta preliminarno rješenje uzdužnog profila. Potom se, primjenom petlje *for*, unosi i formira niz elemenata koji su uzdužni nagibi nivelete prometnice. Spomenuta se petlja *for* kreće od

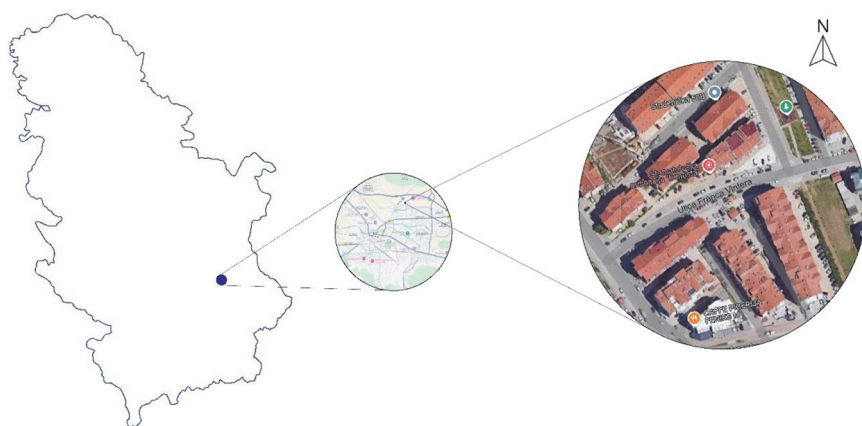
vrijednosti 1 do $t+1$, gdje je parametar t broj lomova nivelete. Stvaranjem ovoga niza mnogo je lakše sagledati elemente uzdužnog profila prometnice. Zatim se, primjenom sljedeće petlje *for*, ispituju vrijednosti formiranoga niza. Zapravo algoritam ispituje imaju li dva uzastopna nagiba nivelete pojedinačnu vrijednost veću od 5 %. Ako je uvjet ispunjen, algoritam predlaže da se, ako je moguće, uzme polumjer koji je veći od minimalnoga, ($R_{v,\min} = 4 \text{ m}$) [15]. U suprotnom ne treba vertikalno zaobljavati niveletu predloženoga rješenja biciklističke infrastrukture. Posljednji dio ove faze analiza je uzdužnih nagiba s gledišta uvjeta gradske vožnje bicikala [11]. Primjenom nove petlje *for* algoritam prolazi kroz prije oblikovani niz i provjerava je li pojedinačna vrijednost svakoga uzdužnog nagiba veća od 10 %. Ako to nije slučaj, algoritam se završava i predloženo rješenje postaje konačnim. U suprotnom, unosi se duljina L , koja je duljina dionice na kojoj je niveleta u nagibu većem od 10 %. Zatim se provjerava je li vrijednost unesene duljine L manja od 20 m. Ako jest, algoritam završava rad i predloženo rješenje postaje konačnim. U suprotnom, algoritam utvrđuje da nije moguće izvesti predloženo rješenje biciklističke infrastrukture u danim uvjetima i predlaže dodatnu analizu digitalnoga modela terena.

4.5. Faza V: Definiranje položaja biciklističke infrastrukture u okviru postojećeg profila analizirane prometnice

Peta i završna faza sami je kraj algoritma. U ovoj su fazi svi geometrijski elementi prihvaćeni na temelju prije definiranih kriterija, odnosno faza. Dobiveni su podaci spremni za daljnju razradu i početak izrade idejnoga rješenja biciklističke infrastrukture. Podaci su prikazani u obliku izvještaja koji će biti prikazan sljedećim poglavljima.

5. Primjena razvijenoga algoritma

Analizom postojeće infrastrukture izvršit će se testiranje algoritma. Analizom će biti obuhvaćene tri prometnice, pristupna, sabirna i magistralna. Ulazni podaci, koji se odnose na geometriju prometnice, dobiveni su uvidom u projekte za građevinsku dozvolu. Spomenuti su projekti su dobiveni od JP Zavoda za urbanizam grada Niša radi znanstvenoga istraživanja.



Slika 7. Položaj ulice Franca Vintera u Nišu

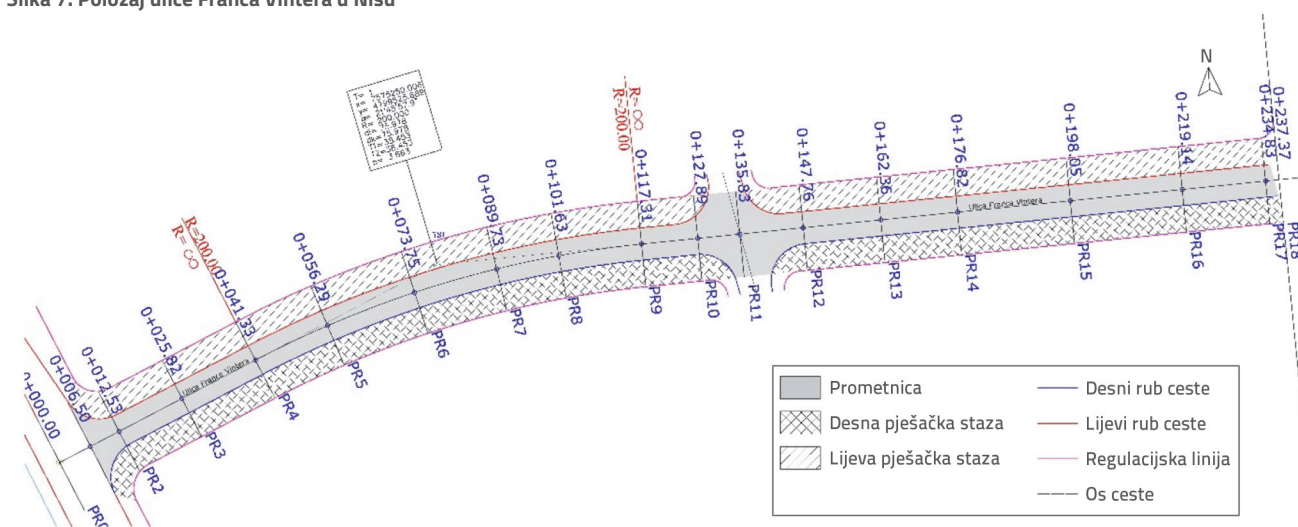
5.1. Analiza pristupne ulice

Analizirana ulica, koja spada u kategoriju pristupne, Ulica je Franca Vintera. Položaj analizirane ulice prikazan je na slici 7. Ukupna duljina ulice, koja je prikazana na slici 8., iznosi 246,88 m i sadrži 19 poprečnih presjeka.

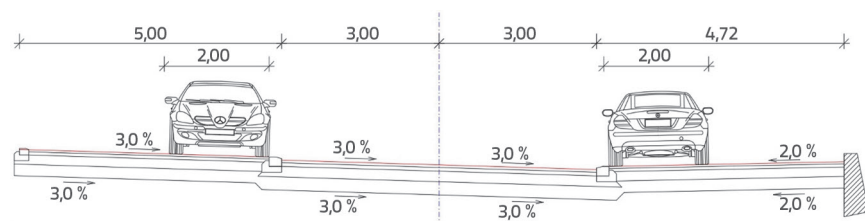
Ulica ima dva kolnička traka, s po jednim prometnim trakom, kao i pješačke prometnice s obje strane kolnika. Širina kolničkih i prometnih trakova iznosi 3,00 m, pa je ukupna širina kolnika 6,00 m. Kolnik je s obje strane obrubljen upuštenim rubnjakom dimenzija 18/24 cm. Ukupna denivelacija kolnika i pješačke prometnice iznosi 6 cm. Kolnička je konstrukcija fleksibilna, izrađena od asfaltnih AB11s (5 cm), BNS32 (7 cm) i nevezanih materijala u obliku drobljenoga kamenog agregata 0 do 31,5 (20 cm) i šljunka 0 do 63 (25 cm). Kolnička konstrukcija pješačkih prometnica identična je kao kolnik. Širina je lijeve pješačke prometnice 5 m, dok širina desne iznosi 4,72 m. Iako su širine pješačkih prometnica promjenjive, razlika je vrlo mala u odnosu na širinu prometnice, pa se spomenute razlike mogu zanemariti. Poprečni je nagib kolnika jednostrani (od lijevoga k desnom rubu kolnika) i iznosi 3 % cijelom duljinom ulice. Poprečni nagib

lijeve pješačke prometnice iznosi 3 % do profila 8 (km 0+101,63), i 2 % do posljednjeg profila, dok je poprečni nagib desne pješačke prometnice konstantan i iznosi 2 %. Poprečni su nagibi pješačkih prometnica orijentirani prema osi kolnika radi odvođenje atmosferske vode i da ne dolazi do zadržavanja na pješačkim prometnicama.

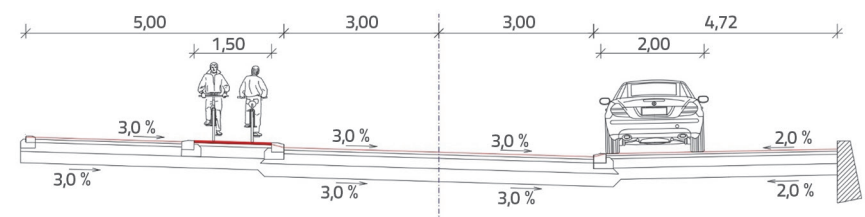
Uzdužni nagib kolnika iznosi 2,3 % od početka ulice do stacionaže km 0+073,74 m i 1,4 % do posljednjega profila. Uzdužni su nagibi pozitivni, tj. analizirana ulica je u usponu u smislu rasta stacionaže.



Slika 8. Situacija Ulice Franca Vintera



Slika 9. Karakteristični poprečni profil pristupne ceste



Slika 10. Prijedlog rješenja unutar poprečnoga profila ulice Franca Vintera

Na lomu nivelete nalazi se jedna vertikalna konveksna krivina polumjera $R = 15000$ m. Na situacijskom se planu može uočiti jedna horizontalna krivina polumjera $R = 200$ m, sa skretnim kutom $\alpha = 21^\circ 45' 58''$, između profila 4 (km 0+041,33) i profila 9 (km 0+117,31). Spomenuta je krivina desno orijentirana u pravcu rasta stacionaže. Na slici 9. prikazan je karakterističan poprečni profil ulice Franca Vintera, s naznačenim paralelnim parkiranjem motornih vozila.

S obzirom na to da je riječ o pristupnoj prometnici, kako je algoritmom definirano, $i = 3$. Prvi upit ovoga ogranka algoritma analizu je intenziteta prometnoga opterećenja. Prometno opterećenje analizirane pristupne ulice spada u kategoriju srednjega opterećenja. Na temelju toga podatka predlaže se postavljanje denivelirane biciklističke staze uz lijevi rub pješačke staze, odvojene rubnjakom i obojene crvenom bojom. Zatim slijedi upit koji analizira vođenje prometa, tj. je li ulica predviđena za jednosmjerni ili dvosmjerni promet. U ovom konkretnom slučaju, riječ je o dvosmjernoj ulici. Nakon toga, vrši se analiza širine pješačkih staza. Širina je pješačkih prometnica veća od 2 metra i predlaže se postavljanje dvosmjerne biciklističke prometnice, koja je denivelirana i odvojena od pješačke prometnice rubnjakom. Algoritam nalaže da biciklistička prometnica bude smještena na dijelu pješačke prometnice koja ima niži stupanj pješačkoga prometa. S obzirom na to da se u ovom konkretnom slučaju s obje strane analizirane ulice nalaze stambene zgrade, može se razmotriti da je razlika u intenzitetu pješačkoga prometa zanemariva, pa se ostavlja prostor projektantu da sam odabere stranu ulice na kojoj će biti izvedena biciklistička prometnica. U skladu s time, optimalna bi pozicija biciklističke prometnice bila na dijelu površine lijeve pješačke prometnice, budući da ona ima veću širinu. Prihvaćena širina biciklističke prometnice iznosi $t_b = 1,5$ m.

Po završetku ove grane algoritma, pristupa se analizi tlocrtnih i visinskih elemenata. Ulazni su podaci sljedeće faze broj vertikalnih i horizontalnih krivina, kao i broj

lomova nivelete (taj je podatak jednak broju vertikalnih krivina). Kao što je ranije rečeno, ulica ima samo jednu horizontalnu krivinu ($n = 1$), jednu vertikalnu krivinu ($m = 1$) i jedan prelom nivelete ($t = 1$). Projektna brzina ove kategorije prometnice iznosi 40 km/h, pa se u prvom koraku ove faze može odrediti minimalni polumjer horizontalnih krivina, prema izrazu (1), sukladno Smjernicama [15]:

$$R_{\min} = 0,238 \cdot V_r + 0,41 \quad (1)$$

pa vrijednost minimalnoga polumjera horizontalnih krivina iznosi $R_{\min} = 9,93$ m.

S obzirom na to da je biciklistička prometnica pozicionirana na lijevoj strani kolnika, bliže tjemenu horizontalne krivine, polumjer biciklističke prometnice iznosi $R_b = R + t_s + t_b / 2$, gdje je:

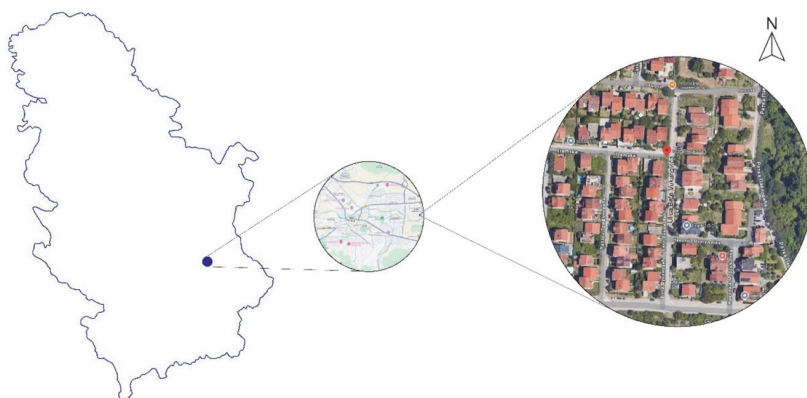
R – radijus horizontalne krivine analizirane prometnice (200 m),
 t_s – širina kolničke trake (3,0 m),
 t_b – širina biciklističke prometnice (1,5 m).

Prema tome, polumjer biciklističke prometnice iznosi 203,75 metara. Polumjer je biciklističke prometnice veći od vrijednosti minimalnog polumjera, čime je uvjet $R > R_{\min}$ ispunjen.

Potom se vrši analiza vertikalnih zaobljenja. Algoritam ulazi u petlju u kojoj analizira niz elementi kojega su vrijednosti uzastopnih nagiba. Niveleta ulice ima samo jedan lom nivelete, tj. dva nagiba, pa je broj elemenata niza 2. Spomenuta petlja ima za cilj da ispita jesu li dva uzastopna nagiba pojedinačno veća od 5 %. Ako jesu, uzima se zaobljenje nivelete same prometnice. Kao što je ranije rečeno, vrijednosti uzastopnih nagiba nivelete iznose $i_1 = 2,3$ % i $i_2 = 1,4$ % (u smislu rasta stacionaže). Oba su nagiba nivelete manja od 5 %, pa je algoritmom definirano da minimalni polumjer vertikalnoga zaobljenja mora iznositi $R_{v,\min} = 4$ m. S obzirom na to da je projektom definirano vertikalno zaobljenje, polumjer kojega iznosi 15000 metara i veći je od minimalne vrijednosti $R_{v,\min}$, uzima se projektirani polumjer i na dijelu biciklističke infrastrukture. Zatim, algoritam vrši analizu uzdužnih nagiba nivelete, koji su veći od 10 %, i duljine dionica zahvaćenih tim nagibom. S obzirom na to da niveleta prometnice ima nagibe vrijednosti kojih su manje od 10 %, ovim se korakom završava algoritam i oblikuje izvještaj koji je prikazan u tablici 4. Prilikom pregleda prometnice primijećeno je da su obilježena parking mjesta za uzdužno parkiranje i na lijevoj i na desnoj pješačkoj prometnici. Stoga treba ukloniti parkirna mjesta s lijeve pješačke prometnice, kako bi se osigurao prostor za biciklističku prometnicu predviđenu algoritmom. Na slici 10. prikazan je prijedlog rješenja položaja biciklističke staze unutar poprečnoga profila ulice Franca Vintera.

Tablica 4. Izvještaj analize i predloženo rješenje smještaja biciklističke infrastrukture kod pristupne prometnice

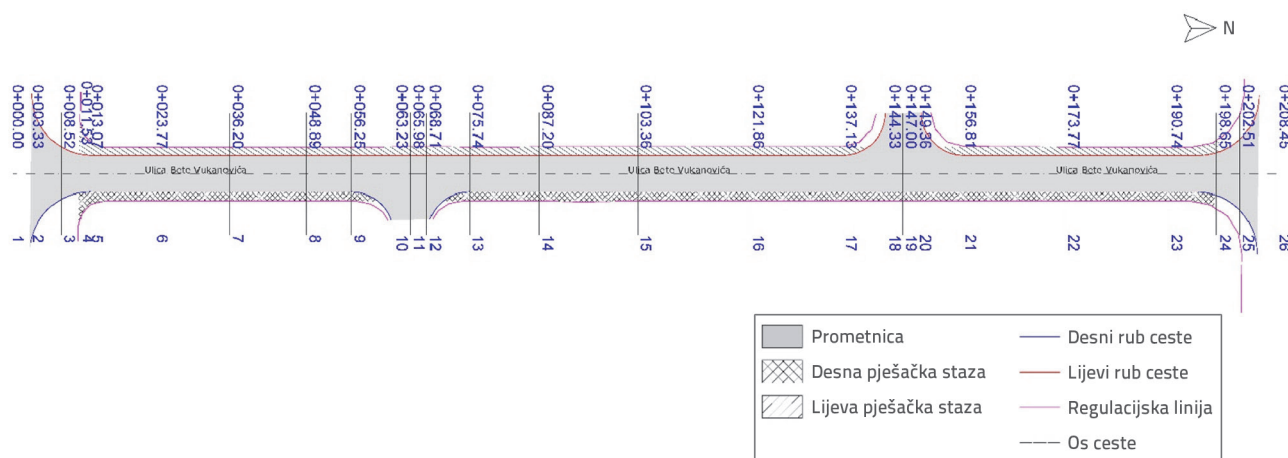
Ulazni podaci za pristupnu prometnicu	
Naziv ulice	Franca Vintera
Duljina analizirane dionice	246,88 m
Prometno opterećenje	Srednje
Broj prometnih trakova	2
Broj prometnih trakova po smjeru	1
Širina prometnoga traka	3,0 m
Širina lijeve pješačke prometnice	5,0 m
Širina desne pješačke prometnice	4,72 m
Broj vertikalnih krivina	1
Polumjeri vertikalnih krivina	$R_{v1} = 15000$ m
Broj horizontalnih krivina	1
Polumjeri horizontalnih krivina	$R_1 = 200$ m
Broj lomova nivelete	1
Uzdužni nagibi nivelete	$i_1 = 2,3 \%$, $i_2 = 1,4 \%$
Tip poprečnoga nagiba kolnika	Jednostrani
Poprečni nagib kolnika	3 %
Poprečni nagib lijeve pješačke prometnice	2-3 %
Poprečni nagib desne pješačke prometnice	3 %
PREDLOŽENO RJEŠENJE	
Tip biciklističke infrastrukture	Biciklistička prometnica
Položaj	Na dijelu lijeve pješačke prometnice
Smjer odvijanja biciklističkog prometa	Dvosmjerno
Širina	1,5 m
Denivelacija rubnjakom	Da
Poprečni nagib	3 %
Broj horizontalnih krivina	1
Radijusi horizontalnih krivina	$R_1 = 203,75$ m
Broj vertikalnih krivina	1
Radijusi vertikalnih krivina	$R_{v1} = 15000$ m
Dodatne mjere	Kolničku površinu obojiti crvenom bojom
Prometna signalizacija	Obilježiti površinu horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom



Slika 11. Položaj ulice Bete Vukanovića u Nišu

5.2. Analiza sabirne ulice

Sabirna ulica podvrgnuta daljnjoj analizi je Ulica Bete Vukanovića, prikazana na slici 11. Uvidom projekta izvršena je analiza elemenata situacije, uzdužnoga i poprečnoga presjeka spomenute prometnice. Ulica sadrži 26 poprečnih profila, kao što je prikazano na slici 12. Posljednji je poprečni profil na stacionaži 208,45 metara, što je i ukupna duljina ulice. Na situaciji nisu uočene horizontalne krivine (slika 12).



Slika 12. Situacija ulice Bete Vukanovića

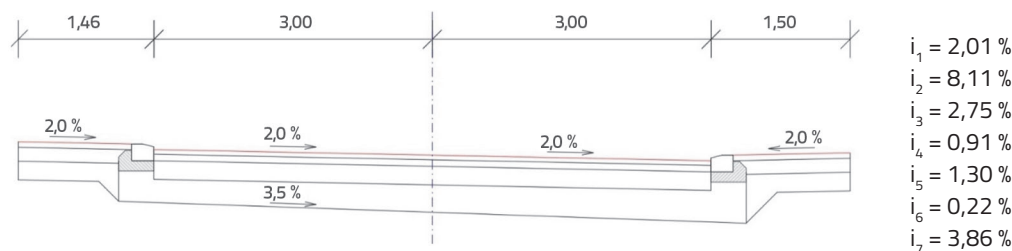
Ulica sadrži dva prometna traka s po jednom trakom za svaki smjer. Širina prometnoga traka iznosi 3 metar, pa ukupna širina kolnika iznosi 6 metara. Kolnik je odvojen od pješačkih prometnica upuštenim rubnjakom, s denivelacijom od 6 cm. Poprečni je nagib kolnika jednostrani, iznosi 2 % i orijentiran je od lijevoga k desnom rubnjaku. Širina je pješačkih prometnica promjenjiva od profila do profila. Međutim, razlika je širina zanemariva i može se uzeti vrijednost od 1,5 m kao prosječna vrijednost širine pješačkih prometnica na svim poprečnim profilima. Obje pješačke prometnice imaju jednostrani nagib ka kolniku i on iznosi 2 %. Kolnička je konstrukcija fleksibilna i sastoji se od asfaltnih slojeva i slojeva mineralnih mješavina. Asfaltni slojeve čine habajući sloj od asfalta AB11 (5 cm) i bitumenizirani nosivi sloj BNS32 (7 cm). Slojeve kolničke konstrukcije od nezvezanih slojeva čine drobljeni kameni agregat 0 do 31,5 (20 cm) i sloj šljunkovito-pjeskovitoga materijala frakcije 0 do 63 (25 cm). Na slici 13. prikazan je karakterističan poprečni profil ulice Bete Vukanovića.

Niveleta u uzdužnom smislu ima 6 lomova i 6 vertikalnih krivina, od toga 4 konkavne i 2 konveksne. Maksimalni polumjer vertikalnih krivina iznosi 2000 m, dok je minimalni 100 metara. Maksimalni uzdužni nagib nivelete iznosi 8,11 %, a minimalni 0,22 %.

Ovom kratkom analizom izvršena je priprema ulaznih podataka algoritma. S obzirom na to da se vrši analiza sabirne ulice, slijedi da je $i = 2$ i pristupa se drugoj grani algoritma. Prvi upit u ovom ogranku odnosi se na predviđeno prometno opterećenje. Prometno opterećenje analizirane

sabirne ulice spada u kategoriju lakoga, pa se predlaže postavljanje biciklističke trake na dijelu kolničkoga traka, uz desni rub kolnika, s pripadajućom horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom. Naredni upit odnosi se na predviđeno prometno uređenje, tj. je li ulica predviđena za jednosmjerni ili dvosmjerni promet. S obzirom na to da je riječ o dvosmjernoj ulici, sljedeći upit odnosi se na širinu pješačkih prometnica. U ovom koraku analizira se je li širina pješačkih prometnica veća od 2 m. Kao što je prije rečeno, širina iznosi 1,5 m, pa se ulazi u sljedeći upit. Sljedeći upit određuje je li širina pješačkih prometnica konstantna ili promenljiva. Širina nije konstantna, ali je zanemarivo mala, zbog čega je uzeta prosječna širina koja iznosi 1,5 m. Nakon ovoga koraka algoritam daje preliminarni prijedlog pozicije biciklističke infrastrukture. Predloženo je rješenje jednosmjerni biciklistički trak u razini kolnika, za svaki smjer, praćen propisnom horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom. Također, predložena je širina traka u opsegu od 0,6 do 0,8 m. Ta je vrijednost orijentacijska, čime se ostavlja prostor projektantu prometne infrastrukture da sam procijeni i donese odluku o širini biciklističke trake.

Zatim, analiza ulazi u narednu fazu algoritma, a to je analiza geometrije prometnice. Prvi je korak ove faze analiza horizontalne geometrije prometnice. S obzirom na to da nema horizontalnih krivina, nego je prometnica u pravcu, predložena će biciklistička infrastruktura također biti u pravcu. Zatim se unosi vrijednost uzdužnih nagiba nivelete. Prometnica sadrži 7 uzdužnih nagiba, i to:



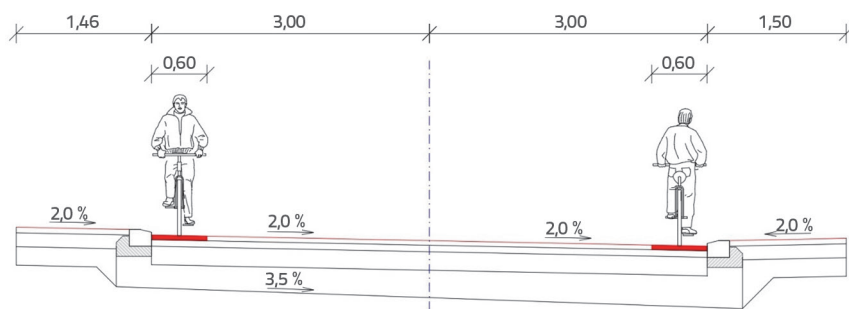
Slika 13. Karakteristični poprečni profil sabirne ulice

Tablica 5. Izvještaj analize i predloženo rješenje smještaja biciklističke infrastrukture kod sabirne prometnice

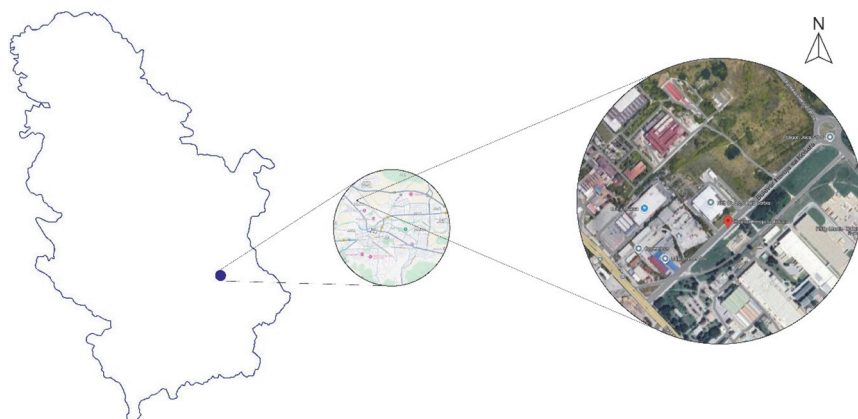
Ulazni podaci za sabirnu prometnicu	
Naziv ulice	Bete Vukanovića
Duljina analizirane dionice	208,45 m
Smjer kretanja vozila	Dvosmjerno
Prometno opterećenje	Lako
Broj prometnih trakova	2
Broj prometnih trakova po smjeru	1
Širina prometnoga traka	3,0 m
Širina lijeve pješačke prometnice	1,5 m
Širina desne pješačke prometnice	1,5 m
Broj vertikalnih krivina	6
Polumjeri vertikalnih krivina	$R_{v1} = 100 \text{ m}$, $R_{v2} = 150 \text{ m}$, $R_{v3} = 400 \text{ m}$, $R_{v4} = 600 \text{ m}$, $R_{v5} = 2000 \text{ m}$, $R_{v6} = 600 \text{ m}$
Broj horizontalnih krivina	0
Polumjeri horizontalnih krivina	$R_1 = 200 \text{ m}$
Broj lomova nivelete	6
Uzdužni nagibi nivelete	$i_1 = 2,01 \%$, $i_2 = 8,11 \%$, $i_3 = 2,75 \%$, $i_4 = -0,91 \%$, $i_5 = 1,30 \%$, $i_6 = 0,22 \%$, $i_7 = 3,86 \%$
Tip poprečnoga nagiba kolnika	Jednostrani
Poprečni nagib kolnika	2 %
Poprečni nagib lijeve pješačke prometnice	2 %
Poprečni nagib desne pješačke prometnice	2 %
PREDLOŽENO RJEŠENJE	
Tip biciklističke infrastrukture	Biciklistički trak
Položaj	Smještaj uz krajni rub kolničkoga traka za svaki smjer
Smjer odvijanja biciklističkoga prometa	Jednosmjerno
Širina	0,6 - 0,8 m
Denivelacija rubnjakom	Ne
Poprečni nagib	2 %
Broj horizontalnih krivina	0
Polumjeri horizontalnih krivina	/
Broj vertikalnih krivina	6
Polumjeri vertikalnih krivina	Biciklistička traka preuzima vertikalnu geometriju kolnika
Dodatne mjere	Biciklističku površinu obojiti crvenom bojom
Prometna signalizacija	Obilježiti površinu horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom

Unosom ovih podataka formira se niz elemenata članovi kojega su vrijednosti uzdužnih nagiba nivelete. Nakon toga se vrši analiza uzastopnih vrijednosti, točnije imaju li dva uzastopna nagiba vrijednost veću od 5 %? Odgovor je afirmativan samo u dva slučaja, kada se vrši analiza nagiba i_1 i i_2 i nagiba i_2 i i_3 . U navedenim slučajevima algoritam daje prijedlog da se uzme polumjer veći od minimalnoga, tako da zaobljenje nivelete bude neprimjetno s gledišta biciklista, a kao minimalnu vrijednost polumjera vertikalne krivine određuje vrijednost $R_{v,min} = 4 \text{ m}$. Prilikom analize ova tri nagiba i zaobljenja nivelete,

primijećeno je da su projektom prometnice definirani promjeri vertikalnih krivina $R_{v1} = 100 \text{ m}$ (konkavna krivina) i $R_{v2} = 150 \text{ m}$ (konveksna krivina) veći od minimalnoga i da predloženi biciklistički trak preuzima geometriju projektirane prometnice. Potom, algoritam ulazi u posljednji korak ove faze koji se odnosi na analizu uzdužnih nagiba koji su veći od 10 %. Pošto su svi uzdužni nagibi manji od 10 %, ovim korakom analiza je završena i oblikuje se izvještaj koji je prikazan u tablici 5. Na slici 14. prikazano je predloženo rješenje unutar poprečnoga profila Ulice Bete Vukanovića.



Slika 14. Položaj biciklističke trake sabirne ulice



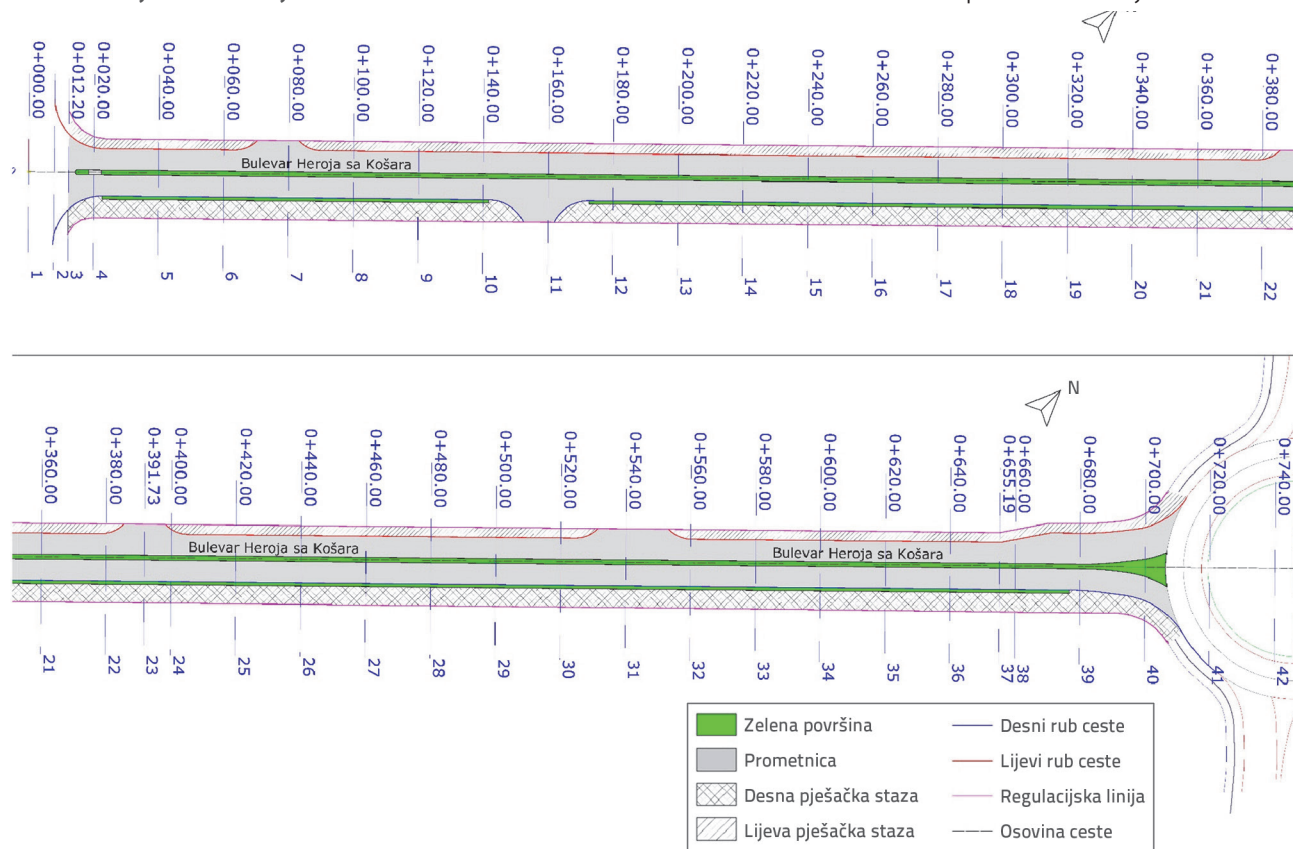
Slika 15. Položaj Bulevara Heroja sa Košara u Nišu

5.3. Analiza magistralne ulice

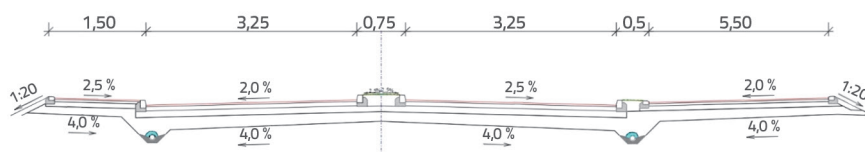
Magistralna ulica analizirana u ovom radu je Bulevar Heroja sa Košara, prikazana na slici 15.

Ulica sadrži 43 poprečna profila, s krajnjom stacionažom km 0+746,39, što je i ukupnu duljinu ulice, slika 16.

Ulica ima dva kolnička traka s po dva prometna traka za svaki smjer. Širina kolničkoga traka iznosi 6,5 m i između njih se nalazi razdjelnik trak širine 1,5 m. Pješačke se prometnice nalaze s obje strane kolnika. U smislu rasta stacionaže s desne se strane kolnika cijelom dužinom ulice nalazi zelena površina širine 1 metar. Širina lijeve pješačke prometnice iznosi 3,0 m, s jednostranim nagibom ka kolniku od 2,5 %. Širina desne pješačke prometnice iznosi 5,5 metara s jednostranim nagibom od 2,5 % ka kolniku. Svaki kolnički trak je s jednostranim nagibom od 2,5 %, orijentiran od osi prometnice ka krajnjem rubu kolnika. Pješačke prometnice su rubnjacima odvojene od kolnika, s ukupnom denivelacijom od 15 cm.



Slika 16. Situacija Bulevara Heroja sa Košara



Slika 17. Karakteristični poprečni profil magistralne ulice

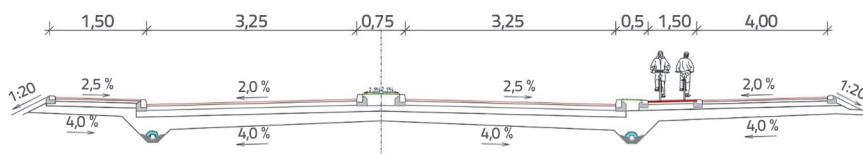
Kolnička je konstrukcija kolnika i pješačkih prometnica fleksibilna i čine je asfaltni slojevi AB16s i BNS32s A u debljinama, redom, 7 i 10 cm. Ispod asfaltnih slojeva nalazi se sloj od drobljenoga kamenog agregata debljine 0 do 31,5 (20 cm) i sloj šljunka 0 do 63 (30 cm). Ulica ne sadrži horizontalne krivine.

Prvi je ulazni podatak algoritma o kategoriji gradske prometnice. U ovom slučaju to je magistralna prometnica, pa je $i = 1$. Sljedeći korak algoritma određuje jesu li širine pješačkih prometnica veće od ili jednake 3 m. Kao što je prije rečeno, širine obje pješačke prometnice veće su od

Niveleta prometnice ima samo jedan lom, u uzdužnom smislu, i jednu vertikalnu krivinu. Vertikalna je krivina konkavna, polumjera $R = 12850$ m. Na slici 17. prikazan je karakteristični poprečni profil Bulevara Heroja sa Košara.

Tablica 6. Izvještaj analize i predloženo rješenje smještaja biciklističke infrastrukture kod magistralne prometnice

Ulazni podaci za magistralnu prometnicu	
Naziv ulice	Bulevar Heroja sa Košara
Duljina analizirane dionice	746,39 m
Smjer kretanja vozila	Dvosmjerno
Prometno opterećenje	Srednje
Broj prometnih trakova	2
Broj prometnih trakova po smjeru	2
Širina prometnoga traka	3,25 m
Širina lijeve pješačke prometnice	3,0 m
Širina desne pješačke prometnice	5,50 m
Broj vertikalnih krivina	1
Promjeru vertikalnih krivina	$R_{v1} = 12850$ m
Broj horizontalnih krivina	0
Promjeri horizontalnih krivina	/
Broj lomova nivelete	1
Uzdužni nagibi nivelete	$i_1 = 0,3 \%$, $i_2 = 1,6 \%$
Tip poprečnoga nagiba kolnika	Jednostrani
Poprečni nagib kolnika	2,5 %
Poprečni nagib lijeve pješačke prometnice	2,5 %
Poprečni nagib desne pješačke prometnice	2,5 %
PREDLOŽENO RJEŠENJE	
Tip biciklističke infrastrukture	Biciklistička prometnica
Smjer odvijanja biciklističkoga prometa	Dvosmjerno
Položaj	Na dijelu desne pješačke prometnice
Širina	1,5 m
Denivelacija rubnjakom	Da
Poprečni nagib	0,03
Broj horizontalnih krivina	0
Radijusi horizontalnih krivina	/
Broj vertikalnih krivina	1
Radijusi vertikalnih krivina	Biciklistička traka preuzima vertikalnu geometriju pješačke prometnice
Dodatne mjere	Biciklističku površinu obojiti crvenom bojom
Prometna signalizacija	Obilježiti površinu horizontalnom i vertikalnom prometnom signalizacijom



Slika 18. Položaj biciklističke staze magistralne prometnice

3 m. Potom, algoritam ispituje postojanje drvoreda. Kod ove prometnice drvored, tj. zelena površina postoji cijelom duljinom ulice na dijelu desne pješačke prometnice. Naredni upit analizira postojanje opreme za pješake (npr. postojanje klupa). Provjerom izvedenoga stanja prometnice nije uočena oprema za pješake. Na temelju svih analiziranih uvjeta algoritam daje prvi preliminarni rezultat, a to je prijedlog da se pozicionira dvosmjerna biciklistička prometnica, uz drvored, obojena crvenom bojom, s pratećom horizontalnom i vertikalnom signalizacijom, na dijelu pješačke prometnice s manjim intenzitetom pješačkoga prometa. Zatim algoritam provjerava intenzitet prometnoga opterećenja. Prometno je opterećenje analizirane magistralne ceste srednje. Na temelju tih podataka algoritam predlaže postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke prometnice odvojene rubnjakom. S obzirom na to da je preliminarno rješenje biciklistička prometnica, algoritam nastavlja daljnju analizu, pa je $j = 2$. Naredni korak jeste ispitivanje postoji li trak za vozila javnoga gradskog prijevoza. Na prometnici nisu predviđeni trakovi za javni gradski prijevoz. Nakon toga slijedi upit kojim se provjerava je li vrijednost projektne brzine veća od 50 km/h. Projektna brzina iznosi 60 km/h, pa algoritam predlaže postavljanje dvosmjerne denivelirane biciklističke prometnice obojene crvenom bojom i odvojene rubnjakom. Tim je korakom završena III faza algoritma i dano je konačno preliminarno rješenje smještaja biciklističke infrastrukture. Na kraju ove faze algoritam predlaže smještanje dvosmjerne denivelirane biciklističke prometnice obojene crvenom bojom, uz drvored, na dijelu desne pješačke prometnice, s pratećom horizontalnom i vertikalnom signalizacijom. Predložena širina biciklističke prometnice iznosi 1,5 metara.

Zatim, algoritam ulazi u IV fazu, a to je analiza geometrije prometnice. Prvi korak ove faze jest ispitivanje horizontalnih krivina. S obzirom na to da je cijela prometnica u pravcu i da nema horizontalnih krivina, ovaj se dio algoritma odmah završava.

U sljedećem se koraku unosi niz elementi kojega imaju vrijednost uzdužnih nagiba nivelete, u smislu rasta stacionaže. Niveleta ukupno ima dva uzdužna nagiba, i to $i_1 = 0,3\%$, $i_2 = 1,6\%$.

Algoritam potom vrši analizu vrijednosti unesenoga niza. U toj analizi ispituje imaju li vrijednosti dva uzastopna nagiba nivelete vrijednost veću od 5%. Ako imaju, predlaže se minimalni polumjer vertikalnih krivina biciklističke infrastrukture. S obzirom na to da su svi uzdužni nagibi nivelete manji od 5%, algoritam predlaže da predložena biciklistička prometnica zadrži vertikalno zaobljenje nivelete magistralne prometnice.

U sljedećem koraku ove faze analizira se duljina dionice na kojoj niveleta ima uzdužni nagib veći od 10%. Svi su nagibi nivelete

manji od 10%, tako da se ovaj korak odmah završava. Okončanjem ovoga koraka oblikuje se izvještaj predloženoga rješenja biciklističke infrastrukture magistralne prometnice, prikazan u tablici 6.

Na slici 18. prikazan je prijedlog rješenja položaja biciklističke staze na poprečnom profilu Bulevara Heroja od Košara.

5.4. Rasprava

Analiza provedena u 5. poglavlju obuhvatila je postojeću infrastrukturu i primjenu razvijenoga algoritma na tri tipa gradskih prometnica (prilazne, sabirne i glavne). Algoritam je pokazao sposobnost prilagodbe specifičnim uvjetima svake prometnice, uzimajući u obzir sve bitne karakteristike cestovne mreže u urbanim uvjetima. Rezultati su pokazali da algoritam učinkovito rješava probleme smještaja biciklističke infrastrukture unutar postojećega profila ceste, čime se povećava funkcionalnost gradskih prometnica.

6. Zaključak

Provedena analiza pokazala je da algoritam učinkovito rješava sve aktualniji problem smještaja biciklističke infrastrukture u urbanim područjima. Algoritam je oblikovan tako da svoje rješenje uklopi u postojeći profil gradske prometnice, a također ostavlja dosta prostora projektantu prilikom konačne razrade projekta. Analizom pristupne ulice, algoritam je predložio biciklističku prometnicu širine 1,5 m, na dijelu površine lijeve pješačke prometnice. S obzirom na to da je širina desne pješačke prometnice dovoljna za pozicioniranje biciklističke infrastrukture, projektant može kasnije izvršiti dodatne analize pozicije biciklističke prometnice na desnoj pješačkoj prometnici i napraviti eventualne promjene konačnoga rješenja.

Biciklistički trak je bio optimalno rješenje analize sabirne ulice. Širina je definirana u rasponu od 0,6 od 0,8 m. Tu širinu projektant treba precizno definirati na temelju izravnoga pregleda geometrije prometnice i načina odvijanja prometa.

Rezultat analize magistralne prometnice je smještanje dvosmjerne biciklističke prometnice, obojene crvenom bojom, na dijelu desne pješačke prometnice. S obzirom na to da je širina pješačke prometnice dovoljno velika i da je ulica visokoga ranga gradskih prometnica, projektant treba prihvatiti širinu predloženoga rješenja biciklističke infrastrukture, tako da uklopi geometriju i odvijanje prometa s prometnicama koje su povezane s analiziranom magistralnom prometnicom.

Opisani algoritam se primjenjuje isključivo na gradskim prometnicama. Također, on ne predviđa smještanje biciklističke infrastrukture u zoni raskrižja, što je njegovo ograničenje.

Algoritam, opisan u ovom radu, treba pomoći projektantu u pronalaženju optimalnoga rješenja pozicije biciklističke infrastrukture u urbanim područjima.

LITERATURA

- [1] Ronan, D., Vikram, P., Szeto, Y., Bidisha, G.: Designing cycle networks to maximize health, environmental, and travel time impacts: An optimization-based approach, *International Journal of Sustainable Transportation*, 2014.
- [2] Laura, W., Ross, S.: Where to improve cycling infrastructure? Assessing bicycle suitability and bikeability with open data in the city of Paris, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2017.
- [3] Jeffrey, M.C., Vladimir, U.: Modijeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data, *Transportation Research Record* 2, Where to improve cycling infrastructure? Assessing bicycle suitability and 2022.
- [4] Habibian, M., Hamouni, P., Haghshenas, P.: Determining the Best Path for Bicycle Lane Construction Using Sustainable Transportation Approach (Case Study: District 1 of Shiraz), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49 (2017) 3, pp. 83-186, <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.683>.
- [5] Robjerto, L., Iñaki, G., Maria, B., José, M., Angel, I.: Optimization of cycle paths with mathematical programming, 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, EWGT2014, 2-4 July 2014, Sevilla, Spain.
- [6] Robjerto, L., Jorge, A., Victor, C.: Mathematical optimization for planning and design of cycle paths, XII Conference on Transport Engineering, CIT 2016, 7-9 June 2016, Valencia, Spain.
- [7] Jennifer, D., Avinash, U.: Optimization Framework for Bicycle Network Design, 2014 American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000690).
- [8] West, J., Köhler, D., Axhausen, K.W.: Analysis of cycling accessibility using detour ratios, A large-scale study based on crowdsourced GPS data, 2024.
- [9] Boisjoly, G., Lachapelle, U., El-Geneidy, A.: Bicycle Network Performance: Assessing the Directness of Bicycle Facilities Through Connectivity Measures, a Montreal, Canada Case Study, *International Journal of Sustainable Transportation*, 2020, <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1600303>.
- [10] Logan, R.D., Salmon, P.M., Read, G.J.: Improving Cycling Safety Through Infrastructure Design: A Bicycle Simulator Study, *Accident Analysis & Prevention*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106134>.
- [11] Biciklističke površine, Priručnik za projektovanje prometnica u Republici Srbiji, Beograd. 2012.
- [12] Mihailo, M., Vojo, A., Jovan, K.: Tehnička uputstva za projektovanje dionica primarne gradske putne mreže (PGS-PM/07), Beograd, 2007.
- [13] Niskogradnja 1: Zbirka propisa sa kompletnim jugoslovenskim standardima, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [14] Planiranje i projektovanje prometnica u gradovima, Mihailo Maletin, Beograd. 2009.
- [15] Smjernice za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima, Sarajevo/Banja Luka, 2005.