



Optimizacija izbora lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala

Nikola Barać^a, Miloš Nikolić^a, Ivana Jovanović^a

^a Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, 11000 Beograd, Srbija

PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.72.03.05
Stručni rad
Primiten: 05.07.2026.
Prihvaćen: 08.08.2026.
Korespondent autor:
nikola.barac12345@gmail.com

ORCID ID

Nikola Barać: 0009-0008-7906-0589
Miloš Nikolić: 0000-0001-5892-8248
Ivana Jovanović: 0000-0002-8863-9241

Ključne reči

Sistem deljenih bicikala
Lokacijski problem
Višekriterijumska optimizacija

REZIME

Sistem deljenih bicikala, kao oblik deljene mobilnosti, pruža mogućnost iznajmljivanja javno dostupnih bicikala. Prelazak korisnika sa korišćenja privatnog vozila na korišćenje deljenog vozila, u ovom slučaju bicikla, ima potencijal da smanji saobraćajna zagušenja i emisije štetnih gasova u gradovima. Efikasnost sistema deljenih bicikala baziranih na stanicama veoma zavisi od rasporeda stanica u prostoru. Sa aspekta korisnika sistema poželjno je da postoji što veći broj stanica, dok upravljač sistema teži da minimizira broj stanica kako bi umanjio troškove. S tim u vezi, cilj ovog rada bio je da se prikaže postupak za rešavanje problema lociranja stanica u sistemu deljenih bicikala. Kvalitet dobijenih rešenja vrednovan je u odnosu na prosečno pređeno rastojanje korisnika i u odnosu na procenat opsluženih korisnika. Problem je rešen metodama jednokriterijumske optimizacije, kao i metodom višekriterijumske optimizacije, kojom je umesto jedinstvenog rešenja dobijen skup Pareto optimalnih rešenja. Iz ugla donosilaca odluka ovakav način rešavanja problema poseduje značajne prednosti po pitanju fleksibilnosti odlučivanja. Za testiranje postupka korišćena je saobraćajna mreža grada Beograda.

1. Uvod

Deljena mobilnost (eng. *Share mobility*) je zajedničko korišćenje bicikala, troketeta i ostalih vozila koja se mogu iznajmiti ili dogovorno koristiti po potrebi za realizaciju putovanja najčešće u gradskoj zoni, ali i van nje. U pogledu urbane mobilnosti, prelazak sa vlasništva na korišćenje usluga, često se promoviše u konceptima održivosti koji su dostupni u velikom broju gradova širom sveta kroz zajedničke sisteme mobilnosti. Deljena mobilnost ima potencijal da poveća multimodalnost, smanji vlasništvo nad vozilima, smanji pređene kilometre putničkim automobilom, smanji zagušenja i emisiju polutanata i dr (Glavić i Milenković, 2021).

Sistem deljenih bicikala (eng. *bike-sharing system*) podrazumeva podsistem javnog prevoza u kome su korisnici u mogućnosti da kratkoročno iznajme bicikl za realizaciju svojih putovanja. Na taj način povećava se iskorišćenost pojedinačnih bicikala, povećava se fleksibilnost korisnika po pitanju izbora načina prevoza, smanjuje se emisija štetnih gasova itd. Pored ekoloških i saobraćajnih benefita, sistemi javnih bicikala pozitivno utiču na javno zdravlje podsticanjem fizičke aktivnosti korisnika.

Sistemi deljenih bicikala se u odnosu na način funkcionisanja mogu podeliti na sisteme zasnovane na stanicama (eng. *dock-based*) i sisteme bez stanica (eng. *dock-less*). Sistemi zasnovani na stanicama funkcionišu tako što korisnici preuzmu bicikl na nekoj od stanica, obave svoje putovanje, i na kraju vrate bicikl na istoj ili nekoj od ostalih stanica u sistemu. S druge strane, u sistemu bez stanica korisnici su u mogućnosti da preuzmu bicikl i da ga nakon završenog putovanja vrate na bilo kom mestu u okviru područja funkcionisanja sistema. Pronalaženje stanica, preuzimanje bicikla i plaćanje naknade za korišćenje bicikla se obavlja putem aplikacije. Kada su u pitanju sistemi deljenih bicikala zasnovani na stanicama, jedan od najznačajnijih faktora koji utiču na efikasnost sistema predstavlja raspored stanica u prostoru (Vogel i Mattfeld, 2011). Korisnicima je u interesu da sistem poseduje što veći broj stanica i da se one nalaze što je bliže moguće. Na taj način njihova fleksibilnost se povećava i udaljenost od izvora/cilja se smanjuje. S druge strane, potražnja u sistemima deljenih bicikala je često asimetrična. Asimetričnost potražnje znači da se na nekim stanicama stvara višak bicikala, dok se na nekim stanicama registruje manjak bicikala.

Da bi sistem funkcionisao efikasno, upravljač taj problem rešava rebalansiranjem bicikala po stanicama. To podrazumeva da ekipa tehničara izlazi na teren i prebacuje bicikle sa mesta gde postoji višak na mesta sa manjkom bicikala. Troškovi rebalansiranja i održavanja bicikala povećavaju se sa povećanjem broja stanica. S tim u vezi, problem određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala predstavlja optimizacioni problem u kome su suprotstavljeni zahtevi korisnika i upravljača sistema. Cilj ovog rada bio je da se prikaže postupak za određivanje lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala. Problem je inicijalno rešen kao lokacijski problem pokrivanja skupa, gde je pronađen minimalan broj stanica potreban za pokrivanje skupa čvorova u kojima se nalazi potražnja korisnika. Nakon toga je za manje vrednosti parametra p problem rešen kao lokacijski problem maksimalnog pokrivanja skupa i kao problem lociranja p medijana. Parametar p predstavlja broj stanica na raspolaganju za postavljanje. Da bi se istovremeno uzeli u obzir kriterijumi predenog puta i pokrivenosti potražnje, na kraju je problem rešen korišćenjem ε – Leksikografske metode višekriterijumske optimizacije. Na taj način je za svako p dobijen skup Pareto optimalnih rešenja. Pažljivo planiranje lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala predstavlja neizostavan korak. Prethodnih godina istraživači su se pretežno bavili primenom metoda koje se oslanjaju na jednokriterijumsku optimizaciju. Značaj ovog rada ogleda se u benefitima koji se mogu postići primenom tehnika višekriterijumske optimizacije u rešavanju problema određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala. Ostatak rada organizovan je na sledeći način. U narednom poglavlju prikazan je pregled literature. Nakon toga sledi metodologija rada, gde je detaljno objašnjen problem koji je rešavan, kao i postupak rešavanja problema. U četvrtom poglavlju se nalaze dobijeni rezultati, dok su u petom poglavlju prikazana zaključna razmatranja rada.

2. Pregled literature

Tehnike rešavanja problema određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala generalno se mogu podeliti na (Bahadori i ostali, 2021):

- tehnike zasnovane na matematičkim algoritmima,
- tehnike zasnovane na upotrebi GIS tehnologije i
- tehnike zasnovane na višekriterijumskom odlučivanju.

U ovom poglavlju prikazani su radovi koji se pretežno tiču prve dve grupe tehnika. Primenjene tehnike u nekoj od svojih faza implementacije sadrže matematičke formulacije iz oblasti lokacijskih problema. Slične matematičke formulacije korišćene su za potrebe ovog rada. García-Palomares i ostali (2012) rešavali su problem određivanja lokacija stanica korišćenjem tehnike zasnovane na GIS tehnologiji. Korišćenjem GIS softvera su u prvoj fazi odredili potražnju korisnika u prostoru, nakon čega su korišćenjem ugrađene softverske funkcije odredili lokacije stanica na dva načina: minimiziranjem impedanse (problem lociranja p medijana) i maksimiziranjem pokrivenosti potražnje.

Dobijeni rezultati pokazuju da se tehnikom maksimiziranja pokrivenosti potražnje lokacije stanica pozicioniraju gušće oko tačaka velike potražnje, dok u slučaju problema lociranja p medijana rešenje sadrži rasplinutije lokacije stanica kako bi se minimiziralo ukupno rastojanje. Zaključak autora je da tehnika maksimiziranja pokrivenosti potražnje daje verodostojnije rezultate u pogledu efikasnosti sistema. Na sličan način su Park i Young Sohn (2017) odredili lokacije stanica u dve faze korišćenjem GIS softvera. Za određivanje potražnje koristili su podatke o gustini naseljenosti i istorijske podatke o putovanjima taksijem, dok su za optimizaciju lokacija koristili ugrađenu funkciju određivanja lokacija p medijana i maksimalnog pokrivanja. Rezultati dobijeni rešavanjem problema lociranja p medijana dali su rasplinite lokacije stanica sa svrhom da se minimizira ukupno predeno rastojanje korisnika, dok su kao rezultat tehnike maksimalnog pokrivanja dobijene stanice gusto locirane oko tačaka velike potražnje. Autori rada preporučuju da se odluka o korišćenju jedne ili druge tehnike donese na osnovu odabrane transportne politike. Mete i ostali (2018) rešavali su problem određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala korišćenjem 5 različitih tehnika. Za potrebe rada određeno je 20 tačaka potražnje korisnika i 20 potencijalnih lokacija stanica sistema. Lokacijski problem definisan je na sledećih nekoliko načina: problem pokrivanja skupa, problem maksimalnog pokrivanja skupa, problem lociranja p medijana, problem lociranja p centara i problem p disperzije. Autori izdvajaju definisanje problema lociranja p medijana kao najefikasniju u konkretnom primeru.

Cintrano i ostali (2018) predložili su da se problem određivanja stanica u sistemu deljenih bicikala rešava kao problem lociranja p medijana. Kako se radi o problemu velikih dimenzija sa 363 lokacija u kojima se nalazi potražnja i 33550 potencijalnih lokacija stanica, autori su koristili metaheuristički algoritam Metoda promenljivih okolina (eng. *Variable Neighbourhood Search – VNS*). Autori su testirali metodu na postojećem sistemu deljenih bicikala u slučaju da se pozicije stanica promene ali da njihov broj ostane nepromenjen. Dobijeno rešenje je značajno bolje od postojećeg u pogledu vrednosti funkcije cilja. Takođe, testiran je i scenario u kom bi trebalo odrediti pozicije novih stanica u sistemu pri nepromenjenim lokacijama već postojećih stanica. Pored očekivanog poboljšanja funkcije cilja zbog povećanja broja stanica, primećeno je da se slična poboljšanja dobijaju u slučaju preraspodele postojećih stanica i u slučaju uvećanja broja stanica u postojećem sistemu.

3. Metodologija

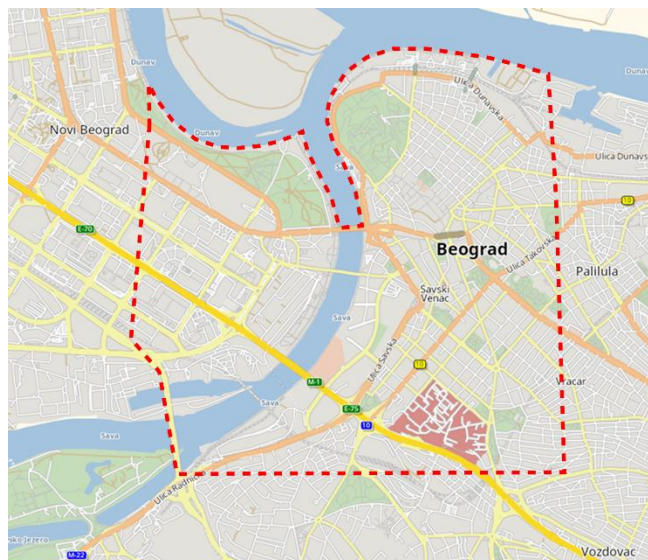
U ovom radu predstavljen je postupak za određivanje lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala. Postupak započinje određivanjem minimalnog broja stanica potrebnog da se pokriju čvorovi u kojima postoji potražnja. Minimalan potreban broj stanica dobijen je rešavanjem lokacijskog problema pokrivanja skupa.

Kada postoje ograničenja po pitanju resursa nekada nije moguće postaviti neophodan broj stanica za pokrivanje celog skupa čvorova. Zbog toga je sledeći korak bio rešavanje lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja i rešavanje problema lociranja p medijana. U oba slučaja je broj stanica na raspolaganju bio manji od broja stanica koji je potreban da se pokriju svi čvorovi u kojima je identifikovana potražnja.

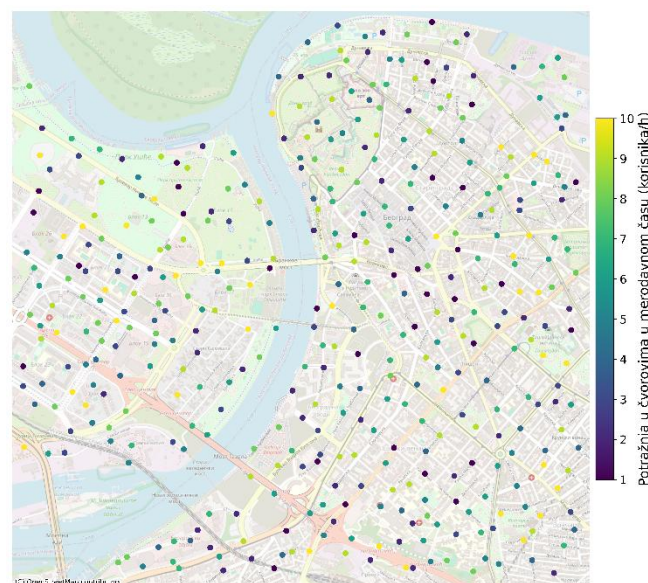
U kontekstu efikasnosti sistema u interesu je da vrednosti obe kriterijumske funkcije uzmu što bolje vrednosti, odnosno potrebno je da se pokrije što veći broj korisnika, ali je potrebno i da korisnici prelaze što manje rastojanje. Rešavanjem svakog od prikazana dva lokacijska problema optimizacija podrazumeva poboljšanje vrednosti isključivo jedne kriterijumske funkcije, dok druga kriterijumska funkcija ostaje zanemarena po pitanju optimizacije. Da bi se prevazišao ovaj nedostatak problem je rešen ϵ – Leksikografskom metodom višekriterijumske optimizacije. Na taj način optimizacija se vrši uzimajući u obzir oba kriterijuma i kao finalni rezultat se umesto jednog optimalnog rešenja dobija skup Pareto optimalnih rešenja. Iz perspektive donosioca odluke ovakav pristup dodaje fleksibilnost u odlučivanju. Umesto da se opredeli za rešenja koja su optimalna po isključivo jednom kriterijumu, donosilac odluke je u mogućnosti da odabere rešenje koje predstavlja kompromis između dva kriterijuma.

Prikazani postupak određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala testiran je na primeru Beograda. U Beogradu ne postoji sistem deljenih bicikala zbog čega je pretpostavljeno da će budući sistem funkcionisati na području centralne gradske zone. Na slici se može videti područje funkcionisanja planiranog sistema deljenih bicikala (Slika 1).

Područje obuhvata uži centar grada, kao i deo grada na granici uže centralne zone. Za prikazano područje je u odnosu na raspored sadržaja u prostoru utvrđena prostorna raspodela potražnje korisnika sistema deljenih bicikala u prostoru (Slika 2). Istovremeno, potražnja je locirana u tačkama koje predstavljaju potencijalne stanice sistema. Za prikazano područje i procenjenju potražnju u merodavnom času potrebno je odrediti lokacije stanica na optimalan način. Međutim, za posmatrani problem funkcija cilja u odnosu na koju se vrši optimizacija zavisi od transportne politike i strategije poslovanja.



Slika 1. Područje funkcionisanja sistema deljenih bicikala



Slika 2. Prostorna raspodela potražnje korisnika u planiranom sistemu deljenih bicikala

Minimalan potreban broj stanica određen je rešavanjem lokacijskog problema pokrivanja skupa. Ovaj problem podrazumeva da se odredi minimalan broj stanica na mreži na takav način da svi čvorovi u kojima postoji potražnja mogu biti opsluženi u nekoj od stanica. Čvor se može opslužiti u nekoj od stanica ukoliko se nalazi na rastojanju manjem ili jednakom od prethodno definisanog rastojanja koje ta stanica "pokriva". Matematička formulacija problema pokrivanja skupa može se formulisati na sledeći način (Teodorović, 2021):

Minimizirati

$$\sum_{j \in J} x_j$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

gde su:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je objekat lociran u čvoru } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

 I – skup čvorova koji zahtevaju opslugu J – skup čvorova-kandidata za lociranje objekta $N_i = \{j | d_{ij} \leq D_p\}$ – skup čvorova-kandidata koji mogu da pokriju čvor i koji zahteva opslugu d_{ij} – rastojanje između čvora i koji zahteva opslugu i čvora-kandidata j D_p – rastojanje “pokrivanja”

Za problem definisan u ovom radu skup I i skup J su jednaki, odnosno svi čvorovi koji zahtevaju opslugu su istovremeno i čvorovi-kandidati za lociranje stanice. Rešavanjem lokacijskog problema pokrivanja skupa dobija se minimalan broj stanica koji je potreban da se prikazani skup čvorova pokrije. U ovako definisanom problemu ne vodi se računa o potražnji u čvorovima. Takođe, zbog ograničenja resursa često nije moguće postaviti željeni broj stanica. Zbog toga je u ovom radu problem rešavan kao problem lociranja p medijana i kao lokacijski problem maksimalnog pokrivanja za različite vrednosti broja stanica na raspolaganju. U slučaju problema medijane potrebno je locirati jedan ili više objekata na mreži, tako da se minimizira prosečno rastojanje od objekta do korisnika ili od korisnika do objekta. S obzirom da se prilikom lociranja p objekata teži minimiziranju ukupnog pređenog rastojanja između objekata i korisnika, to je problem lociranja p medijana moguće formulisati na sledeći način (Teodorović, 2021):

Minimizirati

$$f_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} x_{ij}$$

pri ograničenjima

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

gde su:

 a_i – broj zahteva za opslugom iz čvora i d_{ij} – rastojanje između čvora i i čvora j

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko } i \text{ dobija opslugu u objektu u čvoru } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

 p – broj objekata koji treba da se lociraju.

Kada ne postoji dovoljan broj stanica za pokrivanje celokupnog skupa čvorova jedno od rešenja je da se stanice postave na takav način da se maksimizira broj opsluženih korisnika za neko zadato rastojanje pokrivanja D_p . Ovaj problem se naziva lokacijskim problemom maksimalnog pokrivanja i njegova matematička formulacija glasi (Teodorović, 2021):

Maksimizirati

$$f_b = \sum_{i \in I} a_i z_i$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j \in N_i} x_j - z_i \geq 0, \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p,$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I$$

gde su:

 a_i – broj zahteva za opslugom iz čvora i

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je potražnja u čvoru } i \text{ pokrivena} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je objekat lociran u čvoru } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

p – broj objekata koji treba da se lociraju.

Prilikom rešavanja lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja ne vodi se računa o rastojanju koje korisnici prelaze već je jedino od značaja da se poveća broj korisnika unutar zadatog radijusa. S druge strane, prilikom rešavanja problema lociranja p medijana pretpostavlja se da će se svi korisnici opsluživati u najbližoj stanici. Međutim, ukoliko se korisnicima najbliža stanica nalazi na rastojanju većem od kritičnog rastojanja postoji mogućnost da neki od korisnika odustanu od korišćenja sistema deljenih bicikala. Zbog toga su optimalna rešenja upoređena u odnosu na prosečno pređeno rastojanje korisnika do stanica, kao i u odnosu na procenat pokrivenih (opsluženih) korisnika za unapred zadato rastojanje D_p .

Za potrebe ovog rada korišćena je ε – Leksikografska metoda višekriterijumske optimizacije. Ova metoda podrazumeva da se problem reši prvobitno u odnosu na jedan kriterijum, nakon čega se relaksirana optimalna vrednost po prvom kriterijumu dodaje kao ograničenje prilikom rešavanja problema u odnosu na drugi kriterijum. U opštem slučaju ovaj proces se nastavlja dok se ne obuhvate svi kriterijumi, međutim u problemu iz ovog rada uzeta su u obzir dva kriterijuma. Potrebno je naglasiti da redosled kriterijuma optimizacije zavisi od prethodno definisane važnosti kriterijuma. Optimizacija se vrši redom od najvažnijeg kriterijuma do najmanje važnog kriterijuma. Kod problema određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala usvojeno je da je kriterijum procenta opsluženih korisnika primarni kriterijum dok je kriterijum prosečnog pređenog rastojanja korisnika sekundarni kriterijum. Za potrebe rešavanja problema korišćena je sledeća matematička formulacija:

Minimizirati

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} x_{ij}$$

pri ograničenjima

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$$

$$\sum_{i \in I} a_i z_i \geq f_b^* - \varepsilon$$

$$\sum_{j \in N_i} x_{jj} - z_i \geq 0 \quad \forall i \in I$$

f_b^* – optimalna vrednost funkcije cilja f_b dobijena rešavanjem problema maksimalnog pokrivanja

$\varepsilon > 0$ – relaksacija optimalne vrednosti funkcije cilja f_b

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko } i \text{ dobija uslugu u objektu u čvoru } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko je potražnja u čvoru } i \text{ pokrivena} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I$$

p – broj objekata koji treba da se lociraju.

U prethodnom koraku postupka određivanja lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala za svaku vrednost parametra p određena su rešenja lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja i rešenja problema lociranja p medijana. U oba slučaja za optimalna rešenja poznate su vrednosti kriterijumskih funkcija. Problem višekriterijumske optimizacije predstavlja rešavanje problema lociranja p medijana sa dodatnim ograničenjem koje proističe iz rešenja problema maksimalnog pokrivanja. Optimalna vrednost kriterijuma procenta opsluženih korisnika iz problema maksimalnog pokrivanja se dodaje u problem p medijana u vidu ograničenja. S obzirom da se radi o ε – Leksikografskoj metodi višekriterijumske optimizacije ovo rešenje se relaksira za određenu vrednost ε .

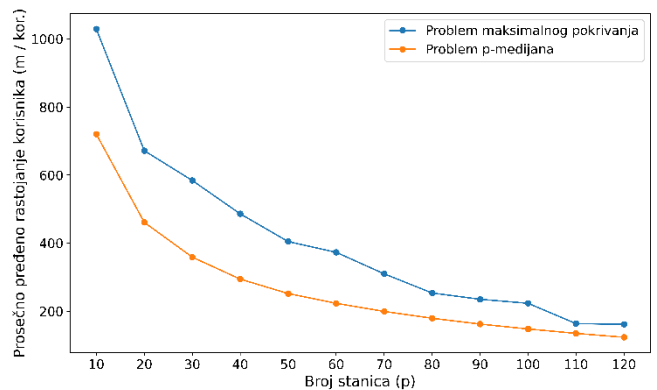
4. Rezultati

U radu su, za potrebe planiranog sistema deljenih bicikala, određene optimalne lokacije stanica sistema. Ulazne podatke ovog problema predstavlja 400 potencijalnih lokacija sa svojim pripadajućim potražnjama (Slika 2 **Error! Reference source not found.**). Bilo je potrebno odrediti koje od lokacija čine optimalno rešenje. Problem je rešavan kao zadatak celobrojnog linearnog programiranja.

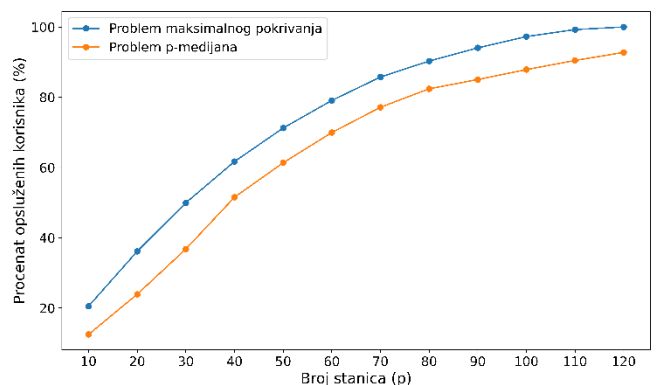
Za potrebe rešavanja zadataka celobrojnog linearnog programiranja korišćena je biblioteka PuLP unutar programskog jezika Python. Na početku je problem rešen kao problem pokrivanja skupa za fiksno rastojanje pokrivanja $D_p = 300$ m i dobijeno je optimalno rešenje koje čini 120 čvorova na području funkcionisanja sistema deljenih bicikala. Ovaj broj predstavlja minimalan broj stanica koji je potreban da bi se pokrio ceo skup čvorova sa potražnjom. U nastavku je prikazana analiza kvaliteta rešenja dobijenih rešavanjem lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja i problema lociranja p medijana (Slika 3, Slika 4, Tabela 1). Definisani problemi su rešeni u slučaju da broj stanica na raspolaganju uzima vrednosti $p = 10, 20, 30, \dots, 120$. Rezultati pokazuju da se rešavanjem problema lociranja p medijana dobijaju rešenja u kojima je prosečno pređeno rastojanje korisnika manje, dok se rešavanjem lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja dobijaju rešenja u kojima je procenat opsluženih korisnika veći. Razlika u prosečnom pređenom rastojanju korisnika između dva načina rešavanja problema se smanjuje sa porastom broja raspoloživih stanica p . S druge strane, razlika u procentu opsluženih korisnika između dva načina rešavanja problema ostaje približno konstantna sa promenom parametra p . Konačna odluka o izboru lokacija stanica u planiranom sistemu deljenih bicikala isključivo zavisi od transportne politike i strategije poslovanja upravljača. Međutim, preporuka koja proističe iz prikazanih rezultata je da bi u slučaju većeg broja stanica na raspolaganju trebalo koristiti rešenja lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja dok bi u slučaju manjeg broja stanica na raspolaganju trebalo koristiti rešenja problema lociranja p medijana.

Tabela 1. Kvalitet rešenja problema u zavisnosti od broja stanica na raspolaganju

p	Lokacijski problem maksimalnog pokrivanja skupa		Problem lociranja p medijana	
	Prosečno pređeno rastojanje korisnika (m / kor.)	Procenat opsluženih korisnika (%)	Prosečno pređeno rastojanje korisnika (m / kor.)	Procenat opsluženih korisnika (%)
10	1029,13	20,52	720,16	12,49
20	671,57	36,14	461,01	23,92
30	584,04	49,96	358,81	36,80
40	486,03	61,69	294,19	51,54
50	404,48	71,23	251,77	61,34
60	373,02	79,08	223,18	69,95
70	309,79	85,75	199,30	77,14
80	253,44	90,29	179,22	82,39
90	235,06	94,04	162,14	85,04
100	223,14	97,26	147,77	87,86
110	163,52	99,25	134,81	90,47
120	161,49	100,00	123,35	92,76



Slika 3. Zavisnost prosečnog pređenog rastojanja korisnika od broja stanica na raspolaganju

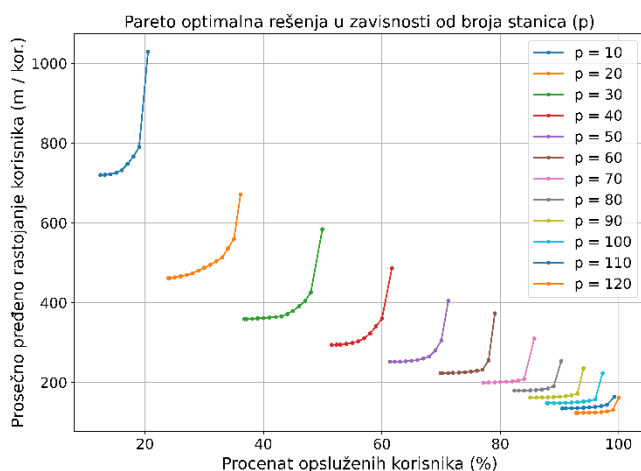


Slika 4. Zavisnost procenta opsluženih korisnika u zavisnosti od broja stanica na raspolaganju

Kako se rešavanjem lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja i problema lociranja p medijana zanemaruje jedan od kriterijuma prilikom optimizacije, u nastavku su prikazani rezultati višekriterijumske optimizacije. Za potrebe ovog rada korišćena je ϵ – Leksikografska metoda. Za svaku vrednost parametra p problem je rešen za više vrednosti parametra ϵ . Na taj način je za svako p umesto jedinstvenog optimalnog rešenja dobijen skup Pareto optimalnih rešenja. Prvo i poslednje rešenje za svako p predstavljaju rešenja problema lociranja p medijana i rešenja lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja.

Rešenje problema lociranja p medijana dobija se kada parametar ϵ uzme izuzetno veliku vrednost, odnosno kada se ograničenje vezano za optimalno rešenje lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja potpuno relaksira. S druge strane, rešenje lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja dobija se kada parametar ϵ uzme vrednost 0, zbog čega je to jedino rešenje koje zadovoljava ograničenja.

Rezultati pokazuju da se za svako p sa relativno malom relaksacijom optimalne vrednosti procenta opsluženih korisnika iz problema maksimalnog pokrivanja mogu dobiti značajna poboljšanja po pitanju kriterijuma prosečnog pređenog rastojanja korisnika. Značajnijim relaksiranjem optimalne vrednosti procenta opsluženih korisnika se za male vrednosti parametra p mogu dobiti dodatna poboljšanja kriterijuma prosečnog pređenog rastojanja korisnika, dok su za veće vrednosti parametra p ova dodatna poboljšanja izuzetno mala (Slika 5).



Slika 5. Pareto optimalna rešenja u zavisnosti od broja stanica (p)

S tim u vezi, preporuka ovog rada jeste da se za bilo koje izabrano p koristi neko od rešenja koja se nalaze na "kolenu" dijagrama Pareto optimalnih rešenja. Na taj način se za vrlo mala smanjenja kriterijuma procenta opsluženih korisnika dobijaju značajna poboljšanja kriterijuma prosečnog pređenog rastojanja korisnika.

5. Zaključak

Sistemi deljenih bicikala pokazali su se kao važan element savremenih transportnih sistema jer utiču na smanjenje saobraćajnih zagušenja i emisija štetnih gasova u gradovima. Uočeno je da bi putovanja biciklom mogla u velikoj meri da zamene putovanja putničkim automobilom, posebno na kratkim relacijama. Efikasnost i uspeh sistema deljenih bicikala u velikoj meri zavise od izbora lokacija stanica. Veći broj stanica omogućava korisnicima veću pristupačnost sistemu i veću fleksibilnost po pitanju kretanja. S druge strane, veći broj stanica stvara i veće troškove za upravljača.

Cilj ovog rada bio je da se prikaže postupak za određivanje lokacija stanica u sistemu deljenih bicikala. Postupak je testiran na primeru Beograda gde je od 400 potencijalnih lokacija stanica trebalo odrediti optimalan podskup stanica.

U prvom koraku je rešavanjem lokacijskog problema pokrivanja skupa određen minimalan broj stanica koji je potreban da se pokriju svi čvorovi u kojima postoji potražnja ($p = 120$). Nakon toga je za vrednosti parametra p manje ili jednake od 120 problem rešen kao lokacijski problem maksimalnog pokrivanja i kao problem lociranja p medijana. Rešenja oba problema evaluirana su u odnosu na kriterijum prosečnog pređenog rastojanja korisnika i u odnosu na kriterijum procenta opsluženih korisnika. Kriterijum prosečnog pređenog rastojanja podrazumeva da se svi korisnici opslužuju u sebi najbližoj stanici dok je kod kriterijuma procenta opsluženih korisnika korišćen parametar rastojanja pokrivanja $D_p = 300$ m. Za svako p dobijeni rezultati su pokazali da se rešavanjem lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja dobijaju bolji rezultati po kriterijumu procenta opsluženih korisnika, dok se rešavanjem problema lociranja p medijana dobijaju bolji rezultati po kriterijumu prosečnog pređenog rastojanja korisnika.

Rešavanje lokacijskog problema maksimalnog pokrivanja i problema lociranja p medijana znači optimizaciju u odnosu na jednu kriterijumsku funkciju pri čemu se ne uzima u obzir druga kriterijumska funkcija. Međutim, efikasnost sistema deljenih bicikala zavisi od oba kriterijuma. Zbog toga je u poslednjem koraku izvršena višekriterijumska optimizacija. Korišćena je ϵ – Leksikografska metoda, a kao primarni kriterijum je usvojen procenat opsluženih korisnika. To znači da je kriterijumska funkcija vezana za procenat opsluženih korisnika ubačena kao ograničenje u problemu lociranja p medijana. Optimalne vrednosti procenta opsluženih korisnika preuzete su iz prethodnog koraka i relaksirane parametrom ϵ . Za svako p problem je rešen za različite vrednosti parametra ϵ zbog čega je umesto jednog optimalnog rešenja dobijen skup Pareto optimalnih rešenja. Rezultati su pokazali da se uz malu relaksaciju kriterijuma procenta opsluženih korisnika dobijaju značajna poboljšanja kriterijuma prosečnog pređenog rastojanja korisnika.

Za razliku od radova iz pregleda literature gde su lokacije stanica određene rešavanjem jednog od lokacijskih problema, preporuka ovog rada je da se koristi pristup višekriterijumske optimizacije. Na taj način donosilac odluke ima mogućnost da bira iz skupa Pareto optimalnih rešenja. Potrebno je istaći da parametar ϵ ima izuzetno jasnu inženjersku interpretaciju, što može biti korisno ukoliko je potrebno odrediti jedinstveno Pareto optimalno rešenje sa specifičnim zahtevima.

Trebalo bi napomenuti da postavljene stanice nemaju ograničenja po pitanju kapaciteta. Takođe, lokacije stanica su ograničene na lokacije u kojima postoji potražnja. Buduća istraživanja trebalo bi da ispitaju uticaj ovih ograničenja na rešenje problema. Dodatno, trebalo bi ispitati osetljivost rešenja u odnosu na parametar rastojanja pokrivanja D_p .

Literatura

- [1] Bahadori, M. S., Gonçalves, A. B., & Moura, F. (2021). A Systematic Review of Station Location Techniques for Bicycle-Sharing Systems Planning and Operation. *International Journal of Geo-Information*, 10(8), 554.
- [2] Cintrano, C., Chicano, F., Stützel, T., & Alba, E. (2018). Studying Solutions of the p-Median Problem for the Location of Public Bike Stations. *18th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence*, 11160. Granada, Spain.
- [3] García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J., & Latorre, M. (2012). Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, 35(1-2), 235-246.
- [4] Glavić, D., & Milenković, M. (2021). *Komercijalna eksploatacija saobraćajne infrastrukture*. Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet.
- [5] Mete, S., Cil, Z. A., & Özceylan, E. (2018). Location and Coverage Analysis of Bike-Sharing Stations in University Campus. *Business Systems Research : International journal of the Society for Advancing Innovation and Research in Economy*, 9(2), 80-95.
- [6] Park, C., & Young Sohn, S. (2017). An optimization approach for the placement of bicycle-sharing stations to reduce short car trips: An application to the city of Seoul. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 105, 154-166.
- [7] Teodorović, D. (2021). *Transportne mreže*. Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet.
- [8] Vogel, P., & Mattfeld, D. (2011). Strategic and operational planning of bike-sharing systems by data mining—a case study. *International Conference on Computational Logistics*. Hamburg.

Optimization of Station Location Selection in a Bike-Sharing System

Nikola Barać,

University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade, Republic of Serbia

Miloš Nikolić, PhD.

University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade, Republic of Serbia

Ivana Jovanović, PhD.

University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade, Republic of Serbia

Abstract: A bike-sharing system, as a form of shared mobility, offers the possibility of renting publicly available bicycles. Shifting users from private vehicles to shared mobility, in this case a bicycle, has the potential to reduce traffic congestion and greenhouse gas emissions in cities. The efficiency of station-based bike-sharing systems heavily depends on the spatial arrangement of stations. From the user's perspective, it is desirable to have as many stations as possible, while the system operator aims to minimize the number of stations to reduce costs. The goal of this paper was to present a procedure for solving the station location problem in bike-sharing systems. The quality of the obtained solutions was evaluated using the average distance traveled by users and the percentage of users served. The problem was solved using single-objective optimization methods, as well as a multi-objective optimization method, which yielded a set of Pareto optimal solutions. From the perspective of decision-makers, this approach offers significant advantages in terms of decision-making flexibility. The procedure was tested on the Belgrade transportation network.

Keywords: bike-sharing system, location problem, multi-objective optimization