

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.009>

ANALIZA SISTEMA KOMBINOVANE DOSTAVE POŠTANSKIH POŠILJAKA

Aleksandar Čupić, Mladenka Blagojević, Dejan Marković
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
a.cupic@sf.bg.ac.rs, m.blagojevic@sf.bg.ac.rs, mdejan@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Značajni troškovi i sve veća očekivanja korisnika u pogledu usluge dostave istog dana učinili su da dostava poštanskih pošiljaka duž poslednje milje postane kritičan deo čitavog procesa dostave. Automatizacija transporta pošiljaka predstavlja šansu za razvoj efikasnijih sistema dostave koje karakteriše integracija različitih i komplementarnih vidova transporta pošiljke do krajnjeg primaoca. Akcenat ovog rada je na analizi mogućnosti implementacije integrisanog sistema dostavno vozilo - robot za dostavu duž poslednje milje. Ovaj tip problema sličan je sistemu dostavno vozilo - dron bez obzira na činjenicu da robote karakterišu mnogo manje brzine kretanja i mogućnost da izvrše nekoliko uzastopnih dostava. Na osnovu tih posebnih karakteristika robota u literaturi su razvijene heuristike koje efikasno identifikuju rešenja rutiranja robota na osnovu početnih ruta obilaska dostavnog vozila i odgovarajućih robotskih operacija. U radu je data analiza uticaja različitih karakteristika koje se tiču dizajna i rada robota i okoline na efikasnost samog sistema. Pokazano je da su sistemi za dostavu duž poslednje milje uz pomoć robota prilično efikasni ako se roboti koriste u jako saobraćajno zagušenim područjima uz smeštanje nekoliko pošiljaka u skladišni prostor samog robota.*

Ključne reči: *dostava duž poslednje milje, integrisana dostava, robot, vozilo*

1. Uvod

Poslednja milja prenosa poštanskih pošiljaka i robe uopšte predstavlja najslabiju kariku lanca snabdevanja. Osim toga, korišćenje drumskih vozila (automobili, kombi vozila, kamioni) prilikom sakupljanja i dostave pošiljaka predstavlja i izvor značajnih posledica po okolinu u vidu formiranja saobraćajnih gužvi i zagađenja životne sredine. Sve veća urbanizacija i ekspanzija e-trgovine donose dodatni pritisak razvoju efikasnih i inovativnih rešenja u domenu *city* logistike [1]. Tehnološki napredak u automatizaciji nudi priliku za razvoj novijih, održivijih i efikasnijih sistema dostave. Konkretno, vrlo aktuelan tehnološki napredak autonomnih vozila (vozila bez vozača, roboti, dronovi) priprema teren za razvoj inovativnih modela dostave koji bi mogli transformisati tehnološki postupak dostave duž poslednje milje. Potpuno automatizovana sredstva rada, kao što su dronovi i

roboti, prelaze iz čisto konceptualne faze u realnu izradu prototipova i testiranja koja trenutno vode ključni učesnici na tržištu usluga visoke tehnologije i dostave. Amazon i Google [2, 3], DHL i UPS [4, 5] rade na mogućnosti zamene skupog tradicionalnog procesa dostave zasnovanog na druskim vozilima i dostavljačima. U njihovom fokusu nalazi se dostava dronovima u područjima koja karakteriše slaba dostupnost (zbog geografskih ograničenja) ili dugo vreme dostave (zbog saobraćaja). Na osnovu dosadašnjih iskustava dokazano je da dronovi mogu efikasno funkcionisati, pre svega kao pomoćni način tradicionalnog načina dostave.

Roboti, takođe, predstavljaju zanimljivo rešenje, posebno u urbanim sredinama koje karakteriše veliki broj zaustavljanja radi dostave i relativno kratke udaljenosti između tačaka u kojima se dostava obavlja. Skladišni prostor robota, za razliku od dronova, mogao bi se podeliti u više odeljaka tako da prilikom svakog obilaska robot može opslužiti više od jednog korisnika u jednom prolasku (iako ova funkcija trenutno nije prisutna u realnim sistemima). Na taj način bi se kompenzovala njihova niža brzina kretanja i naglasila prednost koju donosi veća nosivost. Različite kompanije već testiraju robote za dostavu poštanskih pošiljaka [6] i dostavu hrane [7, 8]. Proizvođač kamiona Mercedes-Benz Vans 2016. godine započeo je partnerstvo sa Starship Technologies, proizvođačem robota za dostavu, kako bi razvio integrisanu uslugu dostave druskim vozilom i robotom, kao što je prikazano na Slici 1 [9].



Slika 1. Starship robot za dostavu

U ovom slučaju drusko vozilo prevozi jednog ili više robota koji se mogu kretati po određenom delu grada kako bi obavili dostavu duž poslednjih nekoliko stotina metara dostavne rute. Pošiljka se nalazi u samom robotu, zaključana je i mogu je preuzeti isključivo korisnici sa šifrom. Činjenica je da, iako je pošiljka bezbedna unutar robota, sam robot nije siguran od eventualne krađe, ali obzirom da je opremljen GPS-om za navođenje do mesta dostave, kao i da je predviđen za kretanje po urbanim zonama gde je prisutan veliki broj ljudi i nadzornih kamera, praktično nema opasnosti od gubitka. Iz sigurnosnih razloga, roboti, koji se kreću po trotoarima, putuju pešačkim brzinama. Bez obzira na sve veći kapacitet baterija, domet i nosivost robota su ipak ograničeni na približno 3,2 km, odnosno oko 20 kg. Integrisana usluga dostave se usled ovih ograničenja čini posebno pogodnom za distribuciju manjih pošiljaka poput paketa, sitne robe i hrane. Iako različite kompanije već razmatraju realno eksploataisanje robota za dostavu i sprovode početne

testove, malo se zna o potencijalnim dobitcima u vremenu dostave ili troškovima operacija. Dok se nekoliko studija fokusiralo na efikasnost sistema dostave dronovima u smislu uštedenog vremena i troškova [10, 11, 12, 13], vrlo malo studija se fokusiralo na konkretan slučaj robota.

I pored činjenice da se dronovi i roboti mogu u velikoj meri uključiti u istu kategoriju automatizovanih načina dostave, može se identifikovati i nekoliko bitnih razlika. Konstrukcijski, robote karakterišu veće nosivosti (20-30 kg u odnosu na 2-5 kg) i potencijalno veći broj odeljaka (što bi omogućilo dva ili više uzastopnih zaustavljanja na dostavnim rutama). Operativno, roboti se odlikuju znatno nižim brzinama (5-10 km/h prema 50-100 km/h) i dometima (5-10 km nasuprot 10-30 km). Na osnovu ovih karakteristika čini se da će roboti u bliskoj budućnosti biti prikladniji za dostavu pošiljaka manje vrednosti u urbanizovanim i gusto naseljenim sredinama, dok bi dronovi mogli biti prikladniji za dostavu vrednih pošiljaka visokog prioriteta u udaljenim ili ruralnim područjima. Konačno, roboti i dronovi će se gotovo izvesno razlikovati u pogledu regulatornog okvira jer se čini da se dronovi suočavaju sa većim sigurnosnim problemima zbog rizika od nanošenja štete ljudima i infrastrukturi. Iz tog razloga, dronovi zahtevaju dodatne dozvole za korišćenje vazdušnog prostora.

U skladu sa tim, u ovom radu razmatra se implementacija koordinisane drumsko vozilo - robot usluge dostave pošiljaka duž poslednje milje i moguće povećanje efikasnosti u različitim scenarijima koja karakterišu različiti saobraćajni uslovi, konfiguracija mesta dostave, zahteva za opslugom (dostavom), dizajna i operativnih karakteristika robota. Analize su ograničene na relativno male scenarije (veličina dostavnog rejona sa 50-100 zaustavljanja) kako bi se fokusirale na uticaj različitih faktora na performance predloženog modela dostave. Doprinos ovog rada sastoji se u proceni potencijalnih prednosti dostave uz pomoć robota na osnovu različitih karakteristika primene i okoline. Uticaj faktora kao što su brzina i gužva u saobraćaju, kapacitet robotskog skladišta i trajanje operacija spuštanja robota sa dostavnog vozila ocenjuje se u smislu poboljšane efikasnosti. Rezultati analiza dovode do šire rasprave o mogućnostima i izazovima implementacije integrisane usluge dostave vozilom i robotima.

2. Pregled relevantne literature

Problem razmatran u radu predstavlja deo problema koji se bavi iznalaženjem optimizacionog algoritma za razvoj efikasnih „mešovitih“ ruta dostave gde je originalna ruta dostavnog vozila modifikovana tako da uključuje putovanja robota (sub-ture). Taj problem je proširenje tradicionalnog problema trgovačkog putnika (*Traveling Salesman Problem - TSP*) i deli sličnosti sa nekim nedavnim pristupima optimizacije predloženim za problem dostave uz pomoć dronova (*Traveling Salesman Problem with drones - TSP-D*). Pitanje kombinovane dostave postavljeno je od strane [14] gde je nakon predstavljanja potencijala upotrebe dronova i robota u dostavi pošiljaka dat pregled tada, još idejnih, rešenja i pilot projekata kombinovanja robota i dronova sa dramskim vozilima. U literaturi se pitanjem kombinovane dostave, između ostalih, bave autori [10, 12, 13, 15]. Koliko nam je poznato, postoje samo dva objavljena rada koja su formalno istraživala robotski asistiranu dostavu paketa, možemo je koristeći istu logiku definisati i kao problem trgovačkog putnika sa korišćenjem robota (*Traveling Salesman Problem with Robot - TSP-R*) [16, 17]. U prvom, predloženi sistem dostave se oslanja na male depoe u kojima se

paketi mogu pretovariti iz dostavnog vozila u robote koji su zaduženi za dostavu pojedinačnih paketa duž poslednje milje dostave. Autori usvajanjem različitih formulacija celobrojnog programiranja istražuju optimalne procedure za planiranje rasporeda kretanja vozila za dostavu i prebacivanje pošiljaka u robote duž rute vozila. U drugom radu autori predlažu model za identifikaciju rasporeda spuštanja i sakupljanja nekoliko robota od strane jednog dostavnog vozila na unapred određenim tačkama. Dva rada takođe su istraživala mogućnost primene robota koji bi se kretali po trotoarima kao podršku dostavi vozilima [18, 19]. U prvom radu autori su razvili sistem mikro depoa koje obilaze dostavna vozila, a koji bi služili kao svojevrsni habovi odakle bi se dalje vršila robotska dostava pošiljaka. U drugom je naglasak bio na efikasnosti dostavljanja pošiljaka uz asistenciju robota sa posebnim osvrtom na uticaj deljenja skladišnog prostora robota na procenat uštede ovakvog sistema dostave.

Rad koji, prema mišljenju autora ovog rada, daje najkonkretnije odgovore na većinu pitanja koja se tiču kombinovane dostave vozilom i robotom je rad [20]. U ovom radu autori se bave proučavanjem niza različitih scenarija kombinovane dostave koja uključuje drumsko dostavno vozilo uz asistenciju jednog robota. Autori su zapazili da, za datu rutu samo za dostavno vozilo, pronalaženje „optimalnog skupa robotskih operacija“ koji poboljšava takvu rutu odgovara određenom slučaju problema maksimalnog ponderisanog nezavisnog skupa poznatog kao problem planiranja ponderisanog intervala. Taj problem su efikasno i optimalno rešili pomoću dinamičkog programiranja. Najpre se kreira početna ruta dostavnog vozila, a zatim se dobija odgovarajuća optimalna kombinacija robotskih operacija pomoću dinamičkog programiranja. Lokalna pretraga sa adaptivnom perturbacijom (*Local Search with Adaptive Perturbation LS-AP*) gde svako rešenje odgovara različitoj početnoj ruti dostavnog vozila se izvodi da bi se iterativno poboljšala TSP-R rešenja. Jednostavnije rečeno, autori su razvili originalnu heuristiku koja najpre rešava rutiranje dostavnog vozila na celokupnom rejonu dostave, a zatim lokalnim pretraživanjem (uz perturbacije početne rute vozila) ubacuje robota koji u određenim čvorovima najpre napušta vozilo, zatim u zavisnosti od scenarija dostavlja jednu ili više pošiljaka i na kraju se vraća u tačno određenom čvoru u vozilo.

3. Osnovna koncepcija problema

Problem dostave vozilima uz pomoć robota koji se ovde razmatra (TSP-R) može se formulisati slično drugim proširenjima tradicionalnog problema trgovačkog putnika koji karakteriše mogućnost opsluživanja nekih korisnika pomoćnim vozilima. Problem trgovačkog putnika sa robotom se, po našem mišljenju, može razmatrati kao poseban slučaj TSP-D jer nije uključena nikakva dodatna infrastruktura i „spuštanje“ i „preuzimanje“ jednog robota treba da bude koordinisano sa zaustavljanjima vozila radi dostave. Međutim, postoje različite karakteristike ovog problema koje ga čine jedinstvenim. Prvo, budući da se roboti, za razliku od dronova, uvek odlikuju manjim brzinama (poredeći ih sa drumskim dostavnim vozilom koje ga nosi), oni su prikladni za dostavu samo u određenim situacijama: relativno mala područja koja karakteriše velika gustina zaustavljanja radi dostave. Iz tog razloga, treba analizirati scenarija od 50-ak korisnika (primalaca paketa) na području od nekoliko kvadratnih kilometara. Operacije utovara/istovara (utovar u smislu spuštanja i preuzimanja robota) se izvode dok je vozilo zaustavljeno radi dostave (nije realno da se robot može vratiti u dostavno vozilo dok se ono kreće između dve susedne

tačke dostave). Stoga, efikasnost operacija utovara/istovara robota u/na dostavno vozilo postaje kritična u slučaju problema TSP-R, dok je ovaj aspekt relativno zanemaren kod slučaja TSP-D. Konačno, zahvaljujući mogućnosti razvoja deljivog skladišta, roboti mogu izvršiti više od jedne uzastopne dostave što bar za sad nije realna opcija za dostavu dronom. Ova činjenica, sa jedne strane, daje komparativnu prednost dostavi pomoću robota i smanjuje njihov hendikep u smislu brzine kretanja, ali sa druge strane usložnjava rešavanje optimalne rute. U literaturi su, usled velikog broja potencijalnih kombinacija, za rešavanje problema TSP-R i TSP-D korišćeni celobrojno programiranje i različiti heuristički pristupi.

Formulacija problema predstavlja specijalni slučaj problema iz teorije grafova (problem nezavisnog skupa - *Independent Set Problem*) poznatog i kao problem planiranja ponderisanog interval (*Weighted Interval Scheduling Problem*) gde je potrebno pronaći optimalan raspored poslova koji se ne preklapaju uz postizanje maksimalno mogućeg zbira pondera. Težine/ponderi mogu zavisi od različitih karakteristika vezanih za dostavu: hitnost pošiljke, njena vrednost, cena poštarine, prioritet klijenta itd. Intervali dostave su definisani vrstom usluge koja se nudi (do 12h, 19h, 4 sata po prijemu i sl.) ali je zbog relativno malog broja dostava na uskom području, koji je posledica ograničenog dometa robota, najverovatniji scenario da je vremenski okvir dostave isti za sve pošiljke.

Na osnovu ove formulacije ukupna ušteda specifičnog rada robota zavisi od originalnog niza tačaka dostave koje je posetilo dostavno vozilo, tačaka u kojima se vrši spuštanje i preuzimanje robota i zamenjenih originalnih tačaka dostave koje je trebalo da obiđe dostavno vozilo tačkama dostave koje sada opslužuje robot. Drugim rečima, cilj TSP-R „podproblema“ za datu rutu dostavnog vozila je maksimizirati ukupne uštede izborom optimalne kombinacije operacija robota.

Veoma je važno primetiti da je za bilo koju rutu obilaska dostavnog vozila moguće a priori isključiti neke operacije robota, na osnovu činjenice da je robot sporiji od vozila, što pojednostavljuje rešavanje postavljenog problema. S obzirom na potencijalnu odlaznu tačku dostave iz koje bi krenuo robot, ako je vreme potrebno robotu da stigne i opsluži potencijalnog primaoca veće od cene kompletiranja preostalog obilaska dostavnim vozilom, onda bi takva operacija robota, odnosno njegovo angažovanje, donela negativne uštede, tj. dodatni trošak i stoga se može odbaciti iz skupa mogućih rešenja. Za svaku dostavnu adresu posećenu na originalnoj ruti dostavnog vozila moguće je identifikovati „dostupni skup“ adresa koji potencijalno može da odredi pozitivne uštede. Uzimanje u obzir dostupnog skupa primalaca pošiljaka omogućava da se ubrza kreiranje robotskih operacija/poseta koje se pridodaju ruti vozila, u zavisnosti od odnosa brzina između dva vida dostave (vozilom ili robotom), oblasti koja se opslužuje i prostornog rasporeda adresa za dostavu u toj oblasti.

Da bi se dodatno smanjilo vreme rada računara za rešavanje problema koji uključuju veliki broj dostavnih tačaka originalna ruta dostavnog vozila bi se mogla podeliti na manje delove gde je isti pristup usvojen za svakog od njih nezavisno. Međutim, ovaj pristup bi doveo do gubitka efikasnosti jer bi propustio operacije/posete koje uključuju adrese za dostavu iz različitih segmenata tako podeljene rute. Obzirom da je reč o dinamičkom problemu koji bi se rešavao svakodnevno, a nekada i više puta u toku dana, naročito u veoma realnom slučaju velikog broja tačaka dostave i/ili nošenja više pošiljaka odjednom, pojednostavljenje rešavanja koje bi vodilo bržem dobijanju rute vozila i uključivanja robota može biti jedini način rešavanja u prihvatljivom vremenskom okviru.

U radu [21] dokazano je da ako se u rešavanju problema krene od optimalne rute vozila dobijene rešavanjem TSP to neće nužno doneti optimalno rešenje za probleme rutiranja sa dve vrste vozila (dostavno vozilo - robot). Međutim, može se očekivati da su TSP-R rešenja izvedena iz optimalnog obilaska dostavnog vozila obično bolja od većine rešenja dobijenih nasumičnim obilaskom. Iz tog razloga, u prvom koraku algoritma TSP-R rešenje se izvodi iz najbolje rute dostavnog vozila nakon čega se vrši sistematska lokalna pretraga sa ciljem da se identifikuju bolja kombinovana rešenja dostavnog vozila i robota modifikacijom originalne rute obilaska vozila.

Nakon identifikacije optimalne rute dostavnog vozila, operacija robota ili poseta tački dostave u suštini podrazumeva da robot sada može da opslužuje jednu ili više prvobitnih tačaka na ruti dostavnog vozila. U zavisnosti od izbora tačaka dostave gde spušta ili preuzima robota/te, dostavno vozilo može da izvrši nekoliko zaustavljanja dok je odvojeno od robota. Početna ruta dostavnog vozila može se izraziti i kao niz primalaca opsluženih hronološkim redom.

Prilikom samog rešavanja problema može se očekivati veliki broj lokalnih pretraga koje se obavljaju bez poboljšanja, u tom slučaju neophodno je da se poveća diverzifikacija tako što će se povećati verovatnoća „slučajnih perturbacija“ početne rute. Nasumične perturbacije karakteriše promenljivi broj alternativnih kretanja vozila. Broj ovih izmena takođe zavisi od stanja pretrage i povećava se sa uzastopnim lokalnim pretragama bez poboljšanja. Na taj način se sprečava zapadanje pretrage u tzv. lokalne optimume koji bi dali lažnu sliku pronalaska najboljeg rešenja.

Uzimajući u obzir prirodu problema koji se razmatra (problem dostave duž poslednje milje za određene četvrti ili centar grada), razumno je ograničiti se na relativno male probleme - do 100 primalaca. Optimalno rešavanje TSP-R koje uključuje još manje (15-ak primalaca) pomoću najsavremenijih softvera za rešavanje problema celobrojnog programiranja zahteva stotine hiljada varijabli i zahteva značajno vreme izračunavanja. Za eksperimente koji su dati u nastavku, a čiji rezultati su preuzeti od [20], pretpostavljene su sledeće vrednosti: brzina robota 1,0 m/s (nešto niža od prosečne brzine odraslog pešaka od 1,4 m/s [22]); brzina dostavnog vozila 6 m/s (u skladu sa prosečnim brzinama saobraćaja identifikovanim u različitim urbanim sredinama širom sveta [23]). Svaka dostava bez obzira da li je od strane dostavnog vozila ili robota (ne mora biti tako) zahteva zaustavljanje od 180s. Ove vrednosti su u skladu sa [24] i [25]. Prosečno vreme spuštanja/podizanja robota iznosi 60 sekundi.

4. Benefiti integrisanog sistema dostave i faktori uticaja

U nastavku su predstavljeni različiti faktori koji utiču na ukupne performanse sistema dostave vozilo-robot: brzina robota i brzina dostavnog vozila, kapacitet skladištenja robota i trajanje operacije spuštanja. Na osnovu rezultata data se neka razmatranja o praktičnim implikacijama za implementaciju sistema za dostavu asistiranu robotom.

4.1. Uticaj odnosa brzina dostavnog vozila i robota

Uticaj odnosa brzine između dva načina dostave (dostavno vozilo i robot), koji može odražavati učinak saobraćajne gužve i date infrastrukture (npr. semafori i

konfiguracija ulice) na efikasnost sistema dostave uz pomoć robota autori rada [20] testirali su pomoću nekoliko simulacija uz pretpostavku konstantne brzine robota i varijabilne brzine vozila. Nekoliko, na slučajan način definisanih, scenarija dostave koja karakterišu različite konfiguracije 50 korisnika na području od 6 km² analizirano je za datu brzinu robota od 1 m/s i brzinu vozila u rasponu od 2 m/s do 8 m/s. Ovi scenariji mogu predstavljati deo od oko 3-4 sata ukupnog trajanja regularnog obilaska ruta dostavnog vozila, odvijaju se u različitim tipovima delova grada (npr. komercijalni naspram stambenih) ili u različito doba dana (npr. vršni i vanvršni sati). Jednostavnije rečeno, realno stanje je da se dešava da se dostavna vozila i roboti kreću ovim brzinama upravo u različitim delovima grada, različitim satima u toku dana. Takve vrednosti su u skladu sa prosečnom brzinom kretanja duž poslednje milje u centru grada¹ merenom u nekoliko centralnih poslovnih četvrti u gradovima [26]. Kao što se i očekivalo, najveće uštede (u odnosu na odgovarajuće rešenje trgovačkog putnika samo sa dostavnim vozilom) nastaju u situacijama koje karakterišu visoki nivoi zagušenja gde je dostavno vozilo samo dva ili četiri puta brže od robota. U ova dva slučaja uštede su oko 21%, odnosno 17%. Za veće brzine dostavnog vozila uštede ostvarene upotrebom robota smanjuju se na vrednosti od oko 15%. Zanimljivo je da se iznad određene brzine dostavnog vozila (6 m/s ili više), iznos uštede stabilizuje oko 15%. Ovaj fenomen se može objasniti mogućnošću smanjenja ukupnih vremena dostave zahvaljujući paralelizaciji operacija dostave, koja traje 180s. Pod ovim pretpostavkama, još uvek je moguće izvesti najmanje jednu operaciju robota na 12 zaustavljanja kako bi se opslužio jedan ili dva korisnika.

Iako je malo verovatno da bi motorizovani drumski saobraćaj imao brzine niže od 2-3 m/s u većini urbanih sredina moguće je da će u nekim ograničenim područjima povremeno doći do privremenog povećanja vremena putovanja zbog nesreća ili vanrednih događaja kao što su kulturne i ostale manifestacije, iznenadne havarije na saobraćajnoj infrastrukturi i sl. U ovakvim situacijama dostava uz pomoć robota mogla bi postati posebno korisna kako bi se izbegli naleti zagušenja i smanjilo ukupno vreme dostave. U Tabeli 1 (uštede kombinovanom dostavom u poređenju sa rešenjem problema trgovačkog putnika samo za dostavno vozilo) za alternativne nivoe zakrčenosti dostavnih tačaka (gde je brzina saobraćaja jednaka 1 m/s u prvih/poslednjih 200 m oko dostavne tačke gde vozilo treba da se zaustavi) i opšte brzine dostavnog vozila (4, 6 i 8m/s) su prikazane za scenario od 50 primalaca. Za scenarija sa relativno ograničeno zagušenim područjima (npr. 10% ili 20% zagušenih dostavnih tačaka), postignute uštede su već znatno veće od odgovarajućih sa homogenim opštim brzinama dostavnog vozila (npr. za 30% zagušenih dostavnih tačaka uštede su gotovo udvostručene za bilo koju početnu brzinu vozila). Zanimljivo je da se za iste nivoe zakrčenosti dostavnih tačaka mogu postići slične uštede bez obzira na početnu brzinu dostavnog vozila. Ovaj rezultat se može objasniti mogućnošću zajedničkog sistema dostave vozilo - robot da efikasno prilagodi i modifikuje rutu kako bi se minimizovalo vreme dostave. U cilju povećanja brzine isporuke, s obzirom na nepredvidivost nastanka zastoja u saobraćaju, bilo bi korisno razviti softversku podršku za modifikaciju rute dostavnog vozila tako da robot može da opslužuje nekoliko zakrčenih područja u jednoj operaciji.

¹ Brzina kretanja duž poslednje milje u centru grada se definiše kao: „Brzina kojom vozač može da očekuje da će putovati jednu milju u centralnom poslovnom okrugu tokom vršnih sati“ [26]

Tabela 1. Uštede (%) koje odgovaraju alternativnim nivoima zakrčenosti dostavnih tačaka za date prosečne brzine saobraćaja

Zagušenost dostavnih tačaka	Opšta brzina dostavnog vozila (m/s)		
	4	6	8
0%	18,2	16,6	14,6
10%	22,7	22,8	22,9
20%	25,7	26,1	26,4
30%	28	28,2	27,9

4.2. Uticaj skladišnog kapaciteta robota

Kao što je već rečeno, mogućnost obavljanja nekoliko uzastopnih dostava robotom, zahvaljujući različitim odeljcima za skladištenje, predstavlja jednu od glavnih prednosti ovog sistema dostave (posebno u poređenju sa dronovima). Da bi se kvantifikovao uticaj ovog svojstva autori rada [20] su razmatrali 10 slučajnih scenarija sa istim karakteristikama kao u tački 4.1. Broj pošiljaka koje robot može da ponese variran je od 1 do 3, odnosno robot može da obavi maksimalno 3 uzastopna zaustavljanja po operaciji dostavljanja. Uštede (ponovo u poređenju sa originalnim rešenjem trgovačkog putnika samo sa dostavnim vozilom) značajno se povećavaju sa 10,7%, što odgovara rešenjima za rad robota sa jednim zaustavljanjem, na 16,5% i 19,6%, što odgovara operativnom rešenju robota sa 2 i 3 zaustavljanja. Iz prethodnog se može zaključiti da povećanje broja odeljaka za smeštaj pošiljaka u robotu sa jednog na tri može udvostručiti efikasnost robotskih sistema za dostavu.

4.3. Uticaj dužine operacija spuštanja i preuzimanja robota

Drugi mogući faktor uticaja na ukupnu efikasnost razmatranog kombinovanog sistema za dostavu vozilo-robot predstavlja dužina operacija spuštanja odnosno preuzimanja robota. Zavisno od stepena automatizacije procesa na relaciji dostavno vozilo-robot i mogućnosti utovara robotskih odeljaka pošiljkama pre samog stavljanja u rad robota, ovaj proces može trajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Rezultati istraživanja pokazuju da bi ukupna efikasnost sistema mogla da se smanji za oko 5% kada se dužina operacija spuštanja i preuzimanja robota poveća sa 60 s na 180 s.

4.4. Uticaj dometa dostave robota

Još jedan značajan faktor koji utiče na ukupnu efikasnost integrisanih sistema za dostavu odgovara maksimalnom dometu robota. S obzirom na oslanjanje robota na punjive baterije, prisustvo nekoliko fizičkih prepreka u urbanim okruženjima i obezbeđivanje sigurnosti kroz solidnu konstrukciju, udaljenost robota, u ekstremnim situacijama, može biti ograničena na svega nekoliko stotina metara. Ipak daleko je realnije da taj domet bude znatno veći tako da su uštede koje postižu roboti kada maksimalni prag za radnu udaljenost koju mogu da pređu poraste na 1000m iznosi 8,7% uštede. Na svakih 500m rasta dometa povećava se ušteda od 1,36% do 1,66% da bi za domet od 3000m iznosila značajnih 14,6% uštede. Za domete iznad 3000m i kada je brzina kretanja dostavnog vozila 6 puta veća od brzine kretanja robota moguće je ostvariti uštede koje se kreću oko 20-ak procenata. Na

osnovu svega navedenog jasno je da različite maksimalne udaljenosti po operaciji robota imaju značajan uticaj na ukupnu efikasnost sistema.

5. Diskusija

Rezultati prethodnih analiza daju prostora za neka korisna razmatranja u vezi sa implementacijom sistema dostave vozilima uz pomoć robota u scenarijima koje karakteriše nekoliko desetina korisnika (primalaca), gde jedan robot može otići iz dostavnog vozila zbog jedne ili više uzastopnih dostava. U zavisnosti od nekoliko faktora koji se tiču operativnih i konstrukcijskih karakteristika robota i spoljašnjeg okruženja takvi integrisani sistemi bi mogli da obezbede značajnu uštedu u vremenu i trošku dostave (u poređenju sa tradicionalnim načinom dostave vozilom).

S obzirom na relativno nisku brzinu robota (1m/s), idealan scenario implementacije podrazumevao bi ograničeno područje (npr. centar grada), visok stepen saobraćajne gužve u tom području (sa prosečnom brzinom ispod 4m/s) i gustu konfiguraciju korisnika (10 ili više korisnika po km²). Ovde bi uštede ostvarene u pogledu obilaska samo dostavnim vozilom bile oko 20%. Ovakvi uslovi bi se realno mogli javiti u gusto naseljenim urbanim područjima tokom najzagušenijih sati. S druge strane, postoji problem navigacije robota u područjima sa velikom gužvom. Prisutnost malih područja zagušenja oko ograničenog broja korisnika takođe predstavlja priliku za implementaciju robota koji može povećati ukupnu efikasnost dostave u takvim situacijama i do 30%. Ova vrsta scenarija se često javlja kao rezultat saobraćajnih nesreća, privremenih uskih grla i posebnih događaja.

Mogućnost podele skladišta u više odeljaka za više uzastopnih dostava omogućava značajno povećanje efikasnosti (10% do 17%). Trenutni dizajn sa jednom pregradom će verovatno morati da bude modifikovan da bi mogao da prihvati više pošiljaka naročito kako zbog razvoja baterija bude rastao njihov domet. Relativno mali domet može da smanji ukupne uštede za 6 - 8%. pa treba uzeti u obzir trajanje baterija ovih uređaja i mogućnost njihovog pravovremenog punjenja. Konačno, efikasnost operacija spuštanja i preuzimanja robota može uticati na ukupne performanse sistema sa razlikama od oko 5% između dostave od 1min i 3min. Mogućnost utovara robota dok je dostavno vozilo na putu, ovde nije uzimana u obzir, ali može značajno uštedeti vreme.

U poređenju sa dostavom asistiranom dronova, sistemi potpomognuti robotima generalno su manje učinkoviti zbog relativno malih brzina i ograničenja za rad na istoj mreži putne infrastrukture. Ipak, kada se uzme u obzir nosivost, domet i mogućnost nošenja više od jedne pošiljke uz ograničenja u vidu vremenske izdržljivosti, zajedno sa drugim ograničenjima kao što su zone zabrane letenja, jaz između drona i robota postaje mnogo uži. Konkretno, gušća i zagušena područja dostave ograničene veličine nude mogućnost sistemima potpomognutim robotima da značajno poboljšaju performanse dostave uz dobitke do 30%.

6. Zaključak

Roboti za dostavu predstavljaju novu priliku za poboljšanje dostave duž poslednje milje u urbanim sredinama. Cilj sistema za dostavu vozilom potpomognutim robotom je da delimično zamene rute vozila i poveća brzinu procesa dostave duž poslednje milje. U ovom radu prikazani su neki od testnih rezultata analize sistema dostave vozilima uz pomoć

robotu u kojem jedan robot može otići iz vozila kako bi obavio jednu ili više dostava krećući se trotoarom. Vreme putovanja korišćeno je kao glavni indikator učinka, dok druge vrste troškova, kao što su troškovi rada i održavanja nisu uzeti u obzir. Rezultati pokazuju da stepen ostvarive uštede u vremenu putovanja nije jednostavan i snažno zavisi od faktora kao što su odnos brzine između vozila i robota, kapacitet skladišta robota i razmeštaja primalaca. U manjoj meri trajanje spuštanja/podizanja robota na/sa trotoar može uticati na ukupnu efikasnost.

U poređenju sa dostavom asistiranom dronovima (dronovi sa velikim dometom leta i brzinom dvostruko ili tri puta većom od brzine kretanja dostavnog vozila u gradu), dostavu asistirano robotom karakterišu manje uštede. Međutim, kada se koristi samo jedan dron sa većim ograničenjima u smislu brzine i dometa leta, prednosti dva sistema su uporedive. Ovo je interesantan ishod koji treba imati na umu kada se razmišlja o komercijalnoj implementaciji usluga dostave duž poslednje milje zasnovane na automatizovanim tehnologijama.

Obzirom da su zone dostave pošiljaka, naročito u slučaju većih gradova u Srbiji, često kombinacija gusto naseljenih urbanih zona sa nepristupačnim i geografski, odnosno infrastrukturno odsečenih lokacija, možda je optimalno rešenje za asistirano dostavu ono koje uz drumsko vozilo dodaje i robotsku i dostavu pomoću drona. Korišćenje više od jednog robota ili drona svakako bi poboljšalo učinak čitavog sistema, takvih pilot projekata već ima, ali bi zahtevalo i daleko kompleksniju metodologiju (najverovatnije neku metaheuristiku) za rešavanje problema. U bilo kojoj varijanti asistirane dostave mogu se ostvariti značajne uštede upotrebom autonomnog vozila umesto klasičnog jer bi i mala asistencija vozaču/kuriru tokom vožnje dala dovoljno vremena da pripremi robotsko vozilo ili dron za sledeću dostavu.

Literatura

- [1] M. Savelsbergh, T. and Van Woensel, "50th anniversary invited article – city logistics: challenges and opportunities", *Transportation Science*, 50 (2), pp. 579–590, 2016
- [2] S. Halzack (2016). Amazon makes its first drone delivery to a real customer. The Washington Post. Available at: https://www.washingtonpost.com/news/business/wp/2016/12/14/amazon-makes-its-first-drone-delivery-to-a-real-customer/?utm_term=.c4c7027b4021.
- [3] J. Nicas (2018). Google's Parent Births New Businesses: Balloons and Drones. The New York Times. Available at: <https://www.nytimes.com/2018/07/11/technology/google-drones-internet-balloons.html>.
- [4] A. Hern (2014). DHL launches first commercial drone 'parcelcopter' delivery service. The Guardian. Available at: <https://www.theguardian.com/technology/2014/sep/25/german-dhl-launches-first-commercial-drone-delivery-service>.
- [5] J. Desjardins (2018). Amazon and UPS are betting big on drone delivery. Business Insider. Available at: <http://www.businessinsider.com/amazon-and-ups-are-betting-big-on-drone-delivery-2018-3>.
- [6] C. Bishop (2016). Swiss Post trials robot parcel deliveries in Bern. The Local. Available at: <https://www.thelocal.ch/20160823/swiss-post-trials-robot-parcel-deliveries-in-bern>.

- [7] J. Burns (2016). Domino's Pizza Robot Making Deliveries In Australia. Forbes. Available at: <https://www.forbes.com/sites/janetwburns/2016/03/18/dominos-pizza-robot-is-making-deliveries-in-australia/#2528686b7d59>.
- [8] D. Coldewey (2019). Kiwi's food delivery bots are rolling out to 12 more colleges. TechCrunch. Available at: <https://techcrunch.com/2019/04/25/kiwis-food-delivery-bots-are-rolling-out-to-12-new-colleges/>
- [9] Daimler, (2017). Vans & Robots. Small delivery robots out of the Sprinter. Available at: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/transporter/vans-robots-small-delivery-robots-out-of-the-sprinter/>.
- [10] C.C. Murray and A.G. Chu, "The flying sidekick traveling salesman problem: optimization of drone-assisted parcel delivery", *Transport. Res. C: Emerg. Technol.* 54, 86-109, 2015.
- [11] J.G. Carlsson and S. Song, "Coordinated logistics with a truck and a drone", *Manage. Sci.* 64 (9), 4052–4069, 2017.
- [12] X. Wang, S. Poikonen, B. Golden, "The vehicle routing problem with drones: several worst-case results", *Optimiz. Lett.* 11 (4), 679–697, 2017.
- [13] Agatz, N., Bouman, P., Schmidt, M., 2018. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transport. Sci.* 52 (4), 965–981.
- [14] A. Čupić, M. Blagojević, G. Marković, "Some Modern Solutions for Delivery Operation in Postal Traffic", IX International Conference "Heavy Machinery-HM2017", Zlatibor, str. 87-94, 2017.
- [15] Q.M. Ha, Y. Deville, Q.D. Pham, M.H. Hà, "On the min-cost traveling salesman problem with drone", *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 86, 597–621, 2018.
- [16] Boysen, N., Schwerdfeger, S., Weidinger, F., 2018. "Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots", *Eur. J. Oper. Res.* 271 (3), 1085–1099.
- [17] D. Jennings & M. Figliozzi, "Study of Sidewalk Autonomous Delivery Robots and Their Potential Impacts on Freight Efficiency and Travel", *Transportation Research Record*, 2673(6), 317-326, 2019, <https://doi.org/10.1177/0361198119849398>
- [18] M. Poeting, S. Schaudt, U. Clausen, "Simulation of an optimized last-mile parcel delivery network involving delivery robots". In: Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic, Springer, Cham, pp. 1–19, 2019.
- [19] M.O. Sonneberg, M. Leyerer, A. Kleinschmidt, F. Knigge, M.H. Breitner, "Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations", In: Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences, 2019.
- [20] M.D. Simoni, E. Kutanoglu, C.G. Claudel, "Optimization and analysis of a robot-assisted last mile delivery system", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 142, 102049, ISSN 1366-5545, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102049>.
- [21] R. Cuda, G. Guastaroba, M.G. Speranza, "A survey on two-echelon routing problems", *Comput. Oper. Res.* 55, 185-199, 2015.
- [22] R. Knoblauch, M. Pietrucha, M. Nitzburg, "Field studies of pedestrian walking speed and start-up time", *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 1538, 27–38, 1996.
- [23] Uber Movements (2019). Uber Technologies, Inc. Available at: <https://movement.uber.com>

- [24] A. Conway, X. Wang, Q. Chen, J. Schmid (2016). Freight Costs at the Curbside. Final Report. Available at: <http://www.utrc2.org/sites/default/files/Final-ReportFreight-Costs-at-Curbside.pdf>
- [25] J. Allen, M. Piecyk, M. Piotrowska, F. McLeod, T. Cherrett, K. Ghali, S. Wise, "Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: the case of London", *Transport. Res. D: Transp. Environ.* 61, 325–338, 2017.
- [26] T. Reed and J. Kidd (2019). Global Traffic Scorecard. INRIX Research. Available at: <http://inrix.com/scorecard/>.

Abstract: *Significant costs and increasing customer expectations for the same-day delivery have made last-mile mail delivery a critical part of the entire delivery process. The automation of transport represents a chance for the development of more efficient delivery systems characterized by the integration of different and complementary modes of transportation to the final recipient. The emphasis of this work is on the analysis of the possibility of implementing an integrated delivery vehicle - robot system for delivery along the last mile. This type of problem is similar to the delivery vehicle - drone system, despite the fact that the robots are characterized by much lower movement speeds and the ability to make several consecutive deliveries. Based on these special robot characteristics, in the literature heuristics have been developed that efficiently identify robot routing solutions based on the delivery vehicle's initial tour routes and corresponding robot operations. An analysis of the influence of various characteristics concerning the design and operation of the robot and the environment on the efficiency of the system itself is given. Robot-assisted last-mile delivery systems have been shown to be quite efficient if the robots are used in heavily traffic-congested areas while placing several items in the robot's own warehouse.*

Keywords: *last mile delivery, integrated delivery, robot, vehicle*

ANALYSIS OF THE SYSTEM OF COMBINED DELIVERY OF POSTAL ITEMS

Aleksandar Čupić, Mladenka Blagojević, Dejan Marković