

# Problem usmjeravanja električnih vozila

Tomislav Erdelić

Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu

Vukelićeva 4, Zagreb, Hrvatska

terdelic@fpz.hr

**Sažetak**—U logističkim procesima, od iznimne je važnosti efikasno upravljati flotom dostavnih vozila kako bi se obavila pravovremena i kvalitetna dostava. Zbog novih regulativa i zakona vezanih uz emisiju stakleničkih plinova u transportnom sektoru, logističke kompanije moraju plaćati sve veće naknade po svakom ispuštenom  $gCO_2/km$ . Dolaskom električnih vozila na tržište, koja nemaju lokalnu emisiju stakleničkih plinova, mnoge kompanije razmišljaju o uvođenju električnih vozila u dostavne procese, osobito za tzv. *last-mile* dostavu. Dobro istraženi problem usmjeravanja vozila (VRP) proširuje se na problem usmjeravanja električnih vozila (E-VRP), koji uzima u obzir specifične karakteristike električnih vozila.

U radu je dana formalna definicija E-VRP problema. Opisane su osnovne karakteristike električnih vozila, njihova primjena na dostavne procese te pregled istraživanja povezanih s modeliranjem energetske potrošnje električnih vozila. Opisane su različite inačice problema koje su proizašle iz specifičnih karakteristika električnih vozila i njihovim uvođenjem u postojeće logističke procese. Također, dan je pregled postupaka rješavanja E-VRP problema, s naglaskom na heurističke i metaheurističke postupke.

**Ključne riječi**—električna vozila, usmjeravanje vozila, energetska potrošnja, heuristike, metaheuristike

## I. UVOD

Problem usmjeravanja vozila (engl. *Vehicle Routing Problem*, VRP) je optimizacijski problem određivanja povoljnih dostavnih ruta od skladišta do geografski raspršenih korisnika uz određena ograničenja [1]. Problem su prvi put 1959. definirali Dantzig i Ramser pod nazivom *The Truck Dispatching Problem* [2]. VRP je NP-težak optimizacijski problem koji je generalizacija dobro poznatog problema trgovačkog putnika (engl. *Traveling Salesman Problem*, TSP) u kojem je potrebno odrediti najpovoljniju rutu kojom bi se poslužili svi korisnici. VRP nalazi primjenu u širokom spektru stvarnih aplikacija što dovodi do definicije mnogih varijanti problema s dodatnim karakteristikama i ograničenjima: ograničeni teretni kapaciteti vozila, vremenski prozori korisnika, više skladišta, prikupljanje i dostava, vremenski ovisno vrijeme putovanja, heterogena flota vozila i dr. [3–5]. Zbog složenosti problema egzaktnim metodama može se optimalno riješiti samo probleme s manjim brojem korisnika. Zbog toga se u literaturi mogu pronaći mnogobrojne heuristike, metaheuristike i hibridni postupci za rješavanje različitih problema i aspekata VRP problema.

U Europi se u posljednjem desetljeću donosi sve više zakona i regulativa vezanih za regulaciju emisije stakleničkih plinova u transportnom sektoru. Vanjski faktori i društveno povećanje ekološke svijesti potaknuli su zelene inicijative u mnogim kompanijama. Konvencionalna vozila s motorima s unutarnjim

izgaranjem (VMUIZ) zagađuju okoliš, osobito zrak u urbanim sredinama te ovisi o ograničenim resursima fosilnih goriva. Europska unija nastoji smanjiti emisiju stakleničkih plinova za 20 % do 2020., odnosno za 40 % do 2030. godine. U transportnom sektoru to predstavlja ozbiljan problem, budući da su transportni procesi odgovorni za 20 % ukupne emisije stakleničkih plinova u 2015. godini [6]. Navedenim problemom bavi se tzv. "zelena" logistika koja nastoji poboljšati održivost produkcijskih i distribucijskih procesa uzimajući u obzir ekološke i socijalne faktore [7]. S dolaskom električnih vozila na tržište, mnoge logističke kompanije razmišljaju o uvođenju električnih vozila u svoju flotu vozila kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova, a time i naknade koje moraju plaćati za svaki ispušteni  $gCO_2/km$ . Električna vozila (EV) imaju nekoliko prednosti u odnosu na vozila s unutarnjim izgaranjem: nemaju lokalnu emisiju stakleničkih plinova, stvaraju minimalnu buku, mogu se napajati električnom energijom iz obnovljivih izvora energije te su neovisni o cijeni nafte i politički nestabilnim zemljama [8], [9]. Postoje dvije osnovne konfiguracije EV vozila: baterijska električna vozila (BEV) koja se napajaju isključivo iz baterija smještenih unutar vozila i *plug-in* hibridna električna vozila (PHEV) koja se napajaju kombinacijom baterija i drugih izvora energije poput motora s unutarnjim izgaranjem. U ovom radu naglasak će biti na BEV vozilima, koji se suočavaju s dva problema: ograničeni domet i potrebna infrastruktura za punjenje. Zbog ograničenog kapaciteta baterije, domet koji mogu postići BEV vozila s potpuno napunjenom baterijom znatno je manji od VMUIZ vozila. Trenutno dostavna BEV vozila imaju domet od 150 do 200  $km$  [10]. Zbog ograničenog dometa, BEV vozila moraju češće posjetiti stanicu za punjenje, čija se lokacija i energetska potražnja mora predvidjeti u urbanističkim planovima. Trenutno je još u većini zemalja manjak instalirane infrastrukture za punjenje. Kako bi prazno BEV vozilo ponovno bilo operabilno potrebno je obnoviti energiju, a to je moguće postići zamjenom baterija ili punjenjem u stanici za punjenje [11], [12]. U oba slučaja potrebno je određeno vrijeme za obaviti radnju pri čemu se zamjena baterija može obaviti unutar fiksnog vremena, a vrijeme punjenja u stanici za punjenje ovisi o stanju napunjenosti (engl. *State of Charge*, SOC) prilikom dolaska u stanicu i željenom stanju napunjenosti. Uzimajući navedeno u obzir, u budućnosti će električna vozila biti bitan faktor održivog razvoja i mobilnosti, osobito u logističkim procesima.

U radu je opisan problem usmjeravanja električnih vozila, postupci rješavanja navedenog problema, te problemi vezani

uz uvođenje električnih vozila u dostavne procese. U poglavlju II definiran je problem usmjeravanja električnih vozila s opisom funkcije cilja i pregledom kronološkog razvoja problema. U poglavlju III opisane su osnovne karakteristike BEV vozila, njihova primjena u dostavnim procesima te model energetske potrošnje vozila. U poglavlju IV dan je pregled osnovnih inačica problema usmjeravanja BEV vozila i njihovih karakteristika. U poglavlju V dan je pregled postupaka rješavanja problema koji se može pronaći u literaturi koji uključuje egzaktne, heurističke i metaheurističke postupke. Zaključak rada i buduća istraživanja dani su u poglavlju VI.

## II. PROBLEM USMJERAVANJA ELEKTRIČNIH VOZILA

Uvođenjem električne flote vozila u distribucijske procese razvio se problem usmjeravanja električnih vozila (engl. *Electric Vehicle Routing Problem*, E-VRP) [13–15]. E-VRP nastoji odrediti najpovoljnije rute flote BEV vozila za posluživanje geografski raspršenog skupa korisnika. Pritom inačice E-VRP problema mogu uzeti u obzir sva standardna ograničenja: teretni kapacitet vozila, vremenski prozori korisnika, radno vrijeme i dr. [5], [16], a dodatno uzimaju u obzir ograničeni domet BEV vozila, odnosno potrebu za punjenjem vozila u stanicama za punjenje koja može biti na zasebnoj lokaciji ili nekoj od lokacija korisnika. Vrijeme putovanja do stanice za punjenje i vrijeme provedeno u punjenju također je bitan kriterij prilikom usmjeravanja vozila, osobito ako se razmatraju i vremenski prozori korisnika unutar kojeg se mora obaviti posluživanje.

Problem se može definirati na potpuno usmjerenom grafu  $G$  pri čemu su korisnici koji trebaju biti posluženi modelirani kao čvorovi u grafu, a udaljenosti između korisnika, odnosno putevi, su modelirani kao lukovi grafa. Neka je  $V = \{1, \dots, N\}$  skup geografski raspršenih korisnika koje je potrebno poslužiti, a skup  $F$  skup stanica za punjenje BEV vozila. Kako bi se dopustila višestruka posjeta pojedinim stanicama za punjenje definira se skup  $F'$  koji sadrži virtualne čvorove posjeta stanicama za punjenje iz skupa  $F$ . Čvorovi 0 i  $N + 1$  označavaju skladište, odnosno svaka ruta počinje čvorom 0, a završava čvorom  $N + 1$  ( $V_{0,N+1} = V \cup \{0\} \cup \{N + 1\}$ ). Graf  $G$  može se definirati kao  $G = (V_{0,N+1} \cup F', A)$ , pri čemu je  $A$  skup lukova  $A = \{(i, j) | i, j \in V_{0,N+1} \cup F', i \neq j\}$ . Ovisno o razmatranom problemu i modeliranju uvjeta iz stvarnog svijeta za svaki luk  $(i, j)$  može se definirati: duljina  $d_{ij}$ , vrijeme putovanja  $t_{ij}$ , energetska potrošnja  $e_{ij}$ , brzina  $v_{ij}$  i sl.

Općenito je u VRP problemima primarni cilj minimizirati ukupan broj korištenih vozila prema izrazu 1, a potom pristupiti minimizaciji udaljenosti prema izrazu 2 ili nekoj drugoj kriterijskoj funkciji [17]. Pritom je potrebno poštivati sva zadana ograničenja: teretni kapaciteti vozila, vremenski prozori, odnosno domet i potreba za punjenjem ako se radi o BEV vozilima. U izrazima 1 i 2  $x_{ij} = \{0, 1\}$  označava binarnu varijablu ovisno o tome dali se u rješenju koristi luk  $ij$  ili ne. Primarni cilj je minimizacija broja vozila jer se općenito veće uštede mogu postići s manjim brojem vozila (trošak vozila, plaća vozača i dr.). Ovakva podjela često je oprečna, budući da se smanjenjem broja vozila često povećava ukupna prijeđena udaljenost i obrnuto. Uzimajući u obzir

visoku kupovnu cijenu BEV vozila, pogodno je na navedeni način definirati hijerarhijsku funkciju cilja [9], [14].

$$\min \sum_{j \in V \cup F'} x_{0j} \quad (1)$$

$$\min \sum_{i \in V_0 \cup F', j \in V_{N+1} \cup F', i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Funkcije cilja mogu biti i složene odnosno da se istovremeno minimizira i broj vozila i udaljenost ili vrijeme putovanja, ali s različitim težinama [18]. Osim minimizacije udaljenosti, mogu se minimizirati i ukupni troškovi koji se sastoje od troškova kupovine BEV vozila, troškova vezanih uz energetska potrošnju (cijena električne energije), troškovi zamjene baterija nakon što im prođe životni vijek ( $\approx 240\,000$  km [19]), troškovi radnih sati zaposlenika [19–23]. Također, mogu se razmatrati i ukupni troškovi unutar određenog planiranog perioda [9], [24], minimizacija emisije štetnih plinova [25], [26], minimizacija energetske potrošnje [27] i dr.

Ovisno o izvedivosti rješenja u procesu pretrage mogu se razmatrati postupci koji prihvaćaju izvedive i neizvedive inačice rješenja. Izvediva rješenja u svakom koraku pretrage osiguravaju da se rješenje može izvesti, odnosno da zadovoljava sva ograničenja problema [22], [28–31], dok neizvediva rješenja najčešće imaju funkcije cilja s koeficijentima kažnjavanja rješenja koja u početku procesa pretrage dopuštaju neizvediva rješenja kako bi se povećao prostor pretrage, a potom kako se postupak pretraživanja privodi kraju postepeno sve više kažnjavaju neizvediva rješenja [14], [19], [20], [27], [32]. Primjer jedne takve funkcije cilja dan je izrazom 3 pri čemu je  $f_{dist}(S)$  ukupna prijeđena udaljenost u rješenju  $S$ , koeficijenti kažnjavanja rješenja označeni su s  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ , a  $P_{cap}(S)$ ,  $P_{tw}(S)$  i  $P_{batt}(S)$  su iznosi prekoračenja ograničenja problema, redom teretnog kapaciteta, vremenskih prozora i baterijskih kapaciteta.

$$f(S) = f_{dist}(S) + \alpha P_{cap}(S) + \beta P_{tw}(S) + \gamma P_{batt}(S) \quad (3)$$

Prva istraživanja vezana uz problem usmjeravanja električne flote vozila objavljena su [13](2011.), gdje su autori razmatrali VRP s prikupljanjem i dostavom (VRPPD) koristeći mješovitu flotu električnih i konvencionalnih vozila. Punjenje vozila odvija se virtualno na lokaciji gdje se pojavila potreba za punjenjem, a ukupno vrijeme punjenja računa se na temelju ukupne prijeđene udaljenosti BEV vozila. U radu [33] (2011.) autori su razmatrali *recharging* VRP problem, u kojem je vozilima s ograničenim dometom dozvoljeno punjenje na lokacijama korisnika tijekom rute. Autori navode primjenu razmatranog problema na EV vozila, te analiziraju utjecaj različitih ograničenja dometa, fiksnih vremena punjenja i vremenskih prozora na rute vozila i kvalitetu dobivenih rješenja. U radu [34] (2012.) autori definiraju *zeleni* VRP (engl. *Green VRP*, G-VRP) u kojem razmatraju flotu vozila koja se napaja alternativnim gorivima: biodizel, etanol, vodik, metanol, prirodni plin, električna energija i dr. Vozila se mogu puniti na zasebnim stanicama za punjenje, pri čemu je vrijeme punjenja fiksno određeno. Pritom ne razmatraju

vremenske prozore korisnika niti teretne kapacitete vozila. Autori u radu [14] (2014.) prvi uzimaju u obzir usmjeravanje cijele flote BEV vozila s mogućim posjetima stanicama za punjenje i vremenom punjenja ovisnim o razini SOC-a. Budući da uzimaju u obzir teretne i energetske kapacitete vozila te vremenske prozore korisnika problem definiraju kao E-VRPTW, a modeliraju ga kao cjelobrojni mješoviti linearni program.

### III. BATERIJSKA ELEKTRIČNA VOZILA U DOSTAVNIM PROCESIMA

#### A. Općenito

Baterijska električna vozila u dostavnim procesima suočavaju se s problemom ograničenog dometa. Osobna BEV vozila u prosjeku imaju kapacitet oko 30 kWh što im omogućava domet od oko 250 km [35], a pojedina vozila mogu ostvariti domet i do 500 km [36]. U dostavnim procesima s manjim teretnim vozilima zabilježeni su dometi od 100 do 200 km [10], [37], [38]. Razlog relativno malog dometa je što se mala količina energije može pohraniti u bateriju, odnosno baterije imaju mnogo manju specifičnu energiju (130 Wh/kg) u odnosu na specifičnu energiju fosilnih goriva (1233 Wh/kg) [39], [45].

U specijaliziranim slučajevima poput primjerice FedEx-a čija prosječna ruta u SAD-u iznosi 68 km [38] BEV vozila mogu se primijeniti direktno zbog dovoljnog dometa, a punjenje se može vršiti u skladištu. Postoje primjene uvođenja BEV vozila u dostavne procese: DHL, UPS, [40], [41], većinom za tzv. "last-mile" dostavu zbog kraćih udaljenosti i manjih teretnih opterećenja. Također, mnoge kompanije provode istraživanja vezana za evaluaciju uvođenja EV vozila u dostavne procese [8], [9], [37], [42–44]. Autori u [44] navode da BEV vozila teško mogu naći primjenu u problemima s vremenskim prozorima budući da dugo punjenje vozila u stanici za punjenje otežava ostvarivanje pravovremene dostave te značajno povećava radne troškove. S druge strane autori u [9] provode analizu slučaja uvođenja teretnog BEV vozila s vremenom planiranja od 5 godina te ih uspoređuju s konvencionalnim teretnim vozilima. Ukazuju da za specifične slučajeve (do 70 km udaljenosti od skladišta) uzimajući u obzir sve fiksne, varijabilne i operacijske troškove, BEV vozila mogu biti kompetitivna s konvencionalnim vozilima u broju vozila i ukupnoj prijeđenoj udaljenosti, dok su istovremeno ekonomski i ekološki bolja opcija, s uštedom od 12 do 32 % i smanjenjem ukupne emisije CO<sub>2</sub> do 25 %.

#### B. Energetska potrošnja

Zbog niske specifične energije, potrebno je znati koliko energije troši BEV vozilo, kako bi se procijenio njegov maksimalni domet. U literaturi se za predikciju energetske potrošnje često koristi mehanički model [45] prikazan izrazima 4 i 5. Sila  $F$  potrebna za svladavanje ubrzanja i otpora (nagib, kotrljanje i zrak) prikazana je izrazom 4 pri čemu je  $m$  masa vozila (najčešće praznog),  $a$  ubrzanje vozila,  $v$  brzina vozila,  $g$  gravitacijska konstanta,  $\alpha$  nagib terena,  $c_r$  koeficijent kotrljanja,  $c_d$  koeficijent otpora zraka,  $\rho$  gustoća zraka i  $A$  frontalna

površina vozila. Ako je  $F \geq 0$  potrebno je uložiti snagu kako bi se BEV vozilo kretalo, inače ako je  $F < 0$  radi se o usporavanju (kočenju) ili vožnji nizbrdo pri čemu se energija vraća u bateriju vozila budući da elektromotor ima mogućnost vraćanja energije tzv. regenerativna energija. Električna snaga koja izlazi iz baterije dijeli se na snagu pomoćnih uređaja  $P_0$ , poput grijanja i ventilacije, i mehaničku snagu  $P_m = Fv$ , ali s koeficijentom  $\mu_m$  zbog prijenosnog omjera s elektromotora na pogon kotača. Prema [46] zbog rasipanja snage na pomoćne uređaje, domet BEV vozila može se smanjiti za 30 %. Ako je poznata potrebna električna snaga, snaga baterije  $P_b$  može se dobiti prema izrazu 5 s koeficijentom pretvorbe  $\mu_e$  kemijske energije u električnu energiju. Energija se vraća u bateriju s koeficijentom  $\mu_g$  (prijenos s pogona na elektromotor te potom iz električne energije u kemijsku energiju) samo ako je  $F < 0$  i ako je brzina veća od minimalne brzine povrata energije  $v_{min}$  koja se određuje eksperimentalno [23], [45], [47]. Povratom se može vratiti 5-15 % ukupno potrošene energije [48], [49]. Kako bi se dobila energetska potrošnja potrebno je izraz 5 integrirati u vremenu ako se radi o kontinuiranom sustavu, ili ako se radi o diskretnom sustavu, sumirati potrošnju po diskretnim vremenskim trenucima  $\Delta t$ .

$$F = \underbrace{mg \sin \alpha}_{\text{Nagib}} + \underbrace{c_r mg \cos \alpha}_{\text{Kotrljanje}} + \underbrace{0.5c_d \rho A v^2}_{\text{Zrak}} + \underbrace{ma}_{\text{Ubrz.}} \quad (4)$$

$$P_b = \begin{cases} \mu_e(\mu_m F v + P_0), & \text{if } F \geq 0 \\ \begin{cases} 0, & \text{if } v \leq v_{min} \\ F v \mu_g + P_0, & \text{else} \end{cases}, & \text{if } F < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Prema eksperimentalnim istraživanjima [45], na nižim brzinama  $v \leq 30$  km/h najveći se dio energije troši na ubrzanje i pomoćne uređaje, dok se na većim brzinama  $v \geq 80$  km/h najviše energije ( $\approx 70$  %) troši na svladavanje otpora zraka. Nagib terena u ukupnom udjelu potrošnje ima manji značaj te se porastom brzine udio smanjuje, dok je udio energije potrošene na kotrljanje konstantan, neovisno o brzini.

Razmatrani model može se proširiti uzimanjem u obzir mase tereta vozila  $m(u_j)$  prilikom dostave dobara korisnicima [19]. Odnosno prilikom kretanja vozila iz skladišta teretni kapaciteti vozila su najčešće popunjeni do kraja, što uzrokuje veću energetska potrošnju na početku ruta. Kako vozila poslužuju korisnike, teret koji prevoze se smanjuje, a time i energetska potrošnja. Energetski optimalno usmjeravanje flote BEV vozila razmatrano je u radu [27]. Autori su analizirali utjecaj energetskeg usmjeravanja na različitim nagibima terena i različitim kapacitetima baterija, te dolaze do zaključka da s porastom visine linearno raste i energetska ušteda, ali se i ukupna udaljenost povećava. U stvarnim uvjetima, profil brzine koji u sebi sadrži i informaciju o ubrzanju generira energetski profil potrošnje koji je varijabilan te ovisi o karakteristikama prometnice (tip prometnice, visinski profil) [50], načinu vožnje vozača [51], prometu (nesreće, ponavljajuća zagušenja) [52–54], vremenskim uvjetima [55] i dr. Iz tog razloga, u literaturi se mogu pronaći statističke metode predik-

cije energetske potrošnje BEV vozila temeljene na podatkovno vođenim metodama [47], [56], [57].

#### IV. INAČICE PROBLEMA USMJERAVANJA ELEKTRIČNIH VOZILA

##### A. Heterogena flota vozila

U postojećim distribucijskim kompanijama velikom su većinom zastupljena konvencionalna VMUIZ vozila. Tranzicija cijele flote vozila na električnu flotu vozila je ekonomski vrlo zahtjevna investicija, a postavlja se i pitanje mogućnosti pravovremenog posluživanja svih korisnika. Stoga, većina kompanija nastoji postepeno uvesti EV vozila u postojeću flotu konvencionalnih vozila. Posljedično, javlja se potreba za usmjeravanjem mješovite flote električnih i konvencionalnih vozila.

Problem usmjeravanja heterogene flote (FSM-VRP od engl. *Fleet Size and Mix VRP*) prvi put je definiran u radu [58] gdje su autori razmatrali usmjeravanje flote vozila s različitim kupovnim troškovima vozila i troškovima usmjeravanja neovisnim o vrsti vozila. Od tada su provedena brojna istraživanja [59], [60], od kojih se može istaknuti usmjeravanje mješovite flote vozila s ciljem minimizacije zagađenja okoliša [61]. U posljednjih nekoliko godina nekoliko je radova razmatralo problem usmjeravanja heterogene flote BEV i VMUIZ vozila [19], [20], [22], [23], [30], [62]. U [19] autori rješavaju navedeni problem uzimajući u obzir jednake teretne kapacitete svih vozila i jednake energetske kapacitete BEV vozila. Prvotno kreiraju rješenje koje sadrži samo rute BEV vozila, a potom  $m$  ruta koji najviše doprinose ukupnim troškovima pretvaraju u rute konvencionalnih vozila, na način da izbace posjete stanicama za punjenje tijekom rute. U fazi lokalne pretrage ne dopuštaju ubacivanje korisnika u rute konvencionalnih vozila. Autori u [20] razmatraju isti problem s različitim teretnim i energetskim kapacitetima vozila. Prilikom kreiranja početnog rješenja autori nastoje za svaki tip vozila kreirati zasebnu rutu te potom u rješenje dodaju onu rutu koja ima najmanje ukupne troškove. U fazi lokalnog pretraživanja koriste operator *Resize* koji pokušava promijeniti tip vozila alociranog za određenu rutu. U rezultatima ukazuju na pozitivan utjecaj heterogene flote vozila na ukupnu generaliziranu potrošnju. Slična analiza na manjim testnim problemima provedena je i u radu [23] gdje autori razmatraju različite stvarne tipove električnih i konvencionalnih vozila.

##### B. Strategije parcijalnog punjenja

U većini E-VRP problema prilikom posjete BEV vozila stanicama za punjenje, razmatra se potpuno punjenje [14], [19], [20]. Navedeno može biti izuzetno vremenski zahtjevno, budući da ovisno o dostupnoj tehnologiji punjenja, SOC-u i kapacitetu baterije, vozilo se može puniti od 20 min do 8 h [12]. Prema tome, u stvarnim aplikacijama potrebno je uzeti u obzir mogućnost parcijalnog punjenja BEV vozila, odnosno napuniti vozilo toliko da ima dovoljno energije da završi trenutnu rutu. Navedeno osobito utječe na korisnike s ograničenim vremenskim prozorima koji u većem broju slučajeva postaju izvedivi zbog prethodno kraćeg vremena punjenja u stanicama za

punjenje. S ekonomske strane pojedini autori navode da bi se na ovaj način mogle ostvariti značajne uštede, osobito ako se dopusti punjenje noću, kada je cijena električne energije niža [15], [63]. S druge strane mnogi potencijalni kupci i vozači BEV vozila imaju "strah od nedovoljnog doseg" (engl. *range anxiety*) [64], odnosno strahuju da domet vozila neće biti dovoljan za obavljanje zadanih poslova, pogotovo ako se uzme u obzir dodatna energetska potrošnja zbog grijanja i ventilacije vozila (do 30 %) [46]. U takvim slučajevima kako bi se osigurala rezerva energije može se razina SOC-a baterije ograničiti unutar određenog intervala, npr. [20, 95] [22].

Nekoliko radova razmatralo je strategije parcijalnog punjenja u E-VRP problemima [15], [22], [28], [30], [62], [63], [65], [66]. U radovima [15], [28] autori prilikom svake zamjene ili ubacivanja korisnika osiguravaju da se vozilo na prethodnoj stanici za punjenje puni samo količinu dovoljnu za obavljanje tog dijela segmenta vozila, što u konačnici rezultira s izbacivanjem određenih stanica za punjenje iz rute vozila i dolazak u skladište na kraju rute s potpuno praznim vozilom. U radu [66] autori definiraju FRVCP (engl. *Fixed Route Vehicle Charging Problem*) za BEV vozila u kojem za fiksno određenu rutu određuju lokacije stanica za punjenje i vrijeme provedeno na punjenju na dva načina: optimalno i heuristički. U radu [63] autori na manjim testnim problemima rješavajući problem egzaktno ukazuju na prednosti parcijalnog punjenja u odnosu na potpuno punjenje. U 7 od 36 testnih problema parcijalno punjenje smanjilo je ukupnu prijeđenu udaljenost i broj posjeta stanicama za punjenje.

##### C. Određivanje lokacija stanica za punjenje

Zbog relativno niskog udjela EV vozila na tržištu, posljedično je i udio stanica za punjenja u cestovnoj infrastrukturi relativno nizak budući da se nije još pojavila tolika potražnja na tržištu. Prema tome veliki potencijal leži u istovremenom određivanju lokacija stanica za punjenje i usmjeravanju električne flote vozila koji se može definirati kao ELRP problem (engl. *Electric Location Routing Problem*) [9], [24], [31], [32], [63]. Cjelokupni potencijal nije moguće iskoristiti ako odluke o lokacijama stanica za punjenje donose vlade i privatne kompanije neovisno o logističkim procesima, kao što je to do sada najčešći slučaj. No, logističke kompanije koje započinju s tranzicijom na BEV vozila donose takve odluke istovremeno, te odlučuju o lokacijama stanica za punjenje i rutama BEV vozila.

U radu [9] autori izrađuju studiju slučaja za uvođenje električne flote vozila i izgradnju stanica za punjenje na lokacijama prodavaonica za logističku kompaniju u Njemačkoj. Prednost navedenog istraživanja je što je logistička kompanija ujedno i vlasnik prodavaonica. Rezultati za specifičan problem i način dostave ukazuju na isplativost uvođenja BEV vozila i izgradnju infrastrukture za punjenje na određenim lokacijama korisnika. U [63] na manjim testnim problemima autori u svim slučajevima ukazuju na bolja rješenja dobivena ELRP-om u odnosu na E-VRP. Razlog leži u činjenici da se procesi punjenja i posluživanja mogu vršiti istovremeno, a i određeni vremenski prozori mogu postati izvedivi postavljanjem lokacija stanica

za punjenje kod korisnika budući da nije potrebno putovati do stanice za punjenje.

#### D. Ostale inačice

Umjesto posjeta stanici za punjenje kako bi se BEV vozilo napunilo do određene razine, u određenim specijaliziranim stanicama moguće je obaviti zamjenu praznih baterija s punim [11], [67]. Glavna prednost ovakve tehnike je brzina, a glavni nedostatak su nestandardizirane baterije u EV vozilima [12]. Cijeli postupak bi mogao trajati manje od 10 min, što je konkurentno vremenu punjenja konvencionalnih VMUIZ vozila, a puno brže od najbržih mogućih načina punjenja BEV vozila [11]. U radovima [11], [67] autori rješavaju E-VRP problem u kojem BEV vozila prilikom posjeta stanici za punjenje obavljaju zamjenu baterija s fiksnim vremenom zamjene, dok u [31], [32] autori rješavaju E-LRP problem sa stanicama za zamjenu baterija.

Većina E-VRP istraživanja fokusira se na statična stanja prometne mreže, u kojoj je vrijeme putovanja konstantna veličina i ne mijenja se kroz dan [9], [14], [15], [19], [20], [24], [28], [32], [63]. U stvarnom svijetu, stanje prometne mreže je dinamičko, mijenja se ovisno o dobu dana, danu u tjednu, sezoni i dr. [53]. Uzimajući u obzir varijabilno vrijeme putovanja na mreži, definiran je TD-VRP problem (engl. *Time Dependent VRP*) [52], [68–70]. U [71] autori uzimaju u obzir BEV vozila i vremenski ovisno vrijeme putovanja te rješavaju E-VRP problem iz stvarnog svijeta koristeći genetski algoritam s vremenom računanja u prosjeku 3 h.

U većini E-VRP istraživanja u kojima se vozila pune u stanicama za punjenje pretpostavlja se linearno vrijeme punjenja, a u nekim slučajevima i fiksno vrijeme punjenja [14], [15], [19], [20], [33]. Većina BEV vozila ima ugrađene litijonske baterije [72] koje se najčešće pune u dvije faze: prvo konstantnom strujom, a potom nakon razine SOC-a  $\approx 80\%$  [75], prelazi se u fazu s konstantnim naponom (CC-CV od engl. *constant current-constant voltage*) [74]. U CC fazi SOC se povećava linearno s vremenom, a potom slijedi CV faza u kojoj struja pada eksponencijalno, te se SOC povećava nelinearno s vremenom [75]. U radovima [66], [76] prilikom rješavanja E-VRP problema autori uzimaju u obzir nelinearnu karakteristiku punjenja na način da je lineariziraju po segmentima.

Poznato je da postoje različite tehnologije punjenja EV vozila: (i) sporo 3.6 KWh/h (6 – 8 h) (ii) srednje 20 KWh/h ( $\approx 2$  h) (iii) brzo 45 KWh/h (20-30 min) [77]. U radovima [15], [22], [30], [62] prilikom dolaska BEV vozila u stanicu za punjenje optimizira se i odabir tehnologije punjenja. Na taj način, može se primjerice ubrzati vrijeme punjenja brzim punjenjem i omogućiti posluživanje korisnika s uskim vremenskim prozorima, no s druge strane povećava se ukupni trošak zbog skuplje jedinične cijene punjenja. Osim navedenog pojedini radovi razmatraju E-VRP uz uzimanje u obzir radnog vremena stanice za punjenje, vremenski ovisne troškove punjenja (jeftinije punjenje noću), broj dostupnih punjača za punjenje i njihova kompatibilnost s BEV vozilima, opterećenje energetske mreže te snagu punjača [22], [30], [62].

Uz E-VRP problem usko je vezan E-TSP problem u kojem se skup korisnika mora poslužiti jednim BEV vozilom. Također za energetske optimizacije bitan je problem pronalaska energetski najkraćeg puta na grafu [10], [78–80].

#### V. POSTUPCI RJEŠAVANJA PROBLEMA

Budući da je VRP poprilično dobro istražen problem, tijekom godina su se pojavili brojni postupci za rješavanje problema. Zbog NP-težine problema i razloga što stvarne instance problema često sadrže veliki broj korisnika, većina algoritama koji se koriste u praksi su heuristike i metaheuristike. Za manje instance problema predlažu se različite egzaktno metode koje su u stanju problem riješiti optimalno. Većina postupaka za rješavanje VRP problema, je uz manje izmjene primjenjiva i na E-VRP problem.

U egzaktno postupke koji su u stanju pronaći optimalno rješenje od 50 do 100 korisnika ubrajaju se metode grananja i ograđivanja, rezanja ili nagrade [81], [82], dinamičko programiranje [83], linearno i cjelobrojno programiranje [84], particija skupova [85] i dr. Za rješavanje E-VRP problema mogu se istaknuti linearno i cjelobrojno programiranje [14], [18], [19], [23], [44], [63], metoda grananja i nagrade [20] te dinamičko programiranje [9].

Heuristički postupci nastoje na temelju specifičnog znanja o sustavu riješiti problem, najčešće suboptimalno, odnosno dovoljno brzo doći do "zadovoljavajućeg" rješenja. U području VRP-a, može ih se podijeliti na konstruktivne i unapređivačke postupke. Konstruktivne metode često se koriste za kreiranje početnog rješenja, bilo serijskim ili paralelnim kreiranjem ruta. Rješenja se stvaraju na "pohlepan" način te su u konačnici najčešće 10-15 % udaljena od optimalnih rješenja [4]. Od poznatijih konstruktivnih metoda mogu se istaknuti Clarkov i Wrightov algoritam uštede [86], *sweep* algoritam [87], *route-first cluster-second* i *cluster-first route-second* [88], [89] i dr. U E-VRP literaturi za kreiranje početnog rješenja uz modifikacije postupaka zbog karakteristika BEV vozila koriste se sljedeće heuristike: *sweep* algoritam [14], *route-split* metoda [66], iterativno ubacivanje korisnika [15], [19], [20], [22], [28], modificirani Clarkov i Wrightov algoritam uštede, algoritam klasteriranja temeljen na gustoći [34] i dr. Osnovna verzija algoritma iterativnog ubacivanja/dodavanja korisnika sadrži skup neobrađenih i obrađenih korisnika. U svakom koraku algoritma iz skupa neobrađenih korisnika se pronalazi onaj koji zadovoljava sva ograničenja problema, a koji najmanje povećava vrijednost funkcije cilja. Ako se vrši dodavanje korisnika, onda se taj korisnik jednostavno dodaje na kraj rute, a ako se vrši ubacivanje korisnika, onda se osim korisnika optimizira i mjesto ubacivanja korisnika u rutu. U trenutku kada se prekorači energetski kapacitet baterije vozila, u rutu se dodaje stanica za punjenje, a kada više nije moguće dodati korisnika u rutu vozila zbog ograničenja problema (teretni kapacitet, vremenski prozori i dr.) otvara se nova ruta te se postupak ponavlja.

Unapređivački postupci najčešće lokalno pretražuju susjedstvo problema, tražeći rješenje koje je bolje od trenutnog rješenja. Susjedstvo se pretražuje perturbacijama rješenja, na

temelju kompozitnih operatora susjedstva. Lokalna pretraga zaustavlja se nakon što u susjedstvu rješenja nije više moguće naći rješenje bolje od trenutnog rješenja, te se trenutno rješenje naziva lokalnim optimumom. Poznati operatori susjedstva *2-opt*, *3-opt*, *Or-opt*, *2-opt\**, *relocate*, *exchange*, *CROSS-exchange* nastoje izbrisati, ubaciti ili zamijeniti lukove/korisnike u rješenju [4], [5]. Ovisno o tome da li rade zamjenu unutar ruta ili između ruta mogu se podijeliti u *intra* i *inter* operatore. Osim navedenih operatora u procesu lokalne pretrage prilikom rješavanja E-VRP problema pojavio se novi operator ubacivanja i brisanja stanica za punjenje [14], [15], [20]. Redoslijed izvođenja operatora utječe na kvalitetu rješenja i vrijeme izvršavanja. Često se postavlja pitanje da li napraviti "prvu bolju" promjenu ili "najbolju" zabilježenu promjenu u procesu lokalne pretrage [90]. Evaluacija operatora također je bitan segment koji utječe na vrijeme izvršavanja algoritma te mora biti efikasno izvedena kako se ne bi puno vremena potrošilo prilikom pretraživanja. Primjerice, u VRPTW problemu izračun promijene udaljenosti ubacivanjem korisnika može se dobiti u konstantnom vremenu  $\mathcal{O}(1)$ , te se u istom vremenu mogu provjeriti ograničenja kapaciteta i vremenskih prozora ako se za svakog korisnika pamti ostatak kapaciteta i najkasnije vrijeme do kojeg se korisnika treba poslužiti. Postupak evaluacije otežava se uvođenjem BEV vozila, ali praćenjem SOC-a kod korisnika i posjeta stanicama za punjenje mogu se osnovni operatori susjedstva za evaluaciju udaljenosti, teretnih i baterijskih kapaciteta izračunati u  $\mathcal{O}(1)$  [14], [20]. Evaluaciju vremena nešto je teže izračunati s složenošću  $\mathcal{O}(B)$  gdje je  $B$  broj čvorova u ruti nakon stanice za punjenje, a prije sljedeće stanice za punjenje, no postoje efikasne izvedbe konkatencijskih operatora koje i tu provjeru provedu u  $\mathcal{O}(1)$  [20].

Operatori susjedstva pretražuju prostor susjedstva samo u neposrednoj okolini trenutnog rješenja, čime često vrlo brzo završavaju u lokalnom optimumu. Kako bi se pretražio veći prostor susjedstva autori u [91] predlažu heuristiku pretraživanja većeg susjedstva (LNS od engl. *Large Neighborhood Search*) koja se temelji na uništavanju i popravljanju rješenja. Efikasnost heuristike ovisi o implementiranim metodama za uništavanje, a osobito za popravljavanje rješenja. LNS je u E-VRP-u uspješno primijenjen u radovima [30], [62]. Nedostatak LNS heuristike je što se tijekom uništavanja i popravljavanja uvijek koriste iste metode, te postupak može zapeti u lokalnom optimumu.

Osim specijaliziranih heuristika, mnoga istraživanja koriste metaheuristike kako bi nastavili pretraživanje nakon prvog pronađenog lokalnog optimuma. Metaheuristike se mogu definirati kao *heuristike koje vode druge heuristike* [4] te se mogu podijeliti u susjedno orijentirane metaheuristike koje generalno iterativno pretražuju susjedstvo trenutnog rješenja i populacijske metaheuristike koje se temelje na evoluciji skupa rješenja na način da se nova rješenja dobivaju iz kombinacija već postojećih rješenja u skupu.

Od susjedno orijentiranih metaheuristika među najpoznatijima je simulirano kaljenje [92], u kojem pomoću temperaturnog parametra na početku procesa lošija rješenja prihvaćaju

s većom vjerojatnošću, a kako se proces pretraživanja privodi kraju vjerojatnost za prihvaćanje lošijih rješenja se smanjuje. U mnogim VRP i E-VRP radovima simulirano kaljenje koristi se kao kontrolna heuristika za prihvaćanje rješenja dobivenih u postupku pretrage [5], [14], [15], [19], [28], [32]. Među poznatijima VRP metaheuristikama su još i tabu pretraživanje [93], [94], varijabilno pretraživanje susjedstva [95], iterativna lokalna pretraga [96] i adaptivno pretraživanje velikog susjedstva [97], [4]. Tabu pretraživanje koristi memorijsku strukturu kako bi se zabranilo pretraživanje već pretraženog prostora rješenja. Zajedno s operatorima susjedstva koristi za intenzifikaciju prostora pretrage [14], [27], [30]. Varijabilno pretraživanje susjedstva temelji se na promijeni susjedstva prema unaprijed definiranim strukturama, najčešće od manjih prema većim promjenama. U području E-VRP problema u radu [14] uspješno je primijenjen za diverzifikaciju prostora rješenja na temelju određenih 15 cikličkih operatora zamjene korisnika u rutama. Metoda se može proširiti s grananjem i adaptivnim mehanizmima [9], [18], [32], [66]. Iterativna lokalna pretraga sukcesivno ponavlja postupak lokalne pretrage. Kada proces zapne u lokalnom optimumu, vrši se perturbacija rješenja te se postupak lokalne pretrage ponavlja [30], [62], [66].

U radu [97] autori prezentiraju adaptivnu heuristiku pretraživanja velikog susjedstva u kojoj tijekom iterativnog postupka ocjenjuju metode uništavanja i popravljavanja, te se u trenutnom koraku vrši odabir metoda prema njihovom tadašnjem učinku. Mnogi su autori za rješavanje E-VRP problema koristili adaptivnu heuristiku pretraživanja velikog susjedstva te osim poznatih metoda uništavanja i popravljavanja poput: slučajnog izbacivanja, izbacivanje najgoreg prema udaljenosti/vremenu, Shawovo izbacivanje, zonsko izbacivanje, pohlepno ubacivanje, ubacivanje sa žaljenjem, zonsko ubacivanje i dr., uvode metode za uništavanje i ubacivanje stanica za punjenje [19–21], [25], [28], [29], [31]. Također, razmatrane su i paralelne verzije algoritma s primjenom na VRP problem [98–101].

Populacijske metaheuristike poput genetskog algoritma [102], *path relinking* i *scatter search* [103], [104], kolonije mrava i pčela [105], [106] imaju široku primjenu na VRP problemima. U području E-VRP-a za rješavanje problema mogu se istaknuti genetski algoritam i algoritam kolonije mrava [71], [107].

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je opisan problem usmjeravanja električnih vozila (E-VRP) koji razmatra dostavu dobara korištenjem baterijskih električnih vozila (BEV). Opisane su specifične karakteristike dostave dobara električnom flotom vozila zbog njihovog ograničenog dometa. Dan je pregled postupaka rješavanja E-VRP problema te povezana istraživanja koja uključuju različite inačice problema i modeliranje energetske potrošnje BEV vozila.

Kroz literaturu može se uočiti da su se razvile efikasne heurističke i metaheurističke metode rješavanja relativno novog E-VRP problema. Također, veliki broj karakteristika BEV vozila iz stvarnog svijeta modeliran je u inačicama E-VRP

problema: mješovita flota vozila, parcijalno punjenje, različite tehnologije punjenja itd.

Iako se veliki broj istraživanja provodi u području električnih vozila i E-VRP problema postoji još dosta prostora za poboljšanja. Većina radova razmatra statično stanje prometne mreže, iako je poznato da se vrijeme putovanja mijenja kroz: (i) dan - osobito u urbanim sredinama tijekom jutarnjih i popodnevni vršnih sati; (ii) različite dane u tjednu (radni tjedan ili vikend); (iii) sezoni i dr. Uzimajući u obzir vremenski ovisne brzine na prometnicama, može se predvidjeti ne samo profil vremena putovanja, već i energetski profil potrošnje vozila na razmatranom segmentu, što može biti od iznimnog značaja prilikom rutiranja BEV vozila. Od provedenih istraživanja prema znanju autora može se istaknuti samo jedan rad u području E-VRP problema s vremenski ovisnim vremenom putovanja, dok istraživanja vezana uz primjenu energetskog profila potrošnje u E-VRP problemu još nisu provedena.

Također relativno mali broj radova razmatra različite opcije punjenja BEV vozila u stanici za punjenje, veći broj skladišta, nelinearno punjenje i sl., kao i mogućnost da je kapacitet stanice za punjenje ograničen. Bitan segment u stvarnom svijetu je mješovita flota vozila, gdje još uvijek ima prostora za istraživanje, osobito u postupcima rješavanja i operatorima lokalne pretrage. Metaheuristike poput adaptivnog pretraživanja velikog susjedstva također pružaju mjesto za napredak u smislu uzimanja u obzir vremena izvršavanja prilikom ocjena metoda uništavanja i popravljavanja ili pak paralelnih verzija. Također, relativno mali broj populacijskih algoritama primijenjen je za rješavanje E-VRP problema.

#### LITERATURA

- [1] G. Laporte, "Fifty years of vehicle routing," *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp. 408–416, 2009.
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Manage. Sci.*, vol. 6, pp. 80–91, Oct. 1959.
- [3] S. Nanda Kumar and R. Panneerselvam, "A survey on the vehicle routing problem and its variants," vol. 04, 01 2012.
- [4] T. Vidal, T. G. Crainic, M. Gendreau, and C. Prins, "Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis," *European Journal of Operational Research*, vol. 231, no. 1, pp. 1 – 21, 2013.
- [5] P. Toth and D. Vigo, eds., *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.
- [6] WEEA (2015), "Greenhouse gas data - emissions share by sector in eu28," 2015. Pristupljeno: 31. kolovoz 2017.
- [7] A. Sbihi and R. W. Eglese, "Combinatorial optimization and green logistics," *4OR*, vol. 5, pp. 99–116, Jul 2007.
- [8] B. A. Davis and M. A. Figliozzi, "A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 49, no. 1, pp. 8 – 23, 2013.
- [9] M. Schiffer, S. Stütz, and G. Walther, "Are ECVs breaking even? - Competitiveness of electric commercial vehicles in medium-duty logistics networks," Tech. Rep. Working Paper OM-02/2016, RWTH Aachen University, Aachen, 2016.
- [10] C.-S. Liao, S.-H. Lu, and Z.-J. M. Shen, "The electric vehicle touring problem," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 86, pp. 163 – 180, 2016.
- [11] J.-Q. Li, "Transit bus scheduling with limited energy," *Transportation Science*, vol. 48, no. 4, pp. 521–539, 2014.
- [12] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 970 – 983, 2017.
- [13] F. Goncalves, S. Cardoso, and S. Relvas, "Optimization of distribution network using electric vehicles: A vrp problem," 2011. Technical report, CEG-IST, Technical university of Lisbon, Portugal.
- [14] M. Schneider, A. Stenger, and D. Goetze, "The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations," *Transportation Science*, vol. 48, no. 4, pp. 500–520, 2014.
- [15] Ángel Felipe, M. T. Ortuño, G. Righini, and G. Tirado, "A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 71, pp. 111 – 128, 2014.
- [16] M. Gendreau and C. D. Tarantilis, "Solving large-scale vehicle routing problems with time windows: The state-of-the-art," 2010. Technical report 2010-04.
- [17] O. Bräysy and M. Gendreau, "Vehicle routing problem with time windows, part i: Route construction and local search algorithms," *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp. 104–118, 2005.
- [18] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, and S. Suraci, "A Matheuristic for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows," *ArXiv e-prints*, May 2015.
- [19] D. Goetze and M. Schneider, "Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles," *European Journal of Operational Research*, vol. 245, no. 1, pp. 81 – 99, 2015.
- [20] G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, and R. F. Hartl, "The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations," *European Journal of Operational Research*, vol. 252, no. 3, pp. 995 – 1018, 2016.
- [21] M. Wen, E. Linde, S. Ropke, P. Mirchandani, and A. Larsen, "An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem," *Computers and Operations Research*, vol. 76, pp. 73–83, 12 2016.
- [22] O. Sassi, W. R. Cherif, and A. Oulamara, "Vehicle Routing Problem with Mixed fleet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs." working paper or preprint, Oct. 2014.
- [23] P. Lebeau, C. De Cauwer, J. Van Mierlo, C. Macharis, W. Verbeke, and T. Coosemans, "Conventional, hybrid, or electric vehicles: Which technology for an urban distribution centre?," *The Scientific World Journal*, p. 11, 2015.
- [24] M. Schiffer, S. Stütz, and G. Walther, "Are ECVs breaking even? : Competitiveness of electric commercial vehicles in retail logistics," Tech. Rep. G-2017-47, RWTH Aachen University, Aachen, 2017.
- [25] E. Demir, T. Bektaş, and G. Laporte, "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 2, pp. 346 – 359, 2012.
- [26] M. Figliozzi, "Vehicle routing problem for emissions minimization," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2197, pp. 1–7, 2010.
- [27] H. Preis, S. Frank, and K. Nachtigall, "Energy-optimized routing of electric vehicles in urban delivery systems," in *Operations Research Proceedings 2012* (S. Helber, M. Breitner, D. Rösch, C. Schön, J.-M. Graf von der Schulenburg, P. Sibbertsen, M. Steinbach, S. Weber, and A. Wolter, eds.), (Cham), pp. 583–588, Springer International Publishing, 2014.
- [28] M. Keskin and B. Çatay, "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 65, pp. 111 – 127, 2016.
- [29] U. Emeç, B. Çatay, and B. Bozkaya, "An adaptive large neighborhood search for an e-grocery delivery routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 69, pp. 109 – 125, 2016.
- [30] O. Sassi, W. R. Cherif-Khettaf, and A. Oulamara, "Iterated tabu search for the mix fleet vehicle routing problem with heterogenous electric vehicles," in *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences* (H. A. Le Thi, T. Pham Dinh, and N. T. Nguyen, eds.), (Cham), pp. 57–68, Springer International Publishing, 2015.
- [31] J. Yang and H. Sun, "Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles," *Computers & Operations Research*, vol. 55, pp. 217 – 232, 2015.
- [32] J. Hof, M. Schneider, and D. Goetze, "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an avns algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 97, pp. 102 – 112, 2017.

- [33] R. G. Conrad and M. Figliozzi, "The recharging vehicle routing problem," in *Proc. of the 61st Annual Conference and Expo of the Institute of Industrial Engineers*, May 2011.
- [34] S. Erdođan and E. Miller-Hooks, "A green vehicle routing problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, no. 1, pp. 100 – 114, 2012. Select Papers from the 19th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- [35] E. A. Grunditz and T. Thiringer, "Performance analysis of current bevs based on a comprehensive review of specifications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, pp. 270–289, Sept 2016.
- [36] Zach, "10 electric cars with most range — new!," 2017. Pristupljeno: 23. ožujak 2018.
- [37] J. van Duin, L. Tavasszy, and H. Quak, "Towards e(lectric)- urban freight: first promising steps in the electric vehicle revolution," 2013.
- [38] W. Feng and M. Figliozzi, "An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the usa market," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 26, pp. 135 – 145, 2013.
- [39] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, *Electric Vehicle Battery Technologies*. Springer, 2013.
- [40] DPDHL, "Electric vehicles in inner city distribution traffic," 2014. Pristupljeno: 15. prosinac 2017.
- [41] UPS, "Ups to rollout fleet of electric vehicles in california," 2013. Pristupljeno: 15. prosinac 2017.
- [42] S. Pelletier, O. Jabali, and G. Laporte, "50th anniversary invited article—goods distribution with electric vehicles: Review and research perspectives," *Transportation Science*, vol. 50, no. 1, pp. 3–22, 2016.
- [43] D. Margaritis, A. Anagnostopoulou, A. Tromaras, and M. Boile, "Electric commercial vehicles: Practical perspectives and future research directions," *Research in Transportation Business & Management*, vol. 18, pp. 4 – 10, 2016. Innovations in Technologies for Sustainable Transport.
- [44] J. Lin, W. Zhou, and O. Wolfson, "Electric vehicle routing problem," *Transportation Research Procedia*, vol. 12, pp. 508 – 521, 2016. Tenth International Conference on City Logistics 17-19 June 2015, Tenerife, Spain.
- [45] J. Asamer, A. Graser, B. Heilmann, and M. Ruthmair, "Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 46, pp. 182 – 199, 2016.
- [46] J. Restrepo, J. Rosero, and S. Tellez, "Performance testing of electric vehicles on operating conditions in bogota; dc, colombia," in *2014 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T D-LA)*, pp. 1–8, Sept 2014.
- [47] C. De Cauwer, W. Verbeke, T. Coosemans, S. Faid, and J. Van Mierlo, "A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions," vol. 10, p. 608, 05 2017.
- [48] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, and S. Suraci, "A variable neighborhood search branching for the electric vehicle routing problem with time windows," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 47, pp. 221 – 228, 2015. The 3rd International Conference on Variable Neighborhood Search (VNS'14).
- [49] A. Artmeier, J. Haselmayr, M. Leucker, and M. Sachenbacher, "The shortest path problem revisited: Optimal routing for electric vehicles," in *KI 2010: Advances in Artificial Intelligence* (R. Dillmann, J. Beyerer, U. D. Hanebeck, and T. Schultz, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 309–316, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [50] E. energy consumption factors for different road types," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, p. 7, 2013.
- [51] A. B. Ellison, S. P. Greaves, and M. C. Bliemer, "Driver behaviour profiles for road safety analysis," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 76, pp. 118 – 132, 2015.
- [52] L. Rožić, J. Fosin, and T. Carić, "Solving the time dependent vehicle routing problem using real-world speed profiles," *Central European Conference on Information and Intelligent Systems, 2015*, 2015.
- [53] T. Erdelić, M. Ravlić, and T. Carić, "Travel time prediction using speed profiles for road network of croatia," in *2016 International Symposium ELMAR*, pp. 97–100, Sept 2016.
- [54] T. Erdelić, S. Vrbanić, and L. Rožić, "A model of speed profiles for urban road networks using g-means clustering," in *2015 38th International Conference on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, pp. 1081–1086, May 2015.
- [55] T. Yuksel and J. Michalek, "Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the united states," vol. 49, February 2015.
- [56] C. De Cauwer, J. Van Mierlo, and T. Coosemans, "Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data," *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 8573–8593, 2015.
- [57] X. Wu, D. Freese, A. Cabrera, and W. A. Kitch, "Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp. 52 – 67, 2015.
- [58] B. Golden, A. Assad, L. Levy, and F. Gheysens, "The fleet size and mix vehicle routing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 11, no. 1, pp. 49 – 66, 1984.
- [59] R. Baldacci, E. Bartolini, A. Mingozzi, and R. Roberti, "An exact solution framework for a broad class of vehicle routing problems," *Computational Management Science*, vol. 7, pp. 229–268, Jul 2010.
- [60] P. Toth, D. Vigo, P. Toth, and D. Vigo, *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014.
- [61] Çađrı Koç, T. Bektaş, O. Jabali, and G. Laporte, "The fleet size and mix pollution-routing problem," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 70, pp. 239 – 254, 2014.
- [62] O. Sassi, W. Ramdane Cherif-Khettaf, and A. Oulamara, "Multi-Start Iterated Local Search for the Mixed fleet Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Electric Vehicles," in *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, vol. 9026, pp. 138–149, Springer, 2015.
- [63] M. Schiffer and G. Walther, "The electric location routing problem with time windows and partial recharging," *European Journal of Operational Research*, vol. 260, no. 3, pp. 995 – 1013, 2017.
- [64] T. M. Sweda, I. S. Dolinskaya, and D. Klabjan, "Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles," *Transportation Science*, vol. 51, no. 4, pp. 1326–1348, 2017.
- [65] N. M. Moghaddam, "The partially rechargeable electric vehicle routing problem with time windows and recapitated charging stations," Master's thesis, Clemson University, Clemson, South Carolina, 2015.
- [66] A. Montoya, C. Guéret, J. E. Mendoza, and J. G. Villegas, "The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 103, pp. 87 – 110, 2017. Green Urban Transportation.
- [67] J. D. Adler and P. B. Mirchandani, "Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 70, pp. 285 – 302, 2014.
- [68] G. Laporte, "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms," *European Journal of Operational Research*, vol. 59, no. 3, pp. 345 – 358, 1992.
- [69] S. Ichoua, M. Gendreau, and J.-Y. Potvin, "Vehicle dispatching with time-dependent travel times," *European Journal of Operational Research*, vol. 144, no. 2, pp. 379 – 396, 2003.
- [70] J. F. Ehmke, A. Steinert, and D. C. Mattfeld, "Advanced routing for city logistics service providers based on time-dependent travel times," *Journal of Computational Science*, vol. 3, no. 4, pp. 193 – 205, 2012. City Logistics.
- [71] S. Shao, W. Guan, B. Ran, Z. He, and J. Bi, "Electric vehicle routing problem with charging time and variable travel time," *Mathematical Problems in Engineering*, p. 13, 2017.
- [72] E. den Boer, S. Aarnink, F. Kleiner, and J. Pagenkopf, "An overview of state-of-the-art technologies and their potential," tech. rep., Germany, 2013.
- [73] M. Bruglieri, A. Colomi, and A. Luè, "The vehicle relocation problem for the one-way electric vehicle sharing: An application to the milan case," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 18 – 27, 2014. Transportation: Can we do more with less resources? – 16th Meeting of the Euro Working Group on Transportation – Porto 2013.
- [74] R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen, and A. Kojic, "Optimal charging strategies in lithium-ion battery," in *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, pp. 382–387, June 2011.
- [75] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte, and M. Veneroni, "Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 103, pp. 158 – 187, 2017. Green Urban Transportation.
- [76] T. Zündorf, "Electric vehicle routing with realistic recharging models," Master's thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Germany, 2014.
- [77] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid

- vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 2151–2169, May 2013.
- [78] M. Bay and S. Limbourg, "Tsp model for electric vehicle deliveries, considering speed, loading and path slope." 2015.
- [79] C. Doppstadt, A. Koberstein, and D. Vigo, "The hybrid electric vehicle – traveling salesman problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 253, no. 3, pp. 825 – 842, 2016.
- [80] R. Roberti and M. Wen, "The electric traveling salesman problem with time windows," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 89, pp. 32 – 52, 2016.
- [81] M. L. Fisher, "Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees," *Operations Research*, vol. 42, no. 4, pp. 626–642, 1994.
- [82] M. I. S. Ropke, J.-F. Cordeau and D. Vigo, "Branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints," *Proceedings of ROUTE, Jekyll Island, 05 2007*.
- [83] S. Eilon, C. D. T. Watson-Gandy, N. Christofides, and R. de Neufville, "Distribution management-mathematical modelling and practical analysis," vol. 21, pp. 589 – 589, 12 1974.
- [84] F. Gheysens, B. Golden, and A. Assad, "A comparison of techniques for solving the fleet size and mix vehicle routing problem," *Operations-Research-Spektrum*, vol. 6, pp. 207–216, Dec 1984.
- [85] M. L. Balinski and R. E. Quandt, "On an integer program for a delivery problem," *Operations Research*, vol. 12, no. 2, pp. 300–304, 1964.
- [86] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points," *Operations Research*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964.
- [87] B. E. Gillett and L. R. Miller, "A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem," *Operations Research*, vol. 22, no. 2, pp. 340–349, 1974.
- [88] J. Beasley, "Route first—cluster second methods for vehicle routing," *Omega*, vol. 11, no. 4, pp. 403 – 408, 1983.
- [89] M. L. Fisher and R. Jaikumar, "A generalized assignment heuristic for vehicle routing," *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 109–124, 1981.
- [90] P. Hansen and N. Mladenović, "First vs. best improvement: An empirical study," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 154, no. 5, pp. 802 – 817, 2006. IV ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization.
- [91] P. Shaw, "Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems," in *Principles and Practice of Constraint Programming — CP98* (M. Maher and J.-F. Puget, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 417–431, Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [92] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [93] F. Glover, "Tabu search—part i," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190–206, 1989.
- [94] F. Glover, "Tabu search—part ii," *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 4–32, 1990.
- [95] N. Mladenović and P. Hansen, "Variable neighborhood search," *Computers & Operations Research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097 – 1100, 1997.
- [96] H. R. Lourenço, O. C. Martin, and T. Stützle, *Iterated Local Search: Framework and Applications*, pp. 363–397. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [97] D. Pisinger and S. Ropke, "A general heuristic for vehicle routing problems," *Computers & Operations Research*, vol. 34, no. 8, pp. 2403 – 2435, 2007.
- [98] N. Labadie, C. Prins, and C. Prodhon, *Metaheuristics for Vehicle Routing Problems*. Wiley, 2016.
- [99] S. Ropke, "Parallel large neighborhood search -a software framework," in *8th Metaheuristic International Conference CDROM*, March 2009.
- [100] V. C. Hemmelmayr, "Sequential and parallel large neighborhood search algorithms for the periodic location routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 243, no. 1, pp. 52 – 60, 2015.
- [101] O. Polat, "A parallel variable neighborhood search for the vehicle routing problem with divisible deliveries and pickups," *Computers & Operations Research*, vol. 85, pp. 71 – 86, 2017.
- [102] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.
- [103] F. Glover, "Heuristics for integer programming using surrogate constraints," *Decision Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 156–166.
- [104] M. G. Resende, C. C. Ribeiro, F. Glover, and R. Martí, *Scatter Search and Path-Relinking: Fundamentals, Advances, and Applications*, pp. 87–107. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [105] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*. A Bradford book, BRADFORD BOOK, 2004.
- [106] Y. Marinakis and M. Marinaki, *Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem*, pp. 347–369. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [107] K. Masliakova, "Optimal routing and charging procedures for electric buses," Master's thesis, The Arctic University of Norway, Narvik, Norway, 2016.