

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

Rješavanje problema usmjeravanja električnih vozila

Tin Jukić

Voditelj: *Doc. dr. sc. Marko Đurasević*

Zagreb, travanj, 2023.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Problem usmjeravanja vozila	2
2.1 Općenito o rješavanju problema	2
2.2 Metode za rješavanje VRP-a	2
2.2.1 Genetski algoritam (GA)	3
2.2.2 Umjetna neuronska mreža (ANN)	3
2.2.3 Umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom.....	4
3. Električna vozila	5
4. Motivacija	6
5. Problem usmjeravanja električnih vozila (EVRP)	7
6. Metode za rješavanje	9
6.1 Rješavanje EVRP-a koristeći ANN + GA	9
7. Zaključak.....	10
8. Sažetak	11
9. Literatura.....	12

1. Uvod

Rješavanje problema usmjeravanja vozila vrlo je kompleksan zadatak. Mogu postojati brojne opcije za koje smatramo da su optimalne u određenom kontekstu. Danas su, zbog sve veće osviještenosti o važnosti zaštite okoliša, sve popularnija električna vozila, a samim time se i, na primjer, dostavne službe počinju opskrbljivati električnim vozilima. No, kao i sve u životu, električna vozila imaju svoje prednosti i mane. U ovom radu će se govoriti o upotrebi električnih vozila za rješavanje problema usmjeravanja vozila te će se navesti koje su prednosti, a koji nedostaci upotrebe istih u ovom kontekstu. Na kraju rada će se pokušati donijeti zaključak o isplativosti prelaska na električna vozila.

2. Problem usmjeravanja vozila

2.1 Općenito o rješavanju problema

Problem usmjeravanja vozila (eng. *Vehicle Routing Problem*, VRP) je vrsta problema kojim se nastoji kao rezultat dobiti put kojim vozila moraju obići korisnike. Svaki VRP problem ima dvije vrste čvorova: čvor izvorište i čvorove korisnike. Uz čvorove, VRP sadrži još i vozila s određenim karakteristikama, kojima obilazi korisnike. Prilikom rješavanja problema usmjeravanja električnih vozila, dodat će se još jedna vrsta čvora u problem: čvor punionica vozila. Glavna pretpostavka VRP-a je da su sva vozila koja imamo na raspolaganju jednaka. Također, sva vozila bi trebala imati neograničeni doseg. To u slučaju rješavanja problema usmjeravanja električnih vozila, zbog karakteristika tih vozila, nije moguće te će se za taj problem pretpostaviti određeni doseg, koji će za sva vozila biti jednak. Cilj rješavanja VRP problema je obići sve korisnike krenuvši iz čvora izvorišta. Postoje razna ograničenja kod VRP-a te stoga postoje i brojne varijante ovog problema, kao što su VRP s vremenskim prozorom (VRPTW), VRP s ograničenim kapacitetom automobila (CVRP), VRP s više izvorišta te brojne druge. U ovom radu fokus će biti na EVRP varijanti (problem usmjeravanja električnih vozila).

Budući da vozila VRP algoritam obilaze korisnike, kao izlaz algoritma dobije se put. Algoritam teži pronalasku optimalnog puta, međutim, u slučaju da se ne može pronaći optimalni put, algoritam pokušava pronaći najbolji mogući put. U osnovnoj verziji problema, algoritam mora obići sve korisnike, dok u inačicama to ne mora uvijek biti moguće (npr. u EVRP-u, zbog ograničenja električnih vozila, algoritam ne mora nužno moći obići sve korisnike). VRP je vrlo kompleksan problem te se za njegovo rješavanje koriste razni algoritmi strojnog učenja. Dva najčešće korištena algoritma za rješavanje ovakvog tipa problema su genetski algoritam (GA) te umjetna neuronska mreža (ANN). Ova dva modela omogućuju treniranje modela te pronalazak optimalnog, ili u najgorem slučaju najboljeg mogućeg puta kojim bi vozila trebala obilaziti korisnike. Najbolji put ovisi upravo o instanci VRP-a koju rješavamo te o ograničenjima koja, kako je prethodno navedeno, mogu biti razna. Na primjer, kod EVRP-a jedno od ograničenja je domet vozila.

2.2 Metode za rješavanje VRP-a

VRP problem je vrlo kompleksan. Kompleksnost se najviše očituje u tome što broj rješenja raste ekponencijalno te se sva moraju ispitati, kako bi se pronašlo optimalno rješenje. Stoga, algoritmi za rješavanje ovog problema trebaju moći pronaći najbolje moguće rješenje za konkretnu instancu problema i za njegova ograničenja. Upravo iz tog razloga se za rješavanje ovog problema koriste metode strojnog učenja, kao što su GA i ANN.

U nastavku rada će ukratko biti objašnjenje dvije popularne metode za rješavanje ovog problema.

2.2.1 Genetski algoritam (GA)

Vrlo popularan algoritam za rješavanje problema koji zahtijevaju neki oblik optimiranja je genetski algoritam, koji je heuristička metoda optimiranja. Temelji se na istraživanju biologa Charlesa Darwina o prirodnoj evoluciji. Kompletan ideja iza ovog algoritma se temelji na pretpostavci preživljavanja najboljih jedinki („survival of the fittest”) te na prirodnoj selekciji. Jedinke koje su opstale koriste se kao osnova za stvaranje novih jedinki za iduću generaciju.

Najmanja jedinica ovog algoritma je jedinka, koja se sastoji od kromosoma. Svaka jedinka predstavlja neko konkretno rješenje promatranog problema.

Svaki genetski algoritam sastoji se od 5 faza rada:

1. Inicijalizacija početne populacije,
2. Funkcija dobrote,
3. Faza selekcije,
4. Križanje,
5. Mutacija.

Na kraju rada ovog algoritma, dobije se jedinka koja najbolje rješava konkretni problem sa zadanim parametrima.

2.2.2 Umjetna neuronska mreža (ANN)

Umjetna neuronska mreža (ANN) je model strojnog učenja koji se temelji na izgledu i funkcioniranju ljudskog mozga. Stoga, kao i prethodno opisani genetski algoritam, ANN također inspiraciju pronalazi u živim bićima.

Najmanja građevna jedinica svake neuronske mreže je neuron. Kao i kod genetskog algoritma, neuroni moraju imati neke ulazne parametre (težine), koji se u ovom kontekstu nazivaju hiperparametrima. Svaki neuron dodatno daje i određeni izlaz te sadrži funkciju aktivacije. Neuronska mreža nastoji kompleksni problem rastaviti na manje dijelove, čime se ubrzava njegovo rješavanje. Neuroni unutar umjetne neuronske mreže su međusobno povezani u slojevima mreže. Također, neuroni u skrivenom sloju sadrže funkciju aktivacije.

Svaka neuronska mreža sastoji se od 3 vrste slojeva:

1. Ulazni sloj (input layer),
2. Skriveni sloj (hidden layer) – jedan ili više njih,
3. Izlazni sloj (output layer) – sadrži neku funkciju aktivacije (ovisno o problemu).

Kada umjetna neuronska mreža završi s radom, dobije se ona mreža koja najbolje rješava neki problem sa zadanim parametrima.

2.2.3 Umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom

Neuronska mreža omogućuje vrlo dobro učenje modela i dobivanje kvalitetnih rješenja. Međutim, javlja se problem optimizacije njenih hiperparametara, koji predstavljaju vrijednosti težina umjetne neuronske mreže. Naime, problem je odabrati „prave” hiperparametre, odnosno, one hiperparametre koji najbolje rješavaju zadani problem. Tome se može doskočiti korištenjem genetskog algoritma za optimizaciju hiperparametara neuronske mreže.

Konceptualno, ideja umjetne neuronske mreže potpomognute genetskim algoritmom je vrlo jednostavna. Koriste se dva modela za treniranje: neuronska mreža, koja se koristi za rješavanje zadanog problema, te genetski algoritam, koji se koristi prilikom izbora hiperparametara neuronske mreže.

Umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom radi na način da se stvori nekoliko modela neuronskih mreža sa slučajno odabranim hiperparametrima te se one dalje treniraju genetskim algoritmom. Neuronske mreže se na kraju ocjenjuju uz pomoć funkcije dobrote. Zatim se, slično genetskom algoritmu, uzimaju dvije najbolje neuronske mreže te se stvaraju nove neuronske mreže, koje ulaze u iduću iteraciju algoritma.

3. Električna vozila

Ljudi današnjice su sve osvješteniji o važnosti zaštite okoliša. Kako je Europska unija donijela zakon o prestanku proizvodnje automobila s motorima s unutarnjim izgaranjem goriva, auto-kompanije su se morale okrenuti alternativnim pogonima svojih proizvoda.

Postoji nekoliko alternativnih pogona, a neki od poznatijih su: pogon na vodik (predvodi Toyota) te pogon na sintetička goriva (predvodi Porsche), ali najpoznatiji i danas najzastupljeniji alternativni pogon za vozila su električna vozila (eng. *electric vehicles*, EVs).

Danas se sve više autoindustrija okreće električnim vozilima, što govori i podatak da skoro svaki današnji proizvođač automobila ima barem jednu verziju električnog automobila u ponudi (naravno, izuzetci postoje).

Najveća prednost električnih automobila upravo je izostanak motora s unutarnjim izgaranjem goriva. Zbog toga, električna vozila ostvaruju nula-emisija (zero-emissions) prilikom vožnje, što ih čini izuzetno ekološki prihvatljivima. Uz to, imaju mogućnost regenerativnog punjenja prilikom kočenja te su prilikom vožnje skoro pa u potpunosti nečujni. Također, električna vozila nemaju „lag“ prilikom pritiskanja gasa te svu svoju snagu mogu isporučiti odmah.

Jedan od danas najvećih i najpopularnijih proizvođača električnih automobila je Tesla.

No, električna vozila nisu bez svojih nedostataka. Prvo se nailazi na problem čistoće izvora električne energije te problem odlaganja starih baterija. Dosta aktualan problem električnih vozila je domet, koji se na modernim vozilima dosta povećao te problem brzine punjenja vozila (puno dulje nego punjenje rezervoara „klasičnog“ vozila). Također, vezano uz punjenje i domet električnih vozila, nailazimo na problem punionica električnih automobila, kojih još uvijek nema puno, a u nekim područjima ih uopće i nema. Dodatno, električna vozila imaju i smanjen kapacitet koji stane uz njih, zbog baterija koje se nalaze u njima.

4. Motivacija

Kako se povećala svijest o važnosti zaštite okoliša te se povećao izbor električnih vozila, sve više kompanija (dostavnih službi i slično) također se okreću električnim vozilima. Prednosti za njih su brojne, od poreznih olakšica zbog zero-emissions karakteristika električnih vozila, do porasta cijene goriva zbog trenutne svjetske situacije. Kako se povećao broj električnih vozila koja sadrže te firme, tako se pojavila i nova grana problema usmjeravanja vozila, bazirana na električnim vozilima.

Kao što je već rečeno u prethodnom poglavlju, jedan od najvećih nedostataka električnih automobila je vrijeme punjenja, koje je, u usporedbi s punjenjem automobila s motorima s unutarnjim izgaranjem, osjetno dulje. Drugi veliki nedostatak električnih vozila, pogotovo u usporedbi s vozilima pokretanim dizelskim gorivom je domet, koji je puno kraći te za dostavne službe može stvoriti veliki problem. Uz to, nailazimo na problem punionica za ta vozila.

Upravo zbog ova dva nedostatka se pojavila nova grana problema usmjeravanja vozila, problem usmjeravanja električnih vozila (EVRP).

5. Problem usmjeravanja električnih vozila (EVRP)

Problem usmjeravanja električnih vozila (EVRP) je grana skupine problema usmjeravanja vozila. Pretpostavka ove instance je da se flota vozila sastoji od električnih vozila. Razlog nastanka ove nove grane sve je veća popularnost električnih vozila u današnje doba, zbog raznih prednosti. Ali, kao i sve na svijetu, električna vozila imaju i svoje nedostatke. Ova grana VRP-a pokušava pronaći optimalan put, ali pritom pazeći na bitne značajke električnih vozila.

Jedan od najvećih problema, kako je prethodno rečeno, je problem dometa i punjenja ovih vozila. Električna vozila imaju puno manji domet i puno dulje vrijeme punjenja nego vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem. Upravo zbog ta dva glavna problema pojavila se nova inačica VRP-a.

Glavna razlika između EVRP-a i ostalih inačica VRP-a je u tome što se kod ostalih inačica VRP-a pretpostavlja da je domet vozila neograničen. Kod EVRP-a, zbog problema s punjenjem i dometom električnih vozila, to se ne smije pretpostaviti te EVRP ima još, kao dodatnu varijablu, kapacitet vozila, za koji se pretpostavlja da je za sva vozila jednak (jer su po definiciji VRP problema sva vozila jednaka).

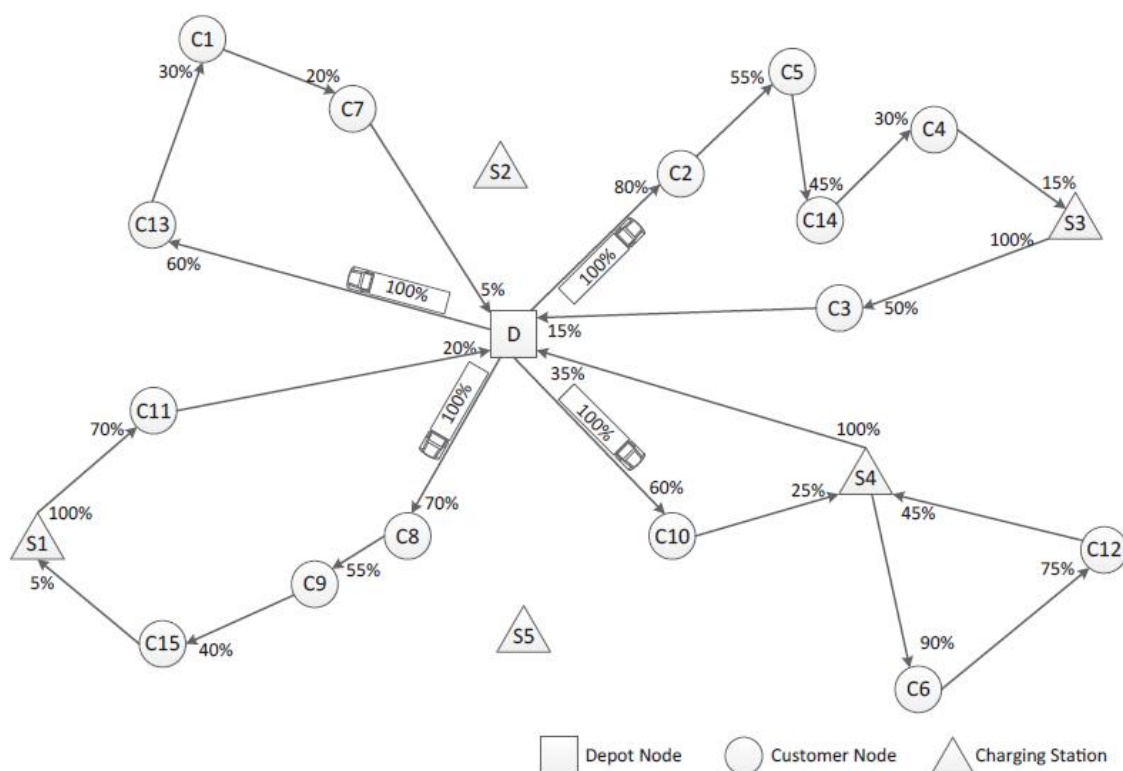
Problem usmjeravanja električnih vozila ima također dodatne varijante, koje su karakteristične za njega. Neke od njih su pronalazak puta uz najmanji utrošak električne energije vozila, heterogena ili pomiješana flota vozila, korištenje hibridnih vozila (vozila koja sadrže i električni motor i motor s unutarnjim izgaranjem, mogu biti i plug-in hibridi), vozila se ne moraju napuniti u potpunosti (do 100% kapaciteta baterije vozila), nego se mogu puniti samo djelomično (npr. samo u rasponu u kojem je punjenje vozila najbrže), mogu se koristiti druge tehnologije punjenja, punjenje prema rasporedu te druge varijante problema. Više o EVRP-u može se pronaći u znanstvenim radovima [*A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches*](#) i [*The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations*](#).

Glavni cilj je, kao što je to cilj svakog rješavanja problema usmjeravanja vozila, pronaći najbolji mogući put s nekim karakteristikama, koje korisnici postavljaju. No, sada je potrebno uvesti još jedno dodatno ograničenje: domet vozila, odnosno, udaljenost koju vozilo može prijeći s trenutnim raspoloživim kapacitetom napunjenosti baterije. Na primjer, za rješavanje CVRP-a sada je potrebno, uz dosadašnje maksimalno iskorištavanje kapaciteta vozila, potrebno paziti i na domet vozila.

U EVRP problem uvode se dodatni čvorovi: punionice. Njih nema puno i pretpostavlja se da nemaju svi korisnici jednaku količinu punionica u svojoj blizini. Može se dogoditi da korisnici nemaju niti jednu punionicu u svojoj blizini.

Dodatno, vozilo ne mora moći do svakog korisnik doći bez punjenja, čak i ako je taj korisnik prvi korisnik kojeg vozilo obilazi te je broj punjenja proizvoljan. Rubni slučaj koji se može dogoditi je da električno vozilo ni na koji način ne može obići odabrani čvor te se u tom slučaju posao obilaska tog čvora delegira vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem.

Najveći izazov kod rješavanja ovog problema predstavlja punjenje vozila. Naime, ako ne pazimo na pravilno punjenje vozila, može se dogoditi da vozilo ostane bez energije i da ne možemo doći niti do idućeg čvora, niti do punionice, niti do izvorišta (depot). Zbog toga je bitno paziti na pravilna punjenja vozila te „gledati unaprijed“ koje čvorove obilaziti, pazeći pritom na udaljenost do korisnika i do prve punionice od njega u odnosu na dostupni domet vozila te u skladu s tim, odlučivati kojeg korisnika idućeg posjetiti, ako i jednoga tim vozilom.



Slika 1. Prikaz jednog od mogućih rješenja EVRP-a, slika preuzeta iz rada [*The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review*](#)

6. Metode za rješavanje

Metode za rješavanje problema usmjeravanja električnih vozila ekvivalentne su metodama za rješavanje problema usmjeravanja vozila. Prilikom rješavanja ovog problema, vrlo često su upotrebljavani prethodno opisani genetski algoritam, umjetna neuronska mreža te umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom, kao kombinacija prethodna dva modela.

Kao rezultat rješavanja ovog problema dobije se optimalni put za obilazak čvorova. Dodatno bi se moglo dodati i ispisivanje koliko puta je bilo potrebno puniti vozila te koliko je korišteno vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (jer se neki korisnici nisu mogli običi koristeći električna vozila – rubni slučaj). Također, algoritam može prikazati i količinu vremena koja je potrošena na punjenje vozila. To vrijeme je bitno zbog novčanih razloga, ne samo zbog cijene električne energije koja se troši za punjenje vozila, nego i zbog toga što u stvarnom životu, više potrošenog vremena odmah znači i veći trošak, odnosno manji prihod.

6.1 Rješavanje EVRP-a koristeći ANN + GA

Prilikom rješavanja problema usmjeravanja vozila, najčešće se koristi lokalna pretraga, gdje se pronalazi inicijalno rješenje te se ono iterativno poboljšava. No, postoje i drugi algoritmi za rješavanje tog problema. Jedan vrlo pogodan algoritam za rješavanje VRP-a je ANN + GA (umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom). Razlog toga je relativno lako treniranje i implementiranje, a dobiju se vrlo pogodni rezultati.

Za rješavanje ECVRP-a (kapacitivno rješavanje problema usmjeravanja električnih vozila) potrebno je podesiti nekoliko hiperparametara u neuronskoj mreži, koja se zatim trenira uz pomoć genetskog algoritma. Algoritam nastoji pronaći onaj put koji maksimizira iskorištenost kapaciteta odabranog vozila, minimizira udaljenost (odnosno, trudi se odabrati najbližeg korisnika, taj je problem riješen korištenjem umjetne neuronske mreže potpomognute genetskim algoritmom u [seminarskom radu](#)) te pritom, kao dodatno ograničenje, mora paziti na domet vozila, kako vozilo ne bi „zaglavilo“ (ranije objašnjeno).

Neuronsku mrežu je zatim potrebno istrenirati na raznim ulaznim podacima za treniranje te potom, dobiveno najbolje moguće rješenje, testirati na skupu podataka za testiranje.

Rezultat ovog algoritma je model koji bi trebao dobro moći odrediti optimalnu rutu za vozila i čvorove, a da pritom pazi na navedena ograničenja, čak i za neviđene čvorove.

7. Zaključak

Rješavanje problema usmjeravanja električnih vozila (EVRP) danas je sve bitnija inačica problema usmjeravanja vozila, zbog sve veće popularnosti električnih vozila. Korištenjem algoritma umjetne neuronske mreže potpomognute genetskim algoritmom dobije se model koji daje najbolji mogući put obilaska čvorova. Na taj način omogućena je usporedba korištenja električnih vozila u odnosu na vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem za konkretni problem. To omogućuje usporedbu prednosti i mana korištenja električnih vozila te se uz pomoć te usporedbe može donijeti odluka isplati li se uopće koristiti električna vozila ili ne.

Ta je usporedba vrlo bitna u stvarnom životu, zato što ona omogućuje firmama (npr. dostavnim službama) da odluče jesu li im potrebna električna vozila te, ako jesu, koliko im ih je potrebno.

Električna vozila imaju brojne prednosti u usporedbi s „klasičnim“ vozilima, ali imaju i brojne mane te stoga, u ovom trenutku, potpuni prelazak na električna vozila nije moguć. Rješavanje ovog problema nam upravo govori o tome u kojoj mjeri se može prijeći na električna vozila te kada je potrebno koristiti vozila s motorima s unutarnjim izgaranje. Nadalje, rješavanje EVRP-a nam još daje uvid u problematiku dometa i punjenja električnih vozila te nam govori o vremenskom trošku prilikom punjenja vozila, koje košta, ne samo zbog potrošnje električne energije, nego i zbog vremena potrebnog za punjenje vozila.

8. Sažetak

Električna vozila postaju važan dio današnjeg života. Sve više se prelazi na njih te je stoga potrebno prilagoditi algoritme rješavanja problema usmjeravanja vozila njima. Postoje brojni modeli za rješavanje problema usmjeravanja vozila, a dva vrlo često korištena modela su genetski algoritam i umjetna neuronska mreža. Električna vozila nisu bez svojih nedostataka te je u algoritme koji rade s njima potrebno „uvesti“ glavne nedostatke korištenja takvih vozila i eliminirati ih, ili barem smanjiti njihov utjecaj na krajnji rezultat algoritma. Dva najveća problema korištenja električnih vozila su domet i vrijeme punjenja. Algoritmi trebaju dati najbolji mogući put obilaska čvorova i model koji, za neviđene čvorove, daje također najbolji mogući put obilaska čvorova, koji ne mora biti optimalan.

9. Literatura

- [1] *Rješavanje problema usmjeravanja vozila korištenjem neuronskih mreža*, Tin Jukić (2022)
- [2] *A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches*, Tomislav Erdelić, Tonči Carić (2019)
- [3] *The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review*, Ilker Kucukoglu, Reginald Dewil, Dirk Cattrysse (2021)
- [4] *The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations*, Michael Schneider, Andreas Stenger, Dominik Goeke (2014)