

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
5.1 Cilj rješavanja eVRP-a	7
6. Metode za rješavanje	8
6.1 Rješavanje eVRP-a koristeći ANN + GA.....	8
7. Zaključak	9
8. Sažetak	10
9. Literatura	11

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

VRP (Vehicle Routing Problem) jedan je od najčešće rješavanih optimizacijskih problema. VRP problem sastoji se od čvorova. Svaka instanca ima čvor izvorište, čvorove korisnike te vozila. Prilikom rješavanja ovog problema, vodimo se pretpostavkom da su svi automobili identični te da svaki automobil na raspolaganju ima neograničenu količinu goriva, odnosno da mu je doseg neograničen. Svi automobili kreću iz čvora izvorišta te dalje obilaze čvorove korisnike, sve dok se ne dosegnu ograničenja. Ograničenja mogu biti razna te upravo zbog toga postoje i brojne varijante ovog problema, npr. VRP s vremenskim prozorom (VRPTW), VRP s ograničenim kapacitetom automobila (CVRP), VRP s više izvorišta te brojne druge.

Rješenje VRP problema je put, kojim vozila moraju obići korisnike. Kako postoji više putova kojima je moguće obići korisnike, postavlja se pitanje koji od njih je optimalan te kako ga pronaći. Zbog kombinatorne kompleksnosti ovog problema, za njegovo rješavanje se često koriste metode strojnog učenja. Za implementaciju VRP problema često se koriste umjetne neuronske mreže (ANN) i genetski algoritam (GA). Oni omogućuju treniranje modela te pronalazak optimalne rute kojom bi se automobili trebali kretati, kako bi troškovi bili što manji. Troškovi također mogu biti razni, npr. u slučaju VRPTW-a, trošak je vrijeme te algoritam teži utrošiti što je manje moguće vremena za obilazak korisnika, kod CVRP-a trošak je kapacitet te se algoritam trudi što je bolje moguće iskoristiti kapacitet danog automobila te time minimizirati trošak, te brojni drugi. Valja napomenuti da se troškovi mogu međusobno kombinirati. Tako npr. algoritam može težiti maksimalnom iskorištenju kapaciteta automobila i pritom minimizirati prijedeni put.

Svaki VRP problem ima definirano koliko vozila ima na raspolaganju te nije nužno iskoristiti sve automobile. Također se može dogoditi da ne postoji put kojim bi algoritam uspio obići sve korisnike.

2.2 Metode za rješavanje VRP-a

Kao što je već ranije navedeno, rješenje VRP problema nije jedinstveno, odnosno može postojati više rješenja. Također, rješenja ne moraju biti jednako kvalitetna te je cilj naći najbolje, odnosno optimalno rješenje konkretnog problema. Zato je za rješavanje ovakvih problema pogodno koristiti algoritme strojnog učenja. Jedan od danas češće korištenih algoritama za rješavanje ovog problema su umjetne neuronske mreže.

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

2.2.1 Genetski algoritam (GA)

Genetski algoritam (GA) heuristička je metoda optimiranja. Ideja iza ovog algoritma, kako samo ime kaže, dolazi iz prirode. Ovaj algoritam je inspiriran istraživanjem biologa Charlesa Darwina o prirodnoj evoluciji. Glavni temelj ovog algoritma je pretpostavka o prirodnoj selekciji i preživljavanju samo najboljih jedinki („survival of the fittest“). Jedinke koje su preživjele daju potomke za iduću generaciju.

Temeljna jedinica kod rada s ovim algoritmom je jedinka. Svaka jedinka se sastoji od kromosoma. Kromosom je matrica koja se sastoji od svojstava, odnosno gena, vezanih uz nju. Geni su najčešće predstavljeni najčešće decimalnim vrijednostima u rasponu između 0 i 1 i često se još nazivaju težinama.

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 također, kao i genetski algoritam, inspiraciju nalazi u živim bićima. Naime, neuronska mreža temelji se na izgledu i funkcioniranju ljudskog mozga.

Najmanja građevna jedinica kod neuronske mreže je neuron, koji, baš kao i ljudski neuroni, prima neke informacije (kod živih organizama su to podražaji, ovdje su to brojevni ulazi - hiperparametri) i daje određeni izlaz. Ideja je da se rješavanje kompleksnog problema razdvoji na manje pod probleme, kako bi se ubrzalo njegovo rješavanje. Neuroni kod umjetne neuronske mreže su međusobno povezani (kao i kod živih organizama) u različitim slojevima mreže, koji se nazivaju čvorovima.

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 ovaj algoritam završi s radom, dobije se ona mreža koja najbolje rješava neki problem sa zadanim parametrima.

2.2.3 Umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom

Možda jedno od najvećih ograničenja umjetnih neuronskih mreža su hiperparametri (Hyperparameters), koji su zapravo vrijednosti težina koje neuronska mreža zahtijeva kako bi mogla riješiti zadani problem. Problem predstavlja dobar izbor hiperparametara. Kako bi se riješilo ovo ograničenje neuronskih mreža, napravljen je novi algoritam učenja neuronske mreže: umjetna neuronska mreža potpomognuta genetskim algoritmom.

Ideja ovog pristupa je napraviti kombinaciju neuronske mreže i genetskog algoritma. Neuronska mreža se koristi za rješavanje zadanog problema, dok se genetski algoritam koristi kako bi se mogle računati nove težine za pojedine slojeve neuronske mreže. Na taj se način omogućuje izmjena težina i traženje rješenja koja bolje opisuju zadani problem.

Prilikom ovog pristupa rješavanju, potrebno je stvoriti nekoliko modela neuronskih mreža koje imaju različite hiperparametre (težine). One se zatim pokreću (istovremeno ili jedna po jedna) te se, nakon što završe s radom, neuronske mreže ocjenjuju, uz pomoć funkcije dobrote. Zatim se uzima nekoliko najboljih neuronskih mreža, kako bi se izračunale nove težine za neuronske mreže koje nastaju iz dvije prethodno izabrane neuronske mreže.

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 je upravo nedostatak motora s unutarnjim izgaranjem goriva. Zbog toga, električni automobili 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 automobila (puno dulje nego punjenje rezervoara „klasičnog“ automobila). 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) se također 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 je sve 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 se pojavila 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, se to ne smije pretpostaviti te eVRP ima još, kao dodatnu varijablu, domet vozila, za koji se pretpostavlja da je za sva vozila jednak (jer su po definiciji VRP problema sva vozila jednaka).

5.1 Cilj rješavanja eVRP-a

Glavni cilj je, kao što je to cilj svakog rješavanja problema usmjeravanja vozila, je pronaći optimalan put s nekim karakteristikama, koje korisnici postavljaju. No, sada je potrebno uvesti još jedno dodatno ograničenje: domet vozila. Na primjer, za rješavanje CVRP-a je sada potrebno, uz dosadašnje maksimalno iskorištavanje kapaciteta vozila, potrebno paziti i na domet vozila.

U eVRP problem se uvode dodatni čvorovi: punionice. Njih nema puno i pretpostavlja se 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.

6. Metode za rješavanje

Metode za rješavanje problema usmjeravanja električnih vozila su ekvivalentne metoda za rješavanje problema usmjeravanja vozila. Najčešće 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

Vjerojatno najpogodniji 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. Na primjer, mogu se podesiti 3 hiperparametra: kapacitet, udaljenost i domet. 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 optimalno 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) je danas 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 optimalan put obilaska čvorova (ili put koji je dovoljno blizu optimalnom). Na taj je način omogućena usporedba prilikom korištenja električnih vozila i vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem. 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 najkorištenija 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 optimalni put obilaska čvorova i model koji, za neviđene čvorove, daje također optimalan put obilaska čvorova (ili put koji je što bliže optimalnom).

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)