

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 .....	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**

VRP (Vehicle Routing Problem) 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 te automobile. 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 neki 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 VRP algoritam obilazi korisnike, kao rješenje rada toga 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. Također, zbog raznih ograničenja, algoritam ne mora 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 ograničenja, kako je prethodno navedeno, ograničenja mogu biti razna. Na primjer, kod eVRP-a jedno od ograničenja je domet vozila i blizina punionice.

### **2.2 Metode za rješavanje VRP-a**

VRP problem je vrlo kompleksan. Kompleksnost se najviše očituje u tome što može postojati više rješenja. 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. Kompletna ideja iza ovog algoritma se temelji na pretpostavci preživljavanja samo najboljih jedinki („survival of the fittest”) te na prirodnoj selekciji. Jedinke koje su opstale se koriste kao osnova za stvaranje novih jedinki za iduću generaciju.

Najmanja jedinica ovog algoritma je jedinka, koja se sastoji od kromosoma. Kromosom sadrži težine trenutne jedinke, koje se koriste prilikom rada algoritma.

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, koje nazivamo 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**

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 modela: neuronska mreža za rješavanje zadanog problema te genetski algoritam za rješavanje problema izbora hiperparametara 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 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).

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%), 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.

### 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)