

# OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

---

Kandidat:

**Emir Žunić**

**Magistar elektrotehnike - diplomirani inženjer elektrotehnike, odsjek automatika**

Prijedlog teme doktorske disertacije (projekta):

**Novi pristup rješavanja problema rutiranja vozila velike dimenzionalnosti  
zasnovan na hibridnom, adaptivnom, podacima vođenom algoritmu**

**A new approach for solving large-scale vehicle routing problems based on  
hybrid, adaptive, data-driven algorithm**

1	Uvod i opis problema .....	2
2	Pregled stanja u oblasti istraživanja.....	4
2.1	Homogeni problem optimizacije transportnih ruta.....	4
2.2	Heterogeni problem optimizacije transportnih ruta .....	4
2.2.1	Grupe heterogenih problema optimizacije transportnih ruta.....	5
2.3	VRP sa praktičnom primjenom .....	7
2.4	Pristupi rješavanja VRP problema.....	9
2.5	Podešavanje parametara VRP algoritama .....	10
3	Motivacija za istraživanje .....	14
4	Cilj istraživanja .....	16
5	Metode i plan istraživanja.....	17
6	Očekivani izvorni naučni doprinos .....	19
7	Literatura.....	20

Sarajevo, septembar 2017.

# 1 Uvod i opis problema

Problem optimizacije transportnih ruta i optimalnog iskorištavanja transportne flote se još od davnina istražuje i konstantno usavršava. Mnoštvo je algoritama, principa i pristupa razvijeno na ovu temu, ali su isti većinom ispitani i testirani na laboratorijskim podacima i uvjetima. Da bi bilo koji naučni poduhvat imao svoju punu moć trebalo bi ga na adekvatan način primijeniti u praktičnim i realnim uvjetima. Na osnovu detaljne analize dostupne literature koja će biti predstavljena u narednom poglavlju, većina dostupnih naučnih radova na ovu temu su neiskoristivi u praktične svrhe. Manji broj radova koji bi se uz mnoštvo modifikacija i mogao primijeniti u praksi također zanemaruju mnoge bitne činjenice bez kojih bi i tako realizirani praktični sistem bio faktički neupotrebljiv. Mnogo činjenica ide tome u prilog, prije svega od broja kupaca (isporučnih mjesta, mušterija) koje je potrebno opslužiti, pa zatim od toga da li se roba krajnjim kupcima prodaje/isporučuje na nivou paketa i/ili komada što direktno utiče na način spremanja robe i punjenja vozila, preko raznih prirodnih ograničenja poput činjenice da se određeni kupci nerijetko moraju opslužiti istim vozilom zbog temperaturnih ili drugih uvjeta vozila, pa do realnog trajanja istovara robe na isporučnim mjestima, zakonskim ograničenjima o maksimalnoj dužini rada određenog vozila i vozača, i još mnogo toga.

Za mnoge kompanije koje se bave proizvodnjom i/ili prodajom različitih proizvoda, troškovi prevoza obuhvataju veliki procenat ukupnih troškova kompanije. Neke procjene iz relevantne dostupne literature ukazuju na činjenicu da na ovakve troškove otpada i do 30 % ukupnih izdataka u određenim granama privrede. S tim u vezi, svaka ušteda na polju transporta ima veliki pozitivan efekat na poslovanje kompanije. Ukoliko se u obzir uzme i činjenica da bi se transportna flota mogla vremenom i unaprijediti i maksimalno prilagoditi potrebama kompanije korištenjem raznih simulacionih pokazatelja koji bi bili dio implementiranog sistema, što direktno utiče i na samu strategiju razvoja, navedene uštede mogu biti i znatno veće. Rezultat istraživanja bi se mogao upravo tako i definisati: realizirati praktično primjenljiv hibridni, podacima vođen, algoritam koji će u obzir uzeti što je moguće više realnih ograničenja, biti u mogućnosti da se konstantno adaptira, poboljšava i usavršava, a da kao rezultat obezbijediti značajne novčane uštede za kompaniju koja će ga i koristiti.

Novi pristup optimizacije transportnih ruta zasnovan na hibridnom, podacima vođenom, adaptivnom algoritmu bi se ukratko mogao opisati na sljedeći način: *za dati skup kupaca (isporučnih mjesta), te definirana raspoloživa vozila, potrebno je odrediti koje vozilo će odvesti robu do kojeg kupca, i kojim redoslijedom će to učiniti, poštujući pri tome sva realna i praktična ograničenja vozila, vozača, zahtjeve svakog od kupaca, te ograničenja mogućih ruta, pri čemu je potrebno minimizirati ukupni trošak isporuke. Na taj način se dobiva optimalni skup ruta. Optimalni skup ruta će također uzimati u obzir i izuzetno bitne historijske podatke koji će se na adekvatne načine inkorporirati u hibridni novorealizirani algoritam. Slobodno rečeno, ovako dobiveni algoritam optimizacije transportnih ruta će biti u mogućnosti da „uči“ i vremenom postaje sve bolji.*

Mnogo pažnje se u nauci, a i u praksi, posvećuje problemu optimizacije transportnih ruta, ili kako se još naziva problemu rutiranja vozila. Problem rutiranja vozila je ime za čitavu klasu problema u kojima se traži optimalna putanja (ruta) kojom bi transportno vozilo ili više njih (pri čemu se jedno vozilo može koristiti više puta u toku jednog rutiranja) obišli zadati broj kupaca (isporučnih mjesta) polazeći iz centralnog skladišta (depoa), te bi se po završetku opsluživanja kupaca vozila vratila u centralno skladište. Pod optimalnom putanjom se prije svega misli na onu sa minimalnom cijenom troškova puta koji se

obide. Ovakvi problemi optimizacije postaju izuzetno kompleksni ukoliko se u razmatranje uzme veliki broj kupaca koje je potrebno opslužiti. Ako je broj kupaca veći od 100, što je izuzetno često u realnim situacijama, tada dati problemi poprimaju atribut velike dimenzionalnosti. Ako se tome pridodaju i realna ograničenja poput vremenskih prozora kupaca, vremena istovara robe, načina pakiranja robe u vozila, mnoga ograničenja kupaca i vozila, onda ti problemi postaju pravi izazov za rješavanje. Upravo navedeni pokazatelji drastično smanjuju broj dostupnih algoritama koji bi se mogli primijeniti na analiziranom setu podataka. Zbog toga se planira u sklopu disertacije uraditi implementacija algoritma sa dva različita pristupa. Jedan je da se problem optimizacije riješi egzaktno, a drugi je kombinacija poznatih heurističkih algoritama. Oba pomenuta pristupa će biti prilagođena praktičnim uvjetima i ograničenjima rutiranja vozila. Pristup koji bude pokazao bolje performanse će biti doraden do mjere kreiranja novog hibridnog algoritma za primjenu u realnim uvjetima optimizacije transportnih ruta. Realizirani algoritam će uključivati i analizu dostupnih historijskih podataka o narudžbama, isporukama, kupcima, GPS trajektorijama i vrijednostima parametara algoritma. te na osnovu adekvatnih *data mining* i/ili statističkih metoda zaključivanja i učenja dati dodatnu snagu cjelokupnom rješenju, kako bi isto bilo što optimalnije, a ujedno i u potpunosti upotrebljivo sa strane praktične primjene. Navedenim koracima će algoritam dobiti epitete adaptivni (eng. *Adaptive*) i podacima vođen (eng. *Data-driven*).

Disertacija će pored teorijske analize ponuditi i implementaciju pomenutih koncepata i novog hibridnog adaptivnog algoritama, te analizirati mogućnosti primjene istih na realni problem iz domena optimizacije transportnih ruta srednjih i velikih distribucijskih kompanija. Svaki od realiziranih i opisanih pristupa će inicijalno biti testiran na standardiziranim uzorcima podataka (*benchmark*) kako bi se izvršila usporedba sa dostupnim naučnim rezultatima i dostignućima, a nakon toga će biti proveden postupak validacije nad realnim setom podataka.

Kompleksni, modularni sistem (pojam *sistem* će se u nastavku teksta koristiti za praktično implementirani hibridni, adaptivni, podacima vođen algoritam) optimizacije transportnih ruta koji se planira implementirati u okviru doktorske disertacije će imati svoju praktičnu primjenu za jednu od najvećih distribucijskih kompanija u Bosni i Hercegovini, koja se bavi trgovinom na veliko i svakodnevno isporučuje veliki broj proizvoda svojim mnogobrojnim kupcima, raznim trgovačkim centrima i trgovinama na malo. S tim u vezi će se koristiti i realni podaci date distribucijske kompanije.

## 2 Pregled stanja u oblasti istraživanja

Relevantni radovi koji se bave istraživanjem i rješavanjem problema optimizacije transportnih ruta se mogu podijeliti na nekoliko načina. U nastavku će detaljno biti prikazani svi pristupi od interesa koji bi se mogli praktično primijeniti na tip i vrstu problema kojim će se baviti ova disertacija.

### 2.1 Homogeni problem optimizacije transportnih ruta

U klasičnom problemu rutiranja vozila (eng. *Vehicle Routing Problem* - VRP) koji je predstavljen od strane Dantziga i Ramsera [1], cilj je da se napravi optimalan plan rutiranja za flotu homogenih vozila (sva vozila imaju iste karakteristike) koja će opslužiti skup kupaca, tako da ruta svakog vozila počne i završi u depou (skladištu), svaki kupac je posjećen samo jednom od strane jednog vozila, pri čemu su ispunjena i neka dodatna ograničenja. Postoji jako mnogo literature koja se bavi VRP-om i njegovim varijantama. Pregledni radovi na ovu temu su predstavljeni u radovima [2]-[3], te knjigama [4]-[5]. U navedenim opisnim radovima posebno su sa praktičnog gledišta interesantni radovi [6]-[13] u kojima se detaljno opisuje VRP problem sa eventualnom mogućnošću njegove praktične primjene na nekoliko različitih načina, te su poslužili kao polazna osnova za potpuno razumijevanje jednog ovako kompleksnog problema. U većini analiziranih radova koji se bave problematikom VRP-a napominje da ovi problemi spadaju u grupu NP-teških (eng. *Non-deterministic Polynomial-time Hardness*) problema.

U većini praktičnih distribucijskih problema zahtjevi kupaca se ispunjavaju korištenjem heterogene flote vozila [14]-[16]. Jedan od često prisutnih problema u industriji je dimenzioniranje ili kompozicija flote vozila. S tim u vezi, jedna od značajnih odluka koja mora biti donijeta je zapravo kompromis između posjedovanja vlastite flote i unajmljivanja vozila kada je to potrebno. Odluke koje se tiču dimenzioniranja flote uključuju određivanje broja i tipova vozila koja će se koristiti, a najbitnija odrednica tipa je obično kapacitet vozila. Na ove odluke najčešće utiče nekoliko varijabli tržišta kao što su cijene transporta, troškovi transporta i očekivani zahtjevi od strane kupaca. Jedan od doprinosa pristupa i hibridnog algoritma koji je planiran da se implementira u okviru doktorske disertacije je i činjenica da će se karakteristike koje utiču na strateške odluke kompanije moći lako i jednostavno provesti, i na taj način vidjeti njihova kratkoročna ili dugoročna isplativost.

Homogeni problemi optimizacije transportnih ruta su bili inicijalni u razvoju ove naučne oblasti. Međutim, u praksi je rijetka situacija da se isti mogu kao takvi i primijeniti. Stoga su kroz historiju naučnici i eksperti osmislili i kreirali različite dorade i ekstenzije datog pristupa, što će biti detaljno opisano u nastavku ovog poglavlja.

### 2.2 Heterogeni problem optimizacije transportnih ruta

Proširenje VRP-a u kome je potrebno dodatno donijeti odluku i o kompoziciji flote vozila je poznato kao heterogeni VRP (eng. *Heterogeneous Vehicle Routing Problem* - HVRP). Problemi koji spadaju u ovu grupu vode korijene iz rada [17] koji je objavljen prije više od 30 godina, a nedavno su evoluirali u jako bogato istraživačko područje. Mogu se uočiti različite klasifikacije ovih problema iz različitih perspektiva. U [18] naveden je generalni osvrt na radove sa posebnim fokusom na tehnike koje daju donje granice problema optimizacije i heuristike. Autori su također uporedili performanse raspoloživih heuristika opisanih do 2008. na *benchmark* primjerima. Baldacci i ostali [19] su predstavili pregled egzaktnih algoritama i usporedbu njihove performanse izračunavanja na kapacitiranim VRP problemima i

na HVRP problemima, dok su Hoff i ostali [14] dali pregled nekoliko industrijskih aspekata kombiniranog problema kompozicije flote i rutiranja u pomorstvu i cestovnom saobraćaju. Nedavno su Irnich i ostali [20] ukratko predstavili radove o HVRP objavljene od 2008. do 2014. godine.

Pregledni radovi iz ove oblasti sistematično su analizirani i do detalja protumačeni, te su u ovom poglavlju prikazani i pomenuti samo oni koji su od interesa za samu zamisao hibridnog algoritma za rješavanje VRP problema velike dimenzionalnosti koji se planira realizirati u okviru disertacije.

### 2.2.1 Grupe heterogenih problema optimizacije transportnih ruta

HVRP problemi u suštini razmatraju ograničenu ili neograničenu flotu vozila sa specificiranim kapacitetom, gdje svako vozilo ima fiksni trošak, da bi opslužilo skup kupaca za koje se zna koliko robe zahtijevaju. Ovi problemi se sastoje od određivanja kompozicije flote i ruta za vozila, tako da su zadovoljena klasična ograničenja VRP problema. Dvije glavne grupe HVRP problema su *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem* (FSM), predstavljen od strane Goldena i ostalih [17], koji radi sa neograničenom heterogenom flotom, te *Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem* (HF), predstavljen od strane Taillarda [21], u kome je flota vozila unaprijed određena. Postoje i druge varijante FSM i HF problema. U nastavku će biti data klasifikacija na osnovu dva kriterija:

- a) ciljeva,
- b) prisustva ili odsustva ograničenja u vidu vremenskih prozora.

Analizirana je dostupna literatura i za neke druge HVRP varijante i ekstenzije, što je također navedeno u nastavku.

I u FSM i HF problemima, cilj je da se minimizira ukupna funkcija troška (cilja) koja uključuje fiksne (eng. *Fixed* - F) i varijabilne (eng. *Variable* - V) troškove vozila. Ovdje se pravi razlika između pet različitih varijanti:

- 1) FSM za fiksnim i varijabilnim troškovima, koji se označava sa  $FSM(F,V)$  koji je predstavljen u [22];
- 2) FSM sa samo fiksnim troškovima, predstavljen u [17];
- 3) FSM sa samo varijabilnim troškovima, označen sa  $FSM(V)$ , predstavljen u [21];
- 4) HF sa fiksnim i varijabilnim troškovima, označen sa  $HF(F,V)$ , predstavljen u [23];
- 5) HF sa samo varijabilnim troškovima, označen sa  $HF(V)$ , predstavljen u [21].

Dvije prirodne ekstenzije FSM i HF problema nastaju kada se postavje ograničenja u vidu vremenskih prozora na početak (eng. *Start*) opsluživanja svakog od kupaca. Ove ekstenzije se označavaju sa FSMTW (eng. *Time Windows* - TW). U ovim ekstenzijama koriste se dvije mjere, odnosno cilja, za izračunavanje ukupnog troška koji treba minimizirati:

- 1) prva se zasniva na ukupnom vremenu rute (eng. *Time* - T) koje je suma fiksnog troška vozila i vremena putovanja, ali isključuje vrijeme opsluživanja (servisiranja). U ovom slučaju, vremena opsluživanja se koriste samo da se provjeri da li je ruta validna i da se izvedu podešavanja vremena napuštanja depoa kako bi se minimiziralo vrijeme čekanja prije početka opsluživanja;

- 2) druga mjera troška se zasniva na udaljenosti (eng. *Distance* -  $D$ ) i uključuje fiksne troškove vozila i udaljenost koju vozilo pređe, kao što je slučaj u standardnom VRP-u sa vremenskim prozorima (VRPTW) [24].

FSM i HF, kombinirani sa iskazana dva cilja, daju zapravo četiri tipa problema:

- 1) FSMTW sa ciljem  $T$ , što se označava sa FSMTW( $T$ ), predstavljen u [25];
- 2) FSMTW sa ciljem  $D$ , označen sa FSMTW( $D$ ), predstavljen u [26];
- 3) HFTW sa ciljem  $T$ , što se označava sa HFTW( $T$ ), predstavljen u [27];
- 4) HFTW sa ciljem  $D$ , predstavljen sa HFTW( $D$ ), predstavljen u [28].

U literaturi su predstavljene i druge varijante FSM i HF problema, uključujući probleme sa više depoa [29]-[31]. Druge ekstenzije uključuju stohastičke zahtjeve [32], isporuke i kupljenje (povrat) robe [33]-[34], višestruka putovanja [35]-[36], upotrebu eksternih prevoznika [37]-[38], ograničenja u pogledu dostupnosti kupca nekom vozilu [39]-[40], zeleno rutiranje [41]-[42], pretovarivanje [43], zavisnost vremenske udaljenosti dvije lokacije od vremena polaska [44], kolekcioni depo [45].

Sa aspekta praktične upotrebe realiziranih algoritama, što je između ostalog u fokusu doktorske disertacije, svi autori iz analizirane literature se slažu u jednoj činjenici: svaki praktični problem optimizacije transportnih ruta posjeduje svoje specifičnosti koje ga u određenoj mjeri čine različitim od ostalih problema. Zbog toga svaki konkretan problem i primjena posjeduje sopstvene kompleksnosti koje značajno utiču na način rješavanja istog, odabir ispravnih koraka, metoda, aproksimacija i sl., što je predstavljeno između ostalog u radovima [46]-[50]. Ove činjenice se prevashodno odnose na uključivanje ograničenja koja su u svakom konkretnom primjeru bitna, a što ne mora značiti da su u drugoj praktičnoj situaciji toliko značajna ili uopšte interesantna. Na osnovu toga se problem rutiranja vozila može podijeliti na nekoliko osnovnih podgrupa [51]-[57]:

VRP sa vremenskim prozorima (VRPTW – *VRP with Time Windows*): Ova varijacija VRP-a se zasigurno najčešće pojavljuje u praktičnim uvjetima, a ona podrazumijeva da se definiraju dodatna ograničenja u formi vremenskih intervala tokom kojih svaki kupac treba biti opslužen.

Kapacitirani VRP (CVRP – *Capacitated VRP*): Klasičnom VRP problemu dodaje ograničenje da ispunjenost vozila na bilo kojoj ruti ne smije premašiti kapacitet vozila  $Q$ , pod pretpostavkom da sva roba mora biti isporučena kupcima. Često se CVRP uzima za definiciju klasičnog VRP-a, jer bez toga ne bi imao nikakvu praktičnu upotrebu.

VRP sa više depoa (MDVRP – *Multiple Depot VRP*): Ova ekstenzija VRP-a podrazumijeva da se umjesto jednog pojavljuje više depoa (skladišta). Svakom od depoa pridružuje se flota vozila koja opslužuju konzumente, te se vozila po završetku opsluživanja vraćaju u isti depo.

Periodični VRP (PVRP – *Periodic VRP*): Klasični VRP podrazumijeva da se svi kupci posjećuju samo jednom. Za razliku od toga, ova modifikacija VRP-a proširuje snabdijevanje kupaca na period od  $N$  dana, tokom kojeg svaki od kupaca treba biti posjećen minimalno jednom.

Stohastički VRP (SVRP – *Stochastic VRP*): Ova modifikacija VRP-a je dosta specifična budući da podrazumijeva da je jedan od parametara samog modela, ili pak neko ograničenje, slučajan. U teoriji se razmatraju situacije da su slučajni kupci, vremenske i prostorne razdaljine između kupaca, vremena

opsluživanja kupaca i slično. U sklopu doktorske disertacije će se za početak izvršiti aproksimacija vrijednosti određenih ograničenja (kao npr. vrijeme istovara kod kupca) sa adekvatnim pripadajućim jednačinama, dok će se vremenom te aproksimacije zamijeniti vrijednostima koje će biti dobivene primjenom savremenih *data mining* i/ili statističkih algoritama iz dostupnih historijskih podataka.

VRP sa izdijeljenom isporukom (SDVRP – *Split Delivery VRP*): Kod ove modifikacije VRP-a se dozvoljava da se jedan kupac opsluži od strane više od jednog vozila, odnosno da bude posjećen više puta. Ova vrsta u praktičnim situacijama je gotovo pa nikako upotrebljiva.

VRP sa povratom (VRPB – *VRP with Backhauls*): Ova modifikacija omogućava da kupac vrati dio robe. U teoretskim razmatranjima proces je takav da se završi snabdijevanje svih kupaca, a potom se obilaze oni kupci koji treba da vrate dio robe. U realnim praktičnim situacijama postoji razlika u tome da se dio robe odmah uzima za povrat od kupca kojemu je taj dan planirana isporuka, naravno pri čemu treba obezbijediti da ta roba ne narušava kapacitete vozila. Time se dobivaju specijalni oblici kao što su VRP sa preuzimanjem (VRPPD – *VRP with Pick-up and Delivery*) i VRP sa dopunom (VRPSF – *VRP with Satellite Facilities*).

## 2.3 VRP sa praktičnom primjenom

S obzirom da su u disertaciji od interesa problemi optimizacije transportnih ruta sa praktičnom prirodom, posebno su tokom analize dostupne literature interesantni bili sistemi razvijeni za praktičnu primjenu. Kako se praktični problemi uglavnom rješavaju sa heterogenim flotama, praktični primjeri spadaju u domen HF problema.

Tarantilis i Kiranoudis [58] su opisali jednu aplikaciju iz stvarnog života koja se bavi pravljenjem rasporeda za distribuciju svježeg mlijeka za jednu kompaniju iz Atine. Autori su željeli minimizirati ukupni trošak isporuke svježeg mlijeka iz mljekare u supermarkete i male prodavnice, pri čemu se koristi heterogena flota vozila. Postoji 299 isporučnih mjesta u toj studiji, a koriste se tri tipa vozila. Autori su predložili heuristiku koja je dala značajna poboljšanja u operacionoj performansi kompanije. U drugom radu, isti autori su studirali dva problema iz stvarnog života koja su prisutna u mljekarskoj i građevinskoj industriji [59]. Prvi studirani slučaj razmatra centralno skladište jedne mljekarske kompanije u kom se nalazi 27 vozila, koja pripadaju jednom od 12 tipova, a u skladištu se čuvaju boce svježeg mlijeka koje moraju dnevno biti isporučene skupu kupaca, čiji broj varira od 240 do 320. U drugom analiziranom slučaju, građevinska kompanija ima distribucijski centar u kom se proizvedeni beton utovara u heterogenu flotu kamiona mješalica. Beton se onda isporučuje na 100 lokacija, a svaki teret može biti izmiješan specifičnim tipom mješalice specifičnog kapaciteta koja može nositi različite smjese betona. Ukupno je raspoloživo 13 vozila, koja pripadaju jednom od 6 tipova. Autori su razvili fleksibilni adaptivni algoritam baziran na memoriji, koji je zapravo heuristika koja ima dvije faze, a uključuje različita operaciona ograničenja. Ovaj metod je nadmašio onaj iz [60], te je značajno smanjio veličinu flote i distribucijske troškove u poređenju sa trenutnom praksom.

Prins je u [35] istraživao varijantu HF sa višestrukim putovanjem, što znači da svako vozilo može obaviti nekoliko putovanja. Istraživano je nekoliko heuristika, konkretno sekvencijalna heuristika, nova heuristika spajanja, lokalno pretraživanje sa najstrmijim nagibom i *tabu* pretraživanje. Varijanta HF sa jednostrukim putovanjem, kao i ona sa višestrukim putovanjem, su rješavane predloženim metodama. Uz to, heuristika spajanja je primijenjena za proizvođača namještaja u blizini Nanta na atlantskoj obali

Francuske, koji ima 775 prodavnica i 71 kamion. U ovom slučaju, narudžbe moraju biti zaprimljene najkasnije u petak, da bi se isporučile u narednoj sedmici. Autor je indicirao da ovakva situacija ostavlja dovoljno vremena u petak navečer za pokretanje algoritma. Ovaj metod je donio značajne uštede u prosječnoj dužini rute i u ukupnom trošku jednog sedmičnog rasporeda ruta.

Calvete i ostali [61] su opisali dvofazni model ciljnog programiranja (eng. *Goal Programming* - GP) za FSM probleme sa više ciljeva i striktnim i nestriktnim vremenskim prozorima, a sve to da bi se riješio problem iz stvarnog života za jednu srednje veliku dostavljačku kompaniju. U prvoj fazi, izvodljive rute su numerisane i izračunata je kazna za svaku rutu na osnovu odstupanja od ciljeva. Druga faza predstavlja problem particioniranja skupa da bi se izabrao najbolji skup izvodljivih ruta. Srednje veliki problemi iz stvarnog života sa 60 instanci su grupisani u šest različitih konfiguracija sa 30, 50 i 70 čvorova. Kupci su klasterisani u četiri grupe na osnovu vremenskih prozora: nestriktni vremenski prozori koji uzimaju u obzir gradske regulative ili zahtjeve kupaca za dostavu u rano jutro, rano popodne ili navečer. Striktni vremenski prozori dozvoljavaju odstupanje od nestriktnih prozora od po jedan sat na obje strane. Kompetitivni rezultati su dobiveni za probleme srednje veličine.

Belfiore i Yoshizaki [62] su predložili algoritam raspršenog pretraživanja za FSMTW sa razdvojenim isporukama iz stvarnog života, a koji se javlja u kompaniji u Sao Paulu. Sekvencijalne heuristike umetanja iz [63]-[64] su iskorištene da se dobije početno rješenje. Nekoliko procedura intenzifikacije i diverzifikacije je također kombinirano. Algoritam je primijenjen na najveću brazilsku maloprodajnu kompaniju koja opslužuje 519 isporučnih mjesta u 11 država. Kupci se opslužuju iz jednog skladišta lociranog u Sao Paulu sa četiri tipa kamiona. Rezultati su pokazali da se troškovi isporuke mogu prosječno smanjiti za 7,5 %.

U [31] je razmatran HF problem sa više depoa i istovremenim prisustvom i isporuke i kupljenja (povrata) robe. Problem je imao nestriktno vremenske prozore i pokušano je naći rješenje za male dostavljačke kompanije iz urbane regije Milana. Predložen je egzaktan *branch-and-price* algoritam baziran na naprednim tehnikama dinamičkog programiranja. Metod je u stanju optimalno riješiti instance sa do 75 kupaca. Uz to, autori su analizirali kako uvođenje nestriktnih vremenskih prozora utiče na performanse i došli su do zaključka da to povećava troškove od 5 do 15 %.

Xu i Jiang [65] su se bavili FSM problemom sa više depoa. Oni su predložili algoritam pretraživanja sa promjenljivim susjedstvom koji se bazira na hibridnim operatorima. Algoritam je primijenjen da se riješi problem koji se javio na jednom velikom projektu koji se bavio vodama u Kini. Simulirano zacjeljivanje je ugrađeno u algoritam da upravlja procesom prihvatanja rješenja. Projekat je sadržavao dva distribucijska centra, 16 kupaca i dva tipa vozila. Cilj je bio da se postigne ravnoteža u toku materijala, uključujući iskopišta, tovarišta, pretovarna mjesta, odlagališta iskopanog otpada, skladišta materijala, distribucijski centar i parking za opremu. Algoritam je uspio smanjiti ukupnu pređenu udaljenost za 3,49 % i reducirati ukupne troškove za 7,35 %.

U [66] je naveden primjer koji zalazi u sferu ekologije, a cilj je bio smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> u FSM problemu. Autori su dali matematsku formulaciju da bi se istražio efekat homogenih i heterogenih flota na emisiju CO<sub>2</sub>. U radu je prikazan mali ilustrativan primjer, i riješen je jedan problem iz stvarnog života. U ovom primjeru, jedan kolekcioni centar u Saint-Etienneu, Francuska, opslužuje 10 čvorova sa tri tipa vozila, od kojih su jedno malo i dva velika, da bi se skupili paketi svaki dan. Rezultati su pokazali da



korištenje heterogene flote vozila daje bolje rezultate nego korištenje homogene flote. Ipak, njihov model je mogao riješiti samo probleme male dimenzionalnosti.

Yao i ostali [67] su se bavili jednom varijantom HF problema u kojoj vozila počinju i završavaju svoje ture u nekoj logističkoj firmi koja nije ona kojoj vozila pripadaju, kupe kartone iz fabrika i isporučuju ih kupcima. Autori su predložili heuristiku koja se bazira na optimizacija roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization Heuristic* - PSO), integriranu sa samoadaptivnom šemom i strategijom poboljšanja na bazi lokalnog pretraživanja. Ovaj metod analiziran je na primjeru Dalian City u kom ima 8 fabrika kartona i 85 kupaca u regionu. Ukupni trošak je smanjen za 28 % u poređenju sa trenutnom situacijom.

## 2.4 Pristupi rješavanja VRP problema

Ideja razvoja generičkog hibridnog algoritma koji zadovoljava što više realnih ograničenja i uvjeta iz svih navedenih i analiziranih relevantnih radova izdvojila je njih nekoliko koji su detaljno analizirani i do određene mjere realizirani kako bi se vidjela njihova stvarna upotrebna svrha i moć.

Mnogo faktora je uticalo na dodatnu analizu dostupnih radova koji bi mogli ponuditi praktično primjenljiv pristup rješavanja VRP problema, a to su:

- broj kupaca,
- ograničenje vremenskih prozora kupaca,
- heterogena flota vozila,
- brzina izvršavanja algoritma,
- radno vrijeme vozila,
- radno vrijeme vozača,
- način punjenja vozila jer se prodaja robe vrši na nivou jediničnog komada (artikla),
- ograničenje vozila po nosivosti (težini) i volumenu,
- ograničenje koja vozila ne mogu opslužiti kojeg kupca,

i još mnoga druga realna ograničenja.

Nekolicina radova iz dostupne literature koji se bave praktičnom realizacijom VRP problema u svojoj osnovi koriste algoritam i princip koji je detaljno opisan i predložen u [29]. Autori u ovom radu uvode matematsku formulaciju problema koja je vrlo detaljna, razumljiva, i može se prilagoditi praktičnom problemu, a i sam način pronalaženja optimalnih ruta je dosta intuitivan. Naime, autori predlažu da se prvo izvrši klasterizacija, tj. grupisanje kupaca u klaster. Klasterizacija se bazira na geografskim karakteristikama kupaca, vremenskim ograničenjima, te ograničenjima u vidu količine robe koju je potrebno isporučiti. Nakon te faze, svaki klaster se predstavi jednim čvorom, i onda se u drugoj fazi pokušava egzaktno naći optimalni skup ruta promatrajući svaki klaster kao samo jedan čvor. U drugoj fazi je moguće i objединiti klaster iz prve faze u jednu rutu, tako da jedno vozilo opslužuje više klastera. Kao rezultat ove faze, zna se koje vozilo obilazi koje klaster. Nakon toga, za sve kupce iz tih klastera i dato vozilo, pokušava se egzaktno pronaći optimalna ruta u trećoj fazi. Dakle, u trećoj fazi traži se onoliko optimalnih ruta koliko je vozila iskorišteno u drugoj fazi. Prezentirani algoritam se zasniva na klasterizaciji bliskih kupaca i njihovom opsluživanju od strane jednog vozila. Takav način rutiranja izgleda dosta logičan. Ipak, zbog korištenja egzaktnih metoda rješavanja MILP problema (eng. *Mixed Integer Linear Programming*) u okviru doktorske disertacije će se pokazati da algoritmi ovakvog pristupa

nisu praktični za probleme koje prelaze stotinjak kupaca, posebno zbog vremena izvršavanja istog. Ovakvi problemi od preko 100 kupaca se često susreću u kompanijama koje su od interesa, što predstavlja ozbiljno ograničenje. Također, određenim analizama i pretpostavkama se može utvrditi da za veći broj kupaca dati algoritam neće biti u mogućnosti da pronađe niti jedno rješenje. Nadalje, kad se određeni kupci dodjeljuju u pripadajući klaster, po pretpostavkama navedenog pristupa isti moraju biti opsluženi od strane jednog vozila, što onda smanjuje mogući "manevarski prostor" za optimizaciju. Zbog svega navedenog u doktorskoj disertaciji će biti analizirani i drugi pristupi za rješavanje kompleksnih praktičnih problema, a onaj koji se pretpostavlja da bi mogao dati izuzetno dobre rezultate u razumnom vremenu je detaljnije opisan u nastavku.

Naime, kao polazna osnova za implementaciju drugog adaptivnog hibridnog algoritma koji će biti sastavni dio doktorske disertacije poslužila je ideja predstavljena u radu [26]. On je izabran jer je algoritam predložen od autora u tom radu bio u stanju riješiti probleme velikih instanci. Treba reći da je ovaj algoritam dat za FSM probleme, iako su praktični problemi zapravo HF tipa. Upravo zbog toga će se u sklopu disertacije uraditi modifikacije ovog pristupa kako bi se dobio praktično primjenljiv hibridni algoritam. Osnovni razlog tome je da zapravo egzaktno metode nisu u stanju rješavati praktične probleme velike dimenzionalnosti (eng. *Large-scale problems*), te da izlaz treba tražiti u heurističkim metodama. Stoga će biti implementiran algoritam koji će se sastojati iz dvije faze: i) inicijalno se rješenje formira korištenjem modificirane heuristike uštede iz [68], a modifikaciju su uradili Liu i Shen u [69]; ii) u drugoj fazi se koristi *tabu* pretraživanje [70]. Kombinacija ova dva algoritma i pristupa garantuje izvrsne rezultate u praktičnoj realizaciji, prije svega podrazumijevajući da će takav hibridni algoritam biti u stanju u jako kratkom vremenu dati vrlo dobra rješenja. Performanse koje se očekuju ovim pristupom su mnogo bolje nego u modifikaciji [29], a planirano vrijeme izračunavanje bi trebalo biti puno kraće.

## 2.5 Podešavanje parametara VRP algoritama

U većini citiranih radova navodi se činjenica koja ukazuje na to da je svaki praktični VRP problem za nijansu različit od njemu najbližijeg problema. Na to prije svega utiču dva parametra:

- realna ograničenja, i
- konstante samog upotrijebljenog algoritma.

Svaka kompanija koja zahtijeva implementaciju VRP-a unutar njihovog okruženja ima svoja ograničenja koja su definisana politikama poslovanja date kompanije. Stoga se nerijetko u literaturi navodi da su ograničenja i restrikcije u ovakvim vrstama problema nestandardni. Lee je u svom radu [71] detaljno opisao jedan takav problem sa prijedlogom rješenja na konkretnom realiziranom primjeru.

Razvojem savremenih tehnologija u posljednjih nekoliko godina vrši se određivanje parametara na osnovu dostupnih informacija iz GPS/GIS sistema, podataka o vremenskim uslovima i prognozama i sl. Nekoliko radova se bavi analizom takvih sistema, a posebno su interesantni radovi [72] koji koristi *data mining* metode i tehnike da bi se odredila određena realna ograničenja VRP problema, te [73] koji koristi predikcije vremenskih udaljenosti između čvorova za potrebe dinamičkog rutiranja za vozila hitne pomoći. Slično je urađeno i u radu [74] u kojem su podaci predstavljeni u obliku *Data Warehouse* (DWH) modela, te su korištene *data mining* tehnike i metode da bi se odredila određena vrsta stohastičkih ograničenja. U [75] je opisan jedan takav primjer koji u jednoj od faza predloženog algoritma koristi savremene *data mining* tehnike. Primjer je realiziran za distribuciju cigareta u gradu Jinan, Kina. Često se

za potrebe podešavanja realnih ograničenja VRP-a koriste i algoritmi mašinskog učenja (eng. *Machine learning*), te druge metode poput *Fuzzy* logike ili pak neuronskih mreža (eng. *Neural Networks*). Postoji nekoliko radova u dostupnoj literaturi koji opisuju primjenu statističkih metoda u ove svrhe. Takvi interesantni realni primjeri predstavljeni su u radovima [76]-[77]. Izuzetno zanimljiv primjer klasične primjene realnih iskoristivih podataka prikazan je u radu [51] gdje se uvodi pojam podacima vođenog (eng. *Data-driven*) rješavanja VRP problema. U ovom radu se po prvi puta pominje i dodatna faza u praktičnim primjerima, a to je faza interakcije čovjek-računar (eng. *Human-computer interaction mode*) koja omogućava da krajnji korisnik ipak posjeduje mogućnost ručne dorade i modifikacije predloženih ruta. Koliko god algoritam smatrali savršenim uvijek postoje realne situacije koje nije moguće predvidjeti i uvrstiti u sistem, te je zbog toga takva mogućnost u praktičnim sistemima prijeko potrebna.

Svaki od analiziranih pristupa i algoritama za rješavanje VRP problema, pa tako i hibridni koji se planira realizirati u sklopu doktorske disertacije, sačinjen je od određenih konstanti. Tim konstantama se određuju određeni težinski faktori, faktori kažnjavanja po pojedinim kriterijumima u ovisnosti od bitnosti samog kriterija po krajnji ishod realne situacije rutiranja vozila i dr. Tek u posljednjih nekoliko godina se u literaturi pojavljuju radovi koji se bave ovom problematikom. Budući da je oblast poprilično nova u akademskoj zajednici ne postoji mnogo radova objavljenih na ovu temu. Ovakav pristup je u literaturi poznat po nazivu Problem podešavanja parametara (eng. *Parameter Setting Problem, PSP*). Najinteresantniji rad na ovu temu predstavili su Calvet i ostali [78] u kojem je opisan statistički pristup za fino podešavanje parametara za metaheurističke algoritme, a koji je primijenjen na VRP problemu. Metodologija koja je predstavljena u ovom radu je izuzetno zanimljiva za dalju analizu, te može poslužiti kao polazna osnova za podešavanje parametara hibridnog algoritma koji će biti finalni proizvod doktorske disertacije. Analizom druge dostupne literature koja se bavi PSP problemom može se zaključiti da se ovi problemi mogu podijeliti u dvije osnovne grupe [79]: (i) *Parameter Control Strategies (PCS)*, (ii) *Parameter Tuning Strategies (PTS)*. U radovima [80]-[81] uvedena je dodatna podgrupa *Instance-specific Parameter Tuning Strategies (IPTS)* koja uključuje i karakteristike instanci na kojima se primjenjuje.

Još jedan zanimljiv rad na ovu temu predstavili su Battiti i Brunato [82] u kojem se koriste metode mašinskog učenja u kombinaciji sa statističkim metodama za fino podešavanje parametara metaheurističkih algoritama. Ono što je zanimljivo jeste da su predstavili model koji bi se mogao primijeniti i za podešavanje parametara u drugim vidovima algoritama, a jedan od najinteresantnijih primjera je primjena za parametre neuronskih mreža. Statističke metode su korištene i u eksperimentima u radu [83] koje su se u kasnijim radovima pokazale kao izuzetno korisne za upotrebu na VRP problemima. Izuzetno korisna prezentacija načina rješavanja ovog problema sa praktičnog stanovišta predstavljena je od strane autora Cooray i Rupasinghe u radu [84] u kojem je razvijen algoritam za rješavanje specijalne vrste tzv. zelenog VRP-a (eng. *Green Transportation* ili *Green Vehicle Routing*) primjenom genetičkog algoritma. Za podešavanje parametara algoritma iskorištene su i realizirane metode mašinskog učenja, što je u konačnici omogućilo brže izvršavanje algoritma i smanjenje računarskih zahtjeva za rješavanje istog. Radovi [85]-[90] se također na nekoliko različitih načina bave ovom problematikom, te kao rezultat daju zanimljive prijedloge i smjernice za eventualna nova poboljšanja. Osim primjene PSP-a za potrebe VRP problema vrlo često se takvi koncepti mogu primijeniti i u druge svrhe [91]-[92].

Na osnovu detaljne analize literature koja se bavi podešavanjem navedene dvije vrste parametara neupitno je da bilo koji VRP sistem koji treba biti korišten u praktične svrhe mora u određenim svojim fazama imati ugrađene metode za podešavanje datih parametara.

U tabeli I predstavljen je pregled referentnih radova prema izvorima njihovog objavljivanja.

Tabela I: Pregled referentnih radova prema izvorima objavljivanja

Izvor	IF*	Naziv	Referenca
Časopis	4.822	Transportation Research Part B: Methodological (ELSEVIER)	[42]
	4.714	Mathematical Programming Computation (Springer)	[31]
	4.334	Transportation Research Part C: Emerging Technologies (ELSEVIER)	[30]
	4.217	Transportation Science (INFORMS)	[3], [26], [34]
	4.131	Management science (INFORMS)	[1]
	4.052	International Journal of Production Economics (ELSEVIER)	[43]
	3.811	Applied Soft Computing (ELSEVIER)	[41], [80]
	3.585	Journal of food Engineering (ELSEVIER)	[58]
	3.582	European Journal of Operational Research (ELSEVIER)	[6], [29], [33], [37], [49], [50], [57], [59], [61], [62], [81]
	3.526	Expert Systems with Applications (ELSEVIER)	[86]
	3.211	Neurocomputing (ELSEVIER)	[47]
	2.859	Computers & Industrial Engineering (ELSEVIER)	[77], [87]
	2.829	Computers & Operations Research (ELSEVIER)	[9], [10], [14], [17], [23], [28], [64]
	2.787	Operations research (INFORMS)	[24], [68]
	1.807	Journal of Heuristics (Springer)	[27], [83]
	1.710	Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)	[5], [20]
	1.709	Annals of Operations Research (Springer)	[19], [45], [67]
	1.422	Journal of King Saud university - Engineering sciences (ELSEVIER)	[44]
	1.362	International Journal of Innovative Computing, Information and Control	[72]
	1.213	NETWORKS	[8], [54]
	1.077	Journal of the Operational Research Society (Springer)	[11], [13], [22], [38], [60], [63], [69], [70], [92]
	1.044	Operations Research/Computer Science Interfaces Series (Springer)	[56], [90]
	0.802	Mathematical Problems in Engineering (Hindawi)	[36]
	0.792	SORT - Statistics and Operations Research Transactions	[78]
	0.753	Naval Research Logistics (NRL) (WILEY)	[12]
	0.572	RAIRO - Operations Research	[21]
	0.568	Yugoslav Journal of Operations Research	[88], [89]
	0.474	Transportation Planning and Technology (Taylor & Francis Online)	[32]
	0.448	INFOR: Information Systems and Operational Research	[40], [46]
	0.398	Procedia - Social and Behavioral Sciences (ELSEVIER)	[73]
0.297	International Journal of Control and Automation	[65]	

Izvor	IF*	Naziv	Referenca
Časopis	-	Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research (Springer)	[35]
	-	Vehicle routing: Methods and studies (ELSEVIER)	[39]
	-	International Journal of Industrial Engineering & Production Research (Iran University of Science & Technology)	[52]
	-	Journal of Industrial Engineering (Hindawi)	[84]
Knjige		Handbooks in operations research and management science (ELSEVIER)	[2]
		Springer Science & Business Media, LLC (Springer)	[4], [18]
		Tuning metaheuristics: a machine learning perspective (Springer)	[79]
		Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science (Springer)	[82]
Konferencije		EvoCOP 2008 (Springer)	[7]
		3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, 2010	[51]
		5th Student Conference on Operational Research (SCOR'16)	[53]
		R4TLI Conference Proceedings 2016	[55]
		IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems 2014	[66]
		ISEP 2005	[74]
		EU/ME 2016 - Design and Analysis of Metaheuristics	[85]
Ostalo		URL: FedEx. 2017	[15]
		URL: TNT Express. 2017	[16]
		National Science Council Republic Of China Part A Physical Science And Engineering	[25]
		Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT)	[48]
		Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE) 2013	[71]
		World Automation Congress Proceedings	[75]
		InTech	[76]
		Electronic Theses and Dissertations	[91]
		Oracle URL dokumenti	[93], [94], [95], [96], [97], [98]
		URL: Tutorials Point (I) Pvt. Ltd. 2012	[99]

IF\* = 5-Year Impact Factor na dan 31.08.2017.

### 3 Motivacija za istraživanje

Problem rutiranja vozila se u literaturi analizira unazad 60-tak godina, kako u teoretskom tako i u praktičnom smislu. Međutim, analizom mnogobrojne dostupne literature na ovu temu uočeno je da velika većina naučnika i istraživača širom svijeta analizira samo one aspekte VRP problema koji u praksi nisu primjenljivi (posebno ako se uzmu u razmatranje samo oni koji rješavaju probleme velike dimenzionalnosti), ili ako jesu, trebalo bi ih znatno modifikovati i prilagoditi realnim situacijama i zahtjevima. To je bio prvi vid motivacije za ovim problemima. Sa druge strane, VRP spada u grupu izuzetno teških problema optimizacije pa je s toga i jasna činjenica da se ne usuđuje svaki istraživač baviti ovom problematikom. Treba imati u vidu i činjenicu da sama praktična implementacija jednog ovako složenog problema često podrazumijeva da se to uradi sa više algoritama, metoda i pristupa. Razlog tome je što je često nemoguće unaprijed tačno predvidjeti ponašanje različitih algoritama, njihove performanse, te moguće nedostatke. Naučni radovi iz kojih se crpe podaci o algoritmima obično u najboljem svjetlu predstavljaju sopstveni algoritam, te (ne)namjerno izostavljaju neka njegova važna ograničenja.

Koliko je bitan izuzetno dobar i kvalitetan sistem rutiranja vozila koji je prilagođen potrebama kompanija koje se bave proizvodnjom i/ili prodajom različitih proizvoda ukazuje i činjenica da na troškove prevoza otpada od 5 do 30 % ukupnih izdataka kompanije, u ovisnosti od grane privrede i djelatnosti. Stoga ne nedostaje motiva da se razvije jedan hibridni model sa novim praktičnim pristupom koji će biti u mogućnosti riješiti VRP probleme velike dimenzionalnosti sa realnim karakteristikama i specifičnostima, a ujedno i pomoći kompanijama koje bi ga koristile da smanje svoje troškove koji su izuzetno visoki i značajni. Novac koji bi se pri tome uštedio bi se mogao iskoristiti za nabavku novih vozila koja bi dugoročno gledano dovela do još većih ušteda. To je još jedno od područja koje će se detaljno prikazati u doktorskoj disertaciji, a odnosi se na kreiranje takvog modela koji će omogućiti analizu različitih opcija i mogućnosti rutiranja vozila, što se u konačnosti može iskoristiti za donošenje strateških odluka kompanije poput nabavke novih vozila, rada vozila u dvije smjene i sl.

U mnogo radova koji su predstavljeni u detaljnom pregledu stanja u oblasti istraživanja nailazi se na jednu nezaobilaznu konstataciju: svaki VRP problem koji se primjenjuje na praktični problem je jedinstven i specifičan, te se skoro pa nikada ne može riješiti već postojećim razvijenim algoritmima bez ikakvih modifikacija. Zaključak je da ne postoje dva identična praktična VRP problema za dvije različite kompanije, već svaka ima svoje specifičnosti po kojima se razlikuju. To je dalo dodatni motiv da se ovakva konstatacija i razmotri. Naime, ukoliko se analizira bilo koja kompanija za koju bi bilo potrebno realizirati sistem optimalnog rutiranja flote vozila, uvijek će se doći do zaključka da data kompanija mora raditi po određenim zakonitostima i principima (koja su možda nametnuta od strane vodstva kompanije, stanja na putevima, ili pak zakona određene države) što nije obrađeno niti uzeto u razmatranje u bilo kojem dostupnom naučnom radu. Prevažodno se tu misli na mehanizme određivanja pojedinih parametara sistema kao što su vremena istovara, način punjenja vozila, radno vrijeme vozila i vozača, i dr., kao i na određivanje samih parametara algoritma koji će ponuditi zadovoljavajuće i prihvatljivo rješenje. U određivanje ovih parametara jako veliku pomoć može imati i iskustvo osoba koje godinama ili decenijama pokušavaju ovaj problem riješiti bez upotrebe računarskih sistema i savremenih algoritama. Ovo iskustvo se kroz analizu historijskih podataka može iskoristiti i ugraditi kao dio jednog novog savremenog algoritma i pristupa. Upravo ova činjenica otvara mogućnost unapređenja bilo kojeg realiziranog algoritma za praktičnu upotrebu VRP-a. Dodatnu motivaciju daje činjenica da će dati realni podaci biti dostupni za potrebe realizacije novog hibridnog, adaptivnog algoritma koji će biti krajnji

proizvod doktorske disertacije, te će isti u obliku novih *benchmark* testnih podataka biti dostupni istraživačima za daljne eksperimente i analize. S pravom se može reći da su dati podaci „neiskorišteno blago“ posebno ako se u obzir uzme činjenica da ljudski um uz dugogodišnje praktično iskustvo može približno optimalno napraviti rute do maksimalno 50 kupaca. Ako se zna da su vođitelji skladišta i transporta nerijetko u izazovu da moraju rasporediti vozila i kreirati dnevne transportne rute sa preko 100 isporučnih mjesta onda zaista u tim podacima postoje vrijedne informacije koje u nauci gotovo pa nikako nisu iskorištene u kontekstu VRP problema. Doktorska disertacija će ponuditi sopstveno kreirani mehanizam njihovog iskorištavanje kao dio jedinstvenog višemodularnog algoritma za rutiranje dostupne flote vozila, uz ostavljenu mogućnost naknadne ručne izmjene predloženih ruta.

Finalna motivacija za istraživanje i izradu doktorske disertacije iz oblasti rutiranja vozila za probleme velike dimenzionalnosti sa praktičnim ograničenjima i primjenom proizašla je iz činjenice da je kompanija koja želi jedno takvo rješenje isto tražila po regionu, Evropi, pa i cijelom svijetu, te bila spremna da za takav sistem (algoritam) izdvoji bilo koju svotu novca. Međutim, nisu uspjeli pronaći niti jedan realizirani algoritam koji bi im u potpunosti (pa čak i do određene mjere) odgovarao i zadovoljio sve njihove realne zahtjeve. Da bi zaposlenici kompanije mogli jednostavno koristiti realizirani hibridni algoritam, isti je potrebno implementirati u vidu web-baziranog sučelja jednostavnog za korištenje, što također predstavlja dodatnu ličnu motivaciju da svoje dugogodišnje iskustvo iz oblasti kreiranja web sistema i aplikacija primijenim i u svrhe prikaza i praktične primjene novokreiranog VRP algoritma i pristupa.

## 4 Cilj istraživanja

**Cilj doktorske disertacije je modelirati i realizirati novi pristup rješavanja problema rutiranja vozila velike dimenzionalnosti zasnovan na novom hibridnom, adaptivnom, podacima vođenom algoritmu, poštujući pri tome realna ograničenja i zahtjeve, uz mogućnost iskorištavanja historijskih podataka za konstantno poboljšanje performansi realiziranog algoritma.**

Cilj doktorske disertacije proizlazi iz pregleda stanja u oblasti istraživanja, lične motivacije i analize realnih problema velike dimenzionalnosti iz domena rutiranja vozila, sa posebnim akcentom na one koji se mogu praktično primijeniti.

Da bi se navedeni cilj ostvario, u radu će se pokazati da se isti postiže kroz uspješno izvršenje niza vezanih koraka koji će postepeno voditi do realizacije krajnjeg cilja istraživanja. U svakom od pomenutih koraka su analizom dostupne literature uočene mogućnosti za kreiranje i realizaciju novih pristupa, modela i poboljšanja, pa se može reći da se glavni cilj sastoji od nekoliko sljedbeno povezanih međuciljeva.

Sa druge strane, da bi jedan tako kompleksan adaptivni algoritam bio upotrebljiv u praksi neophodno ga je kreirati u vidu web-baziranog sučelja koje će biti lako i intuitivno za korištenje bilo kojem profilu krajnjih korisnika, što je također jedan od podciljeva doktorske disertacije.



## 5 Metode i plan istraživanja

Metode istraživanja će se zasnivati na teoretskim razmatranjima, različitim analizama, induktivno-deduktivnim metodama, te empirijskim i eksperimentalnim potvrđama dobivenih rezultata poboljšanja.

Okvirni plan istraživanja sadrži sljedeće aktivnosti i korake:

- a) Proučavanje i klasifikacija objavljenih naučnih i stručnih radova iz oblasti rutiranja vozila, sa posebnim akcentom na probleme velike dimenzionalnosti koje je moguće praktično primijeniti, uključujući i analizu dostupnih radova na temu podešavanja kako parametara takvih algoritama tako i različite principe i metode određivanja pripadajućih ograničenja koja moraju biti zadovoljena;
- b) Detaljna analiza onih pristupa i algoritama koji bi bili najpogodniji za primjenu na željenom problemu, posebno ako se tome dodaju i specifični zahtjevi realnih problema i ograničenja;
- c) Za dva analizirana pristupa koja su se pokazala kao najpodobnija u ove svrhe (što je detaljno opisano u pregledu stanja iz oblasti istraživanja) izvršiti implementaciju istih, te uraditi neophodne modifikacije kako bi bili u potpunosti primjenljivi na praktičnim problemima od interesa;
- d) Analizirati i uporediti dobivene rezultate na *benchmark* testnim podacima, odnosno opće poznatim skupovima podataka koji se koriste u ovakvim vrstama istraživanja;
- e) Odabrati onaj pristup koji bi na osnovu dobivenih rezultata i zaključaka mogao riješiti VRP probleme velike dimenzionalnosti sa uključenim specifičnostima i praktičnim zahtjevima koji nisu analizirani u drugim radovima;
- f) Modelirati i implementirati novi hibridni algoritam koji će biti u stanju da riješi tako postavljeni problem;
- g) Opisati način prikupljanja realnih podataka i ograničenja iz praktičnih sistema neophodnih za uspješnu primjenu realiziranog hibridnog algoritma. Implementirati podmodul GPS praćenja vozila na osnovu kojeg će se dobiti dodatni podaci za analizu. Na osnovu tako dobivenih podataka iz datog podmodula kreiranjem i upotrebom savremenih *data mining* i/ili statističkih metoda odrediti zakonitosti među kupcima, putanjama i vozilima, te formulirati druge parametre sistema poput vremena istovara, ograničenja koji kupac ne može biti opslužen robom od određenog vozila i dr.;
- h) Kreirati *data mining* i/ili statističke metode koje će na osnovu dostupnih historijskih podataka moći ispravno podešavati konstante novokreiranog hibridnog algoritma po principu kontinuiranog učenja i donošenja ispravnih odluka;
- i) Realizirani hibridni, adaptivni, podacima vođen algoritam sa svim navedenim cjelinama prvo testirati nad testnim javno dostupnim podacima, a zatim nad realnim podacima, uslovima i ograničenjima. Da bi i drugi istraživači mogli dalje razvijati i usavršavati algoritme nad tim setom podataka, dostupne podatke objaviti u vidu novih *benchmark* podataka;
- j) Sve navedene korake objediniti u jedan jedinstveni web-bazirani sistem koji će na jednostavan način prezentirati rezultate, te će biti lagan i intuitivan za upotrebu za bilo kojeg korisnika koji ga bude koristio. Sistem će pratiti savremene pravce i koncepte web-baziranih aplikacija;
- k) Analizirati i obezbijediti mogućnost ručne modifikacije predloženih ruta unutar realiziranog web-baziranog sistema;

Praktična realizacija web-baziranog sistema će biti izvršena korištenjem Oracle JDeveloper+JHeadstart programskog alata [93]-[95], korištenjem Oracle Application Development Framework (ADF) okruženja [96], Java programskog jezika [97] i Oracle baze podataka [98]. Određeni dijelovi sistema će biti realizirani korištenjem C/C++ programskog jezika [99], te kao takvi biti inkorporirani sa ostalim segmentima cjelokupnog sistema u jednu jedinstvenu cjelinu koja će se moći koristiti od strane autorizovanih korisnika sistema.

## 6 Očekivani izvorni naučni doprinos

Istraživanje će pružiti naučni, stručni i praktični doprinos.

Osnovni naučni doprinos se sastoji u prijedlogu novog jedinstvenog i unificiranog, podacima vođenog, hibridnog algoritma rutiranja vozila za probleme velike dimenzionalnosti koji se može primijeniti na realne situacije iz ovog domena, uvažavajući pri tome praktična ograničenja koja nisu uzeta u razmatranje u drugim naučnim radovima iz ove oblasti. Naučni doprinos će se osim navedenog ogledati i u činjenici da će realni testni podaci (*benchmark*) nad kojima će se vršiti validacija novokreiranog algoritma biti javno objavljeni drugim istraživačima za dalje analize i eksperimente. U predloženom adaptivnom algoritmu svi podaci, uključujući i one historijske, će se savremenim i/ili sopstveno kreiranim metodama iskoristiti na način da će implementirani sistem poprimiti moć „učenja“ u svrhu dobivanja praktično primjenljivih optimalnih transportnih ruta.

Stručni doprinos će se odnositi na detaljan opis i izradu modela koji će se sastojati od nekoliko međusobno povezanih cjelina, te smjernice na koji način ih uvezati u jedan jedinstveni praktično primjenljiv algoritam.

Praktični doprinos će se ogledati u implementaciji web-baziranog sistema jednostavnog za korištenje, sa uključenom mogućnošću naknadne modifikacije predloženih ruta.

Osim navedenih doprinosa, sekundarni doprinosi doktorske disertacije uključuju sljedeće:

- sistematičan pregled literature sa detaljnom analizom prednosti i nedostataka postojećih formalno definisanih koncepata, modela i algoritama unutar oblasti,
- kreiranje modela za prikupljanje realnih podataka koji su neophodni za dobivanje optimalnih ruta, te onih na osnovu kojih će sistem „učiti“ i u svakoj iteraciji poboljšavati svoje performanse,
- integracija realiziranog sistema sa eksternim sistemima poput ERP rješenja kompanije koja je zainteresovana za implementaciju istog, zatim besplatno dostupnih GIS/GPS sistema, geografskih sistema vizuelni za prikaz dobivenih optimalnih ruta i dr.,
- analiza literature i realizacija zamišljenog hibridnog algoritma će zasigurno rezultirati otvaranjem novih pitanja i smjernica za dalja istraživanja i unapređenja, što se također može smatrati doprinosom.

## 7 Literatura

- [1] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- [2] Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W., & Vigo, D. (2007). Vehicle routing. *Handbooks in operations research and management science*, 14, 367-428.
- [3] Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408-416.
- [4] Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (Eds.). (2008). The vehicle routing problem: latest advances and new challenges. *Springer Science & Business Media, LLC*. Vol. 43.
- [5] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014). Vehicle routing: problems, methods, and applications. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- [6] Derigs, U., & Kaiser, R.. (2007). Applying the attribute based hill climber heuristic to the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 177, 719–732
- [7] Nagata Y., & Bräysy, O. (2008). Efficient Local Search Limitation Strategies for Vehicle Routing Problems. In: van Hemert J., Cotta C. (Eds.) *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. EvoCOP 2008. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4972. Springer, Berlin, Heidelberg
- [8] Nagata, Y., & Bräysy, O. (2009). Edge assembly based memetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *NETWORKS*, 54, 205-215.
- [9] Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34, 2403–2435
- [10] Kytöjoki, J., Nuortio, T., Bräysy O., & Gendreau M. (2007). An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34, 2743–2757.
- [11] Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin J.-Y., & Semet F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 512–522.
- [12] Laporte, G. (2007). What you should know about the vehicle routing problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54, 811–819.
- [13] Laporte, G. (2009). A concise guide to the traveling salesman problem. *Journal of the Operational Research Society*, 61(1), 35–40.
- [14] Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2010). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2041-2061.
- [15] FedEx. 2017. <<http://www.fedex.com/gb/about/index.html>> (pristup 27.06.2017.).
- [16] TNT Express. 2017. About TNT UK. <[http://www.tnt.com/express/en\\_gb/site/home/about\\_us/about\\_tnt\\_express.html](http://www.tnt.com/express/en_gb/site/home/about_us/about_tnt_express.html)> (pristup 27.06.2017.).
- [17] Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66.
- [18] Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges, Springer Science & Business Media, LLC*, 3-27.
- [19] Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175(1), 213-245.

- [20] Irnich, S., Schneider, M., & Vigo, D. (2014). Four variants of the vehicle routing problem. *Vehicle routing: problems, methods, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics*, 18, 241-271.
- [21] Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO - Operations Research*, 33(1), 1-14.
- [22] Ferland, J. A., & Michelon, P. (1988). The vehicle scheduling problem with multiple vehicle types. *Journal of the Operational Research Society*, 39(6), 577-583.
- [23] Li, F., Golden, B., & Wasil, E. (2007). A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(9), 2734-2742.
- [24] Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- [25] Liu, F. H., & Shen, S. Y. (1999). A method for vehicle routing problem with multiple vehicle types and time windows. *Proceedings-National Science Council Republic Of China Part A Physical Science And Engineering*, 23, 526-536.
- [26] Bräysy, O., Dullaert, W., Hasle, G., Mester, D., & Gendreau, M. (2008). An effective multirestart deterministic annealing metaheuristic for the fleet size and mix vehicle-routing problem with time windows. *Transportation Science*, 42(3), 371-386.
- [27] Paraskevopoulos, D. C., Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Ioannou, G., & Prastacos, G. P. (2008). A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, 14(5), 425-455.
- [28] Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2015). A hybrid evolutionary algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 64, 11-27.
- [29] Dondo, R., & Cerdá, J. (2007). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1478-1507.
- [30] Bettinelli, A., Ceselli, A., & Righini, G. (2011). A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 723-740.
- [31] Bettinelli, A., Ceselli, A., & Righini, G. (2014). A branch-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous-fleet pickup and delivery problem with soft time windows. *Mathematical Programming Computation*, 6(2), 171-197.
- [32] Teodorovic, D., Krčmar-Nozic, E., & Pavkovic, G. (1995). The mixed fleet stochastic vehicle routing problem. *Transportation Planning and Technology*, 19(1), 31-43.
- [33] Irnich, S. (2000). A multi-depot pickup and delivery problem with a single hub and heterogeneous vehicles. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 310-328.
- [34] Qu, Y., & Bard, J. F. (2014). A branch-and-price-and-cut algorithm for heterogeneous pickup and delivery problems with configurable vehicle capacity. *Transportation Science*, 49(2), 254-270.
- [35] Prins, C. (2002). Efficient heuristics for the heterogeneous fleet multitrip VRP with application to a large-scale real case. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 1(2), 135-150.

- [36] Seixas, M. P., & Mendes, A. B. (2013). Column generation for a multitrip vehicle routing problem with time windows, driver work hours, and heterogeneous fleet. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- [37] Chu, C. W. (2005). A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 657-667.
- [38] Potvin, J. Y., & Naud, M. A. (2011). Tabu search with ejection chains for the vehicle routing problem with private fleet and common carrier. *Journal of the Operational Research Society*, 62(2), 326-336.
- [39] Nag, B., Golden, B. L., & Assad, A. (1988). Vehicle routing with site dependencies. *Vehicle routing: Methods and studies*, 149-159.
- [40] Chao, I. M., Golden, B., & Wasil, E. (1999). A computational study of a new heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 37(3), 319-336.
- [41] Juan, A. A., Goentzel, J., & Bektaş, T. (2014). Routing fleets with multiple driving ranges: Is it possible to use greener fleet configurations?. *Applied Soft Computing*, 21, 84-94.
- [42] Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254.
- [43] Kritikos, M. N., & Ioannou, G. (2013). The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows. *International Journal of Production Economics*, 144(1), 68-75.
- [44] Afshar-Nadjafi, B., & Afshar-Nadjafi, A. (2014). A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet. *Journal of King Saud University - Engineering sciences*.
- [45] Yao, B., Yu, B., Hu, P., Gao, J., & Zhang, M. (2016). An improved particle swarm optimization for carton heterogeneous vehicle routing problem with a collection depot. *Annals of Operations Research*, 242(2), 303-320.
- [46] Coelho, L., Renaud, J. & Laporte, G. (2016). Road-based goods transportation: A survey of real-world logistics applications from 2000 to 2015. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54, 1-18.
- [47] Osaba, E., Carballedo, R., Diaz, F., Onieva, E., Masegosa, A., & Perallos, A. (2017). Good Practice Proposal for the Implementation, Presentation, and Comparison of Metaheuristics for Solving Routing Problems. *Neurocomputing*.
- [48] Lahyani, R., Coelho, L., & Renaud, J. (2015). Alternative Formulations and Improved Bounds for the Multi-Depot Fleet Size and Mix Vehicle Routing, *CIRRELT-2015-36*.
- [49] Atefi, R., Salari, M., Coelho, L., & Renaud, J. (2017). The Open Vehicle Routing Problem with Decoupling Points. *European Journal of Operational Research*, 10.1016/j.ejor.2017.07.033.
- [50] Tarantilis, C. D., Diakoulaki, D., & Kiranoudis, C. (2004). Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations. *European Journal of Operational Research*, 152, 437-453.
- [51] Fu, C., & Wang, H. (2010). The solving strategy for the real-world vehicle routing problem. *3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, 2010*, 3182-3185.
- [52] Alinaghian, M. (2014). A Navel Heuristic Algorithm for Combining biased randomization with iterated local search for solving the multidepot vehicle routing problemthe Periodic Vehicle Routing Problem. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 25(2), 139-149.

- [53] Rasku, J., Kärkkäinen, T., & Musliu, N. (2016). Feature Extractors for Describing Vehicle Routing Problem Instances. *5th Student Conference on Operational Research (SCOR'16)*, Article No. 7, 7:1–7:13
- [54] Pollaris, H., Braekers, K., Caris, A., Janssens, G. K. & Limbourg, S. (2017), Iterated local search for the capacitated vehicle routing problem with sequence-based pallet loading and axle weight constraints. *NETWORKS*, 69, 304–316.
- [55] Cooray, P. L. N. U., & Rupasinghe, T. D. (2016). An Analysis of Methodologies for Solving Green Vehicle Routing Problem: A Systematic Review of Literature. *R4TLI Conference Proceedings 2016, R4TLI-B42*.
- [56] Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (Eds.). (2008). The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, 43(1)
- [57] Uchoa, E., Pecin, D., Pessoa, A., Poggi, M., Vidal, T., & Subramanian, A. (2016). New Benchmark Instances for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 257.
- [58] Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2001). A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods. *Journal of food Engineering*, 50(1), 1-9.
- [59] Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2007). A flexible adaptive memory-based algorithm for real-life transportation operations: Two case studies from dairy and construction sector. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 806-822.
- [60] Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T., & Vassiliadis, V. S. (2003). A list based threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 65-71.
- [61] Calvete, H. I., Galé, C., Oliveros, M. J., & Sánchez-Valverde, B. (2007). A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1720-1733.
- [62] Yoshizaki, H. T. Y. (2009). Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 750-758.
- [63] Dullaert, W., Janssens, G. K., Sörensen, K., & Vernimmen, B. (2002). New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 1232-1238.
- [64] Ho, S. C., & Haugland, D. (2004). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers & Operations Research*, 31(12), 1947-1964.
- [65] Xu, Y., & Jiang, W. (2014). An improved variable neighborhood search algorithm for multi depot heterogeneous vehicle routing problem based on hybrid operators. *International Journal of Control and Automation*, 7(3), 299-316.
- [66] Moutaoukil, A., Neubert, G., & Derrouiche, R. (2014, September). A comparison of homogeneous and heterogeneous vehicle fleet size in green vehicle routing problem. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 450-457). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [67] Yao, B., Yu, B., Hu, P., Gao, J., & Zhang, M. (2016). An improved particle swarm optimization for carton heterogeneous vehicle routing problem with a collection depot. *Annals of Operations Research*, 242(2), 303-320.

- [68] Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- [69] Liu, F. H., & Shen, S. Y. (1999). The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research society*, 721-732.
- [70] Cordeau, J. F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational research society*, 52(8), 928-936.
- [71] Lee, W. L. (2013). Real-Life Vehicle Routing with Non-Standard Constraints. *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE) 2013*, Vol I, 432-437.
- [72] Hu, X., Huang, M. & Zeng, A. (2007). An intelligent solution system for a vehicle routing problem in urban distribution. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 3.
- [73] Musolino, G., Rindone, C., Polimeni, A., & Vitetta, A. (2013). Travel Time Forecasting and Dynamic Routes Design for Emergency Vehicles. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 87, 193-202.
- [74] Marković, H., Čavar, I., & Carić, T. (2005). USING DATA MINING TO FORECAST UNCERTAIN DEMANDS IN STOCHASTIC VEHICLE ROUTING PROBLEM. *ISEP 2005*.
- [75] Wang, W,m & Wu, Y. (2012). A multi-stage algorithm for the real-world large-scale vehicle routing problem. *World Automation Congress Proceedings*, 1-4.
- [76] Carić, T., Galić, A., Fosin, J., Gold, H., & Reinholz, A. (2008). A Modelling and Optimization Framework for Real-World Vehicle Routing Problems, Vehicle Routing Problem, Tonci Caric and Hrvoje Gold (Ed.), *InTech*, DOI: 10.5772/5790. Available from: [https://www.intechopen.com/books/vehicle\\_routing\\_problem/a\\_modelling\\_and\\_optimization\\_framework\\_for\\_real-world\\_vehicle\\_routing\\_problems](https://www.intechopen.com/books/vehicle_routing_problem/a_modelling_and_optimization_framework_for_real-world_vehicle_routing_problems) (pristup 17.08.2017.).
- [77] Calvet, L., Ferrer, A., Gomes, M., Juan, A., & Masip, D. (2016). Combining statistical learning with metaheuristics for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem with market segmentation. *Computers & Industrial Engineering*, 94.
- [78] Calvet, L., Juan, A. A., Serrat, C., & Ries, J. (2016). A statistical learning based approach for parameter fine-tuning of metaheuristics. *SORT - Statistics and Operations Research Transactions*, 40(1), 201-240.
- [79] Birattari, M., & Kacprzyk, J. (2009). Tuning metaheuristics: a machine learning perspective. *Springer*, Vol. 197.
- [80] Montero, E., Riff, M. C., & Neveu, B. (2014). A beginner's guide to tuning methods. *Applied Soft Computing*, 17, 39-51.
- [81] Ries, J., Beullens, P., & Salt, D. (2012). Instance-specific multi-objective parameter tuning based on fuzzy logic. *European Journal of Operational Research*, 218, 305-315.
- [82] Battiti, R., & Brunato, M. (2010). Reactive Search Optimization: Learning While Optimizing, *Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science*, 543-571.
- [83] Coy, S. P., Golden, B. L., Runger, G. C., & Wasil, E. A. (2001). Using Experimental Design to Find Effective Parameter Settings for Heuristics. *Journal of Heuristics*, 7(1) 77-97.
- [84] Cooray, L. N. U., P & Rupasinghe, P. T. (2017). Machine Learning-Based Parameter Tuned Genetic Algorithm for Energy Minimizing Vehicle Routing Problem. *Journal of Industrial Engineering*, 2017, 1-13. 10.1155/2017/3019523.



- [85] Corstjens, J., Depaire, B., Caris, A., & Sörensen, K. (2016). A Multilevel Methodology for Analysing Metaheuristic Algorithms for the VRPTW. *EU/ME 2016 - Design and Analysis of Metaheuristics*.
- [86] Lessmann, S., Caserta, M., & Montalvo, I. (2011). Tuning metaheuristics: A data mining based approach for particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 38, 12826-12838.
- [87] Moghaddam, B. M., Ruiz, R., & Sadjadi, S. (2012). Vehicle routing problem with uncertain demands: An advanced particle swarm algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 306-317.
- [88] Kritzinger, S., Doerner, K., Tricoire, F., & Hartl, R. (2014). Adaptive search techniques for problems in vehicle routing, Part I: A survey. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25, 3-31.
- [89] Kritzinger, S., Doerner, K., Tricoire, F., & Hartl, R. (2014). Adaptive search techniques for problems in vehicle routing, Part II: A numerical comparison. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25, 11-11.
- [90] Sharda, R., & Voß, S. (2013). Operations Research/Computer Science Interfaces Series: Advances in Metaheuristics. *Springer*, Vol. 53.
- [91] Hepdogan, S. (2006). Meta-raps: Parameter Setting And New Applications. *Electronic Theses and Dissertations*, 914.
- [92] Ries, J. & Beullens, P. (2015). A semi-automated design of instance-based fuzzy parameter tuning for metaheuristics based on decision tree induction. *Journal of the Operational Research Society*, 66(5), 782–793
- [93] Oracle. (2011). Oracle Fusion Middleware User's Guide for Oracle JDeveloper 11g, E17455-02, [https://docs.oracle.com/cd/E24382\\_01/user.1112/e17455.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E24382_01/user.1112/e17455.pdf)
- [94] Oracle. (2013). Oracle JHeadstart Developer's Guide, <http://download.oracle.com/consulting/jhsdevguide1111.pdf>
- [95] Oracle. (2010). Building Rich Enterprise JSF Applications with Oracle JHeadstart for ADF (11.1.1), <http://download.oracle.com/consulting/jhstutorial1111.pdf>
- [96] Oracle. (2011). Fusion Developer's Guide for Oracle Application Development Framework, B31974-11, [https://docs.oracle.com/cd/E23943\\_01/web.1111/b31974.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E23943_01/web.1111/b31974.pdf)
- [97] Oracle: Gosling, J., Joy, B., Steele, G., Bracha, G., & Buckley, A. (2011). The Java<sup>®</sup> Language Specification, <https://docs.oracle.com/javase/specs/jls/se7/jls7.pdf>
- [98] Oracle: Lorentz D., & Roeser, M. B. (2016). Oracle Database SQL Language Reference, 11g Release 2, E41084-04, [https://docs.oracle.com/cd/E11882\\_01/server.112/e41084.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E11882_01/server.112/e41084.pdf)
- [99] Tutorials Point (I) Pvt. Ltd. (2012). LEARN C++ programming language. [http://cds.iisc.ac.in/wp-content/uploads/DS286.AUG2016.Lab2\\_.cpp\\_tutorial.pdf](http://cds.iisc.ac.in/wp-content/uploads/DS286.AUG2016.Lab2_.cpp_tutorial.pdf)