



Universitatea Alexandru Ioan Cuza din Iasi, Romania
Facultatea de Informatica



Metode Bazate pe Calcul Evolutiv pentru Probleme de Rutare a Vehiculelor si Planificare

Candidat PhD
Raluca Iulia Necula

Coordonator
Prof. Dr. Dorel Lucanu

Rezumat Extins

Ianuarie 2018

Rezumat

Teza vizeaza investigarea a doua probleme de rutare si planificare a vehiculelor, si anume problema comis voiajorului multiplu (mTSP) si problema de rutare a vehiculului cu ferestre de timp (VRPTW), care este una dintre cele mai importante si populare extensii ale problemei de rutare a vehiculului (VRP). Problema comis voiajorului multiplu, o extensie directa a binecunoscutei probleme a comis voiajorului (TSP), poate fi vazuta ca un caz specific a problemei de rutare a vehiculului, daca sunt eliminate cererile clientilor si capacitatea vehiculului, implicate in formularea problemei clasice de rutare a vehiculului. Prin urmare, mTSP sta la baza multor probleme de optimizare intalnite in domeniile de transport si logistica. Data fiind nevoia in crestere pentru mobilitate si implicatiile sale in domeniile de logistica si management a lantului de aprovizionare, care se bazeaza foarte mult pe distributia rutiera, VRP, cu mTSP la baza, a atras de-a lungul anilor interes mare din partea cercetatorilor, fiind intens studiata.

De vreme ce aceste doua probleme de optimizare combinatoriala sunt NP-hard, fiind dificil de rezolvat, iar metodele exacte adesea necesita timpi mari de calcul, care sunt inacceptabili în scenariile din viata reala, abordarile metaeuristice sunt cel mai adesea folosite spre rezolvarea lor. In acest scop, teza propune o colectie de algoritmi bazati pe ant colony optimization (ACO) pentru rezolvarea a doua variante a mTSP cu un singur obiectiv, una care isi propune sa obtina tururi balansate, si o alta care are drept scop minimizarea costului celui mai lung tur, realizand in acest fel o distributie egala a volumului de munca intre voiajori. In plus, problema bi-obiectiva mTSP, care cauta sa minimizeze simultan distanta totala parcursa si gradul de dezechilibrare al tururilor, este de asemenea abordata in teza prin recurgerea la diferiti algoritmi multi-obiectiv bazati pe ACO. Un alt studiu legat de mTSP, examineaza corelatia intre mecanismul folosit pentru selectarea voiajorului de-a lungul fazei de constructie a turului si calitatea solutiei obtinute, subiect care nu a mai fost investigat inainte in literatura.

Ultima parte a tezei este axata pe problema VRPTW, pentru care o colectie de algoritmi ACO sunt propusi. Mai intai, este abordata problema VRPTW cu un singur obiectiv, care considera o functie obiectiv ierarhica, cand cautam sa minimizam cu prioritate numarul de vehicule, si in al doilea rand cautam sa minimizam distanta totala parcursa. In continuare, problema bi-obiectiv VRPTW este investigata prin intermediul unui algoritm ACO multi-obiectiv care foloseste o schema de descompunere, cand cele doua obiective precedente sunt tratate in mod egal. Data fiind relevanta sa practica, apropiata de contexte din lumea reala, problema dinamic VRPTW este de asemenea studiata in teza. Aceasta problema presupune aparitia de-a lungul zilei de lucru a cererilor online de la clienti, anterior necunoscute in sistem, care trebuie sa fie incorporate intr-un program in curs de evolutie, in timp ce vehiculele isi executa rutele.

Concluzionand, teza concepe si examineaza un numar de 23 de algoritmi bazati pe ACO, meniti sa abordeze doua probleme importante de rutare avand largi aplicatii practice, mTSP si VRPTW. Analiza experimentală aprofundată a metodelor propuse arata ca acestia sunt capabili sa obtina rezultate satisfacatoare, furnizand intr-un timp limitat solutii de calitate buna, care in unele cazuri sunt competitive cu alte solutii raportate in literatura. Algoritmii bazati pe ACO proiectati pentru rezolvarea problemei bi-obiectiv mTSP, surclaseaza alti trei algoritmi ACO multi-obiectiv propusi in literatura. In plus, algoritmul dezvoltat pentru abordarea problemei DVRPTW, care este strans legata de scenariul din lumea reala, se dovedeste a fi superior altui algoritm din literatura bazat pe ACO, si reuseste sa gaseasca noi solutii cele mai bune pentru instante cu un nivel ridicat de dinamicitate, in care putine cereri din partea clientilor sunt cunoscute de la inceput, caz care este mai probabil sa apara in situatii reale. Un benchmark de instante mTSP pentru care sunt raportate solutii (sub)optimale, calculate prin metode exacte de catre software-ul de optimizare CPLEX este introdus in teza si facut disponibil online pentru a ajuta cercetatorii atunci cand isi evalueaza comparativ euristicile propuse. Pentru evaluarea performantei algoritmilor propusi pentru rezolvarea variantelor de problema VRPTW, sunt folosite instantele de test ale lui Solomon cu 100 de clienti, fiind un benchmark binecunoscut, frecvent utilizat in literatura, care este de asemenea disponibil online. In afara de aceasta, in scopul de a permite cititorului interesat sa reproduca rezultatele raportate, instantele de test DVRPTW si codul sursa al unor algoritmi sunt facute disponibile in mod gratuit.

Cuprins

1	Lista Lucrari Stiintifice	1
2	Prezentarea Tezei	2
2.1	Motivatie	2
2.2	Contributii	4
2.3	Structura Tezei	6
2.4	Abordari Bazate pe ACO pentru Problema Comis Voiajorului Multiplu .	7
2.5	Abordari Bazate pe ACO pentru Problema de Rutare a Vehiculului	8
3	Concluzii si Munca Viitoare	11
	Bibliografie	14
	Lista de Abrevieri	15

Lista Lucrari Stiintifice

- [CONTR1] Raluca Necula, Mihaela Breaban, Madalina Raschip. *Tackling Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows by means of ant colony system*. In 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pages 2480-2487, IEEE Press, 2017, doi:10.1109/CEC.2017.7969606
- [CONTR2] Raluca Necula, Mihaela Breaban, Madalina Raschip. *Tackling the Bi-criteria Facet of Multiple Traveling Salesman Problem with Ant Colony Systems*. In Proceedings of the 2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI 2015, pages 873-880, IEEE Press, 2015, doi:10.1109/ICTAI.2015.127
- [CONTR3] Raluca Necula, Mihaela Breaban, Madalina Raschip. *Performance evaluation of ant colony systems for the single-depot multiple traveling salesman problem*. In E. Onieva, I. Santos, E. Osaba, H. Quintian, & E. Corchado (Eds.), Proceedings of the 10th International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems, HAIS 2015, pages 257-268, volume 9121 of Lecture Notes in Computer Science, 2015, doi:10.1007/978-3-319-19644-2_22
- [CONTR4] Raluca Necula, Madalina Raschip, Mihaela Breaban. *Balancing the Subtours for Multiple TSP Approached with ACS: Clustering-based Approaches vs. MinMax Formulation*. In Proceedings of EVOLVE - A Bridge between Probability, Set Oriented Numerics, and Evolutionary Computation VI, EVOLVE 2015, pages 210-223, volume 674 of Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2018, doi:10.1007/978-3-319-69710-9_15

Prezentarea Tezei

2.1 Motivatie

Transportul joaca un rol important in viata noastra moderna, deoarece acopera o mare varietate de situatii variind de la distributia de produse industriale si furnizarea de servicii in diferite parti din intreaga lume pana la sprijinirea miscarii zilnice a oamenilor in diverse activitati. De asemenea, transportul rutier reprezinta modalitatea predominanta de livrare si ridicare a bunurilor din intreaga lume. Doua probleme binecunoscute de optimizare combinatoriala asociate cu sarcina de transport sunt problema comis voiajorului (TSP) si problema de rutare a vehiculului (VRP), care isi au originea in multe aplicatii din lumea reala ce pot fi modelate in mod natural ca diferite probleme relateate cu TSP si VRP. In conexiune cu aceste doua probleme de rutare, teza se preocupa cu problema mTSP, o generalizare a problemei TSP, care utilizeaza mai multi voiajori pentru vizitarea setului dat de orase, si cu problema VRPTW, o extensie a problemei clasice VRP, care considera in plus o constrangere de fereastră de timp asignata fiecarui client. Majoritatea problemelor cu privire la transport, care au un impact negativ asupra vietilor noastre, sunt asociate cu o utilizare ineficienta a infrastructurii rutiere disponibile. Exemple de astfel de efecte negative includ congestia, cresterea poluarii si mai multe accidente rutiere. Prin urmare, adresarea acestor probleme de transport rutier prin cercetarea problemelor precum VRPTW si mTSP, un caz special al VRP, este de o importanta cruciala intrucat poate atenua aceste probleme si poate imbunatati calitatea vietilor noastre. In afara de aceasta, globalizarea economiei mondiale conduce catre o crestere constanta a volumului de marfuri care necesita sa fie transportate intre diferite locatii in timp util. In scopul de a ramane competitivi pe piata, companiile de distributie trebuie sa-si eficientizeze operatiile si sa utilizeze sisteme asistate de calculator care sa

integreze metode de optimizare care sa vina in sprijinul procesului de luare a deciziilor. Astfel, trebuie sa fie investite eforturi catre determinarea planurilor de rutare eficiente care sa diminueze costul global de rutare suportat, si totodata sa fie satisfacute diferite constrangeri, aspect care implica rezolvarea diferitelor variante ale problemei VRP. In plus, gasirea strategiilor optimale in aceste probleme de rutare ajuta la reducerea emisiilor care au un impact negativ asupra mediului, si in acelasi timp atenuaza intarzierile la livrare, care in schimb creste satisfactia clientilor.

Problema de rutare a vehiculului a fost studiata pe scara larga de mai bine de 50 de ani, si astfel, s-a cristalizat de-a lungul anilor intr-un domeniu activ de cercetare. De asemenea, VRP este una dintre cele mai importante probleme de optimizare combinatoriala, avand multe aplicatii practice in domenii precum transportul si logistica, care acopera o gama larga de situatii intalnite in lumea reala, implicand distributia si colectarea bunurilor sau persoanelor dintr-un loc in altul. In afara de aceasta, studiul problemei VRP are o importanta practica, intrucat poate aduce contributii valoroase in sistemele de logistica, prin reducerea costurilor asociate, care determina ca problema VRP sa aiba un impact economic considerabil. Asa cum s-a mentionat in Toth & Vigo (2001), prin aplicarea metodelor computerizate in rezolvarea problemelor de rutare care apar in transport, se pot obtine economii semnificative variind de la 5% la 20% privind costurile totale. Acest lucru este mai proeminent in unele sectoare de piata, in care transportul reprezinta un procentaj mare din pretul final al produselor.

Desi sta la baza problemei VRP, si in acelasi timp este o generalizare directa a problemei TSP, o problema de optimizare combinatoriala binecunoscuta, studiata intens de-a lungul anilor, mTSP a primit mai putin interes de cercetare, iar aplicatii ale algoritmilor ACO pentru aceasta problema nu au fost atat de larg investigate. mTSP poate fi considerata ca o problema intermediara, care este situata intre TSP si VRP din punct de vedere al complexitatii sale implicate: mTSP este mai dificil de rezolvat decat TSP, insa in acelasi timp este o problema mai simpla in comparatie cu VRP, care incorporeaza constrangeri si aspecte aditionale in formularea sa. Mai mult decat atat, mTSP sta la baza multor probleme ce apar in domeniile de transport si logistica si prin urmare, se merita studierea acestei probleme pentru a se concepe algoritmi eficienti capabili sa furnizeze solutii de calitate buna intr-un timp rezonabil. Cealalta problema examinata in teza, VRPTW, are o relevanta practica considerabila, fiind mai apropiata de scenariile din lumea reala decat problema clasica VRP, prin integrarea in formularea sa a constrangerii legate de ferestre de timp, astfel incat clientii sunt disponibili pentru livrarea bunurilor sau a serviciilor doar intr-un anumit interval de timp.

Deoarece metodele exacte nu pot fi aplicate in mod fezabil in situatii practice pentru a rezolva in timp util probleme dificile precum mTSP si VRPTW, am recurs la algoritmi metaeuristici pentru rezolvarea lor. De-a lungul anilor, abordari bazate pe swarm intelligence cum ar fi algoritmi ACO au fost aplicate cu succes pentru rezolvarea multor probleme de optimizare combinatoriala. In plus, algoritmi ACO pot fi aplicati in mod natural pe probleme care necesita gasirea celor mai scurte drumuri intr-un graf, cum este cazul problemei TSP, si de asemenea mTSP si VRPTW, care sunt generalizari ale TSP. Un set de algoritmi bazati pe metaeuristica ACO sunt propusi si investigati in teza pentru abordarea mai multor variante de probleme mTSP si VRPTW, care sunt analizate atat ca probleme cu un singur obiectiv, dar totodata si dintr-o perspectiva multi-obiectiv. Pentru majoritatea abordarilor propuse, rezultatele experimentale indica ca metodele bazate pe colonia de furnici sunt eficiente si sunt capabile sa produca rezultate competitive cu cele raportate in literatura.

2.2 Contributii

Principalele contributii ale tezei pot fi sumarizate dupa cum urmeaza:

- Dat fiind faptul ca nu sunt disponibile gratuit benchmarks pentru mTSP, asa cum este TSPLIB¹ pentru TSP, este introdus in teza un benchmark de instante mTSP, disponibil online ca MTSP LIB², pentru care raportam solutiile (sub)optimale obtinute atunci cand rezolvam aceste instante prin metode exacte de catre software-ul de optimizare CPLEX. Scopul este ca acest benchmark sa fie reutilizat de catre alti cercetatori atunci cand evalueaza performanta metodelor lor propuse pentru abordarea mTSP.
- Cinci algoritmi bazati pe ACS sunt dezvoltati si evaluati comparativ pentru abordarea problemei marginite mTSP cu un singur obiectiv, care pe langa minimizarea distantei totale parcurse, cautam sa obtinem tururi balansate in privinta numarului de orase vizitate in turul unui voiajor, astfel incat sa se obtina echitate intre volumul de munca asigurat fiecarui voiajor (rezultate publicate in articolul [CONTR3]).
- Pentru a obtine tururi balansate, am integrat tehnici de clusterizare precum K-means si Fuzzy C-means in cadrul mai multor algoritmi bazati pe ACS proiectati pentru varianta MinMax a mTSP, cu scopul de a partitiona orasele date in cel

¹<http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>

²<http://profs.info.uaic.ro/~mtsplib>

mai bun mod posibil in multimii disjuncte care sa fie asignate voiajorilor. Aceasta varianta mTSP desi are relevanta practica, a fost mai putin studiata in literatura, si din cele mai bune cunostinte, putine articole au recurs la algoritmi de clusterizare atunci cand s-au ocupat de varianta MinMax mTSP (rezultate publicate in articolul [CONTR4]).

- Un algoritm bazat pe ACO ce respecta abordarea MinMax este proiectat pentru tratarea problemei mTSP bi-obiectiv, care surclaseaza alti algoritmi ACO multi-obiectiv propusi in literatura. Acest studiu isi propune sa umple un gol existent in literatura, intrucat putine studii au fost identificate care trateaza problema mTSP dintr-o perspectiva multi-obiectiv. In plus, in urma revizuirii literaturii a reiesit ca nu exista metode bazate pe ACO care sa abordeze mTSP intr-un mod explicit dintr-o perspectiva multi-obiectiv (rezultate publicate in articolul [CONTR2]).
- O revizuire a literaturii asupra schemelor existente utilizate in algoritmi bazati pe ACO de-a lungul procesului de construire a tururilor, atunci cand se rezolva problema mTSP.
- Un set de algoritmi ACO care utilizeaza diferite mecanisme de selectie a voiajorului atunci cand construiesc o solutie pentru mTSP, si o noua schema de selectie simultana este propusa, care alege simultan intr-un singur pas voiajorul si orasul urmator care sa fie vizitat in turul sau. Rezultatele sunt analizate atat dintr-o perspectiva cu un singur obiectiv, cat si multi-obiectiv. Din cele mai bune cunostinte, nu exista studii precedente care sa trateze mTSP in acelasi timp din ambele aspecte, si sa analizeze corelatia intre schema de selectie a voiajorului utilizata in procesul de constructie a solutiei si calitatea solutiilor obtinute.
- Un algoritm ACO multi-obiectiv care se bazeaza pe o schema de descompunere pentru abordarea problemei bi-obiectiv static VRPTW. In afara faptului ca prin comparatie cu problema VRPTW cu un singur obiectiv, varianta multi-obiectiv a VRPTW a primit mai putina atentie, din cele mai bune cunostinte, nu exista in literatura abordari ACO bazate pe descompunere pentru rezolvarea VRPTW dintr-o perspectiva multi-obiectiv.
- Un algoritm bazat pe ACO care apeleaza la un mecanism simultan de constructie a solutiei pentru tratarea problemei dinamice VRPTW cu un singur obiectiv. De asemenea, metoda propusa integreaza o procedura de cautare locala si o euristica de inserare, menite a reduce in plus numarul de vehicule necesare pentru a deservi clientii. Revizuirea literaturii a aratat ca putine abordari care utilizeaza algoritmi

ACO au fost propusi pentru rezolvarea acestei variante VRPTW de o relevanta practica semnificativa, fiind strans legata de scenarii din lumea reala. Analiza experimentală a aratat ca metoda noastra este competitiva si surclaseaza o alta abordare ACO din literatura, reusind sa obtina rezultate mai bune in special pe instantele DVRPTW cu un nivel de dinamicitate mai mare (rezultate publicate in articolul [CONTR1]).

- In afara de elaborarea si examinarea algoritmilor ACO mentionati mai sus pentru abordarea problemelor mTSP si VRPTW, un efort semnificativ a fost dedicat implementarii acestor abordari. Metodele propuse au fost dezvoltate in Java, si sunt bazate pe versiunea Java a pachetului software ACOTSP³, care contine mai multi algoritmi ACO utilizati pentru rezolvarea instantelor TSP simetrice.

2.3 Structura Tezei

Capitolul 1 ofera motivatia care a stat la baza cercetarilor efectuate in teza, cu privire la doua probleme care sunt investigate: problema comis voiajorului multiplu (mTSP) si problema de rutare a vehiculului cu ferestre de timp (VRPTW). Apoi, urmeaza enumerarea contributiilor tezei, iar in final, este prezentata organizarea tezei.

Capitolul 2 furnizeaza fundamentul teoretic prin prezentarea in linii generale a metaeuristicii ACO, si descrie doi algoritmi ACO, Ant Colony System (ACS) si Max-Min Ant System (MMAS), pe care sunt bazate metodele prezentate in Capitolul 3 si 4 pentru abordarea problemelor mTSP si VRPTW, respectiv.

Capitolul 3 este dedicat problemei mTSP, prin prezentarea variantelor sale, a benchmarkului propus de instante mTSP si prin realizarea unui studiu a literaturii privind aceasta problema. De asemenea, mai multe abordari bazate pe ACO sunt concepute si investigate pentru tratarea diferitelor variante ale problemei mTSP, care este examinata atat ca o problema cu un singur obiectiv cat si ca o problema multi-obiectiv.

Capitolul 4 adreseaza problema VRP, prin prezentarea variantelor sale si prin revizuirea lucrarilor relationate privind problema VRPTW, o extensie a problemei clasice VRP. Intrucat mTSP poate fi vazuta ca o versiune simplificata a problemei clasice VRP, unii din algoritmi ACO propusi in Capitolul 3 sunt extinsi si adaptati in Capitolul 4

³Thomas Stützle. ACOTSP, Versiunea 1.0. Disponibil la <http://www.aco-metaheuristic.org/aco-code>, 2004.

pentru rezolvarea problemei VRPTW. Ca si in cazul mTSP, algoritmi ACO proiectati sunt meniti sa abordeze VRPTW ca o problema cu un singur obiectiv si multi-obiectiv, dar in plus investigam de asemenea VRPTW ca o problema dinamica cu un singur obiectiv.

In final, concluziile si directiile viitoare de cercetare sunt prezentate in Capitolul 5.

2.4 Abordari Bazate pe ACO pentru Problema Comis Voiajorului Multiplu

Desi nu a fost atat de intens studiata ca TSP, mTSP este o extensie directa a TSP de o importanta practica, necesitand ca mai mult de un voiajor sa fie utilizat pentru acoperirea intregii multimi de orase. Dupa ce este data descrierea problemei mTSP, si indicarea varinatelor acesteia, un benchmark de instante mTSP este introdus in teza. Apoi sunt prezentate mai multe studii, care folosesc algoritmi ACO, spre rezolvarea problemei mTSP dintr-o perspectiva cu un singur obiectiv si multi-obiectiv. Proiectati pentru probleme de drumuri minime si cu eficienta dovedita pentru TSP, algoritmi de tip ant colony sunt de asemenea o alegere naturala pentru mTSP.

In sectiunea 3.4.2 am evaluat comparativ performanta mai multor metode bazate pe ACO pentru versiunea balansata a mTSP, in care impunem limite inferioare si pentru numarul de orase care sa vizitate intr-un tur, astfel incat sa se obtina o distributie echitabila a volumului de munca intre voiajori. Rezultatele sunt raportate la solutiilor optime obtinute pe benchmarkul mTSP din Sectiunea 3.3 utilizand software-ul de optimizare CPLEX. Aceasta este o prima incercare de a face disponibil in mod public un benchmark pentru mTSP, impreuna cu raportarea solutiile (sub)optimale calculate pe aceste instante cu CPLEX. In acelasi timp, acest studiu isi propune sa umple un gol gasit in literatura, dat fiind faptul ca nu exista nicio cercetare care sa evalueze performanta relativa a mai multor algoritmi bazati pe ACO pentru mTSP.

In sectiunea 3.4.3 am cautat de asemenea sa echilibram tururilor voiajorilor, dar in termeni de distanta (cost) al fiecarui tur. Pentru aceasta, am utilizat formularea Min-Max a mTSP, care desi are o importanta practica mai mare, a fost mai putin studiata in literatura. In scopul de a obtine un volum de munca echilibrat, metodele propuse incorporeaza tehnici de clusterizare, care nu au mai fost considerate inainte intr-o combinatie cu un algoritm de swarm intelligence pentru rezolvarea variantei MinMax mTSP.

Ca o extensie a celor doua studii precedente, care considera mTSP ca o problema cu un singur obiectiv, am abordat in continuare mTSP dintr-o perspectiva multi-obiectiv, dat fiind faptul ca putine studii anterioare au adresa aspectul bi-criterial al mTSP intr-o maniera explicita. Astfel, am investigat in Sectiunea 3.5.2 trei algoritmi ACO multi-obiectiv si unul cu un singur obiectiv, si am analizat performanta lor cu privire la calitatea aproximarilor construite ale frontului Pareto. Sectiunea 3.6 a examinat corelatia intre mecanismul folosit pentru selectarea voiajorului in timpul etapei de construire a turului, si calitatea solutiilor obtinute, aspect care nu a mai fost investigat pana acum in literatura. In acest sens, am propus trei scheme, dintre care doua sunt secventiale, in care voiajorul este selectat intr-un mod aleator si intr-o maniera probabilista, respectiv, si ultima, fiind o schema de selectie simultana, in care voiajorul si orasul de vizitat in turul sau sunt alesi simultan in acelasi pas. Comparat cu abordarile existente in literatura, am evaluat solutiile obtinute sub doua aspecte, astfel incat solutiile sunt analizate atat dintr-o perspectiva cu un singur obiectiv, dat fiind obiectivul MinMax, dar de asemenea si intr-un context bi-criterial, asa cum s-a efectuat in Sectiunea 3.5.2.

2.5 Abordari Bazate pe ACO pentru Problema de Rutare a Vehiculului

Problema de Rutare a Vehiculului (VRP) este o problema studiata pe scara larga in domeniul de Cercetari Operationale, datorita aplicabilitatii sale mari in managementul lantului de aprovizionare, care implica livrarea si/sau colectarea fizica de bunuri sau servicii de la clienti. De asemenea, mai multe studii efectuate in teza cu privire la o varianta VRP, si anume problema de rutare a vehiculului cu ferestre de timp (VRPTW), care este una dintre cele mai studiate variante ale VRP, sunt descrise mai departe. Atunci cand fiecare client are asociata o fereastră de timp, atunci avem de-a face cu VRPTW, o problema NP-hard studiata pe scara larga, care este unul dintre cele mai popular tip de problema de rutare. In VRPTW mai multi clienti trebuie sa fie serviti in cadrul intervalului de timp specificat, iar programul rutelor vehiculelor trebuie sa fie stabilit. Metodele propuse pot fi vazute ca extensii pentru problema VRPTW a algoritmilor ACO proiectati in Capitolul 3 pentru problema mTSP. Aceasta afirmatie este justificata de faptul ca mTSP poate fi considerata ca o versiune simplificata a problemei (clasice) VRP, care asuma numai capacitatile vehiculelor drept constrangere aditionala. Daca capacitatile vehiculelor sunt suficient de mari in VRP astfel incat sa nu restrictioneze

capacitatile vehiculelor, atunci VRP este aceeași problema ca și mTSP, și prin urmare mTSP poate fi văzută ca VRP fără capacitate.

Sectiunea 4.3 prezinta o munca preliminara in proiectarea algoritmilor ACO care se ocupa cu problema statica VRPTW cu un singur obiectiv. In acest sens, trei metode bazate pe ACS sunt propuse si examinate, una dintre ele incluzand o euristica de inserare combinata cu operatori de cautare locala, faza intentionata sa mai reduca din numarul de vehicule necesare pentru servirea tuturor clientilor. Evaluarea algoritmilor investigati este realizata considerand o ierarhie intre cele doua obiective: minimizarea numarului de vehicule (sau a numarului de tururi) are prioritate fata de minimizarea distantei totale parcurse, abordare care este frecvent utilizata de catre euristicile propuse in literatura pentru rezolvarea VRPTW. Analiza experimentală este efectuată pe mai multe instanțe din benchmark-ul VRPTW clasic al lui Solomon cu 100 de clienți, și arată rezultate promitatoare comparativ cu un alt algoritm ACO și cu cele mai bune soluții cunoscute disponibile în literatura. Totuși, mecanisme adiționale trebuie să fie încorporate pentru a îmbunătăți performanța algoritmilor propuși, și pentru a obține rezultate competitive cu cele raportate în literatura. Ca o continuare a acestui studiu, considerăm în Sectiunea 4.4 aceeași problema statică VRPTW, însă tratată într-un context multi-obiectiv, când ambele obiective, numărul de vehicule și distanța totală, au aceeași importanță și nicio prioritate între acestea nu este presupusă. De asemenea, studiul din această secțiune își propune să umple un gol existent în literatura, dat fiind faptul că în comparație cu problema VRPTW cu un singur obiectiv, sunt disponibile mai puține articole care adresează VRPTW multi-obiectiv, deși această versiune este capabilă să captureze mai bine probleme întâlnite în lumea reală. În acest scop, am proiectat un algoritm multi-obiectiv bazat pe ACS care înglobează conceptul de descompunere în vederea rezolvării problemei VRPTW multi-obiectiv. Studiul computațional arată că algoritmul nostru este capabil să producă rezultate promitatoare, totuși pentru a obține rezultate competitive cu o altă metodă din literatura bazată pe descompunere, este necesar să încorporăm un mecanism adițional menit să sporească diversitatea soluțiilor.

Intrucat majoritatea problemelor din lumea reala implica un aspect dinamic, in Sectiunea 4.5 investigam problema dinamic VRPTW prin intermediul algoritmilor bazati pe ACS. Consideram ca natura dinamica a problemei este data de cererilor clientilor, in care nu toate sunt cunoscute de dinainte, ci o parte din acestea sunt dezvaluite dinamic de-a lungul zilei de lucru, in timp ce vehiculele isi executa rutele. Scopul acestui studiu este sa proiecteze si sa analizeze algoritmi bazati pe ant colony optimization, care sunt capabili sa obtina solutii de calitate buna pentru instante DVRPTW cu un nivel

mai ridicat de dinamicitate. In acest scop, propunem un algoritm bazat pe ACS, care recurge la mecanism simultan de construire a solutiilor, in care vehiculul si urmatorul client de adaugat in turul sau sunt selectati simultan in timpul pasului de tranzitie. Abordarea noastra este hibridizata cu o procedura de cautare locala constand din doi operatori, relocate si exchange, care sunt aplicati intr-o maniera iterativa, pana cand nu mai este posibila o imbunatatire. Mai mult decat atat, am integrat in metoda noastra o euristica de inserare pentru a incorpora mai bine clientii nevizitati in tururile existente, reducand in acest fel numarul de vehicule necesare pentru a servi toti clientii. Studiul experimental arata ca metoda noastra este capabila sa genereze solutii de calitate buna in special pentru instantele DVRPTW cu o dinamicitate mai mare, surclasand o alta abordare bazata pe ACS din literatura.

Concluzii si Munca Viitoare

Aceasta teza s-a axat pe studierea a doua probleme binecunoscute de optimizare combinatoriala, mTSP, care este o generalizare a TSP, si VRPTW, avand mTSP la baza sa, prin apelul la metode metaeuristice. VRPTW este una dintre cele studiate variante ale VRP, fapt dovedit de cantitatea vasta de literatura care acopera aceasta problema. Data fiind dificultatea considerabila si aplicatiile practice inerente, care apar in domeniile de transport si logistica, aceste probleme au tras un volum mare de cercetari de-a lungul anilor, cristalizandu-se in subiecte importante in zona de Cercetari Operationale. De asemenea aceste doua probleme de rutare sunt omniprezente in multe industrii, de vreme ce transportul este implicat in fiecare aspect al vietii noastre moderne. In afara de aceasta, aceste probleme au un impact economic considerabil, intrucat implica o parte semnificativa a costurilor operationale al multor companii. S-a aratat ca elaborarea de metode computerizate pentru rezolvarea acestor tipuri de probleme poate aduce economii semnificative in costurile suportate de catre companiile de distributie si in pretul final al produselor. Astfel, se merita studierea acestor probleme, si proiectare de algoritmi eficienti meniti a le rezolva.

Din cauza timpului ridicat de calcul care este implicat, majoritatea metodelor exacte sunt prohibitive atunci cand sunt aplicate la instante mTSP si VRPTW de dimensiuni mari care apar de obicei in scenariu din lumea reala. In aceste cazuri, metodele exacte nu sunt garantate sa ajunga la o solutie optima, si este mai potrivit sa fie aplicate metaeuristici care pot furniza solutii aproximative aproape de optim intr-un timp limitat, astfel incat acestea pot fi implementate cu succes pentru rezolvarea problemelor din lumea reala. Prin urmare, mai multe abordari bazate pe metaeuristica ACO, care se inscrie in framework-ul de swarm intelligence, au fost elaborate in teza pentru a rezolva problemele mTSP si VRPTW. Metaeuristica ACO este o metoda bazata pe populatii,

care este inspirata de comportamentul de cautare a hranei onservat in coloniile reale de furnici, care reusesc sa gaseasca drumuri scurte intre musuroi si sursele de hrana.

Mai intai, am investigat problema mTSP din perspectiva cu un singur obiectiv si din perspectiva multi-obiectiv. Cand am tratat mTSP ca o problema cu un singur obiectiv, am urmarit sa minimizam distanta totala parcursa si sa obtinem tururi balansate in termeni de numar de orase care sa fie vizitate in turul fiecarui voiajor. De asemenea, am cautat sa obtinem tururi echilibrate, prin minimizarea costului celui mai lung tur, cand am inclus in metodele noastre thenici de clusterizare pentru impartirea oraselor in grupuri egale. Cand am interpretat mTSP intr-un context multi-obiectiv, doua obiective au fost optimizate simultan: costul total si gradul de balansare al tururilor, care a fost masurata ca diferenta intre costul celui mai lung tur si costul celui mai scurt tur. Apoi am examinat impactul schemei de algerea a voiajorului, utilizata in timpul fazei de constructie a solutiilor, asupra calitatii solutiilor generate, atunci cand metodele propuse au fost evaluate atat dintr-o maniera cu un singur obiectiv cat si multi-obiectiv.

Ca si in cazul mTSP, atunci cand am investigat VRPTW, am analizat-o mai intai ca o problema statica cu un sigur obiectiv si multi-obiectiv, si mai apoi ca o problema dinamica cu un singur obiectiv. In acest sens, am extins si am adaptat unii dintre algoritmi proiectati in teza pentru abordarea mTSP, dat fiind faptul ca VRPTW este o generalizare a mTSP. Cand am adresat problema static VRPTW cu un singur obiectiv, am considerat o functie obiectiv ierarhica, adesea folosita de catre euristicele disponibile in literatura pentru VRPTW, care presupune o prioritate intre cele doua obiective, numarul de vehicule utilizate si distanta totala parcursa. Acest lucru implica faptul ca minimizarea numarului de vehicule este obiectivul primar, in timp ce obiectivul secundar este sa se minimizeze distanta totala parcursa. Apoi am studiat aceeasi problema statica VRPTW, insa interpretata dintr-o perspectiva multi-obiectiv, intrucat majoritatea aplicatiilor de rutare din lumea reala posedea in mod inerent o natura multi-obiectiv. In acest caz, am urmarit sa optimizam simultan cele doua obiective anterioare, care au fost tratate in mod egal, avand aceeasi importanta. In cele din urma, intr-o incercare de a veni si mai aproape de scenariii din lumea reala, am luat in calcul aspectul de timp real al VRPTW, cand am analizat-o ca o problema cu un singur obiectiv, considerand aceeasi functie obiectiv ierarhica. Am presupus ca aspectul dinamic al VRPTW este dat de cerrerile clientilor, cand nu toate sunt cunoscute de dinainte, ci unele din acestea sunt dezvaluite dinamic pe masura ce ziua de lucru progresa.

Analiza experimentală a aratat ca per ansamblu metodele propuse sunt capabile sa obtina rezultate promitatoare, furnizand valori bune pentru obiectivele considerate, si

obtinand seturi de aproximare care ofera diferite solutii de compromis in proximitatea frontului Pareto de referinta. In cazul variantelor mTSP marginit si MinMax mTSP cu un singur obiectiv, unele din cele mai bune solutii sunt obtinute de algoritmi bazati pe ACO care impun limite pe dimensiunea tururilor si de catre algoritmul bazat pe ACO care urmeaza abordarea MinMax, respectiv. De asemenea, in cazul unor instante mTSP mai mari, cu un numar mai mare de orase si cu mai multi voiajori, metoda care integreaza tehnica K-means de clusterizare, se poate dovedi utila datorita abilitatii sale de a descompune instanta de problema initiala intr-un numar de subprobleme mai mici. Cand am considerat problema VRPTW, abordarile care au cuplat algoritmi ACO cu proceduri de cautare locala si euristici de inserare par sa furnizeze rezultate mai bune. In plus, in cazul problemelor dinamice de optimizare, cum este de exemplu DVRPTW, utilizarea unui mecanism simultan pentru construirea tururilor vehiculelor, care da sanse mai bune pentru a se incorpora clientii disponibili nevizitati in tururile existente ale vehiculelor, ajuta la obtinerea de solutii de inalta calitate, intr-un timp limitat, astfel incat poate fi aplicata cu succes in scenarii practice.

In concluzie, teza ofera o patrundere asupra aplicabilitatii tehnicilor de calcul natural pentru abordarea unor probleme dificile de rutare si planificare. Mai exact, a aratat cum algoritmi bazati pe ACO pot fi proiectati pentru a rezolva doua probleme de rutare provocatoare, mTSP si VRPTW, de importanta practica semnificativa, care se incadreaza in multe scenarii din lumea reala din domeniile de transport si logistica. Rezultatele computationale au aratat ca spre deosebire de metodele exacte, abordarile bazate pe ACO sunt capabile sa furnizeze solutii de calitate buna intr-un timp rezonabil, si s-ar putea dovedi o optiune viabila atunci cand sunt adresate probleme de optimizare din lumea reala.

Posibile directii pentru munca viitoare includ rezolvarea problemei DVRPTW dintr-o perspectiva multi-obiectiv si extinderea cercetarii pentru a aborda probleme de tipul dynamic rich vehicle routing problems (Lahyani et al., 2015), care pot incorpora constrangeri si obiective mai complexe, gasite in probleme VRP din lumea reala. Printre attributele aditionale care pot fi considerate in formularea problemei, ne putem referi la: timpi de calatorie dependenti de timp, flota heterogena de vehicule, depouri multiple, multiple rute per vehicul, operatii de ridicare si livrare asociate cu locatia fiecarui client, si rute deschise ca in cazul open VRP, care nu necesita ca vehiculele sa se intoarca la depou, odata ce si-au terminat turul. De asemenea, o alta directie de cercetare o constituie studierea problemei de car pooling si a problemei dinamice de ride-sharing (Agatz et al., 2012; Furuhata et al., 2013), care sunt relationate cu VRP si cu problema dial-a-ride.

Bibliografie

- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, *223*(2), 295–303. doi:10.1016/j.ejor.2012.05.028.
- Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.-E., Wang, X., & Koenig, S. (2013). Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B: Methodological*, *57*(Supplement C), 28–46. doi:10.1016/j.trb.2013.08.012.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., & Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, *241*(1), 1–14. doi:10.1016/j.ejor.2014.07.048.
- Toth, P., & Vigo, D. (2001). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM.

Lista de Abrevieri

ACO	Ant Colony Optimization. ii
mTSP	Multiple Traveling Salesman Problem. 6
TSP	Traveling Salesman Problem. ii, 2
VRP	Vehicle Routing Problem. ii, 2, 8
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows. 6, 8