



Domeniul: Ingineria Sistemelor

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Strategii de optimizare a operațiilor din sistemele logistice

Student-doctorand:
Ing. Horațiu FLORIAN

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Adina Mariana AȘTILEAN

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Petru Dobra** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Adina Mariana Aștilean** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Ioana Făgărășan** - Universitatea Politehnică din București;

- Prof. Dr. Ing. **Gheorghe Dorin Șendrescu** - Universitatea din Craiova;

- Prog. Dr. Ing. **Tiberiu Ștefan Leția** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

- Cluj-Napoca -
2024

Introducere

Teza de doctorat oferă o privire de ansamblu asupra problematicei și modalităților de abordare actuale privind optimizarea operațiilor în sistemele logistice. Studiul a fost orientat în direcția identificării și soluționării situațiilor de funcționare dezechilibrată din cadrul sistemelor bike-sharing. Din această perspectivă, cercetarea prezintă soluții noi elaborate în scopul predicției cererii resurselor necesare pentru reechilibrare în sistemele bike-sharing și metode care pot fi aplicate pentru corectarea dezechilibrelor.

În acest scop, au fost propuse mai multe metode și modele, cele mai importante dintre acestea fiind: modelul variațiilor temporale ale numărului de biciclete în stațiile sistemelor bike-sharing, modelul comportamentului grupurilor de stații, metoda de grupare bazată pe măsurarea gradului de similitudine a stațiilor, metoda de generare a listelor de priorități care vizează ordinea de vizitare a stațiilor de biciclete în scopul reechilibrării acestora, metoda de repartizare a stațiilor la agenții care efectuează reechilibrarea și metoda de integrare a algoritmilor de rutare în cadrul strategiei de relocare propuse.

Analiza problemei

În ultimele decenii, domeniul logisticii a avut o evoluție permanent ascendentă, concretizată prin diversificarea metodelor de abordare și creșterea numărului și utilității aplicațiilor. Optimizarea operațiilor unui sistem logistic îi determină competitivitatea.

Identificarea claselor de operații și analiza proceselor caracteristice stau la baza ulterioarelor strategii de optimizare. În contextul general al studiilor având ca obiect managementul sistemelor logistice, se urmărește:

1. Livrarea corectă și în siguranță a bunurilor și serviciilor. Aceasta presupune efectuarea la standardele impuse a operațiilor de încărcare și descărcare, evitarea blocajelor cauzate de mutarea mărfurilor, ambalarea produselor evitând deteriorarea acestora și evitarea confuziilor când se etichetează pachetele.
2. Optimizarea stocurilor, pentru a nu exista exces sau deficit de marfă, realizată prin: furnizarea de suficient spațiu de depozitare, evitarea supra-dimensionării depozitului, crearea unui cadru operațional, stivuirea corectă care evită deteriorări, asigurarea securității și prezența unui sistem precis de inventariere.
3. Consolidarea, care presupune: evitarea confuziei între produse similare, urmărirea ușoară a produselor, încărcarea completă a mijloacelor de transport, sincronizarea timpilor de sosire a mărfurilor.
4. Pregătirea sortimentului comercial, având următoarele probleme: planificarea corectă a stocurilor pentru a se evita cazurile de supraaprovizionare sau subaprovizionare, crearea unui cadru operațional între departamente (achiziții, vânzări, depozitare etc.), estimarea corectă a cererii.
5. Transportul, având următoarele probleme: evitarea blocajelor în trafic, asigurarea securității, evitarea rutelor ineficiente, alegerea unor rute în mod flexibil, care să ia în considerare diferite riscuri (cerere fluctuantă a produselor, condiții meteo nefavorabile etc.).
6. Creșterea eficienței operațiunilor, prin identificarea și eliminarea pierderilor de timp și a costurilor pe întregul lanț de aprovizionare.
7. Satisfacerea nevoilor clienților, prin asigurarea unui nivel ridicat de servicii și prin respectarea cerințelor acestora.

Sistemele logistice cuprind o varietate de categorii, cele mai importante dintre acestea fiind:

- Sistemele logistice de aprovizionare
- Sistemele logistice de producție
- Sistemele logistice de distribuție
- Sistemele de logistică inversă
- Sistemele logistice militare
- Sistemele logistice medicale
- Sistemele logistice de transport și infrastructură
- Sistemele logistice de gestionare a lanțului de aprovizionare

Într-o lume marcată de creșterea rapidă a urbanizării și de tendințele globale în dezvoltarea durabilă, domeniul logisticii joacă un rol vital în cadrul unor sisteme complexe. Un element distinctiv al sistemelor logistice este accentul pus pe integrarea funcționalităților diferitelor componente, rezultatul concretizându-se în entități coerente și bine coordonate. Eficiența unui sistem logistic este determinată de capacitatea sa de a asigura o mișcare fluentă a bunurilor, de la punctul de origine la destinație, într-un mod care să minimizeze costurile și să optimizeze utilizarea resurselor. Mai mult, abilitatea de a reacționa rapid la schimbările de mediu și de a anticipa cerințele viitoare sunt caracteristici esențiale ale sistemelor logistice de succes.

Dincolo de costuri, logistica afacerilor este din ce în ce mai importantă, fiind influențată de anumiți factori, după cum urmează:

- **Globalizarea piețelor.** Comerțul mondial este într-o continuă dezvoltare, iar tendința de globalizare a piețelor cunoaște de asemenea o creștere. Mutarea produselor de la punctul de fabricație la cel de consum, la scară globală, are provocări logistice evidente.
- **Dereglementarea.** Transportul a trecut de la o industrie foarte reglementată, la o industrie de piață din ce în ce mai liberă. Efectele au constat în diversificarea opțiunilor, o complexitate crescută în ceea ce privește serviciile și costurile logistice și mai multe oportunități de îmbunătățire a operațiunilor de afaceri.
- **Calitatea serviciilor oferite clienților.** Dereglementarea, piețele globale și alți factori creează un mediu de afaceri mai competitiv, reflectat direct în necesitatea de a asigura lanțuri de aprovizionare care să poată livra produsele la timp și care se poate adapta la schimbările rapide ale pieței.
- **Dezvoltarea tehnologică.** Accelerarea progreselor tehnologice schimbă și îmbunătățește semnificativ operațiunile logistice. Exemplele includ urmărirea automată a codurilor de bare ale produselor, gestionarea activelor de transport prin intermediul comunicațiilor prin satelit, comerțul electronic și suportul decizional computerizat.
- **Mediul înconjurător.** Reglementările de mediu actuale și cele preconizate au implicații semnificative asupra logisticii și pot avea un impact fundamental asupra locațiilor utilităților, fabricilor, unităților de depozitare și a centrelor de reciclare.

Într-un context mai larg, interesul crescut pentru mobilitate urbană durabilă a condus la dezvoltarea și implementarea sistemelor bike-sharing. Acestea au fost introduse pe piață cu scopul oferirii unei alternative ecologice și eficiente din punct de vedere al costurilor pentru transportul urban, în special în zonele aglomerate. Optimizarea administrării resurselor și asigurarea unui flux eficient sunt doar două dintre cele mai dificile probleme cu care se confruntă aceste sisteme.

Prin intermediul acestui sistem, bicicletele sunt puse la dispoziția publicului pentru utilizare comună pe termen scurt, pentru o taxă redusă sau gratuit. În general, ele permit utilizatorului să împrumute o bicicletă de la un loc de parcare și să o returneze la un alt loc de parcare, care aparține aceluiași sistem. O proprietate cheie a acestor sisteme logistice este faptul că baza materială rămâne în cadrul sistemului, adică nu este transmisă clientului sau unei alte entități. Prin urmare, spre deosebire de alte categorii de sisteme logistice, o mare parte a problemelor întâmpinate se concentrează pe administrarea bazei materiale.

În continuare, se vor detalia câteva dintre problemele specifice care pot apărea în cadrul sistemelor bike-sharing:

- Multe biciclete pot ajunge să fie parcate în afara zonelor de interes, unde nivelul cererii este foarte ridicat, după doar câteva utilizări; cauzele pot fi legate de polarizarea traficului, la care se mai adaugă eventual zone în care numărul de locuri de parcare este sub nivelul cerut.

În regim dinamic, există câteva soluții practice pentru a asigura numărul de biciclete și locuri de parcare accesibile, într-un interval de timp rezonabil. Unele dintre soluțiile actuale se bazează pe reechilibrarea executată de utilizatori și se concentrează pe găsirea unor modalități de a convinge utilizatorii să parcheze biciclete împrumutate la alte destinații decât cele pe care le consideră cele mai convenabile [1, 2]. Reechilibrarea desfășurată de operatori este o altă soluție potrivită pentru a asigura disponibilitatea resurselor la timp, fiind eficientă în mod special în cazuri care necesită relocare urgentă. Pentru aceste cazuri, diferite modalități de echilibrare au fost propuse, cu scopul de a minimiza numărul de stații în care clienții nu pot găsi biciclete sau locuri de parcare [3, 4]. Există și propuneri de a combina cele două abordări [5].

- Fenomenul de golire al stațiilor de biciclete este non-determinist, ceea ce poate duce la situații în care vehiculele de reechilibrare sunt temporar depășite de situație.

Predicția cererii de biciclete într-o anumită marjă acceptabilă poate fi abordată atât la nivel de stație, cât și la nivel de grup de stații ce au comportament similar. În cadrul lucrării [6], o metodă de măsurare a gradului de similitudine este propusă pentru gruparea stațiilor, în cadrul căreia nivelurile de încărcare a stațiilor sunt folosite ca trăsătură de bază a modelului. Chiar dacă implică mai mult efort computațional, predicția încărcării la nivel de stație poate oferi în anumite situații rezultate superioare. Autorii din [7] folosesc o metodă bazată pe contorizarea bicicletelor pentru a prezice cererea la fiecare oră, pentru oricare stație. Călătoriile anterioare și factori externi cum ar fi vremea, momentul zilei și infrastructura disponibilă sunt luate în considerare pentru modelul de predicție.

- Tiparele de utilizare a sistemului sunt adesea neclare, iar impactul factorilor externi, precum vremea sau infrastructura, este dificil de măsurat ca atare.

Lucrarea [8] analizează informațiile istorice pentru a extrage și folosi tipare de comportament critic pentru operațiuni de reechilibrare dinamică. Starea defectă a bicicletelor este urmărită pentru a optimiza operațiile din sistemele bike-sharing, articolul [9] propunând un model bazat pe algoritmul de programare cu numere întregi și articolul [10] propunând o metodă euristică greedy.

- Lotul de biciclete este numeros și în consecință și numărul de stații, ceea ce îngreunează urmărirea lor și controlarea operațiilor pentru întreg sistemul.

O analiză aprofundată a comportamentului detaliat al sistemelor de dimensiuni mari este adesea nepractică. Astfel, sunt necesare abordări reduționiste, care să permită studiul unor subsisteme mai simple, sau alte elemente care să ofere înțelegerea comportării sistemului. În acest sens, divizarea sistemului în grupuri joacă un rol crucial în rezolvarea problemei. Prin aplicarea tehnicilor de grupare folosind atribute precum locația [11, 12], tipare de utilizare [13, 14] sau preferințe de utilizare [15, 16], informații valoroase pot fi obținute din sistem, cu scopul de a optimiza alocarea bicicletelelor [17], amplasarea stațiilor [18] sau planificarea rutelor [19].

- Necesitatea de a construi scenarii adaptate cazurilor în care se iau decizii de relocare a bicicletelor, sau a celor care implică evaluarea necesității stațiilor de a fi reechilibrate, determinarea numărului necesar de biciclete care trebuie transportate către stații sau deciderea numărului de vehicule necesare pentru a deservei un set de stații.

În acest context, un indicator de consecvență a călătoriilor este utilizat în lucrarea [20] ca descriptor de trăsături pentru o metodă de învățare automată, cu scopul de controla operațiunea de reechilibrare statică, crescând gradul de satisfacere a cererii și scăzând în același timp numărul de vizite ale stațiilor de către operatorii de reechilibrare. Autorii lucrării [21] au dezvoltat un cadru de simulare cu scopul de a evalua diferite strategii de reechilibrare.

- Relocarea eficientă a bicicletelor prin alegerea unor rute, care să satisfacă mai multe obiective (consumul de combustibil al vehiculelor implicate în relocare, timpul redus pentru transport, evitarea pierderii clienților, reducerea timpului în care stațiile funcționează în stare critică).

În scopul creșterii performanțelor sistemului, multe strategii au fost propuse, folosind algoritmi exacti, hibridi, euristici, metaeuristici și hiper-euristici [22, 23]. Pentru a găsi strategii de rutare noi, unele studii adaptează și dezvoltă formulări tipice pentru problema de rutare a vehiculelor având constrângeri de capacitate. Aceasta ia în considerare generalizarea problemei comis-voiajorului, care a fost intens studiată în literatură, în variante deterministe și stocastice. Multe aplicații, care folosesc diferite ipoteze și constrângeri, au fost definite în acest context, având soluții propuse atât pentru abordările deterministe cât și cele stocastice. Abordări stocastice ale problemelor de rutare a vehiculelor cu capacitate limitată și metodele dezvoltate în scopul soluționării lor, pe parcursul a peste două decenii, sunt prezentate și analizate succint în lucrările [24, 25]. În [25], mai multe categorii de soluții reprezentative au fost analizate, în timp ce în [24], autorii s-au focalizat pe prezentarea tipurilor de probleme și abordările acestora.

Sistemele bike-sharing au o serie de caracteristici importante, care le situează în categoria sistemelor logistice complexe. Grupurile de operații și activități care se efectuează în cadrul lor vizează următoarele aspecte:

- **Gestionarea resurselor:** În sistemele bike-sharing, resursele sunt bicicletele și stațiile de ancodare, depozitele intermediare și flotele de vehicule utilizate în operațiile de reechilibrare.
- **Optimizarea rutelor:** Găsirea celor mai potrivite trasee pentru clienți, dar și a rutelor optime pentru vehiculele implicate în operațiile de echilibrare a stațiilor sunt esențiale pentru minimizarea costurilor.
- **Planificarea spațială:** Asigurarea spațiilor necesare în scopul depozitării permanente și temporare a tuturor resurselor, precum și stabilirea locațiilor acestora sunt elemente care influențează pe termen lung eficiența funcționării întregului sistem.
- **Monitorizarea continuă a stării sistemului:** culegerea și stocarea informațiilor referitoare la locația și starea tuturor resurselor existente, folosind tehnici și tehnologii actuale, sunt factori importanți care pot contribui atât la o mai bună funcționare de moment a sistemului, cât și la elaborarea unor noi strategii de optimizare.

- **Gestionarea incertitudinilor:** Cerințele utilizatorilor pot varia în funcție de momente din zi, sezon sau evenimente speciale. Adaptarea la fluctuațiile cererii este dificilă.
- **Necesitatea mentenanței:** Include verificarea și reparațiile bicicletelor sau stațiilor de andocare.
- **Planificarea stocurilor:** Planificarea și gestionarea stocurilor, pentru a se asigura că resursele sunt disponibile atunci când sunt necesare, este esențială.
- **Interacțiunea cu clienții:** Include informații despre disponibilitatea bicicletelor și procesul de închiriere.
- **Reglementări și legislație:** Reglementările și legislația care guvernează operațiunile și siguranța resurselor sau utilizatorilor trebuie aplicate.
- **Planificarea capacității:** Este important să se planifice și să se ajusteze capacitatea pentru a răspunde fluctuațiilor cererii și pentru a asigura servicii adecvate utilizatorilor.
- **Colaborarea cu terțe părți:** Sistemele logistice și bike-sharing pot implica colaborarea cu terțe părți, cum ar fi furnizorii sau partenerii externi, pentru a asigura aprovizionarea sau pentru a extinde serviciile.
- **Experiența utilizatorului:** În ambele tipuri de sisteme, se urmărește îmbunătățirea experienței utilizatorului legată de procesele de închiriere și asigurare a serviciilor de calitate.

Actualitatea temei. Necesitatea optimizării operațiilor din sistemele bike-sharing

Ultimele decenii au fost marcate de modernizare și urbanizare, procese care au condus la atingerea de noi niveluri ale congestiei traficului, punând în pericol dezvoltarea viabilă a zonelor urbane. Traficul aglomerat este asociat cu grade ridicate de poluare chimică și fonică, pericol de accidente și pierderi economice. În acest context, a apărut un nou domeniu, denumit "Smart Mobility". Tehnologiile emergente precum conducerea autonomă, au potențialul de a transforma modul în care funcționează sistemele de mobilitate [7]. Cu toate acestea, multe soluții propuse pentru a reduce efectele negative privind ambuteiajele și poluarea au de asemenea dezavantaje și efecte adverse nedorite [26]. Chiar dacă pare promițătoare, implementarea la scară largă a soluțiilor existente din acest domeniu rămâne o provocare, necesitând timp, analiză complexă și suportarea unor costuri considerabile [27, 28].

O paletă de măsuri disponibile a fost luată în considerare ca abordare alternativă, care presupune restricționarea utilizării vehiculelor existente și înlocuirea lor cu alte mijloace de transport [29]. De asemenea, în ultimii ani, sistemele de transport au fost adaptate pentru a răspunde la nevoile de transport ale anumitor categorii de utilizatori [30]. În acest sens, ciclismul este văzut ca o soluție prietenoasă cu mediul [31], care poate scurta timpul de deplasare, dacă sunt asigurate condiții corespunzătoare. În consecință, la momentul actual, există un număr mare de sisteme bike-sharing ce implică în total milioane de biciclete [31].

Pentru desfășurarea în bune condiții a activității de închiriere a bicicletelor dintr-un lot determinat, din care clienții pot extrage biciclete, în scopul deplasării în diferite părți ale orașului, în sistemele bike-sharing trebuie rezolvate mai multe categorii de probleme referitoare la: capacitate, transfer, fiabilitate și integrare, care se regăsesc și la alte modalități de transport [32].

Cu toate că au fost înregistrate anumite progrese, multe lucrări din literatura de specialitate menționează faptul că, în continuare, reechibrarea stațiilor în sistemele bike-sharing rămâne o problemă deschisă. Studiile efectuate și alternativele de rezolvare a problemelor specifice, elaborate și implementate în această lucrare, au fost motivate de necesitatea de a găsi soluții, care să asigure performanțe superioare în cadrul categoriilor de aplicații menționate și a celor care prezintă caracteristici asemănătoare.

Obiectivele tezei

Cercetarea întreprinsă în cadrul acestei teze de doctorat a fost axată pe dezvoltarea și implementarea de noi strategii și metode, în scopul soluționării unor probleme actuale de optimizare din domeniul logistic.

Obiectivele propuse în acest context au fost:

- **Primul obiectiv:** modelarea comportamentului sistemelor bike-sharing, luând în considerare:
 - momentele zilei și duratele perioadelor în care stațiile au majoritatea locurilor ocupate sau libere (sunt în stare critică);
 - caracteristicile fluctuației în timp a numărului de biciclete în stații;
 - urmărirea evoluției numărului de stații aflate în stare critică din cadrul unor subsisteme.

- **Al doilea obiectiv:** dezvoltarea metodelor de analiză a comportamentului sistemelor bike-sharing luând în considerare:
 - gradul de încărcare a sistemului;
 - probabilitatea de trecere a subsistemelor dintr-o stare în alta;
 - volumul (numărul) resurselor necesare în vederea reechilibrării și planificarea utilizării acestora.

- **Al treilea obiectiv:** dezvoltarea, implementarea și testarea unor metode de reechilibrare a stațiilor de biciclete care integrează:
 - modele statistice;
 - algoritmi aparținând inteligenței artificiale.

- **Al patrulea obiectiv:** modelarea variațiilor în timp ale numărului de biciclete în stațiile sistemelor bike-sharing, folosind metode statistice.

- **Al cincilea obiectiv:** evaluarea performanțelor sistemului rezultat în urma reechilibrării, urmărind:
 - rata clienților pierduți;
 - timpii totali de funcționare în stare critică a stațiilor;
 - lungimea rutelor de reechilibrare;
 - numărul de biciclete care au făcut obiectul relocării.

- **Al șaselea obiectiv:** validarea soluțiilor propuse, pe baza unei analize comparative între rezultate obținute utilizând în cadrul metodei algoritmi de referință, respectiv algoritmul propus.

- **Al șaptelea obiectiv:** Extragerea trăsăturilor unui sistem bike-sharing de mari dimensiuni, utilizând datele înregistrate ale sistemului Citi Bike din New York.

Conținutul tezei

Teza de doctorat este formată din 2 secțiuni principale și 9 capitole, corespunzând unor părți distincte din cadrul cercetării întreprinse, care a avut ca obiect principal optimizarea operațiilor din cadrul sistemelor logistice. În continuare, se prezintă un rezumat pentru fiecare secțiune și, respectiv, capitol.

Capitolele primei secțiuni au un conținut complementar, fiecare contribuind la formarea unei imagini de ansamblu asupra categoriilor de aplicații, a cerințelor specifice acestora, a modalităților de rezolvare existente și a abordărilor propuse, în scopul găsirii de noi soluții performante.

În scopul identificării direcțiilor de cercetare care prezintă interes pentru sistemul logistic, **Capitolul 1** prezintă o imagine de ansamblu a problematicii domeniului logistic, în legătură directă cu principalele categorii de sisteme logistice și clasele de operații aferente lor. Sunt evidențiați factorii economici și sociali care au condus la evoluția conceptelor și necesitatea diversificării abordărilor existente. În acest context, este menționată categoria sistemelor bike-sharing, sisteme logistice complexe, în cazul cărora este necesară continuarea eforturilor de cercetare pentru a le transforma într-o modalitate de transport urban, care să ajungă la nivelul preconizat. Pe baza evaluării rezultatelor publicate, sunt identificate problemele pentru care soluțiile existente nu sunt satisfăcătoare, reechilibrarea în timp util a stațiilor de biciclete fiind una dintre ele. Pe baza aspectelor menționate, în continuare, sunt enumerate obiectivele propuse în cadrul cercetării întreprinse în teza de doctorat și la final este prezentat rezumatul capitolelor acesteia.

Capitolul 2 detaliază prezentarea principalelor aspecte care influențează direct modul de elaborare a deciziilor în sistemele logistice. Se evidențiază legătura între gruparea strategiilor de optimizare și specificul categoriilor de activități cărora le sunt destinate. Este subliniat rolul modelării comportamentului sistemelor logistice în generarea alternativelor de funcționare. Sunt menționate elementele comune care se regăsesc în cadrul modelelor, indiferent de categoria pentru care sunt construite. Sunt evidențiate dificultățile și limitările proceselor de modelare și elaborare a metodelor de optimizare a activităților, atât în funcție de categoriile de aplicații, cât și luând în considerare orientările în abordare.

Capitolul 3 prezintă un studiu care analizează cu precădere soluții recent propuse în vederea rezolvării principalelor categorii de probleme ale domeniului logistic. Lucrările la care se face referire prezintă interes atât din punctul de vedere al orientării spre abordări teoretice noi pentru domeniul logistic, cât și din cel al accentului pe care îl pun pe necesitatea și posibilitatea de a integra tehnici și tehnologii recente în scopul găsirii unor soluții cu un grad ridicat de aplicabilitate practică. O paletă largă de soluții și strategii de optimizare care au fost aplicate în diferite aplicații logistice, este examinată atât prin prisma utilității pe care a demonstrat-o, cât și prin aceea a limitărilor constatate. Un aspect de interes prezentat de asemenea este cel legat de oportunitățile pe care le oferă anumite direcții de cercetare, în vederea dezvoltării soluțiilor inovative, utile și cu aplicabilitate largă. În acest sens, un subcapitol este dedicat sistemelor bike-sharing și necesităților de reechilibrare a stațiilor acestuia.

A doua secțiune se axează pe contribuția personală, concretizată prin stabilirea conceptelor de bază comune pentru toate studiile de caz efectuate și prin prezentarea aplicațiilor reprezentative pentru problematica aferentă, a soluțiilor propuse, a rezultatelor obținute și a concluziilor.

În **Capitolul 4** sunt formulate ipoteze și precizate caracteristici și descrise structuri care sunt utilizate în mai multe dintre modelele, metodele, algoritmi și aplicațiile ulterioare prezentate în lucrare.

În **Capitolul 5** este abordată problema variației numărului de biciclete în stații, la diferite momente ale zilei, și a fost propus un model care să reflecte dinamica cererii în perioadele de vârf. Modelul a fost creat utilizând rețele Petri probabilistice și validat utilizând datele disponibile în baza de date publică a sistemului Citi Bike din New York. Rezultatele obținute au condus la concluzia că pentru diferite intervale orare modelul propus se încadrează în intervalul de toleranță acceptat. Utilitatea modelului constă în faptul că este capabil să furnizeze în avans informații legate de eventualele stări critice în care poate ajunge sistemul și oferă un mod sugestiv de urmărire a variațiilor din

comportamentul resurselor.

Cercetarea întreprinsă în **Capitolul 6** a urmărit un obiectiv similar cu cel abordat în capitolul anterior. Diferența majoră constă în modul în care este planificată reechilibrarea, aceasta vizând grupuri de stații având caracteristici comune. Pornind de la informațiile existente despre gradul de încărcare a stațiilor de biciclete, a fost studiat comportamentul stațiilor. În acest sens, a fost elaborată o nouă metodă de determinare a similitudinii comportamentului pentru gruparea stațiilor, iar, prin intermediul grupurilor obținute, a fost posibilă identificarea unui model pentru comportamentul grupurilor de stații. Stabilirea momentelor zilei în care stațiile sunt în stare critică a stat la baza metodei de determinare a similitudinii comportamentului acestora, modelarea comportamentului grupului de stații fiind realizată utilizând lanțuri Markov. Pe baza rezultatelor obținute, se poate identifica locația subsistemelor cu trăsături specifice, în cazul de față, subsisteme care necesită reechilibrare și se poate determina necesarul de resurse corespunzător.

Capitolul 7 prezintă un studiu motivat de necesitatea creșterii performanțelor strategiilor și metodelor de reechilibrare aplicate în sistemele bike-sharing. Utilizând informații înregistrate din sistemul Citi Bike cu privire la numărul, locația și încărcarea stațiilor și a camioanelor de reechilibrare, a fost elaborată, implementată și testată o metodă de rutare performantă a camioanelor. La baza metodei stau un algoritm genetic modificat, având rolul de a determina o ordine de reechilibrare a stațiilor din subsisteme, și un mecanism de inferență, cu rol de atribuire a sarcinilor de reechilibrare către camioane. Rezultatele obținute în aplicațiile în care metoda a fost implementată au evidențiat costuri reduse ale rutelor de reechilibrare, satisfacerea condițiilor pentru evitarea pierderii clienților și asigurarea unei distribuiri uniforme a sarcinilor către camioane.

În **Capitolul 8** este prezentat un studiu comparativ care are ca scop evaluarea performanțelor metodei de reechilibrare propuse în capitolul 7, în variantele în care algoritmul genetic modificat este înlocuit cu alți algoritmi de referință: algoritmul ACO (Ant Colony Optimization), algoritmul HHO (Harris Hawks Optimization), algoritmul TSA (Tabu Search Algorithm) și algoritmul genetic standard. În acest scop, au fost create histograme corespunzătoare datelor ce descriu rezultatele aplicării fiecărui algoritm în cadrul metodei, pentru mai multe cazuri, în scopul acoperirii a mai multor situații existente, care caracterizează comportamentul sistemelor bike-sharing reale. Utilizarea histogramei permite determinarea valorilor indicatorilor de performanță pentru rutele obținute, indicatorii reflectând reducerea costurilor și scalabilitatea metodelor propuse. În urma analizei a reieșit că algoritmul genetic modificat propus are performanțe superioare față de algoritmi de referință în toate cazurile, cu excepția optimizării Harris Hawks, față de care prezintă performanțe superioare doar în cazul subsistemelor de dimensiune redusă.

Capitolul 9 cuprinde concluziile generale și principalele contribuții ale tezei, cu accent pe elementele inovative și incluzând aspectele legate de implementare.

Lucrarea mai conține listele de abrevieri, referințe, tabele, figuri și publicații ale autorului.

În continuare, se vor prezenta metodele și modelele propuse în scopul optimizării operațiilor din cadrul sistemelor logistice, discutând rezultatele obținute și expunând concluziile la care au condus acestea.

Modelarea variațiilor temporale ale numărului de biciclete în stațiile sistemelor bike-sharing, utilizând rețele Petri probabilistice

Predicția cererii, în scopul prevenirii situațiilor în care unele stații de biciclete devin inutilizabile este una dintre problemele care nu au fost soluționate corespunzător în cazul sistemelor bike-sharing. În acest sens, se prezintă un model capabil să reflecte evoluția în timp a numărului de biciclete și docuri disponibile în diferite stații de biciclete, răspândite într-o zonă urbană. Utilizând rețelele probabilistice Petri definite în [33] și datele istorice, modelul descrie modificările intervenite, la diferite intervale de timp, în cererea de biciclete la nivel de stație, stațiile făcând parte din grupuri cu caracte-

ristici diferite. Aceste caracteristici diferă în funcție de poziționarea zonelor în oraș. Poziția periferică sau centrală a stației de biciclete, prezența diferitelor instituții, stații de transport sau obiective turistice în imediata ei vecinătate ar putea avea o influență importantă asupra valorii estimate a cererilor pe o perioadă mai scurtă sau mai lungă de timp. Conceput pentru a reflecta dinamica cererii în perioadele de vârf, modelul propus poate descrie și evoluțiile probabile ale numărului de biciclete disponibile și în alte intervale orare, pe durata unei zile, în sezoane diferite.

În scopuri de modelare, a fost utilizată o rețea Petri probabilistică, definită în [33] ca:

$$PPN = \{N, F, \lambda, M\}, \text{ unde} \quad (1)$$

$N = (P, T, Pre, Post)$ corespunde structurii rețelei Petri formată din: mulțimea locațiilor, P ; mulțimea tranzițiilor, T ; funcțiile Pre și $Post$, definite pe mulțimea arcelor orientate de la locații la tranziții, respectiv, pe mulțimea arcelor orientate de la tranziții la locații;

$F : P \rightarrow f_p(t)$ și $f_p(t)$ este probabilitatea de distribuție definită pe setul arcelor orientate de la locații la tranziții;

λ este o funcție definită pe mulțimea T , ce impune constrângeri pentru tranziții;

$M : P \rightarrow N$ reprezintă marcajul.

Valoarea probabilității inițiale a fiecărui jeton este egală cu 1 și se modifică după fiecare execuție a unei tranziții, valoarea anterioară a probabilității jetonului fiind înmulțită cu valoarea probabilității asociate arcului de intrare în tranziție. Un exemplu privind modul de execuție a tranzițiilor este prezentat în Figura 1:

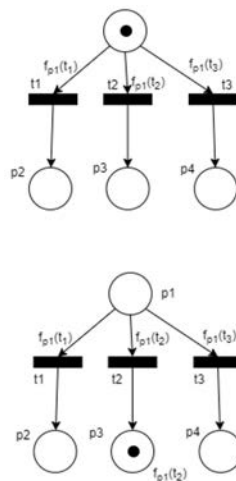


Figura 1: Evoluția marcajului după execuția tranziției t_2 [34].

Datele au fost colectate de-a lungul unei perioade cu durată precizată, la intervale de timp egale. Se presupune că în momentul inițial este cunoscut numărul inițial de biciclete, iar încărcarea stației este echilibrată. Din acest punct de plecare există mai multe evoluții posibile, pe parcursul unor intervale de timp succesive.

Structura generală a modelului este ilustrată în Figura 2:

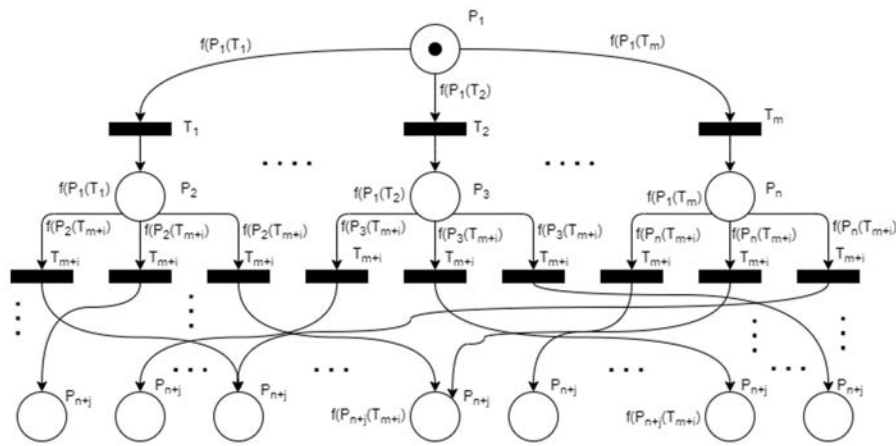


Figura 2: Structura generală a modelului [34].

Fiecare locație marcată va corespunde unei stări probabile a sistemului. Numărul probabil de biciclete din stație într-un anumit moment, poate fi determinat luând în considerare valorile probabilităților asociate segmentelor precedente aparținând traseului urmat în model.

Pentru a stabili probabilitatea de a urma un traseu dintre cele posibile, s-au luat în considerare două categorii de date: numărul de biciclete înregistrat în stație la un moment dat (corespunzând în acest caz cu sfârșitul intervalelor de timp stabilite, aceleași pentru toate zilele) și numărul total al înregistrărilor anterioare care au condus la aproximativ același număr de biciclete. Probabilitatea asociată unui anumit segment al traseului, respectiv, al unui arc care leagă o locație și o tranziție, va fi calculată ca raport între numărul de zile trecute în care, în același interval de timp, a fost înregistrat același număr de biciclete, și numărul total de înregistrări (zile din perioada luată în considerare). Din considerente practice, pentru a evita un număr mare, dar irelevant, de trasee posibile, micile diferențe între numărul de biciclete la momentele date nu au fost luate în considerare.

Principalele avantaje ale acestui model sunt legate de gradul de încredere ridicat privind valorile estimate și modul sugestiv de urmărire a variațiilor resurselor (numărul disponibil de biciclete, respectiv locuri libere). Mai mult, pot fi evidențiate influențele diferiților factori asupra rezultatului final estimat, incluzând intervalele de timp care compun întreaga perioadă de monitorizare.

Valorile obținute la ieșirile modelului pot servi scopurilor de reechilibrare, oferind a priori informații privind posibile stări critice ale stațiilor de biciclete.

Metodă de determinare a similitudinii comportamentului pentru gruparea stațiilor

În cadrul sistemelor bike-sharing, polarizarea traficului asociată cu naveta cauzează una dintre cele mai frecvente probleme pentru astfel de sisteme. Astfel, sistemele bike-sharing tind să își schimbe starea, de la un punct de echilibru către o stare dezechilibrată, în care există stații fără biciclete disponibile și stații pline, în care nu există docuri disponibile pentru returnarea bicicletelor închiriate. Menținerea disponibilității bicicletelor și a docurilor este una dintre provocările cu care se confruntă operatorii sistemelor bike-sharing.

Pentru majoritatea sistemelor bike-sharing, problema reechilibrării se pune atunci când, ca o consecință directă a funcționării se atinge un prag limită prestabilit, considerat acceptabil, al numărului de locuri libere, respectiv ocupate. Problema de reechilibrare este privită ca o problemă de optimizare în care rutele pot fi planificate pe baza estimărilor privind modul de utilizare a bicicletelor. Această abordare la nivel de stație este o sarcină intensivă din punct de vedere computațional. Pentru a reduce complexitatea predicțiilor, majoritatea studiilor propun soluții care implică gruparea stațiilor.

În acest context, în continuare este prezentată o nouă măsură de similitudine [6] care poate fi utilizată pentru gruparea stațiilor în funcție de perioadele de timp în care disponibilitatea bicicletelor este sub un anumit prag, subliniind astfel necesitatea clară ca eforturile de reechilibrare trebuie să fie direcționate către anumite grupuri de stații, pentru anumite perioade de timp.

Pentru a grupa stațiile sistemului, trebuie precizate criteriile care stabilesc apartenența la fiecare grup în parte. În acest sens, pot fi luate în considerare următoarele elemente și caracteristici:

- fluxul de biciclete;
- poziția geografică;
- apropierea de centre de interes (de exemplu, zone turistice, parcuri, instituții publice);
- densitatea stațiilor din vecinătate.

O altă variantă poate fi și luarea în considerare a gradului de încărcare a stației [6]. Exprimat fie ca un număr real, având valori în intervalul $[0;1]$, fie în procente, (0-100%), acesta este numărul de biciclete normalizat din stațiile de biciclete.

Având în vedere definiția menționată, gradul de încărcare poate fi exprimat sub forma următoarei egalități:

$$L = \frac{nb}{nb + nd} \quad (2)$$

unde nb și nd sunt numărul de biciclete, respectiv docuri, disponibile la stație. Capacitatea totală, reprezentată de numitorul fracției, nu este o constantă, fiind supusă modificării în timp datorită defectelor și a reparațiilor aferente care se desfășoară fie în cazul bicicletelor, fie la docuri ducând la scăderea și, respectiv, la creșterea capacității.

În Figura 3 se poate vizualiza evoluția în timp a gradului de încărcare L a unei stații alese arbitrar din sistemul Citi Bike.

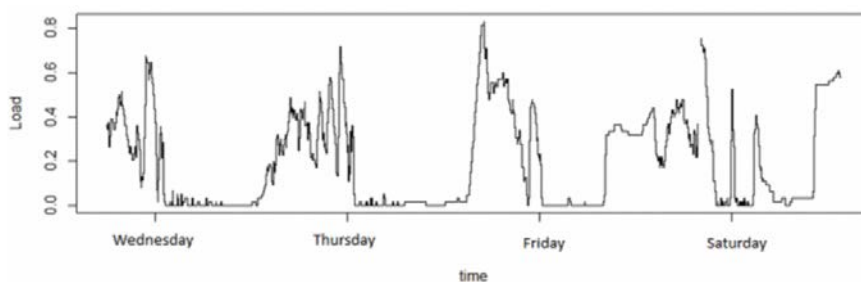


Figura 3: Evoluția în timp a gradului de încărcare.

O observație importantă referitoare la această reprezentare, care poate fi extinsă și la restul stațiilor din setul de date colectat, este că funcția suferă mai rar fluctuații în jurul valorii minime.

Această observație privind evoluția în timp a gradului de încărcare permite eliminarea din evaluarea obiectivă a unor porțiuni extinse din reprezentare, făcând abstracție de o mare parte a valorilor reprezentate.

Astfel, după obținerea acestei caracteristici, va rezulta un singur indicator numeric, care descrie stația în mod particular și care se bazează pe valorile gradului de încărcare înregistrate.

Pentru a obține valoarea corespunzătoare indicatorului numeric, datele rămase în urma procesului de eliminare sunt preluate și stocate, pentru fiecare intrare în parte și pentru setul de valori obținut se calculează ora medie la care au fost colectate datele.

Pragul luat în considerare în vederea eliminării valorii minime este calculat conform relației:

$$k_{\eta}(x) = \begin{cases} 0, & x > \eta \\ 1, & x \leq \eta \end{cases} \quad (3)$$

unde $k_{\eta} : [0, 1] \rightarrow \{0, 1\}$ este funcția caracteristică a setului de valori posibile ale gradului de încărcare; x reprezintă valoarea gradului de încărcare; η este valoarea constantă setată pentru prag.

Ora uzuală de funcționare în gol, \bar{h} , este calculată cu expresia următoare și este trăsătura esențială utilizată pentru determinarea gradului de similitudine.

$$\bar{h} = \frac{\sum_i h_i \cdot k_{\eta}(L_i)}{\sum_j k_{\eta}(L_j)} \quad (4)$$

unde h_i reprezintă momentul de timp când a fost colectată informația despre gradul de încărcare L_i .

Pe baza valorii medii orare, exista posibilitatea de a clasifica stațiile de biciclete.

De exemplu, în stațiile din zonele rezidențiale, stocul de biciclete disponibile tinde să se epuizeze dimineața în timpul săptămânii de lucru, din cauza faptului că majoritatea locuitorilor din mediul urban au un program de lucru similar în timp ce pentru centrele de activitate, în stațiile corespunzătoare stocurilor de biciclete tind să se epuizeze în jurul serii, marcând întoarcerea de la muncă a angajaților.

Este important de menționat că aceste tendințe se concretizează în informații specifice, informații peste care se suprapune zgomot.

Modul în care s-a realizat clasificarea în această lucrare presupune divizarea întregului interval orar 0-24 în subintervale mai mici și atribuirea unei clase fiecărui subinterval. În mod ideal pentru operațiunile de reechilibrare, stațiilor ce aparțin aceleiași clase le corespund arii geografice compacte. Obținerea unei distribuții geografice omogene a claselor implică o performanță scăzută a algoritmului ales, deoarece nu poate servi ca suport la decizia de a reloca vehiculele de reechilibrare în anumite zone.

Setul de pași pentru clasificare este descris în cele ce urmează.

1. Pentru fiecare stație, se calculează gradul de încărcare în funcție de moment.
2. Pe baza gradului de încărcare, se calculează ora uzuală de funcționare în gol pentru fiecare stație de biciclete.
3. În scopul reprezentării grafice, se atribuie fiecărei stații o culoare corespunzătoare partiției orare care include ora uzuală de funcționare în gol.
4. Toate stațiile sunt reprezentate prin puncte colorate într-un sistem de axe de coordonate, pe axa X fiind reprezentată longitudinea, iar pe axa Y latitudinea.

Se precizează că datele de intrare pe baza cărora se calculează gradul de încărcare în raport cu timpul sunt colectate o dată la 5 minute, pe parcursul întregii zile, pentru fiecare stație, acestea reprezentând:

- Localizarea, prin intermediul coordonatelor geografice (latitudine, longitudine);
- Numărul de docuri disponibile;
- Numărul de biciclete disponibile;
- Numărul de docuri și biciclete nefuncționale.

Rezultatele obținute prin aplicarea metodei propuse utilizând datele sistemului Citi Bike, luând în considerare intervale de aproximativ trei zile și jumătate și folosind setul de parametri descris în capitolul anterior, sunt prezentate în Figura 4. Stațiile sunt grupate în culori specifice claselor.

Se poate observa că există șase clustere diferite care denumesc fiecare un interval orar specific, culorile fiind atribuite în felul următor: ROȘU - [0; 4), PORTOCALIU - [4; 8), GALBEN - [8; 12), VERDE - [12; 16), ALBASTRU - [16, 20) și MOV - [20; 24).

Pe axa X este reprezentată longitudinea, axa Y latitudinea. Fiecare punct colorat corespunde unei stații de biciclete.

În cazul reprezentat, majoritatea stațiilor sunt colorate în albastru și galben, majoritatea stațiilor fiind în mod uzual goale, fie pe perioada dimineții a zilei, între orele 8 și 12, fie în decursul serii, între 16 și 20.

Tranziția de la grupurile albastre la cele galbene se face gradat, existând stații intermediare, de culoare verde, care reprezintă intervalul [12; 16).



Figura 4: Gruparea datelor în funcție de ora uzuală de funcționare în gol.

Traficul se aglomerează dimineața și seara în majoritatea zonelor metropolitane, ceea ce se potrivește cu măsurătorile efectuate.

Din punctul de vedere al rezultatelor comparative derivate, se poate observa că zonele cele mai extinse, colorate albastru și galben, tind să aibă aceeași localizare, iar în afara acestora, culoarea stațiilor fluctuează în mod pronunțat.

În cadrul metodei de validare, disparitatea definită la nivel de stații a fost determinată și s-a demonstrat că, luând în considerare o abatere precizată, se încadrează în limitele stabilite. Grupările rezultate pot fi utilizate atât în scopul rutării vehiculelor care efectuează reechilibrarea cât și pentru predicția cererii de resurse.

Modelarea comportamentului grupului de stații

Stațiile sistemelor bike-sharing întâmpină frecvent dezechilibre, care se traduc în distribuția nepotrivită a bicicletelor în sistem și în dificultăți privind îndeplinirea cerințelor utilizatorilor. Pentru a rezolva aceste situații, multe sisteme dispun de vehicule de reechilibrare care să redistribuie bicicletele. Stabilirea numărului necesar al vehiculelor de reechilibrare reprezintă un factor determinant pentru creșterea eficienței sistemului, menținând în același timp costuri reduse de achiziție și utilizare a resurselor. În acest scop, a fost propus un model bazat pe lanțuri Markov, care oferă suport în vederea stabilirii dimensiunii optime a flotei de reechilibrare în cazul în care, în cadrul unui subsistem, se realizează operația de reechilibrare pentru stațiile al căror comportament are un caracter dinamic pronunțat.

Pentru a obține un model al comportării subsistemului, un vector de stare $X(t)$ (unde t reprezintă timpul) este atașat subsistemului:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

unde m este numărul de stații de biciclete ce aparțin subsistemului și x_i este o funcție atașată la stația B , definită după cum urmează:

$$x_i = x(B_i) = \begin{cases} 1 & B_i \text{ este în STARE CRITICĂ} \\ 0 & \text{altfel} \end{cases} \quad (6)$$

Starea critică generală a subsistemului, \bar{x} , este determinată pe baza vectorului de stare, pentru a servi ca intrare pentru stările modelului de comportament propus. Starea critică generală a subsistemului este definită ca procentul de stații de biciclete din subsistem care se află în stare critică, formulat mai jos:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} (\cdot 100\%) \quad (7)$$

Diagrama din Figura 5 descrie metoda de calcul a stării critice generale, \bar{x} , folosind informațiile despre numărul de biciclete disponibile, k_i , și capacitatea, C_i , pentru oricare stație, B_i , ce aparține unui subsistem format din m stații de biciclete, $1 \leq i \leq m$.

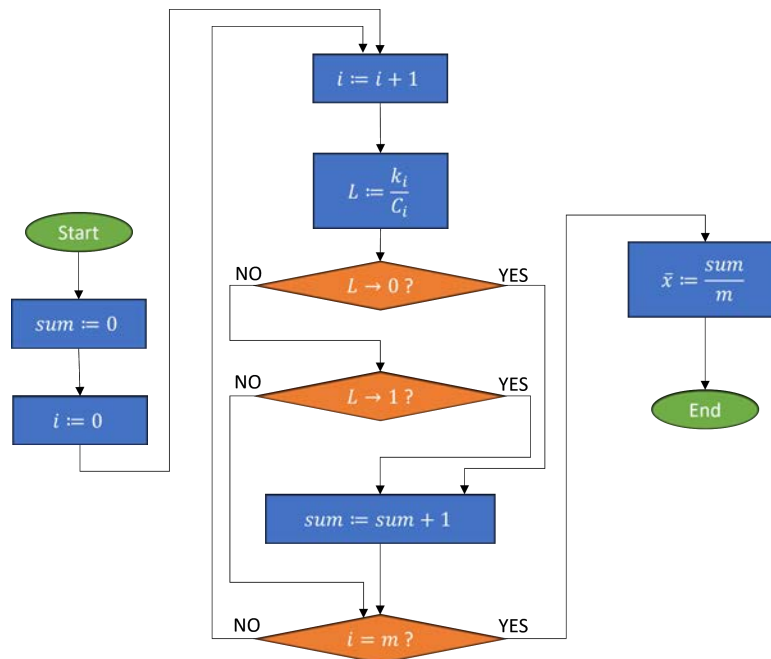


Figura 5: Diagrama metodei de calcul al stării critice generale a subsistemului.

În cazul utilizării modelului bazat pe lanțuri Markov pentru descrierea comportamentului subsistemului, apar două probleme: explozia numărului de stări și interdependența dintre stări și numărul de stații de biciclete. Ambele probleme sunt rezolvate printr-o strategie de cuantizare descrisă după cum urmează.

Luând în considerare că: s-a asociat o anumită valoare din domeniul $[0\%, 100\%]$ vectorului de stare a subsistemului; că rezoluția măsurării depinde de variabila m (definită în ecuația (7) ca număr de stații de biciclete) și că stările lanțului Markov trebuie să fie independente de numărul de stații

de biciclete, în caz contrar scalabilitatea subsistemului nefiind asigurată (adică dacă m este crescut, numărul de stări ar trebui să rămână constant, în caz contrar apare problema de explozie a numărului de stări), se efectuează o cuantizare pe intervalul de valori $[0\%, 100\%]$ al \bar{x} , după cum urmează:

$$[0\%, 100\%] = [0\%, \nu_1) \cup [\nu_1, \nu_2) \cup \dots \cup [\nu_{N-1}, 100\%], \quad (8)$$

$\uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow$
 $S_1 \qquad \qquad S_2 \qquad \qquad \qquad S_N$

unde S_1, S_2, \dots, S_N reprezintă stările lanțului Markov; $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{N-1}$ sunt constante ($0\% < \nu_1 < \nu_2 < \dots < \nu_{N-1} < 100\%$).

Din orice stare curentă, S_i , un subsistem are posibilitatea teoretică de a trece la orice altă stare, S_j , așa cum se poate vedea în cadrul exemplului de evoluție a stării subsistemului, în Figura 6, sau în cadrul diagramei de tranziție a stării pentru un subsistem, în Figura 7.

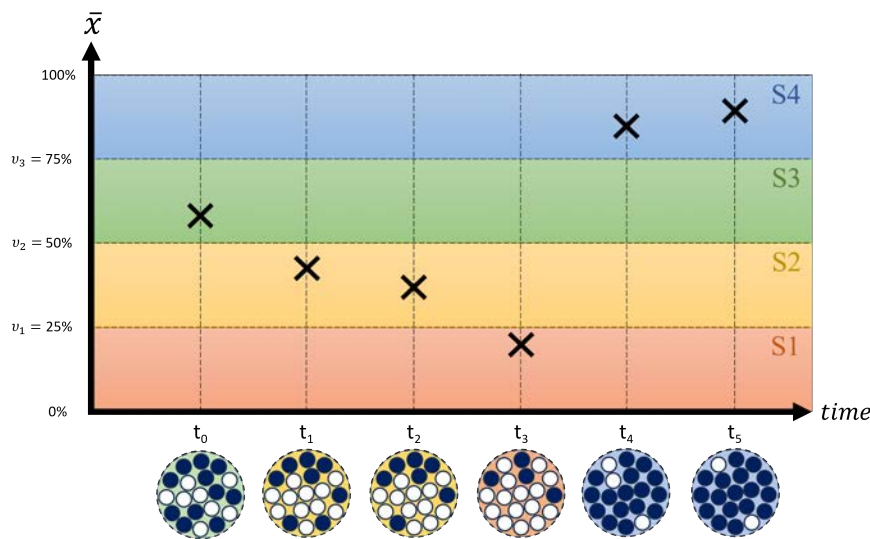


Figura 6: Un exemplu de evoluție a stării subsistemului.

În cadrul exemplului din Figura 6, subsistemul este simbolizat de un cerc care:

- are un contur de tip linie întreruptă,
- are un interior de culoare identică cu cea a benzii determinate de intervalul de valori procentuale corespunzătoare unei stări distincte,
- peste care, se suprapune un set de cercuri mai mici,
 - unele dintre ele având interior de culoare închisă.

De exemplu, reprezentarea subsistemului situată la marginea din stânga conține 11 cercuri de culoare închisă și 8 de culoare albă, care se suprapun peste un cerc cu interior de culoare verde. Această reprezentare simbolizează faptul că subsistemul are 19 stații, din care 11 se află în stare critică, iar valoarea stării critice generale corespunde stării S_3 a subsistemului. În grafic, pe axa absciselor a fost reprezentat timpul, iar pe axa ordonatelor, valoarea stării critice generale (\bar{x}). Fiecare punct de pe grafic corespunde unei stări critice generale de valoare \bar{x}_i , calculată la momentul de timp t_i , valoare care se încadrează într-unul dintre intervalele de valori ce corespund unei stări distincte: S_1, S_2, S_3 sau S_4 . Fiecare valoare \bar{x}_i a fost calculată împărțind numărul stațiilor reprezentate de cercuri mici de culoare închisă la numărul total de cercuri mici, din cadrul fiecărui cerc mai mare, reprezentând subsistemul.

Starea S_i din cadrul lanțului Markov este precizată în funcție de raportul dintre numărul de stații aflate în stare critică și numărul total de stații din subsistem. Starea se schimbă atunci când valoarea raportului ajunge în afara intervalului de valori $[v_{i-1}, v_i)$ specific stării S_i .

Timpu asociat tranzițiilor este exprimat printr-o variabilă aleatoare X cu o funcție de distribuție exponențială:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (9)$$

Dacă t_{ij} reprezintă intervalul de timp pentru care un subsistem rămâne în stare S_i până când atinge starea S_j , exprimat printr-o variabilă aleatoare de distribuție exponențială, cu valoare medie γ_{ij} , frecvența de execuție a tranziției va fi $\lambda_{ij} = \frac{1}{\gamma_{ij}}$, numită rata de tranziție.

O reprezentare generală a lanțului Markov asociat unui subsistem de stații este dată în Figura 7.

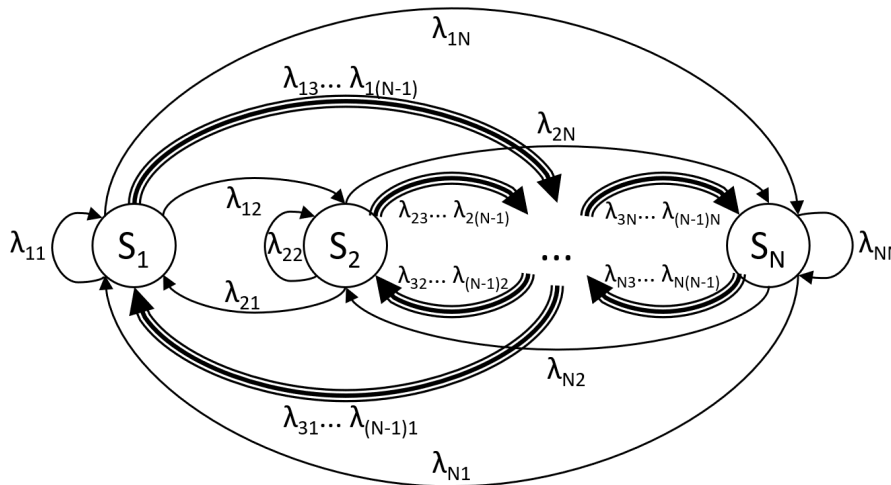


Figura 7: Diagrama de tranziție a stării pentru un subsistem.

Următoarele ipoteze au contribuit la stabilirea evoluției modelate de lanțul Markov:

- Odată ce un camion a părăsit o stație de biciclete, nu se mai poate întoarce la aceasta decât dacă a vizitat alte stații între timp.
- Bicicletele nu pot fi transferate între camioane care se întâlnesc în afara stațiilor.
- Probabilitatea tranziției între stările ce corespund unor intervale de valori învecinate este mult mai mare decât în celelalte cazuri.

Utilizând lanțul Markov propus și metoda descrisă în continuare, se poate determina regimul staționar al subsistemului și stabili numărul de camioane necesar pentru operația de reechilibrare.

Nivelul de cerere din subsistem (pentru reechilibrare) este definit în ecuația de mai jos:

$$D = \bar{x} \cdot m \quad (10)$$

Relația dintre dimensiunea optimă a flotei și diferitele cerințe ale subsistemului poate fi ilustrată și în Figura 8.

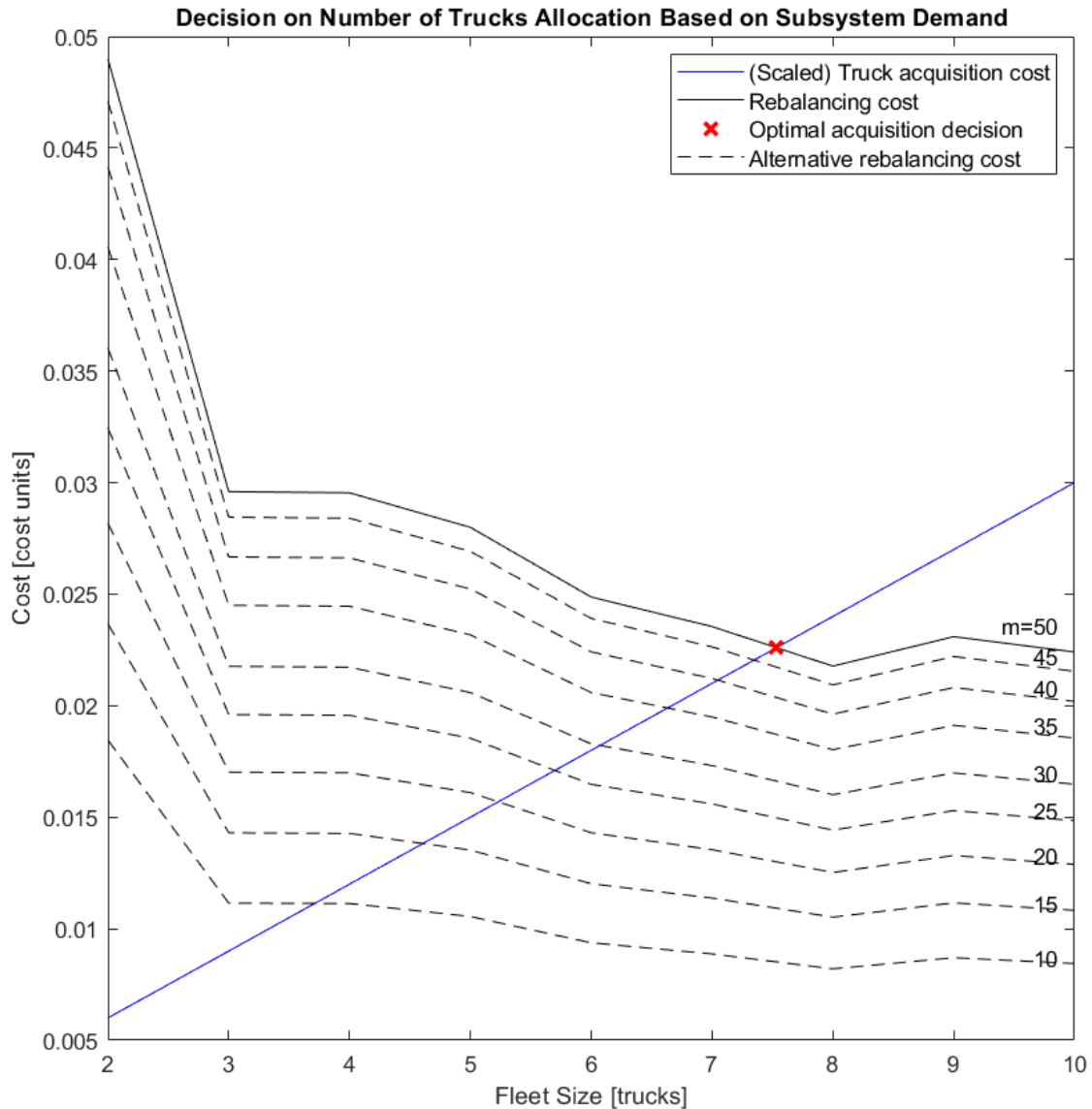


Figura 8: Reprezentarea costurilor, în funcție de numărul de camioane, de achiziție și utilizare a flotei de reechilibrare.

Pentru exemplificare, în Figura 8, pe baza rezultatelor disponibile din [35], costul real de reechilibrare a fost trasat sub forma liniei negre continue pentru care cererea subsistemului este maximă ($D = m = 50$ – marcat deasupra liniei); liniile întrerupte au fost folosite pentru alte cereri diferite ($D = 10, 15, 20, \dots, 45$ – marcat în partea de sus a liniilor); punctul roșu corespunde numărului optim de camioane, ca un compromis între costul inițial de achiziție a flotei și costul de reechilibrare; linia albastră are asociat costul scalat de achiziție a camionului, care crește liniar în funcție de numărul de camioane implicate, având în vedere că fiecare camion suplimentar reprezintă un cost fix. Scalarea costului de achiziție a camionului este formulată mai jos:

$$FK(\text{Tr}) = \alpha \cdot K_t \cdot \text{Tr}, \quad (11)$$

unde $FK : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$ este costul scalat al flotei; $\text{Tr} \in \mathbb{N}$ este numărul de camioane alocate pentru subsistem; $\alpha \in \mathbb{R}^+$ este un factor de scalare constant; $K_t \in \mathbb{R}^+$ este costul fix al achiziției unui camion.

Factorul de scalare α a fost selectat astfel încât să fie îndeplinite criteriile de optim din ecuația (12):

$$\hat{T}r \text{ este OPTIM} \iff FK(\hat{T}r) \approx CK(\hat{T}r), \quad (12)$$

unde $\hat{T}r$ este numărul optim de camioane alocate subsistemului; $FK : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$ este costul flotei reprezentat la scară; $CK : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$ este costul de reechilibrare; se folosește aproximarea (\approx) în loc de egalitate (=) deoarece este imposibil să se aloce fracții de camioane, deci se va folosi cel mai apropiat număr natural (de exemplu, în Figura 8, $\hat{T}r = 7$ sau 8).

Ecuția 7 arată că starea critică generală \bar{x} se modifică în timp și, pe baza ecuației (10), cererea subsistemului D este, prin urmare, schimbătoare. Numărul optim $\hat{T}r$ de camioane depinde, de asemenea, de D . Deoarece subsistemul care urmează să fie modelat aparține unui SBS din lumea reală, o altă constrângere este aceea că $\hat{T}r$ este selectat în mod ideal o singură dată în faza de început a subsistemului. Pentru a determina o cerere invariantă în timp \hat{D} a subsistemului, vor fi utilizate probabilitățile de stare staționară pentru subsistem. Vectorul de probabilități în starea de echilibru P^* este definit în ecuația de mai jos:

$$P^* = [P_1^* \quad P_2^* \quad \dots \quad P_N^*], \quad (13)$$

unde N este numărul de stări individuale ale subsistemului; P_i^* este probabilitatea ca subsistemul să fie în starea S_i și poate fi determinată prin rezolvarea următorului sistem de ecuații:

$$\begin{cases} P^* Q = 0 \\ \sum_{i=1}^N P_i^* = 1 \end{cases} \quad (14)$$

Luând în considerare ecuația de cuantizare (8) care afirmă că S_i corespunde unei criticități generale ca medie a limitelor intervalului ($\frac{1}{2}(v_{i-1} + v_i)$), cererea constantă \hat{D} a subsistemului va fi calculată după cum urmează:

$$\hat{D} = P^* \Upsilon m, \quad (15)$$

unde Υ este vectorul de stare critică generală medie asociat stărilor subsistemului ($\Upsilon \mapsto \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$), definit după cum urmează:

$$\Upsilon = \begin{bmatrix} \frac{v_{0,1}}{v_{1,2}} \\ \frac{v_{1,2}}{v_{2,3}} \\ \vdots \\ \frac{v_{N-2,N-1}}{v_{N-1,N}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_1 + v_2 \\ v_2 + v_3 \\ \vdots \\ v_{N-2} + v_{N-1} \\ v_{N-1} + 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Utilizarea modelului poate fi aplicată în sistemele bike-sharing reale pentru că are capacitatea de a surprinde comportamentul sistemului cu o rezoluție suficient de mare pentru ca vehiculele de reechilibrare să respecte constrângerile de timp. Stabilirea unei dimensiuni optime a flotei de reechilibrare asigură o eficiență crescută a operațiilor efectuate. Rezultatele obținute constituie un argument favorabil extinderii utilizării modelului, pentru descrierea comportamentului altor sisteme.

Strategii suport bazate pe algoritmi genetici modificați pentru re-locarea resurselor în sistemele bike-sharing

Chiar dacă s-au obținut deja multe rezultate promițătoare, numeroase articole publicate evidențiază faptul că problema reechilibrării în sistemele bike-sharing rămâne o problemă deschisă de cercetare. Motivată de necesitatea de a găsi soluții adecvate, care să asigure performanțe superioare, se propune

o strategie de re poziționare a bicicletelor în stațiile sistemelor bike-sharing, caracterizate printr-o dinamică pronunțată [35]. Elementele principale ale acestei strategii sunt un algoritm genetic controlat fuzzy-logic (AGCLF) și un mecanism de inferență. Primul pas al metodei constă în stabilirea ordinii deservirii stațiilor de biciclete, care necesită reechilibrare, de către camioanele care fac reechilibrarea, utilizând algoritmul AGCLF [36]. Pentru a minimiza costul total de transport per bicicletă transportată, în a doua etapă este dezvoltată o metodă de repartizare a listelor care conțin ordinea de deservire a stațiilor la agenții care efectuează reechilibrarea.

Figura 9 este o reprezentare schematică a metodei: o listă de reguli care specifică constrângerile de reechilibrare, împreună cu datele de trafic dinamic, constituie intrarea unui algoritm de decizie; algoritmul genetic este folosit pentru a determina ordinea serviciilor. Regulile de atribuire a camioanelor sunt apoi aplicate pentru a obține lista ordonată de stații pentru fiecare camion.

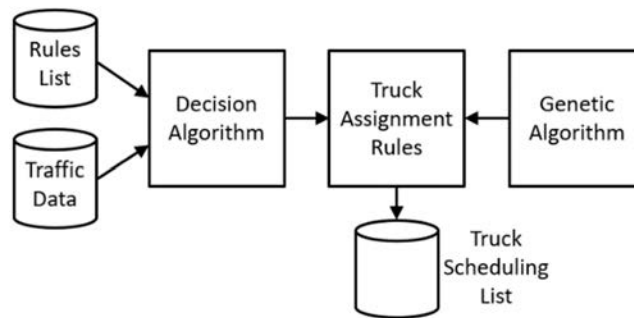


Figura 9: Reprezentare schematică a metodei propuse.

Diagrama bloc a algoritmului AGCLF, propus pentru soluționarea problemei de reechilibrare, este prezentată în figura următoare:

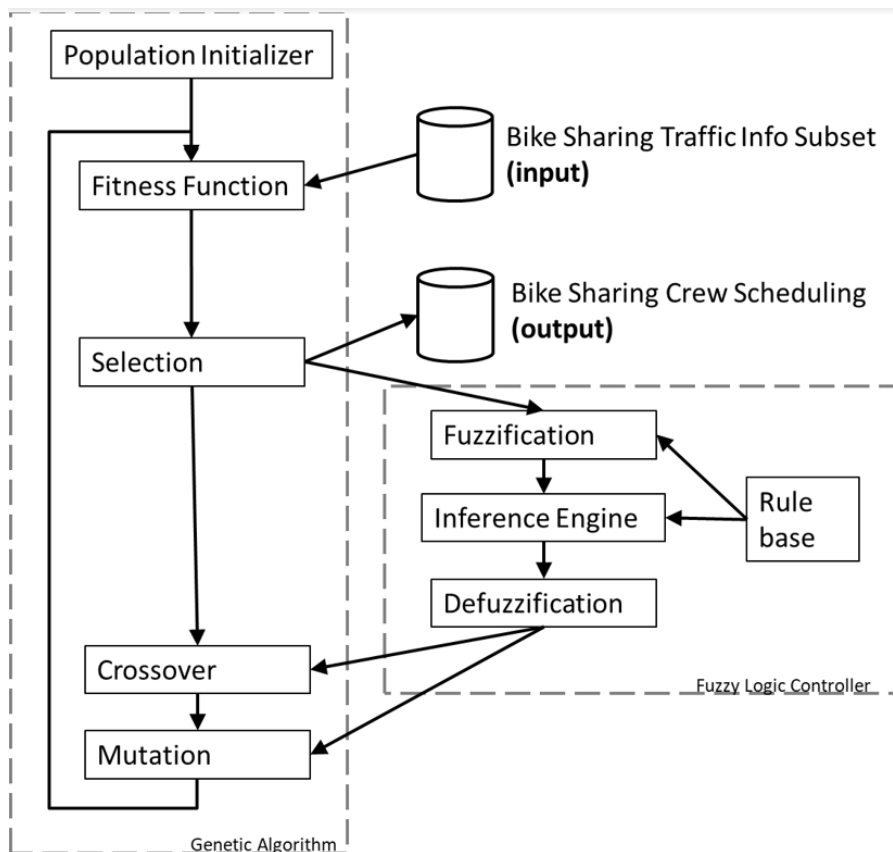


Figura 10: Schema bloc a algoritmului AGCLF.

Diagrama este formată din două părți principale, corespunzătoare algoritmului genetic (AG) și controlerului fuzzy-logic (CFL).

Controlerul ajustează dinamic probabilitățile de încrucișare și mutație pentru următoarea generație pe baza statisticilor soluțiilor candidate curente.

Rezultatul în urma aplicării algoritmului AGCLF este ordinea de deservire a stațiilor de biciclete care necesită reechilibrare.

Pașii algoritmului de asociere a listelor de priorități, care vizează ordinea de vizitare a stațiilor, la camioanele de reechilibrare, sunt prezentați în continuare:

Algoritm 1 Algoritm de decizie pentru asocierea camioanelor.

```

1: INPUTS: S, T
2: for station in S do
3:   truckAssigned ← FALSE
4:   truck ← getFirstElement(T)
5:   repeat
6:     journey ← getJourneyHistory(truck)
7:     if length(journey) = MINIMUM then
8:       pair(truck, station)
9:       if ableToFulfillDemand(truck) then
10:        route ← distance(truck,station)
11:       else
12:        route ← distance(truck, depot) + distance(depot, station)
13:       end if
14:       journey ← journey + route
15:       updateJourneyHistory(truck, journey)
16:       truckAssigned ← TRUE
17:     else
18:       truck ← getNextElement(T)
19:     end if
20:   until truckAssigned = TRUE
21: end for
22: OUTPUT: journey

```

Algoritmul ia în considerare evenimentul special când camionul nu mai are capacitatea de a deservi direct următoarea stație de biciclete. Vizitarea suplimentară a depozitului va duce la creșterea costului total al călătoriei.

Un exemplu de rute atribuite camioanelor, rezultate din rularea aplicației pentru un subsistem format din 5 camioane și 20 de stații, se prezintă în Tabelul 1.

Tabelul 1: Exemplu de rute rezultate.

ID Camion	Ruta	Lungime rută	Grad de încărcare [%]
1	0→7→16→4→20→0	14.34	72
2	0→17→23→12→0→15→9→14→0→3→2→0	13.80	86
3	0→6→10→8→0	16.96	53
4	0→11→19→13→18→0	15.35	35
5	0→1→0→5→0	12.55	64

Indicatorii de performanță, cu valorile calculate pe baza rutelor obținute ale camioanelor de reechilibrare, reflectă aspecte relevante privind funcționarea corectă a sistemului: reducerea timpului total de funcționare în stare critică a sistemului; reducerea ratei clienților pierduți; obținerea unei distribuiri uniforme a sarcinilor repartizate camioanelor de reechilibrare. Eficiența metodei a fost testată în cadrul diferitelor studii reprezentative de caz, utilizând datele înregistrate din sistemul Citi Bike.

Analiză comparativă a rezultatelor obținute prin integrarea în metoda de relocare a unor algoritmi de referință

Metoda de relocare a bicicletelor în sistemele bike-sharing, prezentată anterior, a fost testată pe datele de trafic de la sistemul Citi Bike New York și rezultatele au fost comparate cu cele obținute înlocuind algoritmul AGCLF cu fiecare dintre următorii algoritmi: Algoritm Genetic Standard (AGS), Ant Colony Optimization (ACO) [37], Harris Hawks Optimization (HHO) [38], Algoritm de Căutare Tabu (ACT) [39]. Aplicabilitatea tuturor metodelor este demonstrată prin efectuarea de experimente numerice folosind date istorice reale de trafic pe 1000 de seturi de date, fiecare set de date corespunzând unui grup de stații din sistem (subsistem) și a unui scenariu, fiecare scenariu fiind o combinație unică de numere de camioane și stații implicate în experiment.

Pentru a reprezenta grafic rezultatele fiecărei metode, a fost utilizată o histogramă. Pe axa orizontală a histogramei sunt reprezentate valorile posibile ale funcției obiectiv corespunzătoare rutării camioanelor de reechilibrare, iar pe axa verticală, numărul de subsisteme pentru care valoarea respectivă a fost determinată. Fiecare subsistem distinct este identificat pe baza numărului și a locațiilor stațiilor pe care le conține, cât și prin numărul de camioane de reechilibrare implicate. Pentru fiecare subsistem în parte este determinat un set de rute corespunzător vizitării stațiilor de către camioanele de reechilibrare. Performanța setului de rute determinat este exprimat de valoarea funcției obiectiv corespunzătoare. Fiecărei valori a funcției obiectiv îi corespunde un element ce este adăugat în histogramă. Un exemplu de histogramă este prezentat în Figura 11.

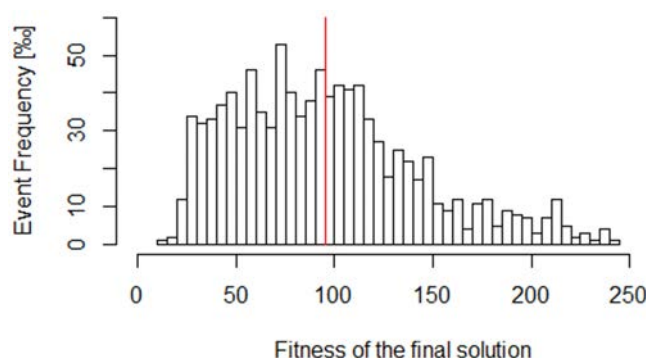


Figura 11: Histograma valorilor indicatorilor de performanță a metodelor de relocare a bicicletelor.

Fiecare subsistem, care stă la baza calculării fiecărui element introdus în histogramă, a fost generat prin folosirea unei ferestre de căutare utilizând datele locației geografice (latitudine, longitudine) a stațiilor de biciclete. În acest context, poziția ferestrelor este aleatorie pe harta stațiilor de biciclete din sistemul bike-sharing, având o dimensiune fixă. Dimensiunea ferestrei a fost aleasă pentru a captura un număr constant de stații. Dacă o fereastră acoperă mai multe stații decât se dorește, se efectuează o selecție aleatorie a stațiilor reziduale care trebuie eliminate din probă. Procedura este exemplificată în Figura 12.



Figura 12: Exemplu de fereastră de căutare aplicată pe sistemul Citi Bike New York.

Mai multe scenarii, care au inclus un număr variabil de camioane și stații de biciclete, au fost definite în scopul evaluării performanței și scalabilității metodei. Analiza comparativă a rezultatelor s-a bazat pe următoarele proprietăți, determinate prin analizarea histogramelor: valoarea mediană a funcției obiectiv, abaterea standard a valorilor, valoarea funcției obiectiv corespunzătoare celei de a 10-a percentile și valoarea funcției obiectiv corespunzătoare percentilei celei de a 90-a percentile.

Un exemplu ilustrând rezultatele, care au fost obținute integrând în metoda de reechilibrare algoritmul genetic modificat propus și algoritmul ACO, este prezentat în Tabelul 2:

Tabelul 2: Rezultatele obținute în urma aplicării algoritmilor AGCLF, respectiv ACO, în cadrul metodei de relocare.

Nr. camioane	Nr. stații	Fitness median [biciclete/km]	Abatere standard [biciclete/km]	Fitness (percentila 10) [biciclete/km]	Fitness (percentila 90) [biciclete/km]	Distanță totală parcursă [km]
AGCLF - DIFERITE NUMERE DE STAȚII						
2	10	9.52	2.33	4.40	16.89	39.72
2	15	11.90	3.01	4.74	20.49	50.94
2	20	13.85	4.28	5.16	23.63	60.64
2	25	15.52	5.82	5.43	28.07	69.83
2	30	17.347	6.77	5.21	30.12	77.53
2	35	18.15	8.41	5.84	33.02	87.28
2	40	19.03	7.22	6.19	34.14	95.01
2	45	19.78	8.95	6.71	32.45	101.36
2	50	20.41	8.36	6.55	37.05	105.43
ACO - DIFERITE NUMERE DE STAȚII						
2	10	5.91	1.06	4.18	10.17	52.27
2	15	7.38	1.59	4.21	12.36	78.21
2	20	9.79	1.67	4.71	12.78	78.39
2	25	10.29	3.99	3.78	15.74	104.47
2	30	12.58	3.35	4.57	16.91	109.50
2	35	13.07	3.69	4.58	17.00	134.73
2	40	12.69	3.22	5.24	17.83	114.38
2	45	11.96	2.83	5.20	18.66	139.90
2	50	14.34	4.09	5.82	18.91	134.86
AGCLF - DIFERITE NUMERE DE CAMIOANE						
2	50	20.41	8.36	6.55	37.05	105.43
3	50	33.79	15.97	10.29	62.75	114.75
4	50	33.85	17.94	9.42	67.19	135.73
5	50	35.72	18.36	9.13	69.37	147.51
6	50	40.21	17.53	12.90	71.59	166.84
7	50	42.47	19.61	11.53	73.71	185.97
8	50	45.93	20.03	13.87	78.26	203.48
9	50	43.30	20.84	12.58	75.28	213.39
10	50	44.63	22.56	14.39	78.04	231.62
ACO - DIFERITE NUMERE DE CAMIOANE						
2	50	14.34	4.09	5.82	18.91	134.86
3	50	25.30	14.86	8.26	49.98	144.22
4	50	28.74	16.11	7.93	51.52	163.18
5	50	31.30	15.52	7.49	63.74	177.76
6	50	34.34	13.70	11.19	53.98	213.99
7	50	38.08	18.38	8.96	58.22	251.56
8	50	35.21	20.71	13.03	65.58	253.67
9	50	39.80	19.75	10.10	63.77	251.59
10	50	38.68	18.29	12.90	66.23	292.42

Analizei comparativă efectuată a condus la concluzia că din punctul de vedere al performanței medii a operației de reechilibrare, rezultate algoritmului propus sunt superioare celor ale algoritmilor ACO, ACT și algoritmului genetic standard, iar pentru subsisteme de dimensiune redusă sunt superioare celor ale algoritmului HHO. De asemenea, s-a demonstrat că algoritmul genetic modificat propus are un timp de convergență mai mic decât algoritmul genetic standard. Rezultatele recomandă metoda pentru a fi utilizată și în cazul altor aplicații similare.

Contribuțiile tezei

Principalele contribuții inovative sunt prezentate în continuare, fiind enumerate respectând ordinea capitolelor tezei:

Capitolele 1, 2 și 3:

1. Realizarea unei analize extinse a studiilor și cercetărilor recente privind optimizarea operațiilor din sistemele logistice: mutare, depozitare, fracționare/grupare, pregătire sortiment comercial, transport și cele din sistemele bike-sharing. Contribuția menționată vizează realizarea primului, celui de-al doilea, celui de-al treilea și celui de-al cincilea obiectiv.

Capitolul 4:

2. Elaborarea unor metode de selectare a stațiilor din sistem, care prezintă o dinamică pronunțată. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al șaptelea obiectiv.
3. Formularea ipotezelor și stabilirea caracteristicilor luate în considerare la descrierea stațiilor de biciclete. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea obiectiv.
4. Formularea ipotezelor și stabilirea caracteristicilor luate în considerare la descrierea agenților de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea obiectiv.
5. Formularea ipotezelor privind cazurile de funcționare a depozitelor. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea obiectiv.
6. Stabilirea criteriilor de selectare a stațiilor caracterizate de o dinamică pronunțată, din sistemele bike-sharing. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea obiectiv.
7. Implementarea funcțiilor de extragere și preprocesare a datelor generate, preluate din baza de date a sistemului sistemul Citi Bike New York. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al șaptelea obiectiv.

Capitolul 5:

8. Utilizarea rețelelor Petri probabilistice pentru modelarea variațiilor temporale ale numărului de biciclete. Contribuția menționată vizează realizarea primului, celui de-al doilea și celui de-al patrulea obiectiv.
9. Implementarea algoritmilor de liniarizare a comportamentului stațiilor de biciclete reflectat prin variația numărului de biciclete în timp. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al șaptelea obiectiv.
10. Implementarea modelelor bazate pe rețele Petri probabilistice care descriu evoluția gradului de încărcare a stațiilor de biciclete. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea și celui de-al șaselea obiectiv.

Capitolul 6:

11. Definirea similitudinii comportamentului stațiilor din sistemul bike-sharing. Contribuția menționată vizează realizarea primului și celui de-al doilea obiectiv.
12. Utilizarea lanțurilor Markov pentru modelarea comportamentului grupurilor de stații de biciclete. Contribuția menționată vizează realizarea primului, celui de-al doilea și celui de-al patrulea obiectiv.

13. Elaborarea unei metode de identificare și evaluare a comportamentului grupurilor de stații, bazată pe selectarea unor intervale orare, corespunzătoare unor șabloane de comportament. Contribuția menționată vizează realizarea primului, celui de-al doilea și celui de-al patrulea obiectiv.
14. Dezvoltarea unei metode de determinare a numărului necesar de camioane în scopul reechilibrării stațiilor în care cererea totală de biciclete se modifică în timp. Contribuția menționată vizează realizarea primului, celui de-al doilea și celui de-al treilea obiectiv.
15. Proiectarea și implementarea aplicației software utilizate la extragerea trăsăturilor subsistemelor, în scopul modelării comportamentului grupurilor de stații. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea și celui de-al șaptelea obiectiv.
16. Implementarea metodei de determinare a similitudinii comportamentului stațiilor. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al doilea și celui de-al șaptelea obiectiv.
17. Proiectarea și implementarea modelării bazate pe lanțuri Markov utilizate la descrierea comportamentului grupurilor de stații. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea și celui de-al cincilea obiectiv.

Capitolul 7:

18. Elaborarea unui mecanism de inferență în scopul atribuirii listelor care conțin ordinea de vizitare a stațiilor către agenții care efectuează reechilibrarea. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea obiectiv.
19. Elaborarea unui algoritm în vederea determinării rutelor agenților de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea obiectiv.
20. Integrarea algoritmilor genetici controlați cu logică fuzzy în metoda de relocare a bicicletelor. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea obiectiv.
21. Definirea în etape a unei funcții obiectiv, în scopul determinării performanței operațiilor de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea, celui de-al cincilea și celui de-al șaselea obiectiv.
22. Parametrizarea unui controler fuzzy în scopul obținerii unor performanțe superioare în cadrul operațiilor de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea și celui de-al șaselea obiectiv.
23. Proiectarea arhitecturii aplicației software care implementează metoda de alocare a listelor de vizitare a stațiilor la agenții de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea obiectiv.

Capitolul 8:

24. Efectuarea unei analize comparative a performanțelor obținute prin integrarea unor algoritmi de rutare reprezentativi în cadrul metodei de relocare a bicicletelor. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al cincilea și celui de-al șaselea obiectiv.
25. Utilizarea unor ferestre de căutare cu locație selectată aleatoriu pentru generarea seturilor de date folosite în scopul validării metodelor de reechilibrare. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al cincilea și celui de-al șaselea obiectiv.

Următoarea contribuție se aplică pentru capitolele 6, 7 și 8:

26. Implementarea tuturor metodelor de identificare și validare a modelelelor propuse în teză. Contribuția menționată vizează realizarea celui de-al treilea, celui de-al șaselea și celui de-al șaptelea obiectiv.

Diseminare

Contribuțiile acestei teze au fost publicate atât în jurnale de prestigiu, din domeniile *Information Theory Applied in Scientific Computing* și *Intelligent Transportation System Technologies and Applications*, cât și în volumele unor conferințe internaționale din domeniul *Automation, Quality and Testing, Robotics*. În continuare, se prezintă lista lucrărilor publicate:

Lucrări publicate în jurnale indexate Web of Science

- Lucrări publicate în perioada elaborării tezei
 - **Florian H.**, Avram C., Radu D., Aștilean A. *Decision system based on Markov chains for sizing the rebalancing fleet of bike-sharing stations*, Applied Sciences, vol. 14, 2024
 - **Florian H.**, Avram C., Pop M., Radu D., Aștilean A. *Resources Relocation Support Strategy Based on a Modified Genetic Algorithm for Bike-Sharing Systems*, Mathematics, vol. 11, 2023
- Lucrări publicate înaintea începerii tezei
 - **Florian H.**, Mocanu A., Vlasin C., Machado J., Carvalho V., Soares F., Aștilean A., Avram C. *Deaf people feeling music rhythm by using a sensing and actuating device*, Sensors and Actuators A: Physical, 2017

Lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale

- IEEE Proceedings
 - Tudoroiu R., Santa M., **Florian H.**, Zaheeruddin M., Radu S., Tudoroiu N. *Nonlinear Neural Control Strategies versus Conventional Control — Case Study and Performance Comparison*, 2024 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2024
- Volume ale conferințelor indexate Web of Science
 - **Florian H.**, Avram C., Pop M., Mocanu A., Radu D., Aștilean A. *Probabilistic Petri Nets Model for Assessing Temporal Variations of the Number of Bikes in Bike-Sharing Stations*, 2022 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2022.
 - **Florian H.**, Pop M., Avram C., Aștilean A. *Similarity measure for station clustering in bike sharing systems*, 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020.

Bibliografie

- [1] X. Guoxun, L. Yanfeng, J. Daxiang, and L. Jun, “A user-based method for the static bike repositioning problem,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 40, pp. 426–436, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12011/1000-6788-2018-0884-11>
- [2] R. E. Sibai, K. Challita, J. B. Abdo, and J. Demerjian, “A new user-based incentive strategy for improving bike sharing systems’ performance,” *Sustainability*, vol. 13, no. 5, p. 2780, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13052780>
- [3] B. Legros, “Dynamic repositioning strategy in a bike-sharing system; how to prioritize and how to rebalance a bike station,” *European Journal of Operational Research*, vol. 272, no. 2, pp. 740–753, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.051>
- [4] Y.-C. Lin, “A demand-centric repositioning strategy for bike-sharing systems,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5580, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s22155580>
- [5] S. Reiss and K. Bogenberger, “A relocation strategy for munich's bike sharing system: Combining an operator-based and a user-based scheme,” *Transportation Research Procedia*, vol. 22, pp. 105–114, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.016>
- [6] H. Florian, M. Pop, C. Avram, and A. Aștilean, “Similarity measure for station clustering in bike sharing systems,” in *2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, 2020, pp. 1–5.
- [7] S. Sohrabi, R. Paleti, L. Balan, and M. Cetin, “Real-time prediction of public bike sharing system demand using generalized extreme value count model,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 133, pp. 325–336, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856417316105>
- [8] M. Cipriano, L. Colomba, and P. Garza, “A data-driven based dynamic rebalancing methodology for bike sharing systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 6967, Jul. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app11156967>
- [9] M. Kruszyna, “NOAH as an innovative tool for modeling the use of suburban railways,” *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 193, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su15010193>
- [10] F. Lu, W. Feng, M. Gao, H. Bi, and S. Wang, “The fourth-party logistics routing problem using ant colony system-improved grey wolf optimization,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, pp. 1–15, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/8831746>
- [11] F. Chiariotti, C. Pielli, A. Zanella, and M. Zorzi, “A dynamic approach to rebalancing bike-sharing systems,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/512>

- [12] E. Eren and V. E. Uz, “A review on bike-sharing: The factors affecting bike-sharing demand,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, p. 101882, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719312387>
- [13] C. S. João Filipe Teixeira and F. M. e Sá, “Empirical evidence on the impacts of bikesharing: a literature review,” *Transport Reviews*, vol. 41, no. 3, pp. 329–351, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1841328>
- [14] C. Sun and J. Lu, “The reliability model for bike-sharing dispatch based on hotspot detection and hypothesis test: A case study in beijing,” *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2022, p. 1–13, Jan. 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2022/7049765>
- [15] —, “Modeling spatial riding characteristics of bike-sharing users using hotspot areas-based association rule mining,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, p. 1–14, Apr. 2022. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2022/5705080>
- [16] C. M. Vallez, M. Castro, and D. Contreras, “Challenges and opportunities in dock-based bike-sharing rebalancing: A systematic review,” *Sustainability*, vol. 13, no. 4, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/1829>
- [17] J. Zhou, Y. Guo, J. Sun, E. Yu, and R. Wang, “Review of bike-sharing system studies using bibliometrics method,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 9, no. 4, pp. 608–630, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756422000174>
- [18] J. Zhao, W. Fan, and X. Zhai, “Identification of land-use characteristics using bicycle sharing data: A deep learning approach,” *Journal of Transport Geography*, vol. 82, p. 102562, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692318309232>
- [19] M. E. Mohammed H. Almannaa and H. A. Rakha, “Dynamic linear models to predict bike availability in a bike sharing system,” *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, no. 3, pp. 232–242, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1611976>
- [20] V. Mahmoodian, Y. Zhang, and H. Charkhgard, “Hybrid rebalancing with dynamic hubbing for free-floating bike sharing systems,” *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 636–652, Sep. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.08.002>
- [21] Y. Jin, C. Ruiz, and H. Liao, “A simulation framework for optimizing bike rebalancing and maintenance in large-scale bike-sharing systems,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 115, p. 102422, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102422>
- [22] Y. Fan, G. Wang, X. Lu, and G. Wang, “Distributed forecasting and ant colony optimization for the bike-sharing rebalancing problem with unserved demands,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 12, p. e0226204, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226204>
- [23] Q. Tang, Z. Fu, D. Zhang, M. Qiu, and M. Li, “An improved iterated local search algorithm for the static partial repositioning problem in bike-sharing system,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, pp. 1–15, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2020/3040567>

- [24] J. Oyola, H. Arntzen, and D. L. Woodruff, “The stochastic vehicle routing problem, a literature review, part i: models,” *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 7, no. 3, pp. 193–221, Sep. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13676-016-0100-5>
- [25] ———, “The stochastic vehicle routing problem, a literature review, part II: solution methods,” *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 6, no. 4, pp. 349–388, Dec. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13676-016-0099-7>
- [26] Y. Zhu, X. Ye, J. Chen, X. Yan, and T. Wang, “Impact of cruising for parking on travel time of traffic flow,” *Sustainability*, vol. 12, no. 8, p. 3079, Apr. 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/su12083079>
- [27] C. Bıyık, A. Abareshi, A. Paz, R. A. Ruiz, R. Battarra, C. D. Rogers, and C. Lizarraga, “Smart mobility adoption: A review of the literature,” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 7, no. 2, p. 146, Jun. 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/joitmc7020146>
- [28] J. Sonnleitner, M. Friedrich, and E. Richter, “Impacts of highly automated vehicles on travel demand: macroscopic modeling methods and some results,” *Transportation*, vol. 49, no. 3, p. 927–950, Jun. 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11116-021-10199-z>
- [29] J. Pucher and R. Buehler, “Cycling towards a more sustainable transport future,” *Transport Reviews*, vol. 37, no. 6, pp. 689–694, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1340234>
- [30] S. Shaheen, “Mobility and the sharing economy: Potential to overcome first- and last-mile public transit connections,” *Transport Reviews*, 2016. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/8042k3d7>
- [31] F. Kon, É. C. Ferreira, H. A. de Souza, F. Duarte, P. Santi, and C. Ratti, “Abstracting mobility flows from bike-sharing systems,” *Public Transport*, vol. 14, no. 3, pp. 545–581, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00259-5>
- [32] The Geography of Transport Systems. [Online]. Available: <https://transportgeography.org/contents/chapter1/what-is-transport-geography/challenges-transport-systems/>
- [33] M. Albanese, R. Chellappa, V. Moscato, A. Picariello, V. Subrahmanian, P. Turaga, and O. Udrea, “A constrained probabilistic petri net framework for human activity detection in video,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 10, no. 8, pp. 1429–1443, 2008.
- [34] H. Florian, C. Avram, M. Pop, A. Mocanu, D. Radu, and A. Astilean, “Probabilistic petri nets model for assessing temporal variations of the number of bikes in bike-sharing stations,” in *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2022, Cluj-Napoca, Romania, May 19-21, 2022*. IEEE, 2022, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/AQTR55203.2022.9802065>
- [35] H. Florian, C. Avram, M. Pop, D. Radu, and A. Aştilean, “Resources relocation support strategy based on a modified genetic algorithm for bike-sharing systems,” *Mathematics*, vol. 11, no. 8, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/8/1816>
- [36] E. Khmeleva, A. A. Hopgood, L. Tipi, and M. Shahidan, “Fuzzy-logic controlled genetic algorithm for the rail-freight crew-scheduling problem,” *KI - Künstliche Intelligenz*, vol. 32, no. 1, pp. 61–75, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13218-017-0516-6>

- [37] M. Dorigo and C. Blum, "Ant colony optimization theory: A survey," *Theoretical Computer Science*, vol. 344, no. 2-3, pp. 243–278, Nov. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2005.05.020>
- [38] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849–872, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
- [39] F. Glover, "Tabu search—part i," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190–206, Aug. 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>