

REZUMAT
asupra tezei de doctorat
“Adaptive Traffic Control Using Bio-Inspired Optimization”,
elaborată de domnul inginer Cristian Coșariu

Creșterea traficului rutier a devenit o problemă a societății moderne. Ea este vizibilă, mai ales în comunitățile în curs de dezvoltare și nu mai poate fi susținută prin extinderea infrastructurii rutiere, aceasta ajungând deja la limită. Este necesară astfel adoptarea soluțiilor integrate inteligente de control al traficului rutier care să raționalizeze traficul în strânsă legătură cu specificul fiecărei rețele urbane, folosindu-se de infrastructura deja existentă.

Se remarcă numărul semnificativ, precum și varietatea abordărilor tot mai complexe, care combină metode specifice ariilor de studiu din inginerie, de la cele specifice transporturilor la cele cunoscute din domeniul calculatoarelor sau sociologiei. Există metode clasice deja care propun fluidizarea mișcărilor traficului rutier prin controlul semaforizării în punctele cu cele mai importante probleme din trafic. Acestea s-au dovedit însă de-a lungul timpului limitate din punct de vedere al lipsei de reacție în timp real la condițiile mereu schimbătoare din trafic. Abordarea avută în vedere în lucrarea de față este una de natură adaptivă, în care semafoarele sunt transformate în elemente active de control, care își modifică parametri de funcționare în funcție de valorile din trafic.

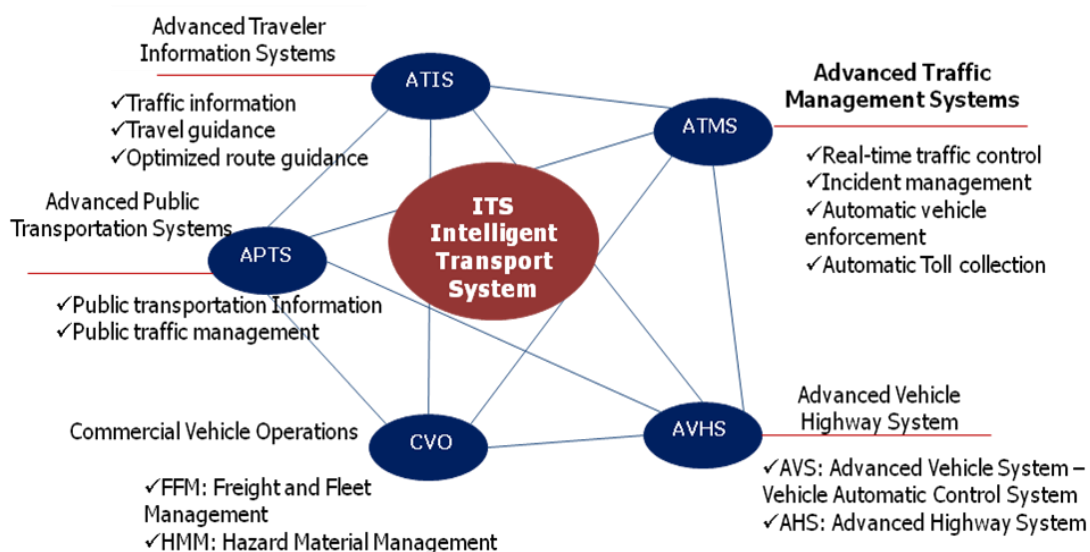
Primul capitol intitulat „Transportation System and the Infrastructure” jalonează prin tematica abordată, folosind o serie de studii recente și lucrări considerate a fi de bază. Este justificată mai apoi oportunitatea, dar și actualitatea preocupării pentru problema optimizării traficului rutier și în mod special necesitatea utilizării metodelor specifice ingineriei calculatoarelor în domenii conexe, precum cel al ingineriei transporturilor. Timpul petrecut în ambuteiajele din trafic este în strânsă legătură cu scăderea calității vieții de zi cu zi. Acest fapt este punctat de studiile recente care arată că s-a ajuns în punctul în care este redus timpul alocat somnului și hranei pentru a compensa timpul petrecut în trafic. În același context, componenta socială a traficului nu poate fi separată de această problemă, în cea mai mare parte a sa, traficul fiind generat de nevoia de socializare umană. Mai mult, prognoza făcută de International Energy Agency, estimează că până în anul 2050 traficul rutier va crește cu până la 50% față de valorile actuale.

În continuare este prezentată evoluția infrastructurii rutiere de la una pasivă, lipsită de reacție, până la semafoarele care au fost transformate în „embedded systems” și proiectate să răspundă în timp real schimbărilor din trafic. În prezent, forumurile internaționale de decizie pregătesc cadrul legislativ pentru a introduce comunicarea „vehicle to vehicle (V2V)”, „vehicle to infrastructure (V2I)” și „infrastructure to infrastructure (I2I)”, menite să crească în primul rând securitatea rutieră. În acest context, atenția se îndreaptă spre sistemele inteligente de management al traficului și spre integrarea senzorilor din întreaga infrastructură pentru optimizarea acestui flux de trafic prezent în rețea. Se caută soluții low-cost și cu impact minim asupra infrastructurii, cercetarea în acest domeniu orientându-se către redesignul echipamentelor deja existente, cum ar fi semnele de circulație inteligente. Semafoarele se transformă astfel din elemente pasive de control al mișcării în

interiorul intersecțiilor, în sisteme inteligente capabile să gestioneze traficul rutier bazat pe răspunsul în timp real la condițiile din trafic. Tehnologia informației sau IT, după cum este referită în literatura de specialitate, oferă mijloacele necesare dezvoltării acestor tehnologii inteligente de control, necesare societății urbane.

Principala consecință a creșterii numărului de vehicule din comunitățile urbane este congestia. Efectele negative ale acesteia pe termen lung se resimt în scăderea calității vieții datorită impactului avut asupra mediului înconjurător, prin ceșterea poluării, dar și asupra vieții sociale, prin reducerea timpului alocat socializării.

În a doua jumătate a sa, capitolul întâi expune răspunsul ingineriei calculatoarelor la această problema a societății moderne, prin dezvoltarea sistemelor inteligente de transport, referite în literatura de specialitate ca și Intelligent Transportation Systems (ITS). Importanța asociată studiului acestor sisteme inteligente este evidențiat și de apariția periodică a unei publicații din seria IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems în care sunt grupate cele mai recente contribuții aduse în acest domeniu. Aceste publicații reprezintă un reper de actualitate pentru cercetătorii din lumea întreagă. ITS acoperă însă un domeniu mult prea vast pentru a reprezenta subiectul unui singur capitol. Mai multe subdomenii reprezintă ITS, iar acestea sunt punctate într-o secțiune dedicată acestora: Advanced Traffic Management Systems (ATMS), Advanced Traveler Information Systems (ATIS), Advanced Vehicle Control Systems (AVCS), Commercial Vehicle Operations (CVO), Advanced Public Transportation Systems (APTS), and Advanced Rural Transportation Systems (ARTS). Figura de mai jos, surprinde o serie de elemente caracteristice celor mai importante subdomenii din cele enumerate mai sus.



Această teză se concentrează asupra subdomeniului ATMS, și anume asupra cercetării Sistemelor Adaptive de Control al Traficului (ATCS) ca parte constitutivă a acestora. În continuare, următoarele subcapitole enumeră o parte din sistemele deja existente, unele în fază experimentală altele sub forma unor soluții comerciale instalate în marile orașe ale lumii. Se discută câteva elemente caracteristice specifice sistemelor deja existente și sintetizate în tabelul de mai jos.

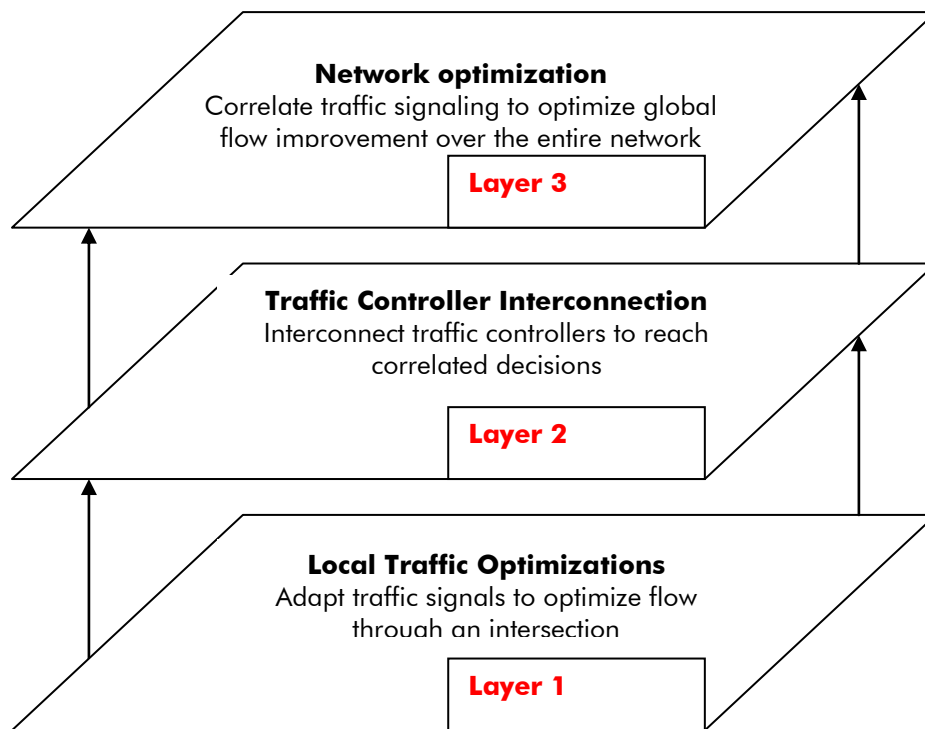
ATCS	ACS Lite	BALANCE	LA ATCS	MOTION	OPAC	RHODES	SCATS	SCOOT	UTOPIA
Detection	MB, SL	NSL	SL	NSL	MB, SL	MB, SL	SL	US, SL	US, SL
Action	P, R	P, R	R	P, R	P	P	R	P, R	P
Adjustment	A/LO	CO	A	CO	CO	CO	A	LO	CO
Timeframe	5-10 min	5 min	Cycle	5-15 min	Phase/Cycle/5min	Phase	Cycle	Cycle/5 min	3sec Cycle
Level	C/L	C/L	C/L	C/L	C/L	C/L	C/L	C/L	C/L
Timings	S,O	S,CI,O,PS	S,CI,O	S,CI,O,PS	S,CI,O	S,PS	S,CI,O	S,CI,O	S,PS*
Flexi Region	No	No*	Yes*	No	No	No	Yes	Yes*	Yes*
Vehicle Actuated	Yes	Yes	Yes*	Yes	No	No	Yes	No	Yes*

În ultima sa parte, acest capitol, dedică o secțiune simulării condițiilor de trafic ca metodă de evaluare a soluțiilor propuse în acest domeniu. În acest sens se pune accentul pe componenta socială a traficului care nu poate fi simulată cu acuratețe de 100% datorită problemei existente în simularea factorului subiectiv de decizie specific caracterului uman și care definește caracterul imprevizibil al traficului rutier. În momentul de față, validarea metodelor de optimizare propuse se face prin simulări probabilistice folosind instrumente software specializate în simularea condițiilor de trafic. Sunt prezentate trei astfel de simulatoare: Vissim, Paramics și Sumo, din perspectiva experienței utilizatorului, argumentându-se în același timp și decizia de a folosi Vissim în vederea validării soluțiilor propuse în această teză.

Cel de-al doilea capitolul este intitulat „A New Perspective Over Traffic Based on Complex Network Analysis” și descrie în primul rând aplicabilitatea rețelelor complexe în modelarea și studiul rețelelor care ne înconjoară, de la cele de energie electrică, la cele de comunicații și transport. Încă de la început, studiul rețelelor complexe a fost asociat cu teoria grafurilor și a metodelor specifice de analiză a acestora. Terminologia folosită pe parcursul tezei, precum și conceptele de bază preluate din teoria grafurilor și aplicate în analiza rețelelor urbane de trafic sunt descrise în următoarele secțiuni din acest capitol. Se explică astfel maparea conceptelor din teoria grafurilor pe rețeaua de drumuri din cadrul unei comunități sociale. Nodurile rețelei de trafic sunt reprezentate în acest sens ca fiind intersecțiile, iar muchiile dintre ele reprezintă drumurile ce le leagă.

În cea de-a doua jumătate a capitolului doi, sunt descrise instrumentele aflate încă în fază incipientă de aplicare în studiul fluxului de trafic, și anume „community detection” și „betweenness centrality metric”. Pe lângă acestea, se punctează și evoluția analizei rețelelor complexe spre cea a rețelelor sociale, în care nodurilor le sunt asociate indivizi, iar muchiilor legături sociale dintre ei. Legătura dintre analiza rețelelor sociale și rețelele de trafic este cu atât mai importantă în condițiile în care rețeaua urbană este una puternic influențată de factorul social, principalii actori din trafic fiind ființe sociale. În continuare, este argumentată oportunitatea utilizării distribuției legăturilor dintre noduri ca și indicator al calității rețelei de transport din punct de vedere topologic. O distribuție echilibrată a acestei valori fiind de preferat, în locul uneia de tip „power law”, care pentru o rețea de trafic exprimă un dezechilibru la nivelul anumitor noduri – intersecții.

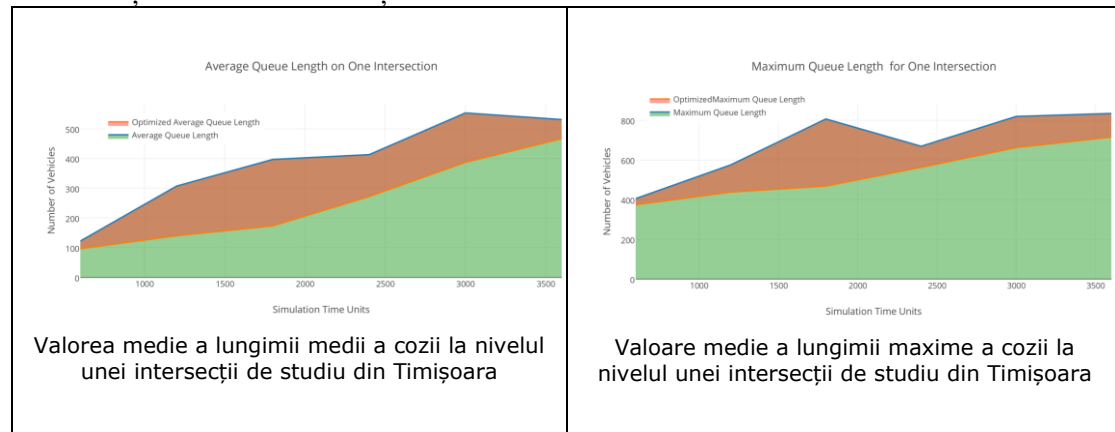
Denumit „The quest for traffic coordination”, capitolul trei, descrie formalizarea problemei optimizării condițiilor de trafic prin abordarea în trei etape distincte, fiecare cu metode caracteristice de lucru. Metodele actuale de optimizare a traficului rutier, se rezumă în primul subcapitol, folosind referiri din literatura de specialitate. Mai departe, se descrie la nivel de detaliu formalismul propus, denumit în mod original „traffic optimization stack” și prezentat în figura de mai jos.



Se definește astfel succesiunea de pași care trebuie urmați în vederea îmbunătățirii condițiilor de trafic la nivelul unei rețele de trafic, prin corelarea și comunicarea optimelor locale obținute. La primul nivel, cel al intersecției, se urmărește implementarea metodelor specifice de generare de optime locale, bazate pe răspunsul la condițiile actuale din trafic. Nivelul doi, grupează metode menite să coreleze rezultatele obținute la nivelul întâi prin comunicarea deciziilor. În acest sens, se folosește comunicarea între punctele cheie din trafic. Cel de-al treilea nivel, asigură cadrul pentru dezvoltarea algoritmilor complecși de rerutare. Aceștia aduc plusul de valoare necesar fluidizării condițiilor de trafic la nivelul întregii rețele urbane. Se propune astfel o abordare descentralizată și distribuită de control al traficului rutier din cadrul comunităților urbane.

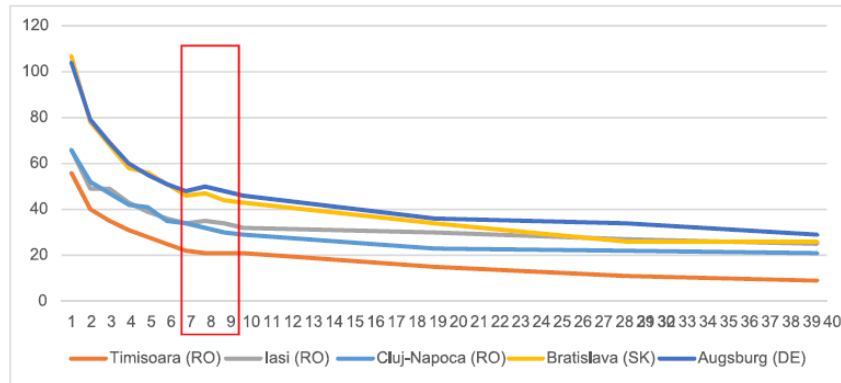
În secțiunile următoare, se descrie o metodă specifică primului nivel, care transformă semaforul într-un „smart device” capabil de un comportament adaptiv în fața schimbărilor dinamice din trafic. Metoda propusă în acest capitol utilizează un set restrâns de parametri, și anume lungimea timpului de verde, lungimea ciclului unui semafor și densitatea de trafic. Se păstrează la un nivel minim variabilele necesare procesului de adaptare. Valorile acestora sunt prelucrate folosind matrici de tip O-D modificate („Origin-Destination matrix”). Modificarea adusă acestor matrici se face prin introducerea timpilor de verde pe lângă valorile deja existente. Soluția propusă determină direcțiile cu încărcare maximă și minimă pe durata fiecărui ciclu de funcționare a unui semafor ce coordonează mișcările dintr-o intersecție. La pasul următor, se calculează procentul pe care îl reprezintă aceste valori din situația la nivel de intersecție și se redimensionează timpii de verde pe baza unui coeficient calculat în funcție de procentajul acestei schimbări. Abordarea nu se oprește asupra metodelor de colectare a datelor din trafic, considerând că pentru această problemă există soluții comerciale care se pot folosi în acest context. Însă, se dedică o secțiune separată analizei rezultatelor simulărilor efectuate pe o zonă de studiu din orașul Timișoara. Indicatorii de calitate selectați pentru a determina îmbunătățirile aduse folosind metodologia propusă sunt: dimensiunea medie și maximă a cozii. Aceștia se măsoară pe fiecare dintre direcțiile intersecției studiate urmărindu-se evoluția lor în timp,

raportate la condițiile de trafic inițiale. Rezultatele implementării acestei metodologii de schimbare a timpilor de verde la nivel local, prin răspunsul la condițiile de trafic curente se dovedește a fi de perspectivă, prezentând valori pozitive pe direcțiile impactate și efecte nenegative pe direcțiile neimpactate. De asemenea, valorile medii raportate la cele inițiale înregistrate la nivelul intersecțiilor studiate punctează rezultatele pozitive la nivelul întregii structuri analizate. Figurile de mai jos, evidențiază în culoarea deschisă, îmbunătățirea obținută la nivelul unei intersecții simulate și studiate din Timișoara.



În capitolul patru, denumit „Achieving network adaptability”, sunt propuse două metode originale care se mapează fiecare pe câte un nivel din „traffic optimization stack”. Prima este specifică nivelului doi din stiva de optimizare descrisă în capitolul anterior și a doua este dezvoltată pentru nivelul trei. În primul subcapitol se abordează problema interconectării optimelor locale obținute anterior în vederea obținerii corelării necesare nivelului doi. În acest sens este necesară o metodă de clasificare a așa-numitelor „puncte critice” ale rețelei de trafic rutier. Astfel, este propusă metodologia de lucru denumită „Social Traffic Light Optimization” (STiLO) care selectează nodurile ce vor funcționa în configurație master-slave pentru implementarea comunicării necesară celui de-al doilea nivel din stivă. Această metodologie are însă nevoie ca harta rețelei urbane să fie prelucrată folosind metode specifice teoriei și analizei rețelelor complexe. Pentru aceasta, se descrie o succesiune de pași care trebuie parcursă pentru a realiza exportul de date din formatul specific unei hărți, în cel de noduri și muchii specific analizei grafurilor.

Folosind datele de intrare obținute în urma prelucrării menționate anterior, se rulează pe graful obținut algoritmul de detecție al comunităților, specific analizei rețelelor complexe. Acest lucru este posibil folosind un tool extern de analiză a grafurilor, Gephi, cu ajutorul căruia sunt detectate comunitățile dintr-un graf. Acest capitol alocă o secțiune dedicată pentru alegerea rezoluției cu care se face detecția comunităților, pas important în maparea acestora pe o hartă reală. Aceasta valoare se alege în jurul punctului de inflexiune observat în reprezentarea sa grafică pentru o serie de comunități reprezentative analizate. Într-o modalitate empirică se face alegerea rezoluției și a valorii de prag pentru oprirea recursivității algoritmului propus. În figura de mai jos se prezintă zona de alegere a rezoluției astfel încât comunitățile identificate de algoritm să fie cât mai aproape, cu cel al cartierelor istorice din cadrul orașelor studiate.



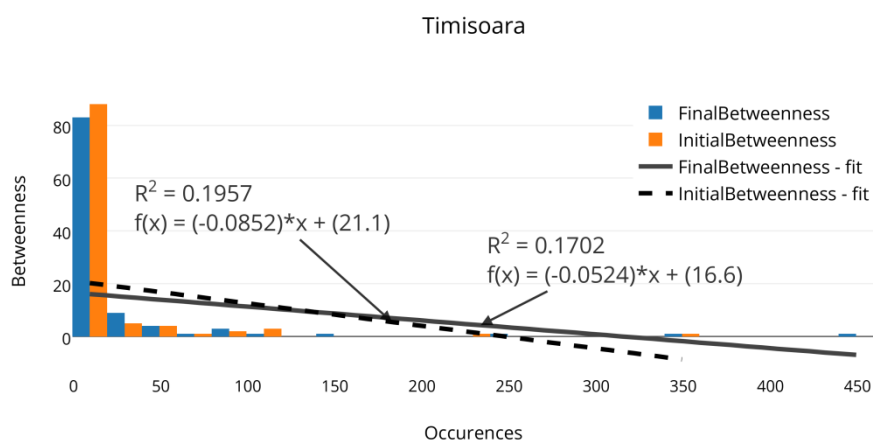
Algoritmul STiLO determină într-o manieră recursivă, fiecare comunitate din graful asociat rețelei urbane. În pasul următor, pentru fiecare nod din comunitățile identificate se calculează valoarea betweenness-ului. Se identifică nodurile cu valoare maximă din fiecare comunitate, acestea fiind selectate ca și master în accepțiunea metodologiei de lucru propuse. Algoritmul continuă într-o manieră recursivă prin identificarea subcomunităților din fiecare comunitate, până când valoarea de prag este atinsă. Granularitatea algoritmului este stabilită prin setarea variabilelor care îi definesc funcționarea, și anume RES și TRESH. Capitolul aplică metodologia descrisă pe un studiu de caz folosind datele orașului Timișoara. Rezultatele evidențiază corelarea dintre nodurile-intersecții determinate prin aplicarea STiLO și cele care înregistrează valori ridicate de trafic în Timișoara, în condiții de trafic real. Această metodă se dovedește a fi o modalitate eficientă de plasare a semafoarelor folosind analiza topologică a rețelei de trafic urban.

În continuare, în capitolul patru, se prezintă o nouă contribuție originală care se adresează nivelului trei al stivei de optimizare a traficului. Denumită, „Social Intersection Genetic Shuffler” (SIGS), metoda explorează posibilitățile oferite de analiza conceptului de betweenness al unui nod din teoria rețelelor complexe, în corelație cu studiul distribuției acestei valori la nivelul unei comunități. Prin normalizarea acestui parametru, se urmărește echilibrarea la nivel de comunitate, a nodurilor încărcate datorită poziționării geografice a acestora. Se analizează panta drepte de interpolare a distribuției betweenness-ului la nivelul fiecărui nod din comunitate și se propune o metodă de scădere a acesteia.

În acest capitol sunt utilizate noțiuni specifice calculului bioinspirat, prin implementarea într-o manieră genetică a acestui algoritm. Partea de core a SIGS împarte rețeaua de trafic în comunități relevante, în manieră asemănătoare STiLO. În continuare, valorile determinate pentru fiecare comunitate sunt reprezentate de distribuția inițială a betweenness-ului, precum și de panta distribuției sale liniare. Procedura geneticShuffle() implementează algoritmul genetic. Se selectează aleator două subcomunități dintre cele identificate anterior. Acestea sunt utilizate în pasul următor pentru încrucișare, urmând a genera o nouă populație de interes. Un alt pas definitoriu pentru algoritmi bioinșpirați este implementarea mutației ca și metodă de diversificare a populației rezultate. SIGS o implementează sub forma schimbării sensurilor unor muchii din comunitatea analizată. Aceste muchii sunt selectate din setul muchiilor incidente nodurilor cu valoare ridicată a betweenness-ului, urmărindu-se echilibrarea acestuia.

Un studiu de caz aplică acest algoritm pe orașul Timișoara, rezultatele fiind sintetizate într-un subcapitol dedicat. Îmbunătățirile obținute în anumite zone ale orașului în termeni de valori modificate pozitiv ale pantei distribuției liniare a

betweenness-ului sunt prezentate sub forma graficelor comparative între situația inițială și cea după rularea algoritmului propus. Figura de mai jos, prezintă o astfel de analiză, în care este surprinsă îmbunătățirea obținută la nivelul unei comunități din orașul Timișoara.



În a doua jumătate a capitolului sunt extinse simulările pe un set de orașe de pe continente diferite în vederea comparării rezultatelor obținute cu condițiile reale de trafic. Orașe precum Budapesta, Los Angeles, Sendai sunt luate în calcul pentru aplicarea metodologiei SIGS. Rezultatele obținute sunt raportate la datele oferite de echipamentele de control din trafic prin intermediul Google Traffic Layer și utilizate pentru comparație. În acest sens sunt confirmate zonele identificate ca fiind predispușe la apariția fenomenului de congestie în trafic, cu zonele identificate de către SIGS. Confirmarea este făcută prin analiza vizuală a datelor colectate din trafic și compararea lor cu rezultatele obținute folosind metodele propuse de analiză statică a topologiei rețelei.

În partea finală a acestei teze se prezintă oportunitatea utilizării tuturor metodelor descrise în cadrul unui singur sistem integrat de gestiune a traficului, denumit generic TACTICS, „A Fault Tolerant Adaptive Control Traffic Cyber-Physical System”. Acesta stabilește cadrul de implementare a metodologiilor de lucru propuse în această teză, specifice pentru fiecare nivel al stivei de optimizare.

Ultimul capitol, al cincilea este intitulat „Conclusions” și este destinat concluziilor pentru cercetările din teză. Prima parte face o analiză retrospectivă a conceptelor abordate de-a lungul tezei și care stau la baza contribuțiilor propuse, iar în final sunt prezentate direcțiile în care ar pot fi continuate investigațiile propuse.

Contribuțiile esențiale ale tezei sunt următoarele:

- Propunerea formalismului pe trei niveluri care abstractizează abordarea optimizării condițiilor de trafic dintr-o rețea de trafic urban, prin definirea direcțiilor ce trebuie urmate în vederea obținerii optimului la nivel de rețea folosind o abordarea de tip „bottom-up”.
- Îmbinarea domeniului analizei rețelelor complexe, cu referire la aspecte din teoria rețelelor sociale specifice ingineriei calculatoarelor, și abordarea problemei optimizării traficului din rețelele urbane folosind noțiuni precum „graf”, „gradul nodului”, „community detection”, „betweenness centrality metric”.
- Algoritmul STiLO de plasare optimă a nodurilor de control, și implicit a semafoarelor, dintr-o rețea de trafic bazat pe analiza statică a grafului asociat rețelei utilizând metode specifice analizei rețelelor complexe.

- Metodologia SIGS care utilizează calculul bioinspirat pentru generarea unui nou set de soluții, prin redirectarea traficului dintr-o rețea, care să conducă la îmbunătățirea condițiilor de trafic la nivelul întregii rețele urbane.
- Studiile de caz descrise și aplicate pe orașul Timișoara, constituie o abordare unică de analiză a acestei comunități urbane, utilizând o serie de „tool-uri”, de la cele specializate în reprezentarea hărților urbane, la cele de analiză a grafurilor de mari dimensiuni și până la cele specializate în simularea condițiilor de trafic, precum și de analiză statică a rețelei de drumuri.
- Stabilirea strategiei de integrare a tuturor metodelor propuse și perspectiva dezvoltării TACTICS, un „cyber-system”, care să implementeze formalismul descris într-o rețea reală, împreună cu toate metodele specifice fiecărui nivel.