

**REFINED CAR-FOLLOWING MODEL INCORPORATING THE BEHAVIOR OF  
THE VEHICLES FROM THE ADJACENT LANES**

**(MODEL RAFINAT DE URMĂRIRE AL VEHICULULUI ÎNCORPORÂND  
COMPORAMENTUL VEHICULELOR DE PE BENZILE ADIACENTE)**

**Teză de doctorat – Rezumat**

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat INGINERIA SISTEMELOR

**autor ing. Mădălin-Dorin Pop**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean

luna: Februarie, anul: 2022

**Capitolul 1, INTRODUCTION (INTRODUCERE)**, descrie motivația temei de cercetare alese cu o definiție clară a problemei și o descriere a obiectivelor cercetării. Prezentarea dezavantajelor actuale ale modelelor de urmărire a vehiculelor susține motivația autorului de a găsi soluții la problemele reale de trafic rutier.

Comportamentul șoferului introduce incertitudini în modelarea traficului rutier la nivel microscopic. Diverse modele de urmărire a vehiculelor sunt orientate pe o singură bandă și nu pot evidenția influența vehiculelor care se deplasează pe benzile de circulație adiacente. O decizie de schimbare a benzii luată de un vehicul de pe banda actuală duce la o „schimbare de lider” în procesul de modelare, iar vehiculul următor (*FV – follower vehicle*) își va adapta mecanismul de control al accelerației pentru a răspunde la acest stimul. Acest mecanism de control este obligatoriu pentru asigurarea evitării coliziunilor din trafic.

Sunt extrem de necesare dezvoltarea de noi soluții care să introducă în procesul de modelare al traficului comportamentul vehiculelor care se deplasează, în aceeași direcție, pe benzile adiacente. În acest sens, dezvoltarea de noi modele de urmărire a vehiculelor va oferi strategii de control pentru deplasarea *FV* prin includerea interacțiunilor cu vehiculele de pe benzile de circulație adiacente. Această abordare este foarte importantă nu numai din perspectiva unei mai bune înțelegeri a traficului, dar și din perspectiva dezvoltării sistemelor de conducere autonomă.

Obiectivele acestei teze sunt următoarele:

- furnizarea unei analize a metodelor de configurare a intersecțiilor;
- obținerea unei predicții mai precise a volumelor de trafic origine-destinație, și implicit crearea unei mai bune imagini de ansamblu asupra comportamentului șoferului;
- dezvoltarea de noi modele microscopice de trafic rutier capabile să încorporeze cu mare precizie comportamentul de alegere a benzii;
- dezvoltarea de noi modele de urmărire a vehiculelor pentru drumurile cu benzi multiple;
- dezvoltarea de modele de detecție și analiză a defectelor modelelor de urmărire a vehiculelor care pot evidenția defectele introduse de procesul de modelare;
- dezvoltarea de noi soluții pentru calibrarea modelelor de urmărire a vehiculelor care sunt ușor de adaptat la modelele de urmărire a vehiculelor orientate către rețele rutiere cu mai multe benzi de circulație pe același sens de deplasare.

Această teză reprezintă o sinteză a realizărilor autorului pe parcursul programului său de cercetare doctorală pe lângă contribuțiile sale deja publicate, după cum urmează:

- 1 articol științific publicat într-o revistă indexată ISI Web of Science (WoS) cu quartilă Q1 și factor de impact (IF) egal cu 3,576;

- 1 articol științific publicat într-o revistă indexată ISI WoS fără quartilă și IF;
- 11 lucrări științifice publicate în volumele indexate ISI WoS ale conferințelor internaționale, una dintre aceste lucrări, [1], fiind premiată cu premiul pentru cea mai bună lucrare - *Best Paper Award "Honorable Mention"*;
- 1 lucrare științifică publicată în lucrările conferințelor internaționale indexate BDI.

Această teză oferă o imagine de ansamblu aprofundată a conceptului de modelare microscopică a traficului și descrie direcțiile actuale de cercetare în acest domeniu. Toate aceste informații au fost structurate în 7 capitole pe 133 de pagini, cuprinzând 60 de figuri, 10 tabele, și având ca sursă de inspirație 130 de referințe bibliografice, inclusiv cele 14 lucrări menționate anterior constând în contribuții originale ale autorului.

**Capitolul 2, STATE OF THE ART IN ROAD TRAFFIC MODELING AT THE MICROSCOPIC LEVEL (STADIUL TEHNIC ACTUAL ÎN MODELAREA TRAFICULUI RUTIER LA NIVEL MICROSCOPIC)**, prezintă o analiză completă a stadiului tehnic actual în modelarea traficului rutier la nivel microscopic. Această analiză începe cu o descriere a dezvoltărilor actuale în ceea ce privește simulatoarele de trafic rutier și arată cât de importante sunt următoarele caracteristici: scalabilitate, partiționarea sarcinii de lucru și organizarea partițiilor.

Acest capitol continuă cu o discuție critică a tendințelor recente în controlul și modelarea fenomenului de urmărire a vehiculelor. Cercetătorii au îmbunătățit multe dintre modelele existente de urmărire a vehiculelor prin utilizarea unor concepte actuale de dezvoltare bazate pe rețele neuronale [2-3]; algoritmi genetici [3-4]; învățare automată [5]; sisteme fuzzy [6-7] sau procese stocastice [8-11].

Alte cercetări încearcă să îmbunătățească acuratețea modelelor de trafic microscopic prin utilizarea unor caracteristici din modelele macroscopice. Borsche și Meurer [12] au combinat aceste modele pentru a oferi o imagine de ansamblu mai bună a interacțiunii dintre fluxurile de trafic și dinamica pietonilor. Totuși, această abordare are deficiențe în descrierea traficului în cazul studierii mișcării vehiculelor când densitatea pietonilor din rețeaua rutieră studiată este redusă. În sens invers, Gkaniya și Dimitriou [13] au propus utilizarea mecanicii microscopice a fluxului de trafic în combinație cu informațiile de trafic rezultate din hărțile de trafic online pentru a depăși dezavantajele estimării diagramelor fundamentale macroscopice.

Interesele actuale ale cercetătorilor acoperă îmbunătățirile modelelor derivate de urmărire a vehiculelor, cum ar fi Gipps [5, 14-15]; Gazis-Herman-Rothery (GHR) [2, 12, 15]; optimal velocity difference (OVD) [16-17]; full velocity difference (FVD) [5, 14, 16, 18-20]; intelligent driver model (IDM) [21-22]. De asemenea, se acordă o atenție deosebită adaptării modelelor menționate pentru a răspunde nevoilor introduse de conducerea autonomă [5, 20-21, 23-26], vehicule conectate [16, 20-21, 23-24] și vehicule electrice [6, 20, 27-28]. Mai mult, în **Secțiunile 2.3.1-2.3.3**, această teză discută în detaliu unele dintre aceste abordări.

O altă secțiune a fost concepută pentru a discuta noi abordări în ceea ce privește procesul de calibrare. Acesta este foarte important în dezvoltarea de noi modele, fiind responsabil pentru asigurarea unei mai bune aproximări a parametrilor modelului în comparație cu parametrii observați din traficul rutier real. Secțiunea respectivă va oferi mai multe abordări în acest sens.

Rețelele de senzori și Internetul Obiectelor (IoT) joacă un rol important în controlul microscopic al traficului. În prezent, serviciile IoT întâlnesc următoarele limitări în ceea ce privește integrarea lor cu sistemele de transport inteligente (ITS):

- eficiența și scalabilitatea infrastructurii de rețea;
- „lipsa flexibilității în interacțiunea dintre vehicule și alte aplicații bazate pe IoT” [29];
- „surse de energie limitate care nu pot asigura funcționalități complete extrem de intensive” [29];
- „limitarea mecanismelor de auto-recuperare pentru a gestiona trecerea de la o stare de

*eroare la modul operațional normal pentru sistemele ITS” [29].*

Rețelele viitorului 2030 urmăresc să ofere soluții la aceste limitări prin „crearea unei platforme comune care permite implementarea unei game largi de tehnologii și arhitecturi” [29-30], „reducerea costurilor prin utilizarea senzorilor cu costuri reduse, servicii de implementare și reducerea consumului de energie” [29, 31], „mecanisme de auto-recuperare din stări de eroare” [29, 32], „sisteme adecvate de politici și reglementări” [29, 33] sau „sisteme concepute pentru stocarea și gestionarea unor volume mari de date de trafic rutier” [29-30, 34-35].

Analiza cercetărilor recente a arătat lacunele actuale existente în procesul de control și modelare la nivelul de urmărire a vehiculelor, precum și implicațiile dezvoltării continue în domeniul ITS.

**Capitolul 3, ROAD TRAFFIC MODELING AT THE MICROSCOPIC LEVEL (MODELAREA TRAFICULUI RUTIER LA NIVEL MICROSCOPIC)**, evidențiază importanța modelării traficului rutier la nivel microscopic. Acest capitol prezintă contribuțiile autorului legate de modelarea traficului rutier. Simulările sunt efectuate folosind software-ul de simulare AnyLogic pentru a analiza impactul diferitelor metode de configurare a intersecțiilor (intersecții necontrolate, intersecții semnalizate și sensuri giratorii) asupra vitezei de deplasare a vehiculelor și a evoluției numărului de vehicule care tranzitează o intersecție. Analiza rezultatelor arată avantajele alegerii sensului giratoriu ca metodă de coordonare a traficului, dar și dezavantajul acestei metode de configurare a intersecțiilor în cazul unui trafic aglomerat care duce la blocaje după depășirea capacității sensului giratoriu.

*„Modelele de trafic microscopice [36] acordă mai multă atenție detaliilor evoluției traficului și sunt vitale pentru analiza traficului, mai ales în prezența ITS. Calibrarea inițială a modelului este necesară pentru a identifica valorile corecte ale parametrilor. Aceste modele necesită informații ale activității tuturor participanților în trafic pentru a avea un feedback al traficului prin parametri precum poziția vehiculului, accelerația/decelerația și viteza vehiculului” [37].*

Pe lângă modelele microscopice, mai există două tipuri de modele în teoria modelării traficului, modelele macroscopice și mezoscopice. *„Modelele macroscopice sunt abordate din perspectiva teoriei fluxului de trafic continuu. Obiectivul acestor modele este de a oferi o descriere în timp și spațiu a evoluției variabilelor de flux macroscopice. Pentru realizarea acestei descrieri se folosesc conceptele de flux și densitate. Flux înseamnă numărul de vehicule care traversează un segment al rețelei rutiere ( $x$ ) într-un timp stabilit anterior ( $\Delta t$ )” [38]. „Modelele mezoscopice pot fi văzute ca o combinație de modele microscopice și macroscopice. În majoritatea cazurilor, în aceste modele, comportamentul parametrilor corespunzători modelelor microscopice este studiat sub influența unor parametri specifici modelelor macroscopice. Exemplul clasic al acestei abordări este modelarea comportamentului unui vehicul în raport cu ceilalți participanți din trafic, ținând cont de aspecte legate de dinamica acestuia” [38].*

Urmărirea vehiculelor reprezintă unul dintre cele „patru niveluri de reprezentare a modelului microscopic al rețelei de trafic rutier alături de configurația intersecțiilor, legăturile și alegerea benzii” [39-40]. Pentru a înțelege mai bine factorii de influență asupra vehiculului în urma procesului de modelare, a fost descrisă modelarea comportamentului schimbării benzii de deplasare. O atenție deosebită a fost acordată definiției criteriilor de stimulare care controlează comportamentul din perspectiva accelerației al FV, luând în considerare comportamentul vehiculului din față, denumit în continuare vehicul lider (LV). Aceste criterii de stimulare joacă un rol extrem de important în acțiunile de evitare a coliziunilor prin controlul adecvat al accelerației FV.

Ultimele două subcapitole oferă o imagine de ansamblu critică a modelelor de urmărire a vehiculelor. Sunt prezentate câteva modele binecunoscute, cum ar fi Gipps, Pipes, GHR,

OVD, FVD, IDM, model bazat pe fuzzy și alte variații ale acestor modele. Având în vedere fundamentul teoretic al procesului de modelare a urmării vehiculelor, acest studiu identifică principalele avantaje și dezavantaje ale acestei abordări de modelare.

Cel mai mare dezavantaj al modelelor de urmărire a vehiculelor este orientarea lor către examinarea traficului rutier pe o singură bandă. În acest fel, apar probleme în cazul integrării unui vehicul nou ca urmare a deciziei conducătorului auto de a-și schimba banda actuală de circulație. În acest caz, este nevoie de un model adaptiv care să poată gestiona schimbările de rol LV/FV în cazuri precum:

- intrarea unui vehicul nou pe banda de circulație modelată;
- părăsirea benzii de către unul dintre vehicule;
- părăsirea benzii curente de către FV cu revenire datorită deplasării LV cu viteză redusă, caz în care vorbim de schimbarea rolurilor celor două vehicule (FV devine noul LV).

O altă problemă specifică acestui tip de modelare este integrarea vehiculelor de mare tonaj. Un studiu în acest sens este prezentat în [41] și își propune să demonstreze capacitatea scăzută de urmărire a vehiculelor în ceea ce privește înlăturarea perturbațiilor din parametrii de trafic în cazul deplasărilor mixte, având atât vehicule de pasageri, cât și vehicule de mare tonaj. S-a observat un răspuns întârziat al conducătorului vehiculului de mare tonaj în cazul decelerației, ca răspuns la decelerația LV reprezentată de un vehicul de pasageri, dar și la preluarea la timp a nivelului de viteză anterior, în timpul și după executarea unei operațiuni de accelerare. Dacă o mașină urmărește un vehicul de mare tonaj, s-a observat o tendință de decelerare mai mare în comparație cu o accelerare treptată continuă a LV, în urma percepției unei acțiuni de decelerare a vehiculului de mare tonaj.

Pe lângă toate contribuțiile menționate, acest capitol servește ca bază pentru construirea unui model rafinat de urmărire a vehiculelor, care să abordeze cu ușurință cazul rețelelor rutiere cu mai multe benzi de deplasare pe același sens, cazuri extrem de des întâlnite în traficul real.

**Capitolul 4, REFINEMENT OF THE CAR-FOLLOWING MODEL (RAFINAREA MODELULUI DE URMĂRIRE AL VEHICULULUI)**, ilustrează metodologia propusă pentru îmbunătățirea (rafinarea) modelului standard de urmărire a vehiculelor în timp discret, constând în extinderea acestui model orientat pe o singură bandă la drumurile cu mai multe benzi de circulație pe același sens de deplasare.

Acest capitol începe cu o analiză a conceptului de modelare a comportamentului șoferului (DBM) și a principalelor sale abordări în ceea ce privește implementarea. Cele mai utilizate tehnici de implementare DBM sunt „*Gaussian mixture model (GMM) și modelul piecewise auto-regressive exogenous (PWARX)*” [42] care sunt prezentate în detaliu în această teză. Ambele abordări sunt studiate cu privire la conceptul de urmărire a vehiculelor și subliniază influența parametrilor LV observați asupra modificărilor comportamentului șoferului FV în timpul deplasării. În plus, teza prezintă modul în care modelarea traficului poate fi realizată folosind lanțuri Markov. Aplicarea acestei abordări de modelare își dovedește avantajele, în special în procesul de simplificare a estimării volumelor de trafic origine-destinație (OD). Precizia acestor estimări aduce îmbunătățiri în gestionarea semafoarelor prin controlul în timp real al intervalului de undă verde asociat acestora.

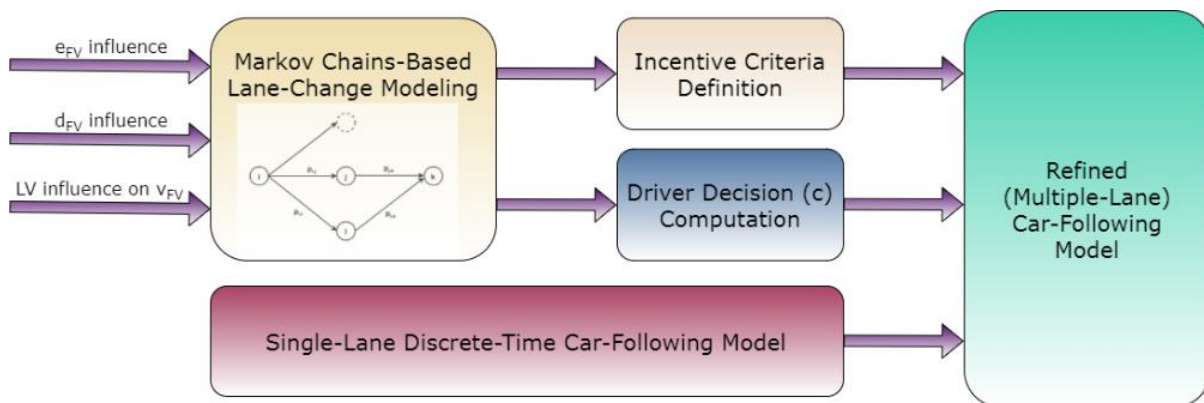
Acest capitol discută, de asemenea, aplicarea „*unui DBM bazat pe execuția tactică a rutei, mai explicit bazat pe comportamentul de schimbare a benzii*” [43]. Procedura propusă pentru rafinarea modelului de urmărire a vehiculelor constă în aplicarea „*deciziilor luate pentru a tranzita porțiuni mici și coordonate ale unei călătorii*” [43-44]. Aici, apare una dintre principalele contribuții ale acestei teze constând în modelarea benzilor de circulație rutieră ca noduri Markov, iar tranzițiile între mai multe noduri ale rețelei rutiere modelate reprezintă manevrele de schimbare a benzii. Probabilitățile asociate fiecărui nod al lanțului Markov constă în probabilitatea de a schimba direcția deplasării prin schimbarea benzii actuale către o bandă de circulație adiacentă specifică. Calculul probabilităților folosește datele de trafic de la un timp

anterior  $t-1$  și actualizează aceste valori în timp real prin preluarea permanentă a parametrilor de trafic folosind sisteme de bucle inductive plasate în rețeaua rutieră.

Din cauza incertitudinilor introduse de comportamentul șoferilor, acțiunea de schimbare a benzii este modelată în continuare ca o problemă specifică bayesiană. Utilizarea conceptului probabilistic Bayesian la acest nivel de modelare a traficului reprezintă o altă contribuție importantă a acestei teze. Acest calcul bazat pe raționament Bayesian ia în considerare parametrii de mișcare pentru FV de pe banda de circulație curentă și, de asemenea, unele probabilități specifice legate de banda vizată. Aceste probabilități legate de banda vizată sunt strâns legate de decizia șoferului de a părăsi rețeaua rutieră printr-o ieșire care este accesibilă doar de pe o bandă adiacentă. Un alt caz care conduce la o decizie de schimbare a benzii de circulație a FV se referă la modificările vitezei LV (comportament de accelerare/decelerare), iar FV își schimbă banda de circulație curentă doar pentru depășirea LV, cu o posibilă revenire pe banda sa inițială după executarea manevrei.

Propunerea modelului de urmărire a vehiculelor destinat drumurilor cu benzi multiple pentru același sens de deplasare consideră benzile de circulație ca noduri Markov ale unei rețele rutiere modelate ca un lanț Markov, iar predicțiile privind schimbarea benzii sunt incluse ca parte a modelului de urmărire a vehiculelor. Această abordare pornește de la reprezentarea modelului de stare a conceptului de urmărire a vehiculelor orientat pe o singură bandă, denumit în această teză și ca model standard de urmărire a vehiculelor, și actualizează permanent valoarea accelerației FV în funcție de predicțiile de schimbare a benzii bazate pe raționament Bayesian. În plus, predicția schimbării benzii armonizează ecuațiile criteriilor de stimulare în raport cu decizia estimată a șoferului și face ca acest model propus să fie adecvat pentru rețelele rutiere cu mai multe benzi de deplasare pe același sens. Figura 1 ilustrează pașii urmați în timpul procesului de rafinare a modelului standard de urmărire a vehiculelor. Principalele surse de influență ale deciziei conducătorului auto sunt:

- banda de intrare a vehiculului vizat ( $e_{FV}$ );
- banda de destinație a vehiculului vizat ( $d_{FV}$ );
- influența comportamentului LV asupra modificărilor de viteză ale FV ( $v_{FV}$ ), reprezentată printr-un coeficient în intervalul  $[0;1]$ .

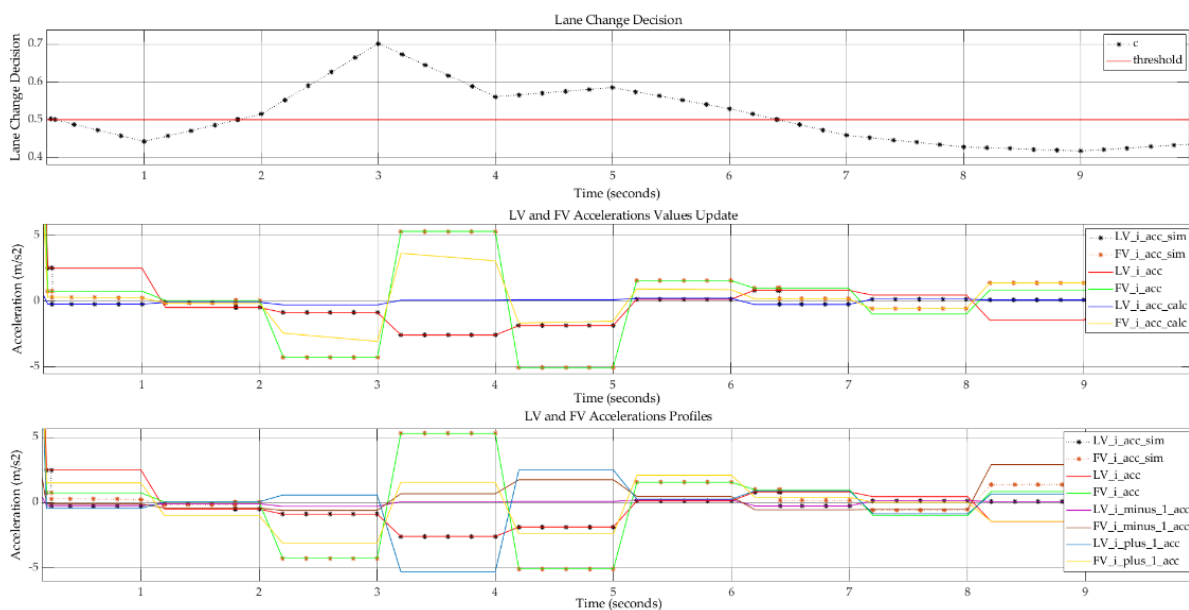


**Figura 1.** Procesul de rafinare a modelului standard de urmărire a vehiculelor.

După prezentarea propunerii de rafinare a modelului standard de urmărire a vehiculelor, a fost realizată o simulare în Simulink, parte a MATLAB R2020a (MathWorks, Natick, MA, SUA) pentru a demonstra implementabilitatea acestuia. Rezultatele arată performanțe bune în estimarea comportamentului vehiculului vizat. Principalul dezavantaj al abordării propuse constă în neglijarea vehiculului FV de pe noua bandă de circulație aleasă de FV de pe banda actuală. Această situație, denumită și ca „schimbare de lider”, permite ca FV de pe o bandă  $i$  să devină LV pentru vehiculul care se deplasează în spatele acestuia pe banda  $j$ .

„Figura 2 prezintă profilele de accelerație și actualizarea internă a valorilor de

acelerație pentru LV și FV dacă  $c$  este mai mare sau mai mic decât pragul stabilit. Valoarea pragului a fost setată la 0,50, iar o probabilitate mai mare de 50% exprimă o decizie de schimbare a benzii. În acest caz, valorile simulate pentru LV și FV au fost setate la valorile calculate, ținând cont de criteriile de stimulare pentru regulile de schimbare asimetrice a benzii - schimbarea benzii de la stânga la dreapta. Pentru o mai bună înțelegere a acestor schimbări ale valorilor de accelerație simulate care încorporează acțiuni de schimbare a benzii, poate fi luat în considerare cazul unei acțiuni de schimbare a benzii de pe  $L_i$  pe  $L_{i-1}$  la un timp de 0,2 s. LV de pe banda  $L_i$  efectuează această acțiune și începe să urmărească comportamentul de mișcare descris de vehiculele care se deplasează pe banda  $L_{i-1}$ . FV de pe banda  $L_i$  își va modifica de asemenea comportamentul de deplasare datorită noului LV, după ce LV inițial își schimbă banda. Un alt caz similar, dar cu o schimbare de bandă de pe  $L_i$  pe  $L_{i+1}$ , este observabil la timpul de 6,3 s” [45].



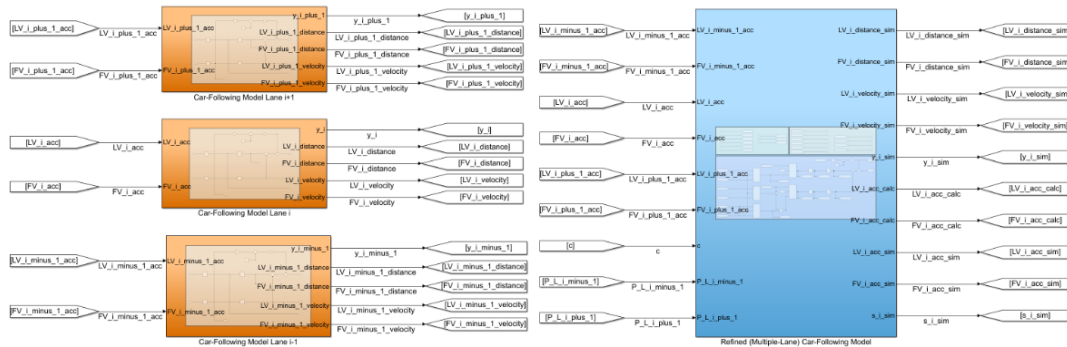
**Figura 2.** “LV și FV de pe banda  $L_i$  – actualizarea profilelor de accelerație” [45].

Ultima secțiune a acestui capitol evidențiază contribuțiile originale aduse de abordarea utilizată în procesul de rafinare a modelului de urmărire a vehiculelor. Această parte oferă, de asemenea, o sinteză a avantajelor și dezavantajelor modelului propus de urmărire a vehiculelor pentru rețele rutiere cu benzi multiple și definește posibilele direcții viitoare de îmbunătățire. Un subcapitol a fost destinat prezentării concluziilor acestui studiu.

**Capitolul 5, FAULT DETECTION OF DISCRETE-TIME MICROSCOPIC TRAFFIC MODELS (DETECȚIA DEFECTELOR MODELELOR DE TRAFIC MICROSCOPICE ÎN TIMP DISCRET)**, oferă o analiză a defectelor în cazul modelului rafinat propus. Analiza defectelor presupune că modelul rafinat introduce defecte prin calcule interne și este utilizat atât ca model observat, cât și ca model cu defect. Modelul nominal constă în trei modele standard de urmărire a vehiculelor, câte unul pentru fiecare bandă de circulație inclusă în experiment. Metodologia aplicată constă în utilizarea ecuațiilor de paritate, așa cum au fost descrise de Kratz et al. [46] și Isermann [47-48]. Conform acestei metodologii, „reziduurile identificate sunt reziduul vitezei relative și reziduul distanței dinamice de rulare” [45].

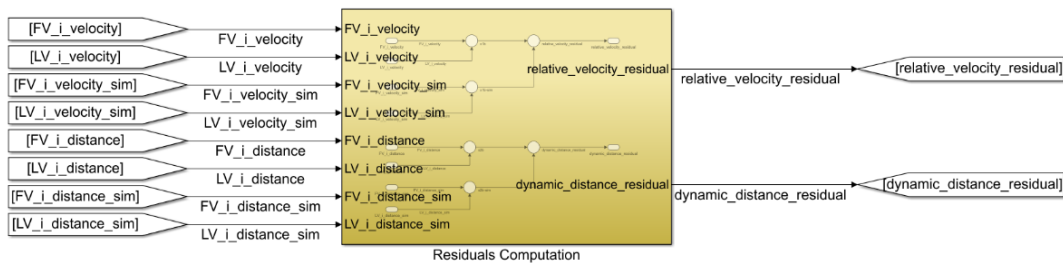
„Pentru a efectua detecția defectelor folosind metoda ecuațiilor de paritate pentru modelul de urmărire a vehiculelor destinat rețelelor rutiere cu mai multe benzi pe același sens de deplasare, a fost implementată o simulare în Simulink, parte a MATLAB R2020a (MathWorks, Natick, MA, SUA). De obicei, detecția defectelor ia în considerare trei tipuri de

modele: nominal, observat și modelul cu defect. Această teză a presupus că modelul observat a încorporat deja erori ca urmare a abordării de calcul propuse. În acest caz, implementarea a constat din două tipuri principale de subsisteme, așa cum se arată în Figura 3: trei blocuri separate pentru implementarea standard a unui model de urmărire a vehiculelor, constând din modelul nominal (portocaliu); și modelul propus pentru urmărirea vehiculelor destinat rețelelor rutiere cu mai multe benzi pe același sens de deplasare, constând din modelul observat (albastru)” [45]. Intrările acestor blocuri sunt valorile accelerației obținute ca ieșiri ale subsistemului *input handler* descris în **Secțiunea 4.5.3** a acestei teze.



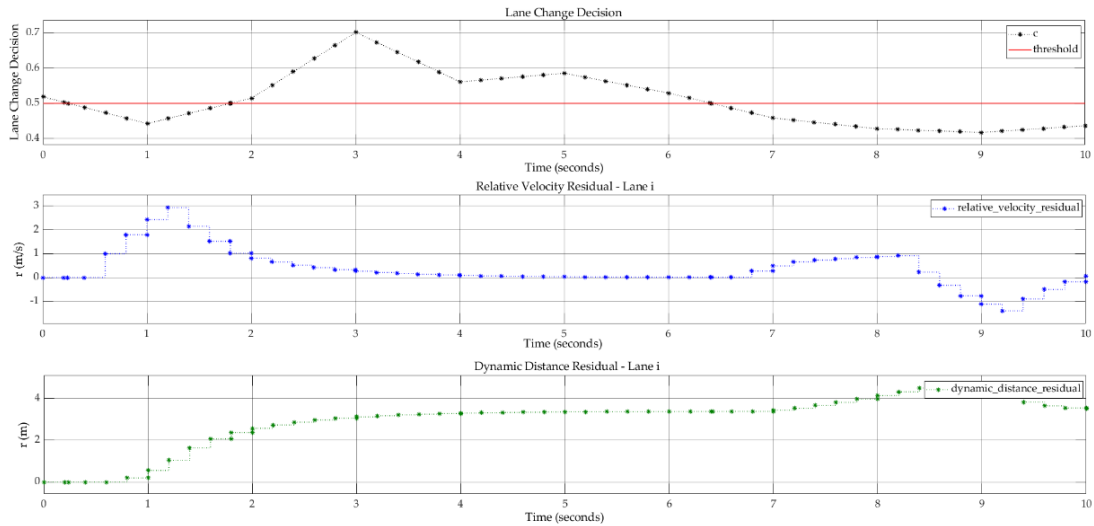
**Figura 3.** „Prezentarea subsistemelor principale – implementare folosind Simulink (MATLAB R2020a)” [45].

„Subsistemul prezentat în Figura 4 acoperă calculul rezidual. Ieșirile sunt *relative\_velocity\_residual* și *dynamic\_distance\_residual*, și constă în diferențele dintre valorile  $\bar{x}_1$  și  $\bar{x}_2$  obținute prin utilizarea modelului nominal și a modelului observat cu defecte introduse prin procesul de rafinare” [45].



**Figura 4.** „Prezentare generală a subsistemului destinat calcului reziduurilor – implementare folosind Simulink (MATLAB R2020a)” [45].

Evaluarea reziduurilor (Figura 5) a arătat că modelul rafinat oferă o descriere precisă a comportamentului LV și FV de pe banda vizată dacă un vehicul nou de pe o bandă adiacentă se alătură benzii vizate. „Modelul propus introduce defecte atunci când decizia șoferului  $c$  are un grad scăzut de incertitudine (adică  $c$  este aproape de pragul 0,50 cu  $\pm 0,10$ ). În alte cazuri, când decizia conducătorului auto nu este afectată de acest nivel scăzut de incertitudine, viteza reziduală relativă tinde spre zero. Distanța dinamică reziduală are o tendință de creștere continuă bazată pe același model, iar valoarea sa rămâne relativ constantă în absența unui nivel scăzut de incertitudine” [45].

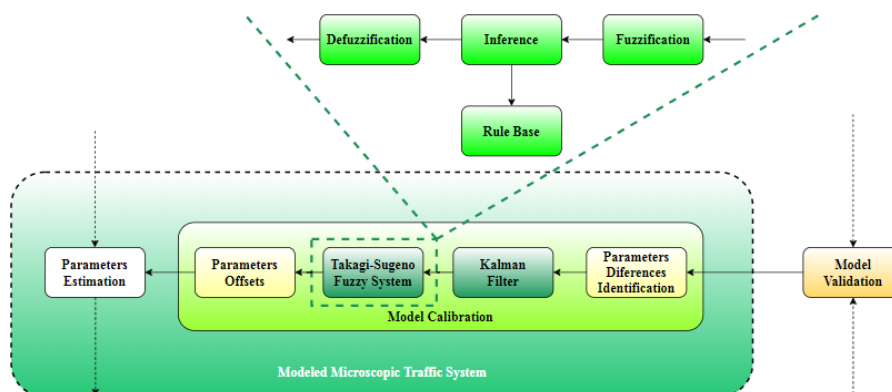


**Figura 5.** “*Detecția defectelor – evaluarea reziduurilor*” [45].

Cu toate acestea, analiza defectelor ilustrează, de asemenea, principalul dezavantaj al modelului propus de urmărire a vehiculelor destinat rețelelor rutiere cu benzi multiple, *constând în faptul că „modelul nu este potrivit pentru o trecere în timp real de la o bandă la alta pentru a asigura monitorizarea comportamentului schimbării benzii pentru fiecare bandă”* [45].

**Capitolul 6, CALIBRATION OF MICROSCOPIC TRAFFIC MODELS (CALIBRAREA MODELELOR DE TRAFIC MICROSCOPICE)**, descrie procesul de calibrare a modelelor de urmărire a vehiculelor și propune o nouă abordare constând într-o soluție hibridă de calibrare online care combină conceptul de filtrare Kalman cu un sistem de inferență fuzzy (FIS) Takagi Sugeno pentru a elimina zgomotele introduse de procesul de modelare. *„Etapa de calibrare va stabili valorile de compensare (offset) care trebuie aplicate intrărilor modelului pentru a reduce diferența față de datele reale. Calibrarea este efectuată până când aceste valori de offset devin egale cu zero”* [37].

După prezentarea teoretică a conceptului de calibrare specific modelelor de trafic microscopice, acest capitol discută noua metodă de calibrare propusă de Pop et al. (Figura 6) [37]. *„Ca parte a sistemului de trafic microscopice modelat, modelul de calibrare are caracteristica de a furniza datele necesare pentru a adapta parametrii interni ai modelului pe baza evaluării primite ca intrare de la sistemul responsabil cu validarea modelului. Împreună cu rezultatul validării, două seturi de parametri constând în valori de simulare și date microscopice de trafic real vor fi trimise către subsistemul de calibrare”* [37].

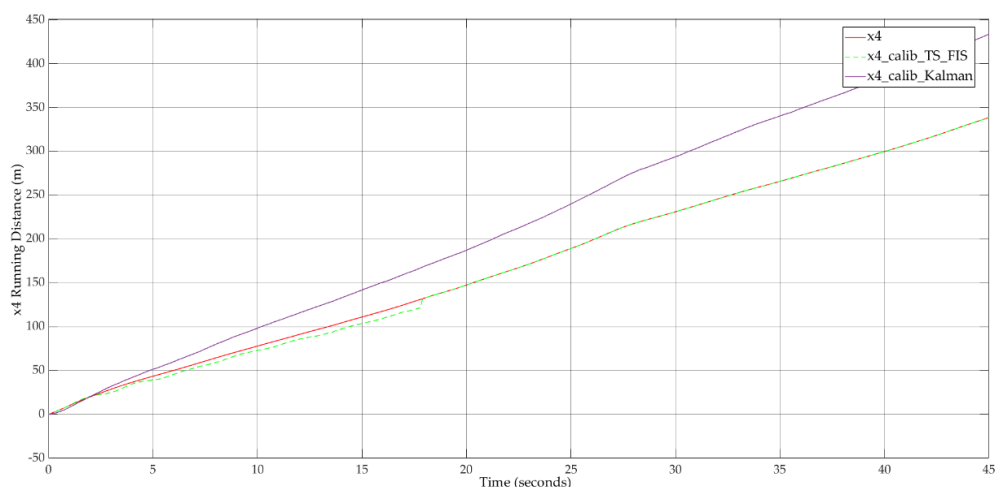


**Figura 6.** Abordarea propusă pentru calibrarea modelelor de trafic microscopice [37].



„Primul subsistem intern al sistemului de calibrare este destinat identificării diferențelor dintre datele reale și cele simulate. Acestea vor fi redirecționate către filtrul Kalman. Valorile filtrate vor fi transmise la pasul final de decizie privind valorile de offset constând dintr-un FIS Takagi-Sugeno. Acest ultim subsistem înglobează componentele specifice fuzzy. Fuzzificarea asigură faptul că diferențele identificate între parametri reali și de simulare sunt convertite într-o variabilă fuzzy. Mai mult, după ce regulile fuzzy au fost definite, variabilele fuzzy de ieșire le vor lua în considerare în stabilirea conexiunilor cu variabilele fuzzy de intrare printr-un pas de inferență. Defuzzificarea va converti variabilele fuzzy în tipurile corespunzătoare de parametri analizați. Aceste valori constând în offset-uri care vor fi aplicate parametrilor de simulare vor fi salvate de un subsistem care va construi o bază de cunoștințe pentru valorile de offset asociate parametrilor” [37].

Metoda de calibrare propusă își dovedește eficiența printr-o identificare mai rapidă a offset-urilor corecte care urmează să fie aplicate parametrilor modelului în comparație cu o simplă filtrare Kalman (Figura 7). „Abordarea bazată doar pe filtrare Kalman nu poate reproduce comportamentul real prin neglijarea interacțiunii dintre vehicule din perspectiva vitezei relative. Abordarea hibridă profită de această interacțiune dintre FV și LV și reușește să identifice valoarea de compensare adecvată care variază în timp și reproduce comportamentul real. Acest avantaj poate fi observat vizual din evoluția traiectoriei, după  $t = 18$  s, sistemul fiind deja calibrat folosind abordarea hibridă. În același timp, abordarea bazată doar pe filtrare Kalman introduce o creștere uniformă a erorii de calcul care duce la o scalare a distanței de rulare comparativ cu condițiile reale de trafic. Din perspectiva complexității de calcul, ambele abordări se potrivesc procesării în timp real. FIS Takagi-Sugeno nu introduce întârzieri de calcul care pot duce la o creștere majoră a timpilor de procesare a datelor în timp real” [37].

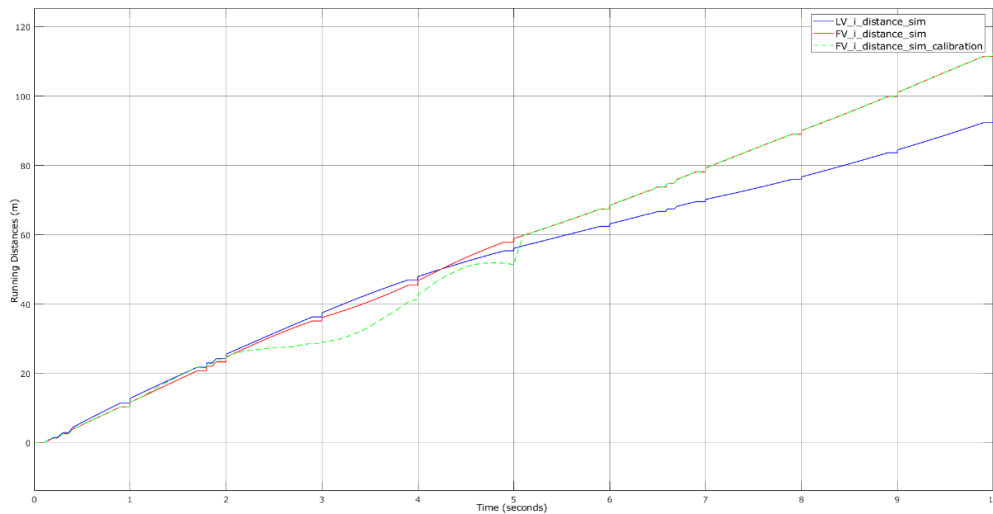


**Figura 7.** “Distanța de rulare pentru FV ( $x_4$ ) - comparație a rezultatului calibrării pentru abordarea bazată doar pe filtrare Kalman și filtrarea hibridă Kalman combinată cu FIS Takagi-Sugeno” [37].

Pe lângă rezultatul cercetării lui Pop et al. [37], acest capitol adaptează această metodă de calibrare și o aplică și în cazul modelului rafinat de urmărire a vehiculelor. Cel mai provocator aspect este adaptarea versiunii propuse inițial pentru sistemul de timp continuu la un mediu de timp discret. Proiectată inițial pentru timp continuu, adaptarea la versiunea în timp discret a modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor a implicat utilizarea unui soluții *ode45* pentru stări continue.

Valorile de compensare determinate prin procesul de calibrare pot reduce, de asemenea, impactul erorilor de calcul rezultate din analiza defectelor realizată în capitolul anterior. Metoda de calibrare reușește să „învețe” diferite șabloane de modificări ale valorii distanței de rulare și

după aproximativ  $t = 5$  s procesul de calibrare este finalizat și modelul rafinat de urmărire a vehiculelor este complet calibrat (Figura 8).



**Figura 8.** Rezultatul calibrării pentru FV ( $FV_i\_distance\_sim$ ) în cazul modelului rafinat de urmărire a vehiculelor.

**Capitolul 7, CONCLUSIONS, CONTRIBUTIONS AND FUTURE RESEARCH (CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI CERCETĂRI VIITOARE)**, evidențiază concluziile tezei, contribuțiile originale ale autorului și posibilele direcții de cercetare viitoare în domeniul modelării microscopice a sistemelor de trafic rutier. **Contribuția globală** a acestei teze este abordarea dezavantajului orientării pe o singură bandă a modelelor de urmărire a vehiculelor prin propunerea unui proces de rafinare care ia în considerare și comportamentul vehiculelor care se deplasează pe benzile de circulație adiacente în procesul de reprezentare a modelului de urmărire a vehiculelor.

Rezultatele acestei teze constă în următoarele **contribuții originale**, împărțite în patru categorii principale:

- o analiză critică a conceptelor utilizate în modelarea traficului rutier la nivel microscopic și evaluarea posibilor factori de influență:
  - o analiză critică și o sinteză a simulatoarelor microscopice de trafic rutier;
  - o imagine de ansamblu comparativă a modelului de urmărire a vehiculelor și a derivatelor acestuia;
  - o analiză critică și o sinteză a evoluțiilor recente ale modelelor de urmărire a vehiculelor, concepute pentru a răspunde nevoilor vehiculelor conectate, autonome și vehiculelor electrice;
  - o analiză critică și o sinteză a metodelor de calibrare a modelelor de urmărire a vehiculelor;
  - identificarea influenței infrastructurii rutiere, politicilor și reglementărilor de trafic, precum și soluțiilor de mobilitate inteligentă în reducerea congestionării traficului;
  - identificarea posibilelor îmbunătățiri în modelarea traficului rutier la nivel microscopic;
  - identificarea posibilelor îmbunătățiri ale metodelor de calibrare a modelelor de urmărire a vehiculelor;
- o abordare sistemică și o modelare a traficului rutier la nivel microscopic:
  - modelarea și implementarea în software-ul de simulare AnyLogic a diferitelor metode de configurare a intersecțiilor;
  - o analiză comparativă a volumelor de trafic și a profilurilor de viteză

- corespunzătoare tuturor metodelor de configurare a intersecțiilor;
- o analiză a siguranței sistemelor de management al sensurilor giratorii cu o singură bandă;
- modelarea și implementarea temporizatoarelor de undă verde folosind AnyLogic și Simulink (MATLAB R2020a);
- dezvoltarea de noi abordări de modelare a benzilor de circulație a unei rețele rutiere ca noduri într-un lanț Markov;
- dezvoltarea de noi algoritmi bazați pe raționament Bayesian, algoritmi genetici și strategii specifice jocurilor minimax pentru predicția comportamentului șoferului și, implicit, estimarea volumelor OD;
- dezvoltarea de noi modele de schimbare a benzii care să includă incertitudinea comportamentului șoferului;
- dezvoltarea și implementarea unui model rafinat de urmărire a vehiculelor care să depășească dezavantajul orientării pe o singură bandă a modelelor standard de urmărire a vehiculelor prin luarea în considerare a modificărilor comportamentale în funcție de acțiunile de schimbare a benzii către benzile de circulație adiacente;
- realizarea unui studiu experimental asupra modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor, bazat pe un set de date reale de trafic rutier pentru un segment de drum cu trei benzi din Timișoara (România);
- o analiză critică comparativă a rezultatelor modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor cu aplicarea separată a modelului standard de urmărire a vehiculelor pentru fiecare bandă a unui segment de drum cu trei benzi;
- o detecție și o analiză sistemică a defectelor introduse de procesul de modelare a modelului rafinat de urmărire a vehiculelor:
  - „definirea unei metodologii de detecție a defectelor bazată pe ecuații de paritate pentru modelele de urmărire a vehiculelor destinat rețelelor rutiere cu benzi multiple pentru același sens de deplasare” [45];
  - identificarea vitezei relative și a distanței dinamice de rulare ca reziduuri ale modelului rafinat de urmărire a vehiculelor;
  - dezvoltarea și implementarea mecanismelor de detecție a defectelor în Simulink (MATLAB R2020a);
  - realizarea unui studiu experimental de detecție a defectelor modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor folosind un set de date reale de trafic rutier pentru un segment de drum cu trei benzi din Timișoara (România);
  - asigurarea măsurătorilor și evaluării valorilor reziduale obținute;
  - o analiză critică a avantajelor și dezavantajelor modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor ca rezultat al evaluării reziduurilor;
- o abordare sistemică și o modelare a procesului de calibrare a modelelor de urmărire a vehiculelor:
  - dezvoltarea și implementarea unui nou model de calibrare pentru modelele de urmărire a vehiculelor ca soluție hibridă care combină filtrarea Kalman cu FIS Takagi-Sugeno;
  - identificarea posibilelor modificări ale modelului de calibrare propus pentru adaptarea acestuia la nevoile modelului rafinat propus de urmărire a vehiculelor;
  - realizarea unui studiu experimental asupra modelului de calibrare propus pe baza unui set de date reale de trafic rutier din Timișoara (România) atât pentru modelul standard cât și pentru modelul rafinat de urmărire a vehiculelor;
  - o analiză critică comparativă a modelului de calibrare propus în ceea ce privește acuratețea și performanța.

Această teză recomandă următoarele posibile direcții de cercetare viitoare:

- controlul în timp real pentru toate vehiculele care se deplasează pe mai multe benzi de circulație, facilitând actualizarea permanentă a accelerațiilor FV-urilor pentru toate benzile de circulație ale unei rețele rutiere, nu numai pentru o bandă de circulație așa cum s-a propus în această teză;
- noi abordări sistemice pentru controlul microscopic al traficului rutier bazate pe algoritmi genetici, algoritmi fuzzy și rețele neuronale pentru a oferi soluții sigure pentru reducerea congestionării traficului;
- noi abordări sistemice pentru metode microscopice de calibrare a traficului rutier bazate pe algoritmi genetici, algoritmi fuzzy și rețele neuronale;
- identificarea tiparelor de comportament care descriu relația dintre metodele de configurare a intersecțiilor și comportamentul șoferului.

**Mulțumiri:** Datele utilizate pentru simulări au fost obținute de la *Primăria Municipiului Timișoara - Direcția Generală Drumuri, Poduri, Parcaje și Rețele Utilitare – Birou Monitorizare Trafic, Timișoara, Romania* în baza aprobării **RE2019-002611/18.12.2019**. Sprijinul este pe deplin recunoscut.

### Referințe bibliografice

- [1] **M.-D. Pop**, O. Proștean, and G. Proștean, “Multiple Lane Road Car-Following Model using Bayesian Reasoning for Lane Change Behavior Estimation: A Smart Approach for Smart Mobility,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, Paris France, Jul. 2019, pp. 1–8. doi: 10.1145/3341325.3341996.
- [2] C. Colombaroni, G. Fusco, and N. Isaenko, “Modeling Car Following with Feed-Forward and Long-Short Term Memory Neural Networks,” *Transportation Research Procedia*, vol. 52, pp. 195–202, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.01.022.
- [3] Y. Lu, Y. Cui, Q. Yang, and M. Zhang, “Car-following Model Based on Genetic Algorithm Optimized BP Neural Network,” *dtetr*, no. ictim, Feb. 2017, doi: 10.12783/dtetr/ictim2016/5540.
- [4] J. Wang, Z. Zhang, F. Liu, and G. Lu, “Investigating heterogeneous car-following behaviors of different vehicle types, traffic densities and road types,” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 9, p. 100315, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.trip.2021.100315.
- [5] D. Yang, L. Zhu, Y. Liu, D. Wu, and B. Ran, “A Novel Car-Following Control Model Combining Machine Learning and Kinematics Models for Automated Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 20, no. 6, pp. 1991–2000, Jun. 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2854827.
- [6] W. Li, T. Chen, J. Guo, and J. Wang, “Adaptive Car-Following Control of Intelligent Electric Vehicles,” in *2018 IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, Wuhan, China, Aug. 2018, pp. 86–89. doi: 10.1109/CCSSE.2018.8724753.
- [7] G. Li and W. Zhu, “The Car-Following Model Based on Fuzzy Inference Controller,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 646, p. 012007, Oct. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/646/1/012007.
- [8] J. Tian, C. Zhu, D. Chen, R. Jiang, G. Wang, and Z. Gao, “Car following behavioral stochasticity analysis and modeling: Perspective from wave travel time,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 143, pp. 160–176, Jan. 2021, doi:

10.1016/j.trb.2020.11.008.

[9] P. Wu, F. Gao, and K. Li, “A Vehicle Type Dependent Car-following Model Based on Naturalistic Driving Study,” *Electronics*, vol. 8, no. 4, p. 453, Apr. 2019, doi: 10.3390/electronics8040453.

[10] T. Xu and J. Laval, “Driver Reactions to Uphill Grades: Inference from a Stochastic Car-Following Model,” *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 11, pp. 343–351, Nov. 2020, doi: 10.1177/0361198120945597.

[11] A. B. Zaky, W. Gomaa, and M. A. Khamis, “Car Following Markov Regime Classification and Calibration,” in *2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, Miami, FL, USA, Dec. 2015, pp. 1013–1018. doi: 10.1109/ICMLA.2015.126.

[12] R. Borsche and A. Meurer, “Microscopic and macroscopic models for coupled car traffic and pedestrian flow,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 348, pp. 356–382, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.cam.2018.08.037.

[13] V. Gkania and L. Dimitriou, “Linking the microscopic traffic flow mechanics with the macroscopic phenomena by exploiting class-type traffic information retrieved from online traffic maps,” *Transportation Research Procedia*, vol. 52, pp. 645–652, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.01.077.

[14] B. Jia, D. Yang, X. Zhang, Y. Wu, and Q. Guo, “Car-following model considering the lane-changing prevention effect and its stability analysis,” *Eur. Phys. J. B*, vol. 93, no. 8, p. 153, Aug. 2020, doi: 10.1140/epjb/e2020-10028-3.

[15] M. P. A. Moghadam, P. Pahlavani, and B. Bigdeli, “A New Car-Following Model Based on the Epsilon-Support Vector Regression Method using the Parameters Tuning and Data Scaling Techniques,” *Int J Civ Eng*, vol. 15, no. 8, pp. 1159–1172, Dec. 2017, doi: 10.1007/s40999-017-0209-4.

[16] S. Jiao, S. Zhang, B. Zhou, Z. Zhang, and L. Xue, “An Extended Car-Following Model Considering the Drivers’ Characteristics under a V2V Communication Environment,” *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1552, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12041552.

[17] B. Yu, H. Zhou, L. Wang, Z. Wang, and S. Cui, “An extended two-lane car-following model considering the influence of heterogeneous speed information on drivers with different characteristics under honk environment,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 578, p. 126022, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.physa.2021.126022.

[18] X. Cao, J. Wang, and C. Chen, “A Modified Car-following Model Considering Traffic Density and Acceleration of Leading Vehicle,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, p. 1268, Feb. 2020, doi: 10.3390/app10041268.

[19] A. Gounni, N. Rais, and M. A. Idrissi, “A new car-following model considering the effect of complex driving behaviour,” in *2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, Rabat, Morocco, Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/GOL49479.2020.9314739.

[20] Y. Li, Z. Liang, H. Zhu, and X. Tang, “Electric Vehicle Dynamics-Based Car-Following Model and Stability Analysis,” in *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, Guangzhou, China, Jul. 2019, pp. 6692–6696. doi: 10.23919/ChiCC.2019.8866395.

[21] J. Echeto, M. G. Romana, and M. Santos, “Swarm Modelling Considering Autonomous Vehicles for Traffic Jam Assist Simulation,” in *15th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2020)*, vol. 1268, Á.

- Herrero, C. Cambra, D. Urda, J. Sedano, H. Quintián, and E. Corchado, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 429–438. doi: 10.1007/978-3-030-57802-2\_41.
- [22] D. Song, R. Tharmarasa, G. Zhou, M. C. Florea, N. Duclos-Hindie, and T. Kirubarajan, “Multi-Vehicle Tracking Using Microscopic Traffic Models,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 149–161, Jan. 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2804894.
- [23] J. Chen, D. Sun, Y. Li, M. Zhao, W. Liu, and S. Jin, “Human–machine cooperative scheme for car-following control of the connected and automated vehicles,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 573, p. 125949, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.physa.2021.125949.
- [24] P. Gora, C. Katrakazas, A. Drabicki, F. Islam, and P. Ostaszewski, “Microscopic traffic simulation models for connected and automated vehicles (CAVs) – state-of-the-art,” *Procedia Computer Science*, vol. 170, pp. 474–481, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.091.
- [25] M. Hasan, D. Perez, Y. Shen, and H. Yang, “Distributed Microscopic Traffic Simulation with Human-in-the-Loop Enabled by Virtual Reality Technologies,” *Advances in Engineering Software*, vol. 154, p. 102985, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.advengsoft.2021.102985.
- [26] B. S. Kerner and S. L. Klenov, “Methodology of Microscopic Traffic Prediction for Automated Driving,” in *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, Mar. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416038.
- [27] T. Schwickart, H. Voos, J.-R. Hadji-Minaglou, and M. Darouach, “A Fast Model-Predictive Speed Controller for Minimised Charge Consumption of Electric Vehicles: Energy-Saving Model-Predictive Cruise Control System for Electric Vehicles,” *Asian Journal of Control*, vol. 18, no. 1, pp. 133–149, Jan. 2016, doi: 10.1002/asjc.1251.
- [28] S. Zhang and X. Zhuan, “Research on Tracking Improvement for Electric Vehicle during a Car-following Process,” in *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, Aug. 2020, pp. 3261–3266. doi: 10.1109/CCDC49329.2020.9164836.
- [29] **M.-D. Pop**, J. Pandey, and V. Ramasamy, “Future Networks 2030: Challenges in Intelligent Transportation Systems,” in *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, India, Jun. 2020, pp. 898–902. doi: 10.1109/ICRITO48877.2020.9197951.
- [30] S. Puri, R. S. Rai, and K. Saxena, “Barricades in Network Transformation from 4G to 5G in India,” in *2018 7th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Aug. 2018, pp. 695–702. doi: 10.1109/ICRITO.2018.8748303.
- [31] L. Chettri and R. Bera, “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, Jan. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2948888.
- [32] L. Tseng and L. Wong, “Towards a Sustainable Ecosystem of Intelligent Transportation Systems,” in *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Mar. 2019, pp. 403–406. doi: 10.1109/PERCOMW.2019.8730669.
- [33] G. Misuraca, D. Broster, and C. Centeno, “Digital Europe 2030: Designing scenarios for ICT in future governance and policy making,” *Government Information Quarterly*, vol. 29, pp. S121–S131, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.giq.2011.08.006.
- [34] P. Masek *et al.*, “A Harmonized Perspective on Transportation Management in Smart

Cities: The Novel IoT-Driven Environment for Road Traffic Modeling,” *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1872, Nov. 2016, doi: 10.3390/s16111872.

[35] G. Sallai, “Chapters of Future Internet research,” in *2013 IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, Dec. 2013, pp. 161–166. doi: 10.1109/CogInfoCom.2013.6719233.

[36] A. Ferrara, S. Sacone, and S. Siri, “Microscopic and Mesoscopic Traffic Models,” in *Freeway Traffic Modelling and Control*, A. Ferrara, S. Sacone, and S. Siri, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 113–143. doi: 10.1007/978-3-319-75961-6\_5.

[37] **M.-D. Pop**, O. Proștean, T.-M. David, and G. Proștean, “Hybrid Solution Combining Kalman Filtering with Takagi–Sugeno Fuzzy Inference System for Online Car-Following Model Calibration,” *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5539, Sep. 2020, doi: 10.3390/s20195539.

[38] **M.-D. Pop**, “Simularea sistemelor inteligente de trafic rutier utilizând AnyLogic“, Teză de disertație, Timisoara, 2017.

[39] B. Yin, M. Dridi, and A. El Moudni, “Adaptive Traffic Signal Control for Multi-intersection Based on Microscopic Model,” in *2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, Vietri sul Mare, Italy, Nov. 2015, pp. 49–55. doi: 10.1109/ICTAI.2015.21.

[40] **M.-D. Pop**, “Traffic Lights Management Using Optimization Tool,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 238, pp. 323–330, 2018, doi: 10.1016/j.sbspro.2018.04.008.

[41] D. Chen, S. Ahn, S. Bang, and D. Noyce, “Car-Following and Lane-Changing Behavior Involving Heavy Vehicles:,” *Transportation Research Record*, vol. 2561, no. 1, pp. 89–97, Jan. 2016, doi: 10.3141/2561-11.

[42] P. Angkititrakul, C. Miyajima, and K. Takeda, “Modeling and adaptation of stochastic driver-behavior model with application to car following,” in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Jun. 2011, pp. 814–819. doi: 10.1109/IVS.2011.5940464.

[43] **M.-D. Pop**, O. Proștean, and G. Proștean, “Minimax Strategy for Lane Choice Prediction in Markovian Traffic Modeling,” in *2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, Rabat, Morocco, Oct. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GOL49479.2020.9314764.

[44] S. Hamdar, “Driver Behavior Modeling,” in *Handbook of Intelligent Vehicles*, A. Eskandarian, Ed. London: Springer, 2012, pp. 537–558. doi: 10.1007/978-0-85729-085-4\_20.

[45] **M.-D. Pop**, O. Proștean, and G. Proștean, “Fault Detection Based on Parity Equations in Multiple Lane Road Car-Following Models Using Bayesian Lane Change Estimation,” *JSAAN*, vol. 9, no. 4, p. 52, Nov. 2020, doi: 10.3390/jsan9040052.

[46] F. Kratz, W. Nuninger, and S. Ploix, “Fault detection for time-delay systems: a parity space approach,” in *Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207)*, Philadelphia, PA, USA, 1998, pp. 2009–2011 vol.4. doi: 10.1109/ACC.1998.702978.

[47] R. Isermann, “Fault detection with parity equations,” in *Fault-Diagnosis Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 197–229. doi: 10.1007/3-540-30368-5\_10.

[48] R. Isermann, “Supervision, fault-detection and diagnosis methods – a short introduction,” in *Fault-Diagnosis Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 11–45. doi: 10.1007/978-3-642-12767-0\_2.