پیاده‌سازی یک مدل چندعامله فازی برای مدیریت ترافیک تخلیه شهر با استفاده از آتوماتای احتمالی

امیررضا کرباسچیان، سعید ستایشی و آرش شریفی

چکیده: به دلیل اهمیت تخلیه سریع شهر هنگام وقوع حوادث طبیعی یا غیر طبیعی، اعمال یک سیاست کنترلی بهینه برای جلوگیری از بروز تراکم و توقف وسایل نقلیه امری لازم و ضروری است. روش‌های موجود برای مدیریت ترافیک در شرایط بحران کمتر به استفاده از رویکردهای هوش مصنوعی پرداخته‌اند و به همین دلیل، هدف اصلی مؤلفین در این پژوهش ارائه یک رویکرد کنترلی بهینه و هوشمند برای ترافیک تخلیه شهر است. در این رویکرد از سیستم استنتاج فازی برای تصمیم‌گیری هر عامل و از آتوماتای احتمالی برای بهینه‌کردن عملکرد عامل‌ها با توجه به ترجیحات هر کدام از آنها در طول زمان استفاده شده است. برای بررسی میزان موفقیت رویکرد کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی مبتنی بر عامل در محیط‌های RStudio و NetLogo و با استفاده از بسته‌های RNetlogo و frbs در زبان R انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده توزیع بار ترافیک، استفاده حداکثری از ظرفیت معابر و پیش‌گیری از بروز تراکم توسط رویکرد پیشنهادی است. با توجه به فناوری‌های ارتباطی نظیر GPS، گوشی‌های تلفن همراه هوشمند، سیستم‌های پرداخت عوارض خودکار الکترونیکی در معابر و ... که در سال‌های اخیر گسترش یافته‌اند، امکان پیاده‌سازی روش کنترل ترافیک بحران پیشنهادی در عمل نیز وجود خواهد داشت.

کلید واژه: **مدیریت ترافیک، مدل‌سازی مبتنی بر عامل، سیستم فازی، سیستم چندعامله، آتوماتای احتمالی.**

۱- مقدمه

تعریف تخلیه[1] شهر عبارت است از حرکت سریع و فوری مردم به مکانی دورتر از محدوده مورد تهدید یا حادثه و به مقصدی امن‌تر. این مطلب دغدغه اصلی مدیران ترافیک است زیرا عدم تحقق این هدف منجر به تراکم و آشوب خواهد شد. طوفان‌های کاترینا و ریتا مثال‌هایی از این دست حوادث در ابعاد بزرگ می‌باشند که باعث خسارات جانی و مالی قابل توجهی شدند (کاترینا منجر به کشته‌شدن ۱۸۳۳ نفر و ۸۱ بیلیون دلار خسارت شد و ریتا در مجموع ۱۲۰ کشته و ۱۱/۳ بیلیون دلار خسارت بر جای گذاشت [۱]). گزارش‌ها نشان می‌دهند که اتخاذ سیاست‌های تخلیه شهر در مورد طوفان‌های کاترینا و ریتا با تأخیر مواجه شد. در نتیجه مردم در هر دوی این طوفان‌ها ترافیک سنگینی را در مسیرهای مابین ایالات تجربه کردند که منجر به انتقال وسایل نقلیه با سرعت آهسته شد [۲] و [۳]. شبکه‌های حمل و نقلی برای مدیریت رخدادهای نادر مانند حوادث طبیعی ساخته نشده‌اند، چرا که از نظر اقتصادی عملی نیست. به علاوه، مهاجرین معمولاً به دنبال بهینه‌کردن کارایی فردی خودشان (مثلاً مدت انتقال) هستند که در این شرایط امکان کاهش عملکرد کلی سیستم وجود دارد. عوامل دیگری مانند ماهیت حادثه و مساحت جغرافیایی، فرایند تخلیه شهر را پیچیده‌تر می‌کنند.

به طور واضح، نیاز شدیدی به سیاست‌های مدیریت ترافیک مؤثر در زمان تخلیه شهر وجود دارد تا کارایی سیستم ارتقا پیدا کند و معمولاً میزان کارایی با زمان تخلیه کلی اندازه‌گیری می‌شود. تا کنون انواع متعددی از سیاست‌های کنترلی مطرح شده‌اند [۴]. کنترل ترافیک زمانی پیاده‌سازی می‌شود که هدف، استفاده کاراتر از شبکه ترافیک موجود توسط مسیردهی مسافرین است. سیاست جریان مخالف[2]، جهت خطوط ارتباطی به سمت داخل و بلااستفاده را عکس می‌کند (در جهت مقصد تخلیه) تا جریان خروجی ترافیک را افزایش دهد. تخلیه مرحله‌ای[3] به دنبال توزیع بهتر تقاضای مسافرین با توجه به اولویت تخلیه هر منطقه است. سیاست کنترل سیگنال[4] تلاش می‌کند تا ظرفیت خیابان را توسط پیاده‌سازی یک برنامه زمان‌دهی سیگنال مؤثر افزایش دهد. سیاست کنترل تنگنا[5] قسمت‌هایی از مسیر که به یک آستانه بالا از تراکم رسیده را موقتاً می‌بندد و زمانی که این قسمت از مسیر به یک آستانه پایین از تراکم رسید، مجدداً باز می‌کند [۵]. این کار باعث می‌شود که در هیچ یک از مسیرها تراکم پیش نیاید و ترافیک در بین همه مسیرها توزیع شود. در بین همه این سیاست‌های کنترلی، سیاست جریان مخالف به صورت گسترده مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته و به طور مکرر در عمل استفاده شده است. علی رغم مزایای روش جریان مخالف، در گذشته هنگام اجرای این روش تصادفاتی رخ داده که از موفقیت آن کاسته است. برای مثال، هنگام اجرای سیاست جریان مخالف در طوفان ایوان[6]، به دلیل عدم هماهنگی بین مدیران تصادفاتی به بار آمد. برخی از اتصالات خروجی به سمت آن دسته از خطوط داخلی که هنوز تغییر جهت نیافته بودند مسیردهی شدند [۶] و این امر ایجاد اغتشاش کرد که منجر به افزایش زمان تخلیه شد.

روش‌های بیان‌شده مبتنی بر دو فرض اساسی هستند: رفتار منطقی و بشردوستانه مسافرین و دقت داده‌های پیش‌بینی شده. اکثر مدل‌های تخلیه فرض می‌کنند که مسافرین در بعضی مواقع مسیرهای طولانی‌تری را انتخاب می‌کنند تا عملکرد کلی سیستم را ارتقا ببخشند. در سناریوی تخلیه واقعی، مسافرین به طور حریصانه رفتار کرده و سعی می‌کنند تا

این مقاله در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۳۰ فروردین ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

امیررضا کرباسچیان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، (email: ar.karbaschian@srbiau.ac.ir).
سعید ستایشی، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، (email: setayesh@aut.ac.ir).
آرش شریفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، (email: a.sharifi@srbiau.ac.ir).

1. Evacuation
2. Contraflow
3. Staged Evacuation
4. Signal Control
5. Throttling
6. Ivan

کوتاه‌ترین مسیر تا مقصد را در حالی که به شرایط سیستم نیز پاسخ می‌دهند، انتخاب کنند. این رفتار حریصانه مسافرین موجب تراکم در بخش‌های مختلف شبکه حمل و نقل خواهد شد. همچنین به دلیل منحصر به فرد بودن حوادث طبیعی، دقت داده‌های پیش‌بینی شده به شدت مورد تردید است.

این مسایل باعث شد تا در این پژوهش برای مدل‌کردن دقیق‌تر شرایط واقعی و تصمیم‌گیری مناسب به هنگام تخلیه شهر، از مدل فازی برای هر عامل و آتوماتای احتمالی ساختار ثابت برای یادگیری و بهینه‌کردن توابع عضویت فازی استفاده شود. سیستم‌های خبره فازی به عنوان سیستم‌های تصمیم‌گیرنده کارا پذیرفته شده‌اند که تصمیم‌گیری در آنها بر اساس استنتاج‌های نزدیک به استنتاج انسانی صورت می‌گیرد. در این حالت برای هر عامل یک سیستم خبره فازی در نظر گرفته می‌شود که به هر مسیر پیش‌رو یک امتیاز اختصاص می‌دهد. هر عامل در هر تقاطع با توجه به متغیرهای ورودی فاصله تا مقصد و تراکم موجود در مسیرهای پیش‌رو و همچنین با توجه به اولویت‌هایی که هر عامل برای این دو متغیر در نظر گرفته است، یک مسیر را انتخاب می‌کند. اما همان طور که گفته شد، عامل‌ها در شرایط بحرانی رفتار حریصانه و شتاب‌زده خواهند داشت که باعث می‌شود مسیرهای منتهی به مقاصد نزدیک‌تر توسط اکثر عامل‌ها انتخاب شده و منجر به تراکم شود. لذا برای مدیریت ترافیک تخلیه و جلوگیری از پیش‌آمدن ازدحام، از سیاست یادگیری تقویتی (جریمه و پاداش) توسط آتوماتای احتمالی استفاده می‌شود. به این صورت که اگر هر عامل پس از انجام یک حرکت باعث شود تراکم محلی بیشتر از یک حد مجاز (آستانه) شود، یک جریمه متناسب با مقدار تراکم ایجادشده از طرف محیط به عامل اعلام می‌شود. این جریمه باعث می‌شود که مراکز تابع عضویت میانی متغیرهای ورودی در یک فرایند یادگیری به راست یا چپ متمایل شوند. با این رویکرد، احتمال حرکت عامل‌ها به سمت مقاصد با تراکم کمتر (اما با فاصله زیادتر) بیشتر می‌شود. در نتیجه تراکم در مسیرها پیش نیامده و عامل‌ها در سطح شهر توزیع می‌شوند. این امر منجر به کاهش زمان تخلیه شهر از عامل‌ها خواهد شد، به این ترتیب ترافیک تخلیه در تمام شبکه حمل و نقل توزیع شده و موجب بالارفتن کارایی کلی سیستم خواهد شد.

رویکرد کلی در این سیاست کنترلی مانند سیاست کنترل تنگنا است با این تفاوت که به دلیل فازی‌بودن عامل‌ها و در نظر گرفتن جریمه در این رویکرد به جای بستن و بازکردن‌های مکرر مسیرهای مختلف در رویکرد کنترل تنگنا، انعطاف‌پذیری و بهینگی بیشتری نسبت به آن دارد چرا که هنگام بستن یک قسمت از مسیر، برای مدتی فضایی از مسیر بسته شده و بلااستفاده باقی می‌ماند. اما در روشی که در این پژوهش به کار رفته است، ما به دنبال حل مشکل تراکم ترافیک به صورت پویا، پیش‌گیرانه و در عین حال با استفاده حداکثری از ظرفیت شبکه حمل و نقل و با توجه به ترجیحات مستقل هر عامل هستیم که به واقعیت نیز نزدیک‌تر باشد.

با توجه به توسعه فناوری‌هایی نظیر سیستم‌های خودکار الکترونیکی پرداخت عوارض، سیستم‌های اطلاع‌رسانی رادیو و GPS، گوشی‌های همراه هوشمند و غیره، پیاده‌سازی این روش در عمل نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

برای این که بتوان روش‌های مدیریت ترافیک مختلف را تحلیل کرد، باید مدل‌های تخلیه دقیقی ساخته شوند. تعداد زیادی از مدل‌های تخلیه تحلیلی[1] و مبتنی بر شبیه‌سازی[2] در بین آثار علمی وجود دارند. اگرچه مدل‌های تحلیلی بینش قوی‌تری حاصل می‌کنند، اما آنها معمولاً به تقریب‌هایی احتیاج دارند (برای آسان‌شدن محاسبات) که باعث می‌شود از اعتبار کاسته شود. به همین دلیل در این پژوهش از شبیه‌سازی مبتنی بر عامل[3] یا ABS استفاده شده که مزیت اصلی ABS این است که می‌توان رفتار جداگانه هر عامل را مدل کرد و برایند پویایی سطح سیستم را در محیط تخلیه بررسی نمود. مهم‌تر از این، ABS همچنین به پاسخ‌گویی تعدادی از سؤال‌های- اگر آنگاه- با توجه به سیاست‌های کنترلی مختلف کمک می‌کند [۷] و [۸].

۲- تاریخچه و بیان مسأله

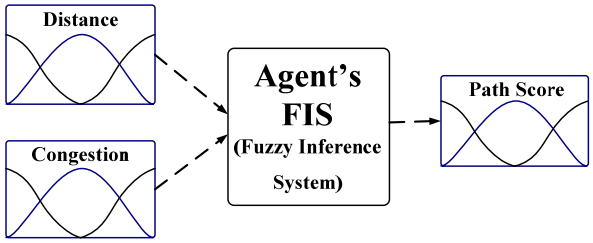
تعدادی از مدل‌های تخلیه در آثار علمی موجود است. در بخش ۲-۱ مروری بر این مدل‌ها با تأکید بر مدل تخلیه ABS انجام خواهد شد و در بخش ۲-۲ سیاست‌های کنترل ترافیک مختلف آمده است.

۲-۱ مدل‌های تخلیه موجود

مدل‌های تخلیه می‌توانند بر اساس سطح دید کلی به سطوح ماکرو[4]، میانی[5] یا مایکرو[6] دسته‌بندی شوند. مدل‌های تخلیه سطح ماکرو جریان ترافیک را توسط چگالی ترافیک، میانگین سرعت وسایل نقلیه و میانگین تراکم در شبکه ترافیک بازنمایی می‌کنند و مدل‌های سطح میانی ترافیک را در گروه‌ها جمع می‌کنند. اکثر مدل‌ها در این دو سطح به عنوان جریان شبکه یا مسأله حل مشکل ترافیک فرموله‌بندی[7] می‌شوند [۹] تا [۱۱]. در مدل‌های شبیه‌سازی سطح مایکرو، مدل‌سازی در سطح وسایل نقلیه به صورت جداگانه انجام می‌شود.

مدل‌های ABS به ابزاری برای رهبران اجتماعی، مدیران بحران (حوادث) و مدیران ترافیک تبدیل شده‌اند به طوری که این مدل‌ها در آماده‌سازی برای حوادث مفید واقع می‌شوند و این آماده‌سازی توسط پاسخ‌گویی به برخی از سؤال‌های "اگر- آنگاه" حاصل می‌شود [۷]. مزیت اصلی ABS قابلیت نشان‌دادن رفتار تجمعی سطح سیستم است در حالی که تنها رفتار عامل‌ها به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شود [۱۲] و [۱۳]. در [۱۴] مؤلفان مدل ABSای ساختند تا رفتار انسان را در شرایط بحران حادثه بررسی کنند. مدل آنها سه نوع عامل دارد: عامل‌های عادی که مسیر همیشگی خودشان را انتخاب می‌کنند، عامل‌های ۱۰۰٪ حریص که مسیر را در هر لحظه که با تراکم مواجه شوند تغییر می‌دهند و در نهایت عامل‌های ۵۰٪ حریص که در ۵۰٪ از زمان‌هایی که با تراکم مواجه شوند مسیر را تغییر می‌دهند. زمانی که عامل‌ها به تقاطع‌ها با اتصالات متراکم می‌رسند، عامل‌های حریص مسیر با کمترین تراکم را انتخاب می‌کنند و سپس کوتاه‌ترین فاصله تا مقصد را می‌پیمایند. آنها نشان دادند که زمان تخلیه کلی وقتی نسبت عامل‌های حریص بالا رود افزایش پیدا می‌کند. البته این رویکرد حریصانه به احتمال زیاد منجر به تراکم خواهد شد که باید سیاست‌های کنترلی را برای برطرف‌کردن مشکل تراکم به کار گرفت. اما در رویکرد پیشنهادی ما انتخاب مسیر توسط عامل‌ها بر مبنای ترجیحات متفاوت آنها نسبت به فاصله و تراکم و همچنین مقادیر فاصله و تراکم در هر مسیر در یک سیستم استنتاج فازی است. توابع عضویت

1. Analytical
2. Simulation
3. Agent Based Simulation
4. Macro
5. Meso
6. Micro
7. Formulated



شکل ۱: نمای کلی سیستم خبره فازی متناظر با هر عامل.

جدول ۱: متغیرهای ورودی سیستم خبره فازی هر عامل و برچسب آنها.

Input variable	Value#1	Value#2	Value#3
Distance	Short	Medium	Long
Congestion	Light	Normal	Heavy

ورودی این سیستم فازی در طول زمان با احتمالی متناسب با تراکم ایجادشده در محل و ترجیح عامل بهینه می‌شوند. لذا این مدل به واقعیت نزدیک‌تر بوده و رویکرد انعطاف‌پذیر و بهینه‌تری برای پیش‌گیری از تراکم و اعمال سیاست کنترلی بهینه ارائه می‌کند.

اکثر معیارهای اندازه‌گیری که در مقالات مربوط به تخلیه استفاده شده، زمان تخلیه کلی می‌باشد. این معیار دارای تعریف مقابل است: زمان کلی سپری‌شده از وقتی که اولین مسافر مبدأ را ترک کند تا وقتی که آخرین مسافر به مقصد برسد [۱۵].

۲-۲ سیاست‌های کنترلی موجود

در طول حادثه، نیاز است که تعداد بیشتری از مسافرین از ظرفیت معابر استفاده کنند. این مطلب باعث تراکم خواهد شد که منجر به افزایش زمان تخلیه می‌شود. مدیران ترافیک سیاست‌های کنترلی متعددی را به منظور حل این مشکل به کار می‌گیرند. در این قسمت به تعریف سه سیاست کنترلی رایج مسیردهی ترافیک، کنترل سیگنال و مسیر مخالف خواهیم پرداخت [۴]. به غیر از سیاست مسیر مخالف، بقیه سیاست‌ها دارای هدف استفاده کاراتر از راه‌های شبکه حمل و نقلی موجود هستند اما در مسیر مخالف، شبکه راه به منظور اجابت تقاضای زیاد مسافرین دوباره طراحی خواهد شد. این سیاست در طوفان‌های متعددی به کار گرفته شده و یک چاره اساسی در تخلیه به هنگام حوادث است [۳] و [۱۶].

تمام سیاست‌های تخلیه یا مرحله‌ای هستند و یا هم‌زمان. تخلیه مرحله‌ای دارای هدف توزیع تقاضای مسافرین در طول زمان است و این امر به جلوگیری از تراکم در قسمت‌های راه کمک می‌کند. در این سیاست، مدیران ترافیک ناحیه مورد تهدید را به مناطقی تقسیم می‌کنند و هر منطقه بنا بر اولویتی که دارد در زمانی خاص تخلیه می‌شود [۱۷] و [۱۸]. در تخلیه هم‌زمان، همان طور که از نامش پیداست همه مسافرین در ناحیه مورد تهدید در یک زمان تخلیه می‌شوند و مدل تخلیه که در این مقاله پیاده‌سازی شده به طور هم‌زمان عمل می‌کند.

در سیاست مسیردهی ترافیک، مدیر ترافیک توسط توزیع تقاضای مسافرین در مسیرهای مختلف، از شبکه راه‌های موجود به طور کاراتری استفاده می‌کند. این مطلب توسط راهنمایی مسافرین از مسیرهای شلوغ به آن دسته از مسیرهای با ظرفیت بیشتر حاصل می‌شود. در سیاست کنترل سیگنال در طول تخلیه به منظور افزایش ظرفیت قسمت‌های راه از یک برنامه زمان‌بندی سیگنال مؤثر برای چراغ‌های راهنما استفاده می‌شود. این روش همچنین می‌تواند در ایجاد دسترسی آسان به مسیرهای تخلیه و جلوگیری از تنگنا در نقاط تلاقی استفاده شود. سیاست کنترل تنگنا نیز از سیاست‌های مسیردهی ترافیک محسوب می‌شود.

اکثر مدل‌ها در آثار علمی که با مسأله مسیر مخالف در ارتباط هستند، مدل‌های در سطح ماکرو یا میانی و مبتنی بر تحلیل‌های اکتشافی هستند [۳] و [۱۹] تا [۲۱].

۳- مدل پیشنهادی

برای هر عامل یک سیستم خبره فازی به عنوان مدل رفتاری آن در نظر گرفته شده که به هر مسیر یک امتیاز اختصاص می‌دهد. سیستم‌های خبره فازی به عنوان سیستم‌های تصمیم‌گیرنده کارایی شناخته شده‌اند که دارای استنتاج‌های نزدیک به استنتاج انسانی هستند. ابتدا در بخش ۳-۱ سیستم فازی متناظر با هر عامل شرح داده می‌شود و سپس در بخش ۳-۲ به توضیح آتوماتای احتمالی تنظیم‌کننده توابع عضویت در طول زمان خواهیم پرداخت.

۳-۱ سیستم خبره فازی عامل‌ها

در ابتدا اولین قدم، تعیین متغیرهای ورودی مختلف برای تصمیم‌گرفتن است. در این مقاله، متغیرهای مهم و تأثیرگذار عبارتند از: ۱) فاصله تا مقصد و ۲) میزان تراکم مسیر.

این متغیرها برای هر مسیر در مدل قابل محاسبه است و می‌توان متغیرهای مذکور را برای هر عامل محاسبه کرد. برای این که میزان ترجیح راننده وسیله نقلیه به هر کدام از این متغیرها مشخص شود، باید درجه اهمیت آنها با انتخاب یکی از این قیود تعیین گردد:

خیلی مهم: مقادیر واقعی کوچک برای متغیر ورودی با این قید، تأثیر بیشتری در خروجی سیستم فازی دارد.

مهم: مقادیر واقعی متوسط برای متغیر ورودی با این قید، تأثیر بیشتری در خروجی سیستم فازی دارد.

اندکی مهم: مقادیر واقعی بزرگ برای متغیر ورودی با این قید، تأثیر بیشتری در خروجی سیستم فازی دارد.

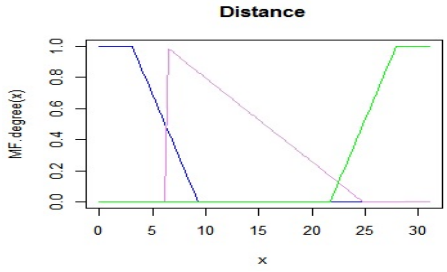
هر کدام از این واژه‌ها به عنوان یک قید متغیر زبانی در نظر گرفته شده که در ساختن توابع عضویت اولیه برای هر عامل حائز اهمیت هستند.

قبل از تولید قواعد، مهم است که برچسب‌های مختلف برای هر متغیر ورودی را تعیین کنیم که این برچسب‌ها در جدول ۱ آمده است. همچنین برچسب‌های خروجی که کیفیت هر مسیر را نشان خواهند داد عبارتند از: خیلی بد[1]، بد[2]، متوسط[3]، خوب[4] و خیلی خوب[5]. بر خلاف متغیرهای ورودی، متغیر خروجی دارای ۵ برچسب است. شکل ۱ نمای کلی سیستم خبره فازی متناظر با سامانه راهبری هر عامل را نمایش می‌دهد.

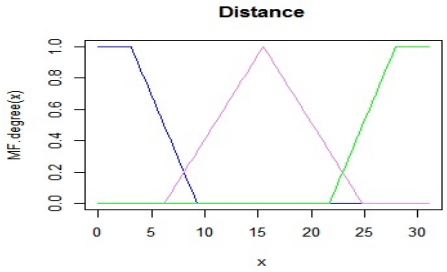
هر کدام از متغیرهای فاصله و تراکم مسیر برای هر کدام از برچسب‌های خود یک تابع عضویت دارند. در تمامی عامل‌ها، تابع عضویت میانی مثلثی و دو تابع عضویت کناری ذوزنقه‌ای هستند. توابع عضویت مثلثی هم ساده هستند و هم ثابت شده که در عمل به حد کافی کارایی دارند [۲۲]. به دلیل این که برای مقادیر واقعی ابتدایی و انتهایی متغیرهای ورودی امکان عضویت کامل در مجموعه فازی وجود داشته باشد، توابع عضویت ابتدایی و انتهایی به صورت ذوزنقه‌ای انتخاب شده‌اند.

هنگامی که عامل در مدل ایجاد می‌شود، توابع عضویت متغیرهای ورودی با توجه به ترجیحات (به طور تصادفی) در نظر گرفته شده، شکل

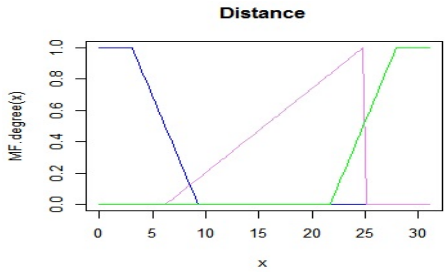
1. Very Bad
2. Bad
3. Average
4. Good
5. Very Good



شکل ۲: توابع عضویت متغیر ورودی فاصله تا مقصد با قید خیلی مهم.



شکل ۳: توابع عضویت متغیر ورودی فاصله تا مقصد با قید مهم.



شکل ۴: توابع عضویت متغیر ورودی فاصله تا مقصد با قید اندکی مهم.

جدول ۲: قواعد فازی سیستم خبره فازی متعلق به هر عامل.

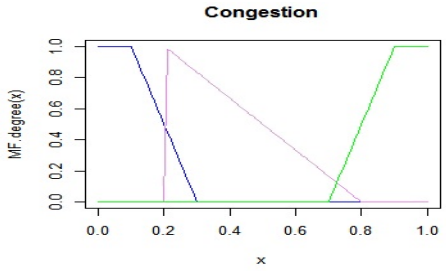
Congestion \ Distance	Short	Medium	Long
Light	Very good	Very good	Good
Normal	Good	Average	Bad
Heavy	Bad	Very bad	Very bad

می‌گیرند. به عبارت دیگر، بسته به این که ترجیح عامل به متغیرهای فاصله و تراکم کدام یک از قیود خیلی مهم، مهم و اندکی مهم باشد، مرکز تابع عضویت میانی مثلثی آن متغیر روی مقدار خاصی از ورودی تنظیم می‌شود.

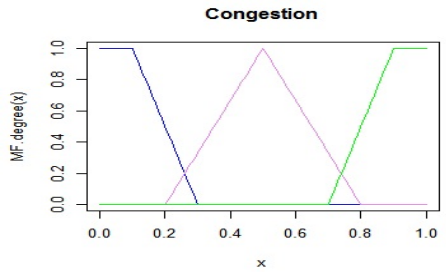
شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب توابع عضویت متغیر فاصله تا مقصد با قیود خیلی مهم، مهم و اندکی مهم را نشان می‌دهند. همان طور که در این شکل‌ها نشان داده شده، مقادیر واقعی این متغیر با توجه به محیط ترافیکی شبیه‌سازی شده از صفر تا ۳۱ خواهد بود.

شکل‌های ۵ تا ۷ نیز به ترتیب توابع عضویت متغیر تراکم مسیر تا مقصد با قیود خیلی مهم، مهم و اندکی مهم را نشان می‌دهند. مقادیر واقعی این متغیر دارای ماهیت تراکمی و بین صفر تا یک است. یعنی مقدار واقعی این متغیر نشان‌دهنده درصد حجم اشغال‌شده از مسیر پیش‌روی هر عامل تا مقصد توسط عامل‌های دیگر است.

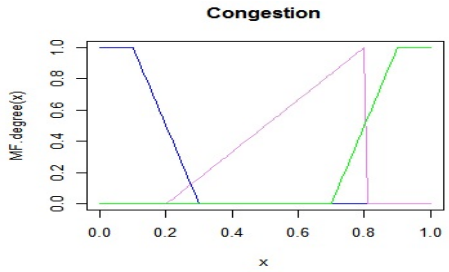
در نهایت شکل ۸ توابع عضویت متغیر خروجی امتیاز هر مسیر را نشان می‌دهد. مقادیر واقعی این متغیر از صفر تا ۱۰۰ است که معرف امتیاز اختصاص‌یافته به هر مسیر با توجه به مقادیر متغیرهای ورودی در سیستم استنتاج فازی است.



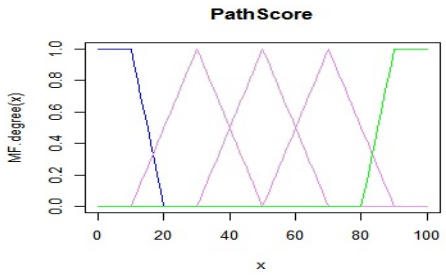
شکل ۵: توابع عضویت متغیر ورودی تراکم تا مقصد با قید خیلی مهم.



شکل ۶: توابع عضویت متغیر ورودی تراکم تا مقصد با قید مهم.



شکل ۷: توابع عضویت متغیر ورودی تراکم تا مقصد با قید اندکی مهم.



شکل ۸: توابع عضویت متغیر خروجی امتیاز مسیر.

جدول ۲ قواعد فازی را با توجه به برچسب‌های متغیرهای ورودی و خروجی نمایش می‌دهد.

پس از بررسی و مقایسه عملکرد و ویژگی انواع مختلف مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده سیستم استنتاج فازی عامل‌ها، $t-\text{norm}$ مینیمم، $s-\text{norm}$ ماکزیمم، موتور استنتاج دینس رشر و غیر فازی‌ساز مرکز ثقل انتخاب شدند.

$t-\text{norm}$ مینیمم بزرگ‌ترین اشتراک فازی و $s-\text{norm}$ ماکزیمم کوچک‌ترین اجتماع فازی است. این دو عمل‌گر نزدیک‌ترین عمل‌گرهای اشتراک و اجتماع به عمل‌گر میانگین بوده و نتایج متعادلی ارائه می‌دهند. همچنین با توجه به این که قواعد موجود در پایگاه قواعد غیر محلی و کلی است، باید از یک موتور استنتاج با استلزام کلی استفاده شود [۲۳]. موتورهای استنتاج زاده، دینس رشر و لوکاشیویکز از استلزام‌های کلی متناظر خود استفاده می‌کنند که رابطه بین این استلزام‌ها به صورت زیر است

$$\mu_{Q_Zade}(x,y) \le \mu_{Q_Dienes-Resher}(x,y) \le \mu_{Q_Lukasiewicz}(x,y) \quad (۱)$$

جدول ۳: ماتریس‌های تولید خروجی برای $\beta=[۰,۰/۳)$.

Congestion		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$	Distance		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$
	$Q_۱$	۰/۲	۰/۳	۰/۵		$Q_۱$	۰/۷	۰/۲	۰/۱
	$Q_۲$	۰/۱	۰/۴	۰/۵		$Q_۲$	۰/۵	۰/۴	۰/۱
	$Q_۳$	۰/۱	۰/۲	۰/۷		$Q_۳$	۰/۵	۰/۳	۰/۲

جدول ۴: ماتریس‌های تولید خروجی برای $\beta=[۰/۳,۰/۷)$.

Congestion		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$	Distance		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$
	$Q_۱$	۰/۸	۰/۱	۰/۱		$Q_۱$	۰/۸	۰/۱	۰/۱
	$Q_۲$	۰/۱	۰/۸	۰/۱		$Q_۲$	۰/۱	۰/۸	۰/۱
	$Q_۳$	۰/۱	۰/۱	۰/۸		$Q_۳$	۰/۱	۰/۱	۰/۸

جدول ۵: ماتریس‌های تولید خروجی برای $\beta=[۰/۷,۱]$.

Congestion		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$	Distance		$\alpha_۱$	$\alpha_۲$	$\alpha_۳$
	$Q_۱$	۰/۷	۰/۲	۰/۱		$Q_۱$	۰/۲	۰/۳	۰/۵
	$Q_۲$	۰/۵	۰/۴	۰/۱		$Q_۲$	۰/۱	۰/۴	۰/۵
	$Q_۳$	۰/۵	۰/۳	۰/۲		$Q_۳$	۰/۱	۰/۲	۰/۷

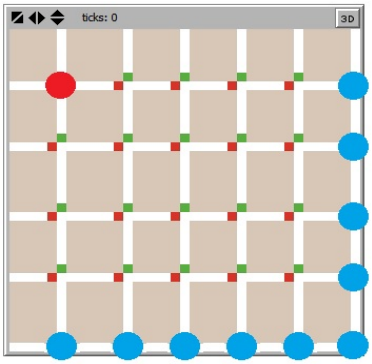
در نتیجه به منظور کسب نتایج متعادل و مورد انتظار، از سیستم استنتاج دینس رشر استفاده شده و در نهایت با توجه به توجیه‌پذیری شهودی غیر فازی‌ساز مرکز ثقل و سادگی توابع عضویت، این غیر فازی‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲ یادگیری توابع عضویت فازی با آتوماتای احتمالی

همان طور که در مقدمه ذکر شد، در این مقاله به منظور توزیع ترافیک تخلیه شهر و استفاده حداکثری از ظرفیت معابر، از سیستم استنتاج فازی و یادگیری تقویتی برای بهینه‌کردن توابع عضویت فازی توسط آتوماتای احتمالی استفاده شده است.

از آنجا که هدف، یادگیری توابع عضویت فازی با توجه به ترجیحات هر عامل به متغیرهای ورودی سیستم فازی است، باید توابع عضویت بخش مقدم سیستم فازی تغییر کنند؛ زیرا این ترجیحات در توابع عضویت بخش مقدم اعمال می‌شوند. در نتیجه استفاده از الگوریتم‌های گرادیان نزولی برای آموزش مورد نظر در این مسأله زمان‌بر بوده و همچنین نتایج مطلوبی ارائه نخواهند کرد. از طرف دیگر با توجه به نوع یادگیری مورد نیاز مسأله یعنی یادگیری برخط، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به دلیل زمان‌بر بودن مناسب نیست. اما در بین الگوریتم‌های یادگیری موجود، یادگیری تقویتی مناسب مسأله است. با توجه به سادگی مسأله طراحی‌شده در این پژوهش، آتوماتای احتمالی از بین روش‌های یادگیری تقویتی امکان پیاده‌سازی ساده و مطابقت با مسأله را دارد. یعنی می‌توان فرایند یادگیری را از طریق آتوماتای احتمالی با تعداد حالات-اعمال محدود پیاده‌سازی نمود. همچنین ماهیت احتمالی انتخاب اعمال در آتوماتای احتمالی، عدم قطعیت حاکم در مسأله تخلیه ترافیک شهری را با دقت بیشتری مدل‌سازی خواهد نمود.

الگوریتم کلی یادگیری به این صورت است که قبل از تصمیم‌گیری هر عامل و انتخاب مسیر بعدی در تقاطع‌ها، ابتدا توابع عضویت متغیرهای ورودی سیستم فازی متناظر با آن عامل از طریق آتوماتای احتمالی ساختار ثابت به روز رسانی می‌شود. به همین منظور، مقدار تراکم محلی اندازه‌گیری شده و به عنوان ورودی آتوماتا در الگوریتم یادگیری در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۹: نمای کلی محیط پیاده‌سازی شده در Netlogo.

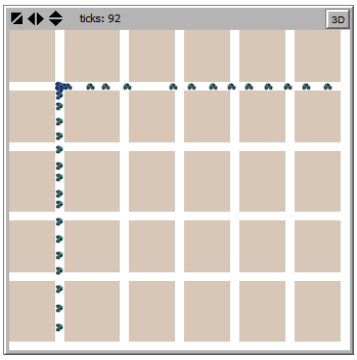
در روش پیشنهادی، خروجی محیط به صورت مدل S بوده و β دارای مقادیر پیوسته بین صفر تا یک است. بازه $[۰,۱]$ برای β به سه قسمت $[۰,۰/۳)$، $[۰/۳,۰/۷)$ و $[۰/۷,۱]$ تقسیم شده و متناظر با این سه قسمت یک جفت ماتریس عملکرد ۳×۳ برای متغیرهای ورودی سیستم خبره فازی (تراکم تا مقصد و فاصله تا مقصد) و به عنوان تابع خروجی آتوماتا در نظر گرفته می‌شود (جداول ۳ تا ۵ به ترتیب ماتریس عملکرد را برای متغیرهای وروی سیستم فازی به ازای بازه‌های $[۰,۰/۳)$، $[۰/۳,۰/۷)$ و $[۰/۷,۱]$ از β نشان می‌دهند). سطرهای هر کدام از ماتریس‌های عملکرد معرف سه حالت داخلی $Q_۱$، $Q_۲$ و $Q_۳$ است. این حالات به ترتیب متناظر با قیود خیلی مهم، مهم و اندکی مهم هستند که معادل ترجیح عامل به هر کدام از متغیرهای ورودی است. ستون‌های هر کدام از ماتریس‌های عملکرد معرف سه عمل $\alpha_۱$، $\alpha_۲$ و $\alpha_۳$ است که هر عمل به ترتیب معادل تغییر توابع عضویت ورودی به توابع عضویت شکل‌های ۲ تا ۴ (در ماتریس عملکرد مربوط به فاصله تا مقصد) و شکل‌های ۵ تا ۷ (در ماتریس عملکرد مربوط به تراکم تا مقصد) است.

روش استفاده از ماتریس‌های تولید خروجی به این صورت است که هرگاه عامل در موقعیت تنظیم توابع عضویت سیستم استنتاج فازی خود قرار گیرد، با توجه به مقداری که برای β از محیط اندازه‌گیری می‌شود، یکی از سه جدول ۳ تا ۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس با توجه به حالت عامل، یکی از سطرهای جدول انتخاب می‌شود. پس از این که با احتمالات جداول ۳ تا ۵ موقعیت مراکز توابع عضویت میانی متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی تغییر یافت، عامل بر اساس توابع عضویت جدید حاصل‌شده، مسیر جدید خود را در تقاطع انتخاب خواهد کرد.

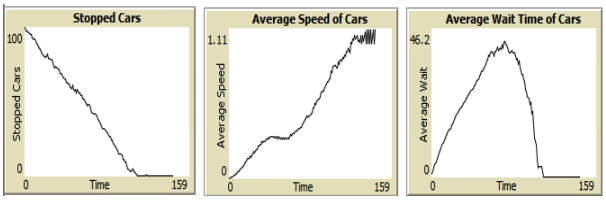
٤- پیاده‌سازی

شبیه‌سازی در محیط RStudio [۲۴] (مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی R [۲۵]) صورت گرفته که در این محیط قابلیت مدل‌سازی مبتنی بر عامل با استفاده از بسته RNetlogo [۲۶] و نرم‌افزار NetLogo [۲۷] و همچنین قابلیت پیاده‌سازی سیستم فازی با استفاده از بسته frbs[1] [۲۸] وجود دارد. به منظور پیاده‌سازی مدل پیشنهادی برای مدیریت ترافیک تخلیه شهر، ابتدا در نرم‌افزار Netlogo یک محیط شهری شامل خیابان‌های موازی و متقاطع شبیه‌سازی و یک مبدأ بحرانی و چندین مقصد امن برای حرکت وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است. شکل ۹ نمای کلی محیط ایجادشده در Netlogo است که مبدأ بحرانی با دایره سمت چپ و بالای شکل و مقاصد امن با دایره‌های ضلع غربی و جنوبی شکل نمایش داده شده‌اند. در هر تقاطع دو چراغ راهنمایی قرار گرفته که هم‌زمان با یکدیگر در بازه‌های

1. Fuzzy Rule Base System



شکل ۱۰: نمای ترافیک حاصل از حرکت حریصانه عامل‌ها (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع‌ها).



شکل ۱۱: بهترین نتایج حاصل از حرکت حریصانه عامل‌ها (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع‌ها).

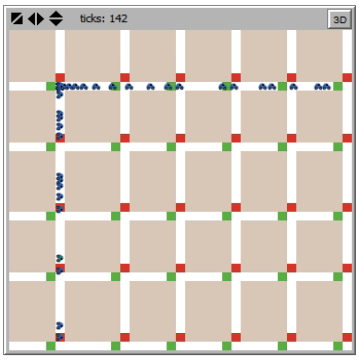
زمانی یکسان تغییر وضعیت می‌دهند. به دلیل تأثیر چراغ‌های راهنمایی در نتیجه کلی سیستم، هر کدام از بخش‌های شبیه‌سازی در دو حالت با چراغ و بدون چراغ راهنمایی صورت گرفته است.

پس از مدل‌سازی محیط شهر، تعداد ۱۰۰ خودرو ایجاد می‌شود و در مبدأ بحرانی با جهت‌های به تصادف انتخاب شده راست یا پایین قرار داده می‌شوند. در صورتی که در مقابل هر خودرو چراغ راهنمای قرمز یا دیگر خودروها وجود نداشته باشند، خودرو با شتاب ۰/۰۹۹ به حداکثر سرعت (که برای همه خودروها یکسان است) دست پیدا می‌کند.

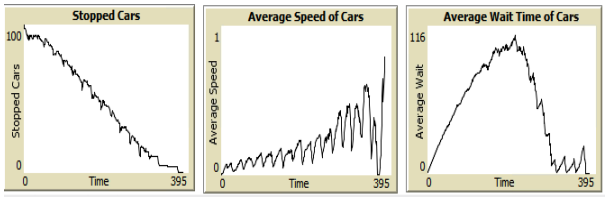
به منظور بررسی موفقیت جنبه‌های مختلف مدل ارائه‌شده در این پژوهش، باید در ابتدا سیستم استنتاج فازی عامل‌ها و سپس آتوماتای احتمالی تنظیم‌کننده آن مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه در بخش اول شبیه‌سازی (تشریح در بخش ۴-۱)، رفتار عامل‌ها بدون سیستم استنتاج فازی و آتوماتای احتمالی و به صورت حریصانه مدل‌سازی و بررسی شده است. در بخش دوم شبیه‌سازی (تشریح در بخش ۴-۲)، مدل‌سازی و بررسی رفتار عامل‌ها تنها بر اساس سیستم استنتاج فازی صورت گرفته و در بخش سوم شبیه‌سازی (تشریح در بخش ۴-۳)، آتوماتای احتمالی نیز به بخش قبلی اضافه شده و تأثیر آن بر عملکرد سیستم فازی عامل‌ها و در نهایت بر عملکرد کل سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از سه بخش شبیه‌سازی (تشریح در بخش ۴-۴) نشان‌دهنده موفقیت بخش‌های مختلف مدل ارائه‌شده در رسیدن به اهداف تعریف‌شده است.

۴-۱ مدل حریصانه عامل‌ها

در مدل حریصانه ابتدا محیط بدون چراغ‌های راهنمایی در نظر گرفته می‌شود. در این مدل خودروها بدون تغییر مسیر به سمت نزدیک‌ترین دو مقصد امن در مسیرهای عمودی و افقی مبدأ بحرانی به صورت حریصانه حرکت می‌کنند. شکل ۱۰ نمای ترافیک حاصل از حرکت حریصانه خودروها به سمت نزدیک‌ترین مقاصد و بدون حضور چراغ‌های راهنمایی را نشان می‌دهد. پس از ده بار اجرای مدل حریصانه بدون حضور چراغ‌های راهنمایی، بهترین نتیجه از نظر زمان تخلیه کلی محیط از



شکل ۱۲: نمای ترافیک حاصل از حرکت حریصانه عامل‌ها (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع‌ها).



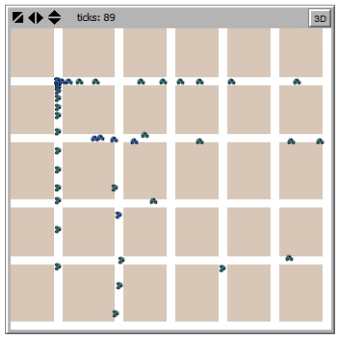
شکل ۱۳: بهترین نتایج حاصل از حرکت حریصانه عامل‌ها (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع‌ها).

خودروها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در این شکل به ترتیب از چپ به راست نمودارهای تعداد وسایل نقلیه متوقف‌شده در طول زمان، میانگین سرعت وسایل نقلیه در طول زمان و میانگین مدت توقف وسایل نقلیه در طول زمان ارائه شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز مربوط به اجرای مدل حریصانه عامل‌ها با حضور چراغ‌های راهنمایی در تقاطع‌ها است. می‌توان با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۳ به تأثیر چراغ‌های راهنمایی بر عملکرد کلی سیستم پی برد.

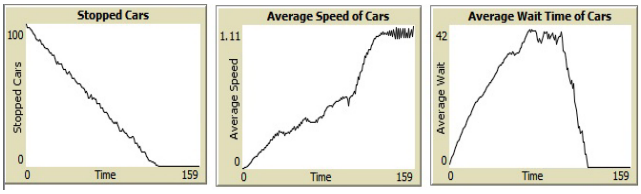
۴-۲ مدل استنتاج فازی عامل‌ها (بدون آتوماتای احتمالی)

سیستم استنتاج فازی عامل‌ها در ترجیحات مختلف با استفاده از بسته frbs در RStudio پیاده‌سازی می‌شود. همچنین در ابتدای اجرا برای هر عامل دو عدد تصادفی به عنوان ترجیح عامل به تراکم و فاصله از ۱ تا ۳ در نظر گرفته شده و هنگام تصمیم‌گیری فازی، بر اساس این دو عدد سیستم استنتاج فازی متناظر آن انتخاب می‌شود. اطلاعات ترافیکی هر عامل پس از اجرای مدل در محیط Netlogo تولید شده و با استفاده از بسته RNetlogo به محیط RStudio منتقل می‌شود. این اطلاعات توسط سیستم استنتاج فازی خاص هر عامل پردازش شده و خروجی به صورت یک امتیاز از ۱ تا ۱۰۰ به دو مسیر پیش‌رو اختصاص داده می‌شود. اطلاعات خروجی سیستم استنتاج فازی دوباره از طریق بسته RNetlogo به محیط Netlogo منتقل شده و مسیر دارای امتیاز بیشتر به عنوان مسیر بعدی عامل انتخاب خواهد شد.

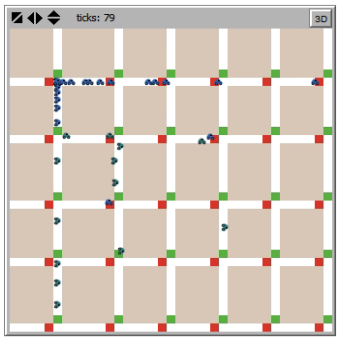
در ابتدا این مدل بدون چراغ راهنمایی در تقاطع اجرا شده و شکل ۱۴ نمای ترافیک حاصل از حرکت عامل‌ها را نشان می‌دهد. پس از ده بار اجرای این مدل، بهترین نتیجه از نظر زمان تخلیه کلی محیط از خودروها در شکل ۱۵ نمایش داده شده که در این شکل به ترتیب از چپ به راست نمودارهای تعداد وسایل نقلیه متوقف‌شده در طول زمان، میانگین سرعت وسایل نقلیه در طول زمان و میانگین مدت توقف وسایل نقلیه در طول زمان ارائه شده است. شکل ۶ نمای ترافیک حاصل از اجرای مدل با چراغ راهنمایی و شکل ۱۷ نیز بهترین نتایج از نظر زمان تخلیه کلی



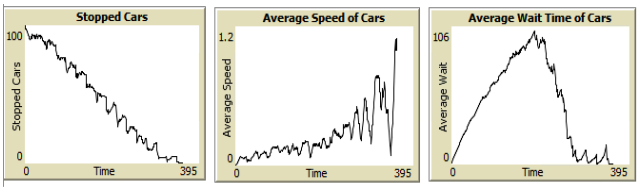
شکل ۱۴: نمای ترافیک حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع).



شکل ۱۵: بهترین نتایج حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع).



شکل ۱۶: نمای ترافیک حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع).

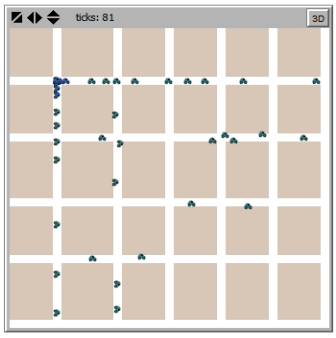


شکل ۱۷: بهترین نتایج حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع).

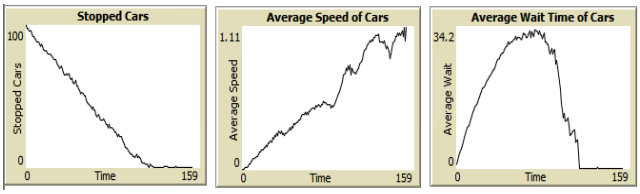
محیط از عامل‌ها پس از ده بار اجرای مدل همراه چراغ راهنمایی است.

۴-۳ مدل استنتاج فازی عامل‌ها با آتوماتای احتمالی

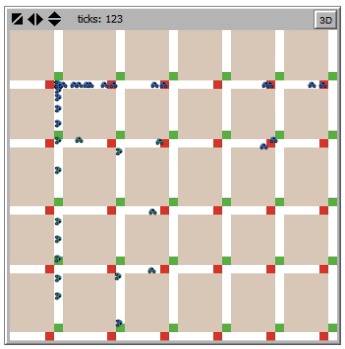
همان طور که بیان شد، به منظور جلوگیری از بروز تراکم و توقف وسایل نقلیه باید توابع عضویت فازی عامل‌ها در طول زمان بهینه شوند. در نتیجه در این پژوهش از یادگیری تقویتی به روش آتوماتای احتمالی استفاده شده است، به این صورت که در ابتدا ترافیک محلی هر عامل در تقاطع به عنوان ورودی آتوماتای احتمالی در محیط Netlogo محاسبه می‌شود. سپس از طریق بسته RNetlogo این اطلاعات به محیط RStudio منتقل شده و با توجه به مقدار ترافیک محلی محاسبه‌شده، یکی از جداول ۳ تا ۵ به عنوان مبنای کار آتوماتای احتمالی انتخاب می‌شود. در نتیجه بسته به این که عامل موجود در تقاطع دارای چه ترجیحاتی نسبت به تراکم و فاصله است، با یک احتمال خاص سیستم استنتاج فازی آن عامل تغییر می‌کند. حاصل این فرایند تصمیم عامل به



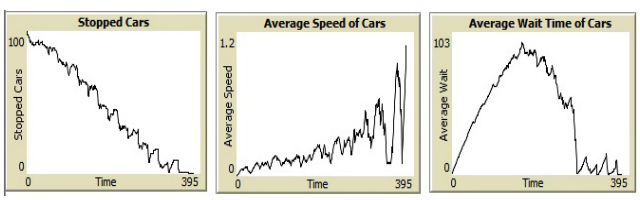
شکل ۱۸: نمای ترافیک حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها با آتوماتای احتمالی (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع).



شکل ۱۹: بهترین نتایج حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها با آتوماتای احتمالی (بدون چراغ راهنمایی در تقاطع).



شکل ۲۰: نمای ترافیک حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها با آتوماتای احتمالی (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع).



شکل ۲۱: بهترین نتایج حاصل از تصمیم‌گیری فازی عامل‌ها با آتوماتای احتمالی (همراه چراغ راهنمایی در تقاطع).

دورشدن بیشتر از فضاهای متراکم است. در نتیجه ترافیک تخلیه نسبت به مدل قبل (بخش ۴-۲) از توزیع بیشتری در محیط شبیه‌سازی برخوردار است.

در ابتدا این مدل بدون چراغ راهنمایی در تقاطع اجرا شده و شکل ۱۸ نمای ترافیک حاصل از حرکت عامل‌ها را نشان می‌دهد. پس از ده بار اجرای این مدل، بهترین نتیجه از نظر زمان تخلیه کلی محیط از خودروها در شکل ۱۹ نمایش داده شده که در این شکل به ترتیب از چپ به راست نمودارهای تعداد وسایل نقلیه متوقف‌شده در طول زمان، میانگین سرعت وسایل نقلیه در طول زمان و میانگین مدت توقف وسایل نقلیه در طول زمان ارائه شده است. شکل ۲۰ نمای ترافیک حاصل از اجرای مدل با چراغ راهنمایی و شکل ۲۱ نیز بهترین نتایج از نظر زمان تخلیه کلی محیط از عامل‌ها پس از ده بار اجرای مدل همراه چراغ راهنمایی است.

جدول ۶: مدل حریصانه ترافیک تخلیه شهر.

زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل حریصانه (بدون چراغ راهنمایی)	زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل حریصانه (همراه چراغ راهنمایی)
۱۴۴	۱۸٫۹۰۳۸	۰٫۵۱۷۳	۳۸٫۸۸	تکرار اول	۳۸۲	۵۱٫۶۸۰۶	۰٫۱۹۹۸	۴۶٫۶۷۲۷	تکرار اول
۱۴۷	۱۷٫۹۵۳۳	۰٫۵۴۴۲	۳۶٫۲۹۲۵	تکرار دوم	۳۸۳	۴۴٫۶۰۸۹	۰٫۲۰۹۹	۴۴٫۴۸۳۰	تکرار دوم
۱۴۸	۱۸٫۶۵۶۶	۰٫۵۳۹۳	۳۶٫۶۴۱۸	تکرار سوم	۳۸۳	۴۸٫۱۲۰۳	۰٫۲۰۴۱	۴۶٫۰۲۰۸	تکرار سوم
۱۵۳	۱۸٫۸۴۳۲	۰٫۵۴۷۹	۳۵٫۸۳۶۶	تکرار چهارم	۳۸۳	۵۰٫۵۳۱۱	۰٫۲۱۰۴	۴۶٫۶۵۰۱	تکرار چهارم
۱۵۳	۲۱٫۳۱۱۹	۰٫۵۱۶۹	۳۷٫۸۶۲۷	تکرار پنجم	۳۸۷	۴۵٫۱۵۰۳	۰٫۲۰۷۲	۴۴٫۷۲۶۱	تکرار پنجم

جدول ۷: مدل استنتاج فازی ترافیک تخلیه شهر.

زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل فازی (بدون چراغ راهنمایی)	زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل فازی (همراه چراغ راهنمایی)
۱۵۹	۲۰٫۱۳۰۲	۰٫۵۴۳۷	۳۶٫۹۶۲۲	تکرار اول	۳۶۰	۴۶٫۱۷۳۰	۰٫۲۴۶۰	۴۶٫۱۸۸۸	تکرار اول
۱۶۱	۱۶٫۸۲۵۵	۰٫۵۶۱۱	۳۴٫۴۹۶۸	تکرار دوم	۳۷۳	۴۸٫۳۷۵۶	۰٫۲۳۰۶	۴۶٫۱۷۴۲	تکرار دوم
۱۶۷	۱۷٫۹۲۰۸	۰٫۵۵۱۳	۳۵٫۶۸۸۶	تکرار سوم	۳۸۰	۴۴٫۶۵۳۴	۰٫۲۳۴۶	۴۴٫۳۷۸۹	تکرار سوم
۱۶۷	۱۹٫۴۶۲۲	۰٫۵۳۲۶	۳۶٫۸۳۲۳	تکرار چهارم	۳۸۰	۴۳٫۷۰۸۸	۰٫۲۴۶۴	۴۲٫۶۰۰۰	تکرار چهارم
۱۶۷	۱۹٫۷۱۸۳	۰٫۵۵۴۱	۳۵٫۰۸۹۸	تکرار پنجم	۳۹۲	۴۴٫۲۳۱۳	۰٫۲۵۷۷	۴۱٫۷۹۰۸	تکرار پنجم

جدول ۸: مدل استنتاج فازی با آتوماتای احتمالی ترافیک تخلیه شهر.

زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل فازی با آتوماتا (بدون چراغ راهنمایی)	زمان کلی تخلیه محیط	میانگین مدت توقف خودروها	میانگین سرعت خودروها	میانگین تعداد خودروهای متوقف	مدل فازی با آتوماتا (همراه چراغ راهنمایی)
۱۵۳	۱۶٫۱۵۷۴	۰٫۵۶۰۲	۳۵٫۲۷۴۵	تکرار اول	۳۸۰	۴۵٫۴۲۸۱	۰٫۲۳۷۶	۴۵٫۲۷۸۹	تکرار اول
۱۵۶	۱۸٫۲۸۹۸	۰٫۵۴۸۶	۳۶٫۹۷۴۳	تکرار دوم	۳۸۶	۴۲٫۷۱۱۱	۰٫۲۳۶۵	۴۳٫۳۶۲۶	تکرار دوم
۱۵۸	۱۵٫۸۹۰۹	۰٫۵۶۶۴	۳۵٫۰۴۴۳	تکرار سوم	۳۹۲	۴۰٫۸۵۲۶	۰٫۲۶۲۰	۴۲٫۳۲۱۴	تکرار سوم
۱۶۰	۱۸٫۸۸۰۷	۰٫۵۴۶۸	۳۶٫۶۳۷۵	تکرار چهارم	۳۹۶	۴۳٫۹۳۸۷	۰٫۲۲۹۵	۴۲٫۷۵۷۵	تکرار چهارم
۱۶۲	۱۷٫۸۴۹۴	۰٫۵۵۵۱	۳۵٫۷۴۶۹	تکرار پنجم	۳۹۹	۴۸٫۹۰۱۲	۰٫۲۲۶۸	۴۲٫۴۷۳۶	تکرار پنجم

٤-٤ مقایسه مدل‌ها

در این بخش به منظور بررسی دقیق‌تر مزایای جنبه‌های مختلف مدل ارائه‌شده، پنج نتیجه بهتر مدل‌های سه‌گانه پیاده‌سازی شده پس از ده بار اجرای مدل در جداول ۶ تا ۸ به مقایسه گذاشته شده است. اطلاعات معنادار استخراج‌شده از جداول ۶ تا ۸ را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

- ترتیب مدل‌ها به لحاظ زمان تخلیه کلی کمتر به صورت زیر است:
  - هنگام عدم وجود چراغ راهنمایی:

    مدل حریصانه < مدل فازی- آتوماتا < مدل فازی
  - هنگام وجود چراغ راهنمایی:

    مدل فازی < مدل حریصانه < مدل فازی- آتوماتا

البته باید توجه داشت که زمان تخلیه کلی متأثر از عوامل دیگری نیز هست که در محیط واقعی وجود دارند اما در این مدل‌سازی برای سادگی اعمال نشدند، مانند تفاوت سرعت خودروهای مختلف یا بروز تصادف و غیره. در نتیجه با مدل‌سازی دقیق‌تر منطبق با واقع قطعاً مدل حریصانه زمان تخلیه کلی بیشتری نسبت به دیگر مدل‌های بهینه و هوشمند خواهد داشت. از طرف دیگر هدف استفاده از مدل‌های فازی و فازی- آتوماتا کاهش تراکم ترافیک و توزیع آن در کل ظرفیت معابر محیط است و نه کاهش زمان تخلیه کلی. در نتیجه این نتایج به معنی عدم موفقیت مدل‌های هوشمند ارائه‌شده نیست.

- ترتیب مدل‌ها به لحاظ تراکم ترافیک کمتر عبارت است از:
  - هنگام عدم وجود چراغ راهنمایی:

    مدل فازی- آتوماتا < مدل فازی < مدل حریصانه
  - هنگام وجود چراغ راهنمایی:

    مدل فازی- آتوماتا < مدل فازی < مدل حریصانه

مشاهده می‌شود همان طور که مورد انتظار بود، مدل فازی- آتوماتا همیشه بهتر از دو مدل دیگر عمل کرده، یعنی هدف که رسیدن به تراکم ترافیک کمتر و توزیع بار ترافیک در کل معابر محیط است، از طریق مدل بهینه و هوشمند فازی- آتوماتا احراز شده است.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی نزدیک واقعیت ترافیک تخلیه شهر و بررسی رویکرد پیشنهادی برای مدیریت آن، یک مدل چندعامله با عامل‌های فازی در محیط RStudio و Netlogo ارائه شد. در رویکرد پیشنهادی هر عامل به عنوان یک سیستم استنتاج فازی مدل می‌شود و از آتوماتای احتمالی برای تنظیم آن و در نتیجه مدیریت رفتار هر عامل در شرایط مختلف ترافیکی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، عمل هر عامل در هر تقاطع با توجه به ترجیحات عامل نسبت به تراکم و فاصله (تنظیم‌شده در ابتدا یا متغیر در طول زمان)، میزان تراکم و فاصله موجود

در مسیر پیش‌رو تا مقصد و همچنین تراکم محلی موقعیت عامل در یک سیستم استنتاج فازی تعیین خواهد شد. نتایج پیاده‌سازی‌های صورت‌گرفته حاکی از موفقیت رویکرد پیشنهادی در مدل‌سازی نزدیک واقعیت و مدیریت ترافیک تخلیه شهر است. البته از رویکردهای پیشنهادی برای مدیریت ترافیک در شرایط عادی نیز می‌توان بهره برد.

از آنجا که در این پژوهش هدف بررسی و اثبات موفقیت رویکردهای کنترلی اتخاذشده برای هر کدام از وسایل نقلیه به عنوان عامل بود، مدلی نسبتاً ساده ارائه شد. در نتیجه یادگیری بخش‌های دیگر سیستم استنتاج فازی عامل‌ها (مانند پایگاه قواعد و بخش تالی) در نظر گرفته نشده است. در این خصوص در کارهای بعدی در راستای این پژوهش باید از روش‌های سطح بالاتر یادگیری مانند یادگیری Q بهره برد. همچنین پیچیدگی‌های بیشتر مرتبط با عامل‌های دیگر موجود در محیط (مانند چراغ‌های راهنمایی هر چهار راه) و یادگیری آنها مورد بررسی قرار نگرفته است که می‌تواند موضوع کارهای بعدی در راستای این پژوهش باشد.

می‌توان در ادامه مدل را به یکی از شهرهای بزرگ مانند تهران توسعه داد. در همین راستا، روش کنترل ترافیک ارائه‌شده در این مقاله ارتقا پیدا کرده و در صورت امکان با دیگر روش‌های کنترل ترافیک ترکیب خواهد شد. علاوه بر این، روش یادگیری تقویتی مبتنی بر آتوماتای احتمالی باید به روش‌های با پیچیدگی بیشتر مانند آتوماتای سلولی و یادگیری Q ارتقا پیدا کند. همچنین برای غلبه بر ابعاد بزرگ مسایل پیش‌رو، باید از سخت‌افزارهای چندهسته‌ای و موازی و روش‌های برنامه‌نویسی خاص آنها بهره برد.

مراجع

[1] V. McKinney, 2007, Sea Level Rise and the Future of the Netherlands, Accessed March 10, 2011, http://www1.american.edu/ted/ice/dutch-sea.html

[2] K. Caruso, 2005, Welcome to Rita Info.com, Accessed March 10, 2011, http://www.ritainfo.com/

[3] S. Kim, S. Shekhar, and M. Min, "Contraflow transportation network reconfiguration for evacuation route planning," *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, vol. 20, no. 8, pp. 1-15, Aug. 2008.

[4] Y. Liu, An Intelligent Optimal Control System for Emergency Evacaution, Ph. D Thesis, University of Maryland, 2007.

[5] M. Madireddy, D. J. Medeiros, and S. Kumara, "An agent based model for evacuation traffic management," in *Proc. of the 2011 Winter Simulation Conf.,* 2011.

[6] J. Varney, 2008, Contraflow Evacuation a Hurricane Triumph, Accessed March 11, 2011, http://www.nola.com/hurricane/arewereready2006/tp/index.ssf?/hurricane/arewereready2006/stories/contraflow.html

[7] E. Bonabeau, "Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems," *PNAS* vol. 99 no. Suppl 3, May 14, 2002.

[8] F. B. Zhan and X. Chen, "Agent-based modeling and evacuation planning," *Geospatial Technologies and Homeland Security*, vol. 94, pp. 189-208, 2008.

[9] T. Cova and J. P. Johnson, "A network flow model for lane-based evacuation routing," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 37, no. 7, pp. 579-604, 2003.

[10] S. Kim, B. George, and S. Shekhar, "Evacuation route planning: scalable heuristics," in *Proc. of the 2007 Int. Sym. on Advances in Geographic Information Systems,* Seattle, WA, US, 2007.

[11] H. W. Hamacher and S. A. Tjandra, "Mathematical modeling of evacuation problems: a state of the art," *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 227-266, 2002.

[12] A. K. Rathi and R. S. Solanki, "Simulation of traffic flow during emergency evacuations: a microcomputer based modeling system," in *Proc. of the 1993 Winter Simulation Conf.*, pp. 1250-1258, 12-15 Dec. 1993.

[13] C. M. Macal and M. J. North, "Agent-based modeling and simulation: desktop ABMS," in *Proc. INFORMS Winter Simulation Conf.*, pp. 95-106, 2007.

[14] B. Zhang, W. Kin, and S. V. Ukkusuri, "Agent-based modeling for household level hurricane evacuation," in *Proc. of the 2009 Winter Simulation Conf.*, pp. 2778-2784, 2009.

[15] A. Shendarkar and K. Vasudevan, "Crowd simulation for emergency response using BDI agent based on virtual reality," in *Proc. of the 2006 Winter Simulation Conf.*, pp. 545-553, 2006.

[16] B. Wolshon, "One-way-out: contraflow freeway operation for hurricane evacuation," *Natural Hazards Review*, vol. 2, no. 3, pp. 105-112, 2001.

[17] X. Chen and F. Zhan, "Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies," *J. of the Operational Research Society*, vol. 59, no. 1, pp. 25-33, Jan. 2008.

[18] X. Chen and F. B. Zhan, "Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies," *Presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. 2004.

[19] H. Tuydes, *Network Traffic Management under Disaster Conditions*, Ph. D Thesis, Northwestern University, 2005.

[20] H. Tuydes and A. Ziliaskopoulos, "Tabu-based heuristic approach for optimization of network evacuation contraflow," *Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board*, vol. 1964, no. 1, pp. 157-168, 2006.

[21] S. Kim and S. Shekhar, "Contraflow network reconfiguration for evacuation planning: a summary of results," in *Proc. 13th ACM Symp. Advances in Geographic Information Systems*, pp. 250-259, Nov. 2005.

[22] G. K. H. Pang, K. Takahashi, T. Yokota, and H. Takenaga, "Adaptive route selection for dynamic route guidance system based on fuzzy-neural approaches," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 2028-2041, Nov. 1999.

[۲۳] م. تشنه‌لب، نیما صفارپور و داریوش افیونی، *سیستم‌های فازی و کنترل فازی*، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صص. ۷۹–۸۰، ۱۳۸۹.

[24] http://www.rstudio.com/, Accessed Apr. 2013,

[25] http://www.r-project.org/, Accessed Apr. 2013,

[26] http://rnetlogo.r-forge.r-project.org/, Accessed Apr. 2013,

[27] U. Wilensky, 1999, *NetLogo (and NetLogo User Manual)*, Center for Connected Learning and Computer Based Modeling, Northwestern University, http://ccl.northwestern.edu/netlogo/, Accessed Apr. 2013,

[28] L. S. Riza, C. Bergmeir, F. H. Triguero, and J. M. Benitez, frbs: Fuzzy rule-based systems, a package for R Language, http://cran.r-project.org/web/packages/frbs/index.html, Accessed Apr. 2013.

امیررضا کرباسچیان در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر گرایش سخت افزار خود را از دانشگاه شاهد و در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی خود را از دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۲ نامبرده به عنوان محقق در مرکز تحقیقات مخابرات ایران به کار مشغول بود و پس از آن از سال ۱۳۹۳ به آزمایشگاه مخابرات امن دانشگاه تهران وارد گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند علوم شناختی و محاسبات نرم، هوش ماشین، سیستم های پیچیده و چندعامله و مدیریت ترافیک در شبکه های کامپیوتری و شهری می‌باشد.

سعید ستایشی در سال ۱۳۵۸ مدرک کارشناسی خود را در رشته فیزیک الکترونیک از دانشگاه رازی و در سال ۱۳۶۱ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته الکترونیک از دانشگاه دولتی گجرات هند دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۶۱ الی ۱۳۶۷ به عنوان معاون ارتباطات راه دور شرکت مخابرات ایران و نماینده عملیاتی ایران در سازمان ماهواره‌ای اینتلسات به کار مشغول بود و سپس به عنوان مشاور وزیر علوم، تحقیقات و فناوری به این وزارتخانه وارد گردید. وی پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوا اسکوتیا درکشور کانادا وارد و در سال ۱۳۷۳ موفق به اخذ درجه دکترای خود از دانشگاه مذکور گردید. دکتر ستایشی از سال ۱۳۷۴ در دانشکده مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر در تهران مشغول به فعالیت بوده و اینک نیز دانشیار این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع و شامل موضوعاتی چون علوم شناختی و محاسبات نرم، هوش ماشین، سیستم‌های پیچیده و کیاس، و سیستم‌های تصویرگر پزشکی می‌باشد.

آرش شریفی در سال ۱۳۸۳ مدرک کارشناسی مهندسی کامپیوتر گرایش سخت افزار خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و مدرک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی خود را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۸۷ در

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند یادگیری ماشین، محاسبات نرم و پردازش تصویر می‌باشد.