

توسعه یک مدل شبیه‌ساز عامل‌مبنا به منظور بهبود جریان ترافیک شهری

مرتضی ترابی^۱، فرهاد حسینعلی^{۲*}، حسین غیاثوند ننجی^۳

^۱ کارشناس ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه

تربیت دبیر شهید رجایی
m.torabi12@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

f.hosseinali@sru.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل -

دانشگاه اصفهان
hossein_ghiasvandnanji@yahoo.com

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۹، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۴۰۰)

چکیده

جمعیت شهرها روز به روز افزایش می‌یابد؛ اما زیرساخت‌های حمل و نقل شهری متناسب با روند افزایش توسعه نمی‌یابد. این امر باعث بروز ازدحام شدید خیابان‌ها شده است. کاربردی‌ترین رویکرد ممکن برای حل این مشکل استفاده کارا از این زیرساخت‌ها است و کنترل درست ترافیک نقش مهمی در این کارایی دارد. هدف این تحقیق توسعه یک سیستم شبیه‌ساز عامل‌مبنا برای کنترل ترافیک شهری است. در این پژوهش، از مدل میکروسکوپی ترافیک در بستری شبیه‌سازی شده از انواع خیابان‌های متقاطع دارای چراغ راهنمایی، جهت بهینه کردن جریان ترافیک استفاده شده است. در این روش با تعریف پارامترهای اصلی ترافیک به عنوان مجموعه‌ای از عامل‌های هوشمند در مقیاس میکرو، انتظار می‌رود بهترین تنظیمات چراغ راهنمایی برای بهبود مسأله ترافیک به دست آید. عامل‌های مذکور شامل سه دسته (خودروها، مرکز کنترل ترافیک و چراغ‌های راهنمایی) با عملکردهای متفاوت هستند. سناریوهای تعریف شده علاوه بر اینکه بهینه‌سازی زمانبندی چراغ راهنمایی در تقاطع‌ها را مد نظر دارند، بهینه‌سازی کل جریان ترافیک را نیز دنبال می‌کنند. سناریوها با تغییر نوع عملکرد چراغ راهنمایی و نوع مسیریابی خودروها پیاده‌سازی شده‌اند. برای چراغ راهنمایی سه حالت معمول، شمارشی و بهینه (هوشمند) در نظر گرفته شده است و همچنین برای مسیریابی خودروها از دو حالت کوتاهترین مسیر و حالت بهینه با استفاده از اطلاعات ترافیک مسیر استفاده گردید. با ترکیب این حالت‌ها مجموعاً شش سناریو حاصل شد. نتایج حاصل از مقایسه زمان توقف خودروها و سرعت میانگین خودروها، بهینه شدن جریان ترافیک را در سناریوی ششم برای حالتی که هم چراغ راهنمایی هوشمند است و هم از مسیریابی بهینه با استفاده از اطلاعات ترافیکی استفاده می‌شود، نشان داد. در این سناریو، متوسط زمان توقف هر خودروها ۳/۱۲ ثانیه بر کیلومتر کاهش و سرعت متوسط آن ۱/۸۳ کیلومتر بر ساعت افزایش را نسبت به مقادیر میانگین هر شش سناریو به ثبت رساند. برای اعتبارسنجی این مدل از داده‌های کنترل شده استفاده شد که دقت نسبی ۸۳٪ را برای پارامتر زمان توقف و ۹۴٪ را برای میانگین سرعت نسبت به داده‌های کنترل شده به دست آورد. این نتایج حاکی از کارایی و قابلیت اطمینان مدل عامل‌مبنای توسعه داده شده برای روانسازی جریان ترافیک در شهر است.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی عامل‌مبنا، مسیریابی هوشمند، سیستم‌های کنترل ترافیک، عامل چراغ راهنمایی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، مسأله ترافیک از مهم ترین دغدغه های شهروندان در کلان شهرها بوده و حل آن از مهم ترین چالش های برنامه ریزان شهری شده است [۱]. امروزه با بهبود استفاده از زیرساخت ها می توان کیفیت جریان ترافیک را تا حدی بهبود بخشید. یکی از وظایف برنامه ریزی شهری، بهبود نحوه استفاده از راه های شهری است [۲]. این برنامه ریزی دو جنبه دارد، یکی برنامه ریزی راهبردی برای راه ها (مثل یک طرفه کردن برخی از خیابان ها یا عریض کردن آن ها) و دیگری کنترل ترافیک موجود با توجه به شرایط ترافیکی شبکه راه ها [۳]. به نظر می رسد که یکی از دستاوردهای بشری در عصر تکنولوژی و ارتباطات، سیستم حمل و نقل (ترافیک) است. چالش های اساسی که حمل و نقل جاده ای با آن ها مواجه است عبارتند از افزایش ازدحام ترافیکی، تصادفات، تأخیرهای حمل و نقل و افزایش وسایل نقلیه [۴]. سازمان حمل و نقل تگزاس آمریکا طبق گزارش توسعه شهری سال ۲۰۰۹ میلادی دانشگاه A&M تگزاس، داده های مختلف ترافیکی را از سال ۱۹۸۲ تا سال ۲۰۰۷ میلادی برای ۴۳۹ ناحیه شهری در آمریکا در اختیار کاربران قرار داده است. بر طبق این گزارش، هزینه های ازدحام ترافیکی (هزینه، وقت تلف شده و سوخت) در ۴۳۹ ناحیه شهری از ۱۶/۷ میلیارد دلار در سال ۱۹۸۲ میلادی به ۸۷/۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۷ میلادی رسیده است [۵]. جهت روان ساختن ترافیک می توان آن را به صورت نرم افزاری شبیه سازی نمود و روش های پیشنهادی را آزموده، نتایج را در واقعیت پیاده نمود. به منظور دستیابی و توسعه مدلی برای هدایت خودروها به مقصدشان تحت وضعیت پویای ترافیکی و کاهش ترافیک شهری به خصوص در تقاطع ها با عامل های^۱ هوشمند [۶]، لازم است ورودی (خودرو) خیابان قبل از رسیدن به تقاطع از طریق هوشمندسازی مسیریابی با استفاده از داده های برخط کاهش یابد [۷] و علاوه بر آن، چراغ های راهنمایی با استفاده از اطلاعات مرکز کنترل ترافیک هوشمند شود [۸] تا زمان توقف خودروها بهینه شده و جریان ترافیک روان شود [۹]. در ادامه برخی از تحقیقات مرتبط مختصراً مرور می شوند.

۱-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

روان سازی ترافیک همواره از راه های متعددی دنبال شده است. در این بین یکی از مهم ترین رویکردها که می توان آن را علمی ترین آن ها نیز دانست، رویکرد مدلسازی شبیه سازی است. در مدلسازی ترافیک، عناصر زمینه ای و ثابت مانند خیابان ها در کنار عناصر متحرک یا چند حالتی مانند خودروها و چراغ های راهنمایی و رانندگی ایفای نقش می کنند. وجود خیابان ها سبب دخیل شدن نقشه در مدلسازی ترافیک و به نوبه خود موجب استفاده از GIS^۲ در مدلسازی ترافیک در سطوح مختلف شده است. از طرفی مدلسازی عامل مبنا^۳ نیز به دلیل خصوصیات آن از روش های کارا در مدلسازی ترافیک بوده است؛ چراکه بسیاری از عناصر ترافیکی را می توان به عنوان عامل در این نوع مدلسازی به خدمت گرفت و ماحصل برهم کنش آن ها را رصد نمود. در هر صورت معمولاً دو عنصر در ترافیک شهری به عنوان عوامل اصلی مورد توجه قرار گرفته اند که عبارتند از خودروها و چراغ های راهنمایی. خودروها به عنوان عوامل اصلی ترافیک و چراغ های راهنمایی به عنوان یکی از مهمترین ابزارهای کنترل ترافیک مطرح هستند. بر همین اساس تحقیقات انجام شده در مدلسازی ترافیک شهری تمرکز قابل توجهی بر چراغ راهنمایی داشته اند. برای نمونه الجافره^۴ و همکاران (۲۰۲۰) به منظور به حداقل رساندن زمان انتظار راننده در تقاطع ها و جلوگیری از ایجاد ترافیک، یک مدل کنترل کننده چراغ راهنمایی تطبیقی عامل مبنا^۵ برای یک شبکه موقت خودرویی پویا در یک تقاطع چهار طرفه ایجاد نمودند که در آن از چهار پارامتر اصلی استفاده شده است: زمان فاز سبز، زمان ورود، زمان سرویس و میانگین زمان انتظار^۶. سپس عملکرد کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی با کنترل کننده زمان ثابت از نظر میانگین زمان انتظار مقایسه و مشخص شد که کنترل کننده پیشنهادی عملکرد بهتری دارد [۱۰]. ماتیو^۷ و همکاران (۲۰۲۰) با کمک یک شبیه سازی عامل مبنا بر اساس دو نوع محیط و پنج استراتژی مختلف، اثربخشی استراتژی های مختلف

^۲ Geospatial Information Systems^۳ AgentBased Modelig (ABM)^۴ Aljaafreh^۵ Agent-based adaptive traffic light^۶ Average Wait Time (AWT)^۷ Mathieu^۱ Intelligent agents

مورد پژوهش بوده است. یوسف سعید^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۱) یک سیستم کنترل خودکار چراغ راهنمایی عامل مبنا با استفاده از حسگرهای بی سیم را با به حداقل رساندن زمان انتظار خودرو مخصوصاً وسایل نقلیه اضطراری برای غلبه بر مشکلاتی مانند ازدحام، تصادفات، سرعت و بی نظمی ترافیک ارائه نمودند [۱۵]. البته باید توجه داشت که ارتباط با خودروها از طریق حسگرها یا فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا از موضوعات جدیدی است که هنوز کمی با عمومیت یافتن فاصله دارد ولی مسیریابی بهینه برای خودروها توسط برنامه‌های کاربردی تلفن همراه کاملاً رایج و قابل پیاده‌سازی است. بازان^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مدل‌سازی میکروسکوپی عامل مبنا و شبیه‌سازی، اثرات یکپارچه‌سازی تصمیم‌گیری سازگار در مورد انتخاب مسیر (توسط رانندگان) و اقدامات کنترلی (توسط چراغ راهنمایی) را با هدف بهینه‌سازی کنترل چراغ راهنمایی با پشتیبانی ناوبری برای رانندگان، آزمایش نمودند و به‌منظور مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی، از یک روش بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک استفاده کردند [۱۶].

با توجه به مطالب عنوان شده، هدف اصلی این پژوهش توسعه مدلی عامل مبنا به‌منظور هوشمندسازی چراغ‌های راهنمایی با اعمال سناریوهایی مختلف برگرفته از مدل میکروسکوپی ترافیک در تقاطع‌های شبکه است که بتواند حجم ترافیک و زمان معطلی خودروها در تقاطع‌ها را کاهش دهد. در این راستا هم اعمال و عدم اعمال مسیریابی بهینه خودروها و هم وجود وسایل نقلیه سنگین در نظر گرفته شده است که در مجموع شرایطی نسبتاً کامل و مدلی نوآورانه را رقم خواهند زد.

۲- ترافیک و مدل عامل مبنا

ترافیک، مجموعه پویایی از عوامل مختلف مثل انسان، خودرو، راه و وضعیت هوا است [۱۷]. در محیط‌های پویا هیچ جزئی از محیط نمی‌تواند باقی بماند مگر آنکه در برابر تغییرات محیط انعطاف داشته باشد یا آنکه بتواند در مقابل آن مقاومت کند [۱۸، ۱۹]. عامل را بنا بر تعریف مائس^{۱۲} می‌توان سیستمی دانست که اهدافی را در یک محیط پویا

مدیریتی را برای چراغ‌های راهنمایی با استفاده از شبیه‌ساز SUMO^۱ و با کمک نقشه‌های انتزاعی جاده و نقشه‌های واقعی شهرهای نیس^۲، منهتن^۳ و مادرید^۴ اندازه‌گیری کردند [۱۱]. ترابی و همکاران (۲۰۲۰) یک سیستم زمانبندی چراغ راهنمایی ترافیک (TST^۵) عامل‌مبنای توزیع‌شده شبکه‌ای را برای شرایط با تغییرات زیاد ترافیکی ارائه دادند که توسط مهندسين راهنمایی و رانندگی و همچنین از طریق شبیه‌سازی گسترده شبکه ترافیکی در ۱۲۸ تقاطع شهر ریچاردسون، تأیید شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سیستم ترافیک متداول مورد استفاده در شهر دارد [۱۲]. در اثر الکسزینکو^۶ و دوبروویکی^۷ (۲۰۲۰) یک سیستم مدیریت تقاطع هوشمند معرفی شده است که مبتنی بر برقراری ارتباط با کنترل‌کننده‌های چراغ راهنمایی به عنوان یک سیستم‌عامل مبنای سلسله‌مراتبی سازمان یافته است. این سیستم با استفاده از بسته شبیه‌ساز ترافیکی منبع-باز SUMO اجرا شده است [۱۳]. نوع وسایل نقلیه نیز از عواملی است که ترافیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خودروهای سواری به عنوان وسایل نقلیه سریع‌تر و خودروهای سنگین و اتوبوس‌ها به عنوان خودروهای کندی به شمار می‌روند که می‌توانند ترافیک را مختل سازند. به همین دلیل برخی تحقیقات به نقش خودروهای سنگین در ترافیک توجه نموده‌اند. برای مثال ژائو^۸ و یوانو^۹ (۲۰۱۹) در پژوهشی، اولویت دادن به کامیون‌ها را در تقاطع‌هایی که ترافیک آن‌ها توسط چراغ کنترل می‌شود (به دلیل از بین بردن تأخیرهای اضافی مربوط به کامیون‌ها)، برای همه وسایل نقلیه مفید دانستند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهبودهای مداوم در کاهش تأخیرهای ترافیکی کامیون‌ها (۵٪ به ۱۰٪) از طریق اولویت دادن به آن‌ها در تقاطع‌ها، در زمان سفر و تعداد توقف وسایل نقلیه مسافری در تقاطع‌ها مؤثر بوده و آن‌ها را کاهش داده است [۱۴]. مسیریابی بهینه و ارتباط با خودروها از دیگر نکاتی است که در هدایت بهتر ترافیک

^۱ Simulation of Urban MObility (SUMO)

^۲ Nice

^۳ Manhattan

^۴ Madrid

^۵ Traffic Signal Timing

^۶ Alekszejenko

^۷ Dobrowiecki

^۸ Zhao

^۹ Ioannou

^{۱۰} Yousaf Saeed

^{۱۱} Bazzan

^{۱۲} Maes

برآورده می‌سازد. عامل در یک محیط قرار دارد و قادر است محیط را حس نماید و در آن به فعالیت بپردازد [۲۰]. مدل عامل‌مبنا مدلی است که شامل یک محیط و یک یا چند عامل است که امکان تعامل، ارتباط و تصمیم‌گیری برای عامل‌ها فراهم است [۲۱]. فناوری عامل‌ها قابلیت همکاری و تعامل بین اجزای سیستم‌های توزیع‌یافته را بهبود می‌بخشد [۲۲-۲۴]. به دلیل چنین قابلیت‌هایی است که مدلسازی عامل‌مبنا امروزه کاربردهای زیادی در امور مختلف از جمله در تحلیل‌های مکانی یافته است [۲۳-۲۵]. سیستم‌های عامل‌مبنای توزیع‌یافته^۷ می‌توانند اطلاعات سیستم‌ها و ایستگاه‌های ردیابی چندگانه و متعدد را ترکیب کنند، جریان ترافیکی را ارزیابی کنند و به تغییرات جریان ترافیکی واکنش نشان دهند. در نهایت این سیستم‌ها می‌توانند پاسخ‌های عملی به تغییرات جریان ترافیکی را به صورت لحظه‌ای ارزیابی کنند. جمعیت و ترکیب اطلاعات و داده حاصل از سیستم‌ها و ایستگاه‌های ردیابی چندگانه می‌تواند به اپراتورها کمک کند تا دید وسیع‌تری از محیط پیدا کنند [۲۶، ۲۷].

۱-۲- تعریف پارامترهای وضعیت و کنترل ترافیک

پارامترهای اصلی وضعیت و کنترل ترافیک در متون علمی به شکل زیر تعریف شده‌اند [۲۸]:

- نرخ جریان^۲: تعداد خودروی عبوری در واحد زمان.
- سرعت جریان: میزان مسافت پیموده شده توسط جریان ترافیک در واحد زمان.
- اشغال^۳: درصد زمانی که یک نقطه از راه، توسط خودرو اشغال می‌شود.
- چگالی^۴: تعداد خودرو موجود در واحد مسافت در واحد زمان.
- زمان پیشروی بین خودروها^۵: فاصله زمانی بین خودرو و خودروی پیش روی آن.
- فاصله پیشروی خودروها^۶: فاصله مکانی بین خودرو و خودروی پیش رو.

- فاز: حالتی که چراغ راهنمایی برای یک خیابان داشته باشد.

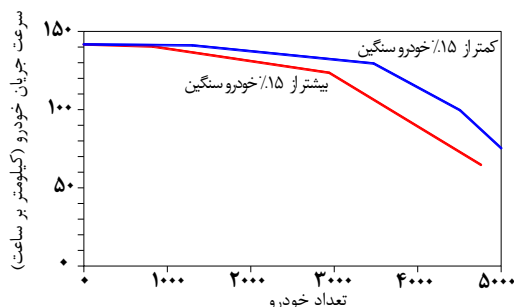
- چرخه^۷: مجموع زمان تمام فازها

- قطاع^۸: زمان سبز یا قرمز بودن چراغ که به ترتیب آن را قطاع سبز و قطاع قرمز گویند.

- آفست^۹: فاصله زمانی بین دو تقاطع

۲-۲- ارتباط بین پارامترها

با استفاده از قواعد فیزیکی و ریاضی می‌توان روابط متنوعی بین پارامترهای فوق برقرار کرد؛ اما در دنیای واقعی، رابطه ایده‌آل بین این پارامترها برقرار نیست. متون ترافیکی بر اهمیت مکان در طبیعت داده تأکید دارند. رفتار سرعت-جریان نسبت به هم در مکان‌های مختلف از راه ممکن است متفاوت باشد [۲۹]. شکل ۱ وابستگی روابط بین جریان و تعداد خودروها را با دو نسبت از تعداد خودروهای سنگین نشان می‌دهد و مشخص می‌سازد که این دو عامل چه اثری بر سرعت جریان ترافیک دارند [۲۹، ۳۰].



شکل ۱- وابستگی سرعت جریان به نوع خودروها [۲۹]

۳-۲- کنترل ترافیک

چراغ‌های راهنمایی غیر چشمک‌زن در تقاطع‌هایی نصب می‌شوند که حجم زیاد ترافیک جلوی استفاده کارا و امن از تقاطع را بگیرد. از منظر چراغ‌های راهنمایی، دو شیوه مجزا و مرتبط برای کنترل جریان ترافیک وجود دارد [۳۱]. چراغ‌های راهنمایی مجزا به دو صورت عملیات پیش‌زمانبندی‌شده و عملیات واکنشی می‌توانند عمل کنند [۳۲]. در عملیات پیش‌زمانبندی‌شده (که به دلیل رواج در ایران می‌توانیم آن را حالت معمول بنامیم)، چراغ‌های

^۷ Distributed agent-based systems

^۲ Flow rate

^۳ Occupancy

^۴ Density

^۵ Ahead time

^۶ Ahead distance

^۷ Cycle

^۸ Split

^۹ Offset

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، سه روش مختلف برای فازبندی چراغ راهنمایی و دو رویکرد مسیریابی برای خودروها در نظر گرفته می‌شود و بدین ترتیب در مجموع شش حالت در قالب شش سناریو اجرا و آزموده می‌شود. محیط کار یک محیط شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار NetLogo است و پس از پیاده‌سازی، جهت اعتبارسنجی کار اقدام می‌شود. مدل عامل‌مبنای توسعه داده شده در این پژوهش دارای سه نوع عامل است: خودروها، چراغ‌های راهنمایی و مرکز کنترل. این سه نوع در ادامه معرفی می‌گردند.

۳-۱- مرکز کنترل ترافیک

عامل مرکز کنترل ترافیک اطلاعات لحظه‌ای خودروها و نیز حالت چراغ‌های راهنمایی را دریافت و به اطلاعات ترافیکی ترجمه می‌کند و در اختیار همه خودروها قرار می‌دهد. در حقیقت با دریافت تعداد خودروهای هر خیابان زمان سفر هر یال محاسبه می‌شود و در اختیار خودروهای دیگر قرار می‌گیرد تا با توجه آن مسیریابی کنند.

۳-۲- چراغ راهنمایی

چراغ‌های راهنمایی از طریق تنظیم زمان فاز رنگ سبز و فاز رنگ قرمز ترافیک را در تقاطع‌ها کنترل می‌کنند. سه حالت برای کنترل چراغ راهنمایی در نظر گرفته شده است:

- حالت اول همان حالت سنتی کنترل چراغ‌های راهنمایی در شهرها است که زمان‌بندی چراغ به‌صورت ثابت است و بدون توجه به حجم ترافیک یا شب و روز بودن زمان قرمز یا سبز بودن برای مسیرهای عبوری رنگ چراغ عوض می‌شود. این حالت در این پژوهش، حالت معمول نامیده می‌شود.
- حالت دوم در مدل، حالت شمارشی نام نهاده شده است. در این حالت چراغ قرمز می‌شود و تعداد خودروهای پشت چراغ در حال اضافه شدن هستند. این تعداد شمارش شده و پس از رسیدن به یک مقدار معین که «صف قطع»^۱ نام دارد، در حقیقت یک حد آستانه است، چراغ سبز شده و اجازه عبور به خودروها

سبز، زرد و قرمز در بازه‌های از پیش تعیین شده‌ای تقسیم می‌شوند. در این نوع عملیات، الگوی ترافیک را قابل پیش‌بینی فرض می‌کنند. چراغ‌های راهنمایی واکنشی، از کنترلگرها و حسگرها تشکیل شده‌اند. در این نوع عملیات، الگوریتم کنترل روی خاتمه زمان سبز متمرکز شده است [۳۵-۳۳] و به چهار طریق ممکن است سبز قطع شود [۳۶]:

- ۱- زمان سبز بیشینه به سر آید. زمانی این اتفاق می‌افتد که زمان سبز بیشینه‌ای که اپراتور برای چراغ راهنمایی تعریف کرده است به سر آید.
- ۲- جریان ترافیک دچار وقفه شود، زمانی که تفاوت در وضعیت ترافیک خیابان‌ها بیشتر از حد آستانه تعریف شده باشد.

- ۳- سیستم مرکزی کنترل چراغ خاتمه سبز را خواستار شود. زمانی که چراغ راهنمایی بخشی از یک سیستم هماهنگ باشد، سیستم می‌تواند آن را تغییر دهد.
- ۴- چراغ راهنمایی انقطاع پذیر باشد. به عبارت دیگر چراغ راهنمایی راه را برای خودرویی که دارای اولویت می‌باشد و به آن می‌رسد، باز می‌کند.

در حالت چراغ‌های راهنمایی مرتبط، چراغ‌های راهنمایی علاوه بر کنترل بر اساس داده‌های محل خود، کنش‌های خود را باید با دیگر تقاطع‌ها به‌منظور دست یافتن به یک سیاست کنترلی جامع هماهنگ کنند که برای توسعه این سیستم‌ها دو رویکرد متمرکز و توزیع‌شده دارد. در سیستم متمرکز کامپیوتر مرکزی با توجه به داده‌های دریافتی از حسگرهای شبکه، وضعیت ترافیک شبکه را بررسی کرده، تصمیمات کنترلی مناسب را اتخاذ و برای اجرا به کنترلگرهای تقاطع‌ها دیکته می‌کند. از ویژگی‌های این روش می‌توان به وابستگی زیاد به خطوط ارتباطی، مقرون به صرفه نبودن به علت نیاز به شبکه‌بندی به منظور ارتباط با کامپیوتر مرکزی و ارائه تصویر جامع از ترافیک و بهینه‌سازی گسترده شبکه ترافیک اشاره کرد [۳۶-۳۸]. در سیستم توزیع شده، کنترلگر تقاطع وظیفه اتخاذ تصمیم برای کنترل تقاطع را دارد. البته می‌تواند با سایر کنترلگرها نیز ارتباط داشته باشد و از ویژگی‌های آن می‌توان به متکی بودن بر کنترلگری محلی، توسعه‌پذیری بهتر نسبت به سیستم‌های متمرکز و مقرون به صرفه بودن به علت شبکه‌بندی کمتر اشاره کرد [۳۹-۴۱].

^۱ Queue-cut

داده می شود. این حالت نیمه هوشمند برای کنترل چراغ راهنمایی است.

- حالت سوم برای هوشمند کردن کنترل چراغ راهنمایی و جریان ترافیک پیشنهاد و توسعه داده شده است. این حالت در مدل، حالت بهینه نامیده می شود. روش کار در این حالت به این صورت است که چراغ راهنمایی تعداد خودروهای هر دو سمت چراغ را زیر نظر گرفته و می شمارد. سپس با یک نسبت بین ماشین های دو سمت عبوری تقاطع زمان چراغ تنظیم می شود یا به عبارتی هر طرف که تعداد ماشین بیشتری در صف باشند چراغ راهنمایی زمان بیشتری برای سبز بودن آن اختصاص می دهد.

۳-۳- خودرو

عامل های خودرو دارای رفتار متقابلی نسبت به یکدیگر هستند. خودروها در هر لحظه با اعلام مختصات خود و حضور در هر خیابان، مکان لحظه ای خود را اعلام می کنند و دیگر خودروها به کمک مرکز کنترل ترافیک از حضور تعداد خودروها در هر خیابان آگاه می شوند. هر خودرو با ورود به هر خیابان در مواجهه با دیگر خودروها سرعت خود را کاهش می دهد که این باعث ازدحام و شلوغی در هر یال می شود. پرواضح است که اگر خودرویی وارد خیابانی بشود که در آن خودرویی وجود ندارد، با حداکثر سرعت (تعریف شده برای خیابان)، به حرکت ادامه می دهد. خودروها پس از رسیدن به عامل چراغ راهنمایی حالت آن را دریافت کرده، با توجه به سبز، زرد یا قرمز بودن تصمیم می گیرند. در صورت قرمز بودن چراغ خودروهای پشت سر آن نیز سرعت خود را از دو واحد نرم افزاری، عقب تر از چراغ کاهش داده و پشت چراغ می ایستند.

در مدل این پژوهش، عامل های خودرو خود به سه دسته (خودروهای سبک، سنگین و اتوبوس ها) تقسیم می شوند. همچنین یک مفهوم ابتکاری به نام طول مجازی برای هر خیابان در نظر گرفته شده است. تعبیر طول مجازی این است که هنگام حرکت در خیابان خلوت، یک خودرو با سرعت مشخص V طول خیابان L را در زمان t می پیماید؛ حال اگر خیابان شلوغ شود و تعدادی خودرو در آن وجود داشته باشد، سرعت خودرو کاهش پیدا می کند و طول L را با سرعتی کمتر و در زمان t' می پیماید. اگر

فرض شود که خیابان خلوت است و خودرو با همان سرعت V ، اما در زمان t' حرکت کرده است، مثل این است که طول مجازی خیابان را می پیماید و فرض می شود مقدار t' طول می کشد. زمان t' زمان سفر مجازی یال نامیده می شود. طول مجازی در رابطه ۱ مشاهده می شود.

$$L' = L + (n + 2n' + 2n'') \quad (1)$$

که در آن n تعداد خودروهای سبک است و از آنجا که طول خودروهای سبک، یک واحد در مقیاس نرم افزار در نظر گرفته شده است؛ مقدار طول اضافه شده به طول واقعی خیابان برابر با $1 \times n$ یا همان n در نظر گرفته شده است. همچنین n' تعداد خودروهای سنگین است و از آنجا طول آن ها برابر ۲ واحد در نظر گرفته شده است این متغیر دو برابر شده است و در انتها n'' نیز تعداد اتوبوس ها است که آن ها نیز دارای طول ۲ واحد هستند.

۳-۳-۱- سناریوهای مسیریابی مدل

روش های مختلفی برای یافتن کوتاه ترین مسیر در دهه های ۵۰ و ۶۰ میلادی به وسیله بلمن^۱ [۴۲]، دایجسترا^۲ [۴۳]، فلویید^۳ [۴۴]، وارشال^۴ [۴۵] و دیگران ارائه شده است. در بین الگوریتم های موجود، الگوریتم دایجسترا در تحقیقات مختلفی توسعه یافته است. الگوریتم دایجسترا مسأله کوتاه ترین مسیر از یک مبدأ را حل می کند. این الگوریتم از یک نقطه (مبدأ) شروع می کند و کوتاه ترین مسیر را به همه گره های دیگر (مقصد) در گراف به دست می آورد [۴۶، ۴۷]. در این روش ها تمامی جواب های مسأله، به دست آمده و بررسی می شوند و در نهایت بهترین جواب از بین همه جواب ها انتخاب می شود. با بزرگ شدن شبکه، حجم محاسبات زیاد شده و به دست آوردن جواب زمانبر خواهد شد. الگوریتم A^* بر خلاف الگوریتم دایجسترا کوتاه ترین مسیر به تمام گره ها را حساب نمی کند و از این رو به زمان بسیار کمتری نیاز دارد [۴۸]. با این حال در شبکه های خیلی بزرگ یا با شروط زیاد و متنوع، زمان یافتن جواب بسیار به درازا خواهد کشید. در چنین مواردی، روش های ریاضی کارایی

^۱ Bellman

^۲ Dijkstra

^۳ Floyd

^۴ Warshall

با شرایط یکسان شبکه و پارامترهای یکسان شامل تعداد خودروها، نوع خودروها، احتمال تک مقصدی بودن خودروهای سواری، احتمال وجود مبدأ و مقصد خارج از شبکه، حد نهایی تعداد خودروها در صف چراغ قرمز و سرعت مجاز تعریف شده برای خیابانها، ایجاد می‌شود. سپس شرایط ترافیک، شبیه‌سازی شده، اثر حالت‌های مختلف مشاهده می‌شوند. در جدول ۱ خصوصیات سناریوهای تعریف شده در این پژوهش، قابل مشاهده است.

۳-۵- روش ارزیابی و اعتبارسنجی

پس از پیاده‌سازی مدل عامل‌مبنا، به ترتیب مراحل تأیید یا راستی‌آزمایی^۵، کالیبراسیون یا تنظیم و اعتبارسنجی^۶ مدل انجام می‌شود. طی شدن این مراحل برای آماده نمودن مدل جهت کاربرد مورد نظر ضروری است. راستی‌آزمایی به معنی اشکال‌زدایی^۷ است و آن را اعتبارسنجی داخلی^۸ نیز نامیده‌اند. با کم و زیاد کردن خودروها می‌توان مدل را به خوبی آزمود و در تعداد کم می‌توان رفتار هر خودرو را به دقت ارزیابی کرد و پیاده‌سازی انجام شده را راستی‌آزمایی کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با زیاد شدن تعداد خودروها زمان اجرای برنامه بیشتر می‌شود. به دلیل معلوم بودن پارامترها نظیر تعداد خودروها و نحوه حرکت آنها، کالیبراسیون عملاً با داده‌های از پیش معلوم انجام شد. درنهایت برای بررسی میزان اعتبار مدل از روش‌های اعتبارسنجی به شرح زیر استفاده می‌گردد.

۳-۵-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل می‌توان دو روش عمده را در پیش گرفت. روش نخست مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های جهان واقعی است که نیازمند استفاده از داده‌های واقعی یک شبکه خیابان‌های شهری، سوابق ترافیک و عبور مرور خودروها، اطلاعات ترافیکی لحظه‌ای و مبدأ و مقصد خودروها در این شبکه می‌باشد تا با قرار دادن آنها در مدل نتایج با وضعیت واقعی مقایسه گردد.

لازم را ندارند. از این روش‌های فرا ابتکاری مطرح گردیدند. با ظهور هوش مصنوعی رفته رفته علاقه به استفاده از آن در بیشتر زمینه‌های علمی افزایش یافت. استفاده از الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی در حل مسأله مسیریابی نیز بسیار رایج است. الگوریتم‌های کلونی مورچه^۱ [۴۹]، زنبورعسل^۲ [۵۰]، ژنتیک^۳ [۵۱]، از جمله روش‌های هوش مصنوعی و فرا ابتکاری هستند که می‌توانند در مسیریابی مورد استفاده قرار بگیرند.

در این تحقیق از دو رویکرد برای انجام آنالیز مسیریابی برای عامل‌ها استفاده شده است تا بتوان تفاوت روش‌های گوناگون مسیریابی را مشاهده کرد. هرچند برای بهینه‌سازی ترافیک تمرکز اصلی بر روی هوشمندسازی چراغ‌های راهنمایی است اما به کار بردن یک روش بهینه برای مسیریابی و پیدا کردن بهترین مسیر (نه لزوماً کوتاهترین مسیر) و مقایسه آن با سناریوهای مربوط به چراغ راهنمایی می‌تواند در هر چه روان‌تر کردن ترافیک شهری کمک شایانی نماید. دو رویکرد مسیریابی مورد استفاده به شرح زیر هستند:

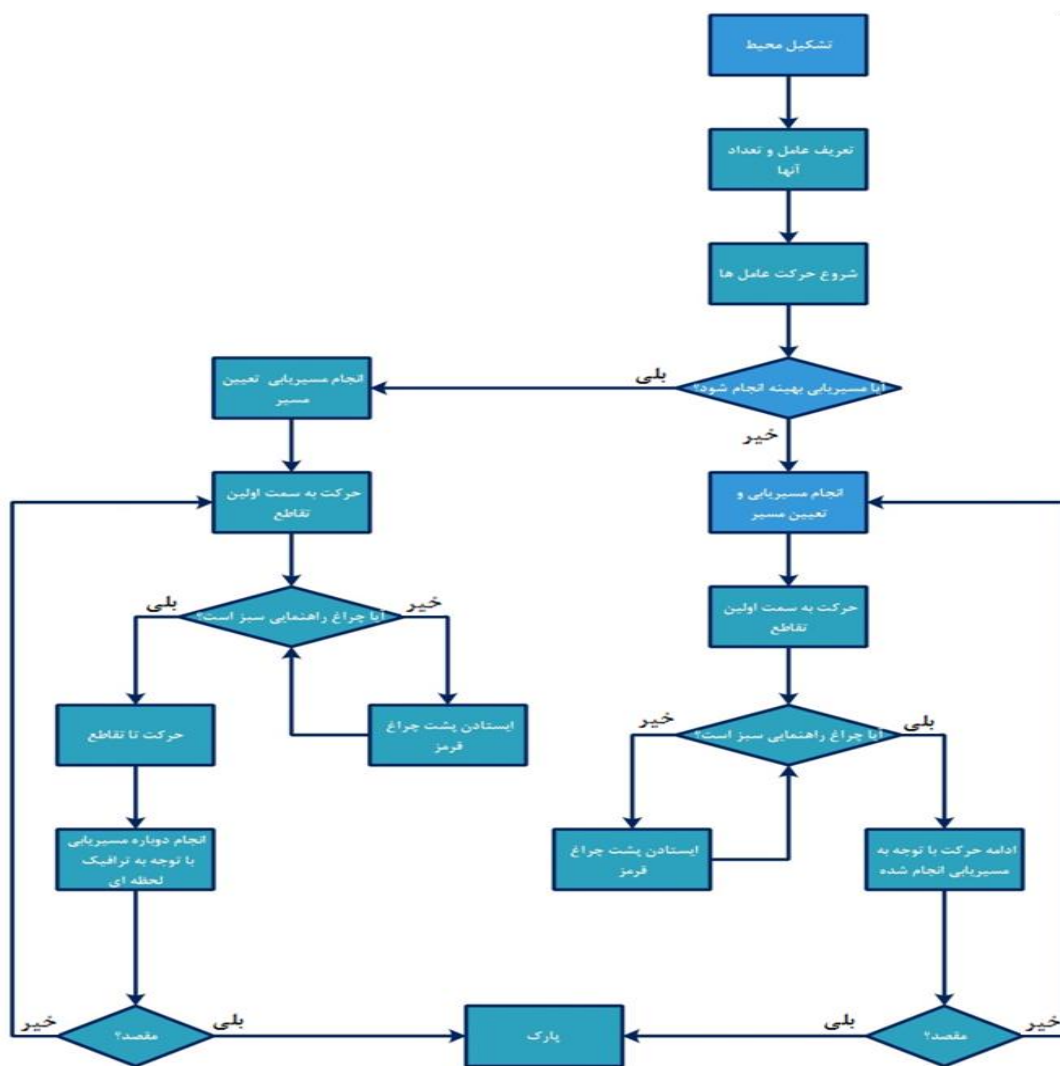
- رویکرد اول: این روش در مدل، روش معمول نامیده شده است. دلیل این نام‌گذاری این است که در آن از معمولی‌ترین روش مسیریابی یعنی کوتاهترین مسیر با بهره‌گیری از الگوریتم A* استفاده شده است.
- رویکرد دوم: این روش در مدل، روش بهینه نام دارد چراکه دارای بهینه‌سازی‌هایی نسبت به روش اول است. در این روش به جای استفاده از کوتاهترین مسیر، مسیری انتخاب می‌شود که ترافیک کمتری داشته باشد. در این روش از تکنیک فرمون معکوس^۴ در الگوریتم کلونی مورچه [۴۹] استفاده شده است. این روش را می‌توان روش هوشمند مسیریابی نیز دانست. روندنمای مراحل اجرای مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۴- تعریف سناریوها

در این پژوهش با توجه به سه حالت چراغ راهنما و دو رویکرد مسیریابی در کل شش سناریوی شبیه‌سازی ترافیک

^۵ Verification
^۶ Validation
^۷ Debugging
^۸ Inner Validation

^۱ Ant colony algorithm
^۲ Bee Colony algorithm
^۳ Genetic algorithm
^۴ Inverse Pheromone



شکل ۲- روندنمای اجرای مدل

جدول ۱- سناریوهای شش گانه

سناریوها	وضعیت چراغ راهنمایی	نوع مسیریابی	توضیحات
سناریوی اول	معمول	معمول	این سناریو حالت پایه است و هیچگونه هوشمندسازی و بهینه سازی در آن وجود ندارد.
سناریوی دوم	معمول	بهینه	در این سناریو چراغ راهنمایی در حالت معمولی بوده و تأثیر مسیریابی بهینه را می توان در مقادیر زمان توقف و میانگین سرعت مشاهده کرد.
سناریوی سوم	شمارشی	معمول	در این سناریو چراغ راهنمایی در حالت نیمه اتوماتیک بوده و در صورتی که تعداد خودروهای صف از عدد چهار بیشتر شود، چراغ سبز می گردد.
سناریوی چهارم	شمارشی	بهینه	در این سناریو نیز چراغ راهنمایی نیمه اتوماتیک بوده و مسیریابی بهینه با توجه به وضعیت ترافیک انجام می گیرد.
سناریوی پنجم	بهینه	معمول	در این سناریو مرکز کنترل ترافیک تعداد خودروهای هر تقاطع را اندازه گیری نموده، با مقایسه تعداد خودروها در هر طرف تقاطع، فازبندی مناسب برای چراغ را انجام می دهد.
سناریوی ششم	بهینه	بهینه	در این سناریو مسیریابی و فازبندی چراغ راهنمایی به طور همزمان بهینه شده اند.

شبیه سازی شده و کنترل شده است؛ به این معنی که با پارامترهای یکسان (حجم و نوع خودروهای در گردش، پیشینه سرعت مجاز، ویژگی های شبکه خیابان ها)، نتایج

هرچند این روش مؤثر و قابل اتکا می باشد، اما همواره نمی توان به چنین داده هایی دسترسی پیدا کرد. روش دوم، امتحان نمودن نتایج با استفاده از داده های

حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از یک مدل به اثبات رسیده مقایسه شوند و صحت نتایج، مورد ارزیابی قرار گیرند.

در این پژوهش به دلیل دسترسی نداشتن به داده‌های موردنیاز روش نخست اعتبارسنجی، از روش دوم برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. بدین منظور از نرم‌افزارهای VISSIM و VISTRO که دو نرم‌افزار شناخته شده ترافیکی هستند، استفاده می‌شود. VISSIM و VISTRO مکمل یکدیگر هستند. VISSIM نرم‌افزار شبیه‌ساز است و VISSIM بهینه‌سازی شبکه را انجام می‌دهد. لذا زمان بهینه سبز و قرمز ابتدا توسط VISTRO انجام شده و سپس توسط VISSIM شبیه‌سازی می‌گردد. پس از اجرای مدل و به تعادل رسیدن، نتایج اصلی و پارامترهای مقایسه‌ای مثل میانگین توقف و میانگین سرعت قابل استحصال است. بنابراین، هرگاه در ادامه صحبت از این نرم‌افزارها شده، از هر دو استفاده شده است. از طرف دیگر از آنجا که بحث مسیریابی را نمی‌توان در این نرم‌افزارها مطرح و پیاده‌سازی کرد، هر شش سناریو در آن‌ها قابل پیاده‌سازی نیست. لذا نتایج سناریوهایی که در هر دو مدل قابل اعمال است (که سناریوی ۵ است) با هم مقایسه و سپس نتایج هر شش سناریوی شبیه‌سازی شده در محیط NetLogo با یکدیگر سنجیده می‌شوند.

۳-۵-۲- ارزیابی سناریوها

برای ارزیابی عملکرد شش سناریو باید سه آماره (متغیر) را مقایسه کرد:

۱. سرعت میانگین^۱: سرعت لحظه‌ای هر خودرو از ابتدای حرکت آن ذخیره می‌شود و در پایان حرکت سرعت میانگین خودرو محاسبه شده و ذخیره می‌شود. در پایان شبیه‌سازی تمامی سرعت‌های میانگین ذخیره شده و متوسط آن‌ها به عنوان سرعت میانگین کل شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود و می‌توان آن را به عنوان میزان روان بودن ترافیک تعبیر کرد چراکه هر چه این عدد بالاتر باشد نشان از سرعت بالای حرکت خودروها و ترافیک کمتر دارد و برعکس.

۲. زمان توقف^۲: زمانی است که خودرو در پشت چراغ قرمز توقف می‌کند. سپس همانند پارامتر سرعت میانگین، زمان‌های توقف همه خودروها ذخیره می‌شود. هر چه این پارامتر مقدار کمتری داشته باشد نشان‌دهنده روان تر بودن ترافیک است؛ اما با توجه به تصادفی بودن مسیر خودروها از طولانی یا کوتاهی مسافت سفر مقدار پارامتر به دست آمده بر مسافت طی شده تقسیم می‌شود.

۳. تعداد کل خودروها^۳: در نظر گرفتن دو پارامتر سرعت میانگین و زمان انتظار به تنهایی کار درستی نیست. در واقع با این عمل ممکن است پارامتر سرعت میانگین در یک شبیه‌سازی بالا باشد اما ناشی از کم بودن تعداد خودروها باشد و این موضوع نمی‌تواند به طور کامل نشان‌دهنده مثبت بودن روند شبیه‌سازی باشد؛ بنابراین در کنار دو آماره قبلی باید تعداد کل خودروها نیز در نظر گرفته شود. البته این آماره در همه سناریوها در ابتدا تقریباً یکسان معرفی می‌گردد ولی با توجه به شرایط مدل گاهی مقادیر آن تغییر می‌کند. در این پژوهش چنانچه تعداد خودروها یکسان باشد بوده باشد، این آماره ارائه نمی‌شود.

۴- نتایج

محیط پیاده‌سازی یک فضای طراحی شده از خیابان‌های یک طرفه و دوطرفه به همراه تعداد متنوعی از چهارراه و سواره با ابعاد 120×120 واحد نرم‌افزاری (Patch) می‌باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. واحد نرم‌افزاری نیز معادل پنج متر و برابر با طول یک خودروی سواری در نظر گرفته شده است. چراغ‌های راهنمایی در چهارراه‌ها و سواره‌های شکل ۳ قابل مشاهده هستند. در صورت سبز بودن چراغ، خودروها قادر به حرکت هستند و در صورت قرمز بودن آن، خودروها می‌ایستند.

در این پژوهش تعداد ۴۵ خودروی سواری شامل ۳۰ خودرو دارای مقاصد تصادفی و ۱۵ خودرو دارای مقاصد گردشی (مانند تاکسی که پس از رسیدن به مقصد، هدف دیگری را برای خود به عنوان مقصد جدید تعریف می‌کنند)، ۱۰ خودروی سنگین و ۵ خودروی حمل و نقل

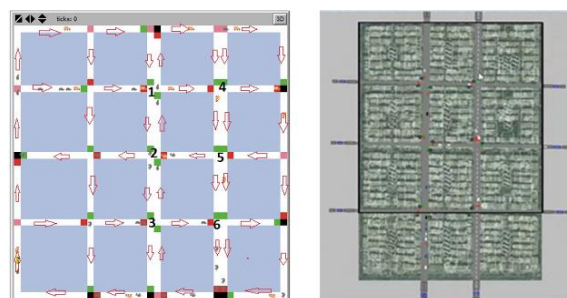
^۲ Wait time

^۳ Number of cars

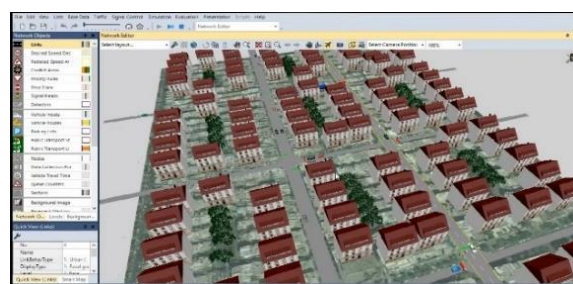
^۱ Average speed

عمومی (مانند اتوبوس دارای مبدأ-مقصد و مسیر مشخص که در مسیریابی بهینه شرکت نمی کنند)، در نظر گرفته شده است که به جز خودروهای گردشی مابقی در تمامی پیاده سازی ها اعمال می شوند. پارامترهای اعمالی از جمله اندازه، سرعت، شتاب افزاینده و کاهنده به همان اندازه که در مدل عامل مبنا در نظر گرفته می شوند در نرم افزارهای ترافیکی نیز وارد می شوند.

شمایی از پیاده سازی در نرم افزارهای VISTRO و NetLogo در شکل ۳ و VISSIM در شکل ۴ نشان داده شده است. برای پیاده سازی مدل در NetLogo مدل تا زمان رسیدن به تعادل اجرا شد. برای در نظر گرفته شدن حالت اتفاقی نیز، مدل ۱۵ بار از ابتدا اجرا و پس از هر بار اجرا میانگین نتایج ۱۰۰ گام آخر اخذ و با هم میانگین گیری شد.



شکل ۳- پیاده سازی در نرم افزار NetLogo (سمت چپ) و پیاده سازی در نرم افزار VISTRO (سمت راست)



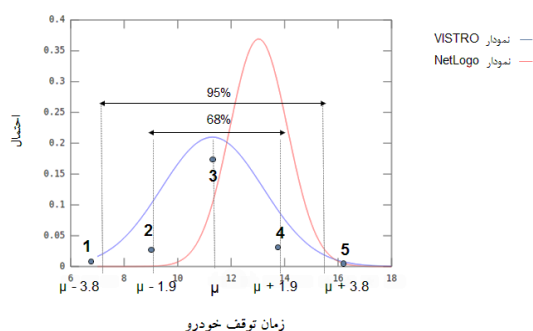
شکل ۴- پیاده سازی در نرم افزار VISSIM به صورت سه بعدی

نتایج به دست آمده از نرم افزار شبیه سازی VISTRO و همچنین روش شبیه سازی NetLogo، به صورت مقادیر عددی خروجی های اصلی (زمان توقف و میانگین سرعت) در جدول ۲ آمده است. ارزیابی نتایج حاصل از روش NetLogo با نرم افزار ترافیکی VISTRO نشان می دهد که مقادیر به دست آمده از مدل عامل مبنا (پیاده سازی شده در نرم افزار NetLogo) به دلیل پایین بودن انحراف معیار قابل اطمینان تر هستند.

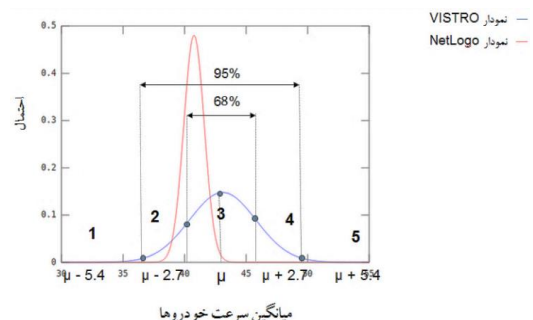
همچنین دقت نسبی ۱۵٪ برای مقادیر زمان توقف و دقت نسبی ۵٪ برای میانگین سرعت مدل محاسبه شد، هرچند ممکن است از نظر زمان توقف برتری احراز نشده باشد. با توجه به انحراف معیار به دست آمده از هر مدل و رسم نمودار زنگوله ای، احتمال اینکه مقادیر زمان انتظار و سرعت میانگین روش عامل مبنا در محدوده مقادیر نرم افزار VISTRO با بازه اطمینان ۹۵٪ قرار گیرد برابر با ۸۳٪ و همچنین احتمال اینکه مقادیر میانگین سرعت روش عامل مبنا در محدوده مقادیر نرم افزار VISTRO در بازه اطمینان ۹۵٪ قرار گیرد برابر با ۹۴٪ است. در شکل های ۵ و ۶ قرارگیری محدوده نمودار مربوط به مدل NetLogo در بازه های اطمینان ۶۶٪ و ۹۵٪ در نمودار مدل VISTRO نشان داده شده است. این نتایج را می توان نشانگر وجود توأم کارایی، اطمینان و انعطاف در مدل عامل مبنای توسعه داده شده دانست.

جدول ۲- مقایسه نتایج دو روش

انحراف معیار	میانگین سرعت، (کیلومتر بر ساعت)	انحراف معیار (ثانیه بر کیلومتر)	زمان توقف، (ثانیه بر کیلومتر)	روش شبیه سازی
۲/۷	۴۳/۱	۱/۹	۱۱/۳	VISTRO
۰/۸۳	۴۰/۷۷	۱/۰۸	۱۳/۰۳	NetLogo



شکل ۵- توزیع پراکندگی نتایج زمان توقف به دست آمده از دو مدل با استفاده از روش گوسی



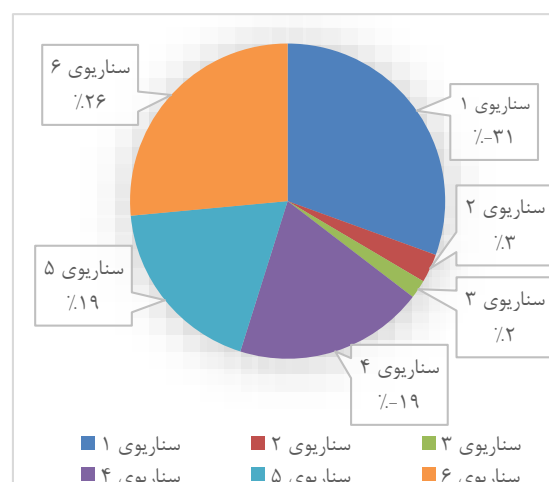
شکل ۶- توزیع پراکندگی نتایج میانگین سرعت خودروها به دست آمده از دو مدل با استفاده از روش گوسی

۴-۱- تحلیل نتایج سناریوها

در هنگام شبیه سازی با مدل عامل مبنا، محدودیت های نرم افزارهای ترافیکی وجود ندارد. از این رو می توان خودروهای گردشی مانند تاکسی ها را که نقش پررنگی در واقعیت دارند به مدل افزود. نتایج کار در شش سناریوی معرفی شده در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. برای محاسبه درصد تغییرات در شکل ۷، ابتدا مجموع قدر مطلق اختلاف ها نسبت به میانگین، حساب شده و سپس درصد اختلاف نتیجه هر سناریو نسبت به این عدد به دست آمده است. در شکل مشاهده می شود که سرعت های میانگین، هنگامی که چراغ راهنمایی روی حالت معمول قرار دارد (سناریوی ۱ و ۲) با کمی اغماض از بقیه سناریوها کمتر است. سرعت میانگین، در حالت شمارشی (سناریوی ۳ و ۴) نیز، از حالت بهینه کمتر است چراکه در این حالت چراغ روی قرمز باقی می ماند تا تعداد خودروهای پشت چراغ به یک حد آستانه برسد و سپس سبز می شود.

جدول ۳- نتایج عددی سناریوها

سناریوها	زمان توقف (ثانیه بر کیلومتر)	میانگین سرعت (کیلومتر بر ساعت)
سناریوی ۱	۲۳/۱۸۷	۶۴/۲۴۳
سناریوی ۲	۲۲/۰۳۹	۶۶/۵۶۱
سناریوی ۳	۲۳/۱۰۶	۶۶/۴۸۶
سناریوی ۴	۲۹/۴۸۱	۶۵/۰۱
سناریوی ۵	۱۹/۵۴۸	۶۷/۶۴۸
سناریوی ۶	۱۹/۷۲۴	۶۸/۱۸۹
میانگین	۲۲/۸۴۷	۶۶/۳۵۷



شکل ۷- مقایسه نسبی سرعت میانگین خودروها

با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود زمانی که چراغ راهنمایی در حالت بهینه است، سرعت میانگین خودروها از بقیه سناریوها بیشتر است. همین موضوع نشان دهنده کارایی روش ارائه شده برای بهینه سازی و روان شدن ترافیک به خصوص برای تقاطع هایی با چراغ راهنمایی است. در سناریوهای سوم و چهارم که چراغ راهنمایی روی حالت شمارشی است زمان توقف خودروها از بقیه سناریوها بیشتر است. در این حالت ممکن است تعدادی از خودروها بدون اینکه نیازی باشد، مدت زمان بیشتری معطل شوند. حالت بهینه برای چراغ راهنمایی باعث می شود که زمان توقف مجموعه خودروها با هم کاهش یابد. هرچند در لحظاتی ممکن است زمان توقف لحظه ای افزایش یابد اما در کل، زمان توقف کلی در این سناریو از بقیه سناریوها کمتر است. سناریوی ۵ با تفاضل نسبی ۲۳٪ با میانگین زمان توقف خودروها دارای کمترین مقدار توقف است و سناریوی ۴ با مقدار ۴۶٪ درصد افزایش، بیشترین زمان معطلی پشت چراغ را دارد. یکی از نکات جالب در این نتایج تفاوت سناریوهای ۳ و ۴ است که هر دو از چراغ راهنمایی در حالت شمارشی استفاده می کنند. در این مقایسه می بینم که وقتی چراغ راهنمایی به صورت شمارشی باشد، مسیریابی هوشمند کارایی لازم را ندارد. البته در این مورد نباید از نقش خنثی ساز اتوبوس ها در مسیریابی هوشمند نیز غافل شد.

سناریوهای پنجم و ششم که مربوط به حالت چراغ-راهنمایی بهینه هستند دارای مقادیر بهتری نسبت به بقیه سناریوها می باشند. در سناریوی پنجم سرعت میانگین به اندازه ۱/۲۹ کیلومتر بر ساعت بهبود یافته و میانگین زمان توقف ۳/۳ ثانیه به ازای هر کیلومتر کاهش یافته است. در سناریوی ششم سرعت میانگین به اندازه ۱/۸۳ کیلومتر بر ساعت بهبود یافته و میانگین زمان توقف ۳/۱۲ ثانیه به ازای هر کیلومتر کاهش یافته است. علت بیشتر بودن سرعت میانگین در سناریوی ششم نسبت به سناریو پنجم را باید به موفق بودن فرایند مسیریابی نسبت داد. با مسیریابی بهینه با توجه به آگاهی از ترافیک موجود در تقاطع بعدی، خودروها مسیرهای کم ترافیک تر را انتخاب می کنند، بنابراین سرعت آن ها افزایش پیدا می کند. بیشتر بودن ناچیز زمان توقف در سناریوی پنج نسبت به سناریوی ششم را می توان به دلیل وجود خودروهای با مسیر ثابت نظیر اتوبوس ها (که از مسیریابی استفاده نمی-

کنند) و نیز تعداد زیاد تقاطع‌ها نسبت به ابعاد نقشه دانست که در واقعیت معمولاً چنین نیست. به هر حال بالاتر بودن سرعت میانگین در سناریوی ششم، نشان از برتری کلی آن بر سناریوی پنجم و در نتیجه انتخاب آن به عنوان بهترین سناریو دارد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدل‌سازی عامل‌مبنا انطباق زیادی با کاربردهای شهری و به‌صورت جزئی‌تر، مسئله ترافیک دارد. در سناریوهای ارائه شده، بهینه‌سازی دو خصوصیت تعریف‌شده زمان توقف و میانگین سرعت برای بررسی وضعیت ترافیک، با تغییر یک سری از پارامترها (نوع مسیریابی و عملکرد چراغ راهنمایی) و ثابت ماندن بقیه (سرعت، تعداد و نوع خودروها) پارامترها دنبال شد. برای چراغ راهنمایی، سه حالت معمول، شمارشی و بهینه در نظر گرفته شد. همچنین مسیریابی خودروها در حالت معمول با روش کوتاهترین مسیر و در حالت بهینه با استفاده از اطلاعات ترافیک مسیر انجام گردید. از طرف دیگر، تفکیک خودروها در فرآیند شبیه‌سازی به سه نوع خودروهای شخصی (به‌عنوان بخش اعظم حجم ترافیک شهری)، خودروهای سنگین و خودروهای حمل و نقل عمومی و شبیه‌سازی ترافیک واقعی شهر با تفکیک خودروهای شخصی به دو نوع معمولی که با الهام از دنیای واقعی تقریباً دارای مبدأ و مقصد مشخص هستند (مانند حرکت از منزل به محل کار و برعکس) و گردش (مانند تاکسی‌ها) که پس از حرکت و رسیدن به مقصد دوباره مقصد جدیدی انتخاب می‌کنند و در ترافیک حرکت می‌کنند امکان بررسی همزمان مسیریابی و کنترل هوشمند ترافیک و در نتیجه استفاده از یک روش بهینه-سازی برای مسیریابی خودروها علاوه بر هوشمندسازی چراغ راهنمایی، را فراهم آورد. نتایج حاصل از مقایسه آماره‌های زمان توقف خودروها و سرعت میانگین خودروها، بیانگر روان‌تر شدن جریان ترافیک با تنظیم چراغ راهنمایی روی حالت بهینه و نیز با بهره‌گیری از حالت

مسیریابی هوشمند خودروها است که هر دو مورد با استفاده از اطلاعات عامل مرکز کنترل ترافیک محقق می‌گردند. افزون بر آن مشخص شد که بهینه‌سازی زمانبندی چراغ راهنمایی اثر مناسب‌تری بر روانسازی ترافیک دارد تا بهینه‌سازی مسیریابی.

در این تحقیق به منظور توسعه مدل عامل‌مبنا برای کنترل ترافیک شهری، با توجه به خصوصیات میکروسکوپی ترافیک در تقاطع‌ها با تعریف پارامترهای اصلی ترافیک، مجموعه‌ای از عامل‌های هوشمند در مقیاس میکرو، در شش سناریو مختلف در محیط نرم‌افزار NetLogo و در یک نقشه تمثیلی از شبکه خیابان‌های شهری، به ایفای نقش پرداخته، ترافیک شهری را شبیه‌سازی کردند. اعتبار سنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار VISTRO (به عنوان یک نرم‌افزار شناخته شده و قابل اعتماد در حوزه ترافیک) انجام گردید و نتایج آن، مدل مورد استفاده را تأیید نمود. در این تحقیق هوشمندسازی چراغ راهنمایی و تعویض مدت‌زمان سبز و قرمز شدن چراغ با توجه به حجم ترافیک دو مسیر با استفاده از سناریوی ششم صورت گرفت که در آن مسیریابی با استفاده از تکنیک فرمون معکوس و فازبندی چراغ راهنمایی به طور همزمان بهینه شدند و این کار باعث شد که ترافیک روان‌تر شده و از حجم ترافیک کل مجموع خیابان‌ها کاسته شود. این نتایج نشان از کارایی مناسب مدل عامل‌مبنا در شبیه‌سازی مدلی پیچیده همچون ترافیک شهری دارد که به همین دلیل می‌تواند برای مدیریت شهری مورد استفاده قرار گیرد. پس از انجام این پژوهش می‌توان پیشنهادهایی را برای تحقیقات در آینده ارائه نمود.

یکی از پیشنهادهای واردکردن اجزای دیگر مانند تونل-های شهری، دوربرگردان‌ها، تقاطع‌های غیر هم‌سطح و غیره به محیط شبیه‌سازی است. همچنین می‌توان چندزمانه کردن چراغ‌های راهنمایی در چهارراه‌ها و نیز وارد کردن عامل‌های ترافیکی دیگر نظیر عابر پیاده به مدل را هم، مد نظر قرار داد.

مراجع

- [1] Melkonyan, A., Koch, J., Lohmar, F., Kamath, V., Munteanu, V., Schmidt, J. A. and Bleischwitz, R. (2020). "Integrated urban mobility policies in metropolitan areas: A system dynamics approach for the Rhine-Ruhr metropolitan region in Germany." Sustainable Cities and Society. Vol. 61, No. 2020, PP. 102358.

- [2] Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). "Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence." *Environment international*. Vol. 140, No. 2020, PP. 1-10.
- [3] Ramazani, H., Shafahi, Y. and Seyedabrishami, S. (2010). "A shortest path problem in an urban transportation network based on driver perceived travel time." *Scientia Iranica Transaction A, Civil Engineering*. Vol. 17, No. 4, PP. 285-296.
- [4] Downs, A. (2005). "Still stuck in traffic: coping with peak-hour traffic congestion." *Brookings Institution Press*.
- [5] Chen, B. and Cheng, H. H. (2010). "A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems." *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. Vol. 11, No. 2, PP. 485-497.
- [6] Wang, H., Zhu, M., Hong, W., Wang, C., Tao, G. and Wang, Y. (2020). "Optimizing Signal Timing Control for Large Urban Traffic Networks Using an Adaptive Linear Quadratic Regulator Control Strategy." *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. doi: 10.1109/TITS.2020.3010725.
- [7] Quessada, M. S., Pereira, R. S., Revejes, W., Sartori, B., Gottsfritz, E. N., Lieira, D. D., da Silva, M. A., Rocha Filho, G. P. and Meneguette, R. I. (2020). "ITSMEI: An intelligent transport system for monitoring traffic and event information." *International Journal of Distributed Sensor Networks*. Vol. 16, No. 10, PP. 1-13.
- [8] Gonçalves, S. M. and Jayme, C. A. (2020). *inventor/inventors; Google Patents, assignee. Predictive, integrated and intelligent system for control of times in traffic lights. United States*.
- [9] Zheng, Y., Wang, J. and Li, K. (2020). "Smoothing traffic flow via control of autonomous vehicles." *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 7, No. 5, PP. 3882-3896.
- [10] Aljaafreh, A., Saleh, M. E., Al-Oudat, N. and Alaqtash, M. (2020). "An agent-based simulation model of dynamic real-time traffic signal controller." *International Journal of Advanced Computer Research*. Vol. 10, No. 46, PP. 1-11.
- [11] Mathieu, P., Nongaillard, A. and Thery, A. (2020). "A Multi-agent Evaluation of Traffic Light Models." *Proc. International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*,
- [12] Torabi, B., Wenkstern, R. Z. and Saylor, R. (2020). "A collaborative agent-based traffic signal system for highly dynamic traffic conditions." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Vol. 34, No. 1, PP. 1-24.
- [13] Alekszejenkó, L. and Dobrowiecki, T. (2020). "Alleviating congestion in restricted urban areas with cooperative intersection management." *Proc. Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*,
- [14] Zhao, Y. and Ioannou, P. (2019). "A co-simulation, optimization, control approach for traffic light control with truck priority." *Annual Reviews in Control*. Vol. 48, No. 2019, PP. 283-291.
- [15] Saeed, Y., Khan, M. S., Ahmed, K. and Mubashar, A. S. (2011). "A multi-agent based autonomous traffic lights control system using fuzzy control." *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 2, No. 6, PP. 1-5.
- [16] Bazzan, A. L., De Oliveira, D., Klügl, F. and Nagel, K. (2005). "To adapt or not to adapt—consequences of adapting driver and traffic light agents." *Adaptive Agents and Multi-Agent Systems III Adaptation and Multi-Agent Learning: Springer*; PP. 1-14.
- [17] Buch, N., Velastin, S. A. and Orwell, J. (2011). "A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic." *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. Vol. 12, No. 3, PP. 920-939.
- [18] Rossetti, R. J., Bampi, S., Liu, R., Van Vliet, D. and Cybis, H. B. (2000). "An agent-based framework for the assessment of drivers' decision-making." *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems*
- [19] Abdulsattar, H., Siam, M. R. K. and Wang, H. (2020). "Characterisation of the impacts of autonomous driving on highway capacity in a mixed traffic environment: an agent-based approach." *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 14, No. 9, PP. 1132-1141.
- [20] Maes, P. (1993). "Modeling Adaptive Autonomous Agents." *Artificial Life*. Vol. 1, No. 1993, PP. 135-162.
- [21] Conte, R., Hegselmann, R. and Terna, P. (2013). "Simulating Social Phenomena." *Springer*.
- [22] Benalla, M., Achchab, B. and Himech, H. (2020). "Improving driver assistance in intelligent transportation systems: An agent-based evidential reasoning approach." *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2020, No., PP. 1-14.
- [23] Hooshangi, N. and Alesheikh, A. A. (2018). "Presenting Spatial Strategies for Agent-Based Task Allocation in Disaster Environments." *Journal of Geomatics Science and Technology*. Vol. 8, No. 2, PP. 173-188.
- [24] Jadidi, M., Hosseinali, F. and Aghamohammadi, H. (2019). "Studying deforestation and changes in forest land cover using agent-based modelling. case study: tonkabon, iran." *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 18, No. 12, PP. 2555-2566.

- [25] Tabasi, M. and Alesheikh, A. A. (2019). "Development of an Agent-Based Model for Simulation of the Spatiotemporal Spread of Leishmaniasis in GIS (Case Study: Maraveh Tappeh)." *Journal of Geomatics Science and Technology*. Vol. 8, No. 3, PP. 113-131.
- [26] Akhondi, M. and Saadi Mesgari, M. (2020). "Agent Based Simulation of ITS for Urban Traffic Control Using GPS." *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*. Vol. 11, No. Special Issue, PP. 249-263.
- [27] Xu, M., An, K., Vu, L. H., Ye, Z., Feng, J. and Chen, E. (2019). "Optimizing multi-agent based urban traffic signal control system." *Journal of Intelligent Transportation Systems*. Vol. 23, No. 4, PP. 357-369.
- [28] Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2011). "Modern control systems." Pearson.
- [29] Hall, F. L. and Montgomery, F. O. (1993). "The investigation of an alternative interpretation of the speed-flow relationship for UK motorways." *Traffic engineering & control*. Vol. 34, No. 9, PP. 420-425.
- [30] Drake, J. L., Schofer, J. L. and May, A. D. (1967). "A statistical analysis of speed density hypothesis." *Highway Research Record*. Vol. 154, No., PP. 53-87.
- [31] Hobeika, A. G. and Kim, C. K. (1994). "Traffic-flow-prediction systems based on upstream traffic." *Proc. Proceedings of VNIS'94-1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference* ,
- [32] Weiss, G. (1999). "Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence." MIT press.
- [33] Sharma, S., Pithora, A., Gupta, G., Goel, M. and Sinha, M. (2013). "Traffic light priority control for emergency vehicle using RFID." *International Journal of Inovations in Engineering and Technology*. Vol. 2, No. 2, PP. 363-366.
- [34] Huang, Y.-S. and Chung, T.-H. (2008). "Modeling and analysis of urban traffic lights control systems using timed CP-nets." *Journal of Information Science & Engineering*. Vol. 24, No. 3, PP.
- [35] Huang, Y.-S. and Su, P.-J. (2009). "Modelling and analysis of traffic light control systems." *IET control theory & applications*. Vol. 3, No. 3, PP. 340-350.
- [36] Adacher, L., Cipriani, E. and Gemma, A. (2015). "The global optimization of signal settings and traffic assignment combined problem: a comparison between algorithms." *Advances in Transportation Studies*. Vol. 2015, No. XXXVI, PP.
- [37] Adacher, L. and Gemma, A. (2017). "A robust algorithm to solve the signal setting problem considering different traffic assignment approaches." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. Vol. 27, No. 4, PP. 815-826.
- [38] Liao, T.-Y. (2013). "A fuel-based signal optimization model." *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 23, No. 2013, PP. 1-8.
- [39] Al Islam, S. B. and Hajbabaie, A. (2017). "Distributed coordinated signal timing optimization in connected transportation networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 80, No. 2017, PP. 272-285.
- [40] Adacher, L., Gemma, A. and Oliva, G. (2014). "Decentralized spatial decomposition for traffic signal synchronization." *Transportation Research Procedia*. Vol. 3, No. 2014, PP. 992-1001.
- [41] Timotheou, S., Panayiotou, C. G. and Polycarpou, M. M. (2014). "Distributed traffic signal control using the cell transmission model via the alternating direction method of multipliers." *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. Vol. 16, No. 2, PP. 919-933.
- [42] Bellman, R. (1958). "On a routing problem." *Quarterly of applied mathematics*. Vol. 16, No. 1, PP. 87-90.
- [43] Dijkstra, E. W. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische mathematik*. Vol. 1, No. 1, PP. 269-271.
- [44] Floyd, R. W. (1962). "Algorithm 97: shortest path." *Communications of the ACM*. Vol. 5, No. 6, PP. 344-348.
- [45] Warshall, S. (1962). "A theorem on boolean matrices." *Journal of the ACM (JACM)*. Vol. 9, No. 1, PP. 11-12.
- [46] Ciesielski, K. C., Falcão, A. X. and Miranda, P. A. (2018). "Path-value functions for which Dijkstra's algorithm returns optimal mapping." *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. Vol. 60, No. 7, PP. 1025-1036.
- [47] Galán-García, J. L., Aguilera-Venegas, G., Galán-García, M. Á. and Rodríguez-Cielos, P. (2015). "A new Probabilistic Extension of Dijkstra's Algorithm to simulate more realistic traffic flow in a smart city." *Applied mathematics and Computation*. Vol. 267, No., PP. 780-789.
- [48] Noori, A. and Moradi, F. (2015). "Simulation and Comparison of Efficiency in Pathfinding algorithms in Games." *Ciência e Natura*. Vol. 37, No. 2, PP. 230-238.

- [49] Claes, R. and Holvoet, T. (2011). "Ant colony optimization applied to route planning using link travel time predictions." Proc. 2011 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and Phd Forum ,
- [50] Karaboga, D. and Basturk, B. (2008). " On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm." Applied soft computing. Vol. 8, No. 1, PP. 687-697.
- [51] Ahn, C. W. and Ramakrishna, R. S. (2002). "A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations." IEEE transactions on evolutionary computation. Vol. 6, No. 6, PP. 566-579.