تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۸

انتخاب مسیر بهینه با استفاده از ارتباط‌های بین‌خودرویی جهت کاهش مصرف سوخت

محمدرضا رمضان پور*
استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
پست الکترونیکی: ramezanpour@mau.ac.ir

ریحانه خورسند
گروه مهندسی کامپیوتر، واحد دولت آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
پست الکترونیکی: r.khorsand@iauda.ac.ir

چکیده

با افزایش گسترده خودرو در جهان، کاهش مصرف سوخت و کاهش دی اکسید کربن در محیط‌های شهری یکی از اهداف اصلی در جهت حفظ محیط زیست می‌باشد. با وجود پیشرفت در شبکه‌های خودرویی نتیجه‌ای برای زمان مطلوب انتظار خودرو در تقاطع‌ها و کاهش میزان تولید دی‌اکسیدکربن به‌دست نیامده است از این‌رو ضمن ترکیب روش کنترل چراغ راهنمایی، چرخش سبز و یافتن بهترین الگوی مسیریابی، به ارائه روش رانندگی سبز جهت تنظیم سرعت خودرو در هنگام ازدحام، با هدف افزایش گذردهی تقاطع پرداخته می‌شود. معیارهای مهم ارزیابی برای روش پیشنهادی، مدت زمان انتقال بسته‌های اطلاعاتی در شبکه و تعداد بسته‌های حذف شده به‌دلیل ترافیک می‌باشند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ضمن کاهش زمان سفر و افزایش توان عبوری تقاطع‌ها به میزان ۲۲/٤ ٪، توانسته است به‌طور میانگین ۲۸٪ تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد.

* نویسندهٔ مسئول

واژه‌های کلیدی: رانندگی سبز- شبکه‌های خودرویی- کاهش مصرف سوخت

۱- مقدمه

در طول دهه گذشته، تحقیقات زیادی در مورد آلودگی هوا و گرم شدن کره زمین انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهد که بخش حمل و نقل جاده در سال ۲۰۰۵ تا حد زیادی مسئول ۲۳ درصد از تولید گازهای گلخانه‌ای جهان از احتراق سوخت (۳۰درصد برای کشورهای OECD)[1] و مسئول۲۲ درصد از تولید گازهای گلخانه‌ای جهان در سال ۲۰۱۰ بوده است [۱]. برای رسیدن به هدف کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین کاهش مصرف انرژی در بخش سیستم مدیریت حمل و نقل به خصوص حمل و نقل جاده‌ای، سیستم‌های حمل و نقل هوشمند تعبیه گردیده‌اند. این سیستم‌ها سعی دارند تا با استفاده از روش‌های برقراری ارتباط با سیستم‌های پردازش داده مختلف، کارکرد سیستم‌های حمل و نقل را ارتقا دهند یکی از این روش‌ها استفاده از شبکه‌های خودرویی سیار است.

1- Organization for Economic Co-operation and Development

شـبکه‌های خودرویی سـیار بـا اسـتفاده از امواج رادیویی انـواع ارتباط‌های خودرو به خودرو[2] و خودرو به زیرساخت[3] را ایجاد می‌کند. در این روش یک خودرو سایر خودروها را از موقعیت ترافیک محلی اطراف خود آگاه می‌سـازد. در این شـبکه هـا خودروها به صورت کامـلاً خود مختار با یکدیگر ارتبـاط برقرار کرده و یک شبکه غیر ساختارمند بی‌سیم ایجاد می‌کنند. هر خودرو شرکت کننده به یک روتر بی‌سیم و یا گره تبدیل می‌شود و یک شـبکه متحرک با طیف گسـترده با اجـازه ایجاد ارتباط خودروها را در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر را تشکیل می‌دهد. اگر هر خودرویی از محدوده ارتباط خارج شود و یا ارتـبـاط قـطع گردد خودروهـای دیگر بلافاصله می‌تواننـد به شـبکه بپیـوندنـد و یـک شـبکه موردی متحرک ایجاد کنند [۲].

سیستم‌های حمل و نقل هوشمند به زیرساخت حمل و نقل سـنتی، اطلاعات و فناوری ارتباطات را اضافه می‌کنند لذا می‌توانند شـرایط واقعی ترافیکی را در جاده‌ها تخمین بزنند و سـرویس‌هایی نظیر برنامه‌ریزی ناوبری و سفر را به‌منظـور بهبـود بازدهی رانندگی فراهم سـازند. یکی از تجهیـزات مورد اسـتفاده در سیسـتم‌های حمل و نقل هوشـمند سیسـتم مکان‌یابی جهانی (GPS) است. سیستم مکان‌یابی جهانی با دقت، ارزان و رایج اسـت و باعث شده سیسـتم ناوبری، کاربردی مهم از شـبکه‌های خودرویی سیار به شمار برود. به هر حال سیستم‌های ناوبری سنتی فقط بر اسـاس نقشه‌های الکترونیکی، کوتاه‌ترین مسیر را برنامه‌ریزی می‌کنند و وقتی که کوتاه‌ترین مسـیر شـلوغ شود کاربر معطل خواهد شد.

زمانی کـه خودروها به مسـیری کـه دارای ازدحام است هدایت می‌شـوند باید به‌صورت پی‌درپی توقف کنند و دوباره راه بیفتند در نتیجه مصرف سـوخت بالا خواهد رفت. مشکل اساسی سیستم‌های ناوبری فعلی آن است که بدون در نظر گرفتن اطلاعات ترافیکی مسیر را برنامه‌ریزی می‌کنند. گرچه برخی از سیسـتم‌های ناوبری می‌توانند به کاربران اجازه دهند به‌صورت دستی مسیر را به مسیری دیگر تغییر دهند؛ اما در عین حال مسـیرهای یکسان برای کاربرهای دیگر ارائه می‌کننـد. از آنجایی‌که کاربران فقط می‌خواهند از مسـیرهای پرازدحـام دوری کنند بنابراین ممکن است تراکم ترافیک دوباره رخ دهد [۳].

در این مقاله به بررسـی مسـئله‌ی ترافیک با وجود هدایت به مسـیر بهینه و عدم توقـف در تقاطع‌ها پرداخته خواهد شد. در واقع در روش پیشنهادی از ترکیب سیستم رانندگی سبز و روش کنترل چراغ راهنمایی استفاده نموده تا ضمن انتخاب بهترین مسـیر و بهترین سرعت رانندگی، توقف‌هـا کاهـش یابد و هدف کاهش مصرف سـوخت و کاهش تولید دی‌اکسیدکربن تحقق یابد.

سـاختار ادامـه مقاله به این شـرح اسـت: در بخش ۲ به مروری بـر کارهای اخیری کـه در این زمینه انجام شده اسـت پرداخته می‌شـود، در بخش ۳ جزئیات روش پیشـنهادی شامل انتخاب مسـیر بهینه و پیشنهاد بهترین سـرعت رانندگی، پرداخته می‌شود. نتایج شبیه سازی در بخش ٤ ارائه خواهد شد و در پایان در بخش ٥ نتیجه گیری بیان خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعـات نشـان داده هنگامـی که خـودرو متوقف اسـت از موتور آن گازهای گلخانه‌ای ناشـی از مصرف سـوخت بیشـتری سـاطع می‌شـود همچنیـن افزایش سـرعت و شـتاب منفی، آلودگی بیشتری نسبت به معطل ماندن و گشـت‌زنی خودرو تولید می‌کند. بنابراین کاهش توقف‌های غیرضروری، سرعت غیرضروری و ترمزهای غیرضروری تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد .در چند سـال اخیر تحقیقات و پژوهش‌های زیادی در حوزه تقاطع انجام شـده اسـت که از دو رویکـرد کنترل چراغ راهنمایی و کنترل سـرعت خـودرو می‌توان جهت کاهش انتشار دی‌اکسـیدکربن در مصرف سوخت استفاده کرد.

2- Vehicle to Vehicle3
3- Vehicle to Roadside

در مقـالات [٤] تا [٨] با اسـتفاده از اطلاعـات دریافتی از خودروها بـه کنترل زمان چراغ راهنمایی پرداخته شـده اسـت که اجازه می‌دهند خودروها بدون توقف از تقاطع‌ها بگذرند. در ادامه به بررسـی روش‌های ارائه شده در این زمینه می‌پردازیم.

Li و همـکاران [٤] الگوریتـم تصمیم‌گیری اولویت و گذراندن دوره‌های کنترل فضای حالت را پیشنهاد دادند. با توسـعه انواع حسگرها و فناوری ارتباطات بسیاری از روش‌های پیشرفته برای تنظیم زمان چراغ توسعه یافت. Azimirad وهمکاران [٥] روشـی بر اسـاس منطق فازی ارائه داده اسـت کـه اطلاعات جریـان ترافیک، در روش زمان‌بندی چراغ راهنمایی با اصول منطق فازی توسـط سیسـتم دریافت می‌شود و پس از پردازش، میزان زمان سـبز اضافه مورد نیاز در هر یـک از رویکردهای تقاطع بر حسـب مشـخصات ترافیک کل تقاطع تعیین می‌شود. در روش Li و همـکاران [٦] اطلاعـات جریـان ترافیک به‌وسـیله ارتباطات بی‌سیم به چراغ‌های راهنمایی ارسال و سـپس در مرکز کنترل ترافیک به‌صـورت پویا با یک ترافیک خاص تنظیم می‌شـود. Li و همکاران [٧] روشـی برای کنترل چراغ راهنمایی ارائه داده اسـت که با تخمین زمان رسـیدن گروهی از اتومبیل‌ها می‌توانند‌دسته‌ای از اتومبیل‌ها از تقاطع بدون توقف عبور کنند. Xu و همکاران [٨] برای کاهش توقف خودروها روشی به نام موج سبز ارائه دادند کـه از ارتباطات بین خودرویـی برای تنظیم سرعت خودروها در هنگام تراکم ترافیک استفاده می‌کند تـا برای کاهـش توقف‌ها در صورتی که ازدحام باشـد خـودرو به چرخش‌ها هدایت شـود. هنگامی که خودرو، اطلاعـات را از چراغ‌هـا دریافـت کردند، حسـگرها یک سرعت توصیه شـده جهت رانندگی را پیشنهاد می‌دهند تا زمانی که خودرو به تقاطع می‌رسـد چراغ سبز باشد. در مقالات [٩] تا [١٦] به این راه حل‌ها اشـاره شده است. Warberg [٩] و Sasaki [١٠] روش موج سبز ارائه دادند که کنتـرل مجموعه‌ای از چراغ‌های راهنمایی را که اجازه می‌دهـد خودروها از طریق خیابان‌هـای بدون توقف در تقاطع‌هـا عبور کنند بر عهده دارد. با تعیین جهت اولویت، موج سـبز می‌تواند ظرفیت ترافیک را افزایش دهد.Ikeda و همکاران [١١] پیشـنهاد یک روش برای کنترل سرعت گروهـی خودروها و کنترل چراغ‌هـای راهنمایی را ارائه نمودنـد. در این روش تمرکـز روی ارتباطات بین چراغ راهنمایی و خودرو می‌باشـد که اجازه می‌دهد رانندگان زمان آینـده چراغ ها را بداننـد. Junges و Bazzan [١٢] روشـی با پیش‌بینی ترافیک در مناطق شـهری که در ان جاده‌ها یک الگوی شـبکه را تشکیل می‌دهند، ارائه می‌دهد که پیام‌های رد و بدل شـده بین چراغ‌های راهنمایی قوام کلی در میان چراغ‌هـای راهنمایی را حفظ می‌کنند. Shen و Xu [١٣] یک روش پیشـنهادی برای ایجاد موج سـبز در هـر دو جهت به‌طور همزمان با تعیین دقیق موقعیت و سـرعت هر خودرو ارائه می‌دهند اما فقط می‌تواند در یک نقشه سـاده با جاده مستقیم اسـتفاده شود. Taale [١٤] روشـی برای تشخیص انتظار اتومبیل‌ها برای چراغ سبز با تجهیز چراغ‌های ترافیک با یک سنسور پیشنهاد داد که طول چراغ سبز توسعه می‌یابد. Gradinescu و همکاران [١٥] روشی با بهره‌گیری ارتباطات خودروی پیشنهاد داد که هر چراغ راهنمایی به یک دستگاه بی‌سیم مجهز شده و هر خودرو اطلاعات موقعیتی خود را می‌فرسـتد تا زمان بهینه را محاسـبه و خودروهایی که در حال چرخش در تقاطع‌انـد را در نظر بگیرد. Lee و همکاران [١٦] روش به حداکثر رسـاندن توان خروجی و کاهش شتاب و سرعت را ارائه داد که با در نظر گرفتن اطلاعات بی‌درنگ ترافیک در محدوده تقاطع اجرا می‌شود و سرعت توصیه‌شده به وسیله ارتباطات موردی خودرویی به خودروها پیشنهاد می‌دهد. تمـام روش‌های فوق برای حل مشـکل افزایش تولید دی‌اکسیدکربن، یا مسیر بهینه را پیشنهاد داده‌اند یا به کنترل چراغ‌هـای راهنمایی پرداخته‌اند و از ترکیب هر دو برای کاهش مصرف سـوخت اسـتفاده نکرده‌اند. اگر مسـیر بهینه انتخاب گردد ولی چراغ‌های راهنمایی کنترل

نگردد یـا چراغ‌هـای راهنمایی کنترل گردد ولی مسـیر بهینه انتخاب نگردد می‌تواند باعث تشـدید شدن ترافیک گردد. در این مقاله، جهت کاهش مصرف سـوخت، هم از روش انتخاب مسیر بهینه و هم از روش‌های کنترل چراغ راهنمایی به‌صورت همزمان استفاده شده است.

در روش پیشـنهادی از روش کنترل چراغ راهنمایی و رانندگی سبز به صورت همزمان استفاده شده تا با کشف کوتاه‌ترین مسـیر خودروها را به سـوی چرخش سوق دهیم. در این روش به ارائه مدل رانندگی سبز جهت تنظیم سرعت خودرو در ازدحام با هدف افزایش گذردهی تقاطع پرداخته می‌شود تا ضمن بررسی کیفیت روش پیشنهادی به کاهش توقف و کاهش دی‌اکسیدکربن در محیط شهری به کمک ارتباطات خودرویی برسیم.

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، از روش چرخش سبز برای کاهش توقف خودروها و از ارتباطات بین خودرویی برای تنظیم سـرعت خودروها در هنگام تراکم ترافیک اسـتفاده شده است تا مصرف سـوخت را کاهش داده و دی‌اکسیدکربن کمتری تولید شـود. برای یافتن بهترین مسیر از ارتباطات بین خودرویی اسـتفاده شـده تا زمان پیمایش هر بخش از جاده را تخمین زده و کوتاهترین مسـیر یافت شود. به منظور کاهش تعداد توقف‌ها، در صورتی‌که در یک مسیر ازدحام باشد خودرو، در مسیرهایی که به‌صورت چرخشی طراحی شده هدایت می‌شود و براساس برنامه‌ریزی چراغ راهنمایی، سرعت رانندگی به آن پیشنهاد می‌شود. در ادامه به جزئیات روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳-۱- انتخاب بهترین مسیر و هدایت خودرو

در این بخش بهترین مسـیر از بین مسیرهای مختلف انتخاب می‌شـود که شـامل دو گام اسـت. گام اول برای مقداردهی اولیهٔ حسگرهای کنار جاده به کار می‌رود و گام دوم از تابع هزینه‌ی سوخت برای انتخاب بهترین مسیر با صرفه‌جویی در انرژی استفاده می‌کند.

۳-۱-۱ گام اول: مقدار دهی اولیه حسگرها (شروع به کار)

با توجه به این‌که در روش پیشنهادی اطلاع از ازدحام حائز اهمیت اسـت ابتدا توسـط حسـگرهای کنار جاده، تراکم ترافیک خودرو در جاده محاسبه می‌گردد. حسگرها از رابطـه (۱) برای محاسـبه ازدحام خودروها اسـتفاده می‌نمایند [۳]:

$$D = C * e^{bV_x} \qquad (۱)$$

به‌طوری که V_x میانگین سرعت مسیر C، x متغیر وابسته به تعداد خودروها در مسیر x و b متغیر وابسته به سرعت خودرو می‌باشـد. D به معنی ازدحام در مسـیر x است. به‌منظور استفاده از اطلاعات برای حل متغیرها، رابطه (۱) را به شکل معادله خطی رابطه (۲) می‌توان نوشت:

$$\log_e D = \log_e C + bV_x \qquad (۲)$$

همچنین رابطه (۲) را می‌توان به فرم یک معادله‌ی خطی به‌صورت زیر نوشت:

$$Y = a + b\left(x - \bar{x}\right) \qquad (۳)$$

به‌طوری که $Y = \log_e D$ و $a = \log_e C$ می‌باشـد و $b\left(x - \bar{x}\right)$ میانگین سـرعت در مسـیر x می‌باشد. با اسـتفاده از یک برازش رگرسیون حداقل مربعات می‌توان پارامترهای C و b را به‌دسـت آورد. به منظور تخمین بار ترافیکی در مسـیرهای آینده، جدولی از اطلاعات ترافیکی گذشته در سـرور نگه‌داری می‌شود. اگر حسگرهای کنار جاده با x نشان داده شوند، نه تنها ترافیک را حس می‌کنند بلکـه داده‌ها را مطابق رابطه (٤) به‌طور مرتب به سـرور ارسال می‌نمایند [۳].

$$sensor_x = \{V_x, Time, S_x\} \qquad (۴)$$

به‌طوری‌که در رابطه فوق Time به معنی زمانی اسـت که حسـگر x سـرعت V_x خودرو را تشخیص می‌دهد، و S_x مکان حسگر اسـت. وقتی این اطلاعات دریافت شود، سرور جدول اطلاعات ترافیکی را مقداردهی اولیه می‌کند تا توسط رابطه (۵)، اطلاعات ترافیکی را ثبت کند [۳]:

$$Table_x = \{V_x, Time\} \quad (۵)$$

به منظـور کاهش سـربار پیام، حسـگرها اطلاعات ترافیکـی را بـر اسـاس دوره‌هـای اوج و غیـر اوج در چرخه‌هـای مختلف گزارش می‌دهـد. در دورهٔ اوج یعنی زمان پیک و سنگینی ترافیک خودروها چرخه‌ی تشخیص کوتـاه مدت،به حسـگرها تخصیص داده می‌شـود زیرا شـرایط ترافیکی در این دوره سـریع تغییـر می‌یابد. در مقابل، در طـول دورهٔ خـارج از اوج، چرخه‌ی بلند مدت اختصاص می‌یابد.

۳-۱-۲ گام دوم: انتخاب مسیر

در این گام با در نظر گرفتن مصرف سوخت از الگوریتم دایجسترا جهت انتخاب بهترین مسیر استفاده می‌شود. با فرض این‌که برای رسیدن به مقصد مجموعه‌ای از مسیرها وجود دارد، طبق رابطه (٦) جهت شناخت وضعیت ترافیک از سـرعت تشخیص داده شـده توسط حسـگرها برای برآورد تعداد خودروها (N_x) می‌توان استفاده کرد [۱۷]:

$$N_x = D_x * S_x = C * e^{bV_x} * L_x \quad (۶)$$

به‌طوری که L_x طول مسـیر x، V_x میانگین سـرعت مسـیر C، x متغیر وابسـته به تعداد خودروها در مسیر و b متغیر وابسته به سرعت خودرو می‌باشد. برای محاسبه میانگین سرعت مسیر x می‌توان از رابطه (۷) استفاده کرد [۱۷].

$$V_x = \frac{1}{b} * \log \frac{K_x}{C * L_x} \quad (۷)$$

که در آن Lx طول مسیر x می باشد و K_x تعداد وزنی خودروها است که همان نسبت تعداد خودرو در مسیر x به تعداد خودروها در کل مسیر می‌باشد، C متغیر وابسته به تعداد خودروها در مسیر و b متغیر وابسته به سرعت خودرو می‌باشـد که پارامترهای محاسـبه شـدهٔ رابطه (۱) هسـتند. به دلیل این‌که مصرف سـوخت خودروهای مختلف متفاوت اسـت هزینه سـوخت هر خـودرو باید محاسبه شود. برای محاسبه مصرف سوخت هر خودرو می‌توان از رابطه (۸) استفاده کرد [۱۷]:

$$F(V_x) = a * \left(\frac{1}{b^2} V_x^{\,2} - \frac{1}{b} + c \right) \quad (۸)$$

در این تابع، با استفاده از متغیر a (ضریب بدست آمده برای نسبت تراکم به سرعت خودرو) و پارامترهای b و c که در رابطه (۷) محاسـبه شده‌اند هزینه مصرف سوخت محاسبه می‌گردد که برای انواع خودروها می‌تواند متفاوت باشد. خودرو هنگام استارت‌زدن و سرعت پایین، سوخت بیش‌تری مصرف می‌کند. با افزایش سرعت مصرف سوخت کاهـش می‌یابد و هنگامی که سـرعت از حد آسـتانه‌اش تجاوز می‌کند دوباره مصرف سوخت افزایش می‌یابد. بعد از تعیین هزینه‌ی سوخت، روش پیشنهادی بهترین مسیر را با توجه به میزان مصرف سوخت انتخاب می‌کند. شبه کد مرحله انتخاب بهترین مسـیر در شکل (۱) نشان داده شده است که با استفاده از الگوریتم دایجسترا کوتاهترین مسیر را بر اساس سوخت مصرفی انتخاب می‌کند.

در گام ۱، مصرف سوخت اولیه صفر و مقادیر مصرف سـوخت راس‌ها بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. اگر فقط یک راس وجود داشته باشـد الگوریتم پیشنهادی متوقف خواهد شـد. در گام ۲، مصرف سـوخت نسبت به شرایط ترافیکـی تغییر می‌کند. در گام‌هـای ۳ و ٤ حداقل مصرف سـوخت برای مسـیر انتخـاب می‌شـود. در ادامه روش رانندگی سبز مسـئول هدایت خودروها به منظور کاهش زمان پیمایش سفر در کل محدوده انتخابی شهر می‌باشد. ایـن روش برای کاهش ازدحام و پراکنده کردن ترافیک به یک راهنمای مسیر پویا نیاز دارد که داده‌های ترافیک قبلی را جمع‌آوری کرده و زمان حرکت روی یک مسـیر خاص را با محاسـبه تعداد گردش‌های به چپ و راسـت، تخمین بزند. در نهایت خودروها را به مسـیرهایی هدایت می‌کند که در نتیجه ترافیک پراکنده شـده و زمان سفر خودروها کاهش می‌یابد.

Algorithm ۱: finding shortest path based on fuel cost

۱: **Set** $i=۰$, $I_۰=\{u_۰=Source\}$, $Fu_۰=۰$, and $Fv=\infty$ for all V/u_0

If $|V|=1$, **then it stop, otherwise go to step 2.**

۲: **For each** v **in** V/I_i, **replace** F_v **by min** $(F_v, F_{u_i}+F^v_{u_i})$

If F_v **is replaced, put a label** (F_v, u_i, T_i) **on** v.

۳: **Find a vertex which min** $\{F(v): v \in V/I_i\}$, say u_i+1

۴: **Let** $I_{i+1}=I_i \cup u_{i+1}$

۵: **Replace** i **by** $i+1$. **If** $i=|V|-1$ **then stop, otherwise go to step 2.**

شکل ۱: شبه کد مرحله اول روش پیشنهادی جهت محاسبه‌ی کوتاه‌ترین مسیر بر اساس هزینه‌ی سوخت

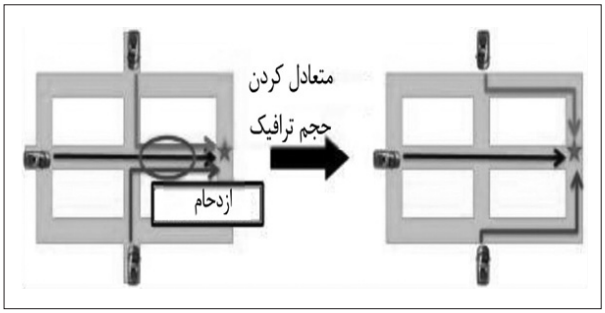
جزئیات این روش در ادامه بیان شده است:

- هر خودرو به مسیری که کوتاهترین زمان را دارد هدایت می‌گردد.
- زمان سفر از تمام بخش مسیر جمع‌آوری و نتیجه به‌عنوان خروجی بیان می‌شود.
- در صورت افزایش ۱٪ زمان سفر برای بالاترین زمان مسیری که ازدحام دارد، خودرو به مسیری که کوتاه‌ترین زمان سفر را دارد هدایت می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است.
- بهترین مسیر به خودروها جهت تعادل حجم ترافیک توصیه می‌گردد تا به نتیجه‌ای پایدار (متوسط زمان سفر از تمام خودروها) برسد.

Algorithm ۲: GreenDrive Algorithm (Input p: Departure places and destinations for all vehicles, S: road segments, E= initial estimated travel time for all road segments

```
۱:   R=R_best= finding shortest path (algorithm ۱)// R:travel routes for all vehicles, R_best: the best
     routes for all vehicles so far
۲:   for k=۱ to N do // N: number of iteration
۳:     M=SUMO_simulate (R,S); // M: observed travel time for all road segments
۴:     for each s ϵ S do
۵:       if s ϵ the top z congested road segments in M then //z:number of road segment to update
۶:         E_n,s=γe_n-۱,s+(۱-γ)m_s // γ: smoothing factor
۷:       Else
۸:         E_n,s=e_n-۱,s
۹:       end if
۱۰:    end for
۱۱:    En={e_n,s,…,e_n,sk}
۱۲:    R= finding shortest path (algorithm ۱)
۱۳:    if total travel time for R isshorter than R_best then
۱۴:      R_best=R;
۱۵:    end if
۱۶:  end for
۱۷:  Return R_best;
```

الگوریتم ۲ شبه کد روش رانندگی سبز را نشان می‌دهد. پارامترهای ورودی برای شبه کد ۲، مکان‌های مبداء و مقصد همه خودروها جهت برآورد اولیه زمان سفر برای تمام مسیرها می‌باشد. برآورد اولیه زمان سفر برای یک مسیر می‌تواند از طول زمان سفر و حد مجاز

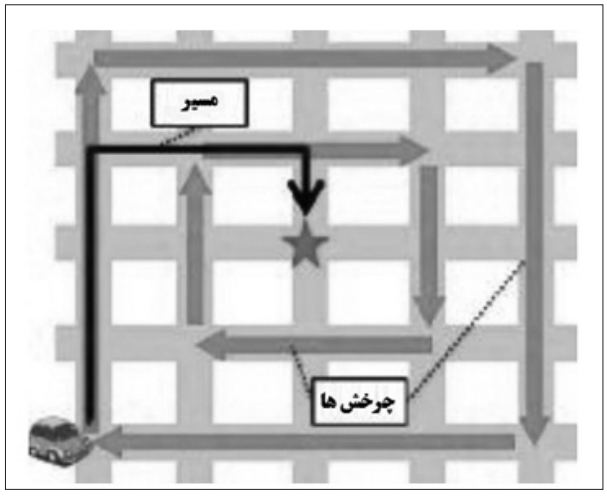


شکل ۲: تعادل در حجم ترافیک

سرعت قانونی محاسبه شود. خروجی الگوریتم نیز بهترین ترکیب از مسیرها برای تمام خودروها می‌باشد که می‌تواند به‌طور متوسط زمان سفر را به حداقل برساند. ابتدا بر اساس برآورد اولیه زمان سفر برای هر بخش از جاده، مسیر سفر آزمایشی برای هر خودرو تعیین می‌شود. این مسیرها بوسیله الگوریتم ۱ یافت می‌شود (خط ۱). سپس جستجو برای بهترین مسیر انجام می‌شود (خط ۲). شبیه‌ساز ترافیک SUMO مسیر سفر آزمایشی برای هر ماشین را اجرا کرده و زمان سفر بدست آمده در هر بخش از جاده در M قرار می‌گیرد (خط ۳). بر اساس نتیجه شبیه‌سازی، بالاترین تراکم بخش جاده انتخاب می‌شود و برآورد زمان سفر برای این بخش جاده به روز شده تا منعکس کننده زمان سفر باشد (خطوط ٤-٥). بر اساس برآورد به روز شده، مسیرهای رفت و برگشت آزمایشی با استفاده از الگوریتم ۱ کوتاه‌ترین زمان مسیر به روز می‌شود (خطوط ٦-۱۲). سپس مجموع مدت زمان سفر برای تمام وسایل نقلیه محاسبه شده و Rbest در صورت لزوم به روز می‌شود (خطوط ۱۳-۱٤). متغیر Rbest بهترین مسیرها در هر لحظه را نگه می‌دارد.

۳-۲- کنترل چراغ راهنمایی و تنظیم سرعت خودرو

برای کنترل چراغ راهنما از روشی به نام موج سبز استفاده شده است که متشکل از چندین چرخش می‌باشد. به منظور کاهش توقف، خودروها در حلقه‌های ایجاد شده چرخ می‌خورند. دلیل نام‌گذاری موج سبز به این علت است که حرکت خودروها به شکل دسته‌ای است و با رسیدن خودروها به هر تقاطع، چراغ مسیر مربوطه سبز می‌گردد.



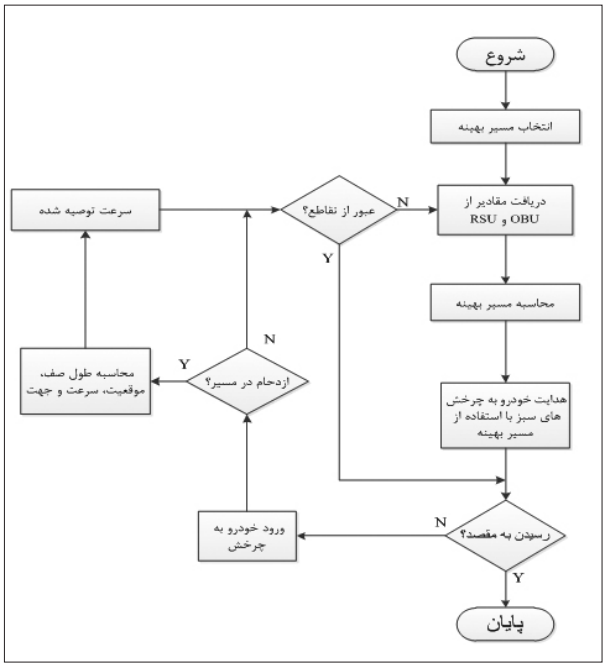
شکل ۳: مثالی از حرکت خودرو در چرخش های ایجاد شده

در واقع کنترل مجموعه‌ای از چراغ‌های راهنمایی که اجازه می‌دهند خودروها بدون توقف در تقاطع‌ها عبور کنند را برعهده دارد. در موج سبز اولویت حرکت به یک جهت داده می‌شود و خودروهای در حال حرکت با سرعت‌های قانونی به ندرت با چراغ‌های قرمز روبه‌رو می‌شوند. در شکل (۳) حرکت در چرخش‌های موج سبز نشان داده شده است.

در روش پیشنهادی جهت کنترل چراغ راهنمایی با در نظر گرفتن اطلاعات ترافیک در محدوده تقاطع به این صورت عمل می‌نماییم که توسط ارتباطات بین خودرویی در شرایط ازدحام ترافیک وقتی با قرار گرفتن خودرو در چرخش، امکان عبور از تقاطع وجود ندارد، سرعت توصیه شده به خودروها پیشنهاد می‌شود.

اگر خودرو با سرعت ماشین جلویی به چراغ سبز برسد و بتواند از تقاطع عبور کند سرعت توصیه شده همان سرعت ماشین جلویی است. اگر با سرعت فعلی به چراغ سبز نرسد و فاصله نسبت به تقاطع و ماشین جلویی زیاد باشد می‌بایست سرعت خود را حفظ کند. چنانچه فاصله زیاد نباشد، در صورت نیاز فوری به ترمز، باید ترمز گرفته و در غیر این‌صورت پدال گاز را رها کرده و یا با توجه به سرعت ماشین جلویی ترمز بگیرد.

مزیت روش پیشنهادی نسبت به موج سبز این است



شکل ۴:روندنمای روش پیشنهادی

که باعث کاهش ازدحام و ترافیک به‌خصوص در حلقه‌های داخلی شده و در نتیجه نسبت به روش موج سبز خودروها توقف کمتری خواهند داشت که باعث کاهش بیشتر دی‌اکسیدکربن می‌گردد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (٤) نشان داده شده است.

۴- نتایج شبیه سازی

بهترین شبیه‌ساز برای شبکه‌های موردی سیار از جهت انعطاف‌پذیری و کارایی نرم‌افزار NS-2 می‌باشد که یک شبیه‌ساز بسیار قوی برای شبکه به شمار می‌رود. پروتکل‌های زیادی در این شبیه‌ساز با معیارهای مختلف ارائه شده‌اند. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی از کدهای C++ استفاده می‌کند. با استفاده از این نوع شبیه‌ساز می‌توان انواع شبکه را پیاده‌سازی و شبیه‌سازی کرد و عملکرد شبکه را مشاهده نمود. برای پیاده سازی روش پیشنهادی از شبیه ساز NS-2 استفاده شده است. خیابان‌های اصلی در این شبکه دارای دو باند و هر باند دارای دو مسیر برای هر جهت و خیابان‌های یک طرفه زیادی نیز موجود می‌باشد. تعداد خودرو در این شبیه‌سازی ۵۰ خودرو

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

متغیرهای شبیه ساز	مقدار
Simulator	NS۲ ۲.۲۹
Simulation Duration(See)	۴۰،۶۰،۸۰،۱۰۰،۱۲۰،۱۴۰
Simulation area	۱۰۰۰m*۱۰۰۰m
Number of vehicles	۵۰
Queue Size	۲۰۰
Packet rate	۴ packet/sec
Traffic type	CBR(UDP)
Data payload	۵۱۲bytes/packet

تعیین شده است. مقادیر پارامترهایی که در شبیه‌سازی استفاده شده است در جدول (۱) نشان داده شده است.

٤-۱- معیارهای ارزیابی

نسبت تحویل بسته[4]

در شبکه‌های موردی سیار معمولاً ارسال بسته به صورت گام به گام یا از طریق چندین پرش انجام می‌شود. نرخ تحویل بسته در شبکه‌های موردی سیار از اهمیت بالایی برخوردار است. نسبت تحویل بسته در این نوع شبکه‌ها از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$PDR= (PT / PR) \times ۱۰۰ \qquad (۹)$$

به‌طوری‌که در رابطه فوق PT تعداد بسته‌های ارسال شده و PR تعداد بسته‌های دریافت شده می‌باشد و PDR نسبت تحویل بسته را نشان می‌دهد.

تعداد بسته های از دست رفته[5]

از دست رفتن بسته‌ها در شبکه‌ها می‌تواند به دلایل مختلفی اتفاق افتد به‌عنوان مثال بسته‌های ارسالی در شبکه موفق به رسیدن به گره مقصد نشوند یا بر اساس خطای بیتی یا سخت افزار معیوب، بسته‌ها از دست بروند. وجود نویز در شبکه نیز می‌تواند سبب از دست رفتن بسته‌ها شود. از دست رفتن تعدادی بسته در شبکه می‌تواند توسط ترافیک که در این نوع شبکه‌ها وجود دارد ایجاد شود.

تاخیر انتها به انتها[6]

در شبکه‌های موردی سیار به مدت زمانی که بسته‌های اطلاعاتی در سراسر شبکه از گره مبدا به گره مقصد انتقال داده می‌شوند تاخیر انتها به انتها می‌گویند. این پارامتر با میلی ثانیه نشان داده می‌شود.

توان عملیاتی[7]

یک شبکه را می‌توان با استفاده از ابزارهای مختلف موجود بر روی سیستم عامل‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. در اینجا نظریه‌ای که بر اساس آن این ابزارها برای اندازه‌گیری تنظیم می‌شوند و مسائل مربوط به این اندازه‌گیری‌ها را توضیح می‌دهد، بیان می‌کنیم. دلیل اندازه‌گیری توان عملیاتی در شبکه این است که افراد اغلب تمایل دارند از حداکثر توان عملیاتی داده در یک لینک ارتباطی و یا دسترسی به شبکه، در واحد بیت بر ثانیه، اطلاع داشته باشند. روش رایج برای اندازه‌گیری این کمیت این است که یک فایل بزرگ را از یک سیستم به سیستم دیگر انتقال می‌دهند و زمان مورد نیاز برای تکمیل انتقال و یا کپی فایل را محاسبه می‌کنند سپس توان عملیاتی با تقسیم اندازه فایل در آن زمان، در واحد مگابیت بر ثانیه، کیلوبیت بر ثانیه و یا بایت در ثانیه به‌دست می‌آید. رابطه (۱۰) نحوه محاسبه توان عملیاتی در شبکه را نشان می‌دهد که معمولا توان عملیاتی در شبکه‌های موردی بی سیم بیت بر ثانیه می‌باشد [۱۸].

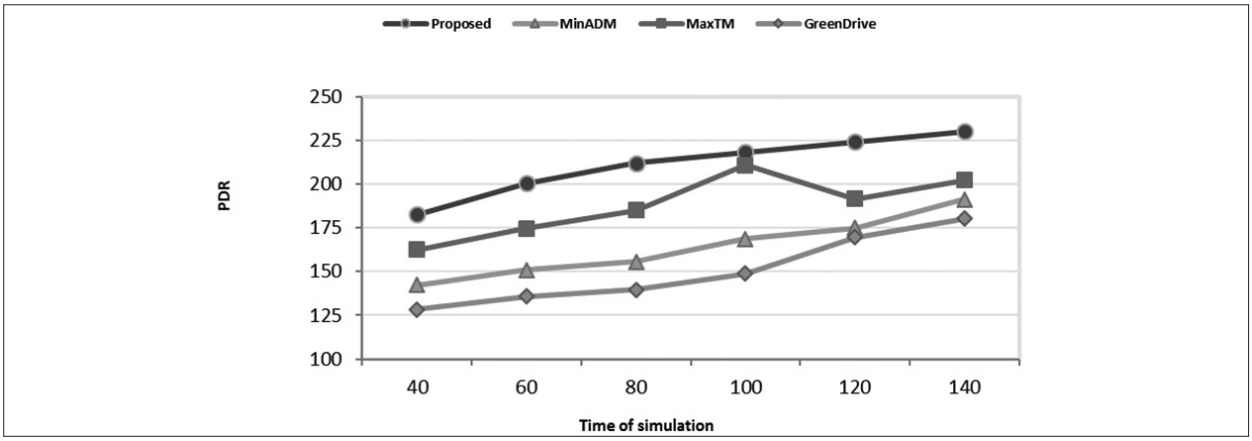
$$X = C / T \qquad (۱۰)$$

به‌طوری‌که X نشان دهنده توان عملیاتی است و C تعداد درخواست‌هایی که توسط سیستم تکمیل شده است را نشان می‌دهد. T نشان دهنده کل زمانی است که سیستم در آن زمان مانیتور شده است.

تخمین انتشار دی‌اکسید کربن

انتشار دی‌اکسیدکربن خودروها تا حد زیادی تحت تاثیر شرایط جاده و شرایط جریان ترافیک و میزان مصرف سوخت می‌باشد. به عنوان مثال، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در جاده‌های شهری نسبت به جاده‌های روستایی و جاده‌های سربالایی نسبت به جاده‌های هموار، روند صعودی دارد. اگر شرایط جاده ثابت بوده و با

4- Packet Delivery Ratio
5- Lost Packets
6- End to End Delay
7- Throughput



شکل ۵: مقایسه نسبت تحویل بسته در روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

شـــرایط متفاوت ترافیکی مثلا" با ازدحام ترافیک برخورد کنیم نرخ متفاوتی از انتشار دی‌اکسیدکربن مشاهده خواهد شد [۱۹]. به منظور تخمین انتشار دی‌اکسیدکربن و با توجه بـــه توضیحات فوق، نیاز به انتخاب مدل برآورد مناســـب ضریب خودرو-کیلومتـــر برای هر نوع خودرو، به منظور بـــرآورد کل تولیـــد گازهای گلخانه‌ای می باشـــد. مدل در نظر گرفته شده برای شرایط متغیر ترافیک با پارامترهای متغیر ســـرعت خودرو، افزایش و کاهش شـــتاب و زمان ســـفر مناسب می‌باشـــد. رابطه (۱۱) نحوه محاسبه میزان انتشار کربن خودرو را در شـــبکه نشان می‌دهد که واحد اندازه‌گیری آن گرم بر ساعت می‌باشد.

$$E = K_e \left(0.3T + 0.028D + 0.056Aee\right) \quad (۱۱)$$

به‌طوری‌که E نشان دهنده میزان برآورد دی‌اکسیدکربن اســـت و K_E ضریب بیـــن میزان مصرف بنزین و انتشـــار دی‌اکســـیدکربن، T زمان کل سفر تا رسیدن به مقصد و D مسافت مقصد سفر می باشد. Aee انرژی شتاب است که از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید [۲۰].

$$Aee = \sum_{k=1}^{k} \sigma_k \left(v_k^2 - v_{k-1}^2\right) \quad (۱۲)$$

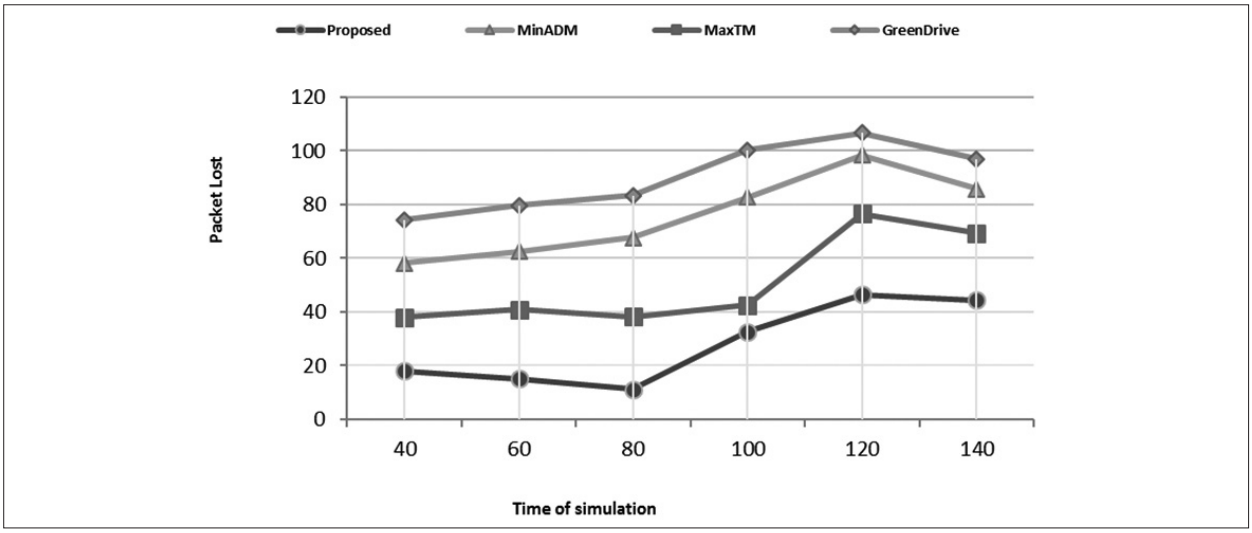
به‌طوری‌کـــه Aee معادل انرژی شـــتاب (برحســـب مجذور متر بر مجذور ثانیه) اســـت که در آن V_K، سرعت در زمان k و σ_k در صورتی که $\left(v_k > v_{k-1}\right)$ باشد مساوی یـــک و در غیـــر این‌صورت صفر خواهد بود. زمان ســـفر هر خودرو از جمع زمان ســـفر جریان آزاد و زمان تاخیر خودروها به‌دست می‌آید. Aee از محاسبه زمان سفر در هنگام کاهش و افزایش شتاب محاسبه می‌گردد.

٤-۲- نتایج ارزیابی و تحلیل

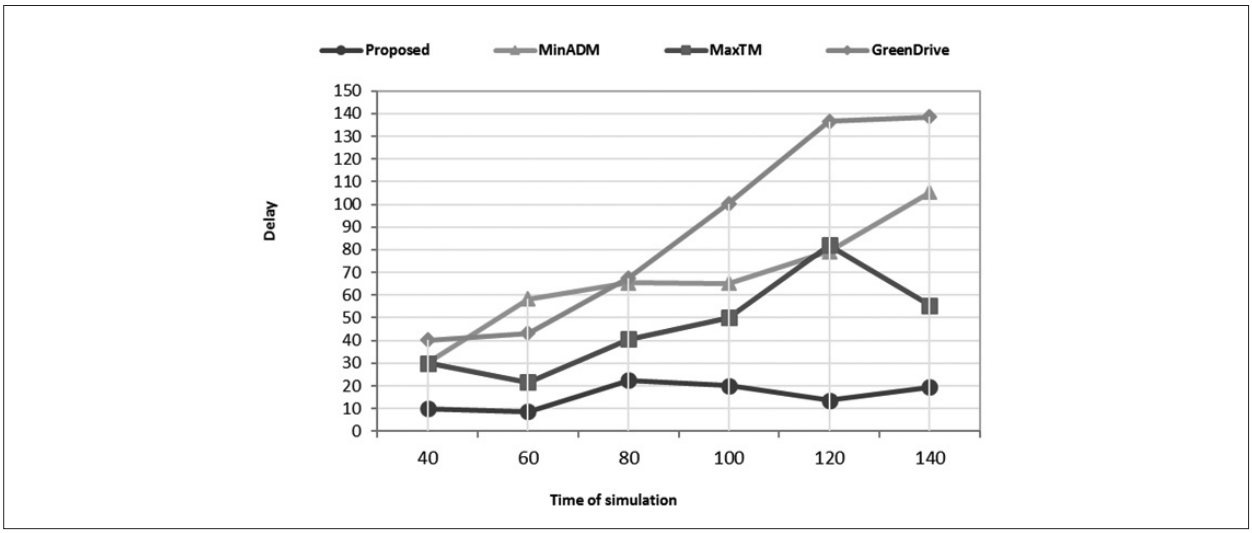
لازم به ذکر است معیارهای ارزیابی روش پیشنهادی با روش های مرجع [۸]، مرجع [۱٦] و مرجع [۱۷] مقایســـه شده است. شبیه‌سازی برای تعداد دفعات مناسبی بررسی شده است تا نتایج بهینه را ارائه دهد. همان طور که در شکل (۵) نشـــان داده شده است شبیه‌سازی روش پیشنهادی با ۵۰ گـــره در زمان های مختلـــف ۱٤۰، ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ٦۰، ٤۰ انجام شـــده اســـت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر نسبت تحویل بسته در زمان‌های مختلف عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

در ادامه بررسی می‌شود که علاوه بر بهبود در نسبت تحویل بســـته تاثیر روش ارائه شـــده در سایر معیارهای دیگر نظیر تاخیر انتها به انتها، توان عملیاتی تعداد بسته‌های حذف شده چگونه خواهد بود.

نرخ کم شدن یا از بین رفتن بسته‌ها، یک مقیاس نسبی از تعداد بســـته‌های اطلاعاتی می‌باشـــد که به‌طور صحیح انتقال یافته و به مقصد می‌رســـند، به کل تعداد بســـته‌های اطلاعاتی که ارســـال شـــده‌اند. این عامل به‌صورت درصد



شکل ۶: مقایسه تعداد بسته‌های از دست رفته در روش پیشنهادی با سایر روشها

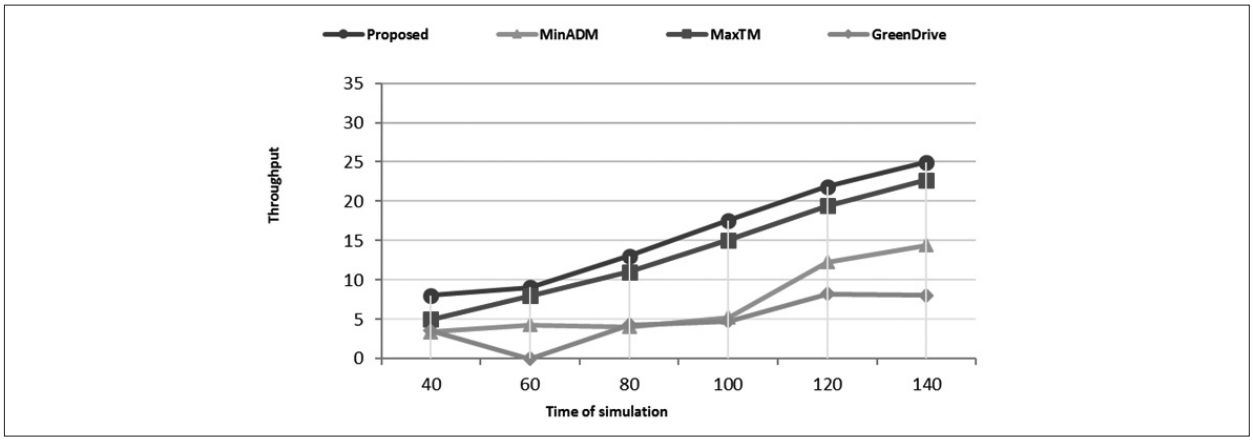


شکل ۷: مقایسه تاخیر انتها به انتها در روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

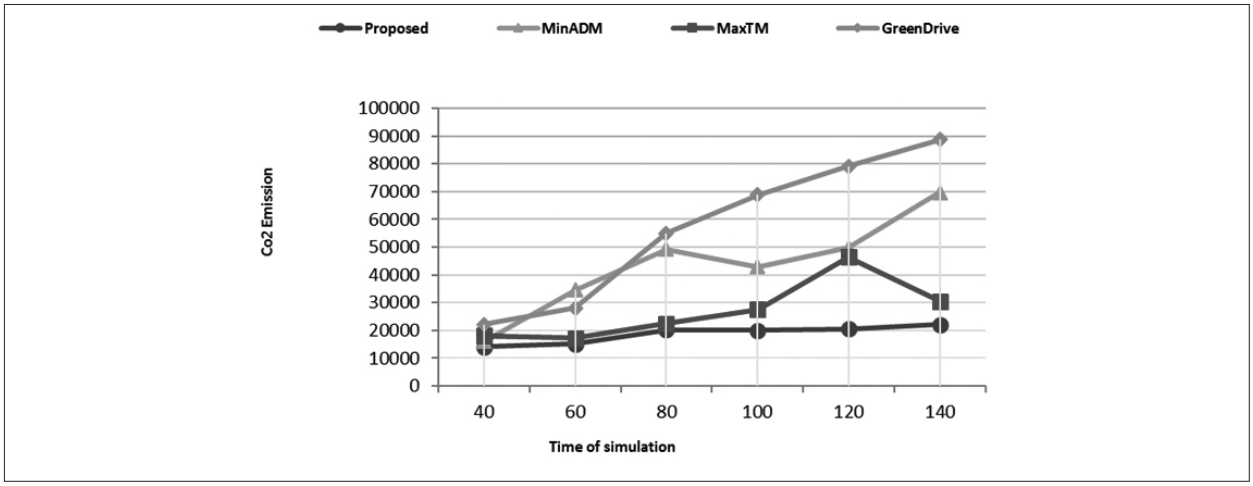
بیان می‌شـود. کم شدن بسته‌ها از دیدگاه کیفیت سرویس به شکسـت‌های شبکه که به دلیل قطع شـدن و یا اشکال در اتصالات بوجود می‌آیند، وابسـته نمی باشـد بلکه به شکسـت‌های شـبکه که به دلیل ازدحام یـا تراکم انتقال اطلاعات بوجود می‌آیند، وابسـته اسـت. نمودار شکل (٦) بیانگر آن است که روش پیشنهادی در روند از دست دادن بسـته‌ها به دلیل ترافیک رو به کاهش بوده است که نشان می‌دهد خودروها در مسیر بهینه و با ازدحام کمتر در حال حرکت هستند و نسـبت به سایر روش‌های مورد مقایسه عملکرد بهتری دارد.

در شـبکه ها معمولا تاخیر انتها به انتها اشاره به مدت زمانی دارد که بسـته‌های اطلاعاتی در سرتاسـر شـبکه از گـره مبدا به گره مقصـد انتقال داده می‌شـوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر مدت زمـان تاخیر انتها به انتها (حـدود ۱۰ میلی ثانیه از مبدا تا مقصد) با افزایش گذردهی مسـیرها زمان سفر را کاهش داده است و عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه دارد که در شکل (۷) مشاهده می‌شود.

همیشه توان عملیاتی جزء معیارهای مهم و اساسی در شبکه‌های موردی سیار بی‌سیم به حساب می‌آید از این‌رو برای ارزیابی روش پیشنهادی این معیار نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار شـکل (۸) نشـان می‌دهد که روش



شکل ۸: مقایسه توان عملیاتی در روش پیشنهادی با سایر روش‌ها



شکل ۹: مقایسه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

پیشـــنهادی در زمان‌های ٤٠ تـــا ١٤٠ عملکرد بهتری دارد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شده است به تعداد کارهایـــی که در واحد زمان انجام می‌شـــود توان عملیاتی گفته می‌شود. توان عملیاتی روش پیشنهادی با ٥٠ گره در زمان‌هـــای مختلف ١٤٠، ١٢٠، ١٠٠، ٨٠، ٦٠، ٤٠ محاســـبه شد. نتایج شبیه‌ســـازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در رونـــد صعودی تـــوان عملیاتی (بیـــش از ١٥ درصد) نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه عملکرد بهتری در زمان‌های مختلف دارد.

در مدل اســـتفاده شـــده جهت برآورد میزان انتشـــار دی‌اکسیدکربن، زمان سفرخودروها، مقصد سفر و ارزش معادل انرژی شتاب به عنوان متغیر معرفی شدند. نمودار شکل (٩) نشـــان می‌دهد که روش پیشنهادی در زمان‌های ٨٠ تا ١٤٠ از نظر نتایج انتشار co2 دارای کاهش چشمگیر نسبت به روش‌های مورد مقایسه دارد که این بیانگر کارایی بهتر مدل پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشـــی برای کاهـــش توقف خودروها بر اساس ارتباطات بین خودرویی ارائه شده است. در این روش هم بهترین مسیر از لحاظ مصرف سوخت برای رسیدن به مقصد و هم سرعت رانندگی در آن مسیر به راننده پیشنهاد می‌شـــود و با استفاده از آن چراغ‌های راهنمایی موجود در تقاطع‌های بین راه برنامه‌ریزی می‌گردند تا خودرو کمترین توقف را داشته باشد. در بخش اول روش پیشنهادی با توجه به مصرف سوخت خودرو و ازدحام مسیرها یک مسیر به

راننده پیشـــنهاد داده می‌شود. در صورت وجود ازدحام در مسیر، روشی پیشـــنهاد می‌گردد تا علاوه بر کاهش توقف خودروها از ســـرعت‌های بـــالا و پاییـــن غیرضروری نیز اجتناب گـــردد و گذردهی تقاطـــع را افزایش دهد. در بخش چرخش سبز مشکل اولویت جهت و سرعت خودرو در تراکم ترافیک حل گردیده است و در بخش رانندگی سبز، خودرو با اســـتفاده از روش کوتاهترین مسیر و ارتباطات موردی بین خودروها ضمن کاهش زمان پیمایش به درون چرخش سبز هدایت می‌شود و در نهایت تولید دی‌اکسیدکربن حاصل از حمل و نقل شـــهری کاهش پیدا می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشـــنهادی ضمن کاهش زمان کل سفر و افزایش توان عبوری تقاطع به میزان ۲۲/٤ ٪ به بهبود عملکرد ترافیک کمک کرده و نسبت به سایر روش‌های مورد مقایسه به‌طور متوسط ۲۸٪ تولید دی‌اکسیدکربن را کاهش داده است.

مراجع

1. Dargay, Joyce, Dermot Gately, and Martin Sommer. "Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030." The Energy Journal (2007): 143-70.
2. Pindilli, Emily. “Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis (Aeris)–Benefit-Cost Analysis.” Prepared by United States Department of Transportation, Federal Highway Administration Office (2012).
3. Chen, Po-Yu, Yi-Min Guo, and Wen-Tsuen Chen. “Fuel-Saving Navigation System in Vanets.” Paper presented at the Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd, 2010.
4. Li, Jinyuan, Xin Pan, and Xiqin Wang. “State-Space Equations and the First-Phase Algorithm for Signal Control of Single Intersections.” Tsinghua Science & Technology 12, no. 2 (2007): 231-35.
5. Azimirad, Ehsan, Naser Pariz, and M Bagher Naghibi Sistani. “A Novel Fuzzy Model and Control of Single Intersection at Urban Traffic Network.” IEEE Systems Journal 4, no. 1 (2010): 107-11.
6. Li, Chunxiao, and Shigeru Shimamoto. “An Open Traffic Light Control Model for Reducing Vehicles’$\Hbox {Co} _ {2} $ Emissions Based on Etc Vehicles.” IEEE Transactions on Vehicular Technology 61, no. 1 (2012): 97-110.
7. Li, Xiao-dong, Fan-zhi Zeng, Guang-yi Chen, and Weixiong Ding. “Design of a Multi-Route Optimal Simulation System for Urban Traffic Controls.” Computer Engineering & Science 10 (2010): 126-30.
8. Xu, Jiaxing, Weihua Sun, Naoki Shibata, and Minora Ito. “Greenswirl: Combining Traffic Signal Control and Route Guidance for Reducing Traffic Congestion.” Paper presented at the Vehicular Networking Conference (VNC), 2014 IEEE, 2014.
9. Warberg, Andreas, Jesper Larsen, and Rene Munk Jørgensen. “Green Wave Traffic Optimization-a Survey” Informatics and Mathematical Modelling, 2008.
10. Sasaki, Masashi, and Takashi Nagatani. “Transition and Saturation of Traffic Flow Controlled by Traffic Lights.” Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 325, no. 3 (2003): 531-46.
11. Ikeda, Takuro, Eiji Kitagawa, and Eishi Morimatsu. “Environmental Evaluation of Non-Stop Driving Assistance Service by High-Spatiotemporal Resolution Traffic Simulator.” Paper presented at the 17th ITS World Congress, 2010.
12. Junges, Robert, and Ana LC Bazzan. “Evaluating the Performance of Dcop Algorithms in a Real World, Dynamic Problem.” Paper presented at the Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 2, 2008.
13. Shen, Guo-jiang, and Wei-ming Xu. “Study on Traffic Trunk Dynamic Two-Direction Green Wave Control Technique.” Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 42, no. 9 (2008): 1625-30.
14. Taale, H. “Comparing Methods to Optimise Vehicle Actuated Signal Control.” (2002).
15. Gradinescu, Victor, Cristian Gorgorin, Raluca Diaconescu, Valentin Cristea, and Liviu Iftode. “Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication.” Paper presented at the Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th, 2007.
16. Lee, Wei-Hsun, Yen-Chen Lai, and Pei-Yin Chen. “A Study on Energy Saving and Co2 Emission Reduction on Signal Countdown Extension by Vehicular Ad Hoc Networks.” IEEE transactions on vehicular technology 64, no. 3 (2015): 890-900.
17. Hershberger, John, Matthew Maxel, and Subhash Suri. “Finding the K Shortest Simple Paths: A New Algorithm and Its Implementation.” ACM Transactions on Algorithms (TALG) 3, no. 4 (2007): 45.
18. Chaudhary, Nadeem A, Vijay G Kovvali, and SM Mahabubul Alam. “Guidelines for Selecting Signal Timing Software.” Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2002.
19. Barth, Matthew, and Kanok Boriboonsomsin. “Traffic Congestion and Greenhouse Gases.” Access Magazine 1, no. 35 (2009).
20. Frey, H Christopher, Alper Unal, Nagui M Rouphail, and James D Colyar. “On-Road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument.” Journal of the Air & Waste Management Association 53, no. 8 (2003): 992-1002.