

به کارگیری نرم افزار شبیه ساز به منظور تخمین مقدار آلاینده های تولید شده در بزرگراه مطالعه موردی بزرگراه نیایش تهران

فریدون مقدس نژاد*، فهیمه گل بابایی**، علیرضا نوری***

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۵/۲

چکیده

یکی از مهم ترین مشکلات مسئولین مدیریت شهری در کلان شهر تهران، همواره تولید آلاینده ها در سطح شهر بوده است که با توجه به اهمیت روزافزون آلاینده های ناشی از تردد خودروها در سطح شهر مدیریت حمل و نقل و ترافیک شهری و مدیریت تولید آلاینده های هوا در سطح شهر دو جزء کاملاً لاینفک به حساب می آیند. در سال های اخیر برنامه ریزی و اثرسنجی راهبردهای ترافیکی توسط نرم افزارهای شبیه ساز ترافیک رشد قابل توجهی یافته است و با ترکیب نرم افزار شبیه سازی ترافیک و مدل های تولید آلاینده، عملاً ابزاری بسیار قوی برای تصمیم گیری بر اساس میزان تولید آلاینده در اختیار مدیران شهری قرار گرفته است. در این مقاله پس از کالیبراسیون و دقیق نمودن مدل شبیه سازی برای بزرگراه نیایش تهران، میزان تولید آلاینده در این بخش از شبکه، بدون اعمال راهبردهای مدیریت شبکه و با اعمال استراتژی کاهش سرعت جریان ترافیک در معبر محاسبه گردید. با مقایسه راهبردهای مذکور به خوبی می توان گزینه بهتر را یافته و در شبکه واقعی با اطمینان بسیار بیشتر به کار برد.

واژگان کلیدی

شبیه سازی، مدیریت آلاینده ها، آلودگی هوا، ترافیک شهری، بزرگراه درون شهری

Email: f.moghadas@yahoo.com

Email: f.golbabaie@yahoo.com

Email: alireza.noory@gmail.com

* عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

** کارشناس ارشد حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

*** کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

در شهر تهران که یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران است، بحران آلودگی هوا پدیده جدیدی نیست. در دهه‌های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ همراه با رشد چشمگیر شهر تهران، شمار وسایل نقلیه موجود افزایش بسیار چشمگیری داشت. در همین زمان تعداد بسیار زیادی از کارخانه‌ها در حومه شهر به وجود آمدند که بسیاری از آن‌ها در جنوب، غرب و جنوب غربی شهر گسترده بودند. گسترش شهر در کنار وضعیت خاص جغرافیایی تهران موجب گردیده است که حل مشکل آلودگی هوای شهر تهران بسیار دشوار گردد و عملاً در برخی از روزهای سال به بحرانی جدی فراروی مسئولین شهر مبدل شود. بر اساس مطالعات دکتر پوراحمد در سال ۱۳۷۷، مشخصات جغرافیایی تهران از جمله جهت وزش باد، میزان بارش، پدیده وارونگی و توپولوژی منطقه از عوامل مؤثر بر کیفیت هوای تهران هست. شمال تهران توسط رشته‌کوه البرز و بخش‌های شرقی و جنوبی آن توسط برخی کوه‌های با ارتفاع پایین‌تر همانند کوه بی‌بی‌شهربانو احاطه شده است. باد غالب منطقه از سمت غرب به شرق می‌وزد و با توجه به قرارگیری بسیاری از مراکز صنعتی در جنوب و جنوب غرب، باد آلودگی‌های صنعتی تولیدشده را با خود به شهر آورده و در محدوده کوه‌هایزک‌کرده به دام می‌اندازد، این در حالی است که در صورت عدم وجود کوه‌ها باد آلودگی‌های شهر را به محلی دورتر منتقل می‌نمود و میزان آلودگی شهر کاهش می‌یافت (Pour Ahmad, 1998). با توجه به این که عمده منابع آلودگی هوای شهر، آلاینده‌های حاصل از فعالیت خودروها و کارخانه‌ها بوده است، مسئولین شهر با انتقال کارخانه‌ها آلاینده به محلی دورتر از شهر اقدام به کم‌رنگ‌تر نمودن نقش کارخانه‌ها در آلودگی شهر نموده‌اند. با وجود مؤثر بودن استراتژی خروج کارخانه‌ها از فضای شهری و کاهش آلاینده‌های تولیدشده توسط آن‌ها، آلودگی تولیدشده توسط خودروها افزایش روزافزونی داشته است. شمار زیاد خودروهایی که در شهر تهران تردد می‌کنند، و افزایش سریع تعداد این آن‌ها، موجب شده است که نقش وسایل نقلیه در آلودگی هوای شهر بسیار بالا باشد. الزامی شدن معاینه فنی خودروها، افزایش قیمت سوخت، بهبود وضعیت حمل‌ونقل عمومی در شبکه و اعمال محدودیت تردد زوج یا فرد در شبکه از جمله راهکارهای بوده‌اند که در مهر و موم‌های اخیر توسط مسئولین در شبکه اعمال شده‌اند. با این وجود آلودگی هوای تهران هر ساله چندین روز موجب تعطیلی ادارات و مراکز آموزشی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین گام‌های پیش‌گیری و مدیریت بحران آلودگی هوا پیش‌بینی میزان آلاینده‌های تولیدشده در سطح شهر هست که با توجه به توانایی شبیه‌سازهای ترافیک که به عنوان یکی از بهترین ابزار مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک شناخته شده‌اند، در صورت ترکیب یک شبیه‌ساز ترافیک با مدل‌های تولید آلاینده می‌توان به یکی از مؤثرترین ابزارهای پیش‌بینی میزان آلاینده‌های تولیدشده در شبکه حمل‌ونقل دست یافت. در این تحقیق ابتدا به معرفی ساختار به کار گرفته شده در یکی از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ترافیک موجود در بازار می‌پردازیم و سپس مدل تولید آلاینده به کار گرفته شده در تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پس از معرفی زیرساخت‌ها، یکی از استراتژی قابل به کارگیری در شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل اعمال محدودیت سرعت در شبکه است. با بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بخشی از شبکه بزرگراهی شهر تهران در کنار اعمال استراتژی مذکور می‌توان اعمال این استراتژی را اثر سنجی کرد و با مقایسه آن با وضعیت شبکه بدون اعمال استراتژی بهترین گزینه را مشخص نمود.

نرم‌افزار بکار گرفته شده در این مقاله نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیک شرکت TSS هست که از پیشرفته‌ترین نسخه موجود در بازار جهانی (نسخه ۶.۱) برای انجام این پروژه استفاده گردیده است که نسبت به نسخه‌های Getram و NG قابلیت‌های بیشتری را دارا هست. یک مدل شبیه‌سازی مصرف سوخت و دو مدل تولید آلاینده در این نسخه از نرم‌افزار قرار دارد که یکی از مدل‌های تولید آلاینده بر اساس پروژه QUARTET و دیگری مدل توسعه یافته‌ای است که میزان دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق و ترکیبات آلی فرار تولیدشده در شبکه را محاسبه می‌کند. میزان این گازها به طور کلی بر اساس میزان سرعت لحظه‌ای و شتاب خودرو و از فرمول Panis و همکارانش محاسبه می‌گردد. کاربر با تنظیم مدل ترافیکی برای منطقه بررسی و اختصاص پارامترهای برداشت شده از شبکه واقعی به مدل می‌تواند مقدار آلاینده تولیدشده توسط تک‌تک خودروها را به دست آورده و نهایتاً با در نظر گرفتن مجموع آلاینده‌های تولیدشده توسط تمامی خودروها مقدار آن را برای تمامی شبکه یا بخش خاصی از شبکه به دست آورد (Rinelli and Feddo, 2011). نرم‌افزار مورد استفاده پیش از این پروژه در بسیاری از نقاط جهان به کار گرفته شده و ارزیابی شده است. در کشور اسپانیا بیش از ۱۰ پروژه بزرگ توسط این نرم‌افزار به انجام رسیده است. در مطالعه‌ای که توسط جنزو همکارانش در سال ۲۰۰۴ در مرکز تحقیقات حمل‌ونقل آلاباما صورت پذیرفت از نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق استفاده شد که بر اساس آن نرم‌افزار برای راه‌های آمریکایی کارکرد خوبی را از خود نشان داده است و نسبت به سایر نرم‌افزارهای هم‌رده خود ارجحیت دارد (Jones et al., 2004). در سال ۲۰۰۷ وینیوپادیت تحقیقاتی را در دانشگاه Queensland انجام داد که شیوه کنترل رمپ ALINEA را بررسی می‌نمود (Winyoopadit, 2007). در سال ۱۳۸۹ اسکندری و همکاران در دانشگاه تربیت مدرس تهران توسط نرم‌افزار شرکت TSS به بررسی به کارگیری همزمان کنترل رمپ و محدودیت سرعت متغیر بر جریان و زمان سفر کل در بزرگراه نیایش تهران پرداختند (اسکندری و فرخ نیا، ۱۳۸۹). با توجه به اینکه شبیه‌سازی بر اساس یک مدل Time based صورت پذیرفته است، در هر گام زمانی از شبیه‌سازی فرمول Panis برای یافتن میزان آلاینده تولیدشده هر یک از

خودروها در آن گام زمانی مورد استفاده قرار می گیرند که با وجود یکسان بودن فرمول برای تک تک خودروها، ضرایب موجود در فرمول برای انواع مختلف خودروها با انواع سوختها، مقادیر متفاوتی را به خود اختصاص می دهد. این مدل تحت نام مدل انتشار آبی آلاینده (instantaneous emission model) نام گرفته است که پارامترهای خروجی آن میزان دی اکسید کربن (CO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ترکیبات فرار آلی (VOC) و ذرات معلق (PM) هست. یکپارچه ترافیک - انتشار آلاینده (ITEM) همان گونه که از نام آن ها برمی آید، از دو بخش کلی نرم افزار شبیه ساز و مدل انتشار آلاینده تشکیل شده است که این دو در کنار یکدیگر امکان پیش بینی و تخمین دقیق مقدار آلاینده تولید شده در شبکه را به وجود می آورند. در این مدل ها، ابتدا پس از اعمال استراتژی حمل و نقلی مورد نظر، با توجه به رفتار ترافیکی تک تک خودروها میزان آلاینده تولید شده در شبکه حمل و نقلیه صورت تقریبی و وابسته به میزان دقت پارامترهای ورودی به شبیه ساز به دست می آید. پس از پیش بینی میزان آلاینده تولید شده توسط شبکه حمل و نقلی، بر اساس وضعیت جغرافیایی و آب و هوای منطقه می توان میزان آلودگی هوای شهر را برآورد نموده و بر اساس آن عملکرد استراتژی مذکور را سنجید. اما این امر کاملاً به دو بخش اصلی ذکر شده در مدل یکپارچه یعنی مدل شبیه سازی ترافیک و مدل انتشار آلاینده ها بستگی دارد.

روش تحقیق

شبیه سازی میکروسکوپی ترافیک قابلیت ارزیابی شرایط رانندگی به صورت لحظه به لحظه و آماربرداری از سرعت و شتاب خودروها را در تمامی بازه های شبیه سازی دارا هست (Barcelo et. al, 1996). هر یک از نرم افزارهای شبیه سازی ترافیک از اجزاء اولیه و زیرساخت هایی تشکیل شده اند که نحوه رفتار رانندگان در مدل را کنترل می کند و آن را با رفتار واقعی رانندگان منطبق می سازد. از مهم ترین این اجزاء مدل هایی تحت نام ($Car following models$) یا مدل های تعقیب هستند که مشخص می سازند که یک راننده چگونه راننده جلویی را تعقیب می کند و سرعت خود را با او مطابقت می دهد که نهایتاً سرعت و شتاب هر وسیله در هنگام تردد در شبکه، از این مدل به دست می آید. نرم افزاری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، از مدل تعقیب Gipps استفاده می کند که اطلاعات سرعت، شتاب و شتاب کاهنده را فراهم می سازد و از دو جزء اصلی شتاب و شتاب کاهنده تشکیل شده است (Gipps, 1986). شتاب گیری با تعریف یک سرعت مطلوب برای رانندگان انجام می شود که هر راننده تلاش می کند به سرعت مطلوب تعریف شده برای خود دست یابد. در هر گام شبیه سازی سرعت نهایی گام محاسبه می شود و به سرعت قبلی خودرو افزوده می گردد. عملیات شتاب گیری تا جایی پیش می رود که یا حضور خودروی دیگری در مقابل خودروی مورد بررسی مانع افزایش سرعت گردد و یا خودرو به سرعت مطلوب خود دست یابد. در مدل Gipps بیان گردیده است که ماکزیمم سرعت قابل دستیابی در بازه زمانی ($t, t+T$) برای وسیله نقلیه n از فرمول ۱ به دست می آید.

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5 a(n) T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (1)$$

که در آن :

$V(n, t)$: سرعت وسیله نقلیه n در زمان t

$V^*(n)$: سرعت مطلوب وسیله نقلیه n برای مقطعی از راه که در آن قرار دارد.

$a(n)$: شتاب بیشینه برای وسیله نقلیه n

T : زمان عکس العمل (Olstam and Tapani, 2001).

از سوی دیگر، بیشینه سرعتی که وسیله نقلیه شماره n در همان بازه زمانی بیان شده در فرمول (۱) ولی این بار با حضور یک خودرو در مقابل آن (خودروی شماره $n-1$) و در همان این و در بازه زمانی ($t, t+T$) می تواند به آن برسد، بر اساس مشخصات خودروها از فرمول (۲) به دست می آید :

$$V_b(n, t + T) = d(n) T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2 \{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t) T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (2)$$

که در آن :

$d(n) (< 0)$: بیشینه شتاب کاهنده مطلوب برای وسیله نقلیه n

$x(n, t)$: محل قرارگیری وسیله نقلیه n در زمان t

$x(n-1, t)$: محل قرارگیری وسیله نقلیه مقابل $(n-1)$ در زمان t

$s(n-1)$: طول مؤثر مسئله نقلیه $n-1$

$d'(n-1)$: تخمین از شتاب کاهنده وسیله نقلیه $n-1$ (Olstam and Tapani, 2001).

در مورد هر یک از خودروها سرعت نهایی لحاظ شده برای خودروی n در مدل در بازه زمانی $(t, t+T)$ از فرمول (۳) به دست می‌آید (TSS, 2010):

$$V(n, t + T) = \min\{V_a(n, t + T), V_b(n, t + T)\} \quad (۳)$$

سپس محل قرارگیری خودرو در مدل توسط فرمول ۴ محاسبه گردیده و به‌روزرسانی می‌شود:

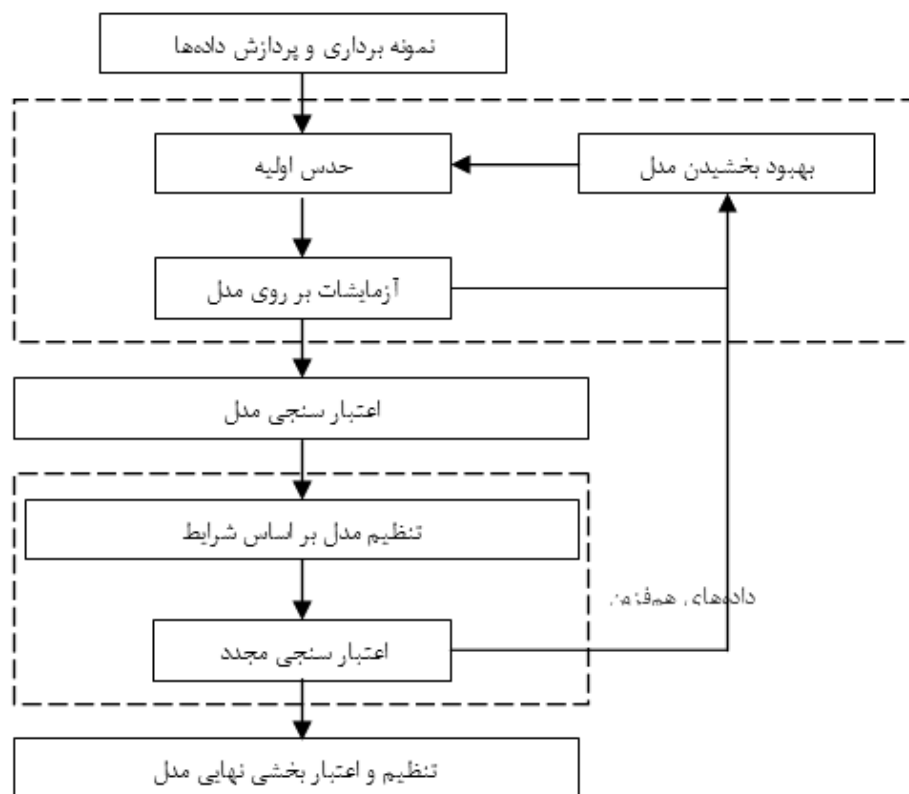
$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad (۴)$$

بر اساس تحقیقات محمود و عیسی در سال ۲۰۰۹، زمان عکس‌العمل در هنگام تعقیب خودروی جلویی عبارت است از زمانی که خودروی عقبی صرف می‌کند تا نسبت به تغییر در عملکرد راننده جلویی عکس‌العمل نشان دهد. در نرم‌افزار دو نوع زمان عکس‌العمل در حال توقف و زمان عکس‌العمل در حال حرکت قابل تعریف هست (Mehmood and Easa, 2009).

پارامتر بسیار مهم دیگری که در تنظیم پارامترهای شبیه‌ساز به کار گرفته شد، پارامتر زمان عکس‌العمل ترمزگیری (BRT) بود که در برخی از مطالعات پیشین نیز بررسی گردیده بود. زمان عکس‌العمل ترمزگیری فاصله زمانی بین مشاهده ترمزگیری ماشین جلویی یا عبور خودروی در حال عبور از مسیر مقابل در یک تقاطع و آغاز ترمزگیری توسط خودروی موردبررسی است (Summala, 2000).

به‌منظور افزایش دقت و بهره‌وری بیشتر مدل، نیازمند کالیبراسیون مدل بر اساس منطقه پروژه هستیم.

عملیات کالیبراسیون و دقیق سازی مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار شبیه‌ساز به‌صورت شما تیک در شکل ۱ نمایش داده‌شده است.



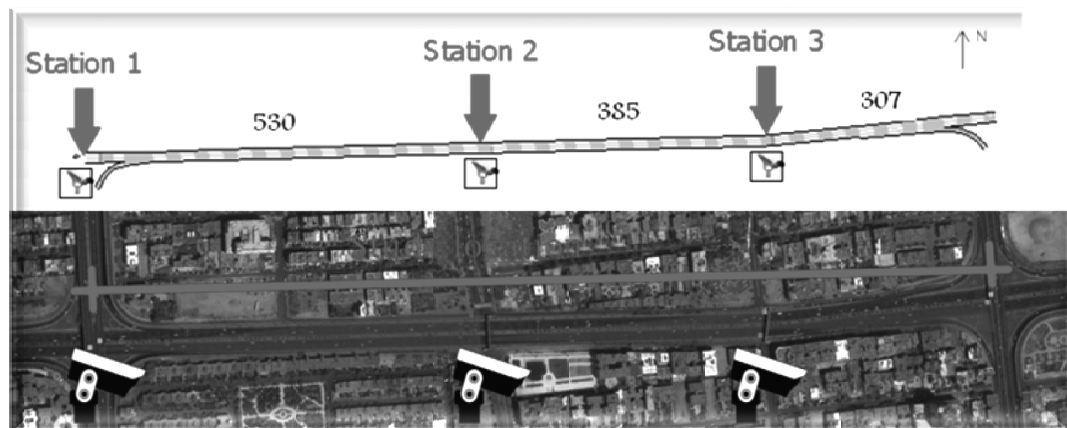
شکل ۱: فرآیند کالیبراسیون نرم‌افزار شبیه‌ساز

منطقه مورد بررسی و کالیبراسیون مدل

منطقه مورد بررسی بخشی از بزرگراه نیایش هست که حدفاصل بولوار شهید پاک نژاد و خیابان سعادت آباد واقع شده است. منطقه مورد نظر شامل یک بخش بزرگراهی و دو رمپ ورودی و خروجی بزرگراه بوده و به منظور بررسی منطقه، ساعت اوج جریان ترافیک بازه زمانی بین ساعت ۸:۳۵ تا ۹:۰۵ انتخاب گردید.

همان گونه که به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است، برداشت جریان ترافیک از سه نقطه و با نصب دوربین های با کیفیت بالا بر فراز بزرگراه انجام گرفت که با توجه به همپوشانی حاصل شده از میدان دید دوربین ها، در بازه برداشت تمامی لین ما در تمامی طول مقطع مورد بررسی در تصاویر ضبط شده قابل بررسی می باشند. تعداد خودروهای عبوری، بر اساس فیلم های برداشت شده از منطقه در هر دوربین در بازه های ۵ دقیقه ای شمارش گردیده و میانگین آن محاسبه گردید. از این داده های حاصل از شمارش جریان به منظور تعیین تعداد ورودی خودروها به مدل استفاده شد که علاوه بر شمارش خودروها (که در جدول ۱ آمده است)، با در نظر گرفتن شاخص های تصویری با طول های مشخص که در تمامی فیلم ها موجود هستند، قابلیت تعیین سرعت خودروها (بدون ایجاد خطا توسط تحذب لنز دوربین) به وجود آمد.

همچنین برای تخمین زمان عکس العمل در حالت توقف ۴۰ خودرو مورد بررسی قرار گرفتند. زمان عکس العمل در حالت توقف به عنوان زمان متوسط میان حرکت خودروی جلویی و آغاز حرکت خودروی عقبی در نظر گرفته شد که این مقدار به طور متوسط برابر ۱.۴۵ ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۲: محل نصب دوربین ها در بزرگراه نیایش و فاصله هر یک از ایستگاه های برداشت در شکل نمایش داده شده است.

جدول ۱: تعداد خودروهای حاصل از برداشت

بازه زمانی	اتوبوس	کامیون	سواری
۸:۳۵-۸:۴۰	۱	۲	۵۰۵
۸:۴۰-۸:۴۵	۴	۲	۶۳۳
۸:۴۵-۸:۵۰	۰	۸	۵۳۴
۸:۵۰-۸:۵۵	۴	۳	۴۸۶
۸:۵۵-۹:۰۰	۶	۳	۴۷۹
۹:۰۰-۹:۰۵	۴	۰	۴۲۹
مقدار کل	۱۹	۱۸	۳۰۶۶
درصد از کل وسایل	۰.۶	۰.۵	۹۸.۸

نمایی از بزرگراه از دید دوربین نصب شده در ایستگاه ۱ در شکل ۳ (بالا) مشاهده می‌گردد. با استفاده از تصاویر به دست آمده از دوربین‌ها و این موضوع که عکس العمل ترمزگیری به عنوان فاصله زمانی بین ترمز گرفتن خودرو جلویی و خودروی عقبی در نظر گرفته شده است، این زمان عملاً مساوی با فاصله زمانی بین روشن شدن چراغ ترمز خودرو جلویی و روشن شدن چراغ ترمز خودرو عقبی فرض گردیده است. با مطالعه ۴۰ جفت از خودروها زمان عکس العمل متوسط برابر با ۱ ثانیه فرض گردید.



شکل ۳: چپ: تصویر برداشت شده دوربین نصب شده در ایستگاه ۱ و راست: دوربین مجاز نصب شده در مدل ساخته شده برای بزرگراه پس از کالیبره کردن مدل.

بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط خودروسازهای داخلی و وزن دهی این اطلاعات بر اساس تعداد خودروهای موجود در کشور از هر نوع، مقدار انحراف معیار، میانگین، ماکزیمم و مینیمم برای بیشینه شتابی که خودروها قابلیت دستیابی به آن را دارند به دست آمد. به طور مشابه میزان بیشینه شتاب کاهنده در قالب انحراف معیار، میانگین، ماکزیمم و مینیمم برحسب متر بر مجذور ثانیه محاسبه گردید. این شتاب کاهنده زمانی اعمال می‌گردد که راننده بخواهد در موقعیت‌های اضطراری در کمترین زمان ممکن خودرو را متوقف سازد. برای موقعیت شرایط رانندگی معمولی عمدتاً از پارامتر دیگری به نام شتاب کاهنده معمولی (Normal Deceleration) استفاده می‌گردد. این شتاب کاهنده در سال ۱۳۸۸ توسط سادات حسینی و وزیری در یک بزرگراه بین شهری محاسبه گردیده است که مقدار آن برابر 5 m/s^2 محاسبه گردیده است (Sadat Hoseini and Vaziri, 2009).

جدول ۲: مقادیر شتاب افزایشنده و کاهنده لحاظ شده در مدل

بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	
۴/۳	۱/۵	۲/۲۵	۲/۰۴	بیشینه شتاب افزایشنده
۵	۵	۵	۰	شتاب کاهنده در شرایط عادی
۶/۹	۶/۷	۶/۱	۲/۳۲	شتاب کاهنده بیشینه

در کنار برداشت از سه دوربین نصب شده بر فراز بزرگراه، یک خودروی سواری مجهز به GPS با قابلیت سنجش و ثبت سرعت به صورت دقیق، در شبکه قرار گرفت که به همراه جریان ترافیک در بازه برداشت، ۳ بار از منطقه مورد برداشت عبور کرده و سرعت جریان ترافیک و زمان سفر را با دقت ثبت نمود.

اطلاعات حاصل از عبور این خودرو که به خودروی شناور (Floating Car) موسوم است، با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مقایسه گردیده و بر اساس آن پارامترهای شبیه‌ساز به گونه‌ای تنظیم شدند که سرعت متوسط جریان که از شبیه‌ساز به دست آمده است و توزیع خودروها در لاینهای مختلف، با آنچه در واقعیت مشاهده گردید یکسان باشد. علاوه بر برداشت‌های ذکر شده فوق که به منظور اعتباربخشی به مدل صورت گرفت، برداشت دیگری در ساعت ۹:۳۰ الی ۱۰ صورت گرفت که به همراه Floating Car و تصویربرداری از بالا از جریان ترافیک صورت پذیرفت که مقادیر حاصل از این برداشت در کنار مقادیر حاصل از برداشت قبلی در جدول ۳ نمایش داده شده است. نمودار ارائه شده در شکل ۴ برداشت‌های حاصل از شبیه‌سازی را در کنار برداشت‌های محلی به دست آمده از خودروی شناور نشان می‌دهد که انطباق نسبتاً قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۳: اطلاعات حاصل از برداشت دوم (به منظور حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل)

نوبت برداشت	زمان سفر (S)	فاصله پیموده شده (Km)	سرعت متوسط (Km/hr)	سرعت متوسط نهایی (Km/hr)
برداشت اول 8:43	139	1.24	35.46	35.45
برداشت دوم 8:54	183	1.24	24.39	
برداشت سوم 9:00	96	1.24	46.50	
برداشت اول 9:34	102	1.24	43.76	50.51
برداشت دوم 9:48	86	1.24	51.91	
برداشت سوم 9:56	63	1.24	55.86	

مدل نوین تخمین میزان انتشار آلاینده ها

اکسیدهای نیتروژن (NOx)، ترکیبات آلی فرار (VOC)، دی اکسید کربن (CO2) و ذرات معلق (PM) توسط معادله ارائه شده در این بخش مدل سازی می گردد. از میان تمامی آلاینده های موجود چهار آلاینده فوق بر اساس پتانسیل آن ها در ضربه به سلامت انسان انتخاب گردیده اند. سایر آلاینده ها تأثیرات به مراتب کمتری بر سلامت انسان می گذارند و سهم آن ها از بار آلاینده های مخرب سلامت انسان در حداقل میزان خود فرض می گردد. یک تابع کلی برای آلاینده های تولید شده در شبکه به صورت ارائه شده در معادله (۵) هست (Panis et al., 2006):

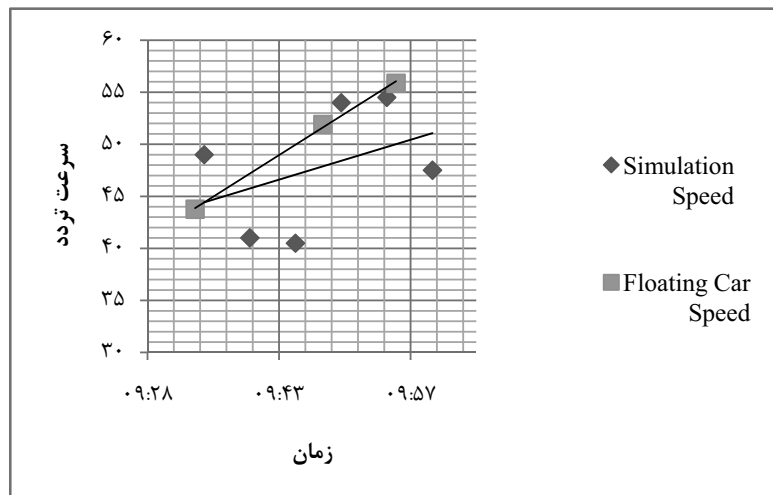
$$E_n(t) = \text{Max} [E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad (5)$$

که در آن $v_n(t)$ سرعت لحظه ای خودروی n در زمان t است که از معادله (۱) و (۲) به دست می آید.

پارامتر $a_n(t)$ نمایانگر شتاب وسیله نقلیه n در لحظه t است که از معادله (۶) برای محاسبه آن استفاده می گردد.

$$a_n(t + \Delta t) = [V_n(t + \Delta t) - V_n(t)] / \Delta t \quad (6)$$

مقدار Δt برابر با گام زمانی شبیه سازی و سرعت وسیله n در زمان t و $V_n(t + \Delta t)$ سرعت وسیله نقلیه پس از سپری شدن یک گام زمانی شبیه سازی است (Panis et al., 2006). در معادله (۵) مقدار E_0 حد پایین تولید آلاینده بر حسب (g/s) است که برای هر نوع از وسیله نقلیه و آلاینده به طور مجزا تعریف می گردد. مقادیر F_1 تا F_6 ثابت های لحاظ شده برای هر گروه آلاینده ها و وسایل نقلیه می باشند که از آنالیز رگرسیونی به دست آمده اند. برای برخی از آلاینده ها فرم متفاوتی برای شتاب افزایشده که به فرم $a_n(t) \geq 0.5 \text{ m/s}^2$ و شتاب کاهنده که به فرم $a_n(t) < 0.5 \text{ m/s}^2$ تعریف می شود را می توان در مدل وارد نمود. بر اساس سهم بخش حمل و نقل بار و نوع سوخت مصرفی این بخش، ظرفیت موتور و همچنین استاندارد آن تابع متوسطی برای هر یک از آلاینده ها محاسبه می گردد. ضرایب معادله (۵) بر اساس چهار آلاینده اصلی مورد بررسی، برای خودروهای از نوع سواری، HDV و اتوبوس محاسبه گردیده و در جدول ۴ ارائه شده اند.



شکل ۳: مقایسه سرعت به دست آمده از مدل و سرعت به دست آمده از خودروی شناور (نماینده سرعت متوسط جریان واقعی)

زمان

هر تابع برای پیش‌بینی مقدار انتشار آلاینده‌ها در شرایط واقعی توسط Panis و همکارانش به کار گرفته شده است و نتایج مطلوبی را در پیش‌بینی مقادیر آلاینده‌ها ارائه نموده است [۱۳].

آلاینده	نوع وسیله نقلیه	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
دی اکسید کربن	خودروی بنزین سوز	0	5.53×10^{-1}	1.61×10^{-1}	-2.89×10^{-3}	2.66×10^{-1}	5.11×10^{-1}	1.83×10^{-1}
	خودروی گازوئیل سوز	0	3.24×10^{-1}	8.59×10^{-2}	4.96×10^{-3}	-5.86×10^{-2}	4.48×10^{-1}	2.30×10^{-1}
	خودروی گازسوز (گاز مایع)	0	6.00×10^{-1}	2.19×10^{-1}	-7.74×10^{-3}	3.57×10^{-1}	5.14×10^{-1}	1.70×10^{-1}
	خودروی HDV	0	1.52	1.88	-6.95×10^{-2}	4.71	5.88	2.09
	اتوبوس	0	9.04×10^{-1}	1.13	-4.27×10^{-2}	2.81	3.45	1.22
اکسیدهای نیتروژن	خودروی بنزین سوز	0	6.19×10^{-4}	8.00×10^{-5}	-4.03×10^{-6}	-4.13×10^{-4}	3.80×10^{-4}	1.77×10^{-4}
	خودروی بنزین سوز ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	2.17×10^{-4}	.	.	.	.	.
	خودروی گازوئیل سوز ($a \geq -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	2.41×10^{-3}	-4.11×10^{-4}	6.73×10^{-5}	-3.07×10^{-3}	2.14×10^{-3}	1.50×10^{-3}
	خودروی گازوئیل سوز ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	1.68×10^{-3}	-6.62×10^{-5}	9.00×10^{-6}	2.50×10^{-4}	2.91×10^{-4}	1.20×10^{-4}
	خودروی گازسوز (گاز مایع) ($a \geq -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	8.92×10^{-4}	1.61×10^{-5}	-8.06×10^{-7}	-8.23×10^{-5}	7.60×10^{-5}	3.54×10^{-5}
	خودروی گازسوز (گاز مایع) ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	3.43×10^{-4}	.	.	.	.	.
	خودروی HDV	0	3.56×10^{-2}	9.71×10^{-3}	-2.40×10^{-4}	3.26×10^{-2}	1.33×10^{-2}	1.15×10^{-2}
	اتوبوس	0	2.36×10^{-2}	6.51×10^{-3}	-1.70×10^{-4}	2.17×10^{-2}	8.94×10^{-3}	7.57×10^{-3}
	خودروی بنزین سوز ($a \geq -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	4.47×10^{-3}	7.32×10^{-7}	-2.87×10^{-8}	-3.41×10^{-6}	4.94×10^{-6}	1.66×10^{-6}
	خودروی بنزین سوز ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	2.63×10^{-3}	.	.	.	.	.
ترکیبات آلی فرار	خودروی گازوئیل سوز ($a \geq -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	9.22×10^{-5}	9.09×10^{-6}	-2.29×10^{-7}	-2.20×10^{-5}	1.69×10^{-5}	3.75×10^{-6}
	خودروی گازوئیل سوز ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	5.25×10^{-5}	7.22×10^{-6}	-1.87×10^{-7}	0	-1.02×10^{-5}	-4.22×10^{-6}
	خودروی گازسوز (گاز مایع) ($a \geq -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	1.44×10^{-2}	1.74×10^{-7}	-6.82×10^{-9}	-8.11×10^{-7}	1.18×10^{-6}	3.96×10^{-7}
	خودروی گازسوز (گاز مایع) ($a < -0.5 \text{ m/s}^2$)	0	8.42×10^{-3}	.	.	.	.	.
	خودروی HDV	0	1.04×10^{-3}	4.87×10^{-4}	-1.49×10^{-5}	1.27×10^{-3}	2.10×10^{-4}	1.00×10^{-4}
	اتوبوس	0	1.55×10^{-3}	8.20×10^{-4}	-2.42×10^{-5}	1.86×10^{-3}	3.21×10^{-4}	1.36×10^{-4}

1.89×10^{-5}	3.75×10^{-5}	.	-9.21×10^{-7}	1.57×10^{-5}	.	0	خودروی بنزین سوز
3.78×10^{-4}	7.50×10^{-4}	.	-1.84×10^{-5}	3.13×10^{-4}	.	0	خودروی گازوئیل سوز
1.89×10^{-5}	3.75×10^{-5}	.	-9.21×10^{-7}	1.57×10^{-5}	.	0	خودروی گازسوز (گاز مایع)
2.27×10^{-4}	1.80×10^{-3}	2.07×10^{-3}	-2.22×10^{-5}	3.35×10^{-4}	2.14×10^{-4}	0	خودروی HDV
2.23×10^{-4}	1.76×10^{-3}	2.08×10^{-3}	-2.38×10^{-5}	3.47×10^{-4}	2.23×10^{-4}	0	اتوبوس

جدول ۴: ضرایب معادله (Panis et al., 2006)

ضرایب جدول ۴ با مقادیر ۸۰٪ برای خودروهای بنزین سوز و ۲۰٪ برای خودروهای گازسوز، در محاسبات منظور گردیده است.

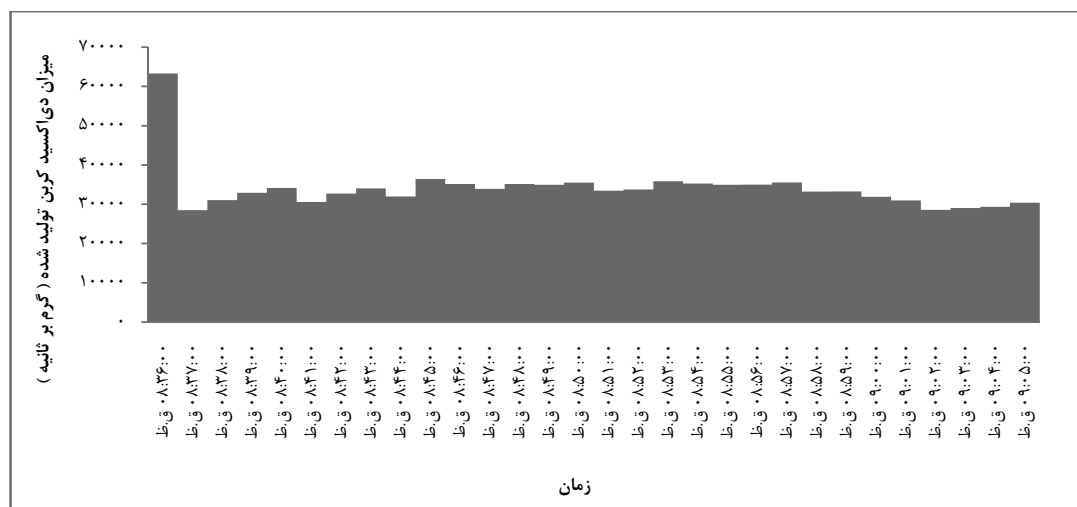
نتایج به دست آمده از مدل سازی

مدل سازی وضعیت شبکه بر اساس برداشت های صورت گرفته از منطقه بزرگراه نیایش که در بخش پیش بیان شد صورت پذیرفته است. به منظور مقایسه تأثیر استراتژی کاهش سرعت تردد خودروها تا حد سرعت اعلام شده از سوی سازمان بهینه سازی مصرف سوخت، دو نوع مدل سازی در فضای نرم افزار صورت گرفت که مدل سازی اول بر اساس وضعیت عادی شبکه بر اساس برداشت های واقعی و بدون اعمال هیچ گونه سیاست مدیریت آلودگی صورت گرفت و مدل سازی دوم بر اساس اعمال سیاست کاهش سرعت خودروها در شبکه انجام شد که منجر به کاهش آلودگی تولید شده توسط خودروها گردید. به منظور به دست آوردن هرچه دقیق تر خروجی های مدل، در ابتدا چندین مدل پایلوت اجرا گردید و سپس مدل اصلی با سه تکرار شبیه سازی شده و از داده های خروجی شبیه ساز میانگین گرفته شد.

آلودگی در حالت عادی بدون اعمال سیاست مدیریت شبکه

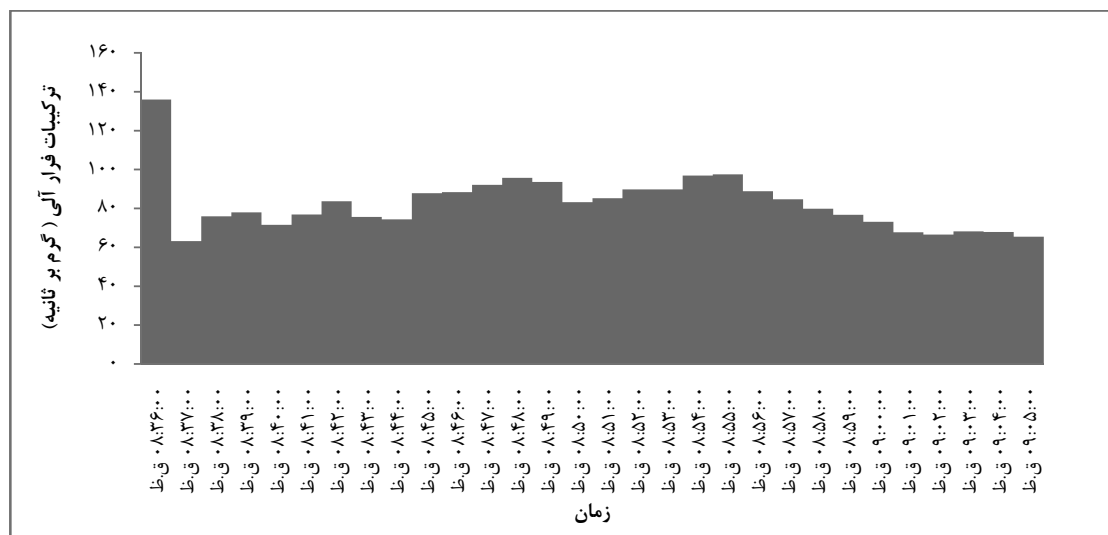
به منظور مقایسه حالتی که هیچ سیاست مدیریتی ترافیکی بر شبکه اعمال نشده است، با حالت اعمال سیاست مدیریت ترافیک در شبکه، در ابتدا شبیه سازی وضعیت شبکه بدون اعمال سیاست های مدیریت ترافیک انجام گرفت.

همان گونه که در بخش پیش بیان گردید خروجی هایی که مدل یکپارچه شبیه سازی ترافیک و مدل Instantaneous Emission ارائه می دهد به چهار دسته تقسیم می گردد. اکسیدهای نیتروژن (NOx)، ترکیبات آلی فرار (VOC)، دی اکسید کربن (CO2) و ذرات معلق (PM) که بر اساس پتانسیل آن ها در ضربه به سلامت انسان انتخاب گردیده اند. سایر آلاینده ها تأثیرات به مراتب کمتری بر سلامت انسان می گذارند و سهم آن ها از بار آلاینده های مخرب سلامت انسان در حداقل میزان خود فرض می گردد. در این سناریو نیز این چهار آلاینده شاخص به منظور قضاوت در مورد وضعیت شبکه به کار گرفته شدند. پس از آغاز مدل سازی در ساعت ۸:۳۶:۰۰ در هر دقیقه میزان تولید آلاینده CO2 در شبکه به دست آمد و پس از میانگین گرفتن از داده های به دست آمده، نمودار نمایش داده شده در شکل ۴ به دست آمد. با توجه به اینکه در ابتدای آغاز شبیه سازی مدل، شبکه خالی از خودرو هست و تمامی خودروها، عملاً با سرعتی معادل سرعت آزاد خود (FFS) حرکت می کنند، و عملاً برای رسیدن به این سرعت باید در طول شبکه اقدام به شتاب گیری نمایند، بنابراین در دقیقه اول شبیه سازی، شاهد جهش قابل توجهی در میزان دی اکسید کربن تولید شده در شبکه هستیم. سپس با آرام تر شدن عبور خودروها به دلیل افزایش تراکم عبور آن ها، به طور ناگهانی شاهد افت شدید در تولید دی اکسید کربن بوده و پس از گذشت زمان، به مرور شاهد افزایش اندک در مقدار دی اکسید کربن تولیدی هستیم که دلیل آن افزایش بیش از پیش تراکم و حرکت آکاردئونی خودروها همراه با افزایش و کاهش سرعت های متوالی است.



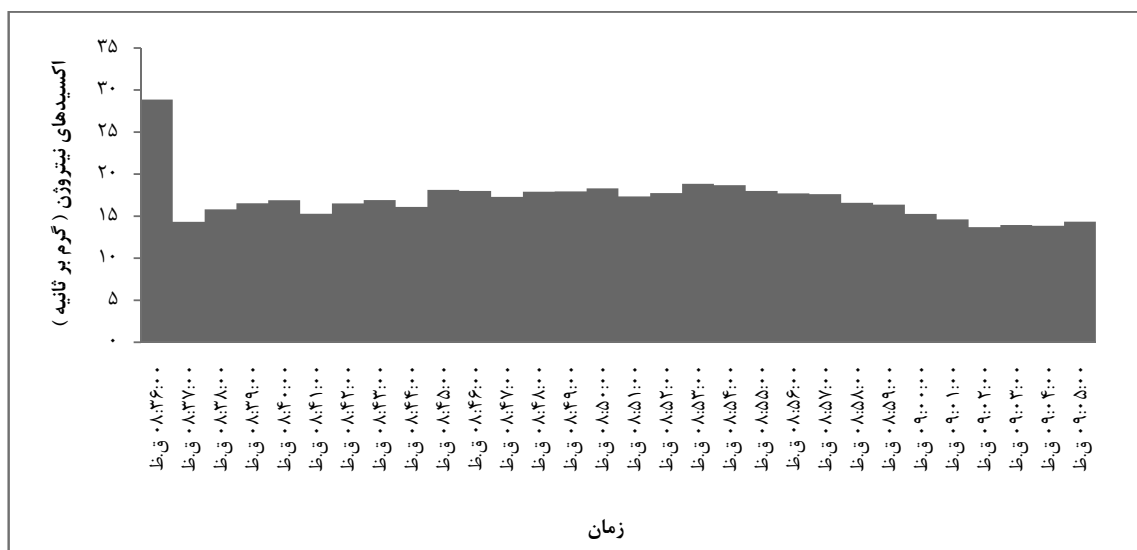
شکل ۴: میزان تولید دی اکسید کربن در شبکه بدون اعمال استراتژی مدیریت شبکه

شکل ۵ نمایانگر تغییرات تولید آلاینده‌های آلی فرار در طول دوره شبیه‌سازی هست. این شکل نشان می‌دهد که افزایش سرعت در ابتدای شبیه‌سازی و شتابگری خودروها در مسیر توانسته است میزان تولید ترکیبات آلی فرار در شبکه را تا ۲ برابر مقدار میانگین افزایش دهد که عملاً این موضوع، همان‌گونه که در مورد دی اکسید کربن بیان شد، پس از گذشت یک دقیقه از آغاز شبیه‌سازی کاملاً برطرف شده و نمودار تولید این آلاینده نیز نمایانگر یک ماکزیمم نسبی در ساعت ۸:۵۳ هست.

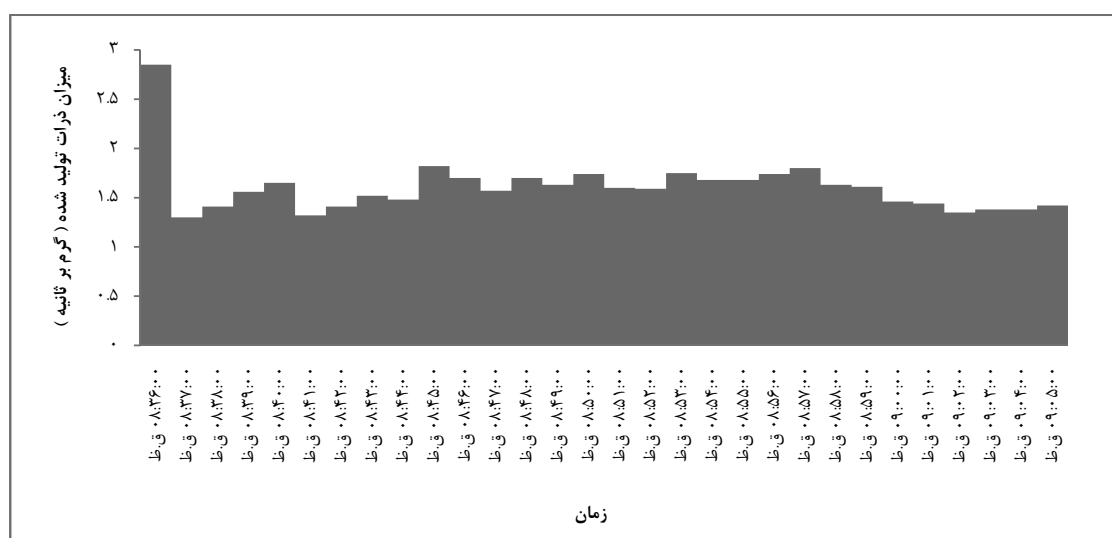


شکل ۵: میزان تولید ترکیبات آلی فرار در شبکه بدون اعمال استراتژی مدیریت شبکه

روندی که در مورد دی اکسید کربن و ترکیبات آلی فرار بیان گردید، در مورد اکسیدهای نیتروژن و ذرات ریز معلق در هوا نیز صادق است که نمودار مربوط به این آلاینده‌ها به ترتیب در شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده و بررسی هست.



شکل ۶: میزان تولید اکسیدهای نیتروژن در شبکه، بدون اعمال استراتژی مدیریت شبکه



شکل ۷: میزان تولید ذرات معلق در شبکه، بدون اعمال سیاست مدیریت شبکه

بر اساس هر یک از شکل های ۴ الی ۷ بر اساس مدل تولید آلاینده موجود در نرم افزار در هر دقیقه میزان آلاینده تولید شده در شبکه برآورد گردید و سپس از تمامی آلاینده های تولید شده در شبکه در هر دقیقه میانگین گرفته شد تا میزان آلاینده تولید شده در شبکه به صورت متوسط به گونه ای که در جدول ۵ نشان داده شده است به دست آید. همچنین مقدار متوسط مصرف سوخت در هر ثانیه از شبیه سازی در جدول ۵ نشان داده شده است.

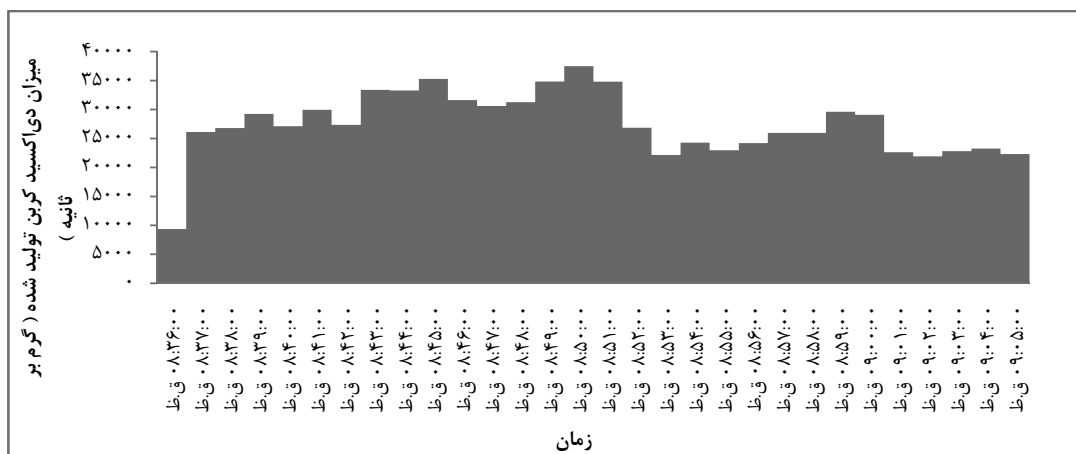
جدول ۵: خروجی های نهایی مدل بدون اعمال سیاست کاهش سرعت

Value	Time Serie
1020060.0	IEM CO ₂ Emission, متوسط in (g/s)
510.0	IEM NO _x Emission, متوسط in (g/s)
48.3	IEM PM Emission, متوسط in (g/s)
2448.8	IEM VOC Emission, متوسط in (g/s)

آلودگی در حالت اعمال استراتژی کاهش سرعت

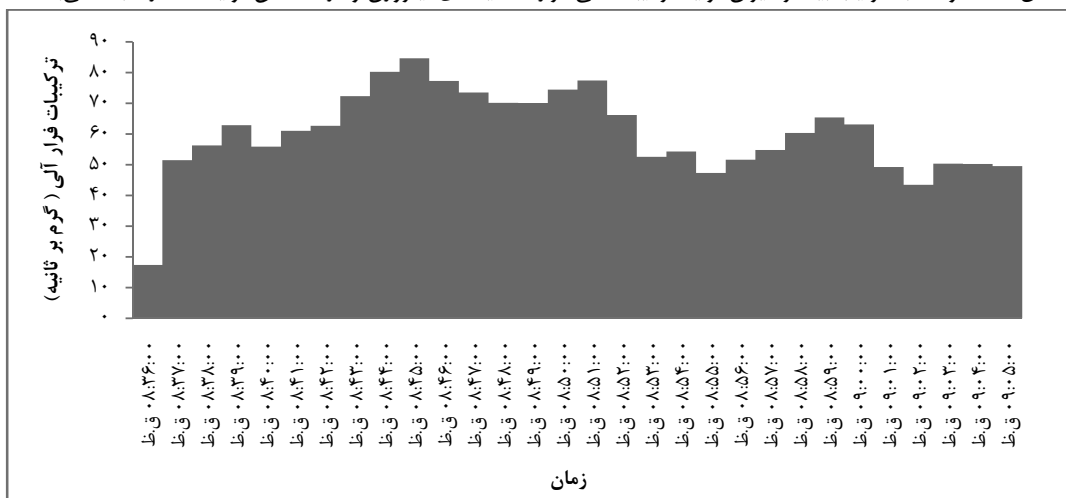
با توجه به نمودارهای مربوط به میزان تولید آلاینده‌های خودروها، سرعتی به نام (Minimum consumption Speed) (قابل تعریف است که در آن خودرو کمترین میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده را دارا هست. یکی از راهکارهای کاهش تولید آلاینده از سوی خودروها می‌تواند محدود ساختن خودروها در بازه مشخصی از سرعت باشد که در صورتی که این بازه به میانگین وزنی (Minimum Consumption Speed) خودروهای عبوری نزدیک باشد می‌توان تولید آلاینده‌ها و مصرف سوخت را کاهش داد. در این بررسی با توجه به آنچه سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور در رسانه‌ها اعلام نموده است با استفاده از VSL ها سرعت خودروها به ۹۰ کیلومتر بر ساعت محدود گردید. استفاده از تابلوهای نمایشگر محدودیت سرعت VSL در مهر و موم‌های اخیر رواج زیادی یافته است که محدودیت سرعت در این تابلوها هم به صورت دستی و هم به صورتیک برنامه زمان‌بندی شده در ساعات مختلف شبانه‌روز سرعت‌های دلخواه را نمایش می‌دهد. همچنین امکاناتی فراهم است که به تابلوها این توانایی را می‌دهد تا از طریق سیگنال‌های ماهواره‌ای و تلفن همراه از راه دور نیز قابل تغییر باشد. بعضی کاربردهای VSL به این ترتیب است که به رانندگان این اطمینان داده می‌شود که اگر با سرعت‌های بالاتری حرکت کنند شرایط ایمن همچنان برقرار است و این عمل سبب خواهد تا از ازدحام و تراکم جلوگیری شود. تابلوهای VSL برای بهبود جریان ترافیک در یک محدوده خاص با فراهم کردن محدودیت سرعت واقع‌بینانه‌تر که قادر خواهد ساخت وسایل نقلیه در یک سرعت افزایش یافته حرکت کنند و تأخیر را کاهش دهند، استفاده می‌شود.

با اعمال استراتژی کاهش سرعت، همچنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، دی‌اکسید کربن تولید شده کاهش چشمگیری را از خود نشان می‌دهد.

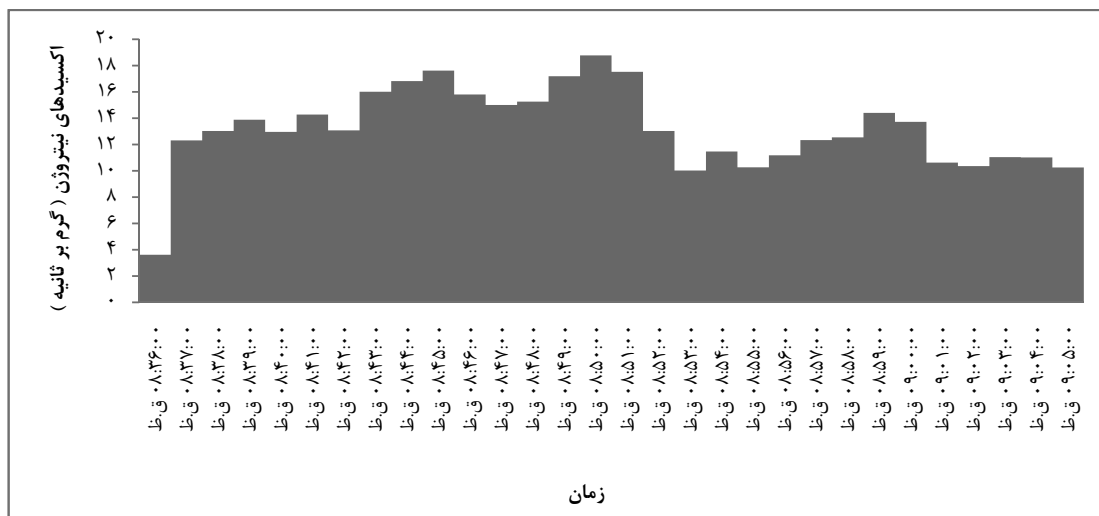


شکل ۸: دی‌اکسید کربن تولید شده در حالت اعمال استراتژی کاهش سرعت

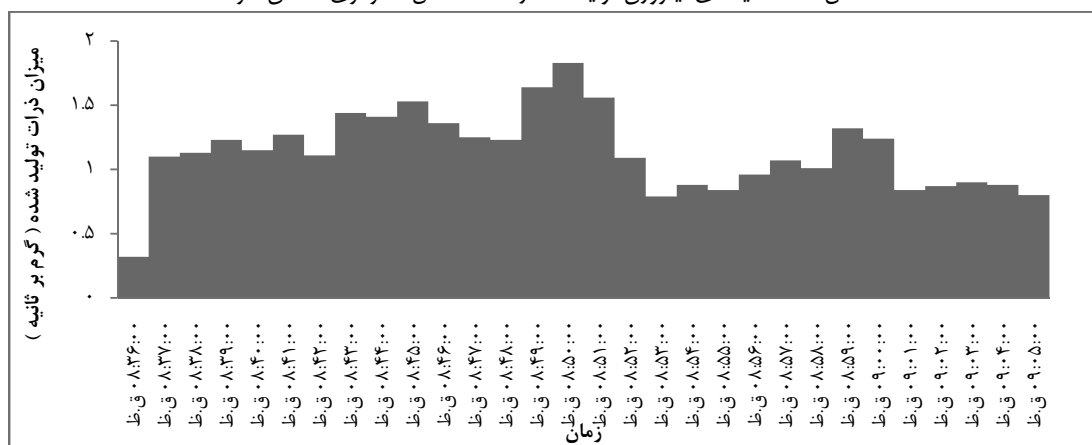
اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بیانگر میزان تولید ترکیبات آلی فرار، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق تولید شده در شبکه می‌باشند.



شکل ۹: ترکیبات آلی تولید شده در حالت اعمال استراتژی کاهش سرعت



شکل ۱۰: اکسیدهای نیتروژن تولید شده در حالت اعمال استراتژی کاهش سرعت



شکل ۱۱: ذرات معلق تولید شده در حالت اعمال استراتژی کاهش سرعت

با محاسبه میانگین داده های ارائه شده در شکل ۸ الی ۱۱ برای تمام بازه های یک دقیقه ای شبیه سازی شده، مقادیر موجود در جدول ۶ به دست آمده اند که نمایانگر کاهش بسیار قابل توجه در مقادیر تولید آلاینده در شبکه می باشند.

جدول ۶: مقادیر خروجی شبکه در حالت استفاده از استراتژی کاهش سرعت

Value	Time Serie
806156.0	IEM CO2 Emission, متوسط in (g/s)
387.7	IEM NOx Emission, متوسط in (g/s)
33.4	IEM PM Emission, متوسط in (g/s)
1747.2	IEM VOC Emission, متوسط in (g/s)

نتیجه گیری

بر اساس آنچه انتظار می رفت، با توجه به اینکه تردد با سرعت Minimum Consumption Speed، موجب کاهش میزان آلاینده تولید شده توسط تک تک خودروها می گردد، بنابراین انتظار می رفت ایجاد محدودیت سرعت برای خودروها موجب کاهش چشمگیر تولید آلاینده ها گردد. بر اساس شبیه سازی صورت گرفته این استراتژی توانسته است میزان تولید آلاینده دی اکسید کربن را از ۱۰۲۰۰۶۰ گرم در هر ثانیه به ۸۰۶۱۵۶ گرم در هر ثانیه برساند که با ۲۱۳۹۰۴ گرم کاهش، عملاً کاهشی ۲۰ درصدی را از خود نشان می دهد. در مورد ترکیبات آلی فرار تولید شده در شبکه، اعمال استراتژی کاهش سرعت منجر به تغییر میزان تولید این آلاینده از ۲۴۴۸۰۸ گرم در هر ثانیه

حرکت تمامی خودروها در شبکه به ۱۷۴۷.۲ گرم در هر ثانیه شده است که کاهش معادل ۷۰۱.۶ گرم در هر ثانیه از فعالیت شبکه را نشان می‌دهد که بنابراین، پارامتر مذکور قریب به ۲۸ درصد کاهش داشته است. اکسیدهای نیتروژن یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند که با اعمال استراتژی کاهش سرعت تا ۲۴٪ کاهش داشته و از ۵۱۰ گرم در هر ثانیه به ۳۸۷.۷ گرم در هر ثانیه رسیده‌اند. همچنین این کاهش برای ذرات معلق (PM) تولیدشده در شبکه در حدود ۳۰٪ بوده است و با کاهش ۱۴.۹ گرم در هر ثانیه، از ۴۸.۳ گرم در ثانیه به ۳۳.۴ گرم رسیده است.

بر اساس مشاهدات صورت گرفته، اعمال استراتژی کاهش سرعت می‌تواند عملیاتی کارساز در زمینه کاهش آلودگی‌های تولیدشده در شبکه باشد که برخلاف برخی از راهبردها مانند اعمال طرح زوج یا فرد که رانندگان را از استفاده از خودروی خود بازمی‌دارد و موجب نارضایتی آنان می‌شود، اجازه استفاده از خودرو را به تمامی رانندگان می‌دهد و تنها با اندکی کاهش سرعت تأثیر خود را در کاهش آلودگی تولیدشده در هر ثانیه از کارکرد شبکه نشان می‌دهد. این میزان کاهش در صورتی که استراتژی در تمامی بزرگراه‌های شهر اعمال گردد اثر بسیار چشمگیری در کاهش میزان تولید آلاینده در شبکه خواهد داشت و با بررسی‌های بیشتر، عملاً می‌تواند به یکی از راهبردهای مدیریت بحران شبکه حمل‌ونقل شهر تهران مبدل شود.

تشکر و قدردانی

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از حمایت‌ها و کمک‌های ارزنده علمی صورت گرفته از سوی مسئولین محترم شرکت کنترل کیفیت هوای تهران قدردانی نموده و از خداوند منان توفیق روزافزون ایشان را مسألت نماییم.

فهرست مراجع

- ۱- ح. اسکندری، ن. فرخ نیا (۱۳۸۹)، ارزیابی اثر همزمان کنترل رمپ و محدودیت سرعت متغیر بر جریان و زمان سفر کل بزرگراه نیایش با رویکرد شبیه‌سازی میکروسکوپی، دهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل و ترافیک تهران، تهران
- 2- Barcelo J., Casas J., E. Codina, Fernandez A., Ferrer J.L., Garcia D. & Grau R., 1996. PETRI: A parallel environment for a real-time traffic management and information system. *In, Proceedings of the 3rd World Congress on ITS (CD-ROM)*, Orlando, Florida.
- 3- Gipps P.G. (1986), A model for the structure of lane-changing decisions, *Transportation Research-Part B*, 5, p 403–414.
- 4- Jones L. S., Sullivan A. J. & Cheekoti N. (2004), *Traffic Simulation Software Comparison Study*, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Alabama at Birmingham Birmingham, Alabama, UTCA Report 02217.
- 5- Mehmood A. & Easa, S. (2009) Modeling Reaction Time in Car-Following Behavior Based on Human Factors, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.5, No.2.
- 6- Olstam J. & Tapani A. (2001) Comparison of Car following models, Swedish National Road Administration, SE-581 95 *Linköping Sweden*, VTI meddelande 960A.
- 7- Panis L.I., Broekx S. & Liu R. (2006) Modeling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits, *Science of the Total Environment* 371, p 270–285.
- 8- Pour Ahmad A. (1998), *The role of climate and the geographic structure on the air pollution of Tehran city*, *Geography Research Quarterly*, No. 34, pp. 38-53.
- 9- Rinelli P. & Feddo N. (2011), A breath of fresh air by combining emissions modeling with traffic simulation, Annual Showcase, *Journal of Infrastructure*, page 122.
- 10- Sadat Hoseini S.M. & Vaziri M. (2009) Estimating Crash Risk Using a Microscopic Traffic Model. *ScientiaIranica, Transaction A, Civil Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 226-237.
- 11- Summala H. (2000) *Brake Reaction Times and Driver Behavior Analysis*, Commentary. *Transportation Human Factors*, 2, p 195–216.
- 12- Winyoopadit S. (2007), Development and Comparative Evaluation of Ramp Metering Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation, *Journal of transportation systems engineering and information technology*, Volume 7, Issue 5.