



شبیه سازی جریان ترافیک در جاده ۴۱ ایران؛ رویکرد تلفیقی سیستم های صف و سیستم های پویا

حسن شاه محمد^۱ . پوریا شکسته بند^{۲*}

دکترای مهندسی صنایع، عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران
دانشجو دکترای مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران.

چکیده: استان خوزستان از مراکز توریستی و جذب سفر در ایام مختلف سال بالخص نوروز و سه ماه ابتدای سال می باشد. سالانه مسافران زیاد از طریق راه های زمینی وارد این استان می شوند. که حجم زیاد ترافیک را برای جاده های اصلی و بزرگراه ها این استان به دنبال دارد. از مهم ترین جاده ها در این استان جاده ۴۱ می باشد که در جنوب غربی ایران و در استان پهناور خوزستان واقع شده است. این جاده از شهر خرمشهر شروع شده و تا شهرستان اهواز ادامه پیدا میکند و از آنجا هم به دزفول می رسد به عبارتی جنوب به شمال استان خوزستان را در برمیگیرد. طول این جاده از ابتدا تا انتها 366 km یا 227 mi می باشد. تئوری سیستمهای صف از ابزارهای بسیار مفید در تحلیل صف ایجاد شده توسط وسایل نقلیه محسوب میشود. پژوهش های موجود درباره کاربرد تئوری صف در مطالعه جریان ترافیک به این موضوع صرفاً به عنوان یک مدل ریاضی پرداخت اند. متاسفانه پژوهشگران حالت پویایی جریان ترافیک مدنظر قرار نداده اند، از این رو در این پژوهش ما با تلفیق تئوری صف و پویایی سیستم ها ملاحظه می کنیم وضعیت ترافیک در این مسیر چگونه است، سپس پیش بینی می کنیم با اضافه کردن یک لاین به مسیر چه وضعیتی برای جریان ترافیک در این محور اصلی استان پیش خواهد آمد.

کلمات کلیدی: تئوری صف، پویایی سیستم، جریان ترافیک، شبیه سازی



۱. مقدمه

پیش بینی مشخصات جریان ترافیک و ارتباط میان پارامترهای ترافیکی، از جمله مواردی است که در مدیریت جریان ترافیک در جاده ها و بزرگراه ها به آن توجه می شود. اهمیت این پیش بینی ها در مواردی همچون تغییر رده عملکردی یک معبر، مطالعه اثر بخشی تغییرات جریان بر زمان سفر، تصادفات، مصرف انرژی و آلودگی هوا بسیار زیاد است. مدل های تئوری جریان ترافیک کمک می کنند تا ارتباط بین پارامترهای جریان ترافیک، سرعت و سایر پارامترهای مورد نیاز را تعیین نمود.

مدل های ترافیکی معمولاً به صورت تجربی مدل سازی می شوند. به شکلی که داده های مربوط به سرعت و جریان ترافیک جمع آوری می شوند و به شکل نمودارهایی ارائه می شوند [۱]. یا ممکن است از شبیه سازی برای مدل سازی استفاده شود [۲]. این رویکردها اگرچه محدودیت هایی در قدرت پیش بینی و آنالیز حساسیت دارند، به مقدار زیادی به داده های موجود و زمان وابسته اند و به طور مستقیم در فرآیندهای تصمیم گیری سیاست گذاری های مختلف قابل استفاده نیستند [۳].

در بررسی ادبیات موضوع سه نوع اصلی برای نمایش مدل ها براساس سطح جزئیات مشاهده می شود: مدل های میکروسکوپی، مزوسکوپی و ماکروسکوپی. مدل های میکروسکوپی با وسایل نقلیه سروکار دارند در حالی که مدل های ماکروسکوپی با جریان ها سروکار دارند. مدل های مزوسکوپی نیز رویکردی ترکیبی از آیتم های میکروسکوپی و ماکروسکوپی ارائه می دهند.

مدل های میکروسکوپی هر وسیله نقلیه را جداگانه توصیف می کنند و بر تئوری های استوار هستند که نحوه مانور هر اتومبیل را در جریان ترافیک بررسی می کند. در مدل های ماکروسکوپی وسایل نقلیه به صورت دسته جمعی به عنوان یک جریان در نظر گرفته می شوند. مدل های مزوسکوپی نیز مدل هایی هستند که برای دستیابی به تحلیل های بهتر عناصر مدل های میکروسکوپی و ماکروسکوپی را با یکدیگر ترکیب می کنند. این مدل ها اجزای ترافیک را با جزئیات بیشتری توصیف می کنند، اما رفتار و تعامل این اجزا در آن ها با جزئیات کمتری توصیف می شود. تاکنون تحقیقات متعددی با هدف ارائه مدل های ارتباط دهنده بین پارامتر های مختلف جریان ترافیک و پیش بینی آن ها انجام شده و مدل های متفاوتی بین پارامتر های ماکروسکوپی جریان ترافیک برقرار شده است [۴].

توجه به مفاهیم تئوری صف و ارتباط آن با جریان ترافیک از مواردی است که توجه به آن کمک شایانی به درک فرآیند عبور و مرور و مدیریت جریان ترافیک خواهد کرد. بررسی ادبیات موضوع نشان می دهد پژوهش های موجود درباره کاربرد تئوری صف در ترافیک به این موضوع صرفاً به عنوان یک مدل ریاضی پرداخته اند و پویایی های موجود در آن را لحاظ نکرده اند.

این پژوهش علاوه بر نگاه دقیق و جزئی با استفاده از تئوری صف به موضوع ترافیک، این مسئله را با رویکرد پویایی سیستم که ابزاری بسیار مناسب برای درک سیستم های پیچیده و پویا می باشد، مورد تحلیل قرار داده است. هدف این مقاله تحلیل پویایی های جریان ترافیک براساس پارامترهای تئوری صف با استفاده از رویکرد پویایی سیستم است. رویکرد پویایی سیستم به این دلیل برای بررسی این موضوع به کار رفته است که این روش علاوه بر داشتن نگاهی تحلیلی به موضوع و درک بهتر فرآیند، توانایی آن را دارد که متغیرهای کمی و کیفی را به طور هم زمان مورد بررسی قرار دهد [۵].



در مجموع این مقاله شامل ۵ بخش است. بخش بعدی به تعریف مسئله اختصاص دارد. در بخش سوم، مدل معرفی می شود و در بخش چهارم پس از اجرای شبیه سازی، نتایج تحلیل ها ارائه می گردد. در نهایت در بخش پنجم جمع بندی و نتیجه گیری مقاله ارائه می شود.

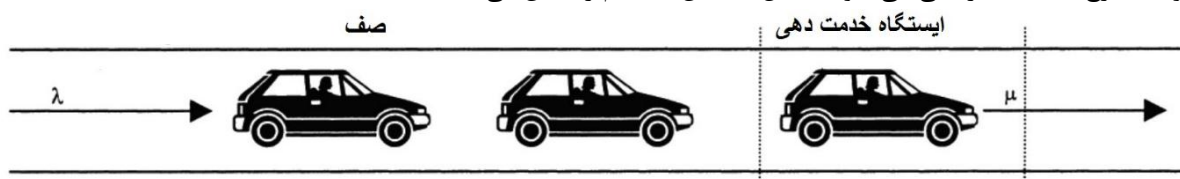
۲. تعریف مسئله

تجربه نشان می دهد یک رابطه ایستا بین سرعت، جریان و تراکم در صورت وجود شرایط مشخص وجود دارد. این رابطه به صورت نمودارهای سرعت-جریان-تراکم نشان داده می شود که رابطه بین جریان ترافیک (q)، تراکم (k)، و سرعت (v) را مشخص می کند. این نمودار اولین بار توسط گرینشلدز ارائه شد [۶]. او در مقاله خود یک نمودار سهمی وار برای نمودار سرعت-جریان در نظر گرفت که بعد از سال ها مفهوم ارائه شده توسط او به نمودارهای شناخته شده سرعت-جریان-تراکم منجر شد [۷][۸]. در کل با مطالعه این جریان ها روابطی بین جریان ترافیک (q)، تراکم ترافیک (E) و سرعت (v) به دست می آید که اساسی ترین رابطه به صورت زیر می باشد [۲]:

$$q = E \times V$$

این رابطه اساسی ترین و مهمترین رابطه شناخته شده است. وقتی که دوتا از این متغیرها شناخته شده باشند، متغیر سوم به راحتی قابل محاسبه خواهد بود. در ادامه برای محاسبه سایر شاخص های ترافیکی لازم است پارامترهای دیگری را تعریف کنیم. جدول زیر این پارامترها را نشان میدهد.

ما در مدل خود جاده را به بخش هایی به طول $1/C$ تقسیم کرده ایم که C در اینجا پیشینه تراکم ترافیکی است که در یک مسیر ممکن است وجود داشته باشد. این مقدار به نوع جاده وابسته است. یعنی اینکه جاده دارای چند لاین برای عبور و مرور است. هریک از بخش های فرضی به عنوان یک خدمت دهنده در نظر گرفته می شود و وسایل نقلیه ای که با نرخ λ وارد می شوند، با نرخ μ خدمت رسانی می شوند. شکل (۱) این سیستم را نشان می دهد [۹].



شکل ۱ - سیستم صف

پارامترهای استفاده شده در تئوری صف هنگامی که برای مطالعه جریان ترافیک استفاده می شوند، ممکن است نام های متفاوتی به خود بگیرند. پارامترهای مورد استفاده در این مقاله در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ - پارامترهای استفاده شده در مقاله

پارامتر	توضیح
E	تراکم ترافیک (veh/km)
C	پیشینه تراکم ترافیک (veh/km)
V	سرعت مؤثر (km/h)



R	سرعت نسبی (km/h)
SN	سرعت اسمی (km/h)
Q	جریان ترافیک (veh/h)
λ	نرخ ورود (veh/h)
μ	نرخ خروج (veh/h)
ρ	شدت ترافیک (μ / λ)
W	زمان حضور در سیستم (h)

منظور از تراکم تعداد اتومبیل های موجود در واحد طول است. سرعت مؤثر نیز همان سرعتی است که اتومبیل ها بر اساس شرایط ترافیکی و ازدحام موجود آن را انتخاب میکنند. سرعت اسمی حداکثر سرعت ممکن در شرایط جریان آزاد ترافیک میباشد. سرعت نسبی نیز نسبت این دو را نشان می دهد. جریان ترافیک نیز تعداد اتومبیل های عبوری در هر ساعت را نشان می دهد. W زمان حضور در سیستم را نشان می دهد که مجموع زمان انتظار در صف به علاوه زمان دریافت خدمت می باشد. طبیعتاً هرچه شدت ترافیک بالا باشد، زمان حضور در سیستم نیز بیشتر خواهد بود.

در این مقاله با تطبیق پارامترهای فوق با تئوری صف اثر متقابل آن ها را در یک مدل پویایی سیستم مورد ارزیابی قرار خواهیم داد.

۳. مدل سازی جریان ترافیک

۱.۳. مدل صف برای جریان ترافیک

صف به زبان ساده مکانی است که واحدهای دریافت کننده خدمت در آن منتظر رسیدن نوبتشان می مانند [۱۰]. نظریه صف برای توصیف پدیده صف های انتظار واحدهای متقاضی دریافت خدمات بسط یافته است. برحسب اینکه نحوه ورود و خدمت دهی در سیستم صف توابع معین یا احتمالی باشند مدل های صف غیر احتمالی و یا احتمالی ایجاد می شوند. سیستم های صف در حالت ساده معمولاً به صورت A/B/m نمایش داده میشوند که A نشان دهنده تابع ورودی، B نشان دهنده تابع خروجی و m نیز تعداد خدمت دهندگان را مشخص می کند. با توجه به این که اتومبیل ها در زمان W مسافتی به طول $\frac{1}{c}$ را طی می کنند، سرعت مؤثر از رابطه زیر به دست می آید:

$$v = \frac{1}{w}$$

سرعت نسبی نیز که نسبت بین سرعت مؤثر و سرعت اسمی هست، از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$r = \frac{v}{SN} = \frac{1}{w * SN}$$

رسم نمودارهای جریان ترافیک، تراکم و سرعت در یک نمودار، دیاگرام معروف سرعت-جریان-تراکم را به ما می دهد. اما باید به این نکته توجه داشت که رسم دقیق این نمودارها به سیستم صف موردنظر و توابع ورودی و خدمت دهی آن



وابسته است. در این مقاله از فرضیات مربوط به مدل $M/M/1$ به عنوان یک مدل پایه ای در مطالعات استفاده می شود. در این مدل نرخ ورود مورد انتظار و نیز نرخ خدمت دهی از توزیع نمایی پیروی می کنند. منظور از زمان خدمت دهی، زمان لازم برای عبور وسیله نقلیه از یک بخش جاده می باشد. وقتی یک وسیله با سرعت اسمی مورد نظر حرکت می کند، زمان انتظار در سیستم از رابطه زیر به دست می آید:

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{SN(C-E)}$$

سرعت مؤثر و سرعت نسبی نیز از رابطه زیر حاصل می شود:

$$v = \frac{SN(C-E)}{C} = SN(1 - \rho)$$

$$r = \frac{v}{SN} = 1 - \rho$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{E}{C}$$

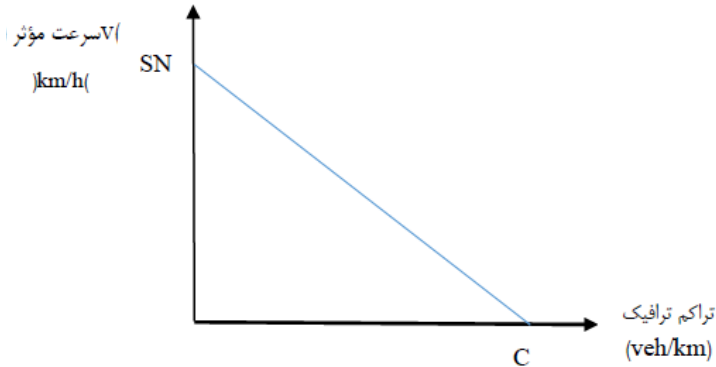
با جای گذاری در معادله عبارت زیر به دست می آید:

$$f(v, g) = v2C - vSNC + SNq = 0$$

با پیشینه کردن عبارت بالا بر حسب q ، q_{max} به صورت زیر به دست می آید:

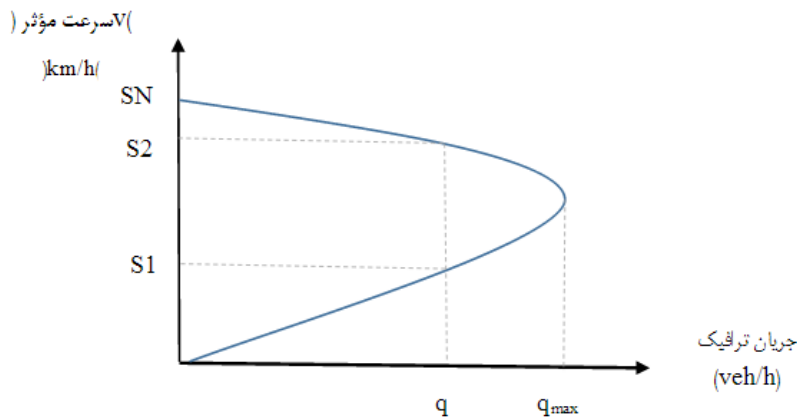
$$q_{max} = \frac{SNC}{4}$$

با توجه به فرمول های بالا مشاهده می شود که یک رابطه منفی میان سرعت مؤثر و تراکم ترافیک وجود دارد. وقتی تراکم ترافیک پایین است، وسایل نقلیه مانع یکدیگر نمی شوند که این مسئله باعث می شود سرعت مؤثر آن ها بالا باشد. وقتی تراکم بیشتر شود، یعنی وسایل نقلیه بیشتری وارد جاده شوند، سرعت مؤثر به تدریج کاهش پیدا می کند. با استفاده از روابط بالا می توان نمودارهای سرعت-تراکم، سرعت-جریان و جریان-تراکم را رسم کرد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود رابطه بین سرعت مؤثر و تراکم یک رابطه خطی معکوس است. یعنی زمانی که هیچ تراکمی مشاهده نمی شود، اتومبیل ها می توانند با حداکثر سرعت مجاز (سرعت اسمی) حرکت می کنند، اما زمانی که تراکم افزایش می یابد، سرعت اتومبیل ها نیز کاهش می یابد.



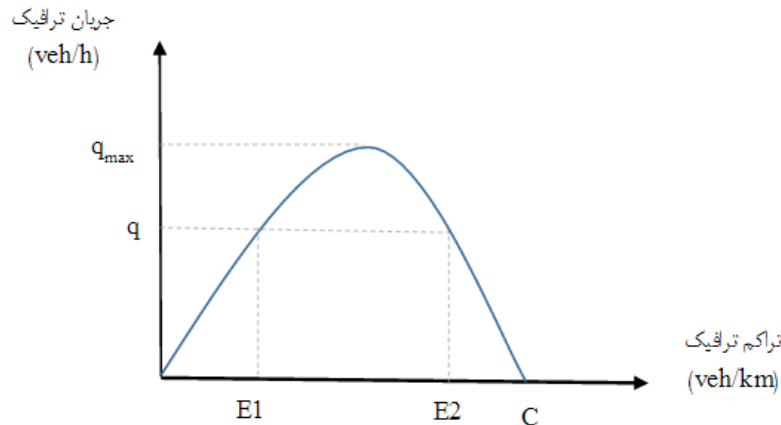
شکل ۲- نمودار سرعت - تراکم برای مدل M/M/1

در شکل (۳) نیز مشاهده می شود هر سرعتی با یک جریان ترافیک منحصر به فردی مطابقت می کند، اما عکس آن برقرار نیست. دو سرعت برای هر جریان ترافیک قابل تصور است. یک سرعت بالای در حال کاهش (S_2) و یک سرعت پایین در حال افزایش (S_1). این گونه می توان توضیح داد که با کاهش میزان سرعت از سرعت اسمی تا حداکثر جریان ازدحام افزایش پیدا می کند، اما جریان کاهش نمی یابد. زیرا تأثیر این کاهش سرعت بر جریان، با افزایش حجم اتومبیل ها خنثی می شود. با ادامه افزایش ازدحام و کاهش سرعت، جریان ترافیک کاهش می یابد [۸].



شکل (۳) - نمودار سرعت - جریان برای مدل M/M/1

شکل (۴) نیز به طریق نمودار قبلی تفسیر پذیر است. به طوری که سمت چپ این نمودار (E_1) با قسمت بالای نمودار قبلی (S_2) و سمت راست این نمودار (E_2) با قسمت بالای نمودار قبلی (S_1) مطابقت می کند.



شکل (۴) - نمودار جریان - تراکم برای مدل M/M/1

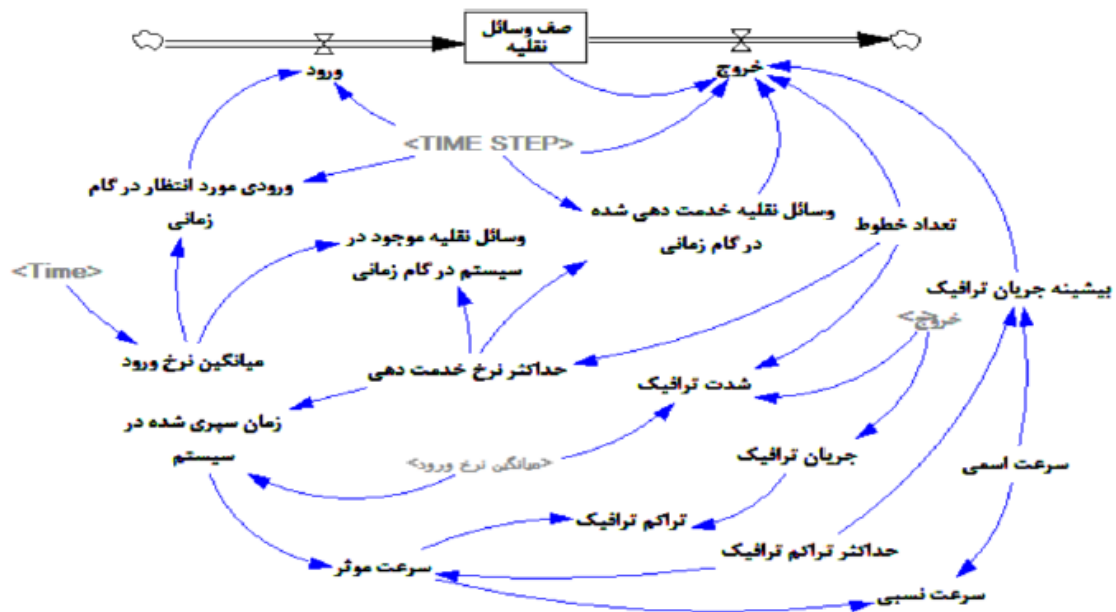
۲.۳. مدل پویایی سیستم

پویایی سیستم یک روش شبیه سازی است که به وسیله مدلسازی به درک مسائل در سیستم های پیچیده و پویا، کمک میکند. فارستر در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی روش پویایی سیستم را به عنوان روشی برای مدلسازی و شبیه سازی در تحلیل سیستم های صنعتی ابداع کرد. از آن زمان، گستره کاربرد روش پویایی سیستم در موضوعات مختلف از مباحث اجتماعی، صنعتی تا سیستمهای مدیریت پروژه وسعت یافته است.

کاربرد اصلی روش پویایی سیستم در پیدا کردن و نشان دادن فرآیندهای بازخوردی است، که همراه با ساختارهای انباره و جریان و تأخیرات زمانی، رفتار پویای یک سیستم را تعیین میکنند [۹].

در بررسی ادبیات مربوط به تئوری صف مشاهده میشود به سیستم صف به عنوان یک سیستم ایستا نگاه شده است و در طول زمان سرعت ورود مشتریان و سرعت ارائه خدمات در سیستم ثابت فرض گردیده است. این رویکرد در سیستم هایی مثل جریان ترافیک که بازخوردهای بسیار مهمی در آنها وجود دارند، به طور کامل پاسخگو نیست. رویکرد پویایی سیستم به این دلیل برای بررسی این موضوع به کار رفته است که این روش علاوه برداشتن نگاهی تحلیلی به موضوع و درک بهتر فرآیند توانایی آن را دارد که متغیرهای کمی و کیفی را بهطور همزمان مورد بررسی قرار دهد [۵]. در سیستمهایی که عوامل انسانی در آن نقش اساسی دارند، نمیتوان برای انسانها نیز همچون ماشینها یک نرخ ارائه خدمت ثابت را در طول زمان کاری در نظر گرفت و تغییرات آن باید لحاظ شود.

شکل (۵) نمودار مدل جریان صف در سیستم ترافیک را نشان می دهد. در این مدل سیستم صف M/M/n فرض شده است. یعنی فاصله زمانی بین ورود دو وسیله نقلیه و نیز زمان خدمت دهی از توزیع نمایی پیروی می کنند و تعداد n خدمت دهنده وجود دارد. این نمودار نحوه تعامل بین متغیرهای یک سیستم صف در یک جریان ترافیک را با یکدیگر را نشان می دهد که میتواند مبنایی برای توسعه یک مدل کمی باشد. برای درک این نمودار آشنایی با دو مفهوم انباره و جریان ضروری است.



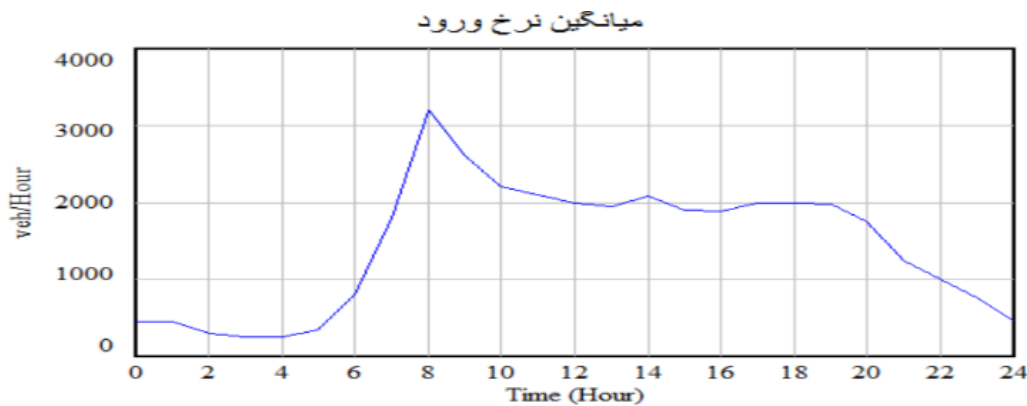
شکل ۵- نمودار جریان صف در سیستم ترافیک

در هر سیستم مقدار برخی متغیرها افزایش یا کاهش می یابد که به آنها متغیرهای انبارهای گفته می شود. نرخ افزایش یا کاهش این متغیرها جریان خوانده می شود. صف در این مدل یک انبار است که مقدار آن با جریانی به نام ورود وسایل نقلیه به پلیس راه افزایش می یابد و با جریان دیگری به نام ارائه خدمت که همان عبور وسایل نقلیه از قسمت مشخص شده (پلیس راه) است، کاهش می یابد. زمان انتظار هر وسیله نقلیه در این مدل از تقسیم طول صف بر اساس تعداد وسایل نقلیه بر نرخ ارائه خدمت به دست می آید.

۴. شبیه سازی مدل

در این مرحله پس از اعتبارسنجی های لازم، اکنون می توان اثر تغییرات اجزای مختلف سیستم را بر دیگر اجزا و کل سیستم مطالعه کرد. برای شبیه سازی این مدل از نرم افزار Vensim PLE استفاده شده است. این نرم افزار یکی از قدرتمندترین نرم افزار های شبیه سازی است [۱۲].

برای مطالعه این مدل از داده های مربوط به جاده ۴۱ در پلیس راه اهواز اندیمشک، استفاده شده است. این داده ها مربوط به همه ی روزها در فصل بهار سال ۱۳۹۵ است که متوسط آن ها در مدل در نظر گرفته شده است. فرض شده است جریان ترافیک در شرایط عادی است و میزان سرعت اسمی معادل حداکثر سرعت مجاز در بزرگراه ها که برابر ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت است، در نظر گرفته شده است. داده های فوق نشان می دهد پیک ورود اتومبیل ها در ساعت ۸ صبح با ۳۲۰۰ اتومبیل در ساعت اتفاق می افتد و سپس روند نسبتاً ثابتی با تعداد تقریبی ۲۰۰۰ اتومبیل در ساعت تا ساعت ۱۹ ادامه پیدا می کند. شکل (۶) نمودار تغییرات نرخ ورود وسایل نقلیه در شبانه روز را در این بزرگراه نشان می دهد.

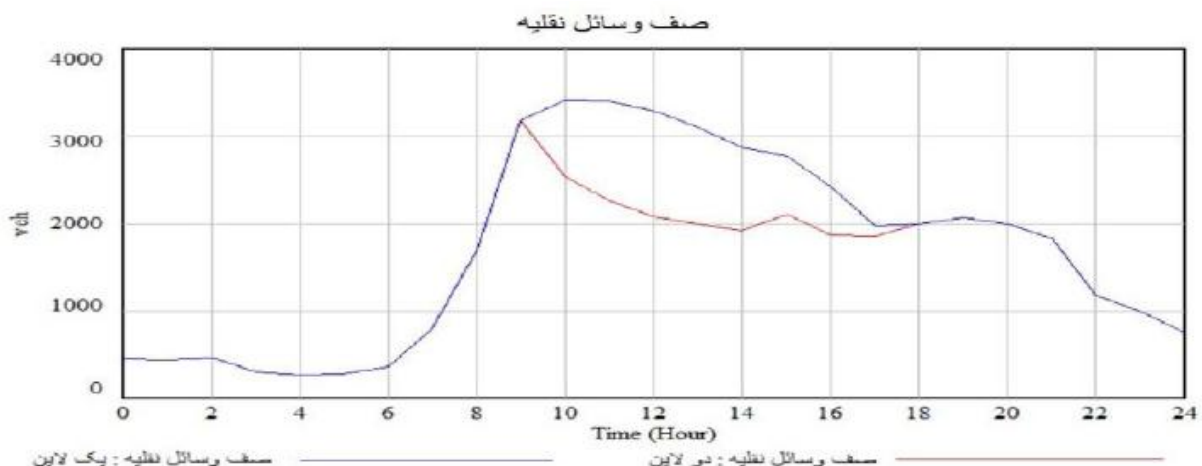


شکل ۶- نرخ ورود وسایل نقلیه در شبانه روز به بزرگراه

با استفاده از این مدل سناریوهای مختلفی را می توان مورد مطالعه قرارداد. ما در اینجا شبیه سازی را یک بار با فرض اینکه این بزرگراه دارای یک لاین بازرسی پلیس راه است انجام می دهیم و سپس تأثیر اضافه شدن لاین دوم بازرسی پلیس راه را بر سایر متغیرها مورد مطالعه قرار می دهیم .

۱.۴. طول صف

اولین متغیر که جز مهم ترین پارامترها برای یک جریان ترافیک نیز می باشد، طول صف است. منظور از طول صف در اینجا تعداد اتومبیل هایی است که در زمان یک ساعت برای دریافت خدمت در سیستم حضور دارند. بررسی طول صف نشان می دهد که میزان آن در ساعت ۱۰ به حداکثر میزان خود رسیده است. تعداد اتومبیل ها ممکن است زیاد به نظر برسد که علت بزرگ آن در نظر گرفتن گام زمانی در شبیه سازی می باشد. البته قابل ذکر است که در راهنمای ظرفیت بزرگراه ها (HCM) استفاده از بازه های بیش از ۱۵ دقیقه برای مطالعه جریان ترافیک از توصیه شده است [۱۴]. شکل (۷) نمودار صف وسایل نقلیه را در طول ساعات شبانه روز نشان می دهد .

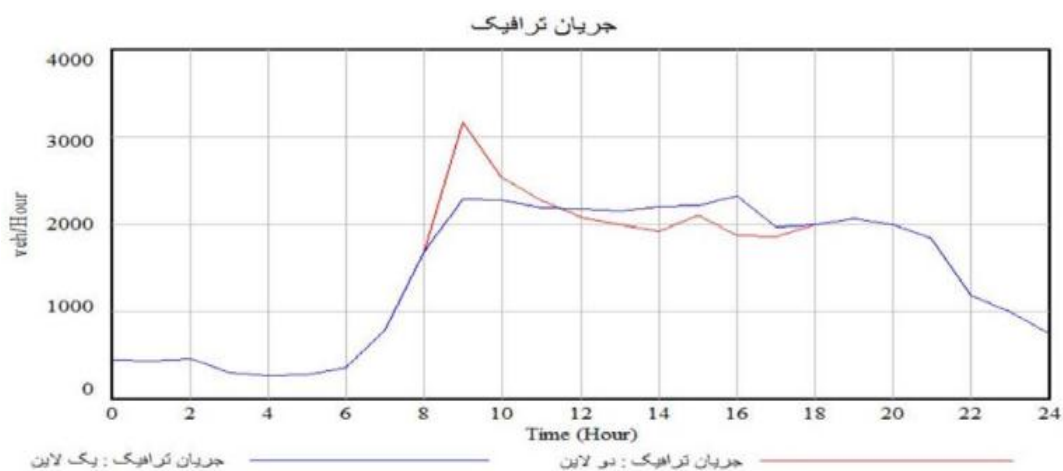


شکل ۷- نمودار صف وسایل نقلیه



۲.۴. جریان ترافیک

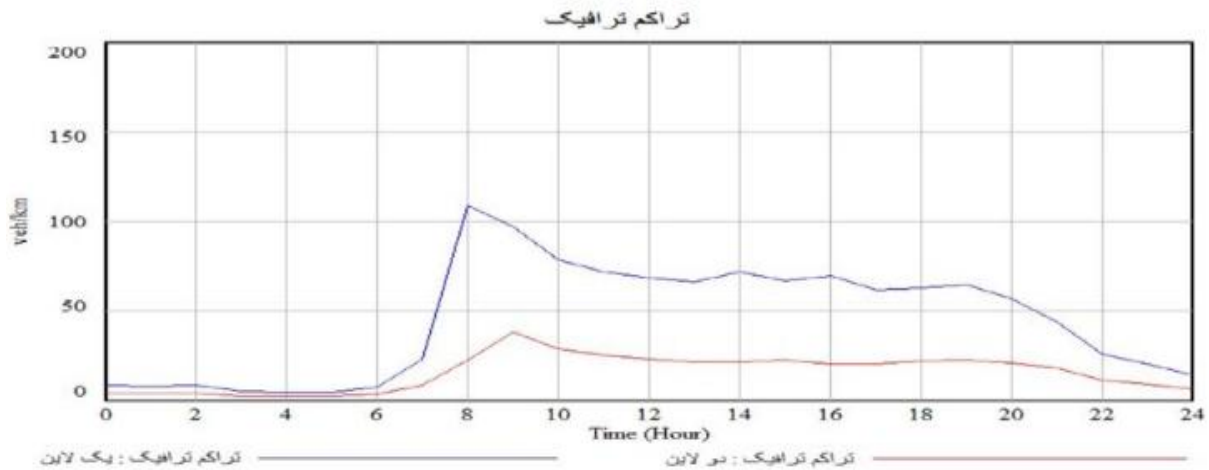
یکی از مهم ترین فاکتورهایی که در مطالعه ترافیک به آن توجه می شود، جریان وسایل نقلیه است که براساس تعداد اتومبیل در ساعت بیان می شود. مطالعه مدل در حالت وجود یک لاین نشان میدهد که پس از ساعت ۸ صبح که تعداد اتومبیل های ورودی به سیستم به سرعت در حال افزایش است، جریان عبوری با نرخ ثابتی ادامه می یابد. همانطور که در نمودار شکل (۸) مشاهده می شود، با اضافه شدن لاین دوم جریان اتومبیل ها در ساعت ۹ به اوج خود می رسد و دوباره افت پیدا می کند. این نشان دهنده بالا رفتن قابل توجه ظرفیت بزرگراه پس از اضافه شدن لاین دوم است.



شکل ۸ - نمودار جریان ترافیک

۳.۴. تراکم جریان ترافیک

تراکم جریان که یکی از شاخصه های ماکروسکوپی ترافیک است که تعداد وسایل نقلیه در یک کیلومتر را نشان می دهد. همان طور که در نمودار شکل (۹) مشاهده می شود، میزان تراکم با نزدیک شدن به ساعت ۸ صبح به یک باره افزایش پیدا می کند و سپس با کاهش دوباره با روند نسبتاً ثابتی ادامه پیدا می کند.



شکل ۹ - نمودار تراکم جریان ترافیک

با اضافه شدن یک لاین، میزان تراکم به مقدار بیش از نصف کاهش پیدا می کند و همچنین در این حالت حداکثر تراکم به یک ساعت بعد منتقل می شود و در ساعت ۹ صبح اتفاق می افتد.

۵. نتیجه گیری

مدل پویایی سیستم که بر اساس تئوری صف و ترافیک طراحی شده است، قادر است تأثیر پارامترهای مختلف را در شاخص های ترافیکی مثل ازدحام و سرعت مؤثر وسایل نقلیه تحلیل کند. این مدل ما را قادر می سازد سناریوهای مختلف ترافیکی را قبل از عملیاتی شدن در مدل اجرا کرد و نتایج به دست آمده را مورد تحلیل قرارداد. مدل پس از طراحی در نرم افزار ونسیم، از لحاظ اعتبار و صحت با استفاده از داده های واقعی ارزیابی شد. پس از آنکه معیارهای لازم کسب گردید، برخی از شاخص های مهم ترافیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهد از میان راهکارهای مختلف برای کاهش طول صف و زمان انتظار وسایل نقلیه در سیستم، اضافه کردن یک لاین یا خط عبوری مؤثرترین راهکار در کوتاه مدت می باشد. تأثیر افزایش یک لاین بر سه پارامتر طول صف، تراکم و تراکم جریان ترافیک بررسی شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد، در مسیرهایی که اختلاف زیادی در ازدحام و شدت ترافیک در دو سمت یک مسیر زیاد است، استفاده از لاین های معکوس پذیر* که جهت عبور و مرور در آن ها بر اساس شرایط ترافیکی قابل تغییر است، می تواند بسیار مؤثر واقع شود. برای پژوهش های آینده می توان از مدل های پیچیده تر صف مثل مدل های $M/G/1$ و $G/G/1$ استفاده کرد. این مدل ها به دلیل پیچیدگی زیاد تطابق بیشتری با واقعیت دارند.



۶. مراجع

- 1-D. CF, " Fundamentals of Transportation and Traffic Operations," Elsevier Science, 1997.
- 2- H. F, "Traffic Flow Theory: A State - of- the - Art Report, Chapter Traffic Stream Characteristics," Transportation Research Board, 2001.
- 3-J. R and J. M. Smith, "Modeling vehicular traffic flow using M/G/C/C state dependent queueing models," Transportation Science, no. 31, pp. 324-336,1997.
- 4-L.Elefteriadou, An Introduction to Traffic Flow Theory, Gainesville, FL,USA: Springer, 2014.
- 5-L. D.C and Oliva. R, "The greater whole: Towards a synthesis of system dynamics and soft systems methodology," European Journal of Operational Research, no. 107, pp. 214-235, 1998.
- 6-B.Greenshields, "A study of traffic capacity," Highway Research Board Proceedings, no. 14, pp. 448-477, 1935.
- 7-G. DC, Traffic Theory, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 8-C.Daganzo,"Fundamentals of Transportation and Traffic Operations, "Elsevier Science, 1997.
- 9-J.D.Sterman, Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world, USA: McGrawHill, 2000.
- 10-D.Heidemann, "A queueing theory approach to speed-flow International Symposium on Transportation and Traffic Theory," in Transportation and traffic theory, Lyon, France, 1996.
- 11-M. U. H. J. Davis, "Understanding the Roles of the Customer and the Operation for Better Queue Management," International Journal of Operations & Production Management, Vol. 14Iss: 5, pp.21 –34, 1994.
- 12-T.Raczynski, "A small Tool for Complex System Simulation niversidad panamericana," Universidad Panamericana, Mexico, 1996.
- 13-N. Vandaele, T. V. Woensel and A. Verbruggen, "A queueing based traffic flow model," Transportation Research, no. 5, pp. 121-135, 2000.
- 14-Transportation Research Board, Highway Capacity Manual, Washington,D.C.: Transportation Research Board, 2014.
- 15-T. Shi and R. Gill, "Developing effective policies for the sustainable development of ecological agriculture in China: the case study of Jinshan County with a systems dynamics model," Ecological Economics, no. 53, pp. 223-246, 2005.
- 16-J. Sterman, Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, Boston: MacGraw Hill, 2000.
- 17-T. Van woensel and N. Vandaele, " Modelling Traffic Flows With Queueing Models: A Review," Asia-Pacific Journal of Operational Research, Singapore, Vol. 24, No.04, August 2007
- 18-A. D. May, TRAFFIC FLOW FUNDAMENTALS, USA: Prentice-Hall,1990.
- 19-V. N., V. W. T. and V. A., "A queueing based traffic flow model, "Transportation Research, vol. 5, no. 2, pp. 121-135, 2000.
- 20-F. A. Armah, D. O. Yawson and A. A.N.M. Pappoe, "A Systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and Air Pollution Link in the City of Accra, Ghana", Sustainability, No.2, pp.252-265, 2010.



21-M. Anokye, "Application of Queuing Theory to Vehicular Traffic at Signalized Intersection in Kumasi-Ashanti Region, Ghana", American International Journal of Contemporary Research, Vol. 3 No. 7, pp. 23-29, July 2013.

22-S. Sani, A. Onkabetse, "DamanMathematical Modeling in Heavy Traffic Queuing Systems", American Journal of Operations Research, no. 4, pp. 340-350, 2014.

۲۳-مهندسی ترافیک پیشرفته، ۱۳۸۵، جلیل شاهی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران. ف-مؤمنی، م.، مروتی شریف آبادی، ع.، دانشور رفتار، دومهنامه علمی پژوهشی دانشگاه شاهد، ۱۳۸۵، مدل سازی پویایی سیستم صف با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، سال ۱۳، شماره ۱۷.

۲۴-احمدوند، ع.، محمدیانی، ز.، خدادادی، ح.، پژوهشهای مدیریت در ایران، ۱۳۹۴، مدل سازی پویایی سیستم حمل و نقل پایدار به منظور اصلاح و بهبود ترافیک، دوره ۱۹، شماره ۲، صص ۳۱-۵۲.

۲۶-سیف، م.، ندیمی، ن.، تحلیل روابط میان پارامترهای ماکروسکوپی جریان ترافیک در شرایط مختلف، ۱۳۹۲، سیزدهمین کنفرانس بین المللی حمل و نقل و ترافیک، تهران