

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه

سید صابر ناصرعلوی (مسئول مکاتبات)، استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

نوید ندیمی، استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

محسن نخعی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

Email: saber_naseralavi@uk.ac.ir

پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۳

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۳

چکیده

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر ظرفیت بر روی پارامترهای صف می باشد تا با ایجاد تغییر مناسب در ظرفیت بزرگراه بتوان به کارایی راه کمک کرد و تأخیر ناشی از ایجاد صف را کاهش داد. هرگاه در یک سیستم و در یک بازه زمانی نرخ ورود یک پارامتر از خروجی بیشتر شود یا به عبارت دیگر سیستم توانایی سرویس دهی به تمامی تقاضا ورودی را نداشته باشد صف ایجاد می شود و وسایل نقلیه باید برای خدمت گیری صبر نمایند. در ترافیک صف علاوه بر کاهش کیفیت سفر، تأثیرهای نامطلوبی بر ایمنی جریان ترافیک نیز دارد. تقاضا استفاده از راه در طول روز متغیر می باشد و متأسفانه در حمل و نقل امکان ذخیره کردن عرضه وجود ندارد نتیجتاً در بسیاری از بازه های زمانی امکان دارد از ظرفیت استفاده نشود همچنین در بازه هایی نیز ظرفیت جوابگوی تقاضا ورودی را نداشته باشد اما می توان با ایجاد تغییر در ظرفیت راه در بازه های مختلف زمانی تأخیر در مسیر را کاهش داد. این کار مستلزم تحلیل حساسیت بر روی تأثیر ظرفیت بر پارامترهای تأخیر می باشد. در این پژوهش یک مدل صف قطعی ارائه می شود که بتواند تأثیر تغییرات ظرفیت گلوگاه آزادراه بر تأخیرهای کاربران را برآورد نماید. فرمول بندی یک مساله کلی بر مبنای نظریه صف قطعی انجام و با روش عددی نیز حل شده است. سپس یک مساله نمونه با استفاده از برنامه کامپیوتری کدنویسی و حل گردیده است و در انتها تحلیل حساسیت بر روی تغییرات ظرفیت صورت گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که شاخص های کارایی صف با افزایش ظرفیت بهبود می یابد. با بررسی موردی هر راه و انجام چنین تحلیل حساسیتی بر روی آن به همراه اعمال سیاست مناسب که موجب تغییر ظرفیت راه شود می توان تأخیر را کاهش و کارایی مسیر را بهبود بخشید. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله به فهم بهتر پدیده شکست در بالادست گلوگاه های ترافیک و مدل های صف کلان کمک می کند و از تحلیل حساسیت صورت گرفته می توان جهت کنترل و مدیریت ترافیک استفاده کرد. با استفاده از روش عددی پیشنهادی در این مقاله می توان برای اشکال مختلف نرخ ورود و خروج، پارامترهای مربوط به صف در هر سیستم (حتی غیر ترافیکی) را محاسبه کرد و ظرفیتی مناسب با پارامترهای تأخیر مورد انتظار محاسبه نمود.

واژه های کلیدی: آزادراه، تغییر در ظرفیت راه، روش عددی، گلوگاه، نظریه صف

۱. مقدمه

زمانی که در یک بازه زمانی، تقاضا بیش از ظرفیت باشد و یا در یک مکان مشخص سرفاصله زمانی ورودی کمتر از زمان خدمت‌دهی (در سطح خرد) باشد، صف تشکیل می‌شود. صف ایجاد شده ممکن است متحرک یا متوقف باشد. وسایل نقلیه مازاد بر ظرفیت در جریان بالادست و یا محوطه خدمت‌دهی ذخیره می‌شوند و خروج آنها در بازه‌های زمانی بعدی صورت می‌پذیرد.

نمونه‌های بی‌شماری از فرایندهای تشکیل صف در سامانه‌های جاده‌ای وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از: تقاطع‌ها، محل‌های اخذ هزینه (عوارض)، تسهیلات پارکینگ‌ها، گلوگاه‌های آزادراه، محل وقوع حوادث، نواحی ادغام و پشت وسایل نقلیه کم سرعت. تشکیل صف در تمامی شیوه‌های حمل و نقلی و در زندگی روزمره مانند صندوق حسابداری خوارو بارفروشی‌ها، باجه‌های حسابداری بانک‌ها و رستوران‌ها رخ می‌دهد.

دو روش تحلیلی را می‌توان در مطالعه صف به‌کاربرد: تحلیل موج ضربه‌ای و تحلیل صف. تحلیل موج ضربه‌ای در زمانی که فرایند تقاضا ظرفیت قطعی باشد به‌کار گرفته می‌شود و به‌ویژه سازگاری خوبی برای ارزیابی فضای اشغال شده هنگام تشکیل صف و همچنین برای تعامل فرایندهای تشکیل صف دارد.

مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل صف در تسهیلات جریان با وقفه یا منقطع (مثل تقاطع‌های چراغ‌دار) صورت گرفته است [Sharma, 2007; Lin and Thomas, 2005; Cohen, 2002; Viti and van Zuylen, 2004]. اغلب مطالعات در خصوص نظریه صف در تسهیلات جریان بدون وقفه یا غیرمنقطع (مثل آزادراه‌ها) در مورد تعیین طول صف در رمپ‌های ورودی و برای استراتژی‌های کنترل رمپ انجام شده است [Wu, 2009]. بنابراین، با توجه به کمبود ادبیات تحقیق در حوزه به‌کارگیری نظریه صف در بخش اساسی تسهیلات جریان بدون وقفه (ناحیه دور از شیب‌راه‌های ورودی و خروجی)، پژوهش در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

چون مفاهیم صف بر اساس عرضه و تقاضا شکل گرفته است به نظر می‌رسد با ایجاد تغییر در ظرفیت راه به منظور تغییر در میزان عرضه حمل و نقل تاخیر در حرکت وسایل نقلیه را کاهش داد که این کار را می‌توان با اعمال سیاست در محدودیت پارک و یا با استفاده از دستگاه‌های جدید خطوط برگشت پذیر انجام داد. استفاده از ظرفیت بدون استفاده خطوط مقابل یکی از راه‌های مناسب ایجاد تغییر در ظرفیت راه هاست.

یک صف ردیفی از افراد یا وسایل نقلیه منتظر است. آنها می‌توانند مشتریان منتظر برای ارائه خدمات باشند یا مسافرانی که منتظرند تا سوار هواپیما شوند. یک سامانه صف از دو عنصر اولیه تشکیل شده است: (۱) مشتریان و (۲) ارائه دهنگان خدمات. می‌توان مثال‌هایی از سامانه‌های صف را در بخش‌های تولیدی و خدماتی و نیز در حمل‌ونقل یافت. از نمونه‌های سامانه‌های صف در حمل‌ونقل می‌توان از خودروهای منتظر در گیشه دریافت عوارض، هواپیماهای منتظر برای نشست و یا برخاست، خودروهای منتظر برای عبور از یک ناحیه کار، کشتی‌ها و کامیون‌های منتظر برای تخلیه بار در باراندازها یا افراد منتظر در صف برای تمديد گواهینامه رانندگی نام برد. یک مشتری از زمان وارد شدن به صف انتظار تا زمانی که خدمت مورد نظر به او ارائه می‌شود، در صف قرار دارد و مشتری تا زمانی که ارائه خدمات کامل شود، در سامانه قرار دارد.

نظریه صف شاخه‌ای از ریاضی است که به مطالعه صف‌ها و ویژگی‌های آنها می‌پردازد و ابزاری مفید برای محاسبه شاخص‌های عملکرد برای ارزیابی کارکرد سامانه صف است. این شاخص‌ها شامل این موارد هستند: تعداد مشتریان در صف، زمانی که یک مشتری در صف سپری می‌کند و زمانی که مشتری در سامانه سپری می‌کند. در مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، این شاخص‌ها برای طراحی جاده (برای مثال، تعیین طول لازم برای خط‌عبور چپ‌گرد) و بهره‌برداری و کنترل ترافیک (نظیر طراحی برنامه زمان‌بندی چراغ راهنمایی) حیاتی هستند.

۲. ادبیات تحقیق

در ساعات مختلف یک روز نرخ جریان ترافیک می‌تواند متفاوت باشد. این الگوهای ساعتی جریان نیز در روزهای مختلف هفته و نسبت به جهت جریان، شهری و یا برون شهری بودن راه و نوع مسیر تغییر می‌کند شکل ۱ الگوهای ساعتی جریان جریان در پل سان فرانسیسکو را نسبت به جهت جریان نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌کنید، این شکل نسبت به وسط روز متقارن است و ترافیک در باند شرقی و غربی در صبح و عصر کاملاً متفاوت می‌شوند. دلیل آن برگشت افرادی هستند که هنگام صبح از منطقه مسکونی به مناطق تجاری و اداری حرکت کرده اند.

در شکل ۱ کاملاً مشخص است که در زمان صبح از ظرفیت باند شرقی و در هنگام عصر از ظرفیت باند غربی به صورت کامل استفاده نمی‌شود. این الگو مشابه الگو بسیاری از راه‌های درون شهری است که مناطق عمدتاً مسکونی را به مراکز شهر متصل می‌کند و در تمامی این مسیرها در یک جهت نرخ جریان بالا و میزان تأخیر زیاد است در صورتی که در جهت مقابل نرخ جریان پایین و عملاً از ظرفیت راه استفاده نمی‌شود. استفاده از ظرفیت راه مقابل و اختصاص دادن یک یا چند خط از مسیر جهت مقابل به جهت با ترافیک بیشتر می‌توان سبب بهبود وضعیت ترافیکی و کاهش نرخ تأخیر شود.

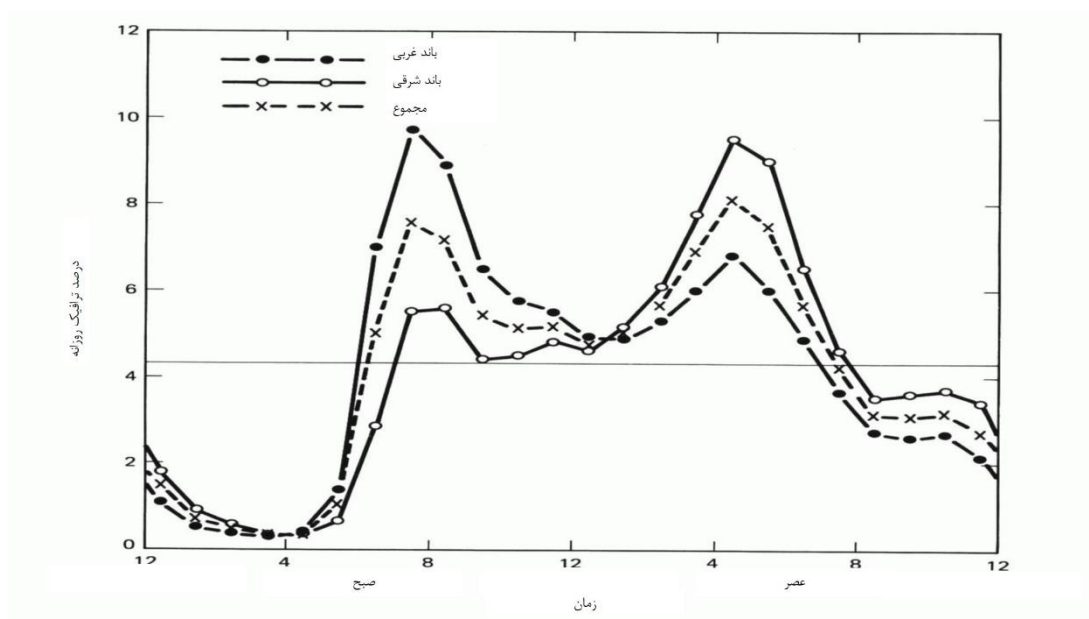
تعیین ساعت‌هایی از شبانه روز به عنوان ممنوعیت پارک حاشیه می‌تواند یک راه افزایش ظرفیت باشد. همچنین امروزه دستگاهایی به نام Barrier Transfer Machine یا اصطلاحاً Road Zipper وجود دارد که به سرعت موانع بین دو جهت یک راه دو طرفه را جابجا می‌کنند و از تخصیص متناوب خطوط در صبح و عصر به جهات مخلف ظرفیت راه را برای جهت با ترافیک بیشتر افزایش داد.

طرح طبقه‌بندی شکل ۳ یک ماتریس ۲×۲ و چهار سلول را نشان می‌دهد. هر سلول نیز به زیرگروه‌های الگوی تشکیل صف، تقسیم می‌گردد. سلول بالا سمت چپ را در نظر بگیرید، این سلول الگوی نرخ ورودی ثابت و نرخ خدمت ثابت نسبت به زمان را بیان می‌کند. دو الگویی که کمتر رخ می‌دهند. اگر نرخ ورودی از نرخ خدمت کمتر باشد، هیچ‌گونه صفی ایجاد فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل/ سال یازدهم/ شماره سوم/ بهار ۱۳۹۹

نمی‌شود. از سوی دیگر اگر نرخ ورودی بیش از نرخ خدمت باشد، صف رشدی پایان‌ناپذیر و همچنین طولی معادل اختلاف بین نرخ ورودی و خدمت خواهد داشت. سلول بالا سمت راست الگویی را نشان می‌دهد که نرخ ورودی نسبت به زمان ثابت است، درحالی‌که نرخ خدمت متغیر می‌باشد. لازم به ذکر است که نرخ خدمت باید در برخی از دوره‌های زمانی، از نرخ ورودی کمتر و در برخی دیگر بیشتر باشد. این سلول نیز به زیرگروه‌هایی از الگوهای تشکیل صف تقسیم می‌گردد.

نرخ خدمت دو مورد نشان داده شده در این سلول از شکل ۳ می‌تواند به شکل یک موج منظم یا مربعی نباشد. بدین معنا که ممکن است تغییرات در مقادیر مختلف نرخ خدمت رخ دهد؛ لذا لازم نیست که این تغییرات آنی رخ دهند و می‌تواند در طول دوره‌های انتقالی رخ دهند. مثال تقاطع چراغ‌دار با نمودار سمت چپ این سلول متناسب است، در حالی‌که وقوع یک حادثه یا تصادف به نموداری مانند آنچه که در سمت راست این سلول نشان داده می‌شود، منتج می‌گردد. سلول سمت چپ پایین الگویی را نشان می‌دهد که در آن نرخ ورودی نسبت به زمان تغییر می‌کند، درحالی‌که نرخ خدمت ثابت است.

برای تشکیل و سپس پراکنده شدن صف، نرخ ورودی باید در برخی از دوره‌های زمانی بیشتر از نرخ خدمت و در برخی دیگر کمتر از نرخ خدمت باشد. دو زیرگروه از الگوهای تشکیل صف در شکل ۳ نشان داده می‌شوند. الگوی سمت چپ سلول، یک نمونه موج منظم از نرخ ورودی را نشان می‌دهد، درحالی‌که الگوی سمت راست سلول برای دوره‌های انتقالی در طول تغییرات نرخ ورودی فراهم آمده است. سلول پایین سمت راست وضعیت پیچیده‌ای را نشان می‌دهد که هم نرخ ورودی و هم نرخ خدمت نسبت به زمان متغیر می‌باشند. برای تشکیل و سپس پراکنده شدن صف، نرخ ورودی ابتدا باید از نرخ خدمت بیشتر باشد و سپس از آن کمتر شود. الگویی که سمت چپ سلول قرار دارد، یک نوع موج منظم از نرخ ورودی و یک نوع موج منظم معکوس از نرخ خدمت را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الگو ساعتی جریان پل سان فرانسیسکو نسبت به جریان در طول روز [۷]

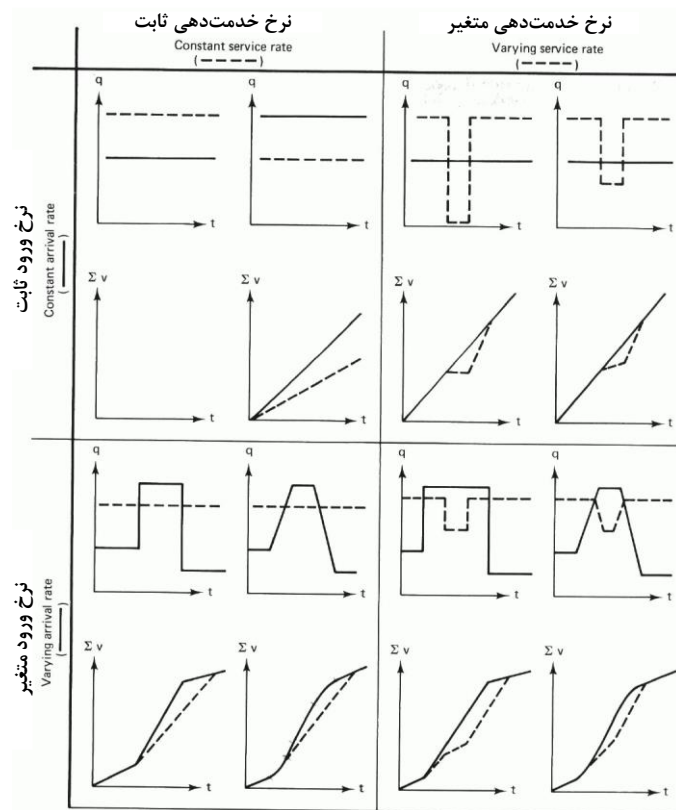


شکل ۲. دستگاه Barrier Transfer Machin

دولینگ^۳ (۲۰۰۸) و شارما (۲۰۰۹) تحلیل شد [Sharma, 2009; Kyte, 2008; Dowling, 2008]. در سال ۲۰۰۹ کیت روش انباشت صف افزایشی برای جریان ترافیک در تقاطع چراغ‌دار را مورد بررسی قرار داده است [Kyte, 2009].

در ارتباط با صف در رمپ ورودی وو و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸ مدل‌هایی برای تخمین صف در رمپ ورودی ارائه داده‌اند [Wu, 2008]. همچنین خصوصیات تخلیه صف در تقاطع‌های چراغ‌دار توسط کیت و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۸،

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه



شکل ۳. الگوهای تشکیل صف قطعی [۷]

تبدیل ایجاد شده استخراج می‌شود [Kimber and Hollis, 1979; Akcelik, 1988].

چندین مدل ترافیکی مدل مبتنی بر روش ورودی و خروجی جهت تخمین ویژگی‌های صف شامل PASSER II-90، SIGNAL 94 و روش راهنمای ظرفیت راه، SIDRA، SYNCHRO3 و TRANSYT-7F بررسی شد و معلوم شد نتایج خروجی این مدل‌ها تا اندازه‌ای متفاوت است چون روش محاسباتی و تعاریف صف در آنها متفاوت است [Mystkowski and Khan, 1999]. در برخی از آنها طول صف اولیه می‌تواند در مدل‌سازی دیده شود ولی در سایر مدل‌ها این قابلیت وجود ندارد [Vilorio et al., 2000].

یک روش ورودی و خروجی ترکیبی جهت تخمین صف توسط شارما و همکاران در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد شد که ویژگی‌های صف را به صورت زمان واقعی ارائه می‌دهد [Sharma, 2007]. این مدل یک روش گرافیکی مبتنی بر

مدل‌های ورودی و خروجی بر روی تجمع خودروها قبل از گلوگاه تقاطع یا آزادراه تمرکز دارند. این روش برای نخستین بار توسط وبستر در سال ۱۹۵۸ میلادی برای تخمین طول صف یک رویکرد از تقاطع چراغ‌دار استفاده شد و پس از آن این روش توسط سایر محققین از جمله کتلینگ، ویگوس و همچنین استرانگ و همکارانش اصلاح شد [Strong et al. 2006; Vigos, 2008; Catling, 1977]. داده‌های لازم برای چنین مدل‌هایی عموماً با شناسگرهای نصب شده بر روی جاده و در محل خط توقف و چندین متر دورتر از خط توقف به دست آمدند.

بسیاری از مدل‌های اولیه از نوع مدل‌های حالت پایدار بودند که در آنها فرض می‌شود بعد از گذشت زمان کافی، حالت سامانه مستقل از حالت اولیه است [Webster, 1958]. و عبارت‌های وابسته به زمان از عبارت‌های حالت پایدار با استفاده از روش

دیاگرام ورودی و خروجی است که می‌تواند از لحاظ نظری ویژگی‌های مکانی و زمانی طول صف در بالادست گلوگاه را تعیین کند. این روش در سه حالت مختلف به کار گرفته شد: حالت ساده نرخ خروج ثابت از گلوگاه، گلوگاهی که یک مرتبه تغییر کند و تقاطع چراغ‌دار در حالت زیر اشباع. پارامترهای کلان مورد نیاز برای مدل از ارتباط با شکل مثلثی جریان و چگالی گرفته شد.

با توجه به کمبود ادبیات تحقیق در حوزه به کارگیری نظریه صف در بخش اساسی تسهیلات جریان بدون وقفه (ناحیه دور از شیب راهه‌های ورودی و خروجی)، پژوهش در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد. همچنین، اکثر مطالعات در این زمینه جنبه مشاهدات میدانی دارد و لذا پژوهشی که به طور نظری شناخت بیشتری از خصوصیات صف نشان دهد مورد نیاز است.

۳. روش تحقیق

با استفاده از روش عددی ارائه شده در این مقاله امکان محاسبه خصوصیات صف تشکیل شده با هر شکل ورود و خروج وسایل نقلیه وجود دارد. هدف اصلی مقاله گلوگاه‌های موجود در آزادراه‌ها می‌باشد اگر ظرفیت را به صورت ثابت و قطعی در نظر بگیریم و الگو ورود خودرو در بازه‌های متفاوت قطعی در نظر گرفته شود الگوی دوزنقه ای شکل مشابه قسمت پایین سمت چپ در شکل ۳ اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر در این مقاله یک مدل قطعی تعمیم یافته صف ارائه می‌شود.

برای بیان آن یک مسأله بررسی می‌گردد که در آن نرخ ورودی متغیر و نرخ خدمت دهی ثابت است و نمودار

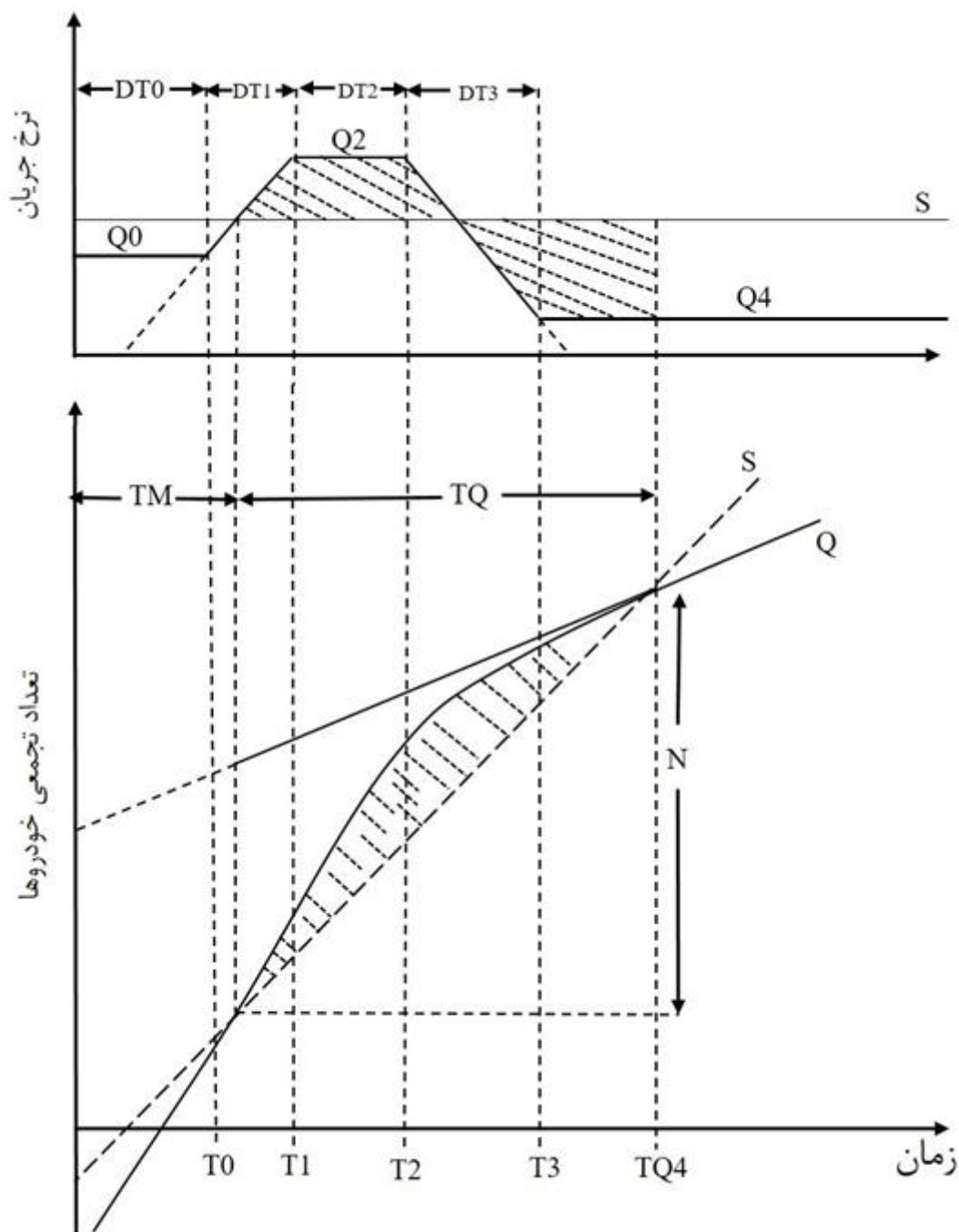
تشکیل صف در شکل ۴ نشان داده می‌شود. این حالت ممکن است در تسهیلات جریان بدون وقفه (غیر منقطع) مثل آزادراه که در آن نرخ خدمت (اگر حادثه‌ای اتفاق نیفتد) ثابت و نرخ ورود یا همان تقاضا متغیر است، پیش آید.

نرخ خدمت S برحسب وسیله نقلیه بر ساعت در کل دوره مطالعه ثابت است. الگوی تقاضای نرخ ورودی Q به شکل یک دوره اوج است که به صورت افزایش تدریجی در بخش ابتدایی این دوره و کاهش تدریجی در بخش انتهایی آن است. به طور مشخص تر، نرخ ورودی با مقدار ثابت Q_0 در بازه زمانی DT_0 آغاز می‌شود که این مقدار از نرخ خدمت S کمتر است. در طول بازه زمانی DT_1 نرخ ورودی Q_1 به صورت خطی از Q_1 تا Q_2 افزایش یافته و گاهی اوقات در طول این دوره زمانی نیز نرخ ورودی Q_1 از نرخ خدمت بیشتر می‌شود. در طول بازه زمانی DT_2 نرخ ورودی مقدار ثابت Q_2 دارد. سپس نرخ ورودی به صورت خطی از Q_2 تا Q_4 کاهش یافته و گاهی اوقات در طول این دوره زمانی نیز نرخ ورودی Q_3 از نرخ خدمت کمتر می‌گردد. پس از بازه زمانی DT_3 نرخ ورودی Q_4 برای تمام مدت زمان مطالعه ثابت باقی می‌ماند.

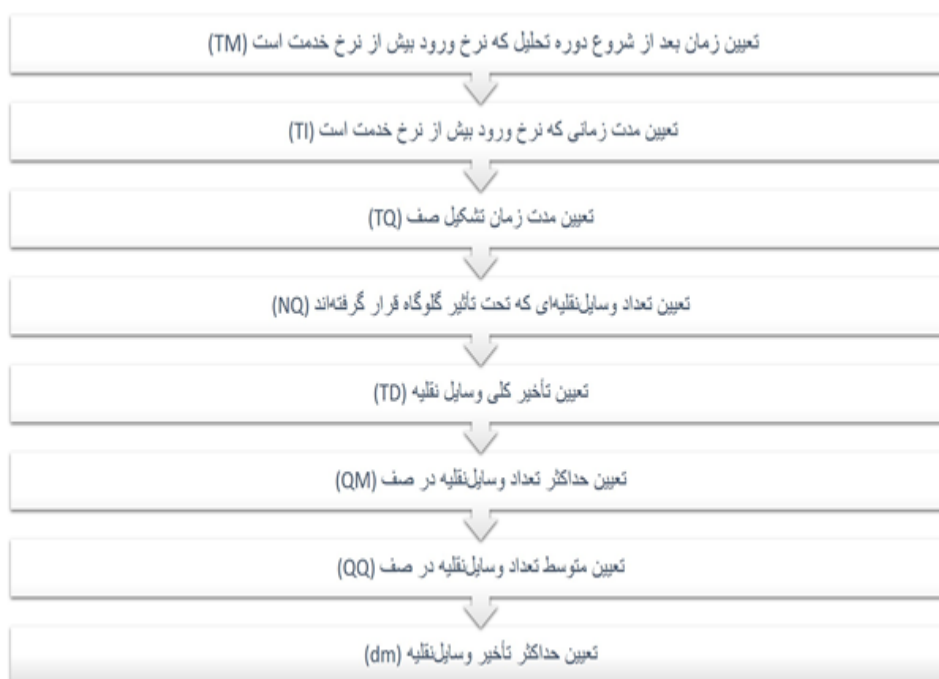
در شکل ۴ نمودار بالا مربوط نرخ ورود و خروج خودروها در حسب زمان و نمودار پایین، نمودار تجمعی صف وسایل نقلیه در شکل می‌باشد. لازم به ذکر است که Q_1 و Q_3 در نمودار بالا به صورت خطی تغییر می‌کنند و در نمودار پایین به شکل منحنی درمی‌آیند.

برای بررسی و حل مسأله صف از مبانی ریاضیات استفاده و بر طبق روند نمایش داده در شکل ۵ عمل می‌شود

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه



شکل ۴. نمودار تشکیل صف برای مسأله تعمیم یافته نرخ ورودی متغیر



شکل ۵. نمایش روند انجام محاسبات پژوهش

بخش آزادراه در نظر گرفته شده بدون دسترسی ورودی و خروجی است و فرض می‌شود نرخ ظرفیت یکنواخت $S(T)$ در آن وجود دارد. الگوی تقاضای ترافیک همان‌گونه که بحث شد به صورت گرافیکی در شکل ۴ قابل مشاهده است. ظرفیت و تقاضا در همه لحظات به شکل زیر مفروض است:

$$q_0(T) = q_0 \quad 0 < T < T_0 \quad (۱)$$

$$q_1(T) = A_1 + B_1 T \quad T_0 < T < T_1$$

$$q_2(T) = q_2 \quad T_1 < T < T_2$$

$$q_3(T) = A_3 + B_3 T \quad T_2 < T < T_3$$

$$q_4(T) = q_4 \quad T_3 < T$$

$$S(T) = S \quad 0 < T$$

پس از حل مسئله کلی صف و استخراج روابط آن، کدنویسی با نرم‌افزار متلب انجام می‌شود و یک مسئله برای آن در نظر گرفته شده و مقادیر شاخص‌های کارایی آن محاسبه می‌گردد. در نهایت با تحلیل حساسیت تأثیر درصدهای مختلف افزایش ظرفیت بر روی شاخص‌های کارایی صف بررسی می‌شود.

در این مقاله برای بررسی و حل مسئله صف از دو روش فرمول نویسی ریاضی و عددی استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. در روش اول به کمک نوشتن معادلات خط و محاسبه نقاط برخورد و مساحت‌های بین اشکال با انتگرال گیری و با کمک نرم افزار کامپیوتری پارامترهای صف محاسبه می‌شود و در روش دوم با نوشتن ماتریس ورودی و خروجی و با استفاده از درایه های ماتریس صف را به صورت ماتریسی و با کمک نرم افزار کامپیوتری حل شده و پارامترهای گفته شده در قسمت روش تحقیق را محاسبه می‌شود.

۳-۱ روش مستقیم (فرمول نویسی)

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه

مقادیر A_1, B_1, A_3 و B_3 بسته به الگوی تقاضا از شکل ۴ به صورت زیر قابل استخراج است:

$$A_1 = q_2 - (q_2 - q_0)(T_1)/(DT_1) \quad (۲)$$

$$B_1 = (q_4 - q_0)/(DT_1)$$

$$A_3 = q_2 - (q_4 - q_2)(T_2)/(DT_3)$$

$$B_3 = (q_4 - q_2)/(DT_3)$$

جریان تجمعی در قسمت پایین شکل ۴ مشاهده می شود با انتگرال گیری مشابه روابط زیر قابل محاسبه است:

$$Q_0(T) = \int q_0(T)dt = q_0T \quad 0 < T < T_0 \quad (۳)$$

$$Q_1(T) = \int (A_1 + B_1T)dt = C_1 + A_1T + 0.5B_1T^2 \quad T_0 < T < T_1$$

$$Q_2(T) = \int q_2(T)dt = C_2 + q_2T \quad T_1 < T < T_2$$

$$Q_3(T) = \int (A_3 + B_3T)dt = C_3 + A_3T + 0.5B_3T^2 \quad T_2 < T < T_3$$

$$Q_4(T) = \int q_4(T)dt = C_4 + q_4T \quad T_3 < T < T_4$$

$$S(T) = \int s(T)dt = C_4 + ST \quad 0 < T$$

مقادیر ثابت انتگرال به صورت زیر قابل تعیین می شوند:

$$C_1 = -A_1(T_0) - 0.5B_1(T_0^2) + q_0(T_0) \quad (۴)$$

$$C_2 = C_1 + A_1(T_0) + 0.5B_1(T_0^2) - q_2(T_0)$$

$$C_3 = C_2 - A_3(T_2) - 0.5B_3(T_2^2) + q_2(T_2)$$

$$C_4 = C_3 + A_3(T_3) + 0.5B_3(T_3^2) - q_4(T_3)$$

$$C_5 = C_1 + A_1(T_M) + 0.5B_1(T_M^2) - S(T_M)$$

از این روابط مشاهده می شود که جریان یکنواخت نمایانگر

خط مستقیم و جریان خطی نمایانگر منحنی درجه ۲ در دیاگرام

تجمعی است. تا زمانی که نرخ تقاضا (نرخ ورود) از ظرفیت

(نرخ خروج) تجاوز نکند هیچ صف و تأخیری به وجود

نمی آید. بنابراین اولین قدم تعیین لحظه ای است که نرخ تقاضا

برابر با ظرفیت می شود و در این لحظه صف شروع می شود و

وسایل نقلیه با تأخیر مواجه می شوند

$$T_M = DT_0 + DT_1(S - q_0)/(q_2 - q_0) \quad (۵)$$

تقاضای $q(T)$ بیش از ظرفیت $s(T)$ در بازه زمانی TI باقی

می ماند. در این بازی زمانی طول صف افزایش پیدا می کنند و

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال یازدهم / شماره سوم / بهار ۱۳۹۹

در انتهای این بازه زمانی، طول صف و تأخیر خودروها به حداکثر مقادیر خود می رسند:

$$TI = (DT_1)K + DT_2 + (DT_3)L \quad (۶)$$

که در آن:

$$K = (q_2 - s)/(q_2 - q_0) \quad (۷)$$

$$L = (s - q_2)/(q_4 - q_2)$$

تعداد وسایل نقلیه ای که در دوره زمانی صف (TQ) در سامانه حضور دارند از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$N' = \int_0^T (q(T) - s(T))dt \quad (۸)$$

اگر در رابطه بالا $N'=0$ قرار دهیم، می توان رابطه ای جهت محاسبه دوره زمانی صف (TQ) استخراج کرد. در این راستا دو حالت پیش می آید. اگر صف پس از زمان T_3 از هم بپاشد مقدار TQ برابر است با:

$$TNQ = \left(\frac{T_1}{2}\right)\left(\frac{(q_2 - s)}{(s - q_4)} + 2\right) + \left(\frac{DT_2}{2}\right)\left(\frac{(q_2 - s)}{(s - q_4)}\right) + \left(\frac{DT_3}{2}\right)\left(\frac{(q_4 - s)}{(q_4 - q_2)}\right) \quad (۹)$$

اگر صف پیش از زمان T_3 از هم بپاشد مقدار TQ برابر می شود با:

$$TNP = T_1 + \sqrt{\left(\frac{(q_2 - s)}{(s - q_4)}\right)(T_1 + DT_2)} \quad (۱۰)$$

تأخیر کل (D) بر حسب وسیله نقلیه بر ساعت به صورت گرافیکی در بخش پایینی شکل ۴ در قسمت هاشور زده شده قابل مشاهده است و با انتگرال گیری زیر قابل محاسبه است:

تأخیر کل با حل این انتگرال به صورت تابعی از نرخ های جریان $q_0(T), q_2(T), q_4(T), s(T)$ و بازه های زمانی DT_0, DT_1, DT_2 و DT_3 محاسبه می شود. تأخیر کل اگر صف پس از زمان T_3 از هم بپاشد، D_N است که از رابطه زیر محاسبه می شود.

پس از معرفی روش عددی روابط ارائه شده در این قسمت برای یک مثال موردی به کار گرفته می شود. در این راستا برنامه کامپیوتری با زبان متلب نوشته می شود و روابط ارائه شده برای محاسبه ویژگی های صف به کار می رود.

۲-۳ روش عددی

برای حل عددی مساله دو ماتریس در نظر می گیریم، درایه های ماتریس اول (a) مقادیر نرخ ورود خودروها در هر ثانیه و در ماتریس دوم (d) مقادیر نرخ خروجی می باشد، برای دقت هرچه بیشتر می توان بازه های زمانی را کوچک تر در نظر گرفت در صورتی که دقت داده های وارد شده یک ثانیه باشد برای هر ساعت ۳۶۰۰ سطر برای ماتریس ها نوشته خواهد شد. در ماتریس ورودی خودروها، درایه ها در سه بخش با توزیع ثابت و دو بخش با توزیع خطی وارد می شوند. در صورتی که نرخ خدمت را ثابت بگیریم درایه های ماتریس خروجی در زمان هایی که نرخ ورود از خروج کمتر می باشد برابر نرخ ورود و در سایر زمان ها برابر ظرفیت آزادراه می باشد. با در نظر گرفتن دقت ثانیه برای درایه های ماتریس ورودی تا ثانیه آخر بازه DT₀ برابر مقدار Q₀ می باشد. در بازه DT₁ درایه i ام از رابطه زیر بدست می آیند :

$$Q_0 + \frac{i(q_2 - q_0)}{3600} \quad (۱۷)$$

در بازه DT₂ تمامی درایه ها برابر Q₂ می باشد و سپس در بازه DT₁ درایه ها با کمک رابطه زیر وارد می شوند:

$$Q_2 + \frac{i(q_2 - q_4)}{3600} \quad (۱۸)$$

بقیه درایه های ماتریس تا انتها مقدار Q₄ وارد می شود. اولین درایه ای که مقدار ورودی برابر ظرفیت می باشد لحظه شروع صف (ابتدای بازه TM) و اولین درایه که دوباره به مقدار ظرفیت می رسد لحظه ای است که صف شروع به از هم پاشیدن می کند (انتهای بازه TI). برای ماتریس خروجی درایه

$$D_N = \int_{T_M}^{T_1} Q_1(T) dT + \int_{T_1}^{T_2} Q_2(T) dT + \int_{T_2}^{T_3} Q_3(T) dT + \int_{T_3}^{T_{Q_4}} Q_4(T) dT - \int_{T_M}^{T_{Q_4}} s(T) dT \quad (۱۱)$$

تأخیر کل اگر صف پیش از زمان T₃ از هم بپاشد، DP است که از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$D_N = \int_{T_M}^{T_1} Q_1(T) dT + \int_{T_1}^{T_2} Q_2(T) dT + L \int_{T_2}^{T_3} Q_3(T) dT - \int_{T_M}^{T_{Q_3}} s(T) dT \quad (۱۲)$$

حداکثر تعداد وسایل نقلیه در صف (Q_{max}) در انتهای بازه زمانی TI رخ می دهد به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Q_{max} = 0.5(q_2 - s)(TI - DT_2) \quad (۱۳)$$

متوسط تعداد وسایل نقلیه در صف ($\bar{Q}$) با توجه به تأخیر کل (D) و بازه زمانی صف یا ازدحام (TQ) قابل تعیین است:

$$\bar{Q} = D/TQ \quad (۱۴)$$

حداکثر تأخیر خودرویی (Q_{max}) برحسب ساعت مربوط به وسیله نقلیه ای است که درست در انتهای بازه زمانی TI می رسد و با رابطه تعیین می شود:

$$D_{max} = (q_2 - s)(TI - DT_2)/(2s) \quad (۱۵)$$

متوسط تأخیر تک تک وسایل نقلیه ($\bar{D}$) بر حسب ساعت با تقسیم کل تأخیر D بر تعداد وسایل نقلیه مواجه شده با صف N به صورت رابطه ای بدست می آید:

$$\bar{D} = D/N \quad (۱۶)$$

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه

$$\bar{d}_M = TD/NQ \quad (20)$$

در نهایت حداکثر تأخیر انفرادی (تک-تک) خودروها برحسب ساعت (d_M) از رابطه ۱۵ محاسبه خواهد شد:

این تأخیر برای وسیله نقلیه ای رخ می دهد که در پایان بازه زمانی TI وارد می شود.

در این راستا برای مجموعه روابط فوق الذکر برنامه کامپیوتری در محیط متلب نوشته شد و اطلاعات ورودی مانند برنامه کامپیوتری که در مسأله بعدی مورد استفاده قرار می گیرد، به برنامه کامپیوتری ارائه شد.

۴. نتایج و بحث

برای تحلیل با استفاده از روش های مذکور از داده های برداشت شده مربوط به نرخ متوسط ورود خودروها در بزرگراه جمهوری اسلامی (شهر کرمان) استفاده شده است. این اعداد برای سادگی مساله به نزدیک ترین اعداد گرد شده اند. ظرفیت بزرگراه ۵۵۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت است و برداشت میدانی از این بزرگراه نشان میدهد که نرخ متوسط ورود خودروها ۳۰۰۰ وسیله نقلیه در ساعت می باشد و در مدت یک ساعت نرخ اوج ۶۶۰۰ وسیله نقلیه در ساعت مشاهده می شود. تقاضای ترافیک قبل و بعد از زمان اوج ۳۰۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت است و تقاضای اوج ۶۶۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت است که به مدت یک ساعت ادامه می یابد. تغییر در میزان تقاضا از ۳۰۰۰ به ۶۶۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت به مدت یک ساعت و از ۶۶۰۰ به ۳۰۰۰ نیز یک ساعت به طول می انجامد. نمودار تشکیل صف برای این مسأله در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

محاسبه مشخصات مختلف صف برای موقعیت تشریح شده در بالا و سپس انجام تحلیل حساسیت برای تعیین اثر افزایش ظرفیت گلوگاه روی شاخص های کارایی صف مد نظر است.

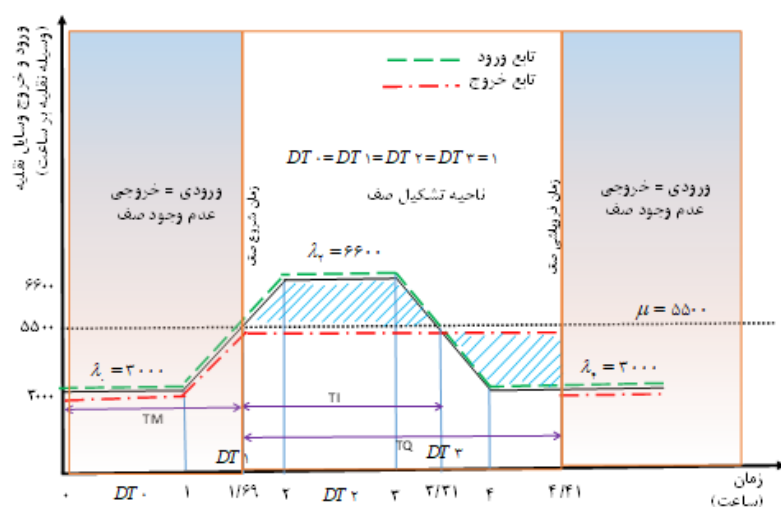
های ماتریس تا زمانی که به لحظه شروع صف می رسیم برابر درایه های ماتریس ورودی متناظر می باشد و از آن درایه به بعد تا لحظه ای که دوباره درایه متناظر در ماتریس ورودی به مقدار ظرفیت برسد برابر S می باشد نهایتاً از انتهای بازه TI تا انتهای ماتریس برابر درایه ماتریس ورودی متناظر است.

پس از تشکیل ماتریس های ورود و خروج خودروها دو ماتریس دیگر برای مقادیر تجمعی خودروها در نظر می گیریم که درایه های آن ها برابر تعداد تجمعی ورود (A) و خروج خودروها (D) تا آن لحظه می باشد. در الگوی دوزنقه صف اگر ماتریس ورودی خودروها را از ماتریس خروجی کم نماییم اولین درایه غیر صفر برابر زمان ایجاد صف (TM) می باشد و مدت زمانی که طول می کشد تا دوباره درایه ماتریس تفاضل صفر شود، زمان هایی است که نرخ ورود بیش از نرخ خدمت است (TI).

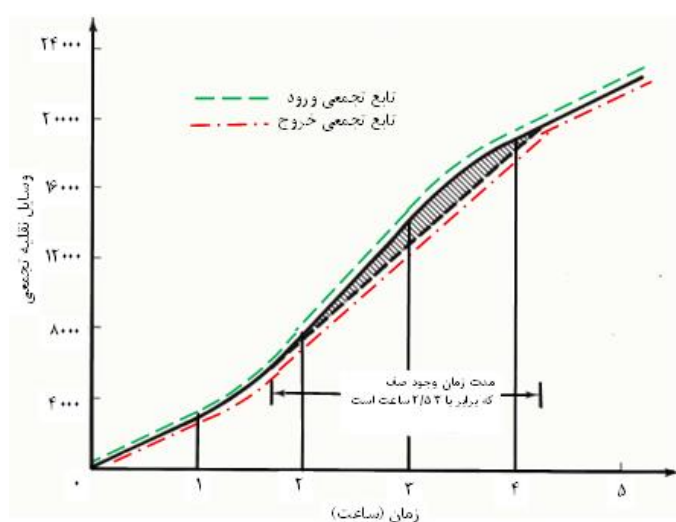
همین طور اگر ماتریس تجمعی ورودی خودروها را از ماتریس تجمعی خروجی خودروها کم نماییم اولین درایه صفر پس از زمان شروع صف نشان دهنده زمان فروپاشی صف و تفاضل بین این زمان و زمان شروع صف برابر مدت زمان تشکیل صف (TQ) می باشد.

در ماتریس تجمعی ورودی خودروها از تفاضل درایه مربوط به زمان شروع و فروپاشی صف تعداد خودروهای تحت تأثیر گلوگاه (NQ) محاسبه می شود. در ماتریس تفاضل ماتریس های تجمعی ورودی و خروجی (ماتریس Q)، درایه دارای بیشترین مقدار برابر حداکثر طول صف (حداکثر تعداد خودروها در صف Q_M) است و مجموع درایه های این ماتریس برابر تأخیر کلی وسایل نقلیه (TD) می باشد. اگر مقدار TD را بر ۳۶۰۰ تقسیم نماییم نرخ تأخیر برحسب خودرو نقلیه در ساعت محاسبه می شود سپس از روابط زیر مقادیر میانگین تعداد وسایل نقلیه در صف $\bar{Q}_Q$ و متوسط تأخیر انفرادی خودروها $\bar{d}_M$ بدست می آید:

$$\bar{Q}_Q = TD/TQ \quad (19)$$



شکل ۶. نمایش توابع ورودی و خروجی برای مسأله نمونه گلوگاه آزادراه



شکل ۷. نمودار تشکیل صف برای گلوگاه یک آزادراه

با استفاده از نرم افزار متلب ماتریس های ورودی و خروجی و تجمعی آن ها ایجاد و پارامترهای صف محاسبه می شود سپس مقدار ظرفیت آزادراه ۲، ۴، ۸ و ۱۶ درصد افزایش داده شد و صف ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین با روش مستقیم نیز مسأله فرمول نویسی و حل شد که جواب های یکسانی از برنامه کامپیوتری برای هر دو حالت بدست آمد. نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده است.

طبق شکل ۶، توابع ورودی و خروجی به صورت زیر است:

$$\text{arrival function} = \begin{cases} 3000 & 0 < t \leq 1 \\ 3600(t-1)+3000 & 1 < t \leq 2 \\ 6600 & 2 < t \leq 3 \\ 6600-3600(t-3) & 3 < t \leq 4 \\ 3000 & 4 < t \end{cases}$$

$$\text{departure function} = \begin{cases} 3000 & 0 < t \leq 1 \\ 3600(t-1)+3000 & 1 < t \leq 1.69=TM \\ 5500 & 1.69 < t \leq 4.41=TM+TQ \\ 3000 & 4.41 < t \end{cases}$$

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه

جدول ۱. نتایج حاصل از برنامه متلب

پارامتر	واحد	مدل پایه					افزایش ظرفیت				
		C	C+0.02C	C+0.04C	C+0.08C	C+0.16C					
		۵۵۰۰	۵۶۱۰	۵۷۲۰	۵۹۴۰	۶۳۸۰					
Ti	hr	۱/۶۱۰	۱/۵۴۹	۱/۴۸۸	۱/۳۶۶	۱/۱۲۱					
Tq	hr	۲/۵۳۲	۲/۳۹۵	۲/۲۶۸	۲/۰۲۵	۱/۴۸۱					
N	veh	۱۳۹۲۹	۱۳۴۴۱	۱۲۹۷۹	۱۲۰۳۰	۹۴۵۶					
Q max	veh	۱۴۳۶	۱۲۶۲	۱۰۹۵	۷۸۱	۲۳۳					
$\bar{Q}_Q$	veh	۷۹۶	۷۰۲	۶۱۰	۴۳۲	۱۲۶					
D max	hr	۰/۲۶۱	۰/۲۲۵	۰/۱۹۱	۰/۱۳۱	۰/۰۳۶					
$\bar{d}_M$	hr	۰/۱۴۴	۰/۱۲۵	۰/۱۰۶	۰/۰۷۲	۰/۰۱۹					
D	veh/hr	۲۰۱۷	۱۶۸۳	۱۳۸۴	۸۷۶	۱۸۷					

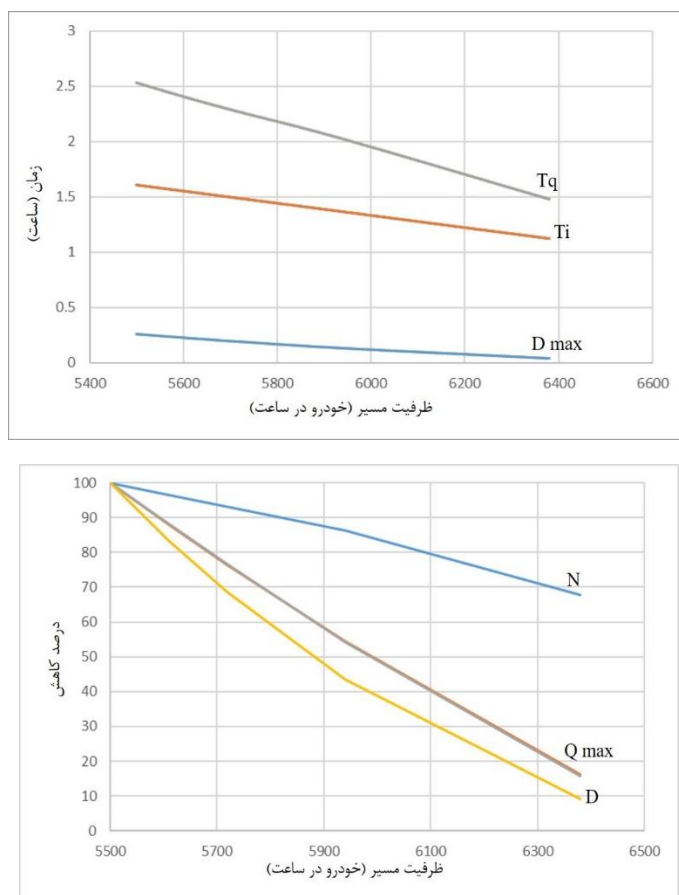
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مسأله نمونه با پارامترهای ورودی مختلف ایجاد شد که نماینده مسائل مختلفی است که می‌توان با تغییر در پارامترهای آن به وجود آورد. از تحلیل نتایج مثال موردی مشخص شد افزایش ظرفیت بر بهبود ویژگی‌های صف تأثیرگذار است بنابر این می‌توان با قانون ممنوعیت پارک کناری در ساعات اوج و همچنین راهکاری برای افزایش خطوط مسیر و در نتیجه افزایش ظرفیت مسیر تاخیر استفاده کنندگان از راه را کاهش داد. استفاده از مسیرهای موازی و یا یک طرفه کردن مسیر در ساعاتی خاص برای افزایش ظرفیت مسیر نیز شیوه‌های دیگری برای کاهش تاخیر و بهبود پارامترهای صف است منتهی باید براساس مطالعات و تحلیل مسیر صورت بگیرد و میزان افزایش ظرفیت با استفاده از پارامترها صف مورد انتظار محاسبه شود که بدین منظور می‌

نتایج به دست آمده از برنامه کامپیوتری در شکل ۸ نشان داده شده در این شکل بخش اول نتایج عددی را به نمایش می‌گذارد و بخش نتایج تحلیل حساسیت که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، به صورت کمی نشان می‌دهد ویژگی‌ها و شاخص‌های کلی صف با افزایش ظرفیت بهبود می‌یابند. مسأله در نظر گرفته شده در این مقاله، یک مسأله کلی است که در بسیاری اوقات در ترافیک روزمره قابل مشاهده است، زیرا در آن اغلب الگوهای نرخ ورودی وجود دارد. برای مثال اگر DT_1 و DT_3 هر دو برابر با صفر باشند، الگوی ورودی به شکل مستطیل و مشابه الگوی ورودی سلول پایین سمت چپ شکل ۳ خواهد بود. از سوی دیگر اگر DT_2 برابر صفر باشد، نتیجه یک الگوی ورودی مثلثی شکل خواهد بود. اکثر الگوهای تقاضایی که در زندگی حقیقی با آن‌ها مواجه می‌شویم، با تغییرات مقادیر مختلف ورودی و بازه‌های زمانی قابل شبیه‌سازی هستند.

از برنامه کامپیوتری نوشته شده می‌توان شاخص‌های کارایی صف در تسهیلات بدون وقفه مثل آزادراه‌ها به‌دست آورد و همچنین از تحلیل حساسیت صورت گرفته می‌توان جهت مدیریت ترافیک و بررسی تأثیر افزایش ظرفیت بر روی شاخص‌های کارایی سامانه تحت مدیریت استفاده کرد.

توان از روابط ارائه شده از این مقاله استفاده کرد. استفاده از روابط ارائه شده در عمل دشوار می‌باشد؛ زیرا احتمال بروز خطا برای حل دستی آنها وجود دارد. برای این منظور مجموعه این روابط کامپیوتری شد و اطلاعات ورودی برای یک حالت خاص به برنامه کامپیوتری ارائه و تحلیل حساسیت صورت گرفت و نتایج ارزشمند آن در قالب یک گراف تعریف نشان داده شود.



شکل ۸. اثر افزایش ظرفیت بر مشخصات صف

۶. مراجع

- Mystkowski, C. & Khan, S. (1999). "Estimating queue lengths by using SIGNAL94, SYNCHRO3, TRANSYT-7F, PASSER II-90, and CORSIM", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1683, pp. 110-117.
- Sharma, A. (2007) "Input-output and hybrid techniques for real-time prediction of delay and maximum queue length at signalized intersections", transportation research record, No. 2035, pp. 69-80.
- Sharma, A. (2009) "Effect of Phase Countdown Timers on Queue Discharge Characteristics under Heterogeneous Traffic Conditions", transportation research record, No. 2130, pp. 93-100.
- Strong, D. W., Nagui M. R, Ken C. (2006) "New calculation method for existing and extended HCM delay estimation procedure", Proceedings of the 85th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Vigos, G., Papageorgiou, M., Wang, Y. (2008) "Real-time estimation of vehicle-count within signalized links", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, No. 16, pp. 18- 35.
- Viloria, F., Courage, K., Avery, D. (2000) "Comparison of queue-length models at signalized intersections", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1710, pp. 222-230.
- Viti, F. and Zuylen H. J. (2004) "Modeling queues at signalized intersections", Traffic Flow Theory and Highway Capacity and Quality of Services, No. 1883, pp. 68-77.
- Akcelik, R. (1988) "The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections", ITE Journal, No. 58, pp. 23-27.
- Catling I. (1977) "A time-dependent approach to junction delays", Traffic Engineering & Control, No. 18, pp. 520-526.
- Cohen, S. L. (2002) "Application of car following systems to queue discharge problem at signalized intersections", Traffic Flow Theory and Highway Capacity, No. 1802, pp. 205-213.
- Dowling, R. (2008) "Predicting Impacts of Intelligent Transportation Systems on Freeway Queue Discharge Flow Variability", transportation research record, No. 2047, pp. 49-56.
- Kimber, R. M. and Hollis, E. M. (1979) "Traffic Queues and Delays at Road Junctions"
- Kyte, M. (2008) "Characteristics of High-Resolution Queue Discharge and the Effect on Signal Timing", transportation research record, No. 2080, pp. 28-36.
- Kyte, M. (2009) "Validating the Incremental Queue Accumulation Method for Left-Turn Delay Estimation", transportation research record, No. 2130, pp. 42-51.
- Lin, F. B. and Thomas D. R. (2005) "Headway compression during queue discharge at signalized intersections", Highway Capacity and Quality of Service, No. 1920, pp. 81-85.

Metered On-Ramps", Transportation Research Record, No. 2099, pp. 30-38.

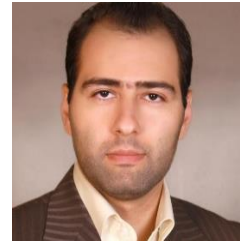
-Wu, J. C. (2008) "Methodologies for Estimating Vehicle Queue Length at Metered On-Ramps", transportation research record, No. 2047, pp. 75-82.

-Webster, F. (1958) "Traffic signal settings. Road Research Technical Paper 39", Road Research Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, London,

-Wu, J. (2009) "Experiment to Improve Estimation of Vehicle Queue Length at

ارائه مدل صف برای ارزیابی تأثیر تغییر ظرفیت بر تأخیر وسایل نقلیه در آزادراه

سید صابر ناصر علوی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات ایمنی و شبیه سازی ترافیک و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه شهید باهنر کرمان است.



نوید ندیمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک و هوش مصنوعی، طرح هندسی راه است. در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه شهید باهنر کرمان است.



محسن نخعی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه شهید باهنر کرمان اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان ارزیابی ایمنی با کمک داده‌های تداخل ترافیک است.

