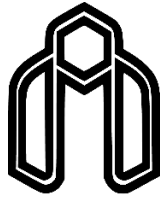


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

تخمین رابطه دینامیکی موج شوک تصادفات ناشی از تغییر خط در اثر انسداد

نگارنده: دانیال رضایی

استاد راهنما:

دکتر ایمان آقایان

دی ۱۳۹۸

شماره: ۹۹ / ۲ / ۲۲  
 تاریخ: ۹۹ / ۲ / ۲۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

**فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد**

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای دانیال رضایی با شماره دانشجویی ۹۶۰۷۳۸۴ رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری تحت عنوان تخمین رابطه دینامیکی موج شوک تصادفات ناشی از تغییر خط در اثر انسداد که در تاریخ ۱۳۹۸/۱۰/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹  (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸   
 ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶  (د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴   
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد   
 نوع تحقیق:  نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاداراهنمای اول	دکتر ایمان آقاییان	استادیار	
۲- استاداراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر جلیل شفائی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر عبدالاحد چوپانی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین قاسم زاده	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

رئیس دانشکده مهندسی عمران  
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کلیه امضاء و مهر درج شده در این فرم (در مدیریت محو تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برقرار شود)

تقدیم به پدر و مادرم

## تعهدنامه

اینجانب دانیال رضایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان تخمین رابطه دینامیکی موج شوک تصادفات ناشی از تغییر خط در اثر انسداد تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققین دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تصادفات کوتاه مدت در زمان‌های کوتاهی اتفاق می‌افتند که بر ویژگی‌های کلان ترافیک از جمله ظرفیت، جریان، سرعت و چگالی اثر منفی می‌گذارند. این مطالعه در نظر دارد تا اثر سناریوهای انسدادی یک خطه و دو خطه را بر به وجود آمدن سرعت موج شوک در یک آزاد راه چهار خطه و اثرات این موج شوک‌ها بر ویژگی‌های کلان ترافیک آن با توجه به داده‌های میدانی تعیین کند. علاوه بر این، در این پژوهش دو مدل توسعه یافته در قالب دو مدل سرعتی و چگالی، بر اساس مدل LWR نشان داده می‌شود. سپس حل مدل‌های توسعه یافته شده بر اساس روش عددی لکس- فردریش برای دو سناریوی ایجاد شده به دست می‌آید. نتایج نشان داد که سناریو انسداد یک خطه و دو خطه به ترتیب باعث کاهش ۲۱ و ۴۵ درصدی در ظرفیت آزادراه چهار خطه می‌شود. همچنین، نتایج بدست آمده از سرعت موج شوک‌ها و اثرات آن‌ها روی ویژگی‌های جریان ترافیک نشان داد که موج شوک‌های ناشی از انسداد دو خطه اثر بیشتری بر روی ویژگی‌های جریان ترافیک نسبت به موج شوک‌های ناشی از انسداد یک خطه دارند. به منظور مقایسه مدل‌های پیشنهادی با یکدیگر، نتایج نشان داد که سرعت موج شوک‌های ناشی از  $LWR^u$  و  $LWR^p$  بر اساس رابطه غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز در حالت انسداد دو خطه اختلاف کمتری را نسبت به مدل LWR از خود نشان می‌دهند (۱۴ و ۱۷ درصد). همچنین علت اختلاف نتایج در حالت انسداد یک خطه بدلیل تاثیر پارامتر چگالی راهبندان در مدل‌های توسعه یافته و کمتر بودن این پارامتر در حالت انسداد یک خطه از چگالی راهبندان، است. در نتیجه، ارزیابی نتایج عملکرد دو مدل پیشنهادی به دست آمده در این پژوهش نشان داد که مدل‌های توسعه یافته پیشنهادی ابزار مناسبی در محاسبه موج شوک‌ها بودند که این مدل‌ها توانستند اثر موج شوک را بر ویژگی‌های کلان ترافیک با عملکرد بالایی تحت شرایط ترافیکی سنگین نسبت به مدل LWR پیش‌بینی کنند.

**واژه‌های کلیدی:** تصادفات کوتاه مدت، سناریوهای انسداد، ویژگی‌های کلان ترافیک، موج شوک، مدل‌های

توسعه یافته LWR، روش لکس فردریش،

## فهرست مطالب

۱	فصل اول
۱	مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ تعریف مساله
۶	۳-۱ ضرورت انجام پژوهش
۷	۴-۱ اهداف پژوهش
۸	۵-۱ نوآوری پژوهش
۸	۶-۱ ساختار پژوهش
۱۱	فصل دوم
۱۱	مبانی نظری و پیشینه تحقیق
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۳	۲-۲ گلوگاههای ترافیکی
۱۴	۳-۲ تعریف موج شوک در جریان های ترافیک
۱۴	۴-۲ مدلسازی جریان ترافیک
۱۷	۵-۲ سرعت موج شوک
۱۹	۶-۲ انواع موج شوک
۲۰	۱-۶-۲ موج شوکهای با ابتدای ایستا
۲۱	۲-۶-۲ موج شوکهای تشکیل صف با حرکت به سمت عقب
۲۲	۳-۶-۲ موج شوکهای محو صف با حرکت به سمت عقب
۲۳	۴-۶-۲ موج شوکهای محو صف با انتهای ثابت
۲۵	۵-۶-۲ موج شوکهای تشکیل صف با حرکت به سمت جلو
۲۶	۶-۶-۲ کاربردهای نظریه ی موج شوک
۲۷	۱-۶-۲ بررسی موج شوک در جریان منقطع
۲۸	۲-۶-۲ بررسی موج شوک در جریان پیوسته
۳۵	فصل سوم
۳۵	روش تحقیق
۳۶	۱-۳ مقدمه
۳۷	۳-۲ جمع آوری اطلاعات

۳۸.....	۱-۲-۳ سناریوهای مورد مطالعه
۴۰.....	۲-۲-۳ استخراج اطلاعات:
۴۳.....	۳-۳ مدل گرین شیلدز.....
۴۴.....	۴-۳ برآورد سرعت موج شوک.....
۴۶.....	۱-۴-۳ مطالعه تحلیلی سرعتهای موج شوک مدل‌های $LWR\rho$ و $LWRu$ .....
۴۸.....	۲-۴-۳ روش لکس-فردریش و مدلسازی موج شوکها:

## فصل چهارم

۵۳

### نتایج

۵۳

۵۴.....	۱-۴ مقدمه.....
۵۴.....	۲-۴ بررسی تعداد خودروهایی عبوری در سناریوهای انسداد یک و دو خط.....
۵۵.....	۱-۲-۴ تعداد خودروهایی عبوری در هر خط.....
۵۷.....	۲-۲-۴ مقایسه تعداد خودروهایی عبوری.....
۵۸.....	۳-۲-۴ سرعت خودروهایی عبوری.....
۶۱.....	۴-۲-۴ بررسی جریان تحت اثر سناریوهای انسداد یک خط و انسداد دو خط.....
۶۲.....	۵-۲-۴ بررسی چگالی تحت اثر سناریوهای مورد نظر.....
۶۳.....	۶-۲-۴ محاسبه سرعت موج شوکها در سناریوهای مورد مطالعه با استفاده از رابطه $LWR$ .....
۶۵.....	۳-۴ برازش سرعت-چگالی-جریان به کمک مدل غیر خطی گرینشیلدز.....
۶۵.....	۱-۳-۴ برازش رابطه سرعت-چگالی.....
۶۶.....	۲-۳-۴ برازش رابطه حجم-چگالی.....
۶۸.....	۴-۴ سرعت موج شوک با استفاده از مدل پیشنهادی.....
۷۳.....	۵-۴ ارزیابی عملکرد روش های توسعه یافته.....

## فصل پنجم

۷۵

### بحث و نتیجه گیری

۷۵

۷۶.....	۱-۵ مقدمه.....
۷۷.....	۲-۵ نتایج تحقیق.....

### پیوست

۷۹

۸۰..... پیوست الف: تصاویری از محیط نرم افزار Adobe premier

۸۱

### منابع و مراجع



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱ گلوگاه ترافیکی بر اثر شرایط هندسی مسیر ..... ۱۳
- شکل ۲-۲ روابط کلی بین سرعت، چگالی و میزان جریان [18] ..... ۱۷
- شکل ۲-۳ حرکت موج شوک ایجاد شده ناشی از تغییرات چگالی ..... ۱۹
- شکل ۲-۴ موج شوک در یک تقاطع چراغدار ..... ۲۰
- شکل ۲-۵ نمودار جریان-چگالی برای تقاطع فوق ..... ۲۱
- شکل ۲-۶ نمودار جریان-چگالی برای حالت تشکیل صف با حرکت به سمت عقب ..... ۲۲
- شکل ۲-۷ نمودار جریان-چگالی برای حالت محو صف با حرکت به سمت عقب ..... ۲۳
- شکل ۲-۸ نمودار جریان-چگالی برای حالت محو صف با انتهای ثابت ..... ۲۳
- شکل ۲-۹ موج شوک ناشی از گلوگاه [1] ..... ۲۴
- شکل ۲-۱۰ نمودار جریان-چگالی برای حالت تشکیل صف با حرکت به سمت جلو ..... ۲۵
- شکل ۲-۱۱ ناحیه مکانی زمانی تصادف ثانویه ..... ۳۰
- شکل ۲-۱۲ موقعیت تصادفات و شناسگرها ..... ۳۱
- شکل ۳-۱ آزادراه شیخ فضل الله نوری [43] ..... ۳۷
- شکل ۳-۲ ناحیه مورد مطالعه در آزادراه شیخ فضل الله نوری ..... ۳۸
- شکل ۳-۳ سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش الف) انسداد یک خط ناشی از منطقه کاری ب) انسداد دو خط ناشی از تصادف در اثر تغییر خط ..... ۳۹
- شکل ۳-۴ نمونه ای از خطوط ترسیم شده برای اندازه گیری پارامترهای جریان ..... ۴۰
- شکل ۳-۵ سناریوهای مورد مطالعه الف) انسداد یک خط ناشی از مناطق کاری ب) انسداد دو خط ناشی از مناطق کاری و تصادف ..... ۴۱
- شکل ۴-۱ تعداد خودروهای عبوری در بازه های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در شرایط عادی جریان .. ۵۵
- شکل ۴-۲ تعداد خودروهای عبوری در بازه های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در حالت انسداد یک خط ..... ۵۶
- شکل ۴-۳ تعداد خودروهای عبوری در بازه های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در حالت انسداد دو خط ..... ۵۷
- شکل ۴-۴ تعداد خودروهای عبوری از مقطع مشخصی از راه در بازه زمانی مورد مطالعه ..... ۵۸
- شکل ۴-۵ نمودار تغییرات سرعت در زمان های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه ..... ۶۰
- شکل ۴-۶ نمودار تغییرات حجم ترافیک در زمان های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه ..... ۶۱
- شکل ۴-۷ نمودار تغییرات چگالی در زمان های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه ..... ۶۳

شکل ۴-۸	مقایسه سرعت موج شوک های برآورد شده با استفاده از LWR	۶۴
شکل ۴-۹	گراف سرعت-چگالی الف) انسداد یک خط ب) انسداد دو خط	۶۶
شکل ۴-۱۰	نمودارهای جریان چگالی و داده های میدانی الف) در حالت انسداد یک خط	۶۷
شکل ۴-۱۱	سیر تکاملی مکانی-زمانی سرعت موج شوکها در دو سناریوی پیشنهادی با استفاده از $LWR^u$	۷۱
شکل ۴-۱۲	سیر تکاملی مکانی-زمانی سرعت موج شوک ها در دو سناریوی پیشنهادی با استفاده از $LWR^p$	۷۲

### فهرست جداول

جدول ۳-۱	داده سرعت جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری	۴۲
جدول ۳-۲	داده جریان جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری	۴۲
جدول ۳-۳	داده چگالی جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری	۴۳
جدول ۳-۴	مقادیر اولیه سرعت موج شوک در روش لکس-فردریش	۵۱
جدول ۴-۱:	اطلاعات مربوط به سرعت برای خودروهای در سناریوهای مورد مطالعه	۵۹
جدول ۴-۲:	مقایسه نتایج روش پیشنهادی با مدل LWR	۷۳

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

امروزه حمل و نقل به عنوان یکی از زیرساخت‌های اساسی هر کشوری مطرح بوده و از جنبه‌های گوناگون اقتصادی، اجتماعی و سیاسی حائز اهمیت است. در میان انواع مختلف حمل و نقل (جاده ای، ریلی، هوایی و دریایی)، حمل و نقل جاده‌ای به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود به عنوان متداول‌ترین شیوه مطرح شده است. از جمله ویژگی‌های آن می‌توان به هزینه مناسب، دسترسی سریع، انعطاف پذیری در انتخاب مسیر و نیز امکان دسترسی به کلیه مراکز تولید و جذب بار و مسافر اشاره کرد. از این رو، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح شبکه حمل و نقل جاده‌ای از اهمیت بسیاری برخوردار است و بی‌شک بدون وجود شبکه حمل و نقل، تاسیسات و ناوگان مطلوب تصور رشد و توسعه عمومی کشور غیرممکن به نظر می‌رسد [1]. حمل و نقل جاده‌ای مزایای بسیاری را برای بالا بردن سطح استاندارد زندگی فراهم کرده است. با این حال حمل و نقل جاده‌ای تأثیرات منفی هم دارد که باید به آن‌ها توجه کافی صورت گیرد. با گسترش روز افزون ترافیک، در مقابل فواید اقتصادی، رفاهی، گسترش ارتباطات و سرعت انتقال، بحث تصادفات و نتایج ناشی از آن به یکی از چالش‌های جوامع بشری مبدل شده است. از دیگر مشکلات و تبعات منفی حمل و نقل جاده‌ای می‌توان به موضوع ازدحام و تاخیر اشاره کرد. از عواملی در روند جریان ترافیک تغییراتی ایجاد می‌کنند و باعث ایجاد تاخیر می‌شود، می‌توان به گلوگاه‌ها اشاره کرد. گلوگاه‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی مانند باریک شدن عرض راه، ابعاد پل و تونل و یا عواملی مانند مناطق کاری و تعمیرات راه و همچنین وقوع تصادف و بسته شدن خط یا خطوط مسیر اتفاق خواهد افتاد. یکی از دلایل مهمی که باعث تاخیر در سفرها می‌شود، موضوع تصادفات است که به دلیل ناگهانی بودن و غیر قابل پیش بینی بودن آن تأثیر مستقیم و بیشتری از عوامل دیگر بر جریان ترافیک دارد و با ایجاد موج شوک باعث بوجود آمدن صف‌های طولانی می‌شود. هنگامی که یک تصادف اتفاق می‌افتد، برای مدتی در خطی که در آن تصادف رخ داده است انسداد رخ می‌دهد. در صورت وقوع انسداد، بخشی از راه بسته می‌شود

که در این حالت عملاً ماهیت ترافیک عبوری و شرایط عملکردی راه تغییر خواهد کرد. در نتیجه مسدود شدن بخشی از راه، ظرفیت نیز به عنوان معیاری تأثیر گذار بر عملکرد راه دچار اختلال شده و با توجه به محل و شدت انسداد ممکن است کاهش یابد. حوادث کوتاه مدت مانند تصادف خودروها با یکدیگر در زمان‌های کوتاهی اتفاق می‌افتند که این اتفاق در زمانی که تراکم مسیر بالا است، مانند ساعت اوج ترافیک، باعث اثر منفی بر ویژگی‌های جریان ترافیک از جمله ظرفیت، سرعت و چگالی می‌شود. هر حادثه‌ای که باعث تغییر در ویژگی‌های جریان ترافیک می‌گردد، باعث ایجاد پدیده‌ای به نام موج شوک می‌شود. کاهش موثر اثرات منفی حمل و نقل جاده‌ای در هر مکانی تنها می‌تواند پس از کسب اطلاعات کافی برای تعریف مشکل و توسعه‌ی اینکه چه حد این مشکل تأثیر منفی بر روی شبکه راه‌ها دارد، بدست می‌آید.

## ۱-۲ تعریف مساله

تحلیل جریان ترافیک را می‌توان یکی از عوامل تأثیرگذار و کلیدی در برنامه ریزی حمل و نقل و مدیریت کارآمد در تسهیلات حمل و نقلی به حساب آورد به طوری که بخش قابل توجهی از تحقیقات و مقالات به این موضوع معطوف شده است و محققان در تلاش هستند تا بتوانند به کمک ابزارهای ریاضی و رایانه‌ای به تحلیل مناسب‌تری از جریان ترافیک دست یابند. یکی از روش‌های تحلیل جریان ترافیک که نخستین بار در سال ۱۹۵۵ توسط لایت هیل و ویت هام ارائه گردید، نظریه‌ی تحلیلی موج شوک<sup>۱</sup> می‌باشد. در ادامه و در سال ۱۹۵۶ توسط ریچاردز نیز ارائه شد که آن را به اختصار به صورت  $LWR$ <sup>۲</sup> نشان می‌دهند. از مدل موج شوک می‌توان برای تحلیل صف<sup>۳</sup> نیز استفاده کرد. این مدل برای نخستین بار توسط لایت هیل و ویت هام برای

---

<sup>۱</sup> Shockwave Theory

<sup>۲</sup> Lighthill, Whitham and Richards(LWR)

<sup>۳</sup> Queue

جریان پیوسته یا بدون وقفه تشریح شد [3,4]. همچنین از نظریه‌ی موج شوک می‌توان برای بررسی تاثیر تصادفات رانندگی بر جریان ترافیک استفاده کرد. وقوع تصادفات و یا تصادفاتی که باعث کاهش تعداد خطوط عبوری در جریان ترافیک می‌شود یکی از عواملی است که روند ترافیک را برهم زده و مختل می‌کند. آشفتگی جریان ترافیک یا رانندگی حرکت- توقف<sup>1</sup> اثرات منفی زیادی مانند افزایش مصرف سوخت، اثرات زیست محیطی و خطرات ایمنی دارد. ترافیک حرکت-توقف معمولاً به دلیل حجم ترافیک زیاد ناشی از قفل شدن خط عبوری تشکیل و باعث تأخیر غیر ضروری در سفر و اتلاف زیاد انرژی می‌گردد [5,6]. مانورهای تغییر خط<sup>2</sup> [7,8] و گلوگاه‌های ترافیکی در حال حرکت<sup>3</sup> [9,10] منجر به تشکیل و انتشار موج آشفتگی در جریان ترافیک می‌گردند.

با به وجود آمدن یک تصادف اولیه، شوک به صورت یک موج به جریان جاری ترافیک منتقل و باعث تغییر سرعت<sup>4</sup>، چگالی<sup>5</sup> و ایجاد تاخیر<sup>6</sup> شده و همچنین ممکن است باعث وقوع تصادفات بعدی شود. یک تصادف اولیه<sup>7</sup> ممکن است عامل ایجاد بیش از یک تصادف ثانویه<sup>8</sup> باشد. علاوه بر این، یک تصادف ثانویه ممکن است یک تصادف اولیه برای یک تصادف ثانویه دیگری باشد. هرچه مدت زمان تصادف طولانی‌تر باشد احتمال وقوع یک تصادف ثانویه بیشتر می‌شود. پتانسیل بالا برای وقوع و پیامدهای منفی تصادفاتی که در نتیجه تصادف اول ایجاد می‌شوند که به آن‌ها تصادفات ثانویه نیز گفته می‌شود باعث ایجاد نگرانی در مورد ایمنی بزرگراه می‌شود. با این حال، تصادفات اولیه و تصادفاتی که در نتیجه آن ایجاد می‌شوند معمولاً به صورت

---

<sup>1</sup> Stop-and-Go

<sup>2</sup> Line change maneuvers

<sup>3</sup> Moving bottleneck

<sup>4</sup> Velocity

<sup>5</sup> Density

<sup>6</sup> Delay

<sup>7</sup> Primary accident

<sup>8</sup> Secondary accident

جداگانه به عنوان تصادف عادی در پایگاه داده تصادف ثبت می‌شوند و هیچ زمینه‌ای برای شناسایی یک تصادف به عنوان تصادف ثانویه وجود ندارد و روابط آنها با تصادفات اولیه معمولاً بطور خاص در پایگاه داده تصادف ذکر نشده [10]. بنابراین در بسیاری از تحقیقات قبلی، تلاش‌های زیادی فقط برای شناسایی تصادفات ثانویه صورت گرفته است، به این صورت که اگر تصادفی در یک زمانی مشخص در ناحیه‌ای از پیش تعیین شده اتفاق افتد، این تصادف متأثر از تصادف اول می‌باشد، اما چگونگی و میزان این تاثیر گذاری کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

به دلیل این مشکلات و نتایج ناشی از آنها، انسداد خطوط ناشی از عوامل مختلف از جمله انسداد ناشی از مناطق کاری<sup>1</sup> و تصادفات باید مورد ارزیابی دقیق تری قرار گرفته شود. در مناطقی که به دلیل مناطق کاری انسداد خط رخ داده است، ظرفیت خط دچار کاهش شده و جریان ترافیک با تغییراتی روبرو می‌شود. با انسداد یافتن خط در نتیجه‌ی مناطق کاری، خودروهایی که در آن خط حضور دارند مجبور در تغییر خط دادن و حرکت کردن به سمت خط کناری هستند. این اقدام آنها مخصوصاً در دقایق ابتدایی انسداد، امکان وقوع تصادف با خودروهایی که در خط کناری به حرکت عادی خط می‌پردازند را افزایش می‌دهد و در واقع بین خودروهای عبوری از خط کناری و خودروهایی که مجبور به تغییر خط هستند یک نقطه برخورد بوجود می‌آید و تصادف در خط کناری منطقه کاری بوجود می‌آید. پس از تصادف خودروها، خط دوم هم بر اثر این تصادف دچار انسداد می‌شود که این انسداد موج شوک دیگری را به جریان ترافیک می‌دهد. با استفاده از روابط موجود میزان اثرات منفی موج شوک‌های ناشی از این سناریوها بر جریان ترافیک مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. علاوه بر این، در این مطالعه برای بهبود کیفیت ارزیابی، نیاز به توسعه و ایجاد رابطه دینامیکی با توجه به روابط موجود و همچنین با توسعه و ترکیب آن با روش‌های دیگر می‌باشد. تصادفات حاصل از موج شوک‌های ترافیکی به منظور بررسی میزان تاثیر گذاری موج شوک‌ها بر جریان ترافیک و تصادفات جاده‌ای نیازمند بررسی و

---

<sup>1</sup> Work Zone

مطالعه بیشتر هستند. برای کاهش تاثیر منفی تصادفات جاده‌ای لازم است پارامترهای درگیر از جمله حجم ترافیک، چگالی و سرعت در تصادفات شناسایی شده و مطالعات لازم برای بهبود شرایط ترافیک بر روی آنها انجام شود.

## ۳-۱ ضرورت انجام پژوهش

شبکه‌های حمل و نقل به عنوان یکی از پایه‌های مهم هر کشوری شناخته می‌شود و از جنبه‌های گوناگون اقتصادی، اجتماعی و سیاسی حائز اهمیت هستند، از این رو برنامه ریزی و مدیریت صحیح شبکه حمل و نقل جاده‌ای از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از ملزومات برنامه ریزی صحیح و اصولی، در نظر گرفتن شرایط مختلف عملکردی سیستم از جمله شرایط متراکم و راه‌بندان است. این پژوهش سعی دارد تا با بررسی ابعاد مختلف کاهش خطوط عبور بر اثر وقوع انسداد<sup>۱</sup> ناشی از مناطق کاری و تصادف ترافیکی در اثر تغییر خط در بازه‌ی زمانی و مکانی حداقل، تحت تاثیر موج شوک‌های ترافیکی پردازد. در نتیجه، به یک رابطه دینامیکی دست می‌یابد که سرعت موج شوک‌ها با استفاده از آن بررسی می‌شود. پس از محاسبه سرعت موج شوک، می‌توان سرعت پیش‌روی صف و تاثیر میزان و شدت این موج بر ظرفیت<sup>۲</sup> راه‌ها را تحت سناریوهای محتمل در تصادفات ترافیکی بررسی کرد. بر اساس مطالعات گذشته، برای اولین بار این پدیده در حال بررسی است و تا کنون اثر بخشی و مطالعه آن بر روی پارامترهای ترافیکی بررسی نشده است. با توجه به کمبود مطالعات و روابط لازم، می‌توان از نتایج و روابط حاصل از این پژوهش در مطالعات آتی با توجه به عدم وجود روابط ریاضی استفاده کرد. برای به حداکثر رساندن استفاده از زیر ساخت‌های موجود حمل و نقل و کاهش تاخیر، بهبود کنترل و کیفیت ترافیک، انجام این قبیل مطالعات ضروری است. شرایطی که در واقعیت اتفاق می‌افتد ولی تا

---

<sup>1</sup> Lane Closure

<sup>2</sup> Capacity



کنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. مطالعاتی از این دست می‌تواند با توسعه نظریه جریان ترافیک<sup>۱</sup> درک اساسی از عوامل مرتبط را ارائه دهد.

## ۱-۴ اهداف پژوهش

حوادث کوتاه مدت مانند تصادف خودروها با یکدیگر در زمان‌های کوتاهی اتفاق می‌افتند که باعث اثر منفی بر ویژگی‌های جریان ترافیک از جمله ظرفیت، سرعت و چگالی می‌شود. به دلیل این مشکلات و نتایج ناشی از آن، اهداف زیر مورد نظر این پژوهش می‌باشد:

- بررسی اثر انسداد یک خط بر اثر وجود مناطق کاری و انسداد خط دوم بر اثر تصادف را بر سرعت موج شوک در آزاد راه چهار خطه با توجه به داده‌های میدانی
- محاسبه سرعت موج شوک با استفاده از رابطه لایت هیل، ویت هام و ریچاردز
- مقایسه میزان کاهش ظرفیت بر اثر وقوع انسداد بر اثر مناطق کاری و انسداد دوم بر اثر تصادف
- اعمال مدل کلاسیک لایت هیل، ویت هام و ریچاردز و ترکیب آن با مدل غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز برای بدست آوردن حل‌های تحلیلی و عددی و بدست آوردن رابطه دینامیکی برای سرعت موج شوک
- مقایسه نتایج بدست آمده از رابطه LWR با مدل توسعه یافته پیشنهادی این پژوهش

---

<sup>۱</sup>Traffic flow theory

## ۵-۱ نوآوری پژوهش

از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به، شناسایی و بررسی اثرات چند گلوگاهی شامل انسداد یک خط و به تبعیت از آن انسداد خط دوم بر ویژگی‌های جریان ترافیک با توجه به موج شوک‌های انتشار یافته از هر حالت و تاثیر آن بر ویژگی‌های جریان ترافیک عبارتند از ظرفیت، سرعت و چگالی اشاره کرد. در این شرایط، انسداد اول باعث ایجاد موج شوک شده و جریان ترافیک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در ادامه و با وقوع تصادف و ایجاد موج شوک دوم، دو موج شوک به طور همزمان بر جریان ترافیک اثر می‌گذارند که تاثیر دو موج شوک به صورت همزمان در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، رویکرد تحلیل دینامیکی یکی دیگر از روش‌های بررسی و تعیین تاثیر این پدیده بر عملکرد آزادراه است. یک مدل بنیادی ماکروسکوپیک به عنوان شروع کار توسعه و تحلیل ویژگی‌های ترافیک اعمال گردید. در پژوهش حاضر، مدل LWR برای تعیین سرعت موج شوک‌ها در سناریوهای انسداد این پژوهش توسعه داده شد. علاوه بر این، مدل غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز برای برآورد دینامیکی موج شوک در انسداد های دوگانه استفاده شد. با توجه به مطالعات گذشته، هیچ پژوهشی بر اساس رابطه سرعت-چگالی غیر خطی گرین شیلدز و رویکرد دینامیکی برای یافتن سرعت موج شوک‌ها برای سناریوهای انسداد یک خط و دو خط انجام نشده است. به علاوه، محققان تنها از مدل LWR برای برآورد سرعت موج شوک‌ها برای هر سناریویی استفاده کردند.

## ۶-۱ ساختار پژوهش

در فصل اول به معرفی و ضرورت انجام پژوهش پرداخته شده است. سپس جنبه‌ی نوآوری و اهداف پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل دوم، سرعت موج شوک و انواع آن‌ها به طور کامل بیان شده است. علاوه بر این، هر کدام از انواع موج‌ها مربوط به چه شرایطی هستند نیز اشاره شد. در ادامه این فصل، به مطالعات گذشته بر روی نظریه موج شوک و کاربردهای آن در تحلیل و بررسی جریان ترافیک پرداخته شد.

در فصل سوم، در بخش اول به مراحل انجام پژوهش مانند مسیر انتخابی و نحوه فیلم برداری از آن، استخراج اطلاعات از تصاویر تهیه شده اشاره شده است. در این فصل از نرم افزار ادوبی پریمیر برای برداشت داده‌ها استفاده می‌شود و اطلاعات برداشت شده به صورت بانک اطلاعاتی در نرم افزار اکسل ذخیره سازی شده است. در ادامه این فصل، مدل پیشنهادی که از مدل گرین شیلدز توسعه داده شده ارائه شد و مراحل دستیابی به مدل توسعه یافته و غیر خطی گرین شیلدز از طریق روابط ریاضی، به طور کامل بیان شده است. در انتهای فصل سوم، به معرفی روش لکس-فردریش که برای حل عددی برای مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته نیز اشاره شده است.

در فصل چهارم، در ابتدا با توجه به اطلاعات برداشت شده، به تاثیر هر کدام از دو حالت انسداد بر تعداد خودروهای عبوری، سرعت خودروهای عبوری، جریان و چگالی پرداخته شد و به مقایسه حالت عادی جریان با دو سناریوی انسداد مورد نظر پرداخته شده است. در بخش بعدی، سرعت موج شوک با استفاده از رابطه LWR انجام شد و میزان این موج شوک‌ها در هر کدام از سناریوها تخمین زده شد و شدت آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در بخش بعدی این فصل، به برازش و تعیین ضریب همبستگی برای داده‌های میدانی این پژوهش و رابطه سرعت-چگالی گرین شیلدز پرداخته می‌شود. در بخش بعد، این پژوهش به محاسبه و پیش بینی سرعت موج شوک با استفاده از روش پیشنهادی می‌پردازد. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی برای سناریوهای موجود با روش LWR مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در فصل پنجم، نتایج این پژوهش ارائه می‌شود.



## فصل دوم

# مبانی نظری و پیشینه تحقیق

## ۲-۱ مقدمه

تصادفات ترافیکی، رویدادهای غیر دائمی<sup>۱</sup> و یا کوتاه مدتی<sup>۲</sup> هستند که منجر به ایجاد اختلال در جریان<sup>۳</sup> ترافیک و ایجاد تراکم<sup>۴</sup>های ترافیکی می‌شوند. تصادفات کوتاه مدت در زمان‌های کوتاهی اتفاق می‌افتند که باعث اثر منفی بر ویژگی‌های جریان ترافیک از جمله ظرفیت، سرعت و چگالی می‌شود. تصادف و خرابی خودروها نمونه‌هایی از این دست حوادث محسوب می‌شوند. در حین وقوع یک تصادف ظرفیت معبر از حالت عادی کمتر شده و در نتیجه‌ی آن صف‌های طولانی شکل گرفته و استفاده کنندگان از معبر را با تاخیر مواجه می‌کند. البته این شرایط در حالتی روی می‌دهد که مسیر دارای جریان ترافیک قابل توجهی از جمله شرایط اشباع یا نزدیک به اشباع باشد. از تصادفات و سوانح رانندگی به عنوان یکی از علل اصلی تاخیر در شبکه معابر یاد می‌شود و معمولاً اثرات نامطلوب آن بر ایمنی، هزینه سفر، آلودگی و تراکم قابل مشاهده و بررسی خواهد بود [11]. بعد از اینکه تصادف اتفاق می‌افتد، برای مدتی آن خط از دسترس خارج شده و به اصطلاح انسداد رخ می‌دهد. پس از بسته شدن خط، موج شوک ناشی از انسداد باعث تغییر در ماهیت جریان ترافیک شده و باعث ایجاد تراکم در پایین دست جریان می‌شود. از دیگر دلایل انسداد، می‌توان به انسداد خط به دلیل ایجاد مناطق کاری مانند تعمیرات روسازی اشاره کرد. این حالت نیز چون باعث کاهش خطوط عبوری می‌شود باعث تغییر در پارامترهای جریان ترافیک مانند جریان، سرعت و چگالی مسیر شده و در نتیجه باعث کاهش ظرفیت مسیر خواهد شد.

---

<sup>1</sup> Non-recurring

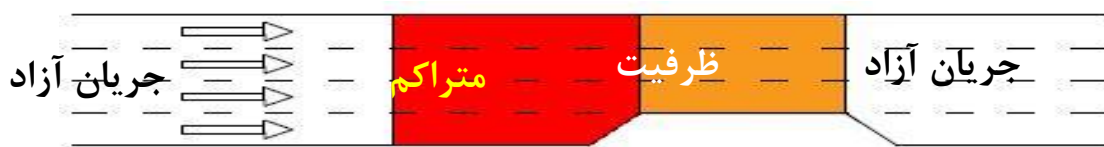
<sup>2</sup> Short-term

<sup>3</sup> Flow

<sup>4</sup> Congestion

## ۲-۲ گلوگاه‌های ترافیکی

گلوگاه‌های ترافیکی می‌توانند به دلیل ایجاد تغییرات در عرضه، به این معنی که ظرفیت مسیر تغییر کند، یا بیشتر بودن تقاضا نسبت به ظرفیت ایجاد شوند [12]. گلوگاه‌ها باعث تغییر در ماهیت ترافیک و شرایط عملکردی در بخشی از مسیر شده و به طور مشخص باعث تغییر ظرفیت مسیر و سرعت متوسط حجم عبوری می‌شوند [13]. این حالت احتمالاً زمانی رخ می‌دهد که در اثر شرایط عادی (باریک شدن عرض راه، وجود پل یا تونل و...) یا وقوع یک تصادف و بسته شدن بخشی از راه، عرض راه کاهش یابد. در شکل ۱-۲ یک نمونه گلوگاه ترافیکی نشان داده شده است که در آن گلوگاه به دلیل کاهش خط با توجه به شرایط هندسی راه ایجاد شده است. در این صورت، ظرفیت بخشی از راه نسبت به حالت عادی تغییر خواهد کرد [14]. مقطعی که سرعت وسایل نقلیه در آن کاهش می‌یابد را می‌توان به طور تقریبی در محلی که چراغ‌های ترمز خودروها روشن می‌شود در نظر گرفت. این مقطع با نزدیک شدن جریان ترافیک به نزدیکی گلوگاه به سمت بالادست<sup>۱</sup> حرکت خواهد نمود و از این پدیده تحت عنوان موج شوک در جریان ترافیک یاد می‌شود [1].



شکل ۱-۲ گلوگاه ترافیکی بر اثر شرایط هندسی مسیر

انسداد، تصادف یا گلوگاهی است که می‌تواند ظرفیت، چگالی و سرعت وسایل نقلیه را کاهش دهد [15]. با توجه به ارتباط موضوع گلوگاه و موج شوک در بخش بعد به تعریف موج شوک پرداخته می‌شود و در ادامه به بررسی توام پدیده موج شوک در حضور گلوگاه پرداخته می‌شود.

<sup>۱</sup> Upstream

## ۳-۲ تعریف موج شوک در جریان های ترافیک

سرعت، جریان و چگالی در یک جریان ترافیکی همواره دارای تغییرات زمانی و مکانی هستند. زمانی که این تغییر حالت روی دهد، یک مرز<sup>۱</sup> تشکیل می شود که محدوده زمان-مکان<sup>۲</sup> یک حالت جریان را از حالت های دیگر متمایز می سازد. وقتی این تغییرات تدریجی باشد، جریان ترافیکی قادر به جذب آن بوده و تاثیر آن بر جریان ترافیک قابل توجه نخواهد بود. زمانی که این تغییرات به طور ناگهانی اتفاق افتد، باعث ایجاد مناطق یا نواحی ترافیکی با خصوصیات متفاوت می شود (مثلا در نواحی مجاور؛ سرعت، جریان و چگالی تفاوت قابل توجه پیدا می کنند) و در حد فاصل یا مرز این نواحی موج هایی شکل می گیرند که به آنها موج شوک می گویند. لذا موج شوک به عنوان شرایط مرزی تعریف می شود که ناپیوستگی در شرایط جریان-چگالی را در محدوده مکان-زمان بیان می کند. نمونه ایجاد یک موج شوک ملایم وقتی است که صفی در پشت یک وسیله نقلیه کندرو در جاده ایجاد می شود. نمونه ایجاد یک موج شوک قوی وقتی است که وسایل نقلیه ناگهان به یک وسیله نقلیه متوقف شده در جاده می رسند.

## ۴-۲ مدل سازی جریان ترافیک

از آن جا که تحلیل استفاده شده در تئوری موج شوک بر مبنای مدل های جریان ترافیک می باشد و با توجه اهمیت این موضوع در این پایان نامه، به توضیح مدل سازی جریان ترافیک می پردازد. به منظور مدل سازی کردن جریان ترافیک لازم است رابطه ی بین جریان، چگالی و سرعت ترافیک تعیین گردد. توسعه مدل های جریان ترافیک نیازمند تعیین عوامل زیر می باشند [16]:

---

<sup>1</sup> Boundary

<sup>2</sup> Space-time



- معادله کلی جریان ترافیک، که در آن جریان ترافیک نتیجه سرعت و چگالی است.
- معادله پیوستگی خودروها، که در آن اختلاف بین تعداد خودروهای ورودی به مسیر و خروجی از آن در یک بازه زمانی مشخص با تغییر تعداد خودروهای سفر کننده در مسیر مطابقت دارد.
- رابطه‌ی بین سرعت-چگالی یا جریان-چگالی

در حال حاضر، نظریه واحدی در رابطه با مدل‌سازی جریان ترافیک وجود ندارد. بیشتر اطلاعاتی که در حال حاضر در این زمینه موجود است عموماً تجربی بوده بجای آن که نظری باشد. پژوهش در این زمینه در دهه‌ی ۳۰ میلادی در قرن بیستم آغاز شد و اساساً بر توسعه روابط سرعت-جریان و سرعت-چگالی بر اساس مشاهدات ترافیکی متمرکز بوده است. بسته به سطح توصیف جریان مورد استفاده، مدل‌های جریان ترافیک به دو دسته‌ی اصلی تقسیم بندی می‌شوند. دسته‌ی اول شامل مدل‌های جریان ترافیک پیوسته میکروسکوپی است که در ارتباط با رفتار متوسط یک جریان پیوسته از وسایل نقلیه می‌باشد، این مدل‌ها روابط اساسی بین جریان، چگالی و سرعت ترافیک را بدست می‌آورند. دسته‌ی دوم مدل‌های جریان ترافیک پیوسته میکروسکوپی را شامل می‌شود که بیشتر در ارتباط با مدل‌سازی عکس العمل‌ها بین وسایل نقلیه به طور فردی می‌باشند. به بیان دیگر، مدل‌هایی که به این دسته تعلق دارند به اغلب به مدل‌های خودروی تعقیب کننده<sup>۱</sup> نسبت داده می‌شوند.

مطالعات اولیه در مدل‌های جریان ترافیک پیوسته بر توسعه روابط ساده جریان، چگالی و سرعت بر اساس مشاهدات ترافیکی متمرکز بوده است. ساختار پایه مدل‌های میکروسکوپی که در این مطالعات توسعه یافته با رابطه‌ی مرتبه اول سرعت-چگالی تعریف می‌شود.

یکی از اولین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی رابطه‌ی سرعت و چگالی توسط گرین‌شیلدز (۱۹۳۴) با فرض

---

<sup>۱</sup> Car Following

خطی بودن رابطه‌ی بین سرعت و چگالی انجام شده و نتیجه‌ی آن به صورت رابطه‌ی ۲-۲ بیان شده است [17]:

$$u = u_f - \frac{u_f}{\rho_j} \rho = u_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_j}\right) \quad (1-2)$$

به طوری که:

$u =$  سرعت متوسط ترافیک (km/h)

$u_f =$  سرعت جریان آزاد (km/h)

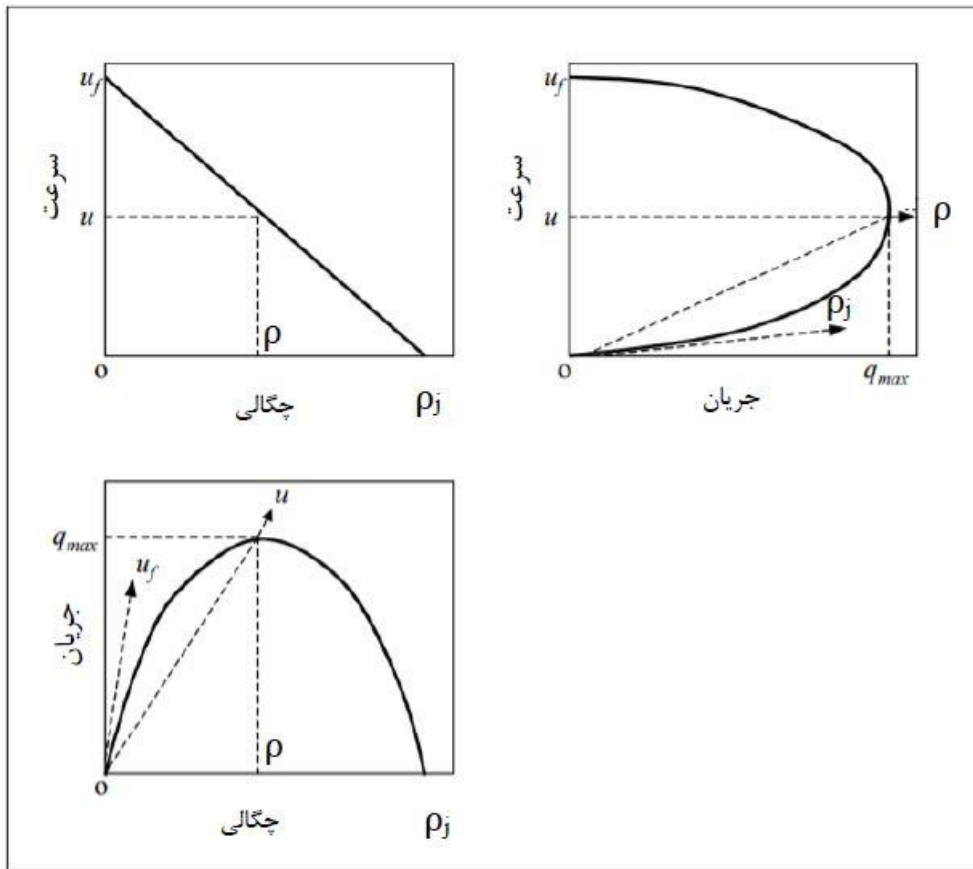
$\rho_j =$  چگالی راه‌بندان (veh/km)

در ادامه اثبات شد که اگر یک رابطه‌ی خطی به صورت رابطه‌ی ۱-۲ برای بیان رابطه‌ی سرعت با چگالی در نظر گرفته شود، روابط جریان با چگالی و سرعت به صورت سهمی شکل به صورت رابطه‌ی ۲-۲ بدست خواهد آمد. نمودار مربوط به رابطه‌ی گرین شیلدز در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در این شکل نمودارهای سرعت-جریان، جریان-چگالی و سرعت-چگالی نمایش داده شده است.

$$q = u_f \rho - \frac{u_f}{\rho_j} \rho^2 \quad (2-2)$$

که:

$q =$  جریان ترافیک (veh/hr)



شکل ۲-۲ روابط کلی بین سرعت، چگالی و میزان جریان [18]

## ۲-۵ سرعت موج شوک

بعد از تغییر در جریان ترافیک، از مهم‌ترین اقداماتی که می‌توان در زمینه بررسی تغییرات بوجود آمده در جریان ترافیک انجام داد، محاسبه سرعت موج شوک می‌باشد. شکل ۲-۳ دو وضعیت مختلف جریان ترافیک را در یک راه مستقیم با چگالی‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$  که در آن  $\rho_1 > \rho_2$  است، نشان می‌دهد. دو جریان ترافیک با خط فرضی  $w$  که حرکت موج شوک با سرعت  $u_w$  را نشان می‌دهد، از هم جدا شده‌اند. اگر خط فرضی  $w$  در جهت نشان داده شده در شکل که همان جریان ترافیک هم محسوب می‌شود حرکت کند،  $u_w$  مثبت خواهد بود. اگر

$u_1$  سرعت متوسط مکانی خودروها در منطقه‌ای با چگالی  $\rho_1$  باشد (مقطع P)، سرعت خودروهای این منطقه نسبت به خط W برابر است با:

$$U_{r1} = (u_1 - u_w) \quad (3-2)$$

تعداد خودروهای منطقه P که در دوره‌ی زمانی t از خط W عبور می‌کنند، برابر است با:

$$N_1 = U_{r1}\rho_1 t \quad (4-2)$$

به طور مشابه، اگر سرعت متوسط مکانی خودروها در منطقه‌ای با چگالی  $\rho_2$  (مقطع Q)،  $u_2$  باشد، سرعت نسبی خودروهای این منطقه نسبت به خط W برابر است با:

$$U_{r2} = (u_2 - u_w) \quad (5-2)$$

و تعداد خودروهایی که در دوره‌ی زمانی t از خط W عبور می‌کنند، برابر می‌شود با:

$$N_2 = U_{r2}\rho_2 t \quad (6-2)$$

با توجه به معادله پیوستگی خودروها از آنجایی که تغییرات برابر صفر است،  $N_1 = N_2$  خواهد بود و این یعنی:

$$U_2\rho_2 - U_1\rho_1 = u_w(\rho_2 - \rho_1) \quad (7-2)$$

اگر نرخ جریان در منطقه ی P و Q به ترتیب برابر  $q_1$  و  $q_2$  باشد:

$$q_1 = U_1\rho_1 \quad (8-2)$$

$$q_2 = U_2\rho_2 \quad (9-2)$$

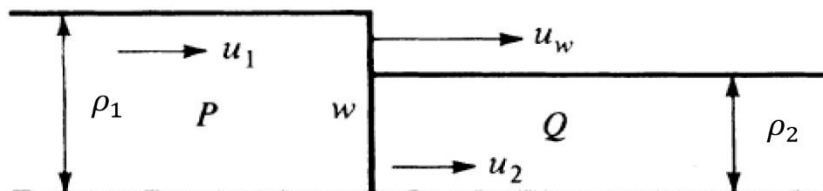
با جایگزین کردن  $q_1$  بجای  $U_1\rho_1$  و  $q_2$  بجای  $U_2\rho_2$  در رابطه‌ی ۵-۲، رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$q_2 - q_1 = u_w(\rho_2 - \rho_1) \quad (10-2)$$

که این رابطه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$u_w = \frac{q_2 - q_1}{\rho_2 - \rho_1} \quad (11-2)$$

رابطه‌ی فوق فرمول مهم محاسبه‌ی سرعت موج شوک می‌باشد (آن را بصورت  $w$  نیز نمایش می‌دهند) که کاربرد فراوانی در مطالعات ترافیکی دارد.



شکل ۲-۳ حرکت موج شوک ایجادشده ناشی از تغییرات چگالی

## ۲-۶ انواع موج شوک

بسته به شرایط ترافیکی، انواع متفاوتی از موج شوک متفاوت تشکیل می‌گردد [1]. انواع موج شوک‌ها که در شکل ۲-۴ نشان داده شده عبارت است از:

- موج شوک‌های با ابتدای ایستا<sup>۱</sup>
- موج شوک‌های تشکیل صف با حرکت به سمت عقب<sup>۲</sup>
- موج شوک‌های محو صف با حرکت به سمت عقب<sup>۳</sup>
- موج شوک‌های محو صف با انتهای ثابت<sup>۴</sup>
- موج شوک‌های با حرکت به سمت جلو<sup>۵</sup>

<sup>1</sup> Frontal Stationary

<sup>2</sup> Backward Forming

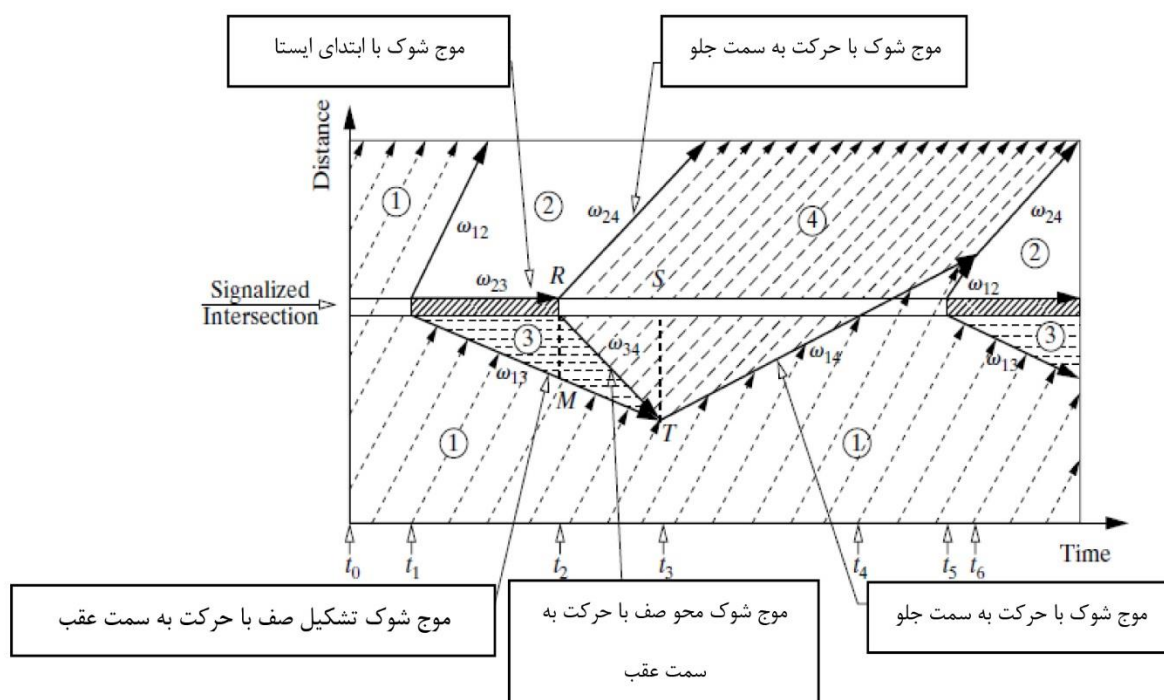
<sup>3</sup> Backward Recovery

<sup>4</sup> Rear stationary and forward recovery shock waves

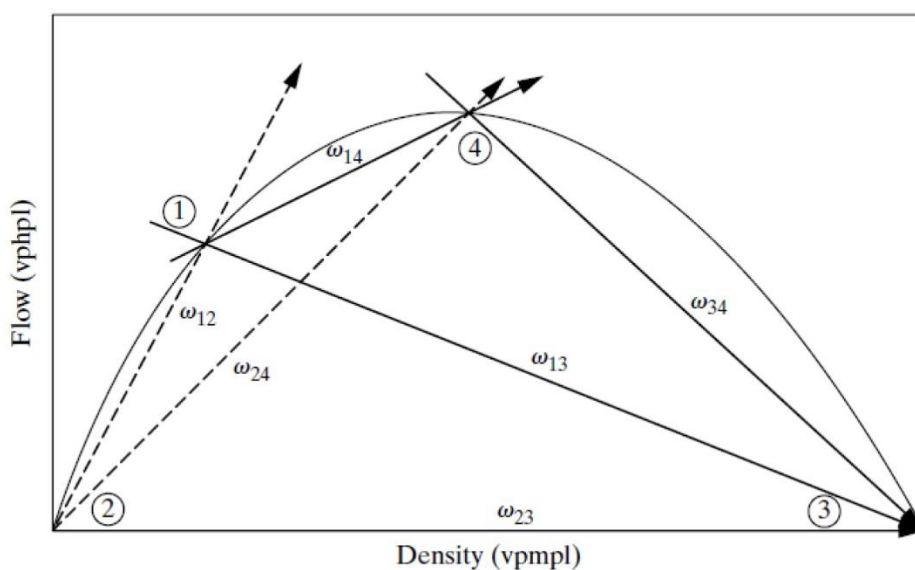
<sup>5</sup> Forward Moving

## ۲-۶-۱ موج شوک‌های با ابتدای ایستا

این موج شوک‌ها در شرایطی شکل می‌گیرند که ظرفیت راه به طور ناگهانی تا صفر کاهش می‌یابد مانند زمانی که در یک مسیر یا چند خط عبوری در تقاطع چراغدار، چراغ قرمز می‌شود یا به دلیل وقوع یک تصادف شدید راه به طور کامل بسته شده است. در این صورت، یک موج شوک با ابتدای ایستا در خط توقف یا خطوطی که پشت چراغ قرمز هستند، همانند آنچه در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، تشکیل می‌شود. همچنین نمودار جریان چگالی برای این تقاطع در شکل ۲-۵ ارائه شده است.



شکل ۲-۴ موج شوک در یک تقاطع چراغدار

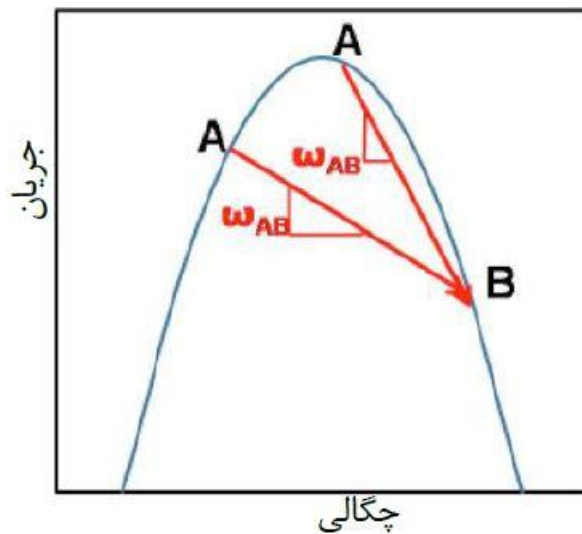


شکل ۲-۵ نمودار جریان-چگالی برای تقاطع فوق

## ۲-۶-۲ موج شوک‌های تشکیل صف با حرکت به سمت عقب

این موج شوک‌ها در شرایطی شکل می‌گیرند که ظرفیت راه کمتر از نرخ تقاضای جریان بوده و در نتیجه یک صف به سمت بالادست گلوگاه بوجود می‌آید. در این حالت موج شوک به سمت بالادست حرکت می‌کند و در هر لحظه مکان انتهایی صف را نشان می‌دهد. نمودار جریان-چگالی برای حالت تشکیل صف با حرکت به سمت عقب در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Demand



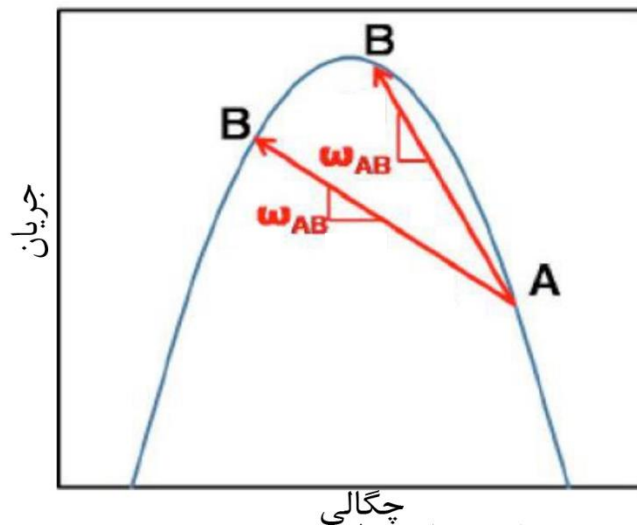
شکل ۲-۶ نمودار جریان-چگالی برای حالت تشکیل صف با حرکت به سمت عقب

این شرایط می‌تواند در مقطعی از راه که تعداد خطوط عبوری در آن کاهش یافته یا در یک تقاطع چراغدار مانند آنچه در شکل ۲-۴ نشان داده شده است با قرمز شدن چراغ رخ دهد.

### ۲-۶-۳ موج شوک‌های محو صف با حرکت به سمت عقب

این موج شوک‌ها در شرایطی شکل می‌گیرند که نرخ تقاضای جریان از ظرفیت راه کمتر بوده یا محدودیتی که باعث کاهش ظرفیت راه در گلوگاه شده، از بین برود به عنوان مثال هنگامی که چراغ در یک تقاطع از قرمز به سبز تبدیل شود، محدودیت جریان ترافیک برداشته می‌شود و ترافیک بعد از تقاطع آزادانه حرکت می‌کند. در این شرایط موج شوک محو صف با حرکت به سمت عقب تشکیل می‌شود. نمودار جریان-چگالی برای این حالت در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

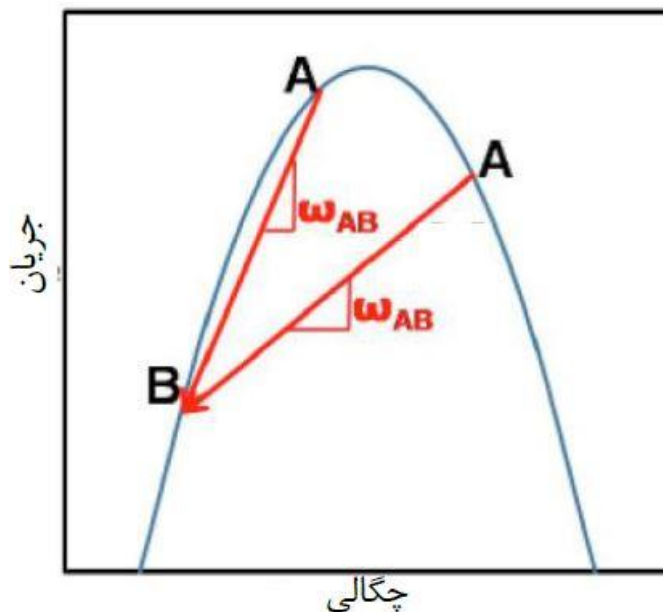




شکل ۲-۷ نمودار جریان-چگالی برای حالت محو صف با حرکت به سمت عقب

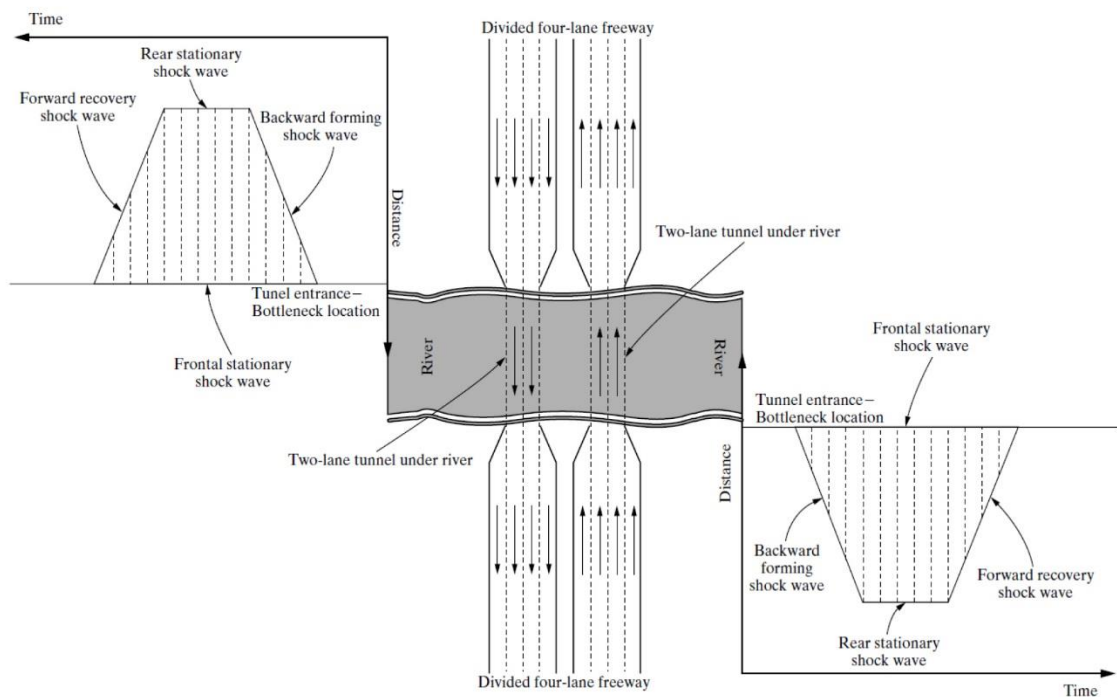
## ۲-۶-۴ موج شوک‌های محو صف با انتهای ثابت

این موج شوک‌ها در شرایطی شکل می‌گیرند که در بالادست گلوگاه ابتدا نرخ تقاضای جریان از ظرفیت راه بیشتر بوده و بعد از آن تقاضای جریان تا ظرفیت گلوگاه کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۸ نحوه‌ی تاثیر این حالت بر جریان و چگالی نشان داده شده است.



شکل ۲-۸ نمودار جریان-چگالی برای حالت محو صف با انتهای ثابت

به طور مثال همان گونه که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است، راه چهار خطه یک طرفه‌ای به یک تونل دو خطه در یک منطقه شهری نزدیک می‌شود. خارج از ساعت اوج<sup>۱</sup> ترافیک، شرایطی که تقاضا کمتر از ظرفیت تونل باشد، هیچ موج شوکی شکل نمی‌گیرد. ولی هنگامی که در ساعت اوج<sup>۲</sup>، تقاضا بیشتر از ظرفیت تونل می‌شود موج شوک تشکیل صف با حرکت به سمت عقب شکل می‌گیرد. همان گونه که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است، تا زمانی که تقاضای جریان از ظرفیت تونل بیشتر باشد، این موج شوک به سمت بالادست گلوگاه ادامه خواهد یافت. با اتمام ساعت اوج، نرخ تقاضای جریان کاهش یافته و به ظرفیت تونل می‌رسد. در این لحظه، تا کمتر شدن تقاضای جریان از ظرفیت تونل یک موج شوک با انتهای ثابت تشکیل شده که منجر به شکل گیری موج شوک محو صف با حرکت به سمت جلو خواهد شد.



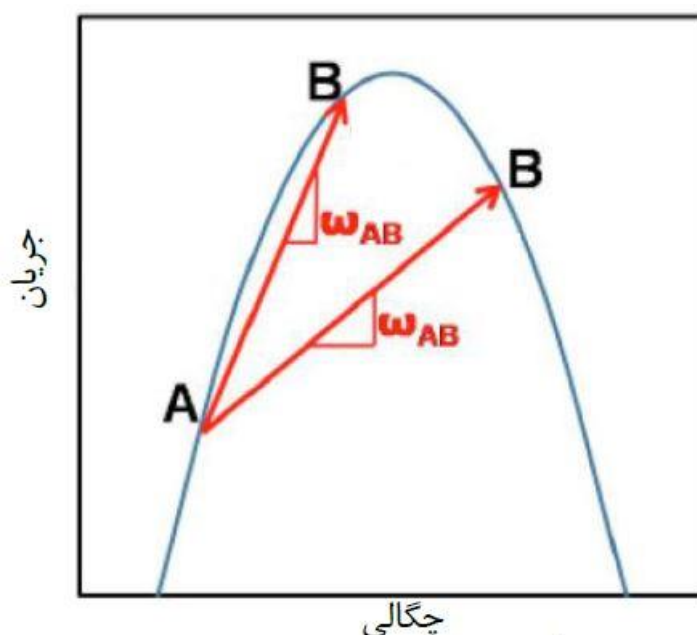
شکل ۹-۲ موج شوک ناشی از گلوگاه [1]

<sup>1</sup> Off Peak

<sup>2</sup> Peak

## ۲-۶-۵ موج شوک‌های تشکیل صف با حرکت به سمت جلو

موج شوک‌های تشکیل صف با حرکت به سمت جلو در شرایطی شکل می‌گیرند که یک خودرو با سرعت کم در جلوی خودروهایی قرار گیرد که امکان سبقت گرفتن از خودروی کندرو برای آنها فراهم نیست. در این حالت، سرعت نرمال به طور موقت کاهش یافته و جریان آن نسبتاً زیاد ولی کمتر از ظرفیت راه می‌باشد. نمودار جریان-چگالی برای این حالت در شکل ۲-۱۰ ترسیم شده است.



شکل ۲-۱۰ نمودار جریان-چگالی برای حالت تشکیل صف با حرکت به سمت جلو

پس از بیان انواع موج شوک‌ها به بررسی موج شوک‌های ایجاد شده در شکل ۲-۴ پرداخته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، شکل ۲-۴ شرایط ترافیکی را در نزدیکی یک تقاطع چراغدار، زمانی که چراغ سبز بوده و در پایان آن، چراغ قرمز می‌شود (شروع فاز قرمز) و نیز زمانی که چراغ قرمز بوده و در پایان آن، دوباره سبز می‌شود (شروع فاز سبز)، نشان می‌دهد. وقتی چراغ سبز است، همان‌طور که در مقطع ۱ نشان داده شده است، جریان نرمال بوده و در زمان  $t_1$  که چراغ قرمز می‌شود بلافاصله دو وضعیت جدید بوجود می‌آید. جریان عبوری از این مسیر متوقف می‌شود و بلافاصله پایین دست خط توقف با چگالی و جریان صفر، مقطع ۲ شکل می‌گیرد.

در همین زمان، تمام خودروهای بالادست خط توقف ثابت هستند و مقطع ۳ با جریان صفر و چگالی برابر با چگالی راهبندان را تشکیل می‌دهند که نتیجه‌ی آن تشکیل موج شوک با ابتدای ایستا و سرعت  $\omega_{23}$  و نیز تشکیل موج شوک تشکیل صف با حرکت به سمت عقب و سرعت  $\omega_{13}$  می‌باشد.

در زمان  $t_2$  و در پایان فاز قرمز، وقتی چراغ دوباره سبز می‌شود، نرخ جریان در خط توقف همان‌طور که در مقطع ۴ نشان داده شده است، از مقدار صفر به نرخ جریان اشباع می‌رسد که با ایجاد موج شوک با حرکت به سمت جلو و سرعت  $\omega_{24}$  منجر خواهد شد. طول صف در زمان پایان فاز قرمز با خط RM نشان داده و در این زمان، موج شوک محو صف با حرکت به سمت عقب و سرعت  $\omega_{34}$  تشکیل می‌شود که با حرکت موج به سمت بالادست خط توقف، صف ایجاد شده، آزاد خواهد شد. تقاطع موج شوک تشکیل صف با حرکت به سمت عقب و موج شوک محو صف با حرکت به سمت عقب در نقطه‌ی T و زمان  $t_3$  بیش‌ترین طول تاثیر صف در پایین دست تقاطع که برابر ST است، را نشان می‌دهد. در این لحظه موج شوک تشکیل صف با حرکت به سمت عقب و موج شوک محو صف با حرکت به سمت عقب پایان می‌یابند و موج شوک جدیدی با حرکت به سمت جلو با سرعت  $\omega_{14}$  تشکیل می‌شود. هنگامی که در زمان  $t_4$  موج شوک با حرکت به سمت جلو از خط توقف می‌گذرد، جریان در خط توقف از نرخ جریان اشباع به جریان اصلی در مقطع ۱ تغییر پیدا کرده و این وضعیت تا زمان  $t_5$  که چراغ دوباره قرمز می‌شود ادامه خواهد یافت.

## ۶-۲ کاربردهای نظریه ی موج شوک

از نظریه‌های توسعه یافته در بحث ترافیک، نظریه موج شوک است که در سال ۱۹۵۶ میلادی ارائه گردید. از نظریه موج شوک می‌توان برای نشان دادن نحوه تبدیل بین دو شرایط مختلف در امتداد جریان ترافیک استفاده کرد [2,3]. تا به امروز از این نظریه در تحلیل جریان‌های ترافیک در وضعیت‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته از قبیل تحلیل جریان ترافیک در آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها، تقاطع‌های چراغ دار، گلوگاه‌های ترافیکی، در

تخمین تاخیر در حوادث ترافیکی از جمله تصادفات و به طور کلی در هر پدیده ترافیکی که در آن تغییری در وضعیت جریان بوجود آید. بنابراین مطالعات گذشته در زمینه‌ی موج شوک را می‌توان با توجه به انواع جریان-های ترافیکی از نظر نحوه‌ی حرکت به دو دسته‌ی کلی تقسیم بندی کرد. دسته‌ی اول، مطالعات در جریان‌های منقطع و دسته‌ی دوم، مطالعات در جریان‌های پیوسته دسته بندی کرد. در جریان‌های پیوسته، عامل خارجی در جریان ترافیک توقف و ممانعت ایجاد نمی‌کند. تقاطع هم سطح، چراغ راهنمایی، علامت ایست و احتیاطی وجود ندارد و مشخصات جریان ترافیک تنها به اندر کنش وسایل نقلیه با مسیر و محیط اطراف بستگی دارد. در حالی که در جریان منقطع، موانع ثابت خارجی نظیر چراغ راهنمایی در مسیر وجود دارد و مهم‌ترین تفاوت این جریان با جریان غیر منقطع در زمان سرویس دهی است.

## ۲-۶-۱ بررسی موج شوک در جریان منقطع

مطالعات موج شوک در تقاطعات چراغ دار مورد توجه زیادی قرار گرفته و مقالات زیادی در این باره به چاپ شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مقاله روربک<sup>۱</sup> (۱۹۶۸) اشاره کرد این پژوهش و نتایج مربوط به آن اولین مقاله است که در آن نظریه‌ی موج شوک در بررسی تشکیل صف در مسیرهایی که به تقاطع ختم می‌شود در شروع بازه زمانی قرمز به کار گرفته شده است [19]. در سالهای بعد تا کنون نیز مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی تقاطعات چراغ دار صورت پذیرفت که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مطالعات کانگ در این زمینه اشاره کرد. کانگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) فرمول بندی مشخصی را بر اساس HCM<sup>۳</sup> برای برآورد تاخیر در تقاطع از طریق مدل موج شوک ارائه کرد و با مقایسه‌ی این مدل با مدل‌های معتبر دیگر، کارایی این مدل در برآورد تاخیر را تایید کرد [20]. لیو و همکارانش<sup>۴</sup> (۲۰۰۹) با کارگیری نظریه‌ی موج شوک روشی ابتکاری را برای

---

<sup>۱</sup> Rorbech

<sup>۲</sup> Kang

<sup>۳</sup> Highway Capacity Manual

<sup>۴</sup> Liu, H.X., et al

تخمین طول صف تقاطع با استفاده از شناسگرهای موجود ارائه کردند. در روش آن‌ها طول صف به صورت تابع زمان بوده و حتی وقتی مسیرهای منتهی به تقاطع از صف‌های طولانی اشباع باشند قابل برآورد است. مدل ارائه شده توسط آن‌ها در مقایسه با داده‌های میدانی از دقت بالایی برخوردار بوده است [21]. ستین<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) یک متدولوژی بر مبنای مدل موج کینماتیکی به منظور تخمین دینامیک صف در تقاطع چراغ دار را توسعه داد [22].

## ۲-۶-۲ بررسی موج شوک در جریان پیوسته

پس از معرفی نظریه موج شوک توسط لایت هیل، ویت هام و ریچاردز در سال ۱۹۵۶، مطالعاتی در رابطه با این نظریه و کاربرد آن در حالت‌های مختلف ترافیکی در دهه‌های ۶۰ تا ۸۰ میلادی ارائه گردید که با توجه به موضوع پژوهش حاضر به بیان مطالعات مرتبط پرداخته می‌شود. مدل LWR در بسیاری از پروژه‌های مهندسی ترافیک مورد استفاده قرار گرفته است، بطور مثال می‌توان به آنالیز دینامیک جریان ترافیک و ایجاد یک مدل پروفیل موج شوک برای جریان ترافیک در شریان‌های شهری متراکم اشاره کرد [17,18]. درو<sup>۲</sup> (۱۹۶۸) با استفاده از نظریه‌ی موج شوک روشی را برای کنترل گلوگاه در کتابی با عنوان نظریه کنترل جریان پیشنهاد کرد [25]. کوهرلر و لتزباخ<sup>۳</sup> (۱۹۷۴) از تحلیل موج شوک در برآورد تاخیر ناشی از تصادفات در بزرگراه‌ها استفاده کردند [26]. در مطالعه ویراسینگ<sup>۴</sup> (۱۹۷۸) نظریه موج شوک در برآورد تاخیرهای متوسط و کل به کار گرفته شد [27]. در پژوهش لو و اسکاباردونیس<sup>۵</sup> (۲۰۰۷) یک الگوریتم عددی به منظور تخمین سرعت موج شوک در آزادراه بر مبنای داده‌های خط سیر خودرو فرموله شده است. کاربرد الگوریتم در مجموعه داده‌های NGSIM

---

<sup>1</sup> M. Cetin

<sup>2</sup> Drew

<sup>3</sup> Leutzbach & Kohler

<sup>4</sup> Wirasinghe

<sup>5</sup> Lu & Skabardonis

<sup>۱</sup> تحت شرایط متراکم نشان می‌دهد که همه‌ی موج شوک‌ها سرعت انتشار مشابهی را دارا می‌باشند [28]. لی و ولپاتی<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) مدل‌های احتمالاتی را برای پیش‌بینی موج شوک‌های ایجاد شده توسط تصادفات کوتاه مدت واقعی توسعه دادند. در این پژوهش، داده‌های مربوط به حجم و چگالی تصادفات در بازه‌ی زمانی یک دقیقه در بزرگراه گاردینر در تورنتو انجام شده است. همچنین تغییرات چگالی و حجم نیز در بازه‌ی سه تا ده دقیقه قبل از وقوع تصادف مشاهده و جمع‌آوری شده است. در واقع هدف از پژوهش آن‌ها تعیین نوع و سرعت موج شوک‌ها با استفاده از داده جریان ترافیک زمان واقعی و ارزیابی اثرات موج شوک‌ها بر احتمال برخورد در آزادراه می‌باشد [29]. در مطالعه‌ی انور و ستین<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) جریان ترافیک تحت تاثیر موج شوک و داده خط سیر خودرو برآورد شده است. در اصل، خط سیر خودرو نشان‌دهنده رژیم‌های آزاد و متراکم می‌باشد. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی آن‌ها می‌تواند جریان ترافیک را با دقت مناسب تحت شرایط جریان متراکم و آزاد پیش‌بینی کند [30]. رامپیس<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) در مطالعه خود، تحلیل موج شوک ایجاد شده توسط سناریوهای تصادفات را با استفاده از نرم افزار VISSIM انجام داد. نتایج بدست آمده از نرم افزار به ویژه طول صف با آنالیز موج شوک‌ها با استفاده از داده‌های میدانی مقایسه شده است. آنالیز موج شوک با استفاده از دیاگرام اساسی گرین شیلدز ساخته شد و نشان داده شد که طول صف با افزایش زمان تصادف تا زمان باز شدن مسیر و برگشت به شرایط عادی به صورت خطی افزایش می‌یابد. این درحالی است که تاخیر کل بطور نمایی افزایش یافته است. بواسطه شبیه‌سازی میکروسکوپیکی ساخته شده در VISSIM، طول صف درحالی که مدت زمان تصادف افزایش می‌یابد، همچنان افزایش پیدا کرده است اگرچه این افزایش بصورت خطی نیست [31].

---

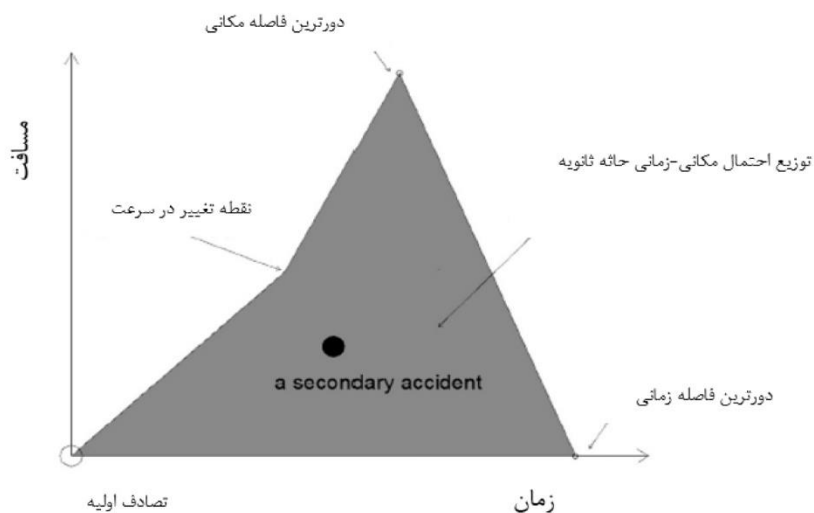
<sup>1</sup> Next Generation Simulation(NGSIM)

<sup>2</sup> Lee & Volpatti

<sup>3</sup> Anua & Cetin

<sup>4</sup> Rompis

در زمینه‌ی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تصادفات ثانویه، جونخوا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) از موج شوک‌ها برای شناسایی تصادفات ثانویه استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که موج شوک‌های حاصل از وقوع یک تصادف اولیه، تاثیر بیشتری در بوجود آوردن تصادف ثانویه نسبت به اثرات جریان ترافیک دارد. آن‌ها از توزیع نرمال و توزیع ویبول<sup>۲</sup> برای بیان گپ‌های زمانی-مکانی بین تصادفات استفاده کردند. همچنین در این پژوهش روش SWBF<sup>۳</sup> برای طبقه بندی تصادفات ثانویه مورد استفاده قرار گرفت [32]. با توجه به پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۶)، تصادف ثانویه به عنوان تصادفی تعریف می‌شود که در صورت تغییر در شرایط ترافیکی، در ناحیه تاثیر تصادف اولیه رخ می‌دهد. در این حالت اثر موج شوک را تا فاصله معینی محاسبه کرده و یک منطقه موج<sup>۴</sup> به دست خواهد آمد. در نهایت هر تصادفی که در ناحیه زمانی مکانی بدست آمده قرار گیرد همان‌گونه که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است (ناحیه خاکستری رنگ) یک تصادف ثانویه خواهد بود. و اگر در خارج از ناحیه ذکر شده قرار گیرد، به عنوان تصادف جداگانه در نظر گرفته می‌شود [10].



شکل ۲-۱۱ ناحیه مکانی زمانی تصادف ثانویه

<sup>1</sup> Junhua et al.

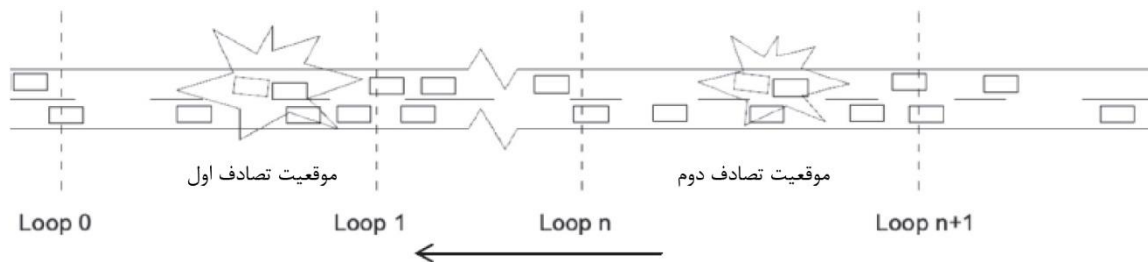
<sup>2</sup> Weibull

<sup>3</sup> Shock Wave Boundary Filtering

<sup>4</sup> Feasible District



وانگ مطالعات خود را با توجه به نظریه‌ی موج شوک انجام داد و مطالعات او شامل سه مقاله در زمینه‌ی طبقه بندی تصادفات ثانویه با استفاده از یک روش دینامیکی بر اساس امواج شوک ردیابی شده توسط شناسگر<sup>۱</sup>ها ارائه شده است که در شکل ۲-۱۲ سناریوی مورد مطالعه‌ی وی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲ موقعیت تصادفات و شناسگرها

پژوهش دیگری از وانگ و همکاران (۲۰۱۸) در همین زمینه در آژادراه‌ها انجام شده است. با داده‌های تصادف و داده‌های جمع آوری شده از شناسگرها در طی سه سال از آژادراه بین ایالتی کالیفرنیا، یک روش مبتنی بر موج شوک برای شناسایی تصادفات ثانویه معرفی شد. همچنین رگرسیون خطی برای مدل‌سازی فواصل زمانی و مکانی از تصادفات انجام شد. نتایج نشان داد که مدل خطی برای پیش بینی فاصله‌های مکانی-زمانی مناسب نیست. در این پژوهش همچنین برای بهبود پیش بینی و کاهش محدودیت‌های روابط خطی بین متغیرها از الگوریتم‌هایی که امکان پیش بینی بهتری از مسائل غیر خطی را امکان پذیر می‌کنند، استفاده شد. این مدل‌ها عبارتند از مدل‌های BPNN<sup>۲</sup> و LSSVM<sup>۳</sup> از الگوریتم‌های کاربردی شبکه عصبی می‌باشند که برای بررسی زمان و مکان تصادف ثانویه توسعه داده شده‌اند. اعتبارسنجی‌ها نشان می‌دهد که هر دو مدل BPNN و LSSVM دارای برآزش خوبی هستند. مدل BPNN می‌تواند برای پیش بینی فاصله زمانی بین تصادفات اولیه و ثانویه استفاده شود که می‌تواند توسط تصمیم گیرندگان و سازمان های مدیریت تصادفات برای جلوگیری یا

<sup>1</sup> Loop Detector

<sup>2</sup> Back-Propagation Neural Network

<sup>3</sup> Least Squares Support Vector Machine

کاهش تلفات ثانویه استفاده شود [33]. همان طور که ذکر شد مطالعات وانگ در زمینه‌ی شناسایی موقعیت مکانی و زمانی تصادف ثانویه بوده است. در مطالعات وانگ بررسی شده است که آیا تصادفی که رخ داده ثانویه است یا خیر و در واقع بحث طبقه بندی نوع تصادفات مطرح بوده است. همچنین، تصادفات در مطالعات وانگ با فاصله مکانی و زمانی از یکدیگر اتفاق افتاده است. علاوه بر این، در مطالعات وی خط انسداد یافته مورد بحث نبوده، یعنی تصادفات ناشی از انسداد دو خط نبوده اند.

شاهین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶)، احمد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) در این زمینه از مدل‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی برای شناسایی موج شوک های ایجاد شده توسط گلوگاه‌ها و تغییر خط‌ها استفاده کردند. در پژوهش شاهین و همکاران (۲۰۱۶) شکل‌گیری و انتشار امواج شوک با روش موجکی<sup>۳</sup> با استفاده از دو مجموعه داده مختلف، به نام‌های ماکروسکوپی (یعنی جریان و سرعت) و میکروسکوپی (خط سیر خودرو<sup>۴</sup>) تحلیل شده است. سرعت انتشار موج شوک برآورد شده در این مطالعه با نتایج گزارش شده در مقالات همخوانی دارد. سرعت موج شوک می‌تواند برای کالیبره کردن نمودار اصلی جریان ترافیک و همچنین تخمین سرعت جریان (زمان سفر) در امتداد یک بزرگراه مورد استفاده قرار گیرد [34]. در مطالعه‌ی احمد و همکاران (۲۰۱۷) موج شوک‌های ایجاد شده به دلیل تغییر خط ناشی از عدم رعایت خطوط حرکتی در جریان ترافیکی ناهمگن ایجاد شده اند که توسط نرم افزار متلب و R تحلیل شده است و برای شهر داکا در کشور بنگلادش صورت گرفته است. بعد از مدل‌سازی، کالیبره کردن و اعتبارسنجی برای مدل‌ها صورت گرفت تا بتوان مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه به کار برده شوند [35].

علاوه بر این، مدل LWR در آنالیز آشفتگی جریان ترافیک و طول صف بیشینه [36] و تخمین دامنه مکان-

---

<sup>1</sup> Sahin et al.

<sup>2</sup> Ahmed et al.

<sup>3</sup> Wavelet

<sup>4</sup> Trajectory

زمان تاثیر تصادفات آزادراه [37] با موفقیت اعمال شد. همه‌ی این مطالعات نشان می‌دهد که مدل LWR به عنوان ابزاری مهم در آنالیز تصادفات شناخته می‌شود. مدل‌های گوناگونی از جمله مدل‌های تشکیل صف، موج شوک و همچنین مدل‌های شبیه‌سازی میکروسکوپی ترافیک جهت بررسی تغییرات ویژگی‌های راه‌ها در اثر وقوع بحران و انسداد بخشی از راه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [38]. با توجه به موضوع پژوهش حاضر، بررسی و مطالعه در زمینه موج شوک در اثر انسداد خطوط در جریان پیوسته را می‌توان در گلوگاه‌های ترافیکی که در اثر عوامل مختلف از جمله تصادفات ایجاد شده‌اند و تبعات ناشی از آن را به‌طور کامل‌تر مورد بررسی قرار داد.

پس از بررسی مطالعات انجام شده در زمینه موج شوک، به بررسی مقالات مرتبط در زمینه گلوگاه‌های ترافیکی پرداخته می‌شود. از پدیده‌های پیچیده در آزادراه که اثر مهم و قابل توجهی بر سرعت وسایل نقلیه دارد، موقعیت گلوگاه است. علاوه بر این، از اثرات منفی این پدیده؛ کاهش ظرفیت، ایجاد صف‌های طولانی و شکل‌گیری موج شوک‌های انتشار به عقب و جلو به عنوان جابجایی حرکت-توقف است. در مطالعاتی از جمله مطالعات لاتانزیو (۲۰۱۱) و تانگ (۲۰۱۲) و (۲۰۱۳)، اثرات گلوگاه‌ها را بر آزادراه‌ها با استفاده از مدل‌های ماکروسکوپی بررسی شده است. در این مطالعات، مدل‌ها قادر به شناسایی ویژگی‌های دینامیک ترافیک در حضور گلوگاه‌ها نبودند. لاتانزیو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) اثر گلوگاه‌های متحرک بر ویژگی‌های جریان ترافیک شامل سرعت و چگالی را با استفاده از یک مدل پیوسته تعیین کردند. اما این مدل با اصول پایستگی جرم<sup>۲</sup> در جریان ترافیک سازگار نبود [39]. بنابراین، برای اصلاح و توسعه دادن این مدل، تانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۲) یک مدل ماکروسکوپی را به عنوان نوعی از اصل پایستگی جرم برای بررسی اثرات گلوگاه در سرعت و چگالی خودرو معرفی کردند. نتایج نشان داد که در حضور گلوگاه‌های استاتیک موج شوک‌ها تاثیر قابل توجهی بر عملکرد

---

<sup>1</sup> Lattanzio et al.

<sup>2</sup> conservation laws

<sup>3</sup> Tang et al.

بزرگراه‌ها دارند [40]. علاوه بر این، تانگ و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل ماکروسکوپییک را به عنوان نوعی از اصل پایستگی برای بررسی اثرات گلوگاه در سرعت و چگالی خودرو معرفی کردند، با این تفاوت که در این مطالعه از گلوگاه‌های ایستای چندگانه<sup>۱</sup> استفاده کردند [41]. کین و اسمیت<sup>۲</sup> (۲۰۰۱) در مطالعه‌ای به بررسی میزان کاهش ظرفیت راه براساس آمار جمع آوری شده از راه‌های همپتون در ویرجینیای آمریکا پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در اثر انسداد یک و دو خط عبور از یک راه دارای سه خط در هر جهت، به ترتیب به میزان ۶۳ و ۷۷ درصد از ظرفیت راه کاسته خواهد شد [42].

---

<sup>۱</sup> multi-static bottlenecks

<sup>۲</sup> Qin & smith

فصل سوم

روش تحقیق

## ۳-۱ مقدمه

سرعت موج شوک به صورت تابعی از پارامترهای ترافیکی از جمله جریان، چگالی و سرعت وسایل نقلیه می‌باشد و نمودارهای آن به صورت رابطه تحلیلی بر حسب پارامترهای ترافیکی مذکور رسم می‌شود. با توجه به تئوری جریان ترافیک و موج شوک، محاسبه سرعت موج شوک ترافیک مستلزم پارامترهای جریان و چگالی می‌باشد. سناریوی اول در این مطالعه شامل انسداد یک خط ناشی از مناطق کاری و سناریوی دوم، انسداد خط دوم بر اثر تصادف ناشی از تغییر خط خودروی موجود در خط اول بر اثر وقوع مناطق کاری می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از تصاویر دوربین های موجود سازمان ترافیک در محل و تصاویر تهیه شده از دوربین نصب شده در محل، اطلاعات و داده‌های مورد نیاز از منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. مدل سازی و توسعه رابطه تحلیلی و دینامیکی سرعت موج پیشنهادی این پژوهش با توسعه مدل غیرخطی گرین شیلدز و مقایسه آن با رابطه لایت هیل، ویت هام و ریچاردز و همچنین استفاده از مدل لکس-فردریش برای حل معادلات دیفرانسیلی انجام می‌پذیرد. این مطالعه به دنبال بدست آوردن رابطه دینامیکی سرعت موج شوک بوجود آمده از توسعه روابط موجود و تخمین سرعت موج شوک‌های ایجاد شده با استفاده از معادلات توسعه یافته در این پژوهش تحت اثر شرایط انسداد یک خط و انسداد دو خط می‌باشد. در بررسی و شبیه‌سازی موج شوک‌ها، ابتدا تصادفات اولیه و موج شوک‌ها باعث وقوع تصادفات دیگر می‌شوند که موج شوک‌های دیگری را به وجود آورده و باعث بسته شدن مسیر برای مدتی می‌شود که پیامد این اتفاقات، ازدحام ترافیک و ایجاد صف‌های طولانی مدت و در نهایت تاخیرهای طولانی در زمان سفر استفاده کنندگان از راه می‌باشد. در نتیجه هدف این پژوهش، مطالعه و بررسی رابطه تحلیلی اثر تصادفات و انسداد ناشی از موج شوک با استفاده از روابط توسعه یافته پیشنهادی این پژوهش بر پارامترهای جریان و مقایسه شدت اثر این موج شوک‌ها با هم می‌باشد.

## ۲-۳ جمع آوری اطلاعات

محل انتخاب شده برای جمع آوری اطلاعات آزادراه شیخ فضل الله نوری واقع در استان تهران می باشد. این آزادراه به دلیل متصل کردن شهر کرج به شهر تهران و همچنین بدلیل اهمیت مناطق صنعتی اطراف آن هر روز تحت جریان ترافیک سنگین می باشد و جریان در این مسیر از ۸۰۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت نیز بیشتر می شود که نشان از حجم بالای جریان عبوری و اهمیت این مسیر دارد. شکل ۱-۳ مسیر مورد مطالعه را نشان می دهد. همچنین دوربین تعبیه شده در این مسیر نسبت به مناطق مشابه، دارای زاویه و موقعیت مناسبی نسبت به مسیر عبوری می باشد که کار برداشت داده در این شرایط با خطای کمتری همراه خواهد بود. آزادراه شیخ فضل الله نوری دارای چهار خط عبور در جهت رفت و چهار خط عبور در جهت برگشت می باشد. خطوط عبوری رفت و برگشت با استفاده از گاردریل های جدا کننده مسیر از هم جدا شده است.



شکل ۱-۳ آزادراه شیخ فضل الله نوری [43]

### ۳-۲-۱ سناریوهای مورد مطالعه

به منظور دستیابی به هدف این پژوهش، سناریوهای انسداد یک خط در اثر مناطق کاری و سپس دو خط بر اثر تصادف، به عنوان حوادث کوتاه مدت در آزادراه شیخ فضل الله نوری (نزدیک شهرک فرهنگیان) بررسی گردید. سپس تصاویر ویدیویی تحت سناریوهای ذکر شده و در حالت شرایط ترافیکی متراکم؛ از مرکز کنترل ترافیک تهران و همچنین با استفاده از دوربین فیلم برداری واقع در مقطع عرضی راه ضبط و ثبت شد. در شکل ۳-۲ تصویری از موقعیت دوربین نسبت به جریان ترافیک را می توان مشاهده کرد.

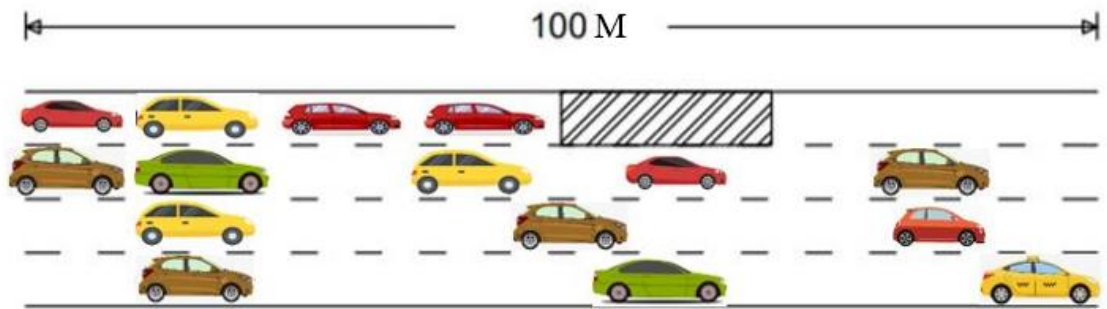


شکل ۳-۲ ناحیه مورد مطالعه در آزادراه شیخ فضل الله نوری

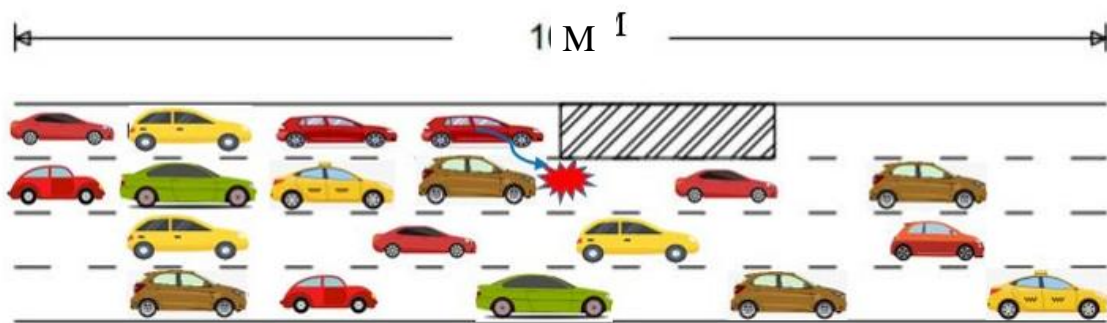
سناریوی اول که شامل انسداد خط تندرو محور مذکور می باشد با توجه به محدودیت های ایمنی و ملاحظات موجود با استفاده از تجهیزات و علائم ترافیکی به منظور شبیه سازی شرایط مناطق کاری مسدود گردید. سناریوی دوم اما با استفاده از یک وسیله نقلیه به منظور نزدیک بودن هر چه بیشتر شرایط شبیه سازی



صحنه‌ی تصادف و اثرات آن با شرایط واقعی دو دقیقه بعد از انسداد خط اول، انسداد داده شد. دو تصویر از سناریوهای فوق در شکل های ۳(الف) و ۳(ب) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳ سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش الف) انسداد یک خط ناشی از منطقه کاری ب)انسداد دو خط ناشی از تصادف در اثر تغییر خط

برداشت اطلاعات بهمن ماه ۱۳۹۷ از ساعت ۱۰ صبح الی ۱۱ انجام پذیرفت. با تحلیل‌های صورت گرفته بر روی تصاویر ویدیویی تهیه شده از دوربین مرکز کنترل ترافیک که در راستای جریان ترافیک قرار داشت و تصاویر دوربین شخصی که عمود بر جریان ترافیک جانمایی شده بود برای سناریوهای مورد نظر، سه کمیت ماکروسکوپیک شامل سرعت (کیلومتر بر ساعت)، جریان ترافیک (خودرو بر ساعت) و چگالی (خودرو بر متر) در طول دو دقیقه برای هر کدام از سناریوهای مذکور و همچنین برای شرایط بدون انسداد (شرایط عادی ترافیک) جمع آوری شده است که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

## ۲-۲-۳ استخراج اطلاعات:

فیلم‌های ویدیویی با استفاده از نرم‌افزار ادوبی پریمیر<sup>۱</sup> ۲۰۱۸ بررسی شد و استخراج داده‌های ترافیکی انجام شد. از مزیت‌های این برنامه می‌توان به تبدیل ثانیه به فریم اشاره کرد که برای تعیین سرعت و مکان خودرو بسیار مفید می‌باشد. برای تعیین فاصله مکانی و بدست آوردن فریم برای هر کدام از فواصل مدرج شده با توجه به اهمیتی که فاصله دقیق این فواصل برای بدست آوردن سرعت هر خودرو و به تبع آن پارامترهای جریان و چگالی، ساعتی قبل از برداشت اطلاعات، رنگ آمیزی کردن حاشیه راه به فاصله دو و نیم متر از یکدیگر و به مسافت ۱۰۰ متر انجام شد. در شکل ۳-۳ تصویری از نحوه برداشت داده نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ نمونه ای از خطوط ترسیم شده برای اندازه گیری پارامترهای جریان

با توجه به اینکه هدف مورد نظر در این پژوهش بدست آوردن تاثیر انسداد بر اثر تصادف بر جریان ترافیک می‌باشد، و با توجه به ناگهانی بودن این رویداد، دقایق ابتدایی پس از انسداد از اهمیت بیشتری برخوردار است. دلیل این امر در تعریف پدیده موج شوک نمایان است. طبق تعریف‌های موجود از این پدیده، موج شوک بر اثر

<sup>۱</sup> Adobe Premiere Pro CC 2018

تغییر ناگهانی در جریان ترافیک اتفاق می‌افتد. بنابراین با گذشت زمان از شدت اثر موج شوک کاسته شده و همچنین رانندگان با وفق دادن خود با شرایط موجود، جریان را به سمت متعادل شدن می‌برند. در نتیجه برداشت داده در زمان بلافاصله بعد از انسداد ملاک ارزیابی پژوهش حاضر می‌باشد. شروع برداشت اطلاعات برای هر دو سناریو از زمانی است که اولین خودرو در هر دو حالت دارای کاهش سرعت محسوسی بوده و به دنبال آن، جریان ترافیک تحت تاثیر این اتفاق ناگهانی تغییراتی داشته است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۵ سناریوهای مورد مطالعه الف) انسداد یک خط ناشی از مناطق کاری ب) انسداد دو خط ناشی از مناطق کاری و تصادف

داده‌های ترافیکی استخراج شده تحت سناریوهای مورد مطالعه در جدول‌های ۳-۱ تا ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: داده سرعت جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری

الف) سرعت (km/h)			
زمان (ثانیه)	سرعت تحت شرایط بدون انسداد	سرعت تحت انسداد یک خط	سرعت تحت انسداد دو خط
۱۵	۴۲/۰۵	۲۰/۲۹	۱۳/۳۴
۳۰	۴۰/۸	۲۲/۷	۱۰/۵۲
۴۵	۴۲/۹	۲۳/۸	۱۰/۱۶
۶۰	۴۱/۹۲	۲۳/۰۵	۱۲/۵۷
۷۵	۴۱/۸۷	۲۲/۶۵	۱۰/۹
۹۰	۴۲/۲۳	۱۸/۸۴	۱۱/۶۴
۱۰۵	۴۱/۵	۱۹/۶۳	۱۵/۹۱
۱۲۰	۴۳	۲۱/۵	۱۶/۶

جدول ۳-۲: داده جریان جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری

ب) جریان (veh/h)			
زمان (ثانیه)	جریان تحت شرایط بدون انسداد	جریان تحت انسداد یک خط	جریان تحت انسداد دو خط
۱۵	۷۶۸۰	۵۲۸۰	۳۶۰۰
۳۰	۶۹۶۰	۶۲۴۰	۳۳۶۰
۴۵	۷۴۴۰	۵۷۶۰	۳۳۶۰
۶۰	۶۷۲۰	۵۲۸۰	۳۶۰۰
۷۵	۷۲۰۰	۵۷۶۰	۴۰۸۰
۹۰	۷۹۲۰	۶۰۰۰	۳۸۴۰
۱۰۵	۷۶۸۰	۵۲۸۰	۴۳۲۰
۱۲۰	۷۴۴۰	۵۰۴۰	۴۰۸۰

جدول ۳-۳: داده چگالی جمع آوری شده در آزادراه شیخ فضل الله نوری

ب) چگالی (veh/km)			
زمان (ثانیه)	چگالی تحت شرایط بدون انسداد	چگالی تحت انسداد یک خط	چگالی تحت انسداد دو خط
۱۵	۱۸۲/۶۴	۲۶۰/۲۳	۲۶۹/۸۶
۳۰	۱۷۰/۵۹	۲۷۴/۸۹	۳۱۹/۳۹
۴۵	۱۷۳/۴۳	۲۴۲/۰۲	۳۳۰/۷۱
۶۰	۱۶۰/۳۱	۲۲۹/۰۷	۲۸۶/۴۰
۷۵	۱۷۱/۹۶	۲۵۴/۳۰	۳۷۴/۳۱
۹۰	۱۸۷/۵۴	۳۱۸/۴۷	۳۲۹/۹۰
۱۰۵	۱۸۵/۰۶	۲۶۸/۹۸	۲۷۱/۵۳
۱۲۰	۱۷۳/۰۲	۲۳۴/۴۲	۲۴۵/۷۸

### ۳-۳ مدل گرین شیلدز<sup>۱</sup>

از جمله اطلاعات لازم و اساسی در تحلیل جریان ترافیک می‌توان به سرعت، چگالی و جریان و روابط آن‌ها با یکدیگر اشاره کرد که روابط بین جریان، چگالی و سرعت از جمله مهم‌ترین پارامترها در تئوری جریان ترافیک هستند. مدل‌های زیادی وجود دارند که رابطه بین این سه پارامتر اولیه جریان ترافیک را بیان می‌کنند. از جمله مدل‌هایی که عموماً مورد استفاده مهندسان ترافیک هستند و در مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند و همچنین عملکرد قابل قبولی از خود در حالت‌های مختلف نشان داده‌اند، می‌توان به مدل‌های گرین شیلدز، گرین برگ<sup>۲</sup> و آندر وود<sup>۳</sup> اشاره کرد. این مدل‌ها پارامترهای کلیدی برای مهندسان ترافیک برای بررسی ویژگی‌های جریان ترافیک هستند. در یک مطالعه میدانی، مدل‌های گرین شیلدز، گرین برگ و آندر وود استفاده

<sup>1</sup> Greenshields

<sup>2</sup> Greenberg

<sup>3</sup> Underwood

شدند [31]. در موقعیت مکانی مورد مطالعه مدل آندر وود بهترین مدل برای برازش داده‌ها می‌باشد و بالاترین ضریب همبستگی را در بین سه مدل مذکور به خود اختصاص داده است، با این وجود این مدل نمی‌تواند با مقدار شرایط ترافیک راه‌بندان کارایی لازم را داشته باشد. وقتی منحنی سرعت-چگالی هیچ وقت با محور xها که چگالی هست برخورد نداشته باشد، بنابراین چگالی راه‌بندان ( $\rho_j$ ) هیچ وقت شناسایی نمی‌شود. پس از مدل گرینبرگ، مدل گرین‌شیلدز بیشترین ضریب همبستگی را دارا می‌باشد و با توجه به اینکه در شرایط راه‌بندان هم عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد، بنابراین برای آنالیز موج شوک مدل گرین‌شیلدز به عنوان بهترین نشان‌دهنده‌ی داده میدانی در نظر گرفته شد. در نهایت آنالیز موج شوک با استفاده از دیاگرام اساسی گرین‌شیلدز ساخته شد و نشان داد که وقتی که زمان تصادف افزایش یابد، طول صف بطور خطی افزایش خواهد یافت درحالی که تاخیر کل بطور نمایی افزایش می‌یابد [31].

### ۳-۴ برآورد سرعت موج شوک

همان‌طور که ذکر شد موج شوک برای اولین بار توسط لایت هیل و ویت هام در سال ۱۹۵۵ و ریچاردز در سال ۱۹۵۶ معرفی شد. بر طبق مروری کلی بر مطالعات که توسط وگنر و کلار<sup>۱</sup> [44]، اندالله و همکاران<sup>۲</sup> [45] و لوکه<sup>۳</sup> [46] انجام شد، مدل جریان ترافیک ماکروسکوپیک LWR بر مبنای معادله پایستگی به صورت زیر فرموله شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q(\rho)}{\partial x} = 0, \text{ where } q(\rho) = \rho U \quad (1-3)$$

که:

$q =$  جریان ترافیک (veh/h)

<sup>1</sup> Wegener & Klar

<sup>2</sup> Andallah

<sup>3</sup> LeVeque

$\rho =$  چگالی (veh/km)

$U =$  سرعت (km/h)

به منظور تخمین سرعت در معادله پایستگی، یک رابطه سرعت-چگالی غیر خطی با در نظر گرفتن گرین شیلدز در معادله (۲-۳) فرموله شده است [45].

$$U(\rho) = U_{max} \left( 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)^m \right), m > 1 \quad (2-3)$$

در پژوهش حاضر، رابطه غیر خطی سرعت-چگالی با فرض اینکه  $m=2$  باشد به شکل معادله (۳-۳) تبدیل شده است:

$$U(\rho) = U_{max} \left( 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)^2 \right) \quad (3-3)$$

$U_{max} =$  سرعت بیشینه (km/h) ،  $\rho =$  چگالی (veh/km) ،  $\rho_{max} =$  چگالی بیشینه (veh/km)

برای رسیدن به جریان ترافیک ایجاد شده توسط یک معادله غیر خطی، لازم است که معادله ذکر شده در بالا (معادله ۳-۳) را در  $q(\rho) = \rho u(\rho)$  جایگزین کرد. بنابراین، یک رابطه جریان ترافیک به عنوان تابع غیر خطی سرعت-چگالی در معادله (۴-۳) ارائه شده است:

$$q(\rho) = \rho \left[ U_{max} \left( 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)^2 \right) \right] = U_{max} \left( \rho - \frac{\rho^3}{\rho_{max}^2} \right) \quad (4-3)$$

حالا، معادله (۴-۳) بدست آمده در بالا در رابطه جریان ترافیک LWR ماکروسکوپی (معادله ۱-۳) جانمایی می شود. یک معادله دیفرانسیل نسبی غیر خطی<sup>۱</sup> تشکیل می شود که در معادله (۵-۳) آورده شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( U_{max} \left( \rho - \frac{\rho^3}{\rho_{max}^2} \right) \right) = 0 \quad (5-3)$$

در این پژوهش، معادله (۵-۳) برای برآورد و تحلیل سرعت موج شوک مورد استفاده قرار گرفت. در واقع، این رابطه LWR را بر حسب چگالی ( $\rho$ ) بیان می کند.

<sup>1</sup> non-linear partial differential equation

### ۳-۴-۱ مطالعه تحلیلی سرعت‌های موج شوک مدل‌های $LWR^u$ و $LWR^p$

از قانون پایستگی و چگالی  $LWR$ ، طبق گام‌های زیر روابط تخمین زده شده است:

در گام نخست، به منظور بدست آوردن معادله  $LWR^p$ ، از معادله (۳-۵) مشتق گرفته می‌شود، که در معادله (۳-۶) نشان داده شده است:

$$\frac{\partial q}{\partial \rho} = U_{max} \left(1 - \frac{3\rho^2}{\rho_{max}^2}\right) \quad (۳-۶)$$

در گام دوم، با در نظر گرفتن رابطه غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز، معادله زیر به عنوان تابع چگالی در معادله (۳-۷) نتیجه شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + U_{max} \left(1 - \frac{3\rho^2}{\rho_{max}^2}\right) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (۳-۷)$$

در گام سوم، معادله اشاره شده در رابطه (۳-۷) به شکل و فرم پایستگی در معادله (۳-۸) به شرح زیر نوشته شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( U_{max} \rho \left(1 - \frac{\rho^2}{\rho_{max}^2}\right) \right) = 0 \quad (۳-۸)$$

سپس، با انتگرال گرفتن از هر دو طرف معادله (۳-۸)، معادلات (۳-۹) الی (۳-۱۲) به ترتیب حل می‌شوند تا سرعت موج شوک بر حسب چگالی بدست آید:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{x_1}^{x_2} \rho dx \right) = -U_{max} \left( \rho_2 \left(1 - \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}\right) - \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2}\right) \right) \quad (۳-۹)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{x_1}^{S(t)} \rho dx + \int_{S(t)}^{x_2} \rho dx \right) = -U_{max} \left( \rho_2 \left(1 - \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}\right) - \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2}\right) \right) \quad (۳-۱۰)$$

$$\rho_1 \frac{\partial}{\partial t} (S(t) - X_1) + \rho_2 \frac{\partial}{\partial t} (X_2 - S(t)) = U_{max} \left( \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2}\right) - \rho_2 \left(1 - \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}\right) \right) \quad (۳-۱۱)$$

$$\rho_1 (\dot{S}(t)) - \rho_2 (\dot{S}(t)) = U_{max} \left( \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2}\right) - \rho_2 \left(1 - \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}\right) \right) \quad (۳-۱۲)$$



در نهایت، سرعت موج شوک ناشی از  $LWR^p$  با چینش دوباره جملات معادله (۳-۱۲)، همانطور که در معادله (۳-۱۳) نشان داده شده است، بدست می‌آید:

$$\dot{S}(t) = \frac{U_{max}(\rho_1(1-\frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2})-\rho_2(1-\frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}))}{\rho_1-\rho_2} \quad (۳-۱۳)$$

در رابطه فوق،  $\dot{S}(t)$  نشان دهنده سرعت موج شوک بر حسب کیلومتر بر ساعت می‌باشد.

علاوه بر این، می‌توان سرعت موج شوک را در رابطه  $LWR$  بر حسب تابعی از سرعت ( $u$ ) نشان داد. برای تعیین سرعت موج شوک در  $LWR^u$ ، بهتر است این معادله را با تابع  $u=u(\rho)$  نمایش داده شود. بنابراین، معادله ماکروسکوپی جریان ترافیک  $LWR$  با در نظر گرفتن قانون پیوستگی به شکل معادله (۳-۱۴) ارائه شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{dq}{d\rho} \frac{du}{d\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (۳-۱۴)$$

سرعت موج شوک  $LWR^u$  با در نظر گرفتن رابطه غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز برآورد شده است که در معادله (۳-۱۵) بصورت زیر آورده شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (U_{max}^2 (\frac{6\rho^3}{\rho_{max}^4} - \frac{2\rho}{\rho_{max}^2})) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (۳-۱۵)$$

با استفاده از معادله (۳-۱۵)، معادله سرعت زیر به عنوان تابع چگالی را می‌توان به فرم پایستگی در معادله (۳-۱۶) نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U_{max}^2 (\frac{3\rho^4}{2\rho_{max}^4} - \frac{\rho^2}{\rho_{max}^2})) = 0 \quad (۳-۱۶)$$

با در نظر گرفتن مراحل مشابه حالت قبل و گرفتن انتگرال از هر دو طرف معادله، سرعت موج شوک از  $LWR^u$  در معادله (۳-۱۷) به شرح زیر آورده شده است:

$$\dot{S}(t) = U_{max}^2 \frac{(\frac{3\rho_1^4}{2\rho_{max}^4} - \frac{3\rho_2^4}{2\rho_{max}^4}) + (-\frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2} + \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2})}{U_{max}(1-\frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2} - 1 + \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2})} \quad (۳-۱۷)$$

به منظور ساده سازی رابطه فوق، می‌توان رابطه (۳-۱۷) را به شکل رابطه (۳-۱۸) در نظر گرفت:

$$\dot{S}(t) = -U_{max} \frac{3(\rho_1^2 + \rho_2^2)}{2(\rho_{max}^2)} + U_{max} \quad (۳-۱۸)$$

بنابراین، با مقایسه سرعت موج شوک بدست آمده از فرم  $LWR^p$  با سرعت موج شوک بدست آمده از  $LWR^u$  می‌توان نتیجه گرفت که معادله دو سرعت موج شوک پیشنهادی با یکدیگر تفاوت آشکاری دارند.

### ۳-۴-۲ روش لکس-فردریش<sup>۱</sup> و مدل سازی موج شوک‌ها:

برای اولین بار، پیتر لکس<sup>۲</sup> و کورت او فردریش<sup>۳</sup> روش عددی خود را برای حل معادلات دیفرانسیل هایپربولیک<sup>۴</sup> با مرتبه بالا مبتنی بر المان محدود<sup>۵</sup> پیشنهاد کردند. کاربرد این روش در حل مسائل معادلات مرتبه دوم و سوم می‌باشد. قدام و همکاران(۲۰۱۶) از یک روش عددی برای مدل LWR تحت شرایط ترافیک ناهمگن استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که روش‌های لکس فردریش و مک کورمک<sup>۶</sup> نتایج بهتر و پایدارتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهند[49]. این مدل در مطالعاتی که در زمینه سیالات انجام شده است کاربرد فراوانی دارد که از جمله می‌توان به مطالعه حیدری فر و بیدختی(۱۳۹۸) اشاره کرد[50]. اساس روش لکس-فردریش به عنوان روش مکان و زمان به عنوان یک ضریب ریاضی ساختگی<sup>۷</sup> با مرتبه ۵/۰ می‌باشد که برای حل معادله‌ی موج تعریف شده است. این روش با در نظر گرفتن قانون پایستگی و بقای جرم هایپربولیک غیر خطی از طریق تابع  $f$  بر حسب سرعت جریان<sup>۸</sup> مانند معادله‌ی (۳-۱۹) معرفی شده است.

$$u_t + (f(u))_x = 0 \quad (۳-۱۹)$$

در معادله فوق،  $f(u) = au$ ، یک معادله خطی است. که،

<sup>1</sup> Lax -Fredriech

<sup>2</sup> Peter Lax

<sup>3</sup> Kurt O. Friedrichs

<sup>4</sup> Hyperbolic

<sup>5</sup> Finite difference

<sup>6</sup> MacCormack schemes

<sup>7</sup> Artificial viscosity term

<sup>8</sup> F(flux)

U پارامتر برداری است.

بنابراین، روش لکس-فردریش را برای سیستم‌های غیر خطی می‌توان در معادله (۳-۲۰) تشکیل داد [49].

$$u_t^{n+1} = 0.5(u_{i+1}^n + u_{i-1}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(f(u_{i+1}^n) - f(u_{i-1}^n)) \quad (۳-۲۰)$$

در معادله‌ی فوق:

$\Delta t$  = گام زمانی که در این پژوهش برابر ۰/۳۵ می‌باشد

$\Delta x$  = گام مکانی که در این پژوهش برابر ۰/۳ می‌باشد

معادله فوق زمانی کاربردی است که شرایط در مسائل بصورت یکنواخت باشد.

### ۳-۴-۳ پایداری و درستی<sup>۱</sup> معادله لکس-فردریش:

به منظور پایداری و صحت روش لکس-فردریش رابطه (۳-۲۱) که به آن عدد پایداری نیز گفته می‌شود باید

در این پژوهش برقرار باشد:

$$\left| a \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| \leq 1 \quad (۳-۲۱)$$

$\Delta x$  و  $\Delta t$  گام‌های مکانی و زمانی هستند. همچنین در معادله‌ی فوق  $a=1$  در نظر گرفته شده است.

به منظور مدل‌سازی سرعت موج شوک معادلات توسعه یافته  $LWR^p$  و  $LWR^u$  با توجه به روش عددی لکس-

فردریش، می‌توان دو معادله توسعه یافته را بر اساس شرایط یکنواختی و شرایط مرزی مطابق معادله (۳-۲۲)

در نظر گرفت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 \quad (۳-۲۲)$$

شرایط مرزی معادله فوق بصورت زیر است:

$$\text{With I.C } u(t_0, x) = u_0(x) \quad a \leq x \leq b$$

$$\text{and B.C } u(t, a) = u_a(x); \quad t_0 \leq t \leq T$$

$$u(t, b) = u_b(x); \quad t_0 \leq t \leq T$$

<sup>1</sup> Stability and accuracy

بر اساس معادله لکس-فردیش معادله (۳-۲۳) در نظر گرفته شد، سپس با در نظر گرفتن چند پارامتر، حل عددی سرعت موج شوک نهایی با توجه به زمان و مکان بر مبنای معادلات (۳-۲۴) الی (۳-۲۶) به شرح زیر ارائه شده است:

$$u_i^{n+1} = 0.5(u_{i+1}^n + u_{i-1}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (f(u_{i+1}^n) - f(u_{i-1}^n)) \quad (۳-۲۳)$$

$$i=1, \dots, M; n=0, \dots, n-1$$

$$\lambda = a \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (۳-۲۴)$$

در رابطه‌ی فوق  $\lambda$  عدد پایداری است

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)u_{i-1}^n + (1 - \lambda)u_{i+1}^n] \quad (۳-۲۵)$$

بنابراین برای حل معادلات توسعه یافته به روش عددی لکس-فردیش، طبق معادله (۳-۲۵) و شرایط مرزی ذکر شده، می‌توان سرعت موج شوک‌ها را با استفاده از معادلات (۳-۲۶) و (۳-۲۷) همان‌طور که در جدول ۳-۲ ارائه شده است، بدست آورد. در فاصله ۰ تا ۵۰ متر بیشترین مقدار موج شوک در حالت انسداد یک خط و انسداد دو خط در نظر گرفته شده که برابر ۳۱ و ۴۷ کیلومتر بر ساعت است. این مقدار در بازه‌ی ذکر شده برای هر دو حالت  $LWR^p$  و  $LWR^u$  برای هر دو حالت انسداد یکسان می‌باشد، یعنی در بازه ۰ تا ۵۰ متر مقدار بیشینه را در نظر می‌گیریم و در غیر اینصورت و به منظور پیش بینی مقدار سرعت موج شوک در ادامه مسیر ( $x > 50$ ) می‌توان از رابطه‌ی (۳-۲۶) و (۳-۲۷) برای هر دو حالت انسداد سرعت موج شوک را پیش بینی کرد.

جدول ۳-۴: مقادیر اولیه سرعت موج شوک در روش لکس-فردریش

$u_0(x) = -31;$ $0 \leq x \leq 50$		انسداد یک خط
$u_0(x) = -47$ $0 \leq x \leq 50$		انسداد دو خط
$LWR^u$	$LWR^\rho$	انواع سرعت موج شوک
$u_0(x) = -U_{max} \frac{3(\rho_1^2 + \rho_2^2)}{2(\rho_{max}^2)} + U_{max}$ <p style="text-align: center;">(۲۶-۳)</p> $x > 50$	$u_0(x) = \frac{U_{max}(\rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\rho_{max}^2}\right) - \rho_2 \left(1 - \frac{\rho_2^2}{\rho_{max}^2}\right))}{\rho_1 - \rho_2}$ <p style="text-align: center;">(۲۷-۳)</p> $x > 50$	سناریوهای تصادف



# فصل ہمارم

## نتیج

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل، ابتدا اطلاعات آماری از داده‌های بدست آمده از فیلم‌ها ارائه می‌شود. و در ادامه با توجه به اطلاعات استخراج شده از فیلم‌های ترافیکی، می‌توان به تحلیل داده‌های مرتبط پرداخت. در ادامه این بخش به بررسی و مقایسه پارامترهای موجود و عوامل تاثیرگذار بر آن در سناریوهای موجود پرداخته خواهد شد. در نهایت، در این بخش به برازش داده‌های میدانی بدست آمده در گام قبل با مدل توسعه یافته و غیر خطی گرین‌شیلدز پرداخته می‌شود و ضرایب همبستگی در شرایط انسداد خط اول و سپس انسداد خط مجاور آن بدست خواهد آمد.

در قسمت بعد، به محاسبه سرعت موج شوک و با استفاده از رابطه LWR و همچنین رابطه دینامیکی توسعه یافته در این پژوهش پرداخته می‌شود و نتایج آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. سرانجام به بررسی دقت روابط بدست آمده از رابطه LWR بر حسب سرعت و چگالی پرداخته و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می‌گردد. و در نهایت، بهترین رابطه از بین روابط توسعه یافته در این پژوهش برای هر یک از سناریوهای انسداد یک خط و انسداد دو خط در انتهای این پژوهش پیشنهاد می‌گردد.

## ۴-۲ بررسی تعداد خودروهای عبوری در سناریوهای انسداد یک

### و دو خط

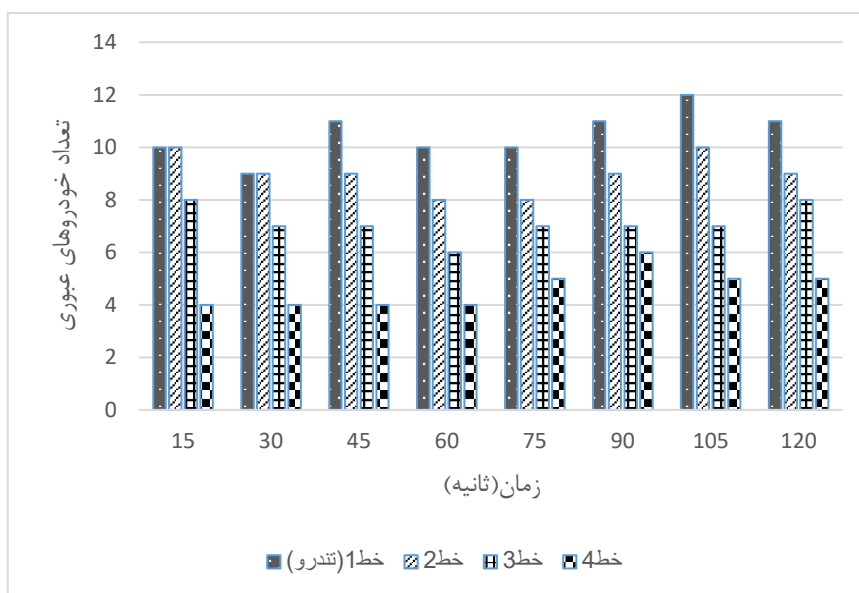
بررسی تعداد خودروهای عبوری به منظور بررسی تاثیر انسداد در سناریوهای مختلف به دو صورت انجام می‌پذیرد. حالت اول بررسی تعداد خودروهای موجود در هر خط قبل از وقوع انسدادها و مقایسه آن با تعداد خودروها بعد از وقوع انسدادها به منظور مقایسه خدمت‌دهی خطوط تحت تاثیر قبل و بعد از انسداد می‌باشد.



حالت دوم بررسی تعداد خودروهای عبوری در زمان‌های مورد نظر و در هر سناریو در از ناحیه مورد مطالعه بطوری که همه‌ی خطوط با هم مورد ارزیابی قرار گرفته می‌شوند.

## ۴-۲-۱ تعداد خودروهای عبوری در هر خط

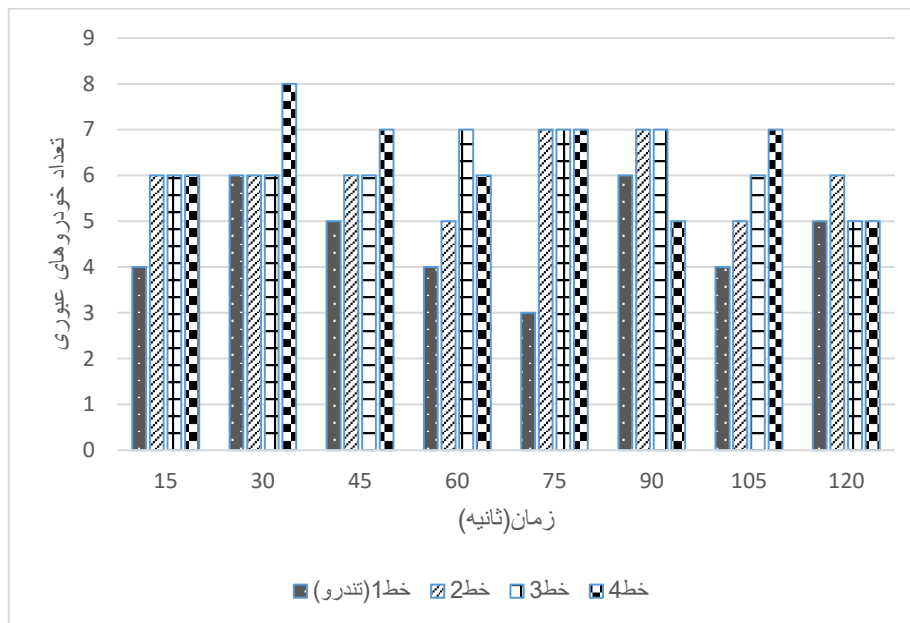
تعداد کل جامعه آماری خودروهای عبوری در بازه‌ی ۱۲۰ ثانیه در حالت طبیعی جریان برابر ۲۵۰ خودرو می‌باشد. که این عدد نشان دهنده‌ی حجم بالای جریان در این مسیر می‌باشد. تعداد خودروهای عبوری در حالت عادی جریان، در هر خط به صورت مجزا در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، نمودارهای خط ۱ در تمامی بازه‌ها بیشترین مقدار را بین سایر خطوط به خود اختصاص داده‌اند که تمایل خودروها به عبور از این خط را در مقایسه با سایر خطوط نشان می‌دهد. در نقطه مقابل، خط کندرو (خط ۴) همان‌طور که در نمودار مشخص است دارای کمترین تعداد خودروی عبوری می‌باشد. یکنواخت بودن نمودارهای بدست آمده در بازه‌های زمانی نشان‌دهنده‌ی عادی بودن جریان ترافیک می‌باشد.



شکل ۴-۱ تعداد خودروهای عبوری در بازه‌های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در شرایط عادی جریان

بعد از انسداد یک خط همان‌طور که در شکل ۴-۲ قابل مشاهده است، با توجه به کند بودن تردد در خطوط

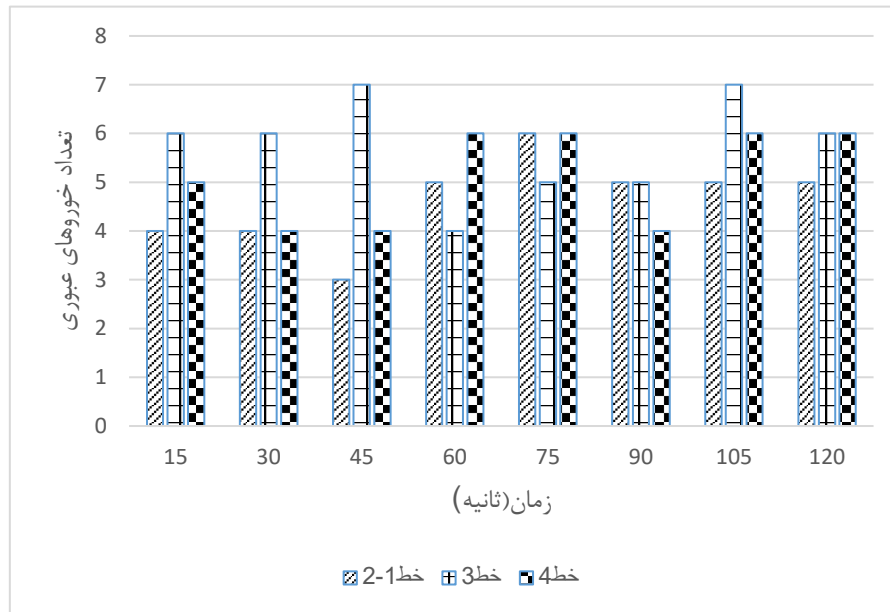
تندرو، تعداد خودروهای عبوری از آن خطوط در بازه‌های ۱۵ ثانیه‌ای مورد نظر کاهش یافته است. همچنین رانندگان وسایل نقلیه تمایل بیشتری به خطوط کندرو از خودشان نشان داده‌اند. لازم به ذکر است که در این حالت تعداد خودروهای عبوری کاهش محسوسی داشته و به میزان ۱۸۶ خودرو می‌رسد. بیش‌ترین کاهش نیز مربوط به خط ۱ می‌باشد که به طور میانگین در بازه مورد مطالعه کاهش ۵۶ درصدی در آن اتفاق افتاده است. کاهش این‌چنین در مدت زمان کوتاه نشان‌دهنده‌ی تاثیر انسداد بر جریان ترافیک می‌باشد که در ادامه به بررسی میزان تاثیر این اتفاق با استفاده از محاسبه سرعت موج شوک پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۲ تعداد خودروهای عبوری در بازه‌های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در حالت انسداد یک خط

بعد از مدت ۱۲۰ ثانیه، خط دوم نیز بر اثر تصادف انسداد می‌یابد. با مسدود شدن خط دوم از لاین سرعت، کاهش دوباره‌ی تعداد خودروهای عبوری از ۱۸۶ به ۱۲۴ خودرو مشاهده می‌شود که خود این اتفاق به تنهایی نشان‌دهنده‌ی وخیم‌تر شدن اوضاع می‌باشد. پس از انسداد یافتن خط دوم، در واقع خط یک و دو با هم ادغام شده‌اند. دلیل این اتفاق، تمایل رانندگان به تغییر خط به دلیل مسدود بودن خطوط و همچنین متوجه شدن رانندگانی که در پایین دست انسداد با دیدن راهنمای خودروهای جلویی برای تغییر خط، می‌باشد. بیشترین میزان کاهش عبور در خطوط پس از ادغام دو خط پس از انسدادها نسبت به حالت عادی جریان برابر ۷۵

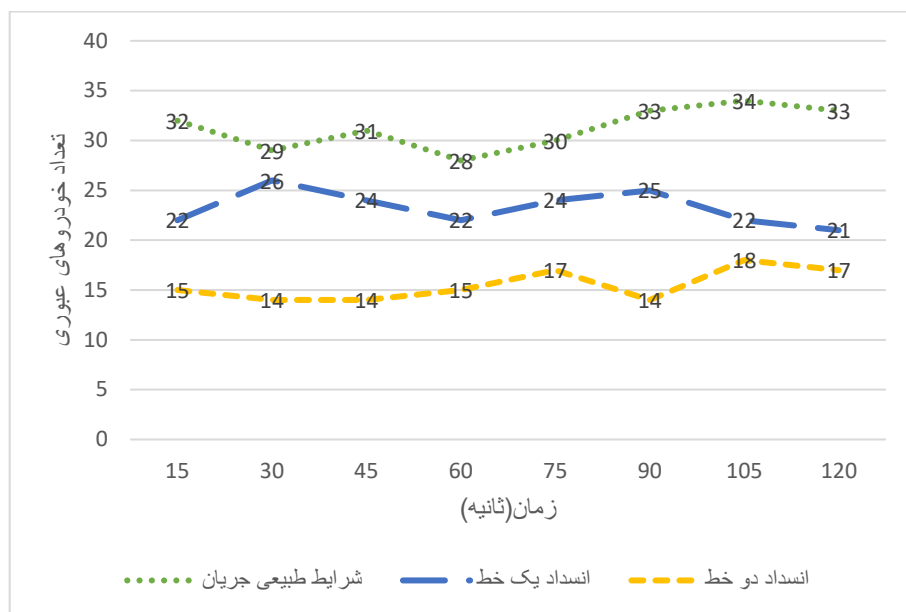
درصد می‌باشد که مربوط به خطوط ۱ و ۲ می‌باشد. نمودار مربوط به تعداد خودروهای عبوری پس از انسداد دو خطدر شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های ۱-۴ تا ۴-۳ مشخص است، انسداد تاثیر قابل توجهی بر جریان ترافیک داشته است.



شکل ۳-۴ تعداد خودروهای عبوری در بازه های زمانی مورد نظر به ازای هر خط در حالت انسداد دو خط

## ۴-۲-۲ مقایسه تعداد خودروهای عبوری

در این قسمت تعداد خودروهای عبوری از تمامی خطوط برای همه سناریوها به منظور مقایسه سناریوها با یکدیگر و با حالت عادی جریان ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۴ می‌توان مشاهده کرد، پس از اعمال تغییرات در دسترسی مسیر شاهد تغییرات قابل توجه در تعداد خودروهای عبوری می‌باشد، به طوری که در شرایط عادی ترافیک در ۱۵ ثانیه نخست، تعداد خودروهای عبوری برابر ۳۲ می‌باشد که این مقدار بعد از انسداد خط اول که انسداد خط تندرو در مسیر مورد مطالعه می‌باشد، تعداد خودروهای عبوری از مقطع مشخصی از راه برابر ۲۲ می‌باشد. همچنین در ادامه و برای انسداد دو خط که شامل انسداد خط تندرو و خط مجاور آن می‌باشد، تعداد خودروها برابر ۱۵ می‌باشد.



شکل ۴-۴ تعداد خودروهای عبوری از مقطع مشخصی از راه در بازه زمانی مورد مطالعه

#### ۴-۲-۳ سرعت خودروهای عبوری

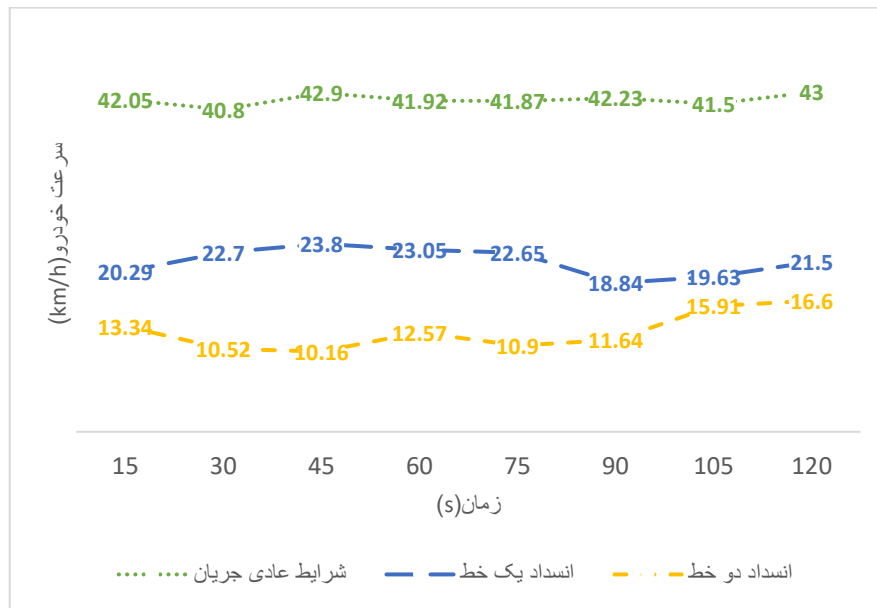
با توجه به شکل ۴-۵، یافت می‌شود که در شرایط طبیعی و بدون انسداد جریان ترافیک، کمترین نوسان در سرعت خودروها وجود دارد. بعد از وقوع انسداد اول با توجه به شکل مشاهده می‌شود که سرعت خودروها از حالت عادی که به طور تقریبی برابر ۴۳ کیلومتر بر ساعت است به مقدار  $20/3$  کیلومتر بر ساعت بلافاصله پس از انسداد می‌رسد و در ادامه جریان ترافیک با نوسانات قابل توجهی نسبت به حالت عادی جریان هماگونه که در شکل ۴-۵ می‌توان مشاهده کرد، روبرو می‌شود. به طور مشابه، مقدار سرعت در انتهای بازه انسداد یک خط برابر  $21/5$  می‌باشد که مقدار آن پس از ایجاد انسداد دوم به  $13/3$  کاهش می‌یابد. اطلاعات مربوط به بیشینه و کمینه سرعت و همچنین میانگین سرعت در هر سناریو و در بازه مورد مطالعه در جدول ۴-۱ آورده شده است. علاوه بر این، در سناریوهای موجود پس از بوجود آمدن انسداد ناشی از مناطق کاری و انسداد ناشی از تصادف، کاهش سرعت قابل توجهی قابل مشاهده است. به طور مثال، سرعت قبل از وقوع انسداد یک خط برابر ۴۳ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که مقدار آن بلافاصله پس از انسداد خط اول به  $20/3$  کاهش می‌یابد. به طور مشابه،

مقدار سرعت در انتهای بازه انسداد یک خط برابر ۲۱/۵ می باشد که مقدار آن پس از ایجاد انسداد دوم به ۱۳/۳ کاهش می یابد.

جدول ۴-۱: اطلاعات مربوط به سرعت برای خودروهای در سناریوهای مورد مطالعه (کیلومتر بر ساعت)

سناریوها	جریان عادی	انسداد یک خط	انسداد دو خط
بیشینه	۴۳	۲۳/۸	۱۶/۶
کمینه سرعت	۴۰/۸	۱۸/۸	۱۰/۱۶
میانگین سرعت	۴۲/۰۳	۲۱/۵۶	۱۲/۷
درصد کاهش سرعت نسبت به حالت عادی	۰	۴۹٪	۷۰٪

با توجه به جدول ۴-۱ می توان درصد کاهش سرعت در هنگام انتقال از یک سناریو به سناریوی دیگر را محاسبه کرد. مقدار کاهش سرعت برای تبدیل از حالت عادی جریان به حالت انسداد یک خط برابر ۴۹ درصد می باشد. همچنین مقدار تغییرات سرعت در حالت عادی جریان در مقایسه با زمانی که انسداد دو خط صورت پذیرفته است، کاهش ۷۰ درصدی را نشان می دهد.

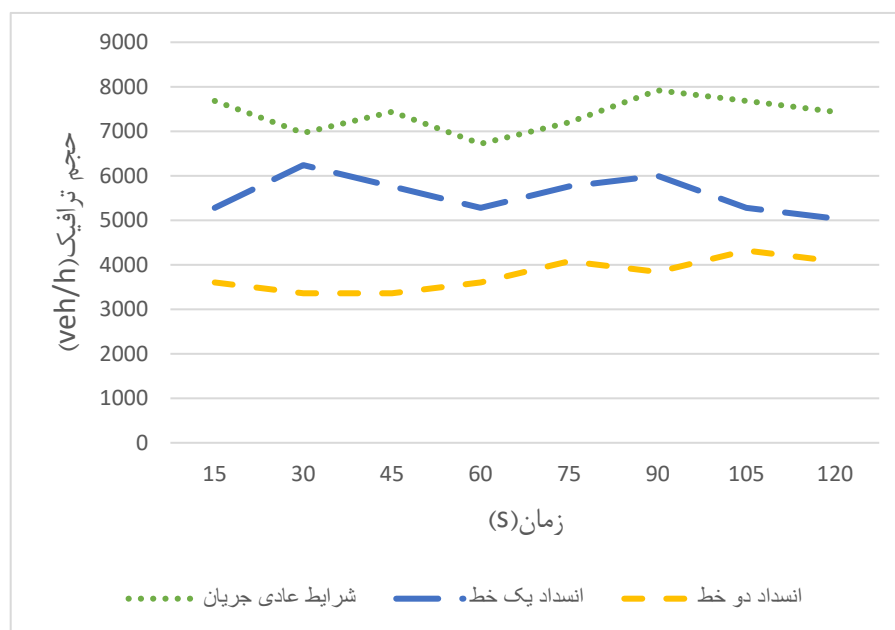


شکل ۴-۵ نمودار تغییرات سرعت در زمان های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه

همچنین بررسی‌های انجام شده به ازای هر خط نشان می‌دهد که این مقادیر برای خط یک (تندرو)، به عنوان خطی که انسداد در آن رخ داده است، مقادیر کاهش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. سرعت اندازی گیری شده برای خط یک در پایان حالت طبیعی جریان مقدار  $43/1$  کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهد. این در حالی است که مقدار سرعت اندازه‌گیری شده در اولین بازه‌ی زمانی پس از انسداد، برابر  $17/9$  کیلومتر بر ساعت بوده است که این مقدار کمترین سرعت برآورد شده در حالت انسداد خط اول است. میزان تغییرات سرعت در این حالت برای خط یک برابر  $58$  درصد می‌باشد. همچنین مقدار سرعت در اولین خط برای حالت انسداد دو خط برابر  $5/48$  کیلومتر بر ساعت می‌باشد، که این میزان کمترین مقدار ثبت شده در این مطالعه می‌باشد. لازم به ذکر است که پس از وقوع تصادف و بسته شدن خط دوم و همچنین بسته بودن خط اول، رانندگان متوجه بسته بودن خط تندرو شده و شروع به تغییر خط و ورود به خط دو کرده‌اند که این شرایط عملاً مسیر را تبدیل به یک مسیر سه خطه کرده است

#### ۴-۲-۴ بررسی جریان تحت اثر سناریوهای انسداد یک خط و انسداد دو خط

با توجه به تحلیل داده‌های مربوط به حجم ترافیک و بدست آوردن جریان ترافیک در بازه‌های زمانی تعیین شده، در شکل ۴-۶ می‌توان تغییرات حجم ترافیک را برای سه حالت جریان عادی، حالت انسداد یک خط و انسداد دو خط مشاهده کرد. قبل از بوجود آمدن انسداد برای خط تندرو و در حالت طبیعی جریان ترافیک، همان‌طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، جریان ترافیک تقریباً نزدیک به ۸۰۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت نیز رسیده است. در ادامه و با بسته شدن یک خط پس از انسداد، مقدار جریان ترافیک به طور تقریبی به ۵۲۸۰ وسیله نقلیه بر ساعت می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی تاثیر کاهش یافتن یک خط از چهار خط موجود بر ظرفیت راه می‌باشد. در ادامه و پس از بوجود آمدن انسداد دوم در اثر تصادف و کاهش یافتن خطوط موجود، در واقع مسیر ۴ خطه تبدیل به مسیر ۲ خطه می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت در این حالت، کاهش حجم ترافیک شدت بیشتری پیدا کرد به طوری که در شروع بازه زمانی برای انسداد دو خط مقدار حجم ترافیک تا مقدار ۳۶۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت کاهش پیدا کرد.

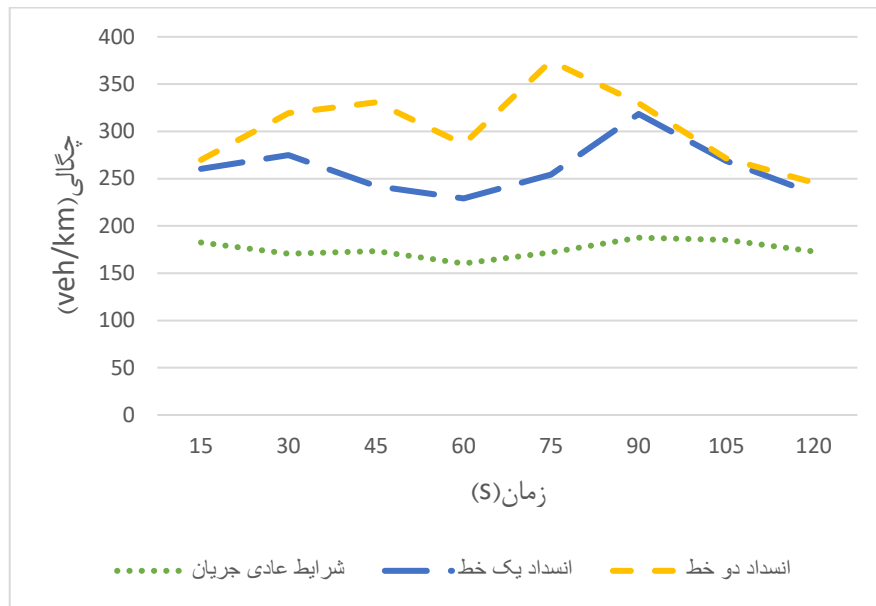


شکل ۴-۶ نمودار تغییرات حجم ترافیک در زمان‌های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه

## ۴-۲-۵ بررسی چگالی تحت اثر سناریوهای مورد نظر

بر خلاف پارامترهایی مثل تعداد خودروی عبوری، سرعت و جریان که در حالت عادی جریان مقدار آن‌ها از سناریوهای مورد مطالعه بیشتر است، در رابطه با چگالی عکس این قضیه صدق می‌کند. به این معنی که در حالت عادی جریان چگالی مسیر مورد مطالعه همان‌طور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود کمتر از دو حالت دیگر می‌باشد. با توجه به شکل زیر، پس از عبور از حالت طبیعی جریان و ایجاد شدن انسداد اول، چگالی که در حالت قبل در محدوده‌ی بیشتر از ۱۵۰ و کمتر از ۲۰۰ خودرو بر کیلومتر قرار داشت با توجه به ناگهانی بودن انسداد به بیش از ۲۵۰ افزایش پیدا کرد. همان‌طور که در روند تغییرات چگالی در حالت انسداد یک خط در شکل ۴-۷ می‌توان مشاهده کرد، در ابتدا، چگالی افزایش می‌یابد که دلیل آن تاثیر ناگهانی بسته شدن و کاهش یافتن یک خط می‌باشد، اما در ادامه با استفاده و تغییر خط رانندگان به استفاده از سایر خطوط موجود برای عبور خودروها، مقداری کاهش در چگالی اتفاق می‌افتد که این حالت نیز پایدار نبوده و در ادامه روند ناپایدار و نوسانی تغییرات چگالی مشخص است. اما همان‌طور که مشخص است چگالی در تمام بازه‌های مورد بررسی افزایش زیادی نسبت به حالت عادی جریان داشته است. بعد از بسته شدن خط اول و در زمان شروع انسداد خط دوم، چگالی نسبت به حالت قبل دچار افزایش شده و روند صعودی چگالی از ابتدای بسته شدن خط دوم قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است ناپایداری و تغییرات چگالی در این حالت شدت بیشتری نسبت به حالت‌های قبل از خود نشان می‌دهد.





شکل ۴-۷ نمودار تغییرات چگالی در زمان های مختلف تحت سناریوهای مورد مطالعه

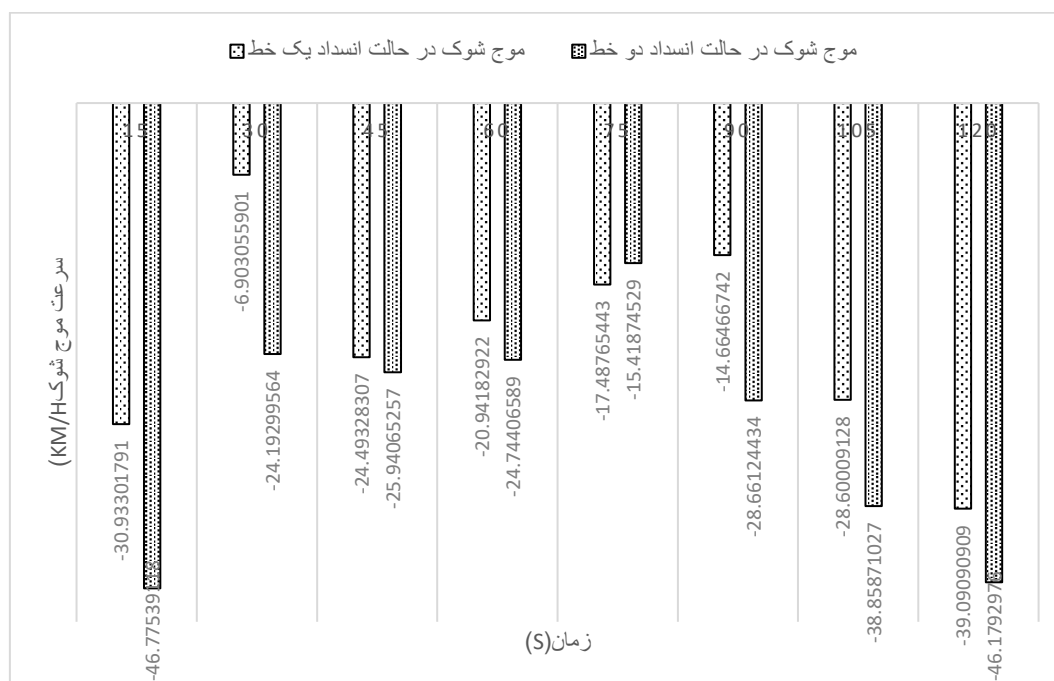
## ۴-۲-۶ محاسبه سرعت موج شوکها در سناریوهای مورد مطالعه با استفاده

### از رابطه LWR

پس از بدست آوردن پارامترهایی که در بدست آوردن موج شوک توسط رابطه LWR تاثیر گذارند، مانند جریان و چگالی، می توان میزان موج شوک در هر بازه زمانی را با استفاده از رابطه ۲-۹ محاسبه کرد. موج شوکهای محاسبه شده در هر سناریو و تمام بازه های زمانی مورد مطالعه در شکل ۴-۸ آورده شده است.

به منظور مقایسه سرعت موج شوکها در سناریوهای موجود، نوع موج شوک Backward که در خلاف جهت جریان ترافیک است در نظر گرفته شده است. از شکل ۴-۸ نتیجه می شود که سرعت امواج شوک ایجاد شده برای انسداد یک خط مطابق انتظار، کم تر از سرعت امواج شوک ایجاد شده در انسداد دو خط است. علاوه بر این، زمانی که سناریوی انسداد دو خط با بستن دو خط اتفاق افتاد، موج شوکهای بزرگتری در مقایسه با

سناریوی انسداد یک خط به وقوع پیوست که منجر به توقف تعداد بیشتری خودرو در بازه‌های مورد مطالعه شده است. نوسانات سرعت موج شوک و انتقال آن به عقب نشان دهنده‌ی ناپایدار بودن جریان ترافیک در هر دو حالت انسداد می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴-۸ نیز مشاهده می‌شود، پس از وقوع انسداد اول سرعت موج شوک حدوداً به ۳۱ کیلومتر بر ساعت می‌رسد که البته با گذشت زمان از این مقدار کاسته شده است. برای شروع حالت انسداد دوم نیز مقدار سرعت موج شوک حدوداً برابر ۴۶ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که این مقدار بیش‌ترین موج شوک محاسبه شده در این مطالعه را به خود اختصاص داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار موج شوک در هر زمان و مکان متغییر است و مقدار آن در هر بازه و در هر سناریو متفاوت می‌باشد.



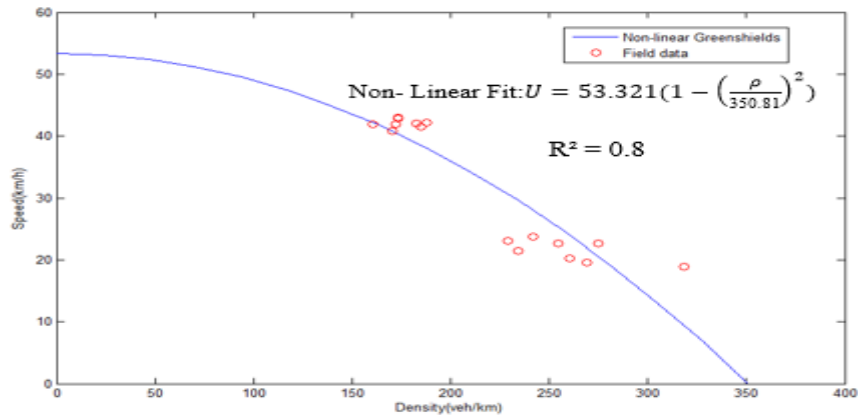
شکل ۴-۸ مقایسه سرعت موج شوک های برآورد شده با استفاده از LWR

## ۳-۴ برآزش سرعت-چگالی-جریان به کمک مدل غیر خطی

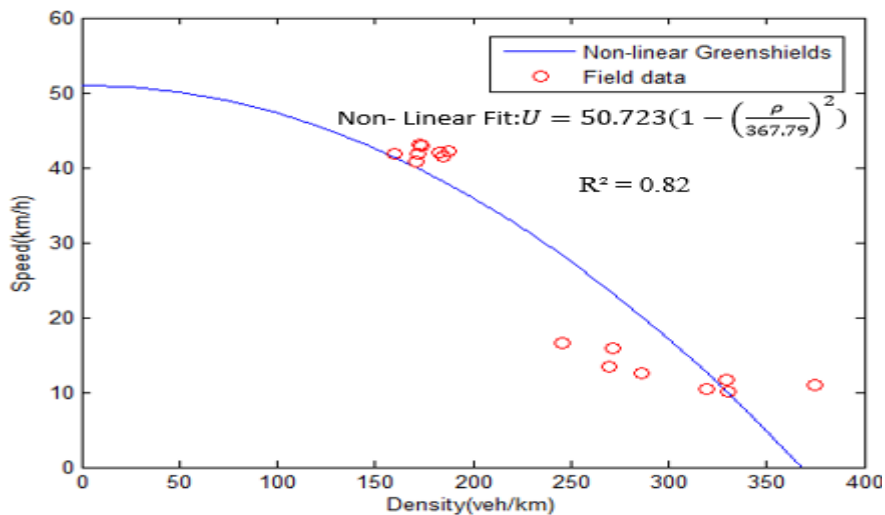
### گرین شیلدز

#### ۱-۳-۴ برآزش رابطه سرعت-چگالی

طبق داده‌های سرعت و چگالی جمع آوری شده در سناریوهای انسداد یک و دو خط، معادله غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز برای هر سناریو در نظر گرفته شده که در شکل‌های ۹-۴(الف) و ۹-۴(ب) آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها، رابطه غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز عملکرد نسبتاً قابل قبولی در مقایسه با داده واقعی ناشی از ضرایب رگرسیونی مهم برای دو سناریوی انسداد از خود نشان داد. به طوری که مقدار ضریب همبستگی برای حالت انسداد یک خط برابر  $0/8$  و مقدار این ضریب برای انسداد دو خط برابر  $0/82$  می‌باشد. از دیگر پارامترهای برآورد شده با استفاده از معادله گرین شیلدز، چگالی راهبندان و سرعت جریان در حالت طبیعی جریان می‌باشد که مقادیر پارامترهای مذکور و در نهایت رابطه غیر خطی سرعت گرین شیلدز برای سناریوهای موجود با توجه به پارامترهای برآورد شده در شکل‌های ۹-۴(الف) و ۹-۴(ب) قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۹ گراف سرعت-چگالی (الف) انسداد یک خط (ب) انسداد دو خط

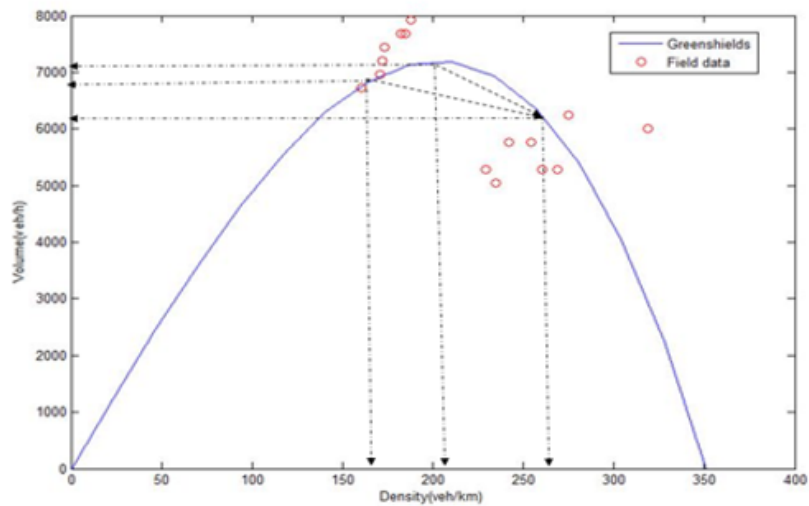
#### ۴-۳-۲ برازش رابطه حجم-چگالی

بررسی ظرفیت مسیر مورد مطالعه با توجه به سناریوهای مورد نظر با استفاده از نمودار جریان-چگالی گرین شیلدز برآورد شده است. برای ارزیابی اثرات دو انسداد خط بر روی ظرفیت بر آزادراه، شکل‌های ۱۰(الف) و ۱۰(ب)، با در نظر گرفتن داده‌های میدانی و مدل گرین شیلدز نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های

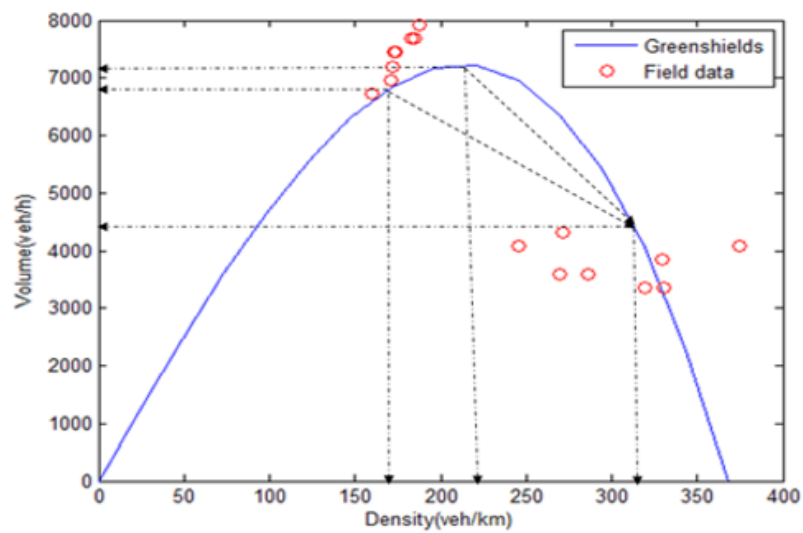
مذکور، این گونه نتیجه می‌شود که با اعمال انسداد یک خط در این مسیر، ظرفیت به میزان ۲۱ درصد کاهش

می‌یابد؛ این مقدار برای اعمال انسداد دو خط برابر ۴۵ درصد می‌باشد.

(ب)



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۰ نمودارهای جریان چگالی و داده‌های میدانی (الف) در حالت انسداد یک خط

(ب) در حالت انسداد دو خط

## ۴-۴ سرعت موج شوک با استفاده از مدل پیشنهادی

به منظور تحلیل سرعت موج شوک‌ها از سناریوهای انسداد یک و دو خط بر مبنای رویکرد دینامیکی و توسعه مدل‌های ماکروسکوپی LWR، مدل لکس-فردریش به عنوان یک روش المان محدود به منظور شبیه‌سازی محاسباتی برای سناریوهای انسداد یک خط و انسداد دو خط با استفاده از موج شوک‌های نتیجه شده از روابط  $LWR^P$  و  $LWR^u$  استفاده شده است. نتایج بدست آمده در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ نشان داده شده است. بخش مورد مطالعه راه برابر ۱۰۰ متر و برای محاسبات عددی به ترتیب برای گام مکانی و زمانی به  $0/2$  و  $0/35$  تقسیم شد. پارامترهای مرتبط با مدل پژوهش حاضر به شرح زیر است:

$$\Delta t = \text{گام زمانی که در این پژوهش برابر } 0/35 \text{ می‌باشد}$$

$$\Delta x = \text{گام مکانی که در این پژوهش برابر } 0/2 \text{ می‌باشد}$$

برای انسداد یک خط:

$$u_m = -31 \text{ km/h}, T = 120 \text{ sec}, \rho_m = 318 \text{ veh/km}, u_f = 43 \text{ km/h}$$

برای انسداد دو خط:

$$u_m = -46 \text{ km/h}, T = 120 \text{ sec}, \rho_m = 374 \text{ veh/km}, u_f = 43 \text{ km/h}$$

که هر کدام از پارامترهای فوق عبارتند از:

$u_f$  نشان دهنده‌ی سرعت در حالت طبیعی

$\rho_m$  نشان دهنده‌ی بیش‌ترین مقدار چگالی برای هر سناریو

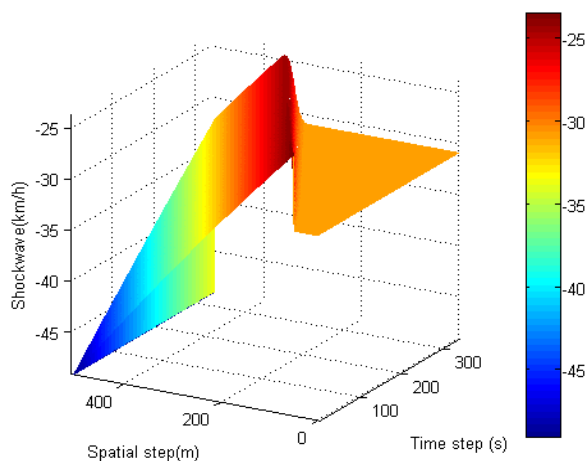
$T$  بازه مطالعاتی در برای هر سناریو

$u_m$  بیش‌ترین مقدار موج شوک برای هر سناریو

محاسبه سرعت موج شوک با استفاد از مدل لکس-فردریش به این صورت است که برای هر حالت باید شرایط اولیه تعریف شده برای هر سناریو بکار گرفته شود. به این معنی که برای انسداد یک خط، مقدار اولیه را با توجه به مقدار محاسبه شده برابر  $u_0 = 39 \text{ km/h}$  در نظر میگیریم. در ادامه به مدل این امکان را می دهیم که با توجه به روابط توسعه داده شده که در جدول بالا ارائه شده است، به شبیه سازی و پیش بینی سرعت موج شوک در بازه های زمانی و مکانی مختلف پردازد. به همین صورت برای انسداد دو خط نیز مقدار اولیه سرعت موج شوک را با توجه به مقدار محاسبه شده برای موج شوک در ابتدای انسداد دو خط بر طبق رابطه LWR برابر  $u_0 = 47 \text{ km/h}$  در نظر گرفته شده است.

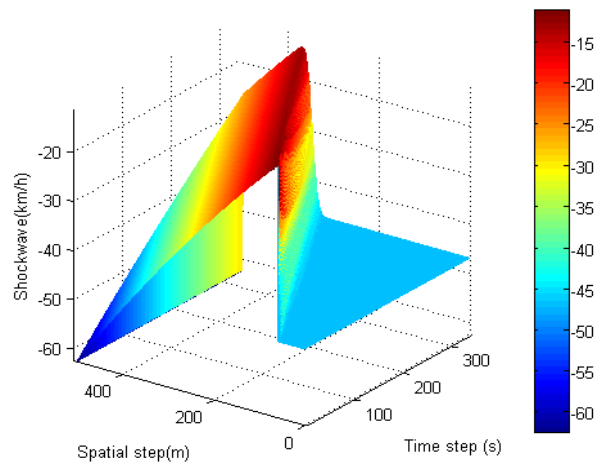
شکل های ۴-۱۱ و ۴-۱۲، پیش بینی مدل های توسعه یافته پیشنهادی را تحت هر دو شرایط اولیه تعریف شده در لکس-فردریش را نشان می دهند. از این شکل ها می توان نتیجه گرفت که مدل های پیشنهادی پژوهش عملکرد بهتری در پیش بینی موج شوک تحت هر دو شرایط اولیه لکس-فردریش ارائه می دهند. همان طور که ذکر شد، برای شرایط مختلف، موج شوک های ترافیک بصورت انتشار به عقب انتشار می یابند. بر طبق شکل های ۴-۱۱ (الف) و ۴-۱۱ (ب) که منعکس کننده رفتار زمانی-مکانی سرعت موج شوک ها با توجه به  $LWR^u$  می باشند؛ با وقوع سناریوهای انسداد موجود، سرعت انتشار در جهت خلاف جریان ترافیک ایجاد می شود و گسترش می یابد. همان طور که در شکل ۴-۱۱ (الف) برای حالت انسداد یک خط نشان داده شده است، می توان به ناپایدار بودن جریان پی برد. به طوری که در ابتدا برای انسداد یک خط پس از افزایش در مدت زمان کوتاهی و در ناحیه ۰ تا ۵۰ متر، با گذشت زمان، کاهش سرعت موج شوک مشاهده می شود. دلیل این امر می تواند این باشد که پس از مدتی از وقوع انسداد و کمتر شدن اثر آشفتگی آن در منطقه مورد بررسی، جریان می تواند با سرعت بیشتر و کیفیت بهتری ادامه پیدا کند. اما این ناپایداری از بین نرفته و ضمن استهلاک، به پایین دست جریان منتقل می شود که در نتیجه، با گذشت زمان و انتقال مداوم این ناپایداری به پایین دست مجددا شاهد افزایش موج شوک و بیشتر شدن سرعت موج شوک از مقدار اولیه آن خواهیم بود. در ادامه انتظار می رود این

روند تا از بین رفتن عامل انسداد ادامه پیدا کند. برای موج شوک ایجاد شده توسط  $LWR^u$  در حالت انسداد دو خط، همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ (ب) نشان داده می‌شود، پس از وقوع تصادف و مسدود شدن خط دوم، موج شوک بزرگ‌تری نسبت به حالت قبل مشاهده می‌شود که مدتی همین شرایط بر جریان غالب است. در ادامه و پس از اینکه رانندگان کمی خود را با شرایط موجود وفق داده و با سرعت بیشتری نسبت به ابتدای وقوع انسداد حرکت می‌کنند، کاهش سرعت موج مشاهده شده است. در ادامه با توجه به انتقال آشفتگی از طریق موج شوک به پایین دست و ادامه پیدا کردن این روند، دوباره جریان ترافیک با توجه به افزایش سرعت موج شوک، کاهش می‌یابد، که این حالت بیانگر افزایش تغییرات در جریان و چگالی بوده و نتیجه‌ی آن افزایش مجدد موج شوک همان‌طور که در شکل ۴-۱۱ (ب) می‌باشد. همان‌طور که از مقایسه دو شکل بالا مشخص است، شدت آشفتگی و انتقال آن به پایین دست جریان در حالت انسداد دو خط بیشتر از انسداد یک خط است. همچنین همگرا بودن روند نتایج بدست آمده از شکل ۴-۱۱ با شکل ۴-۸ نشان دهنده درست بودن روابط توسعه یافته است که این پژوهش با توجه به روابط خود به دنبال بهبود عملکرد رابطه  $LWR$  می‌باشد.



(الف)



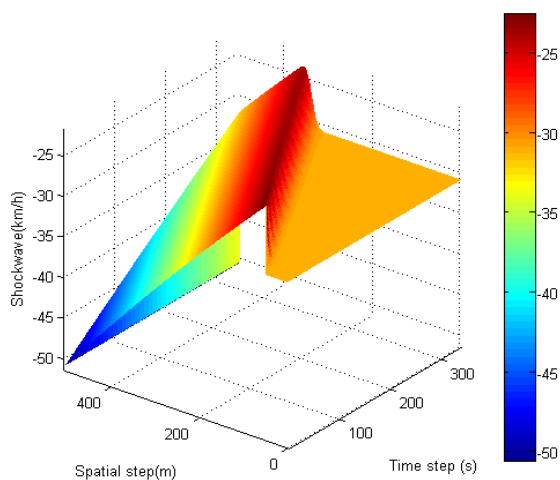


(ب)

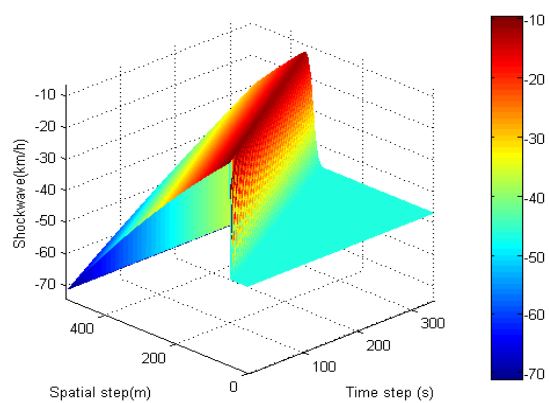
شکل ۴-۱۱ سیر تکاملی مکانی-زمانی سرعت موج شوک ها در دو سناریوی پیشنهادی با استفاده از  $LWR^u$  (الف) انسداد یک خط (ب) انسداد دو خط

همچنین شکل های ۴-۱۲ (الف) و ۴-۱۲ (ب) رفتار مکانی-زمانی سرعت موج شوک ها را بر مبنای مدل توسعه یافته  $LWR^p$  نشان می دهد. اولین چیزی که پس از مشاهده دو شکل مربوط به  $LWR^p$  و مقایسه آن با شکل های  $LWR^u$  می توان به آن اشاره کرد شباهت قابل توجه نمودارهای دو حالت فوق می باشد. زمانی که انسداد خط اول در جریان بالادست ایجاد شد، موج شوک بزرگی در دامنه ۰ تا ۵۰ متری در طول مسیر ایجاد می شود که ناگهان سرعت انتشار موج باعث بوجود آمدن روند منفی در پایین دست جریان شده که این اتفاق باعث کاهش در ظرفیت می شود و به طور ناگهانی باعث افت قابل توجه ظرفیت می شود. با گذشت زمان و در فواصل عقب تر از انسداد و به سمت پایین دست، موج شوک در حال کم شدن است. همان طور که ذکر شد این حالت به دلیل تزریق آشفتگی به جریان ترافیک دارای نوسانات قابل توجهی است. اما با ادامه یافتن انسداد و انتشار موج شوک به سمت عقب و افزایش صف، ناگهان پس زدن جریان و افزایش مجدد موج شوک همان طور که در شکل ۴-۱۲ (الف)، اتفاق می افتد به طوری که سرعت موج شوک از مقدار اولیه آن نیز بیشتر می شود. بنابراین، می توان به این نتیجه رسید که نمودارهای هر دو حالت سازگاری قابل توجهی با یکدیگر و همچنین

با نمودار موجود در شکل ۴-۸ دارند که این موضوع نشان‌دهنده تأیید درستی روابط می‌باشد. همچنین سرعت موج شوک ایجاد شده برای حالت انسداد دو خط با استفاده از  $LWR^u$  و  $LWR^p$  بزرگتر از سرعت موج شوک مشابه در انسداد یک خط می‌باشد. به این معنی که انسداد دو خط می‌تواند باعث صف طولانی تری در مقایسه با انسداد یک خط شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۲ سیر تکاملی مکانی-زمانی سرعت موج شوک ها در دو سناریوی پیشنهادی با استفاده از  $LWR^p$  (الف) انسداد یک خط (ب) انسداد دو خط

## ۴-۵ ارزیابی عملکرد روش های توسعه یافته

به منظور بررسی اثر بخشی روش پیشنهادی و مقایسه سایر روش ها بر روی سرعت موج شوک، دقت به عنوان اندازه گیری درستی مورد استفاده قرار گرفت. دقت بر حسب درصد و بصورت ۱۰۰- مقدار خطا بیان می شود. که،

$$\text{خطا}(\%) = \frac{|\text{مقدار مشاهده شده} - \text{مقدار شبیه سازی شده}|}{\text{مقدار مشاهده شده}} \times 100 \quad (۱-۴)$$

با توجه به نتایج بدست آمده در شبیه سازی سرعت موج شوک تحت جریان ترافیک سنگین و متراکم، جدول ۴-۲ ارائه شده است. این جدول اختلاف نتایج روش پیشنهادی را با مدل LWR نشان می دهد. با توجه به این جدول، سرعت موج شوک شبیه سازی شده با استفاده از روش موجود در حالت انسداد دو خط اختلاف کمتری را در دو حالت با  $LWR^u$  و  $LWR^p$  نشان می دهد. به منظور مقایسه بالا بودن دقت مدل در پیش بینی سرعت موج شوک ایجاد شده در سناریوی انسداد یک خط، هر دو مدل عملکرد یکسانی را از خود نشان داده. بنابراین، در حالت انسداد یک خط برای تخمین سرعت موج شوک برای سناریوی انسداد یک خط می توان به طور دلخواه از هر کدام از دو مدل پیشنهادی استفاده کرد. برای بررسی مدل مناسب برای سرعت موج شوک ایجاد شده در سناریوی انسداد دو خط، هر دو مدل اختلاف قابل قبولی در مقایسه با مدل LWR از خود نشان داده اند و در این بین، مدل توسعه یافته  $LWR^u$  اختلاف کمتری در مقایسه با مدل  $LWR^p$  از خود نشان می دهد که به عنوان بهترین مدل برای تخمین سرعت موج شوک برای حالت انسداد دو خط توصیه می شود.

جدول ۴-۲: مقایسه نتایج روش پیشنهادی با مدل LWR

سرعت موج شوک		نوع انسداد
$LWR^p$	$LWR^u$	
۳۹/۱۱٪	۳۹٪	انسداد یک خط
۱۷/۲۲٪	۱۴٪	انسداد دو خط

بنابراین، روش پیشنهادی به عنوان سیستم برآورد کننده سرعت موج شوک با دقت قابل قبول در مقایسه با مدل کلاسیک لایت هیل، ویت هام و ریچاردز (LWR) معرفی می‌شود. مدل‌های توسعه یافته قادر به برآورد سرعت موج شوک در سناریوهای ترافیکی ایجاد شده با دقت قابل قبول می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که انسداد دو خط رخ داده است با توجه به اینکه شرایط راهبندان حاکم است، مدل LWR با مدل‌های  $LWR^u$  و  $LWR^p$  توسعه یافته پیشنهادی درصد کمی اختلاف دارند. این در حالی است که اختلاف مدل‌های پیشنهادی با مدل LWR در حالت انسداد یک خط است که جریان متراکم است درصد اختلاف قابل توجهی نسبت به مدل LWR دارد. دلیل اختلاف زیاد در این حالت به این دلیل است که روابط توسعه یافته بر مبنای چگالی راهبندان توسعه داده شده‌اند و از آنجایی که در حالت انسداد یک خط چگالی بیشینه با چگالی راهبندان برابر نیست، در محاسبه‌ی موج شوک بر مبنای مدل توسعه یافته، به جای چگالی راهبندان، چگالی بیشینه موجود قرار داده شده است که دارای اختلاف ۳۹ درصدی با مقادیر محاسبه شده در مدل LWR می‌باشد. در نتیجه، می‌توان به این نتیجه رسید که مدل‌های توسعه یافته پیشنهادی در شرایط ترافیکی راهبندان با توجه به پارامترهای مورد استفاده در این مدل‌ها عملکرد و دقت بهتری نسبت به مدل LWR با توجه به داده‌های میدانی، دارد.

# فصل پنجم

## بحث و نتیجه گیری

## ۵-۱ مقدمه

در این پژوهش به بررسی اثرات ناشی از انسداد در یک خط بر اثر وجود مناطق کاری و پس از آن انسداد در دو خط بر اثر وجود مناطق کاری و تصادف، بر جریان ترافیک و محاسبه موج شوک انتشار یافته به عقب در حالت‌های ذکر شده با استفاده از رابطه کلاسیک LWR می‌پردازد. پارامترهای اساسی برای محاسبه موج شوک طبق روش LWR، سرعت، جریان و چگالی می‌باشد. پس از بدست آوردن این پارامترها از روابط مربوط خود، به محاسبه شدت و اثر موج شوک‌ها در سناریوهای مورد نظر و مقایسه آن‌ها با هم پرداخته شد.

مهم‌ترین هدف این پژوهش دستیابی به رابطه دینامیکی در زمینه محاسبه موج شوک‌ها و تخمین سرعت موج شوک‌های متوالی ناشی از انسداد می‌باشد.

اهداف این پژوهش شامل: ابتدا بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای بررسی ویژگی‌های جریان ترافیک در هنگام وقوع تصادف و انسداد می‌باشد. در ادامه پس از بدست آوردن موج شوک طبق مدل لایت هیل، ویت هام و ریچاردز به توسعه مدل پیشنهادی پرداخته شد. به این صورت که با ترکیب کردن مدل سرعت-چگالی غیرخطی گرین‌شیلدز با روش LWR دو رابطه یکی بر حسب چگالی ( $LWR^p$ ) و دیگری بر حسب سرعت ( $LWR^u$ ) توسعه داده شد. در گام بعد با استفاده از مدل لکس-فردریش و با استفاده از نرم افزار متلب به شبیه سازی و بررسی مدل‌های پیشنهادی پرداخته شد و به پیش بینی سرعت موج شوک‌ها در طول مسیر و در زمان‌های مختلف پرداخته شد. در نهایت نتایج بدست آمده از مدل‌های پیشنهادی و مدل LWR با یکدیگر مقایسه شد و اختلاف آن‌ها در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۵-۲ نتایج تحقیق

هدف از این پژوهش، مطالعه یک مسیر چهار خطه براساس سناریوهای انسداد خط اول بر اثر مناطق کاری و انسداد خط دوم بر اثر تصادف با استفاده از شبیه‌سازی ماکروسکوپی با در نظر گرفتن مدل سرعت-چگالی غیر خطی گرین شیلدز و مدل LWR به منظور بررسی اثر حضور موج شوک‌ها بر سرعت وسیله نقلیه است. همزمان با وقوع اولین انسداد خط، با استفاده از مدل گرین‌شیلدز غیر خطی ظرفیت آزادراه ۴ خطه با کاهش ۲۱ درصدی مواجه شده است، این در حالی است که وقوع انسداد خط دوم باعث کاهش ۴۵ درصدی در ظرفیت آزادراه ۴ خطه شده است. به علاوه، دو سناریوی ترافیک در این حوزه برای پیاده سازی رویکرد شبیه سازی عددی انتخاب شده است. بر اساس پیاده سازی و اجرای مدل‌های دینامیکی نتایجی که از این پژوهش بدست آمده است به شرح زیر است:

- بررسی میزان تاثیر انسداد های یک خط و دو خط بر ظرفیت مسیر با استفاده از مدل غیر خطی گرین‌شیلدز بر اساس داده‌های میدانی.
- برآورد سرعت موج شوک‌های ناشی از سناریوهای مورد مطالعه با استفاده از رابطه LWR و ارزیابی اثرات آن‌ها بر ویژگی‌های ترافیک.
- توسعه رابطه موج شوک با استفاده از ترکیب آن با رابطه غیر خطی گرین شیلدز و بدست آوردن رابطه موج شوک بر حسب سرعت و چگالی ( $LWR^u$  و  $LWR^p$ ).
- محاسبه سرعت موج انسدادهای مورد مطالعه و ارزیابی اثرات آن با استفاده از مدل‌های پیشنهادی و مقایسه نتایج آن با مدل کلاسیک LWR.
- با توجه به مدل‌های  $LWR^p$  و  $LWR^u$  می‌توان نتیجه گرفت که سرعت موج شوک‌های ناشی از  $LWR^u$  و  $LWR^p$  بر اساس رابطه غیر خطی سرعت-چگالی گرین شیلدز در حالت انسداد دو خط از یکدیگر

متمایز می‌باشند و همچنین اختلاف کمتری را نسبت به مدل LWR از خود نشان می‌دهند (۱۴ و ۱۷ درصد). در حالی که در انسداد یک خط اختلاف نتایج مدل‌های توسعه یافته پیشنهادی با مدل LWR بدلیل تاثیر پارامتر چگالی راهبندان در مدل‌های توسعه یافته و کمتر بودن این پارامتر در حالت انسداد یک خط از چگالی راهبندان، بیشتر است (۳۹ درصد). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های توسعه یافته در شرایط ترافیکی راهبندان عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

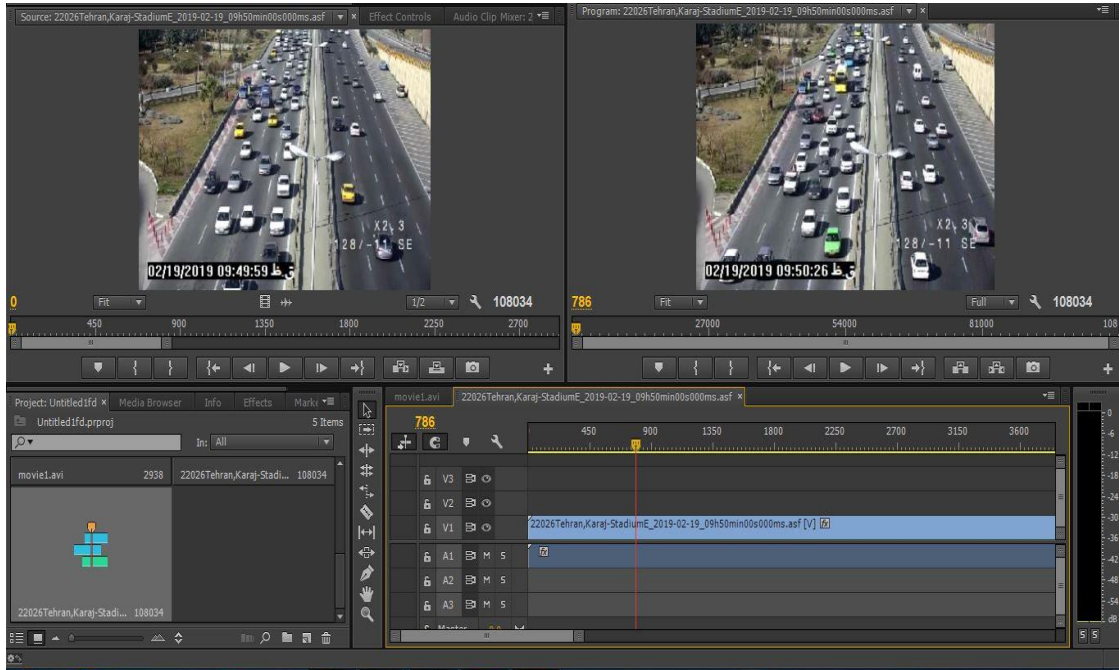
- به منظور حل عددی مدل‌های توسعه یافته سرعت موج شوک، مدل لکس-فردریش بکار گرفته شد. با مقایسه سرعت موج شوک‌ها در اولین و دومین انسداد مسیر، می‌توان نشان داد که سرعت امواج شوک ناشی از سناریوی انسداد خط دوم، سریع‌تر از سرعت موج شوک ناشی از انسداد خط اول است که به این معنی است که خودروهای بیشتری در انسداد خط دوم باقی می‌ماند. همان‌طور که مشخص است، شدت آشفتگی و انتقال آن به پایین دست جریان در حالت انسداد دو خط بیشتر از انسداد یک خط است. در نهایت با استفاده از مدل لکس-فردریش مشخص شد که نمودارها و نتایج مربوط به مدل‌های  $LWR^u$  و  $LWR^p$  سازگاری قابل توجهی با یکدیگر و همچنین با نمودار و نتایج مربوط به مدل کلاسیک LWR دارند که این موضوع نشان‌دهنده‌ی تائید درستی روابط پیشنهادی این پژوهش می‌باشد.

کاربرد این مطالعه برای مهندسان ترافیک جهت بررسی تاثیر تصادفات بر روی مشخصه‌های ترافیکی تحت شرایط متراکم و راهبندان می‌باشد. علاوه بر این، روش پیشنهادی در این پژوهش به محققان در ارزیابی عملکرد آزادراهها تحت تاثیر انسدادهای کوتاه مدت در ظرفیت، سرعت و چگالی، کمک می‌کند. و آنها می‌توانند بر اساس این مدل‌ها، راه‌حل خود را برای حل شرایط ترافیکی متراکم و راهبندان تحت انسدادهای کوتاه‌مدت، و کاستن مشکلات در آینده پیشنهاد دهند.



پوست

## پیوست الف: تصاویری از محیط نرم افزار Adobe premier



شکل ۰- ۱ تصاویری از محیط نرم افزار adobe premier

# منابع و مراجع

- [1] Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2009). *Traffic and highway engineering*. Cengage Learning.
- [2] Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178), 317-345.
- [3] Richards, P. I. (1956). Shock waves on the highway. *Operations research*, 4(1), 42-51.
- [4] Zheng, Z., Ahn, S., Chen, D., & Laval, J. (2011). Applications of wavelet transform for analysis of freeway traffic: bottlenecks, transient traffic, and traffic oscillations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(2), 372-384.
- [5] Bilbao-Ubillos, J. (2008). The costs of urban congestion: estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link roads. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(8), 1098-1108.
- [6] “Ahn, S., & Cassidy, M. J. (2007). Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers. In *Transportation and Traffic Theory 2007. Papers Selected for Presentation at ISTTT17 Engineering and Physical Sciences Research Council (Great Britain) Rees Jeffreys Road Fund Transport Research Foundation TMS Consultancy Over Arup and Partners, Hong Kong Transportation Planning (International) PTV AG*.
- [7] Laval, J. A., & Daganzo, C. F. (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(3), 251-264.
- [8] Koshi, M., Kuwahara, M., & Akahane, H. (1992). Capacity of sags and tunnels on Japanese motorways. *ite Journal*, 62(5), 17-22.
- [9] Laval, J. A. (2006). Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. *Transportation Research Record*, 1988(1), 86-91.
- [10] Wang, J., Xie, W., Liu, B., & Ragland, D. R. (2016). Identification of freeway secondary accidents with traffic shock wave detected by loop detectors. *Safety science*, 87, 195-201.
- [11] Cai, J., Shehata, M., & Badawy, W. (2009). A robust video-based algorithm for detecting snow movement in traffic scenes. *Journal of Signal Processing Systems*, 56(2-3), 307-326.
- [12] Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2004). *Traffic engineering*. Pearson/Prentice Hall.
- [13] Coifman, B., & Kim, S. (2011). Extended bottlenecks, the fundamental relationship, and capacity drop on freeways. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 17, 44-57.
- [14] Banks, J. H. (1990). Flow processes at a freeway bottleneck. *Transportation Research Record*, (1287).
- [15] Knoop, V., Hoogendoorn, S., & Adams, K. (2009). Capacity reductions at incidents sites on motorways. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 9(4).
- [16] Roess, R. P. (1987). Development of analysis procedures for signalized intersections in the 1985 highway capacity manual. *Transportation research record*, 1112, 10-16.
- [17] Greenshields, B. D. (1960). The density factor in traffic flow. *Traffic Engineering, Inst Traffic Engr*, 44(1).
- [18] Chaudhary, N. A., Kovvali, V. G., & Alam, S. M. (2002). *Guidelines for selecting signal timing software* (No. FHWA/TX-03/0-4020-P2,). Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.
- [19] Rorbeck, J. (1968). Determining the length of the approach lanes required at signal-controlled intersections on through highways. *Transportation Research/UK*, 2(3).
- [20] Kang, Y. S. (2000). *Delay, stop and queue estimation for uniform and random traffic*

- arrivals at fixed-time signalized intersections* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [21] Liu, H. X., Wu, X., Ma, W., & Hu, H. (2009). Real-time queue length estimation for congested signalized intersections. *Transportation research part C: emerging technologies*, 17(4), 412-427.
- [22] Cetin, M. (2012). Estimating queue dynamics at signalized intersections from probe vehicle data: Methodology based on kinematic wave model. *Transportation Research Record*, 2315(1), 164-172.
- [23] Jin, W. L., Gan, Q. J., & Gayah, V. V. (2013). A kinematic wave approach to traffic statics and dynamics in a double-ring network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 114-131.
- [24] Wu, X., & Liu, H. X. (2011). A shockwave profile model for traffic flow on congested urban arterials. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1768-1786.
- [25] Drew, D. R. (1968). *Traffic flow theory and control* (No. 467 pp).
- [26] Leutzbach, W., & Kohler, U. (1974, August). DEFINITIONS AND RELATIONSHIPS FOR THREE DIFFERENT TIME INTERVALS FOR DELAYED INTERVALS. In *Transportation and Traffic Theory, Proceedings* (Vol. 6).
- [27] Wirasinghe, S. C. (1978). Determination of traffic delays from shock-wave analysis. *Transportation Research*, 12(5), 343-348.
- [28] Lu, X. Y., & Skabardonis, A. (2007, January). Freeway traffic shockwave analysis: exploring the NGSIM trajectory data. In *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*.
- [29] Lee, C., & Volpatti, S. (2010). Effects of shock waves on freeway crash likelihood. *Open Transportation Journal*, 4, 61-70.
- [30] Anuar, K., & Cetin, M. (2017). Estimating Freeway Traffic Volume Using Shockwaves and Probe Vehicle Trajectory Data. *Transportation research procedia*, 22, 183-192.
- [31] Rompis, S. Y. (2018). Traffic Flow Model and Shockwave Analysis. *JURNAL SIPIL STATIK*, 6(1).
- [32] Junhua, W., Boya, L., Lanfang, Z., & Ragland, D. R. (2016). Modeling secondary accidents identified by traffic shock waves. *Accident Analysis & Prevention*, 87, 141-147.
- [33] Wang, J., Liu, B., Fu, T., Liu, S., & Stipanovic, J. (2019). Modeling when and where a secondary accident occurs. *Accident Analysis & Prevention*, 130, 160-166.
- [34] ŞAHİN, İ., KUSAKCI, S., & Aydin, G. (2016). Shockwaves in Highway Traffic: Macroscopic and Microscopic Analysis with Wavelet Transform.
- [35] AHMED, A., HASAN, M. T., ALA, M. R., & HOQUE, M. S. (2017). CHARACTERISTICS OF FUNDAMENTAL DIAGRAMS DUE TO SHOCKWAVE BY NON-LANE BASED HETEROGENEOUS TRAFFIC.
- [36] Mongeot, H., & Lesort, J. B. (2000). Analytical expressions of incident-induced flow dynamics perturbations: using macroscopic theory and extension of Lighthill-Whitham theory. *Transportation research record*, 1710(1), 58-68.
- [37] Al-Deek, H., Garib, A., & Radwan, A. E. (1995). New method for estimating freeway incident congestion. *Transportation Research Record*, 30-39.
- [38] Hadi, M., Sinha, P., & Wang, A. (2007). Modeling reductions in freeway capacity due to incidents in microscopic simulation models. *Transportation Research Record*, 1999(1), 62-68.
- [39] Lattanzio, C., Maurizi, A., & Piccoli, B. (2011). Moving bottlenecks in car traffic flow:

- a PDE-ODE coupled model. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 43(1), 50-67.
- [40] Tie-Qiao, T., Peng, L., Yong-Hong, W., & Hai-Jun, H. (2012). A macro model for traffic flow with consideration of static bottleneck. *Communications in Theoretical Physics*, 58(2), 300.
- [41] Tang, T. Q., Li, P., & Yang, X. B. (2013). An extended macro model for traffic flow with consideration of multi static bottlenecks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 392(17), 3537-3545.
- [42] Qin, L., & Smith, B. L. (2001). Characterization of accident capacity reduction.
- [43] "Google Maps." [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/@35.7179618,51.2822053,1592m/data=!3m1!1e3>.
- [44] Wegener, R., & Klar, A. (1996). A kinetic model for vehicular traffic derived from a stochastic microscopic model. *Transport Theory and Statistical Physics*, 25(7), 785-798.
- [45] Andallah, L. S., Ali, S., Gani, M. O., Pandit, M. K., & Akhter, J. (2009). A Finite Difference Scheme for a Traffic Flow Model Based on a Linear Velocity-Density Function. *Jahangirnagar University Journal of Science*, 32(1), 61-71.
- [46] LeVeque, R. J., & LeVeque, R. J. (1992). *Numerical methods for conservation laws* (Vol. 132). Basel: Birkhäuser.
- [47] CHU, C. (1978). Numerical methods in fluid dynamics, in "Advances in Applied Mechanics"(CS. Yih, Ed.), Vol. 18.
- [48] Roos, H. G. (1997). Thomas, JW: Numerical Partial Differential Equations. Finite Difference Methods. New York etc., Springer-Verlag 1995. XX, 437 pp., DM 78,-. ISBN 0-387-97999-9 (Texts in Applied Mathematics 22). *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 77(5), 386-386.
- [49] Gaddam, H. K., Chinthireddy, A., & Rao, K. R. (2016). Comparison of Numerical Schemes for LWR Model under Heterogeneous Traffic Conditions. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 44(3), 132-140.

[50] حیدری فر، شبیم و ناصر طالب بیدختی، ۱۳۹۸، حل عددی معادله آب کم عمق به روش حجم

محدود WENO با استفاده از الگوی تخمین شار عددی لکس فردریش، یازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران،

شیراز، دانشگاه شیراز

## **Abstract:**

Short-term incidents occur in short periods of times which they lead negative impact on macroscopic traffic characteristics of highways including capacity, speed, and density. first this study is aimed to examine the effect of the first lane and second lane closure on generating shock waves and macroscopic traffic characteristics in a four-lane highway based on field data. Second, it is extended LWR models based on speed and density which were known as  $LWR^u$  and  $LWR^\rho$ , respectively. Then, the extended models are solved by Lax-Friedrichs scheme for two incident scenarios The results indicated that there was a reduction of 13% and 40% in the capacity of four-lane closure scenarios, respectively. However, the second lane closure scenario caused 40% decrease in capacity of four-lane highway. Shockwaves estimated by extended models indicated that the second lane closure had more significant effect on macroscopic traffic characteristics in comparison with the first lane closure. In order to compare the extended LWR models, sensitivity analysis approved that two models had the same performance on predicting the effect of shockwaves on macroscopic traffic characteristics for the first lane closure scenario. Meanwhile, the  $LWR^\rho$  model had better performance than the  $LWR^u$  model for the second lane closure scenario. Therefore, experimental results on real datasets showed that the proposed models were the suitable systems for analyzing shockwave under congested traffic conditions which they presented higher accuracy compared with state-of-the-art methods

**Key Words:** Short-term incidents, Incident scenarios, Macroscopic traffic characteristics, Shock wave, Extended LWR models, Lax-Friedrichs scheme,



Shahrood University of Technology

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering**

**Estimating Dynamic shockwaves based on lane changes in lane closures**

By: Danial Rezaei

Supervisor:

Dr. Iman Aghayan

January 2020