

بررسی جریان ترافیکی ناحیه تداخلی با استفاده از شبیه‌سازی

کامران رحیم‌اف^۱، علی اکبری مطلق^{۲*}

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، واحد تهران شمال

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، واحد تهران شمال

*aliam394@gmail.com

ارسال: مرداد ۹۷ پذیرش: مهر ۹۷

چکیده

ناحیه تداخلی از برخورد دو یا چند جریان ترافیکی که در حال عبور از بزرگراه هستند به وجود می‌آید. با توجه به ایجاد تأخیرات، وجود برخورد در این ناحیه از مشکلات آن می‌باشد. جهت برطرف ساختن این مشکلات نیاز است تا با ابزارهای مدل‌سازی ترافیکی بهینه‌ترین طرح را جهت کاهش تأخیرات و برخوردها ارائه نمود. در این مطالعه هدف تحلیل و مقایسه روش HCM و FRESIM جهت مدل‌سازی ناحیه تداخلی بوسیله نرم‌افزار شبیه‌سازی FRESIM می‌باشد. ابتدا آیین‌نامه‌های HCM و DUTCH مورد بررسی قرار گرفت و براساس مقایسه‌های صورت گرفته، آیین‌نامه HCM برای سناریوهای مختلف انتخاب شد و سناریوهای مختلف ناحیه تداخلی برای آن اجرا گردید. از سوی دیگر با شناخت پارامترهای پرداخت نرم‌افزار FRESIM، ناحیه تداخلی با استفاده از این نرم‌افزار مدل‌سازی و کالیبره گردید. آنگاه، با مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از HCM نتیجه‌گیری شد که این نرم‌افزار قابلیت محاسبه تأخیرات در بالادست و پایین دست ناحیه تداخلی را که از ضعف‌های HCM می‌باشد، داراست. از سوی دیگر این نرم‌افزار با استفاده از مدل‌های دنباله‌روی وسایل نقلیه و تغییر باند وسایل نقلیه علاوه بر مدل‌سازی طرح هندسی، توان مدل کردن رفتار رانندگان نواحی مختلف را داراست. در ادامه پیشنهاد می‌شود که برای سناریوهای مختلف و با استفاده از نرم‌افزارهای متنوع این فرآیند ادامه یابد تا بتوان به مدل جامعی جهت حصول مشخصات جریان ترافیکی در ناحیه تداخلی دست یافت.

کلمات کلیدی: ناحیه تداخلی، HCM، FRESIM، شبیه‌سازی، کالیبراسیون، تغییر باند، دنباله‌روی.

۱- مقدمه

ناحیه تداخلی از برخورد دو یا چند جریان ترافیکی که در یک جهت و در طولی از بزرگراه در حال گذر هستند و به ابزارهای کنترل ترافیکی نیازی ندارند بوجود می‌آید (به غیر از علائم راهنمایی). وقتی که یک فضای همگرا بدنبال یک فضای واگرا قرار می‌گیرد یا وقتی که یک رمپ ورودی بدنبال یک رمپ خروجی قرار می‌گیرد و یک باند کمکی آنها را به هم متصل می‌نماید، نواحی تداخلی بوجود می‌آیند. نواحی تداخلی نیاز شدید به مانورهای تغییر باند دارند که در این حالت رانندگان باید برای دسترسی به باندهای مورد نظرشان برای رسیدن به خروجی مطلوب، تلاش کنند. بنابراین ترافیک در ناحیه تداخلی به آشفتگی بیش از حدی که بطور طبیعی بر روی آزادراه‌های اصلی وجود دارد، مربوط می‌شود.

آشفتگی موجود در ناحیه تداخلی و رفتار پیچیده وسایل نقلیه در این ناحیه باعث بوجود آمدن سردرگمی، تأخیر، پس زدن ترافیک و تصادف در بخش همگرایی ناحیه تداخلی می‌شود [۱].

تحلیل ترافیک در نواحی تداخلی بسیار پیچیده می‌باشد. در فصل نهم راهنمای WSDOT، «ترافیک تقاطع‌های غیر همسطح» آمده است: «بخاطر اینکه نواحی تداخلی آشفتگی قابل توجهی را باعث می‌شوند طراحی تقاطع‌های همسطح که نواحی تداخلی را حذف می‌کنند یا آن را از راه اصلی دور می‌کنند، مطلوب می‌باشد». ناحیه تداخلی مطابق آیین‌نامه HCM دارای انواع مختلفی است که بسته به تعداد باندها و تعداد تغییر باند خودروها به سه نوع A، B و C تقسیم می‌شوند. در ایران روش منتخبی جهت تحلیل و طراحی نواحی تداخلی وجود ندارد و اکثر طراحی‌ها براساس آیین‌نامه HCM می‌باشد [۲]. در این مطالعه علاوه بر بررسی روش HCM، به بررسی برخی از روش‌ها همانند روش Dutch پرداخته می‌شود. همچنین روش شبیه‌سازی و کاربرد آن در مدل کردن این نواحی بررسی می‌گردد. پس از بررسی روش‌های موجود به مقایسه این روش‌ها و انتخاب روش مناسب‌تر با شرایط ایران پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

متدولوژی تحلیل و طراحی تداخلی اولین بار در راهنمای ظرفیت بزرگراه در سال ۱۹۵۰ ارائه شد. داده‌های میدانی این متدولوژی از ۶ سایت در واشنگتن دی‌سی، آرلینگتون و ویرجینیا در سال ۱۹۴۷ گردآوری گردید. از آن زمان، رویکردهایی برای تحلیل نواحی تداخلی توسعه یافته است. بیشتر این فعالیت‌ها بر اساس گردآوری اطلاعات در اواخر دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ استوار شده است.

HCM سال ۱۹۵۰ نشان داد که تعداد وسایل نقلیه‌ای که در خط تاج با هم تلاقی می‌کنند ضرورتاً فراتر از تعداد وسایل نقلیه‌ای که یک باند منفرد را اشغال می‌کنند، نیست. بنابراین در حالتی که وسایل نقلیه باید مانورهای تداخلی را بطور همزمان (بیشتر یا کمتر) انجام دهند، کل تعداد وسایل نقلیه عبوری از میان ناحیه تداخلی نمی‌تواند فراتر از ظرفیت یک باند منفرد باشد. HCM ذکر کرد که طول مؤثر ناحیه تداخلی توسط فاصله‌ای که رانندگان ترافیک سایر مسیرها را می‌بینند، در سطح سرویس بالاتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این فاصله توسط رانندگان برای تنظیم سرعت‌ها و موقعیت‌شان قبل از رسیدن به ناحیه تداخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین HCM متذکر شده است که سرعت در ترکیب با طول ناحیه تداخلی، نقش مهمی را در کاربرد ناحیه تداخلی بازی می‌کند.

تحقیقات تکمیلی توسط نورمن در سال ۱۹۵۷، هس در سال ۱۹۶۳، لایش ۱۹۵۸ و ۱۹۶۴، منجر به توسعه بخش مربوط به ناحیه تداخلی در نسخه بعدی HCM در سال ۱۹۶۵ گردید. HCM سال ۱۹۶۵ نشان داد که عملکرد تداخلی اساساً علاوه بر ترکیب ترافیک به طول و عرض ناحیه تداخلی نیز بستگی دارد. همچنین HCM سال ۱۹۶۵ عنوان نمود که بدون توجه به تعداد یا طول باندها، وقتی وسایل نقلیه به ظرفیت محتمل دو باند ترافیکی نزدیک می‌شوند به طرز بدی ناحیه تداخلی متراکم می‌گردد [۱].

در نهایت دو نوع پیکربندی برای باند ایجاد شد، آنها یک Ramp تداخلی تحت عنوان یک ناحیه تداخلی که تشکیل شده از یکسری رمپ‌های ورودی و خروجی متوالی که با یک باند کمکی (اضافی) به هم متصل هستند، را تعریف نمودند. در ضمن یک Major Weave نیز در جایی که ۳ یا چند شاخه ورودی و خروجی دارای ۲ یا چند باند تشکیل دهنده یک شاخه اصلی، یک نقطه همگرایی اصلی یا هر دو هستند، تعریف شد. محققان تأثیرات طراحی متغیر را تحلیل کردند و دریافتند که پیکربندی باند، اغلب در مورد وسایل نقلیه‌ای که فقط از بخش‌های کوچکی از راه استفاده می‌کنند، نتیجه می‌دهد. بنابراین نتیجه‌گیری شد که تعیین دقیق تعداد کل باندها که توسط HCM در سال ۱۹۶۵ پیشنهاد شده، برای تضمین خصوصیات عملی پیش‌بینی شده، کافی نیست.

در سال ۱۹۷۵، NCHRP یک شیوه جدید که متغیرهای اضافی شامل هندسه، ترکیب ترافیک، حجم‌های وسایل نقلیه باند اصلی و حجم‌های وسایل نقلیه تداخلی را بحساب می‌آورد، برای تحلیل ناحیه تداخلی ارائه کرد. پیگناتارو، مک شین، کرولی، راس و لی در سال ۱۹۷۵ تحقیقات NCHRP را دنبال کردند و دریافتند که بهترین ارتباط توصیفی ترافیک تداخلی از فرضی که نسبت باندهای تداخلی به کل باندها با نسبت حجم تداخلی به حجم کل متناسب است، توسعه می‌یابد. آنها دریافتند که عرض مورد نیاز وسایل نقلیه تداخلی مستقیماً با درصد کل ترافیکی که وسایل نقلیه بوجود می‌آورند، ارتباط دارد [۳].

در سال ۲۰۱۴، مارکزاک و بویسن روش قابل اطمینان‌تر پیشنهاد نمودند که رفتار جریان ترافیک در باندهای مجزا از مناطق تداخلی را بر مبنای تخمین توزیع وسایل نقلیه در هر محل در باندهای right-most یک Major Weave ارزیابی می‌کرد. این مطالعه از داده‌های تجربی در باندهای کمکی و right-most آزادراه در ۹ محل استفاده کردند. هر ناحیه تداخلی به طول‌های ثابت برای اندازه‌گیری حجم‌ها تقسیم شد و تمامی حرکات تداخلی و غیرتداخلی استخراج شدند. داده‌ها تحلیل شدند و پارامتر جریان ترافیکی که واضح‌ترین اثر روی رفتار وسایل نقلیه از آزادراه به رمپ است، نرخ جریان تداخلی بود. در سال ۱۹۹۹، FHWA برنامه‌های FRESIM، FREFLO، FREQ و HCS را مورد مقایسه قرار داده و به نسبت میزان توانایی آنها در مدل کردن هر مورد از ضعیف تا عالی (از شماره یک تا چهار) به آنها امتیاز داد. از نتایج این تحقیق نیز می‌توان جهت انتخاب یکی از این چهار مدل بسته به نیاز موجود بهره جست [۴].

در تحقیقی که توسط رینا و آهن انجام شده است یازده مدل شبیه‌سازی از نظر توانایی‌هایشان در زمینه حمل و نقل هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند که این یازده مدل از بین تعداد زیادی از مدل‌های مورد مطالعه انتخاب شده‌اند و بیشتر آنها پیش از این در زمینه‌های مختلف حمل و نقل هوشمند مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۵].

۳- روش تحقیق

۳-۱- پارامترهای ورودی و خروجی نواحی تداخلی

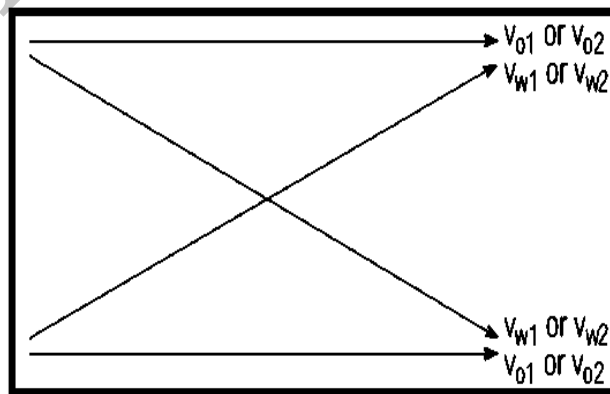
ورودی‌ها و خروجی‌ها در سه دسته زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

G: اطلاعات مربوط به طرح هندسی

S: سرعت آزاد در ناحیه تداخلی و غیر تداخلی

V: حجم‌های تداخلی و غیر تداخلی

علاوه بر سه دسته ورودی فوق نیاز به در دسترس بودن برخی مشخصات جریان ترافیکی از جمله ضریب ساعت اوج (PHF)، درصد وسایل نقلیه سنگین و ضریب آشنایی رانندگان به مسیر می‌باشد. شکل ۱ متغیرهای بکار رفته در تحلیل نواحی تداخلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پارامترهای مؤثر در ناحیه تداخلی

۳-۲- بررسی و مقایسه روش‌های HCM و DUTCH

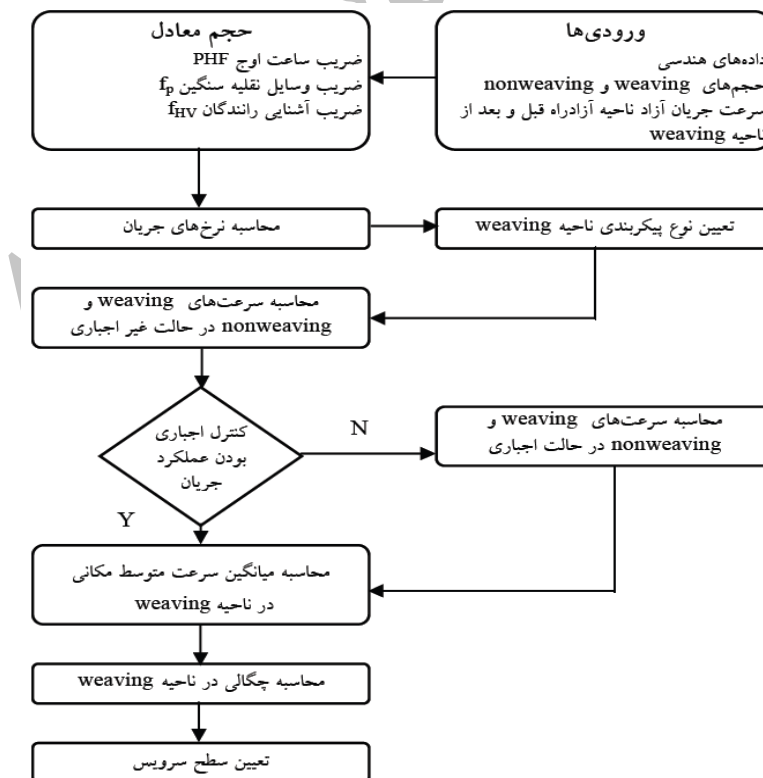
۳-۲-۱- معرفی روش‌های HCM و DUTCH

روش تحلیل ناحیه تداخلی آزادراه در آیین‌نامه HCM 2000 براساس تحقیقات انجام شده دهه ۸۰ استوار است. این روش بر پایه تخمین سرعت جریان‌های تداخلی و غیر تداخلی بوده و شاخص چگالی جهت محاسبه سطح سرویس این ساختار بکار می‌رود. سطح سرویس با سطوح مختلف A (جریان آزاد) تا سطح F (متراکم) بیان می‌شود. آیین‌نامه HCM ظرفیت را به صورت ماکزیمم نرخ جریان ۱۵ دقیقه‌ای برحسب همسنگ سواری بر ساعت در هر باندها (pcphpl) بیان می‌کند. روش تخمین ظرفیت و تعیین سطح سرویس برای هر سه نوع پیکربندی A، B و C ارائه شده است. [۶] پیکربندی‌های مختلف براساس تعداد تغییر باندهای موردنیاز هر جریان تداخلی همان‌طور که در جدول ۱ عنوان شده، تعریف می‌شوند. همچنین شکل ۲ متدولوژی آیین‌نامه HCM در خصوص نواحی تداخلی را نشان می‌دهد.

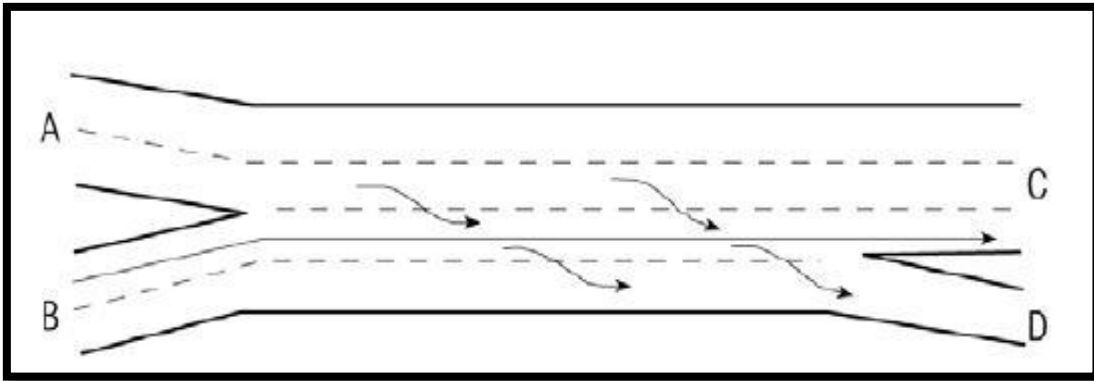
جدول ۱- تعیین نوع پیکربندی به کمک تعداد تغییر باند

تعداد تغییر باندهای موردنیاز توسط جابجایی VW2			تعداد تغییر باندهای موردنیاز توسط جابجایی VW1
۲	۱	۰	
نوع C	نوع B	نوع B	۰
غیر قابل قبول	نوع A	نوع B	۱
غیر قابل قبول	غیر قابل قبول	نوع C	۲

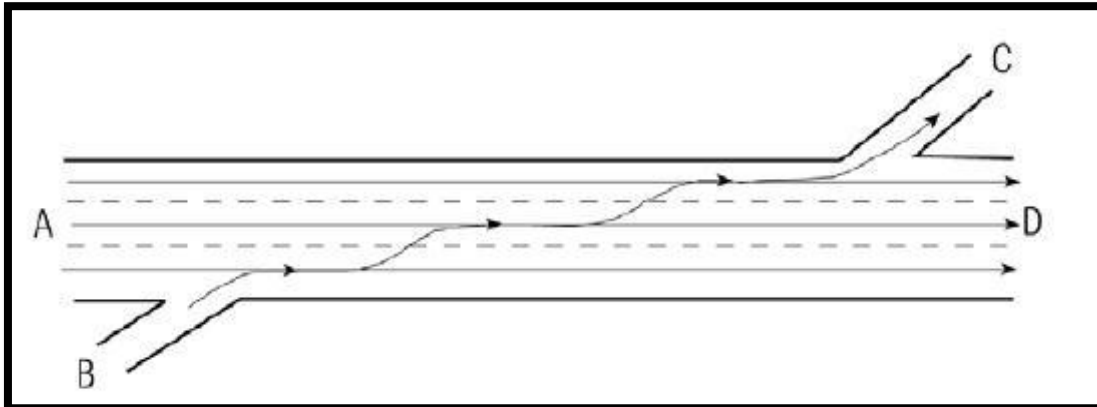
در آیین‌نامه DUTCH برخلاف HCM سطح سرویس تخمین زده نمی‌شود و پروسه طراحی Dutch روی ظرفیت قابل دستیابی ناحیه تداخلی استوار است. طرح ناحیه تداخلی در این روش براساس تساوی یا نسبت کمتر از ۰/۸، تقاضا-حجم استوار است. راهنمای Dutch، ظرفیت را در فاصله زمانی ۵ دقیقه‌ای که این مقدار توسط نرم افزار شبیه‌سازی FRESIM بکار می‌رود، بررسی می‌کند. نواحی تداخلی در آیین‌نامه Dutch به دو گونه متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- متدولوژی تحلیل نواحی تداخلی آزادراهی براساس آیین‌نامه HCM



شکل ۳- دو نمونه ناحیه تداخلی مقارن



شکل ۴- ناحیه تداخلی نامقارن (۳+۱ → ۲+۲)

به طور خلاصه پروسه طراحی Dutch برای نواحی تداخلی روی آزادراه‌ها شامل گام‌های زیر است:

- ۱- تعیین تقاضای شاخه‌های A و B
- ۲- تعیین تقاضای تداخلی AD و BC
- ۳- مشخص نمودن سهم تداخلی (LR) شاخه با کوچکترین نرخ جریان مطلق
- ۴- مشخص کردن درصد کامیون
- ۵- محاسبه نسبت تداخلی (WR)
- ۶- کنترل نسبت حجم جریان‌های تداخلی (نسبت آنها تفاوت زیادی با ۰/۵ نداشته و بهتر است مساوی باشند).
- ۷- تعیین هندسه مناسب تداخل مطابق با مقادیر ظرفیت (از جدول موجود در آیین‌نامه)
- ۸- کنترل حداقل طول مورد نیاز ناحیه تداخلی که امکان انطباق با تقاضاهای یافت شده در گام ۱ را دارد.
- ۹- اگر نسبت حجم جریان‌های تداخلی به طور قابل ملاحظه‌ای از ۰/۵ فاصله داشته باشد یا هندسه مطلوب از ناحیه تداخلی در جدول وجود نداشته باشد، مدل ماکروسکوپیک FRESIM جهت تعیین مقادیر ظرفیت بکار می‌رود [۱].

۳-۲-۲- مقایسه روش‌های HCM و Dutch

در ابتدا با بررسی آیین‌نامه‌های HCM و DUTCH به بررسی و ورودی‌ها و خروجی‌های موردنظر برای هر یک از روش پرداخته شد. در جدول ۲ به طور خلاصه مواردی را که دو آیین‌نامه HCM و Dutch به عنوان پارامترهای ورودی و یکسری فرضیات مدنظر قرار داده و در نهایت خروجی موردنظر را نتیجه می‌دهند، خلاصه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، آیین‌نامه HCM دارای خروجی‌های مناسب‌تر و بیشتری نسبت به مدل Dutch است. در آیین‌نامه HCM سطح سرویس، چگالی و میانگین سرعت متوسط مکانی در ناحیه weaving مشخص می‌شود، در حالی که مدل Dutch

از این لحاظ دچار ضعف است. در آیین نامه Dutch ظرفیت مشابه آنچه در HCM آمده تعریف می شود، بجز آنکه یک فاصله زمانی در تحلیل استفاده می شود. لازم به ذکر است که روش Dutch به نوعی از نتایج شبیه سازی استفاده می کند و روشی کاملاً ریاضی نیست. علاوه بر خروجی های محدودتر مدل Dutch، این مدل دارای فرضیات خاصی نیز هست که این مسأله باعث ایجاد محدودیت در مدل می شود و استفاده از آن را به ویژه در مناطق شهری محدود می کند. بنابراین با توجه به مقایسه صورت گرفته، مدل HCM برای مقایسه در مراحل بعدی مورد استفاده قرار می گیرد.

۴- بررسی روش شبیه سازی

شبیه سازی تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. ایجاد مدل شبیه سازی هم به منزله ابزار تحلیلی برای پیش بینی تأثیر تغییرات بر سیستم های موجود و هم به عنوان ابزار طراحی برای پیش بینی عملکرد سیستم جدید در شرایط گوناگون است. بنابراین می توان به شبیه سازی ناحیه weaving، اعتباریابی مدل شبیه سازی و مقایسه آن با آیین نامه های در دسترس به معیاری جهت انتخاب روش بهینه مطابق با شرایط ایران دست یافت.

کاربردهای شبیه سازی در حمل و نقل شامل طراحی حمل و نقل (تخمین سود و هزینه، مطالعه پیچیده ترافیکی، آنالیز صدور گازهای زائد و ...) طراحی بزرگراهها (آنالیز ظرفیت بزرگراهها، طراحی مکان های دریافت عوارض، طراحی تقاطعها، طراحی میداين و ...)، کنترل ترافیک و عملکرد آن (کنترل علائم ترافیکی، مدیریت محدود کردن ترافیک شهری، طراحی مناطق بدون حادثه و ...)، مدیریت ترافیک آزادراهها (آنالیز گلوگاهها، ارزیابی HOT/HOV و ...)، حمل و نقل عمومی (اولویت علائم ترافیکی، مدل های تقاضای سفر و ...)، ارزیابی ITS (آنالیز سیستم های مشاهده ترافیک، ارزیابی الگوهای جدید کنترلی و ...) و تحقیقات و توسعه می شود [۲].

۴-۱- معرفی برنامه شبیه سازی

یکی از مسایل مهم در بکارگیری روش شبیه سازی انتخاب نرم افزاری کارا و مورد اطمینان است. معیارهای مهمی همانند قابلیت مدل سازی شرایط مورد نظر، میزان کاربرد در گذشته، انعطاف پذیری مدل جهت کالیبراسیون و غیره، در انتخاب نرم افزار مهم می باشد. در این تحقیق پس از مطالعات صورت گرفته مدل FRESIM که بخش آزادراهی نرم افزار TSIS می باشد، انتخاب شد. FRESIM یکی از مدل های شبیه سازی ریزنگر آزادراهی است که وسایل نقلیه ورودی را به صورت مجزا در ورودی مدل سازی می کند و امکان بیان رفتار ترافیکی را به صورت واقعی میسر می سازد. FRESIM امکان مدل سازی موارد زیر را دارد:

۱- ۵ تا ۱ خط اصلی حرکت با ۱ تا ۳ رمپ به همراه ۱ تا ۳ خط اتصال داخلی به آزادراه.

۲- تغییرات شیب و شعاع انحناء آزادراه.

۳- اضافه کردن و حذف باندها در محل های مورد نیاز.

۴- تعریف منطقه راهبندان در آزادراه.

۵- تعریف خطوط مخصوص وسایل نقلیه سنگین.

از دلایل دیگر انتخاب این نرم افزار می توان به توانایی های این مدل در شبیه سازی نواحی آزادراهی و در دسترس بودن آن در ایران را نام برد.

۴-۱-۱- کالیبراسیون مدل FRESIM

برای کالیبراسیون مدل ابتدا پارامترهای کالیبراسیون مورد شناسایی قرار گرفت. این پارامترها بر روی شاخص عملکرد (زمان سفر) که مبنای کالیبره کردن برنامه هستند، تأثیر گذارند. بعد از شناسایی این پارامترها به دلیل تعدد و دشواری پیدا کردن

مقادیر نهایی آنها، آنالیز حساسیت صورت گرفت. در آنالیز حساسیت با تغییر مقادیر پارامترها، میزان تأثیرگذاری آنها بر روی شاخص عملکرد بررسی شد.

بر اساس نتایج بررسی‌ها، پارامترهایی که تأثیرشان بر روی شاخص عملکرد ناچیز بود، حذف شد و سایر پارامترها به گونه‌ای تغییر یافت تا با خروجی‌های حاصل از HCM سازگار باشد که در ادامه به تشریح روند فوق‌الذکر پرداخته می‌شود.

۴-۲- تعیین پارامترهای پرداخت مدل

برای پرداخت مدل ابتدا باید پارامترهای میکروسکوپی که بر زمان سفر موثرند، مشخص شود. این کار با بررسی راهنمای برنامه و بررسی مطالعات انجام شده در گذشته انجام پذیر است. بعد از بررسی تحقیقات انجام شده و با رجوع به راهنمای برنامه، پارامترهای جدول ۳ به عنوان پارامترهای موردنظر در این تحقیق استفاده شدند که به همراه مقادیر پیش فرض و محدوده تغییرات در برنامه ارائه شده‌اند:

بعد از انتخاب پارامترهای کالیبراسیون، حساسیت شاخص عملکرد (زمان سفر) به عنوان خروجی مدل نسبت به این پارامترها بررسی شد و نتایج به عنوان رهنمودهای اصلی در مرحله پرداخت مدل بکار گرفته شد. لازم به ذکر است که مقدار شاخص عملکرد در هر مورد بر اساس ۶ اجرای مختلف نرم‌افزار با استفاده از هسته اعداد تصادفی و میانگین‌گیری از خروجی‌های حاصل که در جدول شماره ۴ ارائه شده محاسبه شد. یافته‌های حاصل از جدول شماره ۴ شامل موارد زیر است:

- ۱- پارامترهای مربوط به حداقل فاصله دنباله‌روی وسایل نقلیه و زمان تأخیر آغاز حرکت، تأثیر خاصی بر روی شاخص عملکرد (زمان سفر) ندارند، لذا از چرخه کالیبراسیون حذف می‌شوند.
- ۲- سایر پارامترها با تفاوت نه چندان زیادی بر روی شاخص عملکرد موثرند، لذا باید در تغییر آنها جهت دستیابی به مقادیر نهایی به صورت همسان عمل کرد.
- با توجه به پایین بودن زمان سفر در حالت پیش فرض لازم است تا پارامترها به گونه‌ای تغییر داده شوند که زمان سفر به زمان سفر در HCM نزدیک شود.

۴-۳- تعیین مقادیر نهایی پارامترهای کالیبراسیون

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد کالیبراسیون نهایی بر روی پارامترهای زیر صورت گرفت:

- ۱- فاکتور حساسیت دنباله روی وسایل نقلیه
- ۲- زمان لازم برای مانور تغییر باند
- ۳- درصد رانندگانی که تسلیم وسایل نقلیه در حال تغییر باند می‌شوند
- ۴- حداقل جدایی برای تولید وسایل نقلیه
- ۵- احتمال تغییر باند

با تغییر این پارامترها میزان نزدیکی میزان شاخص عملکرد به خروجی‌های HCM بررسی شد و پس از تغییر هر کدام از پارامترها با توجه به ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها بهترین مقدار انتخاب شد. این فعالیت در چرخه‌های متوالی تکرار گردید و ترکیب بهینه پارامترها حاصل شد. ترکیب بهینه عبارت است از بهینه‌ترین مقادیر برای پارامترهای مختلف که خروجی برنامه را بر خروجی HCM منطبق می‌سازد. مقادیر نهایی ترکیب بهینه در جدول ۲ درج شده است.

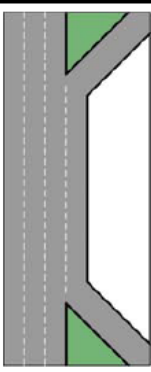
جدول ۲- مقادیر نهایی ترکیب بهینه پارامترهای کالیبراسیون

ردیف	پارامتر	مقدار نهایی
۱	فاکتور حساسیت دنباله روی وسایل نقلیه	۱-۱۰
۲	زمان لازم برای مانور تغییر باند	۵۰
۳	درصد رانندگانی که تسلیم وسایل نقلیه در حال تغییر باند می شوند	۱۰
۴	حداقل جدایی برای تولید وسایل نقلیه	۲۰
۵	احتمال تغییر باند	۳

۵- طرح سناریوهای مختلف توسط FRESIM

سناریوهای مختلف در قالب جدول ۳ برای حجم‌های مختلف weaving و nonweaving به همراه درصد‌های وسایل نقلیه سنگین، طول‌های ناحیه weaving و سایر فرضیات بکار رفته نشان داده شده است.

جدول ۳- سناریوهای مختلف جهت انجام مقایسه بین HCM و نرم‌افزار شبیه‌سازی FRESIM

V_{1o1} (veh/h)	۲۴۰۰	V_{1w1} (veh/h)	۴۸۰	N	۴			
V_{1o2} (veh/h)	۱۲۰	V_{1w2} (veh/h)	۲۴۰					
V_{2o1} (veh/h)	۳۰۰۰	V_{2w1} (veh/h)	۶۰۰	FFS (mph)	۶۵			
V_{2o2} (veh/h)	۱۵۰	V_{2w2} (veh/h)	۳۰۰	L_1 (ft)	۱۰۰۰			
V_{3o1} (veh/h)	۳۶۰۰	V_{3w1} (veh/h)	۷۲۰	L_2 (ft)	۱۵۰۰			
V_{3o2} (veh/h)	۱۸۰	V_{3w2} (veh/h)	۳۶۰	PHF	۰/۹			
V_{4o1} (veh/h)	۴۵۰۰	V_{4w1} (veh/h)	۹۰۰	f_p	۱			
V_{4o2} (veh/h)	۲۲۵	V_{4w2} (veh/h)	۴۵۰	P_{1T}	۰/۰۵		f_{1HV}	۰/۹۷۶
V_{5o1} (veh/h)	۶۰۰۰	V_{5w1} (veh/h)	۱۲۰۰	P_{2T}	۰/۱		f_{2HV}	۰/۹۵۲
V_{5o2} (veh/h)	۳۰۰	V_{5w2} (veh/h)	۶۰۰	P_{3T}	۰/۱۵		f_{3HV}	۰/۹۳۰

۵-۱- تحلیل سناریوهای مختلف بر اساس روش HCM

نتایج حاصل از تحلیل سناریوهای مختلف (شامل ۵ حجم، ۳ درصد وسایل نقلیه سنگین و ۲ طول مختلف) اجرا شده با HCM به شرح زیر است:

۱- زمان سفر با افزایش حجم از مقدار 2880 veh/h به 7200 veh/h به صورت خطی افزایش می‌یابد که این رشد در حدود ۳۵ درصد است. همچنین میزان تأخیر در این بازه نیز به صورت خطی رشد داشته و این افزایش معادل ۲۵۰ درصد است (اشکال ۵ و ۸) که نشان می‌دهد هیچگونه صفی در بالادست ناحیه تداخلی تشکیل نشده و هنوز حجم جریان بیشتر از ظرفیت نشده است.

۲- با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین، روند افزایش زمان سفر و متناسب با آن تأخیر همچنان به صورت خطی باقی می‌ماند ولیکن اختلاف تأخیر در حجم‌های کم نسبت به حجم‌های بالا با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین افزایش بیشتری دارد و افزایش آن برای زمان سفر و تأخیر در بازه تغییرات حجم از 2880 veh/h به 7200 veh/h به ترتیب معادل ۳۵ و ۲۵۰ درصد است (اشکال ۶ و ۷) که متناسب با نتیجه بیان شده در بند قبلی است. این امر نشان دهنده این است

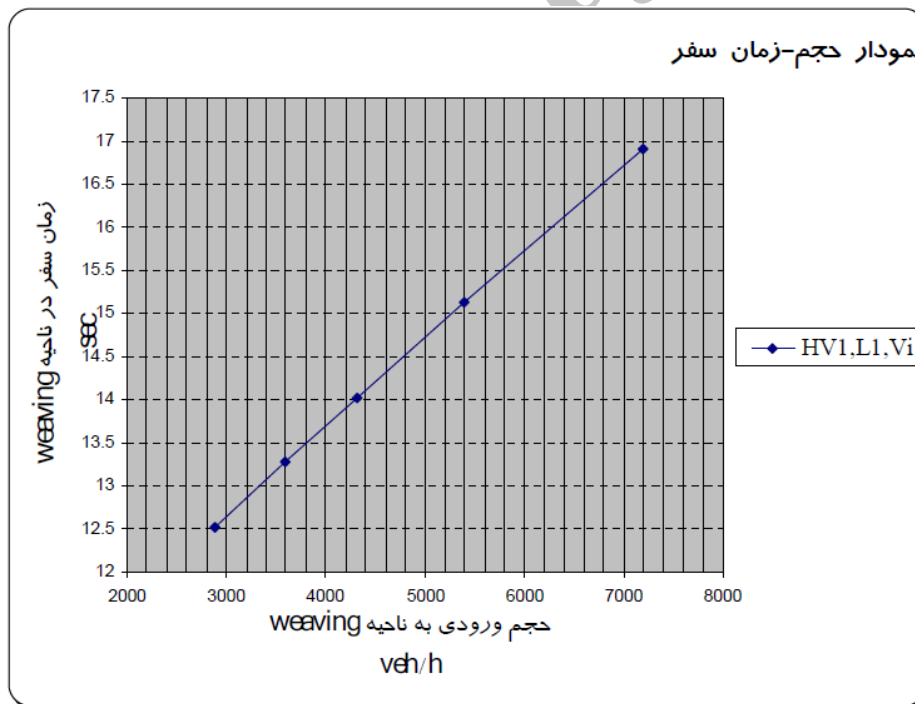
که همسنگ سواری در حالت عادی آزادراهی و در نواحی تداخلی به گونه‌ای همسان عمل می‌کند، در صورتی که به نظر می‌رسد در واقعیت عملکرد جریان ترافیک سنگین در نواحی تداخلی متفاوت از نواحی عادی آزادراهی است.

۳- با افزایش ۵۰۰ فوت به طول ناحیه تداخلی (از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ فوت) و در بازه تغییرات حجم از مقدار ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h، زمان سفر برای حجم‌های پایین از حدود ۴۲ درصد تا حدود ۳۵ درصد برای حجم‌های بالا افزایش می‌یابد. همچنین تأخیر نیز در بازه تغییرات حجم و افزایش طول، از ۷ درصد به ۱۳ درصد رشد می‌یابد (اشکال ۶ و ۷).

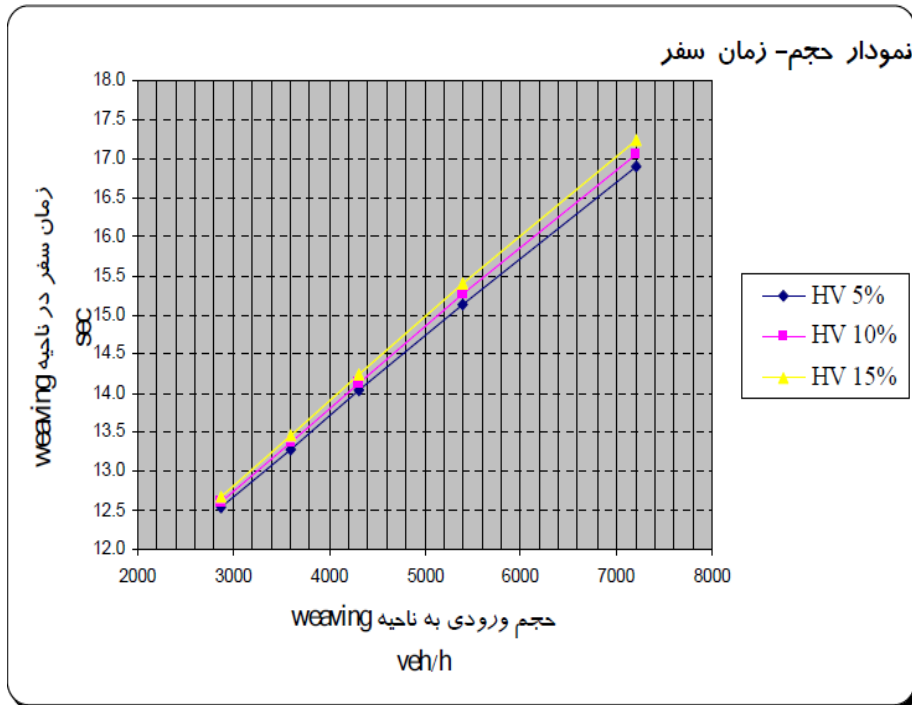
۲-۵- تحلیل سناریوهای مختلف بر اساس روش FRESIM

یافته‌هایی که از تحلیل سناریوهای مختلف در نرم‌افزار شبیه‌سازی FRESIM حاصل می‌شوند، به شرح ذیل است:

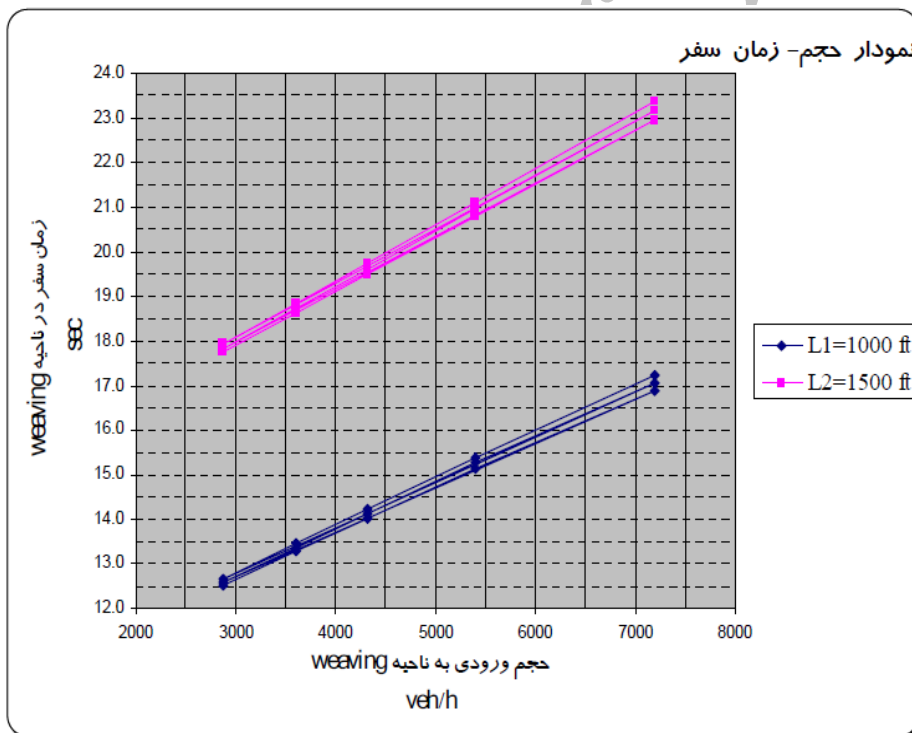
- ۱- افزایش زمان سفر با افزایش حجم از مقدار ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h به صورت بسیار ناچیز و در حدود ۳ درصد است. تأخیر نیز با همین رویکرد در حدود ۶۴ درصد رشد دارد (اشکال ۹ و ۱۱). این افزایش تأخیر ناشی از کاهش شتاب در بالادست، افزایش شتاب در پایین دست و کاهش سرعت در طول ناحیه تداخلی است.
- ۲- با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین و با افزایش حجم از ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h، زمان سفر حدود ۳ درصد رشد دارد. مقدار تأخیر در حجم‌های پایین تا حجم‌های بالا از ۷۱ تا ۵۲ درصد افزایش می‌یابد (اشکال ۱۰ و ۱۲). این امر نشان دهنده این است که عملکرد همسنگ سواری در حالت عادی آزادراهی نسبت به حالت تداخلی متفاوت است و در حجم‌های پایین میزان تأثیر آنها در افزایش تأخیر نسبت به حجم‌های بالا، بیشتر است.
- ۳- با افزایش ۵۰۰ فوت در طول ناحیه weaving (از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ فوت) و در بازه تغییرات حجم از ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h، زمان سفر در حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد، اما تأخیر با همین رویکرد در حجم‌های پایین دست نسبت به بالادست از ۷۱ درصد تا حدود ۹۳ درصد رشد را نشان می‌دهد (اشکال ۱۰ و ۱۲).



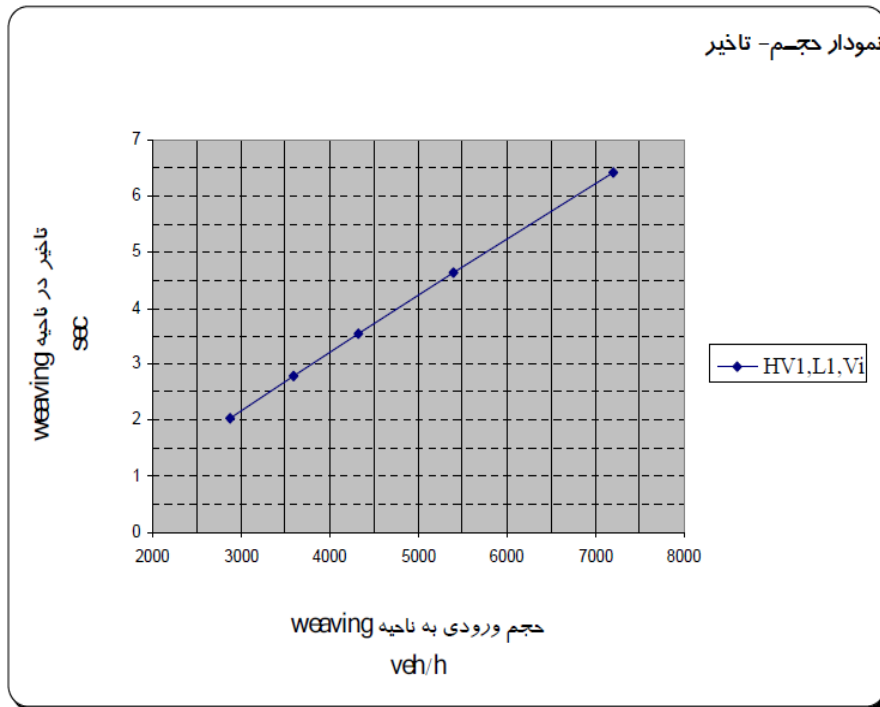
شکل ۵- حجم‌های مختلف با زمان سفر در ناحیه تداخلی برای ۵٪ وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



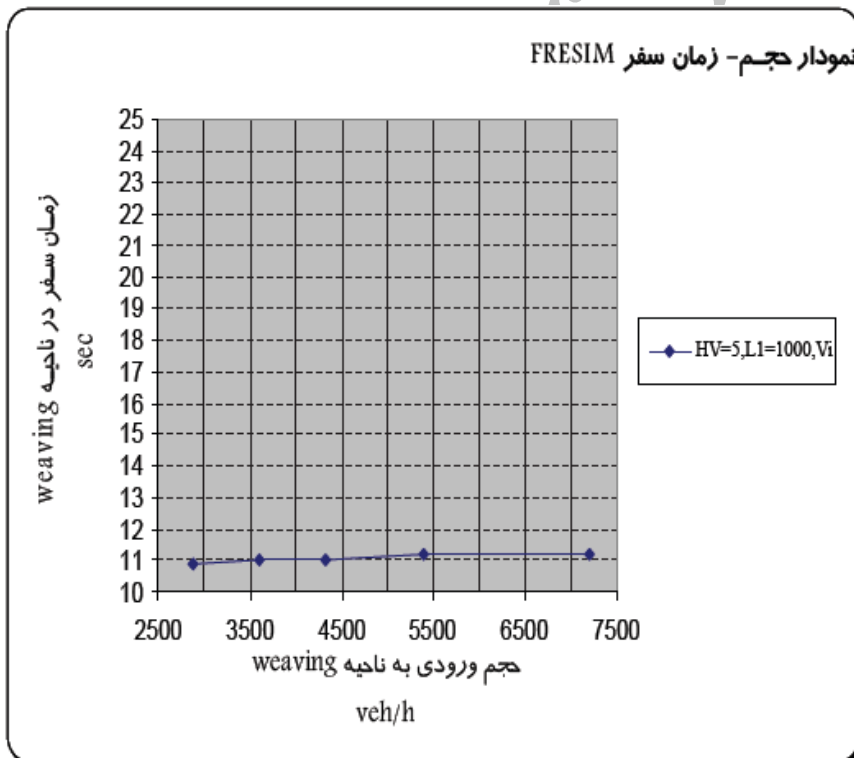
شکل ۶- حجم‌های مختلف با زمان سفر در ناحیه تداخلی برای درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



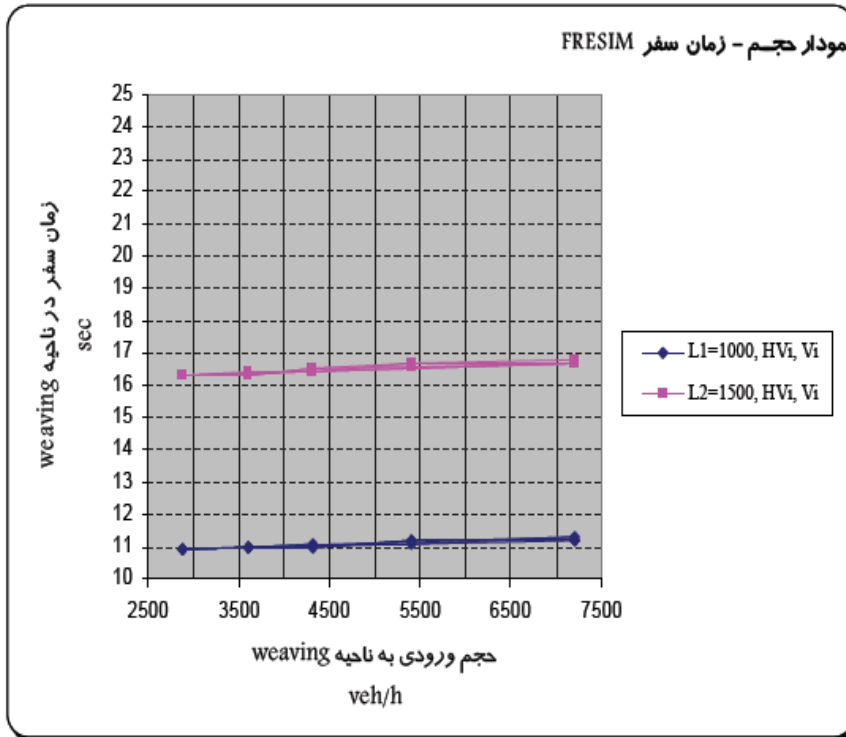
شکل ۷- حجم‌های مختلف با زمان سفر در ناحیه تداخلی برای طول‌های مختلف و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



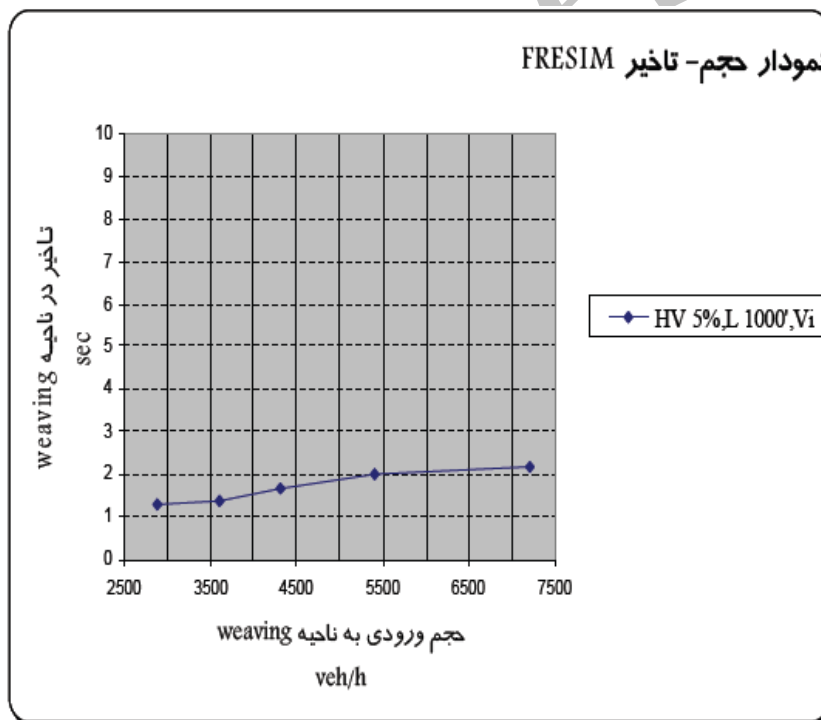
شکل ۸- حجم‌های مختلف با تأخیر در ناحیه تداخلی برای ۵٪ وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



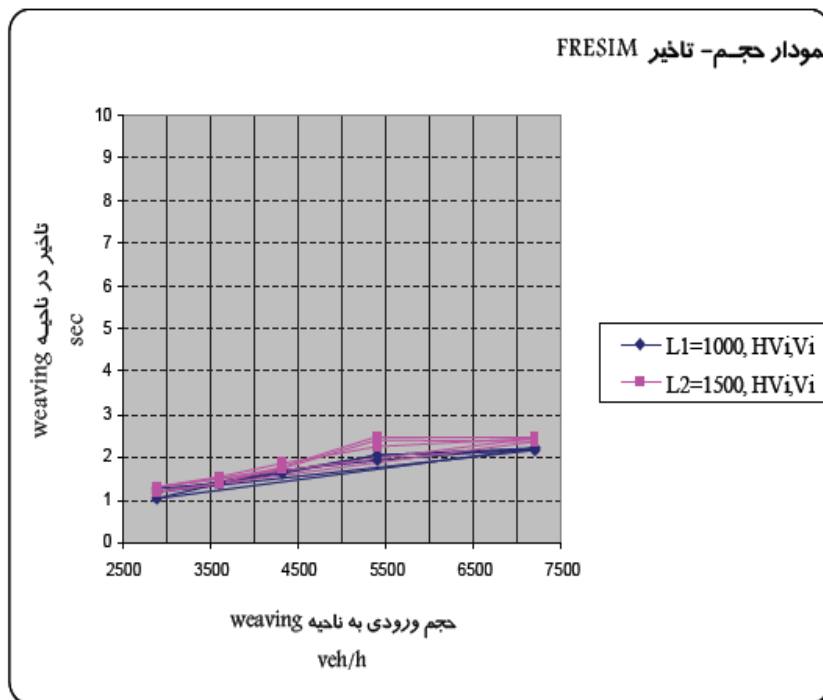
شکل ۹- حجم‌های مختلف با تأخیر در ناحیه تداخلی برای درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



شکل ۱۰- حجم‌های مختلف با تأخیر در ناحیه تداخلی برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



شکل ۱۱- تأخیر در حجم‌های مختلف در ناحیه تداخلی برای ۵٪ وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



شکل ۱۲- تأخیر در حجم‌های مختلف در ناحیه تداخلی برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین

۵-۳- مقایسه روش‌های HCM و FRESIM

با مقایسه خروجی‌ها و تحلیل‌های انجام شده بر روی روش HCM و FRESIM نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- افزایش زمان سفر و تأخیرات نسبت به حجم در FRESIM بر خلاف HCM دارای یک روند خطی ثابت نیست و در حجم‌های میانی تأثیر زیادی بر روی افزایش تأخیر و زمان سفر داشته و در حجم‌های کم و بالا تأثیر این پارامترها به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابند (اشکال ۴، ۶، ۸ و ۱۰).
- ۲- با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در مورد روش‌های HCM و نرم‌افزار شبیه‌سازی FRESIM، می‌توان نتیجه گرفت که تأخیر حاصله در ناحیه weaving بیشتر متأثر از افزایش حجم است (اشکال ۴ الی ۱۱) و همانطور که در شکل‌های ۵، ۷، ۹ و ۱۱ ملاحظه می‌شود تأثیرات افزایش طول نیز نقش مهمی را در افزایش تأخیر ایفا می‌کند.
- ۳- میزان افزایش تأخیر در آیین‌نامه HCM نسبت به نرم‌افزار شبیه‌سازی FRESIM به مراتب بیشتر است.
- ۴- روش FRESIM توانایی مدل کردن تأخیر ناشی از افزایش شتاب و کاهش شتاب در نواحی تداخلی را داراست در حالی که روش HCM فاقد این مهم است.
- ۵- علیرغم اینکه تأخیر محاسبه شده در روش FRESIM بر خلاف روش HCM، شامل تأخیر در نواحی بالادست و پایین دست نیز می‌شود و لیکن مقدار تأخیر حاصله از روش HCM پایین‌تر است. در واقع خروجی HCM به مراتب مقادیر بالاتری از تأخیر را در نواحی تداخلی ارائه می‌دهد و این میزان تأخیر در حجم‌های پایین تا حجم‌های بالا از حدود ۵۹ تا ۲۰۵ درصد رشد دارد.

۶- نتیجه‌گیری

- ✓ یکی از ضعف‌های مهم در مدلسازی ناحیه تداخلی، عدم در نظرگیری تأخیرات بالادست و پایین دست این ناحیه است که با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری این مشکل قابل رفع است.

- ✓ طرح هندسی ناحیه تداخلی را بخوبی مدل نمی‌کند، در صورتیکه با استفاده از برنامه شبیه‌سازی امکان مدلسازی هندسی کامل ناحیه تداخلی امکان‌پذیر می‌باشد. در ضمن زوایای اتصال رمپ به راه اصلی و سایر مشخصات هندسی همانند باند کاهش و افزایش شتاب مربوط به رمپ‌ها، قابل مدلسازی است.
- ✓ در FRESIM با استفاده از پارامترهای مربوط به مدل دنباله روی وسایل نقلیه و مدل تغییر باند می‌توان مشخصات جریان ترافیکی را در ناحیه تداخلی بر اساس رفتار رانندگی در ایران بدست آورد.
- ✓ در روش HCM زمان سفر با افزایش حجم بصورت خطی افزایش می‌یابد که این افزایش دارای شیب تقریبی ۳ به ۱ می‌باشد.
- ✓ در روش HCM با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین و افزایش زمان سفر، متناسب با آن تأخیر همچنان بصورت خطی باقی می‌ماند و لیکن اختلاف تأخیر در حجم‌های بالادست به حجم‌های پایین دست با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین افزایش بیشتری دارد.
- ✓ در روش HCM با افزایش ۵۰۰ فوت در طول ناحیه تداخلی (از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ فوت)، زمان سفر حدود ۴۱ درصد افزایش می‌یابد. همچنین تأخیر نیز به میزان ۱۶ درصد افزایش می‌یابد.
- ✓ افزایش زمان سفر و تأخیرات در FRESIM بر خلاف HCM دارای یک روند خطی ثابت نیست بلکه در حجم‌های پایین تأثیر زیادی بر روی افزایش آن ندارد و در حجم‌های بالاتر بصورت پله‌ای افزایش می‌یابد.
- ✓ تأخیر کل که علاوه بر تأخیر در ناحیه تداخلی شامل تأخیر در ناحیه افزایش شتاب (پایین دست) و کاهش شتاب (بالادست) می‌شود، دارای مقدار بالایی از تأخیر در ناحیه تداخلی می‌باشد که این نشان دهنده این است که این تأخیرات در بررسی ناحیه تداخلی حتماً باید در نظر گرفته شوند.

۶-۱- پیشنهادات

- ✓ برای ادامه این فعالیت می‌توان با بررسی سایر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی که قابلیت مدل کردن ناحیه تداخلی را دارند (مثل Integration) به مقایسه جامع‌تری در این زمینه پرداخت و با مقایسه خروجی‌های حاصل از آنها و آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد، مدل برتر را جهت کاربردهای ترافیکی انتخاب نمود.
- ✓ می‌توان مقایسه صورت گرفته را برای انواع دیگر ناحیه تداخلی (نوع B و C) نیز انجام داد.

۷- مراجع و منابع

- 1- Florian Marczak, Ludovic Leclercq, Christine Buisson; 2017; "A Macroscopic Model for Freeway Weaving Sections"; HAL Id: hal-01215745, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01215745v2>.
- 2- J.M. Torne, F. Soriguera, and N. Geroliminis; 2014; "On the consistency of freeway macroscopic merging model"; Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 14-0324.
- 3- Andreas Tapani; Johan Olstam; 2013; "Microscopic traffic simulation modelling of 2+1-roads"; 2nd Symposium of the European Association for Research in Transportation, Stockholm.
- 4- F. Marczak and C. Buisson; 2014; "Analytical derivation of capacity at diverging junctions"; Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 14-1625.
- 5- P. Reina and S. Ahn; 2014; "Prediction of merge ratio using lane flow distribution" Transportation Research Board Annual Meeting, Paper 14-5459.
- 6- G. Zhang and Y. Wang; 2013; "Optimizing coordinated ramp metering: a preemptive hierarchical control approach" Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28(1):22-37.