

## یادداشت پژوهشی

# بررسی تأخیر جریان ترافیکی در نواحی تداخلی نوع A

علی منصور خاکی، دانشیار، دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسین محمدی جو، کارشناس ارشد، شرکت مهندسی مشاور مترا، تهران، ایران

محمد پوررضا، کارشناس ارشد، پژوهشکده حمل و نقل تهران، ایران

[mkhaki@iust.ac.ir](mailto:mkhaki@iust.ac.ir)

### چکیده

ناحیه *weaving* از برخورد دو یا چند جریان ترافیکی که در حال عبور از بزرگراه هستند به وجود می‌آید. بالا رفتن ریسک تصادفات به علت تغییرات سرعت و انجام حرکت‌های مانوری و همچنین ایجاد تأخیر در آزادراه از مسایل مربوط به نواحی تداخلی است. به منظور ارایه طرحی بهینه برای کاهش تأخیرات، ایجاد یکنواختی در سرعت و کاهش تصادفات، نیاز به بررسی و تحلیل دقیق جریان‌های ترافیکی در این نواحی است.

در این تحقیق ابتدا به مطالعه روش‌های *HCM*، *DUTCH* و *FRESIM*<sup>۱</sup> جهت مدل‌سازی ناحیه تداخلی پرداخته شد. پس از مقایسه آیین‌نامه‌های *HCM* و *DUTCH* نتایج نشان داد که مدل *DUTCH* مدلی کاملاً ریاضی نبوده و از سوی دیگر با توجه به فرض‌های متعدد محدود کننده در این روش، متدولوژی *HCM* به‌عنوان روش بهینه انتخاب شد و زمان سفر و میزان تأخیر برای سناریوهای مختلف با توجه به حجم جریان‌های ترافیکی، طول ناحیه تداخلی و درصد وسایل نقلیه سنگین، بر اساس این روش مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر با شناخت نرم‌افزار *FRESIM* و پارامترهای پرداخت آن، ناحیه تداخلی مدل‌سازی و کالیبره شد. آنگاه با مقایسه خروجی‌های روش شبیه‌سازی و خروجی‌های حاصل از *HCM*، نتایج نشان داد که این نرم‌افزار علیرغم قابلیت محاسبه تأخیرات در بالادست (کاهش شتاب) و پایین‌دست (افزایش شتاب) ناحیه تداخلی، همواره تأخیر کمتری نسبت به آیین‌نامه *HCM* محاسبه می‌کند و از حجم‌های کم تا زیاد، مقدار تأخیر از ۵۹ تا ۲۰۵ درصد رشد نشان می‌دهد. روند افزایش تأخیر در *HCM* به صورت خطی بوده و لیکن نتایج تأخیر با استفاده از شبیه‌سازی نشان داد که در حجم‌های میانی این روند خطی بوده و در حجم‌های کم و بالا میزان تغییر آن کاهش می‌یابد. همچنین نتیجه گیری شد که علیرغم در نظر گیری همسنگ سواری در ناحیه تداخلی معادل نواحی آزادراهی معمولی توسط *HCM*، این مقدار در *FRESIM* متفاوت بوده و تأثیر آن بر افزایش میزان تأخیر در حجم‌های بالاتر، بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: ناحیه تداخلی، تأخیر، زمان سفر، *HCM*، *FRESIM*، شبیه‌سازی، کالیبراسیون

### ۱. مقدمه

پس زدن ترافیک و لزوم برخورد در بخش همگرای ناحیه *weaving* می‌شود.

تحلیل ترافیک در نواحی *weaving* بسیار پیچیده است. در فصل نهم راهنمای *WSDOT*<sup>۲</sup>، با عنوان "ترافیک تقاطع‌های غیر هم‌سطح" آمده است: "به خاطر اینکه نواحی *weaving* آشفتگی

ناحیه *weaving* از برخورد دو یا چند جریان ترافیکی که در یک جهت و در طولی از بزرگراه در حال گذر هستند به وجود می‌آید و به ابزارهای کنترل ترافیکی (به غیر از علائم راهنمایی) نیازی ندارد [۱]. آشفتگی موجود در ناحیه *weaving* و رفتار پیچیده وسایل نقلیه در این ناحیه باعث به وجود آمدن سردرگمی، تأخیر،

روش در سال ۱۹۸۰ در بخشنامه ۲۱۲ TRB تعدیل شد. رایلی، کل و جانسون در سال ۱۹۸۴ گزارش کردند که روش‌های ارایه شده در بخش نامه ۲۱۲ TRB صلاحیت توضیح عملکردهای ناحیه weaving را ندارد و این موضوع منجر به توسعه روش JHK شد [۵]. در نهایت HCQSC ماموریت تجدید نظر به‌خاطر تضاد بین روش‌ها را به دست آورد و منجر به HCM نسخه ۱۹۸۵ شد [۳]. فازیو و رافایل در سال ۱۹۸۶ سه روش لایش، JHK و HCM ۱۹۸۵ را برای محاسبه ترافیک بالادست ناحیه weaving و به وجود آمدن تغییر مسیر ترافیک در ناحیه weaving. آزمایش کردند. در نتیجه این مطالعات، محققان عنوان کردند که HCM سال ۱۹۸۵ محدودیت کاربردی دارد [۶]. در سال ۱۹۸۹ اسکاباردونیس، کاسیدی، می و کوهن در انستیتو مطالعات حمل‌ونقل در دانشگاه برکلی کالیفرنیا روی نواحی weaving کالیفرنیا، مدل‌های شبیه‌سازی را بکار بردند. آنها از مدل میکروسکوپی INTRAS استفاده کردند [۷]. استورم، لایمن و می در سال ۱۹۹۳ بر روی برنامه شبیه‌سازی FREWEV در دانشگاه برکلی کالیفرنیا جهت مقایسه آلترناتیوهای ناحیه Major Weaving مطالعه کردند [۸]. وانگ، کاسیدی، می و چان در سال ۱۹۹۳ برای ارزیابی ظرفیت نواحی weaving در این ناحیه دست به کاوش زدند. راس و مک شین براساس تغییراتی در HCM سال ۱۹۸۵ دادند و این بهنگام سازی در سال ۱۹۹۷ پذیرفته شد. همچنین NCHRP از مطالعه دیگری در مورد عملیات ناحیه weaving برای بهنگام سازی چهارمین ویرایش آیین‌نامه ظرفیت بزرگراه (HCM2000) حمایت کردند. مطالعه‌ای توسط هشام رخا و ای هوا ژانگ در اگوست ۲۰۰۶ به کمک نرم افزار شبیه‌سازی INTEGRATION و مقایسه‌ای با نتایج HCM و داده‌های میدانی انجام شد که نتایج نشان داد مدل‌های ارایه شده با داده‌های میدانی سازگار بوده لیکن فرآیند HCM نتایج بزرگ‌تری را در خصوص ظرفیت نواحی تداخلی ارایه می‌کند [۹]. همچنین در مطالعه دیگری توسط شنگ نان کان و غلام بام در سال ۲۰۰۶ مقایسه‌ای بر روی مدل‌های FRESIM، VISSIM و CELLSIM انجام شد و نتایج نشان داد که نرم‌افزار شبیه‌سازی CELLSIM جهت کالیبره کردن و اعتباریابی در خصوص ناحیه تداخلی بهتر عمل نموده و نتایج مربوط به چگالی به داده‌های میدانی نزدیک‌تر است [۱۰].

قابل توجهی را باعث می‌شوند، طراحی تقاطع‌های همسطح که weaving را حذف می‌کنند یا آن را از راه اصلی دور می‌کنند مطلوب است" [۲].

ناحیه weaving 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 گزیده‌ای برای تحلیل و طراحی نواحی weaving وجود ندارد و اکثر طراحی‌ها براساس آیین‌نامه HCM است.

در این مطالعه علاوه بر بررسی روش HCM به بررسی روش Dutch نیز پرداخته می‌شود و همچنین با استفاده از شبیه‌سازی و کاربرد آن در مدل کردن این نواحی به بررسی نتایج حاصل از آن در خصوص زمان سفر و تأخیر و مقایسه با روش HCM پرداخته می‌شود.

## ۲. مروری بر مطالعات پیشین

آیین‌نامه HCM اولین بار در سال ۱۹۵۰ بررسی و تحلیل ناحیه weaving را آغاز کرد. داده‌های میدانی آن از ۶ سایت واقع در واشنگتن دی سی و آرلینگتون ویرجینیا در سال ۱۹۴۷ گردآوری شده بود. HCM ۱۹۶۵ بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵ توسط نورمن، هس و لایش تهیه شد و نشان داد که هنگامی که وسایل نقلیه به ظرفیت احتمالی دو باند ترافیکی نزدیک می‌شوند ناحیه شدیداً متراکم می‌شود. تحقیقات دیگری توسط راس، مک شین و پیگناتارو در سال ۱۹۷۴ نشان داد که روشهای HCM سال ۱۹۶۵ در تخمین سطح سرویس دقیق عمل نمی‌کنند و این ناشی از این حقیقت بود که پیکربندی باند به عنوان یک پارامتر در روش تحلیل و طراحی بررسی نمی‌شد [۳]. در سال ۱۹۷۵ NCHRP در گزارش ۱۵۹ خود، متغیرهای اضافی شامل هندسه، ترکیب ترافیک، حجم‌های وسایل نقلیه باند اصلی و وسایل نقلیه در حال مانور را در تحلیل نواحی weaving بکار برد. پیگناتارو، مک شین کرولی و لی در سال ۱۹۷۵ تحقیقات NCHRP را دنبال کردند و دریافتند که بهترین ارتباط توصیفی ترافیک weaving، ناشی از تناسب نسبت باندهای weaving به کل باندها با نسبت حجم weaving به حجم کل است [۴]. در سال ۱۹۷۹ لایش، روش HCQSC را که یک روش گرافیکی برای تمامی حل‌ها بود ارایه کرد. البته کاربران دریافتند که اجرای این روش با وجود دقت و حساسیت در پیکربندی باند، مشکل است. بنابراین، این

آیین‌نامه HCM ظرفیت را به صورت ماکزیمم نرخ جریان ۱۵ دقیقه‌ای برحسب همسنگ سواری بر ساعت در هر باند (pcphpl) بیان می‌کند روش تخمین ظرفیت و تعیین سطح سرویس برای هر سه نوع پیکربندی A، B و C ارایه شده است. پیکربندی‌های مختلف براساس تعداد تغییر باندهای مورد نیاز هر جریان تداخلی همان طور که در جدول ۱ عنوان شده، تعریف می‌شوند. همچنین در شکل ۱ متدولوژی آیین‌نامه HCM در خصوص نواحی تداخلی ارایه می‌شود.

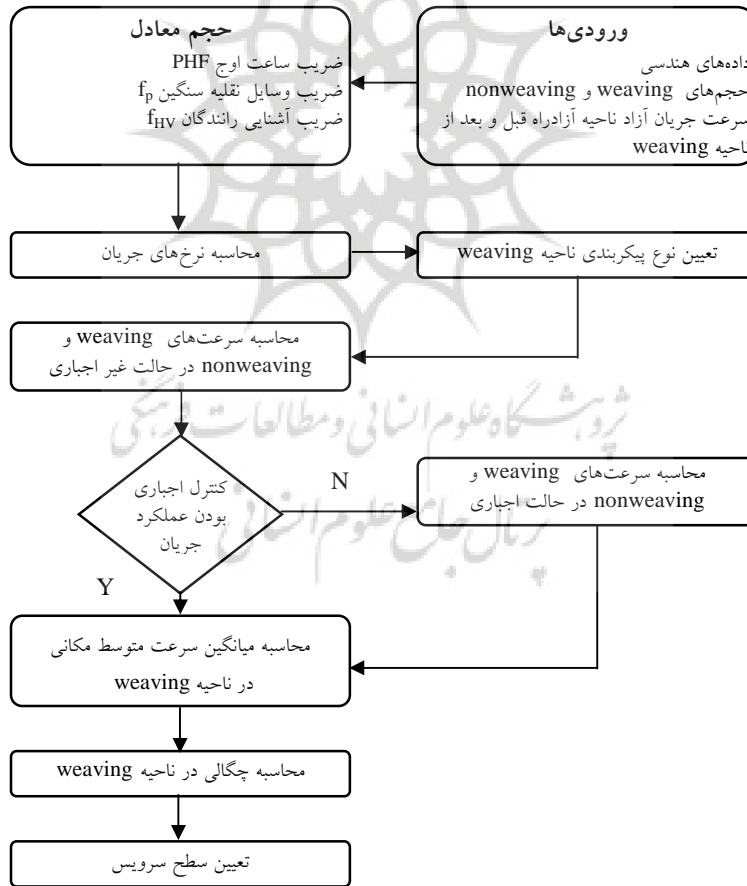
### ۳. بررسی و مقایسه روش‌های HCM و DUTCH

#### ۱-۳ معرفی روش‌های HCM و DUTCH

روش تحلیل ناحیه تداخلی آزادراه در آیین‌نامه HCM2000 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.

جدول ۱. تعیین نوع پیکربندی به کمک تعداد تغییر باند [۱]

تعداد تغییر باندهای مورد نیاز توسط جابجایی $vw_2$			تعداد تغییر باندهای مورد نیاز توسط جابجایی $vw_1$
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



شکل ۱. متدولوژی تحلیل نواحی تداخلی آزادراهی براساس آیین‌نامه HCM [۱]

۹. اگر نسبت حجم جریان‌های تداخلی به طور قابل ملاحظه از ۰/۵ فاصله داشته باشد یا هندسه مطلوب از ناحیه تداخلی در جدول وجود نداشته باشد، مدل ماکروسکوپیک FOSIM جهت تعیین مقادیر ظرفیت بکار می‌رود.

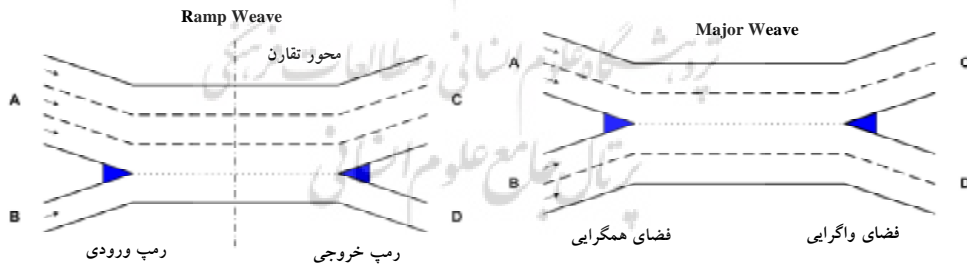
### ۲-۳ مقایسه روش‌های HCM و DUTCH

در ابتدا با بررسی آیین‌نامه‌های HCM و DUTCH به بررسی ورودی‌ها و خروجی‌های مورد نظر برای هر یک از روش‌ها پرداخته شد. در جدول ۲ به طور خلاصه مواردی را که دو آیین‌نامه HCM و DUTCH به عنوان پارامترهای ورودی و یک سری 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 آیین‌نامه DUTCH ظرفیت مشابه آنچه در HCM آمده تعریف می‌شود، بجز آنکه یک فاصله زمانی در تحلیل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که روش DUTCH به نوعی از نتایج شبیه‌سازی استفاده می‌کند و روشی کاملاً ریاضی نیست.

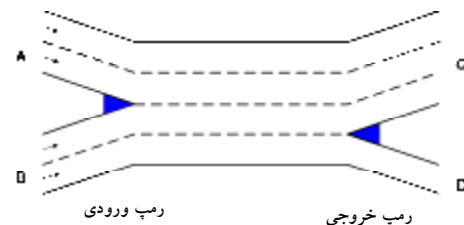
در آیین‌نامه DUTCH بر خلاف HCM سطح سرویس تخمین زده نمی‌شود و پروسه طراحی Dutch روی ظرفیت قابل دستیابی ناحیه تداخلی استوار است. طرح ناحیه تداخلی در این روش بر اساس تساوی یا نسبت کمتر از ۰/۸، تقاضا-حجم استوار است. راهنمای Dutch ظرفیت را در فاصله زمانی ۵ دقیقه‌ای که این مقدار توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی FOSIM بکار می‌رود، بررسی می‌کند. نواحی تداخلی در آیین‌نامه DUTCH به دو گونه متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند که در شکل ۲ نشان داده شده است:

به‌طور خلاصه پروسه طراحی Dutch برای نواحی تداخلی روی آزادراه‌ها شامل گام‌های زیر است: [۱۱]

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 یافت‌شده در گام ۱ را دارد.



شکل ۲. دو نمونه از ناحیه تداخلی نوع متقارن



شکل ۳. یک نمونه ناحیه تداخلی نامتقارن "۱+۳→۲+۲"

بررسی تأخیر جریان ترافیکی در نواحی تداخلی نوع A

جدول ۲. مقایسه روش‌های HCM و Dutch با معیارهای ورودی، خروجی و فرضیات

آیین‌نامه		پارامترها		ردیف
DUTCH	HCM			
√	√	طول	داده‌های هندسی	۱
√	√	عرض		۲
√	√	تعداد باندها		۳
	√	وضعیت ناهمواری		۴
√	√	تعیین پیکربندی		۵
	√	PHF		۶
	√	$f_p$		۷
√	√	$f_{HV}$		۸
√	√	کل نرخ جریان		۹
√	√	نرخ جریان weaving		۱۰
√	√	حداقل نرخ جریان weaving		۱۱
√		نسبت حجم		۱۲
√	√	نسبت weaving شاخه‌ها		۱۳
√		سرعت ورودی به ناحیه weaving		۱۴
√	√	سرعت جریان آزاد در ناحیه weaving		۱۵
	√	حجم‌های weaving و nonweaving		۱۶
√	√	ظرفیت		۱۷
	√	سطح سرویس		۱۸
	√	چگالی		۱۹
	√	میانگین سرعت متوسط مکانی در ناحیه weaving		۲۰
√		سرعت جریان آزاد ۱۲۰ Km/h یا ۷۵ mph		۲۱
√		نسبت تقاضا-حجم ۰/۵ یا کمتر از ۰/۸		۲۲
√		در صورت بروز ماکزیمم تغییر باند در ۳۵۰ متر اول ناحیه weaving، جدایی بوجود می‌آید		۲۳
√		بطور کل فرض می‌شود سهم کامیون‌ها در وسایل نقلیه سنگین بیشتر از وسایل نقلیه غیر مسافربری است.		۲۴
√		حجم را با استفاده از ضریب pcu-truck ۱/۵ می‌توان به pcph تبدیل نمود.		۲۵

۴. بررسی روش شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. ایجاد مدل شبیه‌سازی هم به منزله ابزار تحلیلی برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات بر سیستم‌های موجود و هم به عنوان ابزار طراحی برای پیش‌بینی عملکرد سیستم جدید در شرایط گوناگون

علاوه بر خروجی‌های محدودتر مدل DUTCH، این مدل دارای فرضیات خاصی نیز هست که این مسأله باعث ایجاد محدودیت در مدل می‌شود و استفاده از آن را به ویژه در مناطق شهری محدود می‌کند. بنابراین با توجه به مقایسه صورت گرفته مدل HCM برای مقایسه در مراحل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از دلایل دیگر انتخاب این نرم‌افزار می‌توان به توانایی‌هایی این مدل در شبیه‌سازی نواحی آزادراهی و در دسترس بودن آن در ایران را نام برد.

## 5. 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.

### 5-1 تعیین پارامترهای پرداخت مدل FRESIM

برای پرداخت مدل ابتدا باید پارامترهای مایکروسکوپی 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 3 به عنوان پارامترهای مورد نظر 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 6 اجرای مختلف نرم‌افزار با استفاده از 6 هسته اعداد تصادفی و میانگین‌گیری از خروجی‌های حاصل که در جدول شماره 4 ارائه شده محاسبه شد. یافته‌های حاصل از جدول شماره 4 شامل موارد زیر است:

1. 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.

است. بنابراین می‌توان به شبیه‌سازی ناحیه weaving، پرداخت و اعتباریابی مدل شبیه‌سازی و مقایسه آن با آیین‌نامه‌های در دسترس به معیاری جهت انتخاب روش بهینه مطابق با شرایط ایران دست یافت.

کاربردهای شبیه‌سازی در حمل‌ونقل شامل طراحی حمل‌ونقل (تخمین سود و هزینه، مطالعه پیچیده ترافیکی، آنالیز صدور گازهای زائد و...)، طراحی بزرگراه‌ها (آنالیز ظرفیت بزرگراه‌ها، طراحی مکان‌های دریافت عوارض، طراحی تقاطع‌ها، طراحی میادین 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 HOV / HOT و...)، حمل‌ونقل عمومی (اولویت علائم ترافیکی، مدل‌های تقاضای سفر و...)، ارزیابی ITS (آنالیز سیستم‌های مشاهده ترافیک، ارزیابی الگوهای جدید کنترل و...) و تحقیقات و توسعه می‌شود.

### 4-1 معرفی برنامه شبیه‌سازی FRESIM

یکی از مسایل مهم در بکارگیری روش شبیه‌سازی انتخاب نرم‌افزاری کارآ و مورد اطمینان است. معیارهای مهمی همانند قابلیت مدل‌سازی شرایط مورد نظر، میزان کاربرد در گذشته، انعطاف‌پذیری مدل جهت کالیبراسیون و غیره، در انتخاب نرم‌افزار مهم می‌باشد. در این تحقیق پس از مطالعات صورت گرفته مدل FRESIM که بخش آزادراهی نرم‌افزار TSIS می‌باشد، انتخاب شد.

FRESIM یکی از مدل‌های شبیه‌سازی ریزنگر آزاد راهی است که وسایل نقلیه ورودی را به صورت مجزا در ورودی مدل سازی می‌کند و امکان بیان رفتار ترافیکی را به صورت واقعی میسر می‌سازد.

FRESIM امکان مدل‌سازی موارد زیر را دارد:

1. 1 تا 5 خط اصلی حرکت با 1 تا 3 رمپ به همراه 1 تا 3 خط اتصال داخلی به آزاد راه.
2. تغییرات شیب و شعاع انحناء آزاد راه.
3. اضافه کردن و حذف باندها در محل‌های مورد نیاز.
4. تعریف منطقه راه‌بندان در آزادراه.
5. تعریف خطوط مخصوص وسایل نقلیه سنگین.

## بررسی تأخیر جریان ترافیکی در نواحی تداخلی نوع A

۲. سایر پارامترها با تفاوت نه چندانی 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.

جدول ۳. پارامترهای پرداخت

ردیف	پارامتر	واحد	محدوده تغییرات در برنامه	مقدار پیش فرض در برنامه
۱	پارامتر حساسیت مدل دنباله‌روی وسایل نقلیه	دهم ثانیه	-	-
۲	میانگین زمان تأخیر آغاز حرکت	دهم ثانیه	۰-۶۰	۱۰
۳	زمان لازم برای مانور تغییر باند	دهم ثانیه	-	۳۰
۴	درصد رانندگانی که تسلیم وسایل نقلیه در حال تغییر باند می‌شوند	درصد	-	۲۰
۵	حداقل جدایی برای تولید وسایل نقلیه	دهم ثانیه	-	۱۸
۶	حداقل فاصله دنباله‌روی وسایل نقلیه	فوت	۳-۱۰	۱۰
۷	احتمال تغییر باند	-	۱-۶	۳
۸	طول وسایل نقلیه	فوت	-	-
۹	سرعت آزاد در ناحیه weaving	مایل بر ساعت	حداکثر ۷۰	۶۵
۹	سرعت آزاد در بالادست	مایل بر ساعت	حداکثر ۷۰	۶۵
۱۰	سرعت آزاد در رمپ ورودی	مایل بر ساعت	حداکثر ۷۰	۶۵
۱۱	سرعت آزاد در پایین دست	مایل بر ساعت	حداکثر ۷۰	۶۵
۱۲	سرعت آزاد در رمپ خروجی	مایل بر ساعت	حداکثر ۷۰	۶۵

جدول ۴. بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای پرداخت برای زمان سفر در ناحیه تداخلی

ردیف	پارامتر ورودی برنامه	پیش فرض	تغییر یافته	مقدار زمان سفر ناحیه تداخلی در تکرارهای مختلف بر حسب ثانیه							زمان سفر (ثانیه)	
				اجرای اول	اجرای دوم	اجرای سوم	اجرای چهارم	اجرای پنجم	اجرای ششم	میانگین		
۱	پیش فرض برنامه			۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹
۲	حد پایین فاکتور حساسیت مدل دنباله‌روی وسایل نقلیه	۱۲-۳	۱۰-۱	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹۳	
۳	حد بالای فاکتور حساسیت مدل دنباله‌روی وسایل نقلیه	۱۲-۳	۱۵-۶	۱۰/۶	۱۰/۶	۱۰/۵	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۵	۱۰/۵	
۴	حد پایین زمان لازم برای مانور تغییر باند	۳۰	۱۰	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۵	۱۰/۳	
۵	حد بالای زمان لازم برای مانور تغییر باند	۳۰	۵۰	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰/۹	۱۰/۹۳	
۶	حد پایین درصد رانندگانی که تسلیم وسایل نقلیه در حال تغییر باند می‌شوند	۲۰	۵	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۰/۸	۱۰/۸	۱۰/۸	۱۰/۸	۱۰/۹	۱۰/۸	
۷	حد بالای درصد رانندگانی که تسلیم وسایل نقلیه در حال تغییر باند می‌شوند	۲۰	۵۰	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰/۹	۱۰/۹۳	
۸	حد پایین حداقل جدایی برای تولید وسایل نقلیه	۱۸	۱۰	۱۰/۶	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۶	۱۰/۵	
۹	حد بالای حداقل جدایی برای تولید وسایل نقلیه	۱۸	۲۰	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹	
۱۰	حد پایین حداقل فاصله دنباله‌روی وسایل نقلیه	۵	۳	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	
۱۱	حد بالای حداقل فاصله دنباله‌روی وسایل نقلیه	۵	۱۰	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	
۱۲	حد پایین زمان تأخیر آغاز حرکت	۱۰	۵	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	
۱۳	حد بالای زمان تأخیر آغاز حرکت	۱۰	۴۰	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	۱۰/۹	
۱۴	حد پایین احتمال تغییر باند	۳	۱	۱۰/۴	۱۰/۴	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۵	۱۰/۳	
۱۵	حد بالای احتمال تغییر باند	۳	۵	۱۰/۹	۱۱	۱۰/۹	۱۱	۱۱	۱۱	۱۰/۹	۱۰/۹۳	

### ۱-۵ تعیین مقادیر نهایی پارامترهای کالیبراسیون

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

۱. فاکتور حساسیت دنباله‌روی 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 ۵ درج شده است.

جدول ۵. مقادیر نهایی ترکیب بهینه پارامترهای کالیبراسیون

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

### ۶. طرح سناریوهای مختلف توسط HCM و

#### FRESIM

سناریوهای مختلف در قالب جدول ۶ برای حجم‌های مختلف weaving و nonweaving به همراه درصدهای وسایل نقلیه سنگین، طول‌های ناحیه weaving و سایر فرضیات بکار رفته نشان داده شده است.

#### ۱-۶ 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  $2880 \text{ veh/h}$  به  $7200 \text{ veh/h}$  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 ۴ و ۶) 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 مقدار  $2880 \text{ veh/h}$  به  $7200 \text{ veh/h}$  به ترتیب معادل ۳۵ و ۲۵۰ درصد است (اشکال ۵ و ۷) که متناسب با نتیجه بیان شده در بند قبلی است. این امر نشان‌دهنده این است که همسنگ سواری در حالت عادی آزادراهی و در نواحی تداخلی به‌گونه‌ای همسان عمل می‌کند، در صورتی که به‌نظر می‌رسد در واقعیت عملکرد جریان ترافیک سنگین در نواحی تداخلی متفاوت از نواحی عادی آزادراهی است.

۳. با افزایش ۵۰۰ فوت به طول ناحیه weaving (از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ فوت) و در بازه تغییرات حجم از مقدار  $2880 \text{ veh/h}$  به  $7200 \text{ veh/h}$ ، 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 ۵ و ۷).

#### ۲-۶ تحلیل سناریوهای مختلف بر اساس روش FRESIM

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

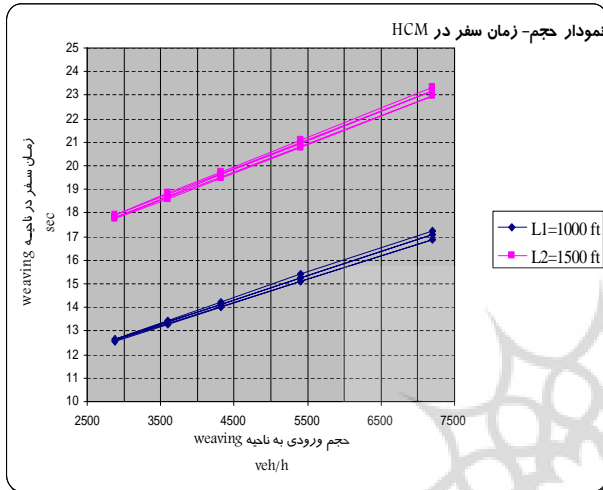
۱. افزایش زمان سفر با افزایش حجم از مقدار  $2880 \text{ veh/h}$  به  $7200 \text{ veh/h}$  به صورت بسیار ناچیز و در حدود ۳ درصد است. تأخیر نیز با همین رویکرد در حدود ۶۴ درصد رشد دارد (اشکال ۸ و ۱۰). این افزایش تأخیر ناشی از کاهش شتاب در بالادست، افزایش شتاب در پایین‌دست و کاهش سرعت در طول ناحیه تداخلی است.



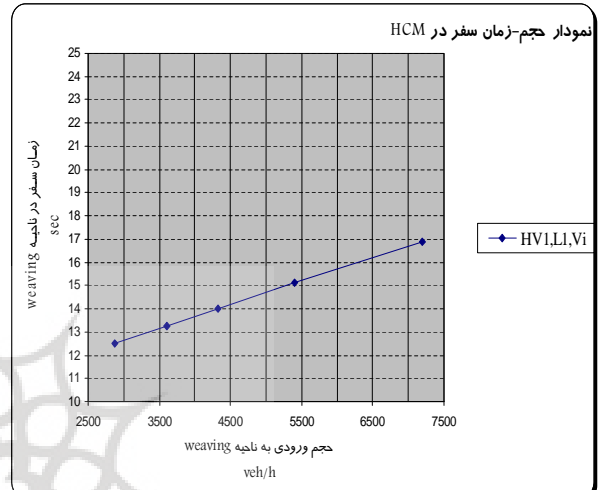
## بررسی تأخیر جریان ترافیکی در نواحی تداخلی نوع A

۳. با افزایش ۵۰۰ فوت در طول ناحیه weaving (از ۱۰۰۰ به ۱۵۰۰ فوت) و در بازه تغییرات حجم از مقدار ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h، زمان سفر در حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد، اما تأخیر با همین رویکرد در حجم‌های پایین‌دست نسبت به بالادست از ۷۱ تا حدود ۹۳ درصد رشد را نشان می‌دهد (اشکال ۹ و ۱۱).

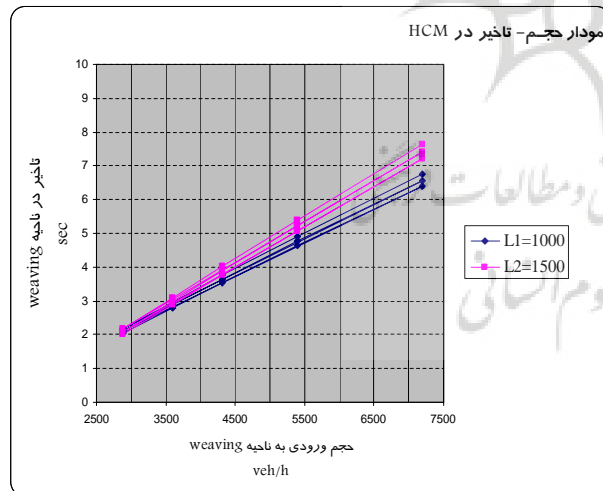
۲. با افزایش درصد وسایل نقلیه سنگین و با افزایش حجم از مقدار ۲۸۸۰ veh/h به ۷۲۰۰ veh/h، زمان سفر حدود ۳ درصد رشد دارد. مقدار تأخیر در حجم‌های پایین تا حجم‌های بالا از ۷۱ تا ۵۲ درصد افزایش می‌یابد (اشکال ۹ و ۱۱). این امر نشان‌دهنده این است که عملکرد همسنگ سواری در حالت عادی آزادراهی نسبت به حالت تداخلی متفاوت است و در حجم‌های پایین میزان تأثیر آنها در افزایش تأخیر نسبت به حجم‌های بالا، بیشتر است.



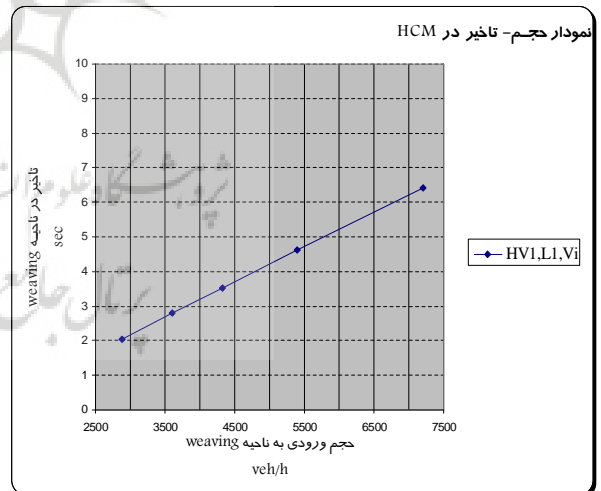
شکل ۵. زمان سفر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



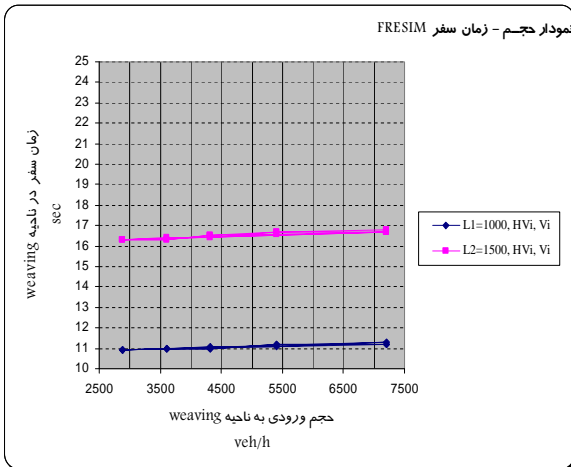
شکل ۴. زمان سفر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای ۵٪ درصد وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



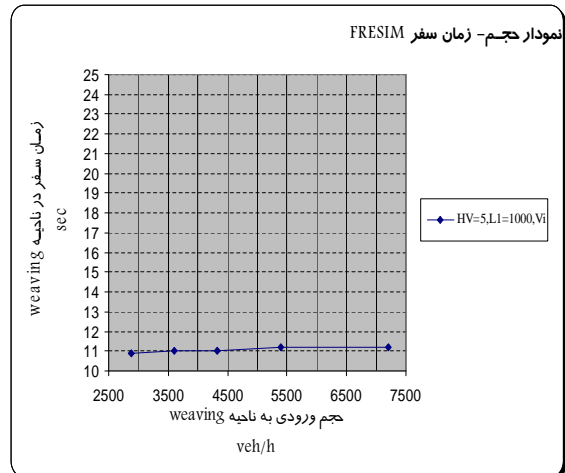
شکل ۷. تأخیر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



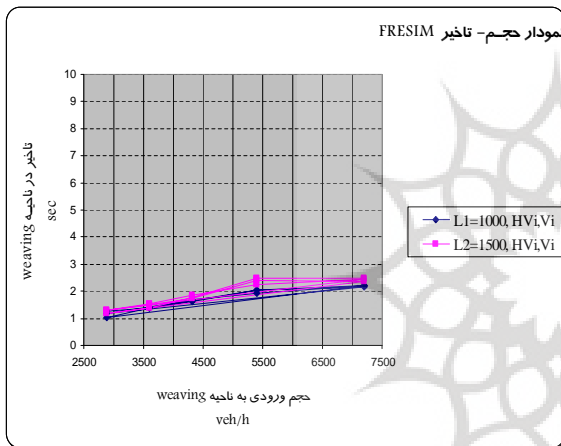
شکل ۶. تأخیر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای ۵٪ درصد وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



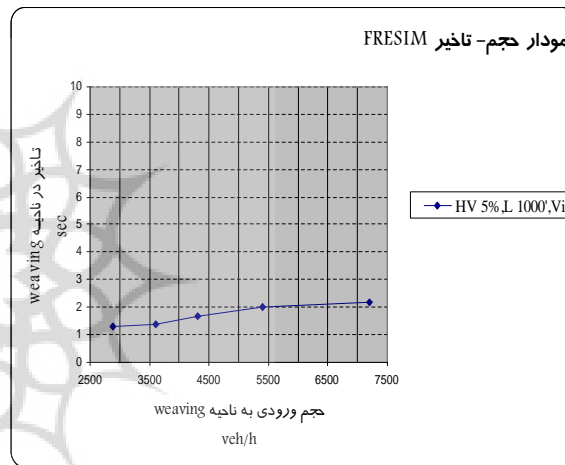
شکل ۹. زمان سفر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



شکل ۸. زمان سفر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای ۵٪ درصد وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت



شکل ۱۱. تأخیر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای طول‌ها و درصد‌های مختلف وسایل نقلیه سنگین



شکل ۱۰. تأخیر در حجم‌های مختلف ناحیه weaving برای ۵٪ درصد وسایل نقلیه سنگین و طول ۱۰۰۰ فوت

### ۳-۶ مقایسه روش HCM و FRESIM

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 HCM شامل تأخیر در نواحی بالادست و پایین‌دست نیز می‌شود، ولیکن مقدار تأخیر حاصله از روش HCM پایین‌تر

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

6. Information Technology Systems
7. Basic Freeway segments

است. در واقع خروجی HCM به مراتب مقادیر بالاتری از تأخیر رادر نواحی تداخلی ارائه می‌دهد و این میزان تأخیر در حجم‌های پایین تا حجم‌های بالا از حدود ۵۹ تا ۲۰۵ درصد رشد دارد.

## ۹. منابع

1. Highway capacity manual, 4<sup>th</sup> edition (2000), Transportation Research Board.
2. Glad, Richard W., Milton, John C. and Olson, David K. (2001) "Weave analysis and performance: The Washington State Case Study", Research Report, Report No: WA-RD 515.1, pp. 4-20.
3. Zhang, Yihua (2005) "Capacity modeling of freeway weaving sections", Blacksburg, Virginia. 2005
4. Roess, R P., Mc. Shane, W R. and Pignataro, L. J (1974) "Configuration, design, and analysis of weaving sections", Transportation Research Record.
5. Pignataro, L., McShane, W., Roess, R., Crowley, K., and Lee, B. (1975) "Weaving areas-design and analysis" NCHRP Report 159, 119 pp.
6. Fazio, J., Roupail, N. M. (1986) "Freeway weaving sections: Comparison and refinement of design and operations analysis procedures", Transportation Research Record, Issue Number: 1091.
7. Skabardonis, A., Cassidy, M., May, A. D. and Cohen, S. (1989) "Application of simulation to evaluate the operation of major freeway weaving sections", Transportation Research Record, Issue Number: 1225.
8. Ostrom, B., Leiman, L., and May, A.D. (1993) "Suggested procedures for analyzing freeway weaving sections", Transportation Research Record, 1398, pp. 42-48.
9. Rakha, Hesham and Zhang, Yihua (2006) "Analytical procedures for estimating capacity of freeway weaving, merge, and diverge sections", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 8, pp. 618-628, Aug.
10. Kan, Sahengnan and Bham, Ghulam H. "A Comparison of microscopic simulation models: FRESIM, VISSIM and CELLSIM Based Weaving Model", ASCE, Aug 2006
11. Minderhoud, M. M. and Elefteriadou, L. "Freeway weaving: comparing the HCM 2000 and Dutch Guidelines", TRB 2003 TRB Paper #03-116

## ۷. نتیجه‌گیری

یکی از ضعف‌های مهم HCM در مدل‌سازی ناحیه weaving در نظر نگرفتن تأخیرات در بالادست و پایین دست این ناحیه است که با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای این مشکل قابل رفع است. همچنین HCM وضعیت هندسی ناحیه weaving را به خوبی مدل نمی‌کند، در صورتی که با استفاده از برنامه شبیه‌سازی امکان مدل‌سازی هندسی کامل ناحیه weaving امکان‌پذیر است و 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 دنباله‌روی وسایل نقلیه و مدل تغییر باند می‌توان مشخصات جریان ترافیکی را در ناحیه weaving بر اساس رفتار رانندگی در ایران به دست آورد. افزایش زمان سفر و تأخیرات در FRESIM برخلاف HCM دارای یک روند خطی ثابت نیست، بلکه در حجم‌های میانی تأثیر زیادی بر روی افزایش آن داشته و در حجم‌های کم و بالا به صورت پله‌ای افزایش می‌یابد و در هر دو روش تأخیر حاصله در ناحیه weaving بیشتر متأثر از افزایش حجم است. خروجی‌های نرم‌افزار FRESIM نشان می‌دهد که تأخیر کل علاوه بر تأخیر در ناحیه weaving شامل تأخیر در ناحیه افزایش شتاب (پایین دست) و کاهش شتاب (بالادست) می‌شود و این تأخیرات در بررسی ناحیه weaving حتماً باید در نظر گرفته شوند، زیرا ابزار مناسبی برای تعیین طول ناحیه تداخلی و تأثیر آن بر تأخیرند.

## ۸. پانویس‌ها

1. Highway Capacity Manual
2. Freeway simulation
3. Washington State Department of Transportation
4. High Occupancy Toll
5. High Occupancy Vehicles