

# توسعه یک مدل برای تخمین سرعت تداخلی و غیر تداخلی در مقاطع تداخلی آزادراه‌های ایران

مهدی زمانی\*

کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[mahdizamanicivil@gmail.com](mailto:mahdizamanicivil@gmail.com)

نیما ارزجانی

کارشناسی ارشد حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Arzjani.nima@gmail.com](mailto:Arzjani.nima@gmail.com)

## چکیده

با وجود بروز آشفته‌گی‌های<sup>۱</sup> جریان ترافیک در نواحی تداخلی آزادراه‌ها و عدم وجود مدل‌های منطبق با شرایط آزادراهی و رانندگی در ایران، لزوم بررسی بیشتر روی نواحی تداخلی<sup>۲</sup> را قوت می‌بخشد. برای اولین بار مطالعه‌ای بر روی نواحی تداخلی آزادراه‌های کشور انجام گرفت و مدل‌هایی منطبق بر شرایط ترافیکی موجود پیشنهاد گردید. این مطالعه، توسط دو مدل مختلف تحلیل شده است؛ مدل اول بر اساس شرایط ترافیکی نواحی تداخلی مورد نظر و مدل دوم بر اساس روش آیین نامه ای HCM2010. در این تحقیق، هدف ما تحلیل تغییر خط<sup>۳</sup> و سرعت وسایل نقلیه در نواحی تداخلی آزادراه است. داده‌های مربوط به زمان سفر (سرعت وسایل نقلیه)، نرخ<sup>۴</sup> تغییر خط و نوع تغییر خط وسایل نقلیه از ۱۶ ناحیه<sup>۵</sup> تداخلی موجود در شش آزادراه کشور جمع‌آوری شده است. در ابتدا با احتساب مقدار تأثیر طول ناحیه تداخلی، تعداد خط و نرخ تردد<sup>۶</sup> بر تغییر خط وسایل نقلیه تداخلی و غیر تداخلی<sup>۷</sup>، کالیبراسیون معادلات تغییر خط تداخلی و غیر تداخلی، با مدل رگرسیونی چندمتغیره انجام شده است. سپس کالیبراسیون معادلات شدت تداخل<sup>۸</sup> برای دستیابی به سرعت وسایل نقلیه تداخلی و غیر تداخلی انجام شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط یکسان مدل‌های سرعت تداخلی و غیر تداخلی پیش‌بینی شده بیشتر از مدل HCM2010 قابل پیش‌بینی هستند.

**کلمات کلیدی:** تغییر خط، نرخ تردد، تداخلی و غیر تداخلی، شدت تداخل، HCM2010

<sup>۱</sup> Turbulence

<sup>۲</sup> Weaving sections

<sup>۳</sup> Lane change

<sup>۴</sup> Rate

<sup>۵</sup> Section

<sup>۶</sup> Flow rate

<sup>۷</sup> Non-weaving

<sup>۸</sup> Weaving intensity

## ۱- مقدمه

توسط نورمن تهیه شد و نشان داد هنگامی که وسایل نقلیه به ظرفیت احتمالی دو خط ترافیکی نزدیک می‌شوند، ناحیه تداخلی شدیداً متراکم می‌شود [۵، ۲]. از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۵ روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل ناحیه تداخلی توسط روش راس و مک شین و روش لیس انجام شد که در HCM ارائه و استفاده شده است [۷]. CALDOT و دانشگاه کالیفرنیا در برکلی تعدادی از مطالعات نواحی تداخلی را از دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ انجام دادند که بر کالیبراسیون مدلی مشابه رویکرد موسکوویتز<sup>۱۳</sup> و نیومن<sup>۱۴</sup> در HCM1965 تمرکز داشت [۱۱]. تمام مطالعات پیکربندی در کالیفرنیا (در اصطلاح اصلی HCM1965) به‌عنوان نواحی یک‌طرفه تداخلی طبقه‌بندی می‌شوند که در آن فعالیت‌های تداخلی در خطوط سمت راست ناحیه متمرکز می‌شود [۸]. در به روزرسانی HCM در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰، ابتدا سرعت تداخلی تخمین زده می‌شود و پس از آن به تراکم تبدیل شده و سطح سرویس بر اساس تراکم محاسبه می‌شود. (در به روزرسانی HCM که در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰ انجام شد؛ ابتدا سرعت تداخلی تخمین زده شد، سپس با تبدیل آن به تراکم، سطح سرویس بر اساس تراکم محاسبه شد) [۱۲]. مهم‌ترین تحقیق پس از HCM2000 در سال ۲۰۰۸ توسط NCHRP در گزارش ۳-۷۵ منتشر شد، این مطالعه نشان می‌دهد برای تخمین سرعت تداخلی و غیر تداخلی، نیاز به معادلات پیچیده و پیکربندی‌های خاص نیست و سرعت را می‌توان با استفاده از تعداد تغییر خط که در سه نوع پیکربندی پیش بینی می‌شود، به دست می‌آید. بدست آورد [۹، ۱۳]. بنابراین در HCM2010 متدلوژی تغییر کرده است به طوری که در مرحله اول نرخ تغییر خط وسایل نقلیه تخمین زده می‌شود و

تداخل از برخورد دو یا چند جریان ترافیک هم‌جهت در طول مشخصی از قطعه‌های آزادراهی یا بزرگراهی که فاقد هرگونه ابزار کنترلی (به استثنای علائم راهنمایی و رانندگی) هستند، به وجود می‌آید [۳]. نواحی تداخلی نیاز شدید به مانورهای تغییر خط<sup>۹</sup> دارند که در این حالت رانندگان باید برای دسترسی به خط‌های موردنظرشان برای رسیدن به خروجی مطلوب تلاش کنند. آشفستگی و رفتار پیچیده وسایل نقلیه در این ناحیه تداخلی از عوامل اصلی ایجاد سردرگمی، تاخیر، پس زدن ترافیک و تصادف در بخش همگرای این ناحیه هستند. تداخل ناشی از تغییر خطوط و سرعت وسایل نقلیه در تقاطع‌های غیر همسطح که به عنوان نوعی از گلوگاه در نظر گرفته می‌شود به صورت مستقیم باعث کاهش سرعت و افزایش تراکم در مقطع گلوگاه‌ها می‌شود. در ایران روش گزیده‌ای برای تحلیل و طراحی نواحی تداخلی وجود ندارد و اکثر طراحی‌ها بر اساس آیین‌نامه HCM است. پیچیدگی رفتار رانندگان و وسایل نقلیه در این ناحیه، تحلیل ترافیکی ناحیه تداخلی، معرفی پارامترهای تأثیرگذار و یافتن آیین‌نامه و همچنین نرم‌افزار مطابق شرایط ایران را ضروری می‌سازد.

## ۲- مروری بر مطالعات گذشته

آیین‌نامه HCM اولین بار در سال ۱۹۵۰ بررسی و تحلیل ناحیه تداخلی را آغاز کرد. داده‌های میدانی آن از ۶ سایت واقع در واشنگتن دی سی<sup>۱۰</sup> و آرلینگتون<sup>۱۱</sup> ویرجینیا<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۴۷ گردآوری شد [۱]. HCM1965 بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵

<sup>۱۲</sup> Virginia

<sup>۱۳</sup> Moskowitz

<sup>۱۴</sup> Newman

<sup>۹</sup> Lane Change

<sup>۱۰</sup> Washington D.C

<sup>۱۱</sup> Arlington

### ۳- پیکربندی خط

در این مطالعه، وسایل نقلیه تداخلی در دو نوع پیکربندی، مانور تداخلی انجام می‌دهند. شکل ۱(a) تداخل نوع A را نشان می‌دهد که شامل یک بخش تداخل ۴ خطه معمولی با یک رمپ ورودی یک خطه و یک رمپ خروجی یک خطه که به وسیله خط کمکی به یکدیگر وصل شده‌اند. وسایل نقلیه رمپ ورودی از خط کمکی وارد بخش تداخلی می‌شوند و باید یک تغییر خط به راست‌ترین خط آزادراه انجام دهند تا مانور تداخل خود را کامل کنند. آن‌ها می‌توانند تغییر خطوط بیشتری را برای دسترسی به خطوط بیرونی آزادراه انجام دهند. به همین ترتیب، وسایل نقلیه رمپ خروجی ممکن است از راست‌ترین خط آزادراه وارد ناحیه تداخل شوند (اگرچه می‌توانند در خط دیگری وارد شوند و تغییر خطوط بیشتری را برای دسترسی به خط کمکی انجام دهند) و باید از خط کمکی خارج شوند. همان‌طور که هر وسیله نقلیه باید حداقل یک تغییر خط را اجرا کند، متغیر  $LC_{MIN}$  به صورت معادله (۱) محاسبه می‌شود [۹].

$$LC_{MIN} = (v_{RF} \times 1) + (v_{FR} \times 1) = v_{RF} + v_{FR} \quad (1)$$

شکل ۱(b) تداخل نوع B را نشان می‌دهد. وسایل نقلیه عبوری از رمپ به آزادراه برای اینکه وارد راست‌ترین خط آزادراه شوند، باید یک تغییر خط انجام دهند. آن‌ها می‌توانند تغییر خطوط بیشتری را برای دسترسی به خطوط بیرونی آزادراه انجام دهند، اما تغییر خطوط اضافی لازم نیست. وسایل نقلیه آزادراه به رمپ می‌توانند بدون تغییر خط، از آزادراه وارد رمپ شوند؛ بنابراین در این مورد، متغیر  $LC_{MIN}$  به صورت معادله (۲) محاسبه می‌شود [۹].

$$LC_{MIN} = (v_{RF} \times 1) + (v_{FR} \times 0) = v_{RF} \quad (2)$$

سپس سرعت تخمین زده شده که متعاقباً سرعت به تراکم تبدیل شده و در پایان سطح سرویس بر اساس تراکم محاسبه می‌شود [۱۱]. در سال ۲۰۱۲ مطالعه ای توسط دوسان گولوویک در دانشگاه فلوریدا انجام شد که با مقایسه سرعت میانگین آزاد و چگالی بدست آمده از روش HCM و مقادیر بدست آمده از مدل ریز شبیه سازی شده، اعتبار روش HCM2010 را برای نواحی تداخلی آزادراه فوق اشباع می‌سنجد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش HCM با محدودیت های جدی مواجه است به طوری که سرعت تخمین زده شده با روش HCM کاملاً با سرعت مشاهده شده در سایت متفاوت است در حالیکه در برخی موارد مقدار تراکم را به درستی مشخص می‌کند [۱۸]. در سال ۲۰۱۴، TRB گزارشی برای نسخه بعدی آیین‌نامه آزادراهی آلمان منتشر کرد که در آن با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی جریان ترافیک ماکروسکوپی، کیفیت سرویس در آزادراه را ارزیابی می‌کند [۱۷]. در سال بعد گزارشی توسط TRB منتشر شد که برخلاف HCM2010 نشان داد در هر دو سرعت تداخلی و غیر تداخلی، در هر دو سرعت تداخلی و غیر تداخلی این تعداد تغییر خط شناخته شده است که اثر مهم دارد و تحلیل مشابه روی آن‌ها صورت گرفته است [۱۰]. در سال ۲۰۱۵ یک مطالعه موردی در فرانسه انجام شد که نتایج نشان داد نرخ سرعت و فاکتور آسایش رانندگی، بیشترین تاثیر را روی کاهش ظرفیت نواحی تداخلی می‌گذارد [۱۶]. در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه موردی در مالزی انجام شد که از روش HCM2010 و روش اصلاح شده که منطبق بر خصوصیات ترافیکی محلی بود که برای تحلیل ناحیه تداخلی بزرگراه استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد سطح سرویس، سرعت تداخلی و چگالی تخمین زده شده توسط روش اصلاح شده، کمی بیشتر از روش HCM2010 است [۱۵].

#### ۴- پایگاه داده

پایگاه داده شامل ۱۶ ناحیه تداخلی آزادراهی از شش آزادراه ایران جمع آوری شده است. کل داده‌های جمع آوری شده در نهایت به صورت ۱۶۲ فیلم ۵ دقیقه‌ای در پایگاه داده طبقه‌بندی شده است. در این تحقیق از ۷۰٪ داده‌های جمع آوری شده، برای کالیبراسیون مدل‌های پیشنهادی و از ۳۰٪ باقیمانده برای اعتبارسنجی آنها استفاده شده است [۹]. جدول (۱) پایگاه داده در این مطالعه را نشان می‌دهد. داده‌های جمع آوری شده شامل:

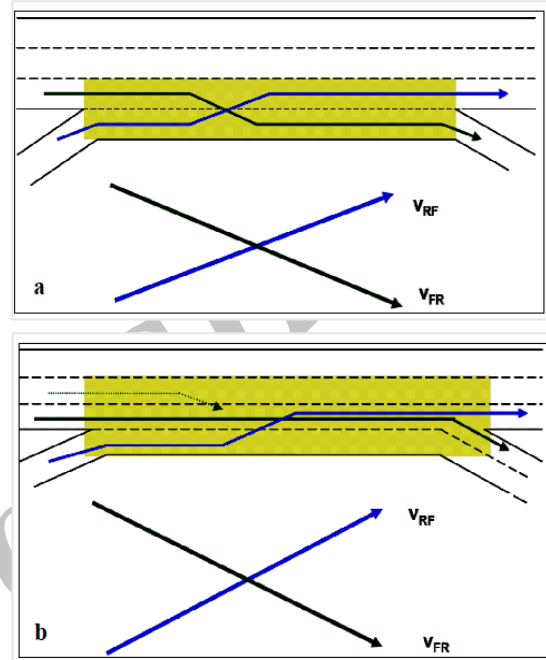
$LCW$ : تعداد کل تغییر خطوط انجام شده توسط وسایل نقلیه تداخلی در بخش تداخل است که به نرخ ساعتی بیان شده است  $(lc/h)$ .

$LCNW$ : تعداد کل تغییر خطوط انجام شده توسط وسایل نقلیه غیر تداخلی در ناحیه تداخلی است که به نرخ ساعتی بیان شده است  $(lc/h)$ .

$LCALL$ : تعداد کل تغییر خطوط انجام شده توسط کل وسایل نقلیه (تداخلی و غیر تداخلی) در بخش تداخلی، به نرخ ساعتی بیان شده است  $(lc/h)$ .  $(LCNW + LCW = LCALL)$

$LC_{MIN}$ : حداقل نرخ تغییر خطی که وسایل نقلیه تداخلی به منظور انجام موفقیت آمیز حرکت تداخلی خود، می‌بایست انجام دهند  $(lc/h)$ .

که در معادلات بالا،  $LC_{MIN}$  حداقل نرخ تغییر خطی که وسایل نقلیه تداخلی به منظور انجام موفقیت آمیز حرکت تداخلی خود انجام می‌دهند.  $V_{RF}$  و  $V_{FR}$  به ترتیب وسیله نقلیه عبوری از آزادراه به رمپ و بالعکس را نشان می‌دهد.



شکل (۱). (a) تداخل نوع A، (b) تداخل نوع B

مسئله مهم در تعیین  $LC_{MIN}$ ، تعیین حداقل تعداد تغییر خطوط است که هر جریان تداخل باید ایجاد کند. تنها نتایج ممکن، ۰ یا ۱ یا ۲ تغییر خط است. به طور کلی رابطه (۳) برای تعیین  $LC_{MIN}$  می‌تواند بیان شود [۹].

$$LC_{MIN} = (V_{RF} * LC_{RF}) + (V_{FR} * LC_{FR}) \quad (3)$$

در معادله (۳)  $LC_{RF}$  حداقل تعداد تغییر خطوط هر وسیله نقلیه در جریان رمپ به آزادراه و  $LC_{FR}$  حداقل تعداد تغییر خطوط هر وسیله نقلیه در جریان آزادراه به رمپ را نشان می‌دهد.

جدول (۱). سایت‌های تشکیل دهنده پایگاه داده

موقعیت مکانی	موقعیت	نوع تداخل	طول (ft)	خطوط	داده‌های ۵ دقیقه‌ای
کرج - قزوین	۱	A	۱۴۵۳	۴	۱۵
کرج - قزوین	۲	A	۷۲۱	۴	۱۵
قزوین - زنجان	۳	A	۵۹۰	۴	۸
قزوین - رشت	۴	B	۱۲۲۰	۳	۹
تهران - ساوه	۵	B	۸۵۶	۴	۹
تهران - ساوه	۶	B	۱۲۱۳	۴	۹
تهران - ساوه	۷	B	۵۲۴	۴	۹
تهران - قم	۸	B	۹۳۱	۴	۶
شاهین شهر - اصفهان	۹	B	۹۹۳	۴	۹
شاهین شهر - اصفهان	۱۰	B	۶۸۵	۴	۹
قزوین - کرج	۱۱	A	۷۵۴	۴	۱۰
اصفهان - فولادشهر	۱۲	A	۷۸۷	۴	۸
فولادشهر - اصفهان	۱۳	A	۴۵۹	۴	۸
رشت - قزوین	۱۴	A	۹۷۸	۳	۱۲
قزوین - رشت	۱۵	A	۷۲۱	۳	۹
رشت - قزوین	۱۶	A	۴۵۲	۳	۹

نشان‌دهنده تغییر خطوط اجباری<sup>۱۵</sup> است و به طور مستقیم با نرخ و نوع پیکربندی تغییر خط تداخلی در ارتباط است. قسمت دوم معادله نشان دهنده نرخ تغییر خطوط اختیاری است که توسط وسایل نقلیه تداخلی ایجاد می‌شود. مقادیر ثابت برای قسمت دوم معادله با توجه به تاثیر هر کدام از پارامترهای تعداد خط (N) و طول ناحیه تداخلی (L<sub>S</sub>) (روند داده‌ها یک رابطه مستقیم بین هر کدام از پارامترهای N و L<sub>S</sub> با نرخ تغییر خط غیر تداخلی نشان می‌دهد) بر نرخ تغییر خط تداخلی بدست آمده‌اند [۹]. این مقادیر با روش مدل رگرسیونی چند متغیره<sup>۱۶</sup> به دست آمده‌اند که همبستگی مقادیر ثابت معادله در جدول (۲) قابل مشاهده

#### ۴-۱- معادله پیش‌بینی نرخ تغییر خط تداخلی

معادله (۴) نرخ تغییر خط در یک بخش تداخلی را پیش‌بینی می‌کند.

$$LC_W = LC_{MIN} + 0.34 \times [(L_S - 400)^{0.47} N^{2.58}] \quad (۴)$$

LC<sub>w</sub> تعداد کل تغییر خطوط انجام شده توسط وسایل نقلیه تداخلی در بخش تداخل است که به نرخ ساعتی بیان شده است (LC/H). همچنین L<sub>S</sub> و N به ترتیب طول ناحیه تداخلی و تعداد خط را نشان می‌دهند. معادله (۴) به وضوح تغییر خطوط اجباری و اختیاری را از یکدیگر تفکیک می‌کند. LC<sub>MIN</sub>

<sup>۱۶</sup> Multiple Regression

<sup>۱۵</sup> Constraint Lane Change

#### ۲-۴- پیش‌بینی نرخ تغییر خط وسایل نقلیه غیر تداخلي

در وسایل نقلیه غیر تداخلي، کلیه تغییر خطوط اختیاری است. تقریباً غیرممکن است که یک ناحیه تداخلي طراحی کنیم به طوری که حرکت وسایل نقلیه از رمپ ورودی به رمپ خروجی و از آزادراه به آزادراه بدون تغییر خط انجام شود. انتظار می‌رود که نرخ جریان غیر تداخلي ( $V_{NW}$ ) تحت تأثیر عوامل مهمی چون طول ( $L_S$ ) و عرض ( $N$ ) ناحیه تداخلي قرار گیرد. [9] نرخ تغییر خط غیر تداخلي را می‌توان تخمین زد که با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$LC_{NW} = 20.7 + (0.162 \times v_{NW}) + (0.645 \times L_S) - (137.8 \times N) \quad (5)$$

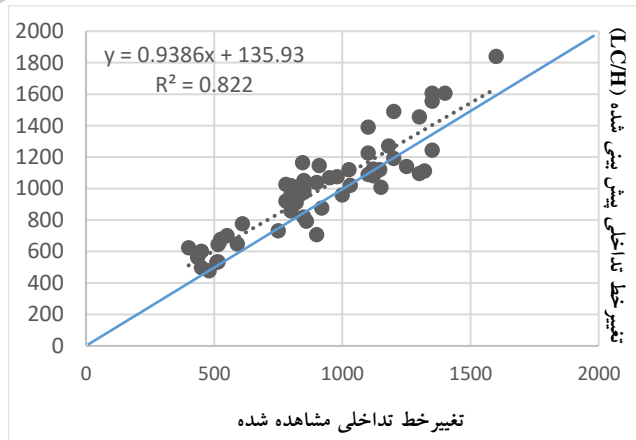
$LC_{NW}$  تعداد کل تغییر خطوط انجام شده توسط وسایل نقلیه غیر تداخلي در ناحیه تداخلي است که به نرخ ساعتی بیان شده است ( $LC/H$ ). معادله (5) نشان می‌دهد که یک رابطه نسبتاً مستقیم بین نرخ تردد وسایل نقلیه غیر تداخلي ( $V_{NW}$ ) و نرخ تغییر خط غیر تداخلي ( $LC_{NW}$ ) وجود دارد. همچنین با افزایش طول ناحیه تداخلي، وسایل نقلیه فرصت بیشتری دارند تا تغییر خط دهند و مقصد مورد نظر خود را انتخاب کنند؛ پس نرخ تغییر خط غیر تداخلي افزایش می‌یابد. اما با افزایش تعداد خط ناحیه تداخلي ( $N$ )، نرخ تغییر خط وسایل نقلیه غیر تداخلي کاهش می‌یابد [9]. مقادیر معادله پیش‌بینی نرخ تغییر خط غیر تداخلي با روش رگرسیونی چند متغیره به دست آمده‌اند و نتایج حاصل از آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

است. عبارت ( $LS-400$ ) در معادله ۴ بیانگر این است که اگر طول سایت در این تحقیق کمتر از ۴۰۰ فوت باشد، نمی‌توان تغییر خط اختیاری توسط وسایل نقلیه تداخلي را در نظر گرفت [9]. زیرا مشاهدات از سایت‌های ۱۳ و ۱۶ نشان می‌دهد، اگر طول ناحیه تداخلي از حدی کوتاه‌تر باشد، تغییر خط اختیاری (علاوه بر حداقل تغییر خط) در ناحیه تداخلي به ندرت اتفاق می‌افتد.

جدول (۲) همبستگی مقادیر ثابت

مقادیر	A	b	C
A	1.000	-.503	-.876
B	-.503	1.000	.027
C	-.876	.027	1.000

شکل (۲) نتایج ارزیابی مدل پیش‌بینی تغییر خط تداخلي را نشان می‌دهد که انحراف استاندارد معادل ۳۱۵ (تغییر خط/ساعت) و ضریب همبستگی برابر ۰.۸۲۲ به دست آمده است.

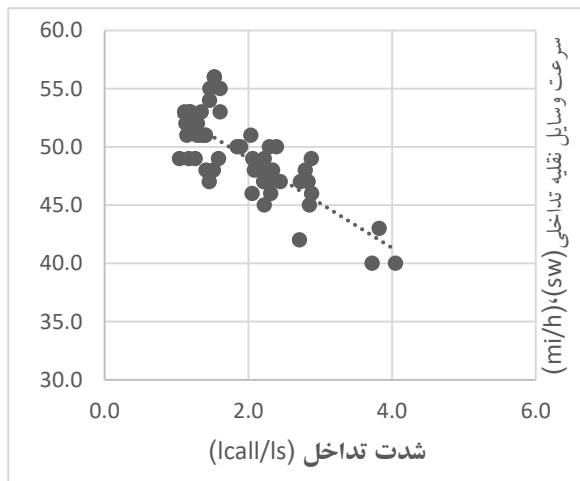


شکل (۲) مقایسه نرخ تغییر خط پیش‌بینی شده و اندازه گیری شده

جدول (۳). نتایج آزمون رگرسیونی خطی

تعداد نمونه	R-square	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_0$ p-value	$\beta_1$ p-value	$\beta_2$ p-value	$\beta_3$ p-value
53	.818	20.7	.162	.645	-137.8	0.127	.013	.004	.000

شکل (۴). تغییرات سرعت تداخلی در برابر شدت تداخل



#### ۵-۱- مدل پیشنهادی سرعت تداخلی

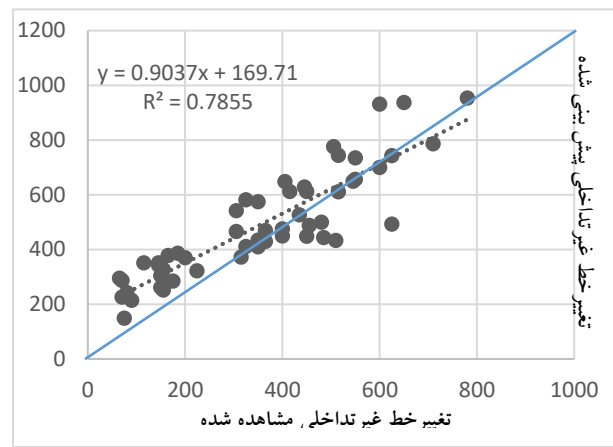
فرض منطقی در مدل سرعت این است که ماکزیمم سرعت ( $S_{MAX}$ ) در نواحی پایه آزادراهی، معادل FFS است که به دلیل وجود شدت تداخل در ناحیه تداخل، از مقدار سرعت وسایل نقلیه تداخلی در این ناحیه کاسته می شود. حداقل سرعت تداخلی مطابق شرایط آزادراهی مورد مطالعه و با توجه به TRB2008، ۱۵ مایل بر ساعت در نظر گرفته شده است. مدل پیش بینی سرعت بعد از کالیبراسیون معادله شدت تداخل به صورت معادلات ۶ و ۷ ارائه شده است [۹،۴]. مقادیر ثابت معادله شدت تداخل و مقدار  $R^2$  در جدول (۴) نشان داده شده است.

$$Sw = 15 + \frac{[FFS-15]}{1+Ww} \quad (۶)$$

$$Ww = 0.307 \times \left(\frac{Lcall}{Ls}\right)^{0.769} \quad (۷)$$

در اینجا،  $Sw$  سرعت تداخلی، FFS سرعت جریان آزاد برای آزادراه (مایل بر ساعت)،  $Ww$  فاکتور شدت تداخل برای

با توجه به نتایج آنالیز مدل پیش بینی تغییر خط غیر تداخلی که در شکل به صورت نمودار آورده شده است، انحراف استاندارد معادل ۲۰۸ (تغییر خط / ساعت) و ضریب همبستگی برابر ۰٫۷۸ به دست آمده است.



شکل (۳). مقایسه نرخ تغییر غیر تداخلی مشاهده شده و پیش بینی شده

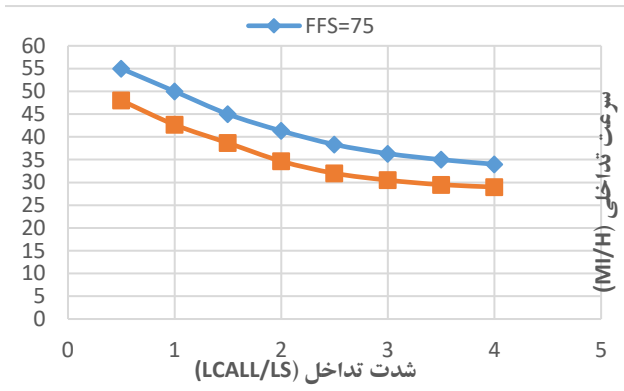
#### ۵- پیش بینی سرعت متوسط وسایل نقلیه تداخلی

در آیین نامه HCM2000، یکی از متغیرهای مهم در مدل سرعت، تراکم یا شدت تداخل در ناحیه تداخلی است که در تعریف آن، پارامترهایی مانند نسبت حجم ( $V_R$ )، تقاضای کل ناحیه بر هر خط ( $V/N$ ) و طول ناحیه تداخل ( $L_S$ )، وجود دارند. اما در مطالعات تکمیلی به جای ( $V_R$ ) و ( $V/N$ )، تعداد کل تغییر خطوط در ناحیه تداخل ( $L_{CALL}$ )، معرفی شده است [۹]. مهم ترین عامل در سرعت تداخلی وسایل نقلیه در ناحیه تداخل، نسبت تعداد کل تغییر خطوط به طول ناحیه تداخل ( $L_{CALL}/L_S$ ) است که این نسبت نشان دهنده شدت تداخل در ناحیه تداخلی است [۹]. مطابق شکل، با افزایش شدت تداخل، سرعت وسایل نقلیه تداخلی کاهش می یابد.

پیشنهادی، بیشتر قابل پیش‌بینی است. البته نتایج حاصل از روش HCM 2010، مستقل از پایگاه داده‌های فعلی است.

### ۵-۲- آنالیز حساسیت سرعت تداخلی

تأثیر متغیرهای کلیدی شامل شدت تداخل ( $LC_{all}/L_S$ ) و FFS بر سرعت وسایل نقلیه تداخل (وسایل نقلیه تداخلی) در شکل نشان داده شده است.



شکل (۶). نمودار آنالیز حساسیت سرعت تداخلی

شکل نشان می‌دهد که:

با افزایش سرعت جریان آزاد (FFS)، سرعت وسایل نقلیه تداخلی افزایش می‌یابد.  
 با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی، شدت تغییرات سرعت وسایل نقلیه تداخلی کاهش می‌یابد.  
 با افزایش شدت تداخل، تفاوت بین سرعت‌های تداخلی در شرایط FFS=75 و FFS=65 (مایل بر ساعت) کاهش می‌یابد.

### ۵-۲- پیش‌بینی سرعت متوسط وسایل نقلیه غیر

#### تداخلی

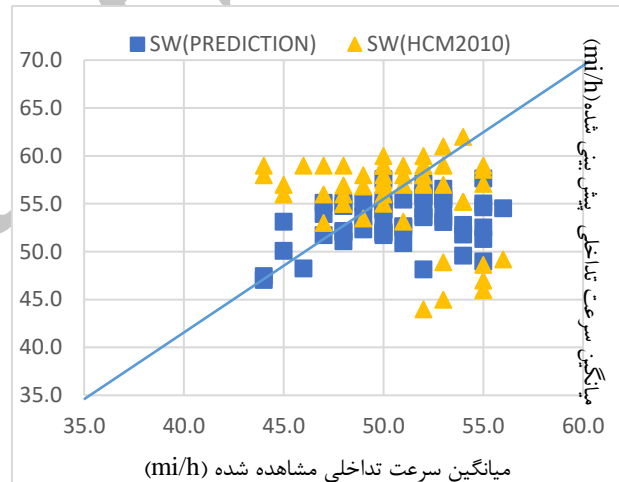
در این مطالعه برای تحلیل سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی، از روش متفاوتی نسبت به HCM2010 استفاده شده است. طبق مطالعات اخیر سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی معادل سرعت جریان آزاد (FFS) فرض شده است، اما بدلیل وجود آشفستگی در ناحیه تداخلی، از مقدار آن کاسته می‌شود همچنین برای

وسایل نقلیه تداخلی،  $a$  و  $b$  مقادیر ثابت کالیبراسیون و  $L_S$  طول بخش تداخل (ft) است. همچنین نشان دهنده مجموع نرخ تغییر خط تداخلی و غیر تداخلی است که مقدار آن از مجموع تغییر خطوط محاسبه شده از معادلات تغییر خط بدست می‌آید.

### جدول (۴). پیش‌بینی مقادیر ثابت برای سرعت تداخلی

a	b	$R^2$
0.307	0.769	0.714

مقدار  $R^2$  برای مدل پیشنهادی سرعت وسایل نقلیه تداخلی معادل ۰٫۴۵ بدست آمده است. همچنین به منظور بررسی دقت مدل پیشنهادی، سرعت تداخلی محاسبه شده از مدل پیشنهادی و روش HCM2010، با سرعت تداخلی اندازه‌گیری شده در سایت مقایسه شده‌اند که در شکل نشان داده شده است.



شکل (۵). مقایسه سرعت تداخلی مشاهده شده و پیش‌بینی شده

نتیجه این اعتبارسنجی نشان می‌دهد که تعداد پیش‌بینی‌های نزدیک‌تر به سرعت اندازه‌گیری شده، به‌طور پراکنده در هر دو پیش‌بینی سرعت وجود دارد، اما مقدار انحراف استاندارد برای سرعت وسایل نقلیه تداخلی، در مدل پیشنهادی 4.5mi/h و در روش HCM2010 6.3mi/h است که نشان می‌دهد در شرایط مشابه، نتایج سرعت تداخلی برای مدل



در اینجا،  $S_{nw}$  سرعت تداخلی، FFS سرعت جریان آزاد برای آزادراه (مایل بر ساعت)،  $W_{nw}$  فاکتور شدت تداخل برای وسایل نقلیه تداخلی،  $a$  و  $b$  مقادیر ثابت کالیبراسیون و  $L_S$  طول بخش تداخل (ft) است. همچنین  $LC_{all}$  نشان دهنده مجموع نرخ تغییر خط تداخلی و غیر تداخلی است که مقدار آن از مجموع تغییر خطوط محاسبه شده از معادلات تغییر خط بدست می آید.

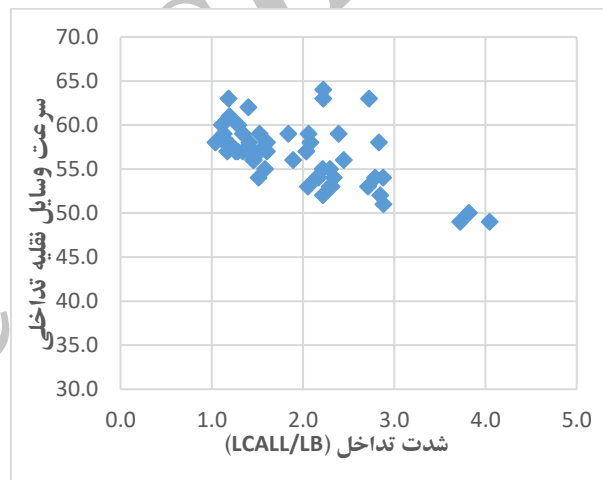
**جدول (۵). پیش بینی مقادیر ثابت برای سرعت غیر تداخلی**

A	b	$R^2$
0.245	0.448	0.615

مقدار  $R^2$  برای مدل پیشنهادی سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی معادل ۰,۳۷ بدست آمده است. همچنین به منظور بررسی دقت مدل پیشنهادی، سرعت غیر تداخلی محاسبه شده از مدل پیشنهادی و روش HCM2010، با سرعت غیر تداخلی اندازه گیری شده در سایت مقایسه شده اند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

نتیجه این اعتبارسنجی نشان می دهد که تعداد پیش بینی های نزدیک تر به سرعت اندازه گیری شده، به طور پراکنده در هر دو پیش بینی سرعت وجود دارد، اما مقدار انحراف استاندارد برای سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی، در مدل پیشنهادی 5.2 mi/h و در روش HCM2010 7.3mi/h است که نشان می دهد در شرایط مشابه، نتایج سرعت غیر تداخلی برای مدل پیشنهادی، بیشتر قابل پیش بینی است.

تخمین سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی از حداقل تعداد تغییر خط ( $LC_{MIN}$ ) و حجم کل ناحیه بر هر خط ( $V/N$ ) استفاده شده است. اما مطالعاتی که بر روی برخی از بزرگراه های ایران انجام شده است نشان می دهد که شدت تداخل ( $LC_{all}/L_S$ ) و سرعت جریان آزاد (FFS) عوامل تأثیرگذار بر سرعت غیر تداخلی هستند [۴،۱۱]. همچنین شکل (۷)، روند تغییرات سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی در برابر شدت تداخل برای این مطالعه را نشان می دهد که با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی، سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی کاهش می یابد.



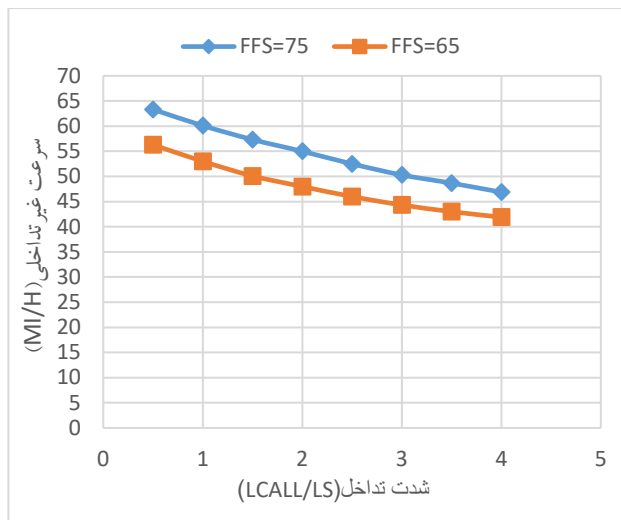
**شکل (۷). تغییرات سرعت غیر تداخلی در برابر شدت تداخل**

### ۳-۵- مدل پیشنهادی سرعت غیر تداخلی

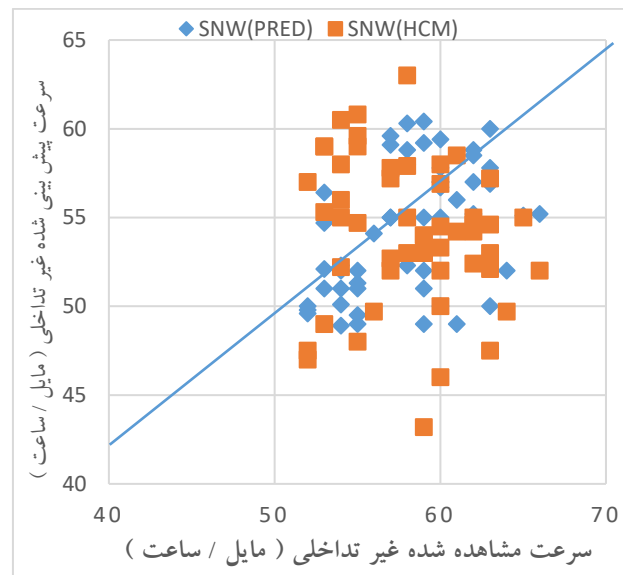
مدل پیش بینی برای سرعت وسایل نقلیه غیر تداخلی بعد از کالیبراسیون معادله شدت تداخل به صورت معادلات ۸ و ۹ ارائه شده است. مقادیر ثابت معادله شدت تداخل و مقدار  $R^2$  در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$S_{nw} = 15 + \left[ \frac{FFS-15}{1+Ww} \right] \quad (8)$$

$$W_{nw} = 0.245 \times \left( \frac{LC_{all}}{L_S} \right)^{0.448} \quad (9)$$



شکل (۹). نمودار آنالیز حساسیت سرعت غیر تداخلی



شکل (۸). مقایسه سرعت غیر تداخلی مشاهده شده و پیش بینی شده

### نتیجه گیری

یکی از نتایج مهمی که در این تحقیق قابل توجه است، اعتبار بالای معادلات تغییر خط است که در صحت سرعت تداخلی و غیر تداخلی، تأثیر مستقیم دارد. علاوه بر این مقایسه مدل‌های پیش بینی شده و HCM2010 برای شرایط مشابه نشان می‌دهد که مدل‌های پیش بینی شده، بیشتر از مدل HCM2010 قابل پیش بینی است. این نتایج می‌تواند برای کشورهایایی که شرایط ترافیکی و رانندگی مشابه ایران دارند، قابل توجه باشد. نتایج به دست آمده از معادلات سرعت تداخلی و غیر تداخلی، نشان می‌دهد که:

با افزایش سرعت جریان آزاد (FFS)، سرعت تداخلی و غیر تداخلی افزایش می‌یابد.

با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی، سرعت تداخلی و غیر تداخلی کاهش می‌یابد.

با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی، شدت تغییرات سرعت تداخلی و غیر تداخلی کاهش می‌یابد.

با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی تفاوت سرعت‌های تداخلی و غیر تداخلی در شرایط FFS=75 و FFS=65 (مایل بر ساعت) کاهش می‌یابد.

### ۴-۵- آنالیز حساسیت سرعت غیر تداخلی

تأثیر متغیرهای کلیدی بر سرعت وسایل نقلیه تداخل در شکل (۹) نشان داده شده است. متغیرهای کلیدی شامل شدت تداخل (LC<sub>all</sub>/LS) و FFS هست. شکل (۹) نشان می‌دهد که:

با افزایش سرعت جریان آزاد (FFS)، سرعت وسایل نقلیه تداخلی افزایش می‌یابد.

با افزایش شدت تداخل در ناحیه تداخلی، شدت تغییرات سرعت وسایل نقلیه تداخلی کاهش می‌یابد.

با افزایش شدت تداخل، تفاوت بین سرعت‌های تداخلی در شرایط FFS=75 و FFS=65 (مایل بر ساعت) کاهش می‌یابد.

14. Cassidy, M., Chan, P., Robinson, B., & May, A. D. (1990). A Proposed Analytical Technique for the Design and Analysis of Major Freeway Weaving Sections. Final Report (No. FHWAUCBITSRR-90-16).
15. Abdullah, R., & Sadullah, A. F. M. (2017, July). A study on traffic weaving segment level of service on Malaysia urban highway. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1865, No. 1, p. 090001). AIP Publishing.
16. Marczak, F., Leclercq\*, L., & Buisson, C. (2015). A macroscopic model for freeway weaving sections. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(6), 464-477.
17. Geistefeldt, J., Giuliani, S., Vortisch, P., Leyn, U., Trapp, R., Busch, F., & Celikkaya, N. (2014). Assessment of level of service on freeways by microscopic traffic simulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2461), 41-49.
18. Jolovic, D. (2012). Use of microsimulation to assess HCM 2010 methodology for oversaturated freeway segments. Florida Atlantic University.
1. Committee on Highway Capacity, Department of Traffic and Operations, Highway Research Board. *Highway Capacity Manual: Practical Applications of Research*. Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1950.
2. Normann, O. K. (1957). Operation of weaving areas. *Highway Research Board Bulletin*, 167, 38-41.
3. Windover, J. R., & May, A. D. (1994). Revisions to level D methodology of analyzing freeway ramp weaving sections. *Transportation Research Record* (1457).
4. NCHRP. (2011). *Guidelines for Ramp and Interchange Spacing*: Transportation Research Board.
5. TCTTS. (2014). *Establishing a Model for Weaving Sections in Iran*. Iran: Tehran Comprehensive Traffic and Transportation Studies Company.
6. Moskowitz, K, and Newman, L, Notes on Highway Capacity, *Traffic Bulletin* 4, California Department of Highways, Sacramento CA, July 1962.
7. Leisch, J. (1983). *Completion of Procedures for Analysis of and Design of Traffic Weaving Areas*. Washington DC: Final Report, Vols 1 and 2, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
8. Pignataro, et al, *Weaving Area Operations Study*, Final Report, NCHRP Project 3-15, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn NY, 1973.
9. Roess, R., et al, *Analysis of Freeway Weaving Sections*, NCHRP Project 3-75, Final Report, Polytechnic University, Brooklyn NY, and Kittelson & Associates, Portland OR, August 2007.
10. Ghavidel Abraghan, R., & Afandizadeh Zargari, S. (2016). Developing a Model for Estimating Weaving and Non-Weaving Speed within Highways Weaving Segments (Tehran). *International Journal of Transportation Engineering*, 4(2), 75-86.
11. Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, 2010, published by the National Research Council, Washington DC.
12. Manual, H. C. (2000). *Highway capacity manual*. Washington, DC, 11.
13. Transportation Research Board (2008) "Analysis of freeway weaving sections", Final Report.