

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های

متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع تصادفات

(مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزوار)

محمدرضا خیراندیش، کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، ایران
سینا صاحبی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

E-mail: s_sahebi@sbu.ac.ir

حمید مدنی، کارشناسی، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

چکیده

سازگاری طراحی هندسی سطح ارتباط بین انتظارات راننده از راه و رفتار هندسه راه را می‌سنجد به صورتی که وجود ناسازگاری‌های هندسی به عنوان عاملی مهم در تصادفات جاده‌ای شناخته می‌شود. تغییر ناکهانی در قوس‌ها مانند وجود یک قوس پس از یک مسیر مستقیم طولانی یا یک قوس با شعاع کم پس از یک قوس با شعاع زیاد نشان دهنده ناسازگاری در قوس‌ها است. ارزیابی هندسه راه توسط شاخص‌های ناسازگاری، نیازمند اطلاعات هندسه راه و پروفیل سرعت عملکردی (سرعت ۸۵ درصدی) است. به دلیل عدم وجود اطلاعات هندسی راه‌ها در کشور، مطالعه در این زمینه دشوار است. در این تحقیق ابتدا به روش استخراج اطلاعات هندسی راه از داده‌های متن‌باز پرداخته شده و سپس بر اساس آن اطلاعات و مدل‌های سرعت عملکردی، پروفیل سرعت برای محور مورد مطالعه ترسیم شده است. پس از اعمال روش‌های قطعه‌بندی، برای هر کدام از آن‌ها، ارتباط بین شاخص‌های ناسازگاری و انواع تصادفات توسط توابع عملکردی ایمنی با یک مدل پواسون یا دوجمله‌ای منفی بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد روش قطعه‌بندی با طول ثابت و قطعات ۵۰۰ متری، روش مناسب برای دستیابی به قطعات همگن است و همچنین مشخص شد شاخص‌های ناسازگاری بر تصادفات واژگونی از میان انواع تصادفات، تاثیر معناداری دارد. از نظر سطح معناداری، شاخص ناسازگاری کاستلو که با استفاده از سرعت اینرشیال محاسبه می‌شود، بهترین ارتباط را با تصادفات واژگونی در یک راه دوخطه نشان داد. توسعه شیوه محاسبات سرعت اینرشیال و بهینه سازی ارتباط شاخص کاستلو با تصادفات واژگونی نشان داد مقدار بازه زمانی قبل از هر نقطه ۱۴ ثانیه و مقدار آلفا برابر با ۴/۱ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی تصادفات دارد.

واژه‌های کلیدی: سازگاری، طرح هندسی، نقشه متن‌باز، تصادف، راه دوخطه

۱. مقدمه

قطعه‌بندی راه به قطعات همگن، روش‌های متنوعی ارائه شده- است که متداول‌ترین آن‌ها قطعات با طول ثابت، روش ژرمن^۱ و روش پیشنهادی HSM^۲ است (Cafiso, D'Agostino, and Persaud 2018; Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, and García 2018b). ناسازگاری با دو روش موضعی^۳ و کلی^۴ اندازه‌گیری می‌شود. در مدل موضعی هدف شناسایی مشکل در یک عنصر راه است همانند تفاوت زیاد سرعت طراحی و عملکردی یا کاهش‌های سرعت ناگهانی، در حالی که در مدل‌های کلی، تغییرات سرعت در کل یک قطعه همگن، به منظور تخمین تعداد تصادف‌های راه به وسیله توابع عملکرد ایمنی، تحلیل می‌شود (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, and García 2019). تا کنون به بررسی مدل‌های کلی سازگاری در راه‌های ایران پرداخته نشده‌است و این تحقیق علاوه بر تعیین شاخص-های ناسازگاری مناسب برای آن، به دنبال ارزیابی ارتباط شاخص‌های ناسازگاری با انواع تصادفات است. پس از آن با هدف پیشینه کردن معناداری شاخص کاستلو^۵ با تصادفات واژگونی، به توسعه شیوه محاسبه سرعت اینرشیال^۶ پرداخته شده‌است.

در قسمت پیشینه تحقیق و مبانی نظری، در ابتدا به بررسی انواع مدل‌های ارائه شده سازگاری طرح هندسی و پس از آن به مدل-های توسعه یافته مختلف در زمینه محاسبه سرعت عملکردی برای راه‌های دوخطه، پرداخته شده‌است. محاسبه شاخص‌های ناسازگاری در قطعات همگن راه انجام می‌شود که جزئیات روش‌های مختلف استفاده شده در مطالعات پیشین برای دست-یابی به قطعات همگن نیز بررسی شده‌است.

۲. ادبیات پژوهش و مبانی نظری

اندازه‌گیری شاخص‌های ناسازگاری به دو صورت موضعی و کلی انجام می‌شود (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, et al. 2019). لم^۷ و همکارانش با در نظر گرفتن مقدار آستانه برای میزان کاهش سرعت در عناصر

چگونگی ارتباط رفتار راه و انتظارات رانندگان، سازگاری طراحی هندسی نامیده می‌شود و با وقوع تصادفات جاده‌ای ارتباط نزدیکی دارد (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, and García 2018a). به صورتی که با کاهش سازگاری در قطعه راه، نرخ تصادف افزایش می‌یابد (Llopis-Castelló, Findley, et al. 2019). استفاده از توابع عملکرد ایمنی که دارای یک شاخص ناسازگاری است، مهندسان ایمنی را قادر می‌سازد تا تاثیرات عوامل انسانی را در ارزیابی ایمنی جاده نیز در نظر بگیرند (Llopis-Castelló, Findley, and García 2020). ویژگی‌های هندسی راه، کنترل کننده سرعت و همچنین وقوع تصادفات هستند. تغییر ناگهانی در قوس‌ها مانند وجود یک قوس پس از یک مسیر مستقیم طولانی یا یک قوس با شعاع کم پس از یک قوس با شعاع زیاد نشان دهنده ناسازگاری در قوس‌ها است (Jacob, Dhanya, and Anjaneyulu 2013). بنابراین طراحی راه باید از نظر سازگاری هندسی ارزیابی شود، که این ارزیابی می‌تواند بر اساس سرعت عملکردی، حجم کاری راننده (Driver Work Load)، شاخص‌های مسیر و پایداری وسیله نقلیه باشد (Choudhari, Sil, and Maji 2022) و رایج‌ترین آن استفاده از پروفیل سرعت عملکردی که رفتار راه را نشان می‌دهد، است (Gibreel et al. 1999; Ottesen and Krammes 2000). برای ترسیم پروفیل سرعت عملکردی در قطعات همگن راه، مدل‌های بسیاری برای سرعت ۸۵ درصدی (سرعت عملکردی) در قوس و تانژانت، در رده‌های عملکردی مختلف راه توسعه داده شده‌است که با ترکیب آن‌ها با مدل‌های محاسبه شتاب افزایشی یا کاهش‌ی و یا در نظر گرفتن مقداری ثابت برای شتاب، می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. پیش‌نیاز ترسیم پروفیل سرعت اطلاعات هندسی راه است که به دلیل عدم وجود داده قابل دسترس آن در کشور این تحقیق به دنبال راهکاری برای دستیابی به آن از طریق نقشه‌های متن باز است. همچنین برای

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزواری)

عنصر هندسی متوالی (شاخص‌های موضعی) یا کل تغییرات سرعت در طول یک قطعه همگن راه (شاخص‌های کلی) باشد. (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, et al. 2019)

۱-۱-۲ شاخص‌های ناسازگاری موضعی

المزید و همکاران با مطالعه کاهش سرعت عملکردی برای وسایل نقلیه مختلف، بر اساس داده‌های هندسی و سرعت جریان آزاد، که با اندازه‌گیری مدت زمان طی کردن ۴۰ متر به دست آمده بود، به بررسی درجه انحنای، طول قوس قائم در قوس افقی، شیب و شرایط روسازی پرداخته‌اند. برای دو حالت وجود یک قوس مدل (۱) و قوس‌های متوالی مدل (۲) را ارائه داده‌اند. (Al-Masaeid et al. 1995)

$$\Delta V_A = 1.84 + 1.39DC + 4.09PC + 0.07G^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.77$$
$$\Delta V_A = \frac{5081}{R_2} - \frac{5081}{R_1} \quad (2)$$

$R^2 = 0.81$
در رابطه (۱) شرایط روسازی با (PC)، درجه انحنای با (DC)، شیب با (G) و در رابطه (۲) شعاع قوس اول با R_1 ، شعاع قوس دوم با R_2 و مقدار کاهش سرعت در دو قوس متوالی با (ΔV_A) نمایش داده شده است. در ادامه با در نظر گرفتن مقدار کاهش سرعت تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت در یک عنصر هندسی نسبت به عنصر قبل از آن به عنوان معیار سازگاری خوب، جدول‌هایی از حالت‌های مختلف ترکیب متغیرها برای دست‌یابی به یک سازگاری خوب ارائه داده‌اند. (Al-Masaeid et al. 1995)
لم و همکاران دو معیار متفاوت برای تعیین سطح سازگاری پیشنهاد داده‌اند. در یک عنصر راه تعیین سطح سازگاری بر اساس اختلاف سرعت عملکردی v_{85} با سرعت طراحی v_d و برای دو عنصر متوالی، بر اساس اختلاف سرعت عملکردی v_{85} آن‌ها انجام می‌شود. معیارهای قرارگیری در سطوح مختلف سازگاری مطابق جدول (۱) است. (Lamm et al. 1988)

متوالی و اختلاف سرعت طرحی با سرعت عملکردی متداول ترین روش بررسی موضعی ناسازگاری را ارائه داده‌اند (Lamm et al. 1988). در این زمینه المزید^۸ و همکاران نیز با محاسبه کاهش سرعت عملکردی در عناصر راه و انتخاب مقدار آستانه‌ای برای آن، جداولی از ترکیب متغیرهای موثر بر کاهش سرعت، برای داشتن یک مسیر سازگار ارائه داده‌اند (Al-Masaeid et al. 1995). برای شاخص‌های ناسازگاری کلی، پولس^۹ و همکاران و گرچ^{۱۰} و همکاران با بررسی اختلاف سرعت عملکردی از میانگین آن (Garach et al. 2014; Polus and Mattar-Habib 2004) کاماچو^{۱۱} و همکاران با بررسی میانگین سرعت عملکردی و میانگین کاهش سرعت‌ها در قطعه راه (Camacho-Torregrosa et al. 2013) و کاستلو و همکاران با ارائه سرعت اینرشیا و بررسی اختلاف آن با سرعت عملکردی (Llopis-Castelló et al. 2018b) به ارزیابی ناسازگاری پرداخته‌اند.

همچنین در زمینه مدل‌های سرعت عملکردی در راه‌های دوخطه، در تحقیقات مختلف تأثیر متغیرهای هندسی همانند شعاع قوس، طول، نرخ تغییرات انحنای، عرض شانه، عرض خط و AADT بررسی شده است. در مورد روش‌های قطعه‌بندی، روش‌های رایج مورد استفاده در مطالعات مختلف از جمله روش ژرمن که اساس آن نرخ تغییرات انحنای است (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, et al. 2019) و روش پیشنهادی HSM که با ایجاد تغییر در معیارهای آن به قطعه‌بندی مسیر می‌پردازد، آورده شده است. در ادامه به بررسی انواع شاخص‌های ناسازگاری، مدل‌های سرعت عملکردی و روش‌های مختلف قطعه‌بندی پرداخته می‌شود.

۱-۲ سازگاری طرح هندسی

بنا بر تعریف، به چگونگی ارتباط رفتار راه و انتظارات رانندگان، سازگاری طراحی هندسی گفته می‌شود و بر اساس تغییرات سرعت بررسی می‌گردد. بررسی تغییرات سرعت می‌تواند در دو

جدول ۱. تعیین سطح سازگاری لم و همکارن

سطح سازگاری	برای یک عنصر راه	برای دو عنصر متوالی
خوب	$ v_{85} - v_a \leq 10$	$ v_{85} - v_{85}^{i+1} \leq 10$
متوسط	$10 \leq v_{85} - v_a \leq 20$	$10 \leq v_{85} - v_{85}^{i+1} \leq 20$
ضعیف	$ v_{85} - v_a > 20$	$ v_{85} - v_{85}^{i+1} > 20$

$$ECR = 1.051e^{-0.377C_p} \quad (۶)$$

$$R^2 = 0.638$$

جدول ۲. معیارهای تعیین سطح سازگاری پولس و همکارن

سطح سازگاری		
ضعیف	متوسط	خوب
$C_p \leq 1$	$1 < C_p \leq 2$	$C_p > 2$

با مقایسه مقدار رابطه (۳) و مقادیر آستانه جدول (۲) برای سطوح مختلف سازگاری، هر قطعه راه در سه دسته خوب، متوسط و ضعیف قرار می‌گیرد. (Polus and Mattar-Habib 2004)

گرچ و همکاران همان متغیرهای مطالعه پولس را بر روی بزرگراه‌های دوخطه برون شهری در استان گرگاندا^{۱۲} در اسپانیا مطالعه کردند. به عنوان نتیجه دریافتند که پارامتر سازگاری ارائه شده در آن مطالعه محافظه کارانه است و مدل سازگاری دیگری مطابق رابطه (۷) با همان بازه‌های کیفی ولی با ساختاری متفاوت ارائه دادند. (Garach et al. 2014)

$$C_G = \frac{195.073}{\left(\frac{\sigma}{3.6} - 5.7933\right)(4.1712 - R_a) - 26.6047} \quad (۷)$$

کاستلو و همکاران مدل سازگاری جدیدی بر اساس پروفیل اختلاف سرعت اینرشیال و سرعت عملکردی در راه‌های دوخطه اسپانیا ارائه دادند. سرعت اینرشیال رابطه (۸) انتظارات راننده را نشان می‌دهد و در هر نقطه می‌تواند بر اساس بازه زمانی یا مکانی قبل آن محاسبه شود. هر بازه‌ی زمانی به اجزاء ۰/۱ ثانیه‌ای و هر محدوده مکانی به اجزاء یک متری تقسیم شده و به سرعت هر جزء مطابق رابطه (۸) وزن داده می‌شود. در رابطه (۹) پارامتر α تعیین کننده شکل توزیع تابع است و مقدار آن می‌تواند بین ۰ تا ۱۰ باشد. برای محاسبه سرعت اینرشیال هر نقطه، ترکیب بازه-های زمانی (از ۵ تا ۴۰ ثانیه با گام‌های ۵ ثانیه‌ای) یا محدوده‌های

با توجه به جدول (۱) اختلاف سرعت‌های کمتر از ۱۰ کیلومتر بر ساعت در سطح سازگاری خوب، اختلاف سرعت‌های بیش از ۱۰ و کمتر از ۲۰ کیلومتر بر ساعت در سطح سازگاری متوسط و در اختلاف سرعت‌های بیش از ۲۰ کیلومتر بر ساعت، طرح هندسی ناسازگار ارزیابی می‌شود. (Lamm et al. 1988)

۲-۱-۲ شاخص‌های ناسازگاری کلی

پولس و همکاران بر اساس این فرض که هر چه تغییرات سرعت در یک قطعه از راه بیش‌تر باشد، احتمال وقوع تصادف در آن بیشتر است، اولین مدل کلی بررسی سازگاری را بر اساس متغیرهای مساحت نسبی R_a و رابطه انحراف سرعت عملکردی σ توسعه داده‌اند که با سه بازه کیفی سطح سازگاری را تعیین می‌کند.

$$C_p = 2.808e^{-0.278R_{a\frac{\sigma}{3.6}}} \quad (۳)$$

$$R_a = \frac{\sum_i^n a_i}{L} \quad (m/s) \quad (۴)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{85i} - \bar{V}_{85})^2}{n}} \quad (km/h) \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵) مساحت محصور بین پروفیل سرعت عملکردی و میانگین سرعت عملکردی (m/s^2) ؛ L طول قطعه همگن راه (m) ؛ \bar{V}_{85} سرعت عملکردی وزن‌دار شده میانگین V_{85i} ؛ (km/h) سرعت عملکردی در ایستگاه i (km/h) و n تعداد بازه‌ها (n) برابر L است، هنگامی که i متر به متر در نظر گرفته شود). تابع عملکرد ایمنی (۶) بر اساس داده‌های مربوط به ۹ بزرگراه دوخطه توسعه یافته و با داده‌های ۲۸ بزرگراه دوخطه ایالات متحده تحلیل شده که در آن ECR تخمین نرخ تصادفات و C_p شاخص ناسازگاری است. (Polus and Mattar-Habib 2004)

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزوار)

کاماچو و همکاران ارتباط بین ۱۲ متغیر مرتبط به سازگاری با نرخ تصادفات در ۳۳ راه دوخطه در اسپانیا، بررسی کرده‌اند. پس از دسته‌بندی متغیرهایی که همبستگی بالایی داشته‌اند، مهمترین هر دسته با توجه به مطالعات قبل و راحتی اندازه‌گیری انتخاب و در نهایت ارتباط این ۵ متغیر با نرخ تصادفات بررسی شده- است. تابع عملکرد ایمنی با سه ساختار مختلف با استفاده از تک تک این ۵ متغیر ساخته شده و مدل نهایی (۱۲) ارائه شده- است. (Camacho-Torregrosa et al. 2013)

$$ECR = \frac{1}{3.36708 + 0.0000029176 \left(\frac{\bar{v}_{85}^2}{\Delta v_{85}} \right)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = 0.482$$

تخمین نرخ تصادف با ECR ، مقدار میانگین کاهش سرعت‌ها در هر قطعه با Δv_{85} میانگین سرعت عملکردی در قطعه با \bar{v}_{85}^2 نشان داده شده و شاخص ناسازگاری در آن مطابق رابطه (۱۳) است.

$$C = \frac{\bar{v}_{85}^2}{\Delta v_{85}} \quad (13)$$

۲-۲ مدل‌های سرعت عملکردی در راه‌های دو خطه

در زمینه محاسبه و ترسیم پروفیل سرعت عملکردی مدل‌های متعددی برای تانژانت و قوس با استفاده از مشخصات هندسی راه و هندسه قوس، شرایط وسیله نقلیه و رفتار راننده توسعه یافته است (Matikana, sciences, and 2022 n.d.).
پرز^{۱۳} و همکاران با استفاده از داده‌هایی که از دستگاه GPS نصب شده بر روی خودروها به دست آمده بود و با بررسی متغیرهای نرخ تغییر انحنا CCR ، شعاع قوس R ، سرعت در قوس $V_{85,c}$ و سرعت مطلوب برابر با ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت مدل‌های متفاوتی برای سرعت در قوس، سرعت در تانژانت و شتاب کاهشی در راه دوخطه ارائه داده‌اند. برای سرعت در قوس‌ها بر اساس محدوده شعاع آن دو رابطه (۱۴) و (۱۵) و بر اساس نرخ تغییر انحنا رابطه (۱۶) ارائه شده‌است. (Pérez Zuriaga et al. 2010)

مکانی (از ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر با گام‌های ۱۰۰ متری) با مقادیر متعدد پارامتر α (از ۰ تا ۱۰ با گام‌های ۱ واحدی) در رابطه (۹) در نظر گرفته شده و بهترین نتیجه در محدوده زمانی برابر ۱۵ ثانیه و توزیع وزنی با مقدار $\alpha = 6$ در رابطه (۹) حاصل شده‌است.

(Llopis-Castelló et al. 2018b)

$$V_{i,k} = \frac{\sum w_j V_{85,j}}{\sum w_j} \quad 0 \leq w_j \leq 1 \quad (8)$$

$$w_j = \left(\frac{-1}{n^2} + \frac{\alpha}{5n^2} \right) j^2 + \frac{2-\alpha}{5} j \quad (9)$$

در رابطه (۸)، $V_{i,k}$ سرعت اینرشیال در نقطه k ، $V_{85,j}$ سرعت عملکردی در نقطه j ، w_j ضریب وزنی در نقطه j و در رابطه (۹) n تعداد کل اجزاء در هر بازه زمانی یا محدوده مکانی، α پارامتر تعیین کننده شکل تابع و j شماره هر جزء (از صفر تا n) است.

تابع عملکرد ایمنی (۱۰) بهترین برازش بر اساس معیار AIC را داشته و رابطه (۱۱) به عنوان شاخص ناسازگاری ارائه شده‌است.

$$y = e^{-6.6479L^{1.02645} AADT^{0.86684} e^{0.14774C_L}} \quad (10)$$

$$C_L = \sqrt{\frac{A(+)\sigma(+)}{L(+)}} \quad (11)$$

y تعداد تصادفات، L طول قطعه، $AAADT$ متوسط ترافیک روزانه در یکسال، مساحت قسمت مثبت زیر نمودار اختلاف سرعت عملکردی با محور افقی $A+$ ، انحراف استاندارد اختلاف سرعت‌ها در قسمت‌های مثبت نمودار $\sigma+$ و طول قطعه در قسمت‌های مثبت نمودار $L+$ است.

جدول ۳. معیارهای تعیین سطح سازگاری مدل کاستلو

سطح سازگاری		
ضعیف	متوسط	خوب
$C_L \geq 4.5$	$2.75 < C_L < 4.5$	$C_L \leq 2.75$

با مقایسه مقدار به دست آمده از رابطه (۱۱) و مقادیر آستانه جدول (۳) برای سطوح مختلف سازگاری، هر قطعه راه در سه دسته خوب، متوسط و ضعیف قرار می‌گیرد. (Llopis-Castelló et al. 2018b)

آن، جمع آوری شده بود. در نقطه ابتدا و میانه قوس حداقل ۱۰۰ مشاهده سرعت عملکردی در شرایط جریان آزاد، روز و خشک برداشت شده است و داده‌های حاصل از سرفاصله زمانی کمتر از ۵ ثانیه حذف شدند. تحلیل همبستگی نشان داد متغیر انحنای قوس $\frac{1}{R}$ با طول قوس L_C و دور e با زاویه شکست Δ همبستگی بالایی دارند. (Passetti and Fambro 1999)

مدل برای حالت با منحنی اتصال

$$V_{85}^{TC} = 82.91 - 0.09\Delta + 0.52L_C \quad (21)$$

$$R^2 = 0.83$$

مدل برای حالت بدون منحنی اتصال

$$V_{85} = 93.3 - 0.42\Delta + 0.079L_C \quad (22)$$

$$R^2 = 0.68$$

آندوزا^{۱۵} به بررسی سرعت عملکردی در تانژانت‌های کوهستانی راه دوخطه در ونزوئلا که دارای حداقل عرض شانه ۱/۲ متر و عرض خط ۳/۶۵ متر بود، پرداخت. داده‌های سرعت با استفاده از رادار در شرایط جریان آزاد و حداقل سرفاصله ۶ ثانیه‌ای جمع آوری شده‌اند. مدل (۲۳) برای سرعت عملکردی در تانژانت بر اساس طول آن L و شعاع قوس قبلی R توسعه داده شده است. (Andueza 2000)

$$V_{85} = 100.69 - \frac{3032}{R} + 27.819L \quad (23)$$

$$R^2 = 0.78$$

کاستلو و همکاران که به بررسی تأثیر سازگاری طراحی هندسی در میزان تولید CO_2 پرداختند. قطعه همگن را قطعه‌ای با AADT ثابت، بدون وجود تقاطعی که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار رانندگان بگذارد و همچنین رفتار یکنواخت هندسی بر اساس روش ژرمن تعریف کردند. روش ژرمن بر اساس نمودار تجمعی قدر مطلق زاویه انحراف در کل راه، مطابق شکل زیر قسمت‌هایی که دارای شیب یکنواختی هستند را عنوان یک قطعه همگن در نظر می‌گیرد. (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, et al. 2019)

$$V_{85,c} = 97.4254 - \frac{3310.94}{R} \quad (14)$$

$$400m < R < 950m \quad R^2 = 0.84$$

$$V_{85,c} = 102.048 - \frac{3990.26}{R} \quad (15)$$

$$70m < R \leq 400m \quad R^2 = 0.76$$

$$V_{85,c} = \frac{1}{0.009483 + 0.0000152CCR} \quad (16)$$

$$R^2 = 0.79$$

برای سرعت در تانژانت رابطه (۱۷) ارائه شده است.

$$V_{85,T} = V_{85,c} + (1 - e^{-\lambda L}) * (V_{des} - V_{85,c}) \quad (17)$$

$$\lambda = 0.0135$$

$$+ (R - 100)(7.00625)(10^{-6})$$

برای شتاب کاهش دو رابطه (۱۸) و (۱۹) بر اساس متغیرهای شعاع و نرخ تغییر انحنای توسعه داده شده است.

$$d_{85} = 0.2635 + \frac{67.799}{R} \quad R^2 = 0.70 \quad (18)$$

$$d_{85} = 0.242186 + 0.00151CCR \quad (19)$$

$$R^2 = 0.71$$

لم و همکاران مدل (۲۰) برای سرعت عملکردی در قوس افقی با استفاده از داده‌های هندسی قوس‌ها با ویژگی‌هایی مثل شیب و فاصله از تقاطع توسعه دادند. میزان AADT در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰۰ وسیله نقلیه در روز و شامل انواع وسایل نقلیه می‌شد. مدل (۲۰) را برای سرعت در قوس‌های افقی با واحد مایل بر ساعت بر اساس عرض خط با واحد فوت LW ، عرض شانه با واحد فوت SW ، درجه انحنای DC و AADT ارائه داده‌اند.

(Lamm, Psarianos, and Mailaender 1999)

$$V_{85,c} = 34.7 - DC + 2.081LW + 0.174SW + 0.0004AADT \quad (20)$$

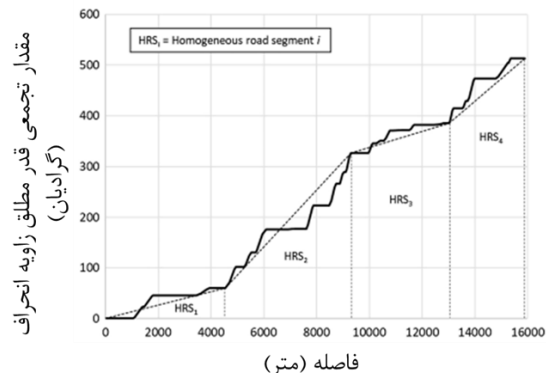
$$R^2 = 0.842$$

پاستی^{۱۴} و همکاران اثر منحنی‌های اتصال بر سرعت عملکردی را بررسی کردند و برای هر دو حالت با و بدون منحنی اتصال مدل سرعت بر اساس طول قوس و زاویه شکست آن ارائه دادند (روابط (۲۱) و (۲۲)). داده‌ها از ۵۱ محل در راه‌های دوخطه برون‌شهری شامل ۱۲ قوس با منحنی اتصال و ۳۹ قوس بدون

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزوار)

روش ژرمن برای دست‌یابی به قطعات همگن بررسی شده‌است. برای هر قطعه در هر روش قطعه‌بندی شاخص‌های ناسازگاری محاسبه شده و ارتباط آن به عنوان متغیر مستقل در یک مدل پواسون با انواع مختلف تصادف ارزیابی شده‌است. توسعه شاخص کاستلو با اعمال تغییر در شیوه محاسبات سرعت اینرشیا به صورت در نظر گرفتن بازه زمانی پیش‌رو برای هر نقطه علاوه بر بازه زمانی قبل از آن، نیز انجام شده‌است.



۳-۱ استخراج اطلاعات هندسی

استخراج اطلاعات هندسی در این تحقیق شامل شش مرحله است. برای این کار ابتدا لایه خطی مسیر از نقاط شکست آن تبدیل به پاره‌خط‌های تشکیل دهنده آن می‌شود. سپس با مقایسه شعاع گذرنده از هر سه نقطه متوالی با مقدار آستانه حداکثری شعاع، پاره‌خط‌های مابین آن در دو گروه قوس یا تانژانت قرار می‌گیرند و در گام بعد عناصر مشابه و متوالی به یکدیگر متصل می‌شود. در آخرین مرحله به نقاط ابتدا و انتهای هر عنصر (قوس یا تانژانت) ارتفاع دهی شده و با توجه به طول آن، متوسط شیب طولی هر عنصر محاسبه می‌شود. در ادامه به جزئیات روش انجام هر مرحله در نرم‌افزار QGIS^{۱۷} پرداخته شده است.

أ) تهیه لایه خطی مسیر از نقشه‌های متن‌باز

با استفاده از نقشه‌های متن‌باز می‌توان با انتخاب مبدا و مقصد مشخص، لایه خطی مسیر را که شامل یک عنصر خط پیوسته از مبدا تا مقصد است، دریافت کرد.

ب) تعیین نقاط شکست لایه خطی در محل پاره‌خط‌های آن لایه خطی مرحله قبل، یک خط پیوسته شامل تعداد زیادی خطوط شکسته است. هدف در این مرحله تفکیک لایه خطی مسیر به خطوط شکسته آن و مشخص کردن نقاط شکست است. برای این کار از ابزار مرتبط در نرم‌افزار QGIS استفاده شده است. خروجی این مرحله تعداد زیادی پاره‌خط و نقاط شکست است که در محل قوس‌ها تراکم بالاتری دارد.

ت) محاسبه شعاع دایره گذرنده از هر سه نقطه متوالی

شکل ۱. روش قطعه‌بندی ژرمن

کافیسو^{۱۶} و همکاران به ارزیابی تأثیر روش‌های قطعه‌بندی در تخمین توابع عملکرد ایمنی پرداخته‌اند. چهار رویکرد قطعه‌بندی نیز در نظر گرفته شده‌است:

۱) قطعه‌بندی بر اساس AADT و انحنای HSM ارائه داده‌است.

۲) بر اساس اینکه هر قطعه شامل ۲ قوس و ۲ تانژانت باشد.

۳) قطعات با طول ثابت (در این مطالعه ۶۵۰ متر در نظر گرفته شده است که از بزرگترین طول قوس بیشتر باشد)

۴) قطعه‌بندی با توجه به ثابت ماندن تمام متغیرهای استفاده شده در مدل، در صورت تغییر در هر کدام، قطعه جدیدی در نظر گرفته می‌شود.

معیار QIC برای ارزیابی برازش مدل‌ها نشان داده است که شیوه قطعه‌بندی ۲ بهترین و شیوه ۳ پس از آن قرار می‌گیرد. (Cafiso et al. 2018)

۳. روش‌شناسی و داده‌ها

در این بخش ابتدا به بررسی روش استفاده از داده نقشه‌های متن‌باز در استخراج اطلاعات هندسی راه که لازمه ترسیم پروفیل سرعت هستند، شامل شعاع قوس، نقاط ابتدایی و انتهایی قوس و شیب طولی و سپس روش‌های ترسیم پروفیل سرعت عملکردی (سرعت ۸۵ درصدی در حالت جریان آزاد) از مدل‌های توسعه یافته پیشین و محاسبه سرعت اینرشیا و ترسیم پروفیل آن پرداخته شده‌است. پس از آن انواع روش‌های قطعه‌بندی شامل قطعات با طول ثابت، روش پیشنهادی HSM و

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره دوم (۶۳) / زمستان ۱۴۰۳

به منظور ترسیم پروفیل سرعت، پس از بررسی نتایج مدل‌های ارائه شده در ادبیات، با توجه به تطابق سرعت‌های محاسبه شده در قوس و تانژانت، از مطالعه پرز و همکاران (Pérez Zuriaga et al. 2010) برای محاسبه سرعت عملکردی و شتاب کاهشی مرتبط با آن برای رده عملکردی راه دوخطه، استفاده شده است.

۱) سرعت عملکردی در قوس بر اساس نرخ تغییرات انحنا (CCR) با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه گردید.

۲) سرعت عملکردی در تانژانت بر اساس سرعت مطلوب و شعاع قوس قبل از تانژانت با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه گردید.

۳) سرعت مطلوب (V_{des})

سرعت مطلوب V_{des} سرعتی تعریف می‌شود که راننده بدون تاثیر عناصر هندسی راه و در حالت جریان آزاد انتخاب می‌کند. بر این اساس سرعت مطلوب در این تحقیق ۹۵ کیلومتر بر ساعت که مطابق با حداکثر سرعت مجاز تابلوها در محور است، در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به تعریف سرعت مطلوب، در محاسبات شاخص‌های ناسازگاری، مقداری محافظه کارانه تلقی می‌شود.

۴) محاسبه شتاب کاهشی با رابطه (۱۹) بر اساس شعاع قوس روبرو انجام شده است

۵) شتاب افزایشی فرض شده برابر با ۰/۸۵ متر بر مجذور ثانیه است (Ottesen and Krammes 2000).

۶) محاسبه مسافت مورد نیاز برای کاهش و افزایش سرعت بین المان‌های متوالی بر اساس روابط فیزیکی سرعت - مکان

۷) محاسبه و تعیین محل شروع و پایان تغییرات سرعت

بر اساس مطالعاتی که در زمینه رفتار سرعت رانندگان انجام شده است، سرعت در ابتدای قوس با سرعت در میانه قوس اختلاف معناداری دارد (Malaghan, Pawar, and Dia 2021). در محاسبه نقاط ابتدایی و انتهایی تغییرات سرعت، مطابق مطالعه مونتلا و همکاران، به طور میانگین ۴۵ درصد از طول قوس تحت

با علم بر این موضوع که از هر سه نقطه متوالی یک دایره می‌گذرد، شعاع دایره گذرنده از هر سه نقطه شکست متوالی محاسبه شده است. هر شعاع محاسبه شده به پاره خط منتهی به نقطه سوم نسبت داده شده و خروجی این مرحله تعداد زیادی شعاع محاسبه شده برای هر پاره خط است.

ث) تعیین قوس و تانژانت

شعاع انتسابی به هر پاره خط مورد بررسی قرار گرفته و در صورتی که شعاع این دایره از مقدار آستانه (۲۰۰۰ متر) در نظر گرفته شده کوچکتر باشد، پاره خط منتهی به نقطه سوم جزئی از یک قوس و در غیر اینصورت جزئی از یک تانژانت در نظر گرفته می‌شود. مقدار آستانه با روش آزمون و خطا و بررسی کل قوس و تانژانت‌ها در محور مورد مطالعه پس از مرحله آخر (مرحله ۶) از بین مقادیر ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ متر بر اساس بهترین تعیین موقعیت نقاط ابتدایی و انتهایی عناصر انتخاب شده است.

ج) اتصال اجزا مشابه متوالی و تشکیل یک عنصر واحد و تعیین مشخصات آن

در این مرحله پاره‌خط‌های متوالی از این منظر که جزئی از تانژانت یا قوس تشخیص داده‌اند، به یکدیگر متصل شده و عنصری واحد (قوس یا تانژانت) را تشکیل می‌دهند. میانگین شعاع پاره‌خط‌های تشکیل دهنده قوس به آن نسبت داده شده است.

ح) ارتفاع دهی به نقاط ابتدا و انتهایی المان‌ها و محاسبه شیب طولی

برای محاسبه متوسط شیب طولی هر قطعه لازم است که ارتفاع نقاط ابتدا و انتهای آن مشخص شود. برای این کار با استفاده از نقشه‌های رستری شامل داده ارتفاع در محیط نرم افزار QGIS و موقعیت قرارگیری نقاط بر روی آن، به هر نقطه ارتفاع پیکسل^{۱۸} منطبق بر آن از تصویر رستری^{۱۹} نسبت داده شده است.

۲-۳ پروفیل سرعت

۱-۲-۳ ترسیم پروفیل سرعت عملکردی

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزواری)

برای بررسی رفتار یکنواخت هندسی، بر اساس نمودار جمع‌ی قدر مطلق زاویه انحراف در کل راه، قسمت‌هایی که دارای شیب یکنواختی هستند به عنوان یک قطعه همگن در نظر گرفته می‌شود. (Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, et al. 2019)

۳-۳ محاسبه شاخص‌های ناسازگاری

چهار شاخص ناسازگاری کلی در این تحقیق محاسبه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. هر چهار شاخص با بررسی تغییرات پیوسته سرعت عملکردی وضعیت ناسازگاری را گزارش می‌دهند. شاخص‌های پولس، گرچ، کاستلو و کاماچو به ترتیب مطابق روابط (۳)، (۷)، (۱۱) و (۱۳)، برای هر قطعه در روش‌های مختلف قطعه‌بندی، محاسبه شده است.

۴-۳ مدل‌سازی

برای هر قطعه راه تعداد تصادفات کل و تعداد تصادفات به تفکیک نوع آن و شاخص‌های ناسازگاری محاسبه شده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها در هر روش قطعه‌بندی (۷ روش)، برای شش حالت تصادف (تصادفات واژگونی، رخ به رخ، برخورد با شی ثابت، جلو به عقب، جلو به پهلو و برخورد با عابر) به عنوان متغیر وابسته و هر بار یک شاخص از چهار شاخص ناسازگاری به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و مدل پواسون^{۲۰} برای آن ساخته شده است. مدل رگرسیون پواسون با تعیین پارامتر پواسون λ (تعداد مورد انتظار رخدادها در هر دوره) به عنوان تابعی از متغیرهای توضیحی، برآورد می‌شود. رایج‌ترین رابطه بین متغیرهای توضیحی و پارامتر پواسون، مدل لگاریتم-خطی^{۲۱} است.

$$\lambda = EXP(\beta X) \quad (24)$$

در رابطه (۲۴) بردار متغیرهای توضیحی و β بردار پارامترهای قابل تخمین است. در رابطه (۲۴)، تعداد مورد انتظار رخدادها در هر دوره با $E(y) = \lambda = EXP(\beta X)$ داده می‌شود. این مدل با استفاده از روش استاندارد حداکثر درست‌نمایی، با تابع درست-نمایی (۲۵) قابل برآورد است.

تأثیر کاهش سرعت قرار می‌گیرد. بر این اساس در این تحقیق نیز طولی حداکثر برابر با ۴۵ درصد طول قوس در کاهش سرعت اثر داده شده است (Montella et al. 2014). فرض شده است افزایش سرعت پس از انتهای قوس و در ابتدای تانژانت شروع شده و تا رسیدن به سرعت محاسبه شده تانژانت ادامه پیدا کند. در صورتی که مسافت کاهش سرعت در تانژانت قبل از قوس تامین نشود، از سرعت در آن تانژانت کاسته شده تا ضمن کاهش مسافت لازم برای تغییر سرعت، این طول در تانژانت مورد نظر تامین شود.

۲-۲-۳ ترسیم پروفیل سرعت اینرشیال

سرعت اینرشیال، بر اساس داده‌های سرعت عملکردی محاسبه شده است. در هر نقطه سرعت اینرشیال، از میانگین سرعت عملکردی وزن‌دار شده در یک بازه زمانی مشخص قبل از نقطه مورد نظر محاسبه شده است. مطابق نتایج مطالعه کاستلو و همکاران (Llopis-Castelló et al. 2018b) سرعت اینرشیال برای هر نقطه از ۱۵ ثانیه قبل از آن و پارامتر α برابر ۶ استفاده شده است.

۳-۲-۳ روش‌های قطعه‌بندی

برای محاسبه شاخص‌های ناسازگاری و بررسی آن مطابق ادبیات موضوع، نیازمند قطعه‌بندی محور مورد مطالعه به قطعات همگن است. برای این کار سه روش متداول قطعات با طول ثابت، روش *HSM* و روش ژرمن در نظر گرفته شده است. در روش طول ثابت کل مسیر به قطعه‌هایی با طول ثابت و برابر با قطعه‌بندی با طول‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ کیلومتر برای تحلیل‌های بعدی با انجام شده است. در روش پیشنهادی *HSM* محل شروع و پایان هر قطعه براساس تغییر در هر یک از پارامترهای *AADT*، عرض خط، عرض شانه، نوع شانه، وجود و عدم وجود شیارهای لرزاننده در خط وسط و وجود و عدم وجود روشنایی است. (American Association of State Highway and Transportation Officials 2010) در روش ژرمن دو عامل مؤثر بر قطعه‌بندی، وجود تقاطع اثر گذار بر جریان ترافیک و رفتار یکنواخت هندسه مسیر است.

محاسبه می‌شود. بنابراین عامل تغییر در مقدار شاخص، تغییرات مقادیر پارامترهای موثر در محاسبه سرعت اینرشیتال است. سرعت اینرشیتال پیشنهادی کاستلو، سرعت هر نقطه بر اساس سرعت‌های عملکردی وزن‌دار شده در بازه زمانی ۱۵ ثانیه قبل از آن است (رابطه (۳-۵)). هر ۱۵ ثانیه به بازه‌های ۰,۱ ثانیه تقسیم شده و به سرعت عملکردی آن با $\alpha = 6$ مطابق رابطه (۹) وزن داده شده است. n تعداد بازه‌های ۰,۱ ثانیه‌ای و مقدار j از ۱ تا n است.

کاستلو بر این اساس که سرعت در هر نقطه نتیجه تصمیمات راننده در یک بازه زمانی قبل از آن است، مقدار سرعت اینرشیتال را به صورت یک میانگین وزن‌دار شده سرعت عملکردی در آن بازه زمانی ارائه داد. اما با توجه به این نکته که سرعت در هر نقطه علاوه بر تصمیمات گذشته راننده می‌تواند تحت تاثیر عنصر هندسی پیش‌رو در آن نقطه نیز باشد، در این تحقیق در محاسبه سرعت اینرشیتال به سرعت عملکردی در یک بازه زمانی بعد از آن نقطه نیز وزن‌دهی شد. رابطه وزن‌ها به صورت همان رابطه بالا بوده و مقدار آن از ۱ در همان نقطه تا ۰ در نقطه آخر بازه زمانی پیش‌رو است.

در مطالعه کاستلو تغییرات مقدار بازه زمانی و پارامتر α تا تعیین بهترین عملکرد شاخص، مطابق شرایط زیر بوده است.

– مقدار بازه زمانی از ۵ تا ۴۰ ثانیه و با گام‌های ۵ ثانیه‌ای

– مقدار پارامتر α از ۰ تا ۱۰ و با گام‌های ۱ واحدی

در این تحقیق بازه زمانی پیش‌رو نیز علاوه بر بازه زمانی قبل با شرایط زیر در نظر گرفته شده است.

– مقدار بازه زمانی قبل از ۵ تا ۲۰ ثانیه و با گام‌های ۱ ثانیه‌ای

– مقدار بازه زمانی قبل از ۰ تا ۱۰ ثانیه و با گام‌های ۱ ثانیه‌ای

– مقدار پارامتر α از ۰ تا ۱۰ و با گام‌های ۰,۱ واحدی برای هر دو حالت بازه زمانی قبل و بعد

شکل (۲) حالت‌های مختلف رابطه (۹) را بر اساس مقادیر پارامتر α برای بازه زمانی قبل از هر نقطه و بازه زمانی بعد از هر نقطه نشان می‌دهد. پارامتر α شکل نمودار را تعیین می‌کند و در

$$L(\beta) = \prod \frac{EXP[-EXP(\beta X)][EXP(\beta X)]^y}{y!} \quad (25)$$

لگاریتم تابع درست‌نمایی برای استفاده و تخمین پارامترها مناسب‌تر بوده و به صورت رابطه (۲۶) است.

$$LL(\beta) = \sum [-EXP(\beta X) + y\beta X - LN(y!)] \quad (26)$$

آزمون نسبت درست‌نمایی یک آزمون رایج است که برای ارزیابی دو مدل پواسون رقیب استفاده می‌شود. آماره آزمون نسبت درست‌نمایی، از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$X^2 = -2[LL(\beta_R) - LL(\beta_U)] \quad (27)$$

که در آن $LL(\beta_R)$ لگاریتم تابع درست‌نمایی در همگرایی برای مدل محدود (مدلی که در آن تمام پارامترهای β صفر باشد یا تنها مقدار ثابت برای آزمایش برازش کلی مدل وجود داشته باشد) و $LL(\beta_U)$ لگاریتم تابع درست‌نمایی برای مدل اصلی است. آماره X^2 دارای توزیع کای مربع^{۲۲} است که با درجه آزادی مساوی با تفاوت در تعداد پارامترها در مدل محدود و اصلی توزیع شده است (تفاوت در تعداد پارامترها در بردارهای پارامتر β_U و β_R). اندازه‌گیری معادل R^2 حداقل مربعات در رگرسیون خطی، برای مدل رگرسیون پواسون به دلیل غیرخطی بودن میانگین شرطی $(E[y|X])$ و ناهمسانی در رگرسیون قابل محاسبه نیست. آماره مشابه بر روی باقیمانده‌های استاندارد شده رابطه (۲۸) است.

$$R_p^2 = 1 - \frac{\sum \left[\frac{y - \hat{\lambda}}{\sqrt{\hat{\lambda}}} \right]^2}{\sum \left[\frac{y - \bar{\lambda}}{\sqrt{\bar{\lambda}}} \right]^2} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸) $\hat{\lambda}$ مقدار تخمین زده شده است. صورت شبیه به باقیمانده مجموع مربعات و منخرج شبیه به کل مجموع مربعات است.

۳-۵ توسعه شاخص ناسازگاری کاستلو

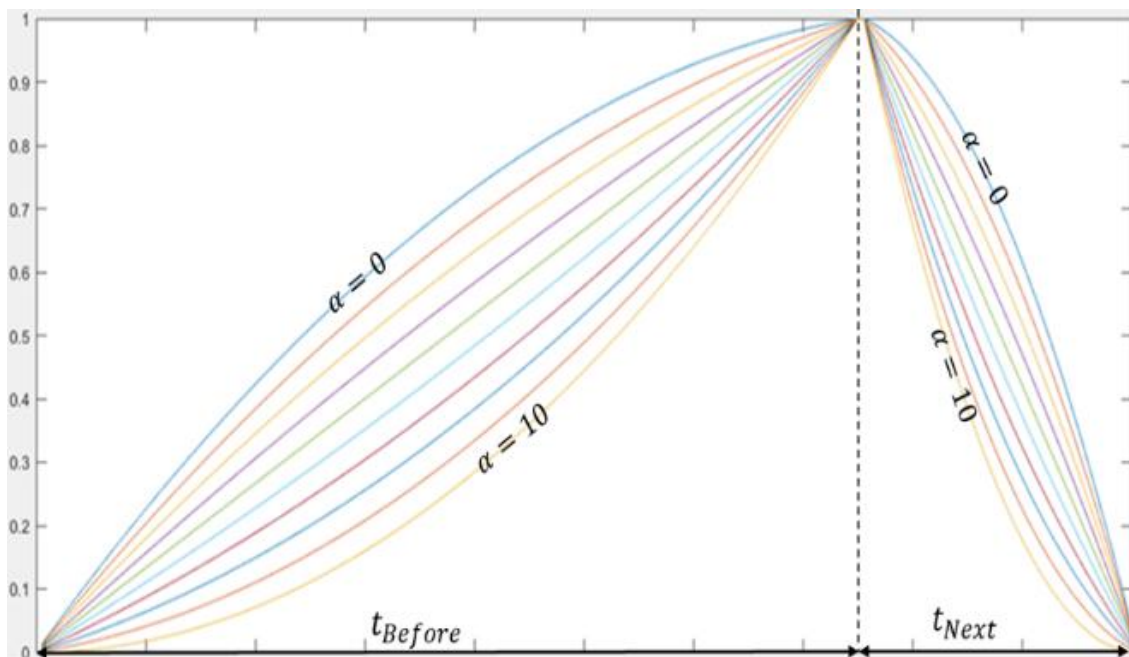
همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، شاخص ناسازگاری کاستلو بر اساس نمودار اختلاف بین سرعت اینرشیتال و سرعت عملکردی

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزوار)

اساس آن شاخص ناسازگاری کاستلو برای هر قطعه محاسبه شد. سپس برای هر حالت یک مدل پواسون با در نظر گرفتن شاخص ناسازگاری به عنوان متغیر مستقل، ساخته شد و مقادیر P-Value محاسبه گردید و بهترین نتیجه از نظر مقدار معناداری به عنوان حالت بهینه شاخص ناسازگاری انتخاب شد.

حالت $\alpha = 5$ شکل رابطه (۹) به صورت خطی بوده و برای مقادیر بزرگتر از آن، با توجه به مقعر شدن نمودار، نقاط نزدیکتر وزن‌های بزرگتری به نسبت نقاط دورتر می‌گیرد. برای تصادفاتی که رابطه معنادار با شاخص ناسازگاری کاستلو داشتند، با تمامی ترکیب‌های ممکن از بازه‌های زمانی قبل و بعد و همچنین مقادیر α ، پروفیل سرعت اینرشپال ترسیم شد و بر



شکل ۲. نمودار حالت‌های مختلف برای وزن دهی به بازه‌های زمانی قبل و بعد از هر نقطه

محور بردسکن - سبزوار شامل ۹۵ قوس با میانگین طول ۲۸۲ متر، حداقل شعاع ۱۹۴ متر، حداکثر شعاع ۱،۹۸۷ متر و ۷۷ تانژانت با میانگین طول ۱،۲۴۶ متر است و بر اساس بیشینه شیب طولی عناصر هندسی مسیر، این محور در شرایط هموار قرار گرفته و کوهستانی نیست.

۴. یافته‌ها

۴-۱ اطلاعات هندسی

پس از انجام مراحل شش‌گانه استخراج اطلاعات هندسی و آستانه حداکثری شعاع مناسب اطلاعات آماری عناصر قوس و تانژانت محور بردسکن - سبزوار مطابق جدول زیر مشخص گردید.

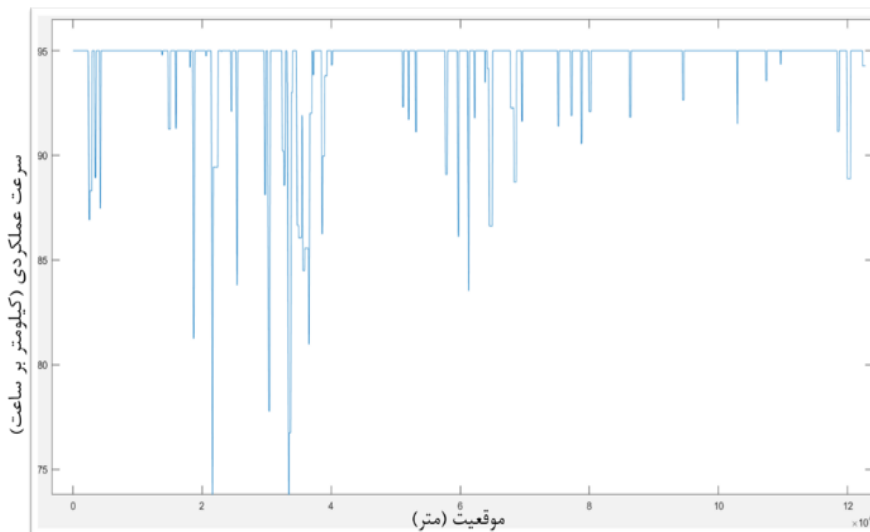
جدول ۴. اطلاعات هندسی محور بردسکن به سبزوار

عصر	تعداد	بیشینه طول (متر)	کمینه طول (متر)	میانگین طول (متر)	بیشینه شعاع (متر)	کمینه شعاع (متر)	میانگین شعاع (متر)	بیشینه شیب طولی (درصد)
تانژانت	۷۷	۸۲۳۷	۲۸	۱۲۴۶	-	-	-	۲/۳۷
قوس	۹۵	۹۱۷	۴۷	۲۸۲	۱۹۴	۱۹۸۷	۸۶۹	۲/۲۶

۲-۴ پروفیل‌های سرعت

محاسبه شده‌است. سپس بر اساس مسافت‌های مورد نیاز برای افزایش و کاهش سرعت با توجه به مقدار شتاب، نقاط ابتدا و انتهای آن تعیین، مقدار سرعت عملکردی برای متر به متر مسیر محاسبه شده و در شکل (۳) قابل مشاهده است.

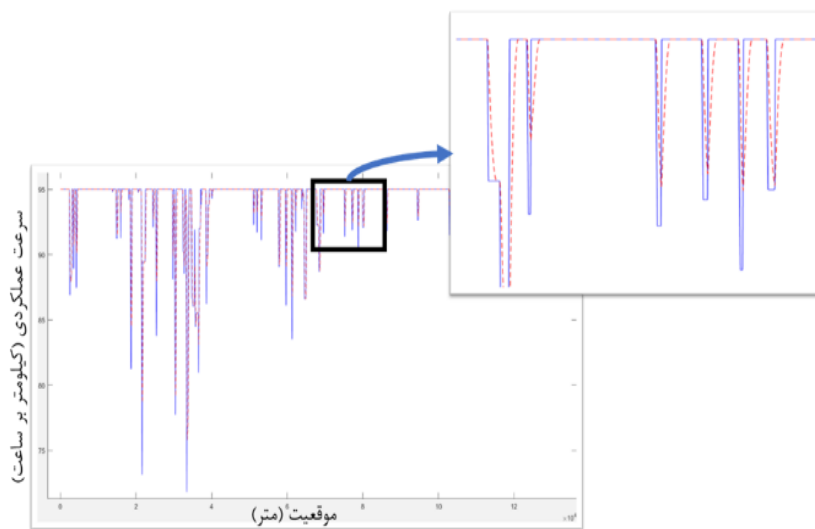
برای ترسیم پروفیل سرعت عملکردی در تمامی عناصر موجود در محور بردسکن به سبزواری (۷۷ قوس و ۹۵ تانژانت) به صورت جداگانه سرعت عملکردی و شتاب کاهشی در میانه آن‌ها



شکل ۳. پروفیل سرعت عملکردی

زمانی ۱۵ ثانیه قبل از آن و پارامتر α برابر ۶ مطابق روابط (۸) و (۹) برای متر به متر مسیر محاسبه شده است. در شکل (۴) پروفیل سرعت اینرشیال به صورت خط چین را در مقابل پروفیل سرعت عملکردی به صورت خط نشان داده‌است.

با توجه به شکل (۳) بیشترین مقدار سرعت عملکردی همان مقدار سرعت مطلوب برابر با ۹۵ کیلومتر بر ساعت، کمترین مقدار برابر ۷۳ کیلومتر بر ساعت، میانگین وزنی آن بر اساس طول محور برای کل مسیر برابر با ۹۴/۲ کیلومتر بر ساعت است. مطابق نتایج مطالعه کاستلو و همکاران (Llopis-Castelló et al. 2018b) سرعت اینرشیال برای هر نقطه با توجه به بازه



شکل ۴. پروفیل سرعت اینرشیال

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزواری)

۳-۴ نتایج روش‌های قطعه‌بندی

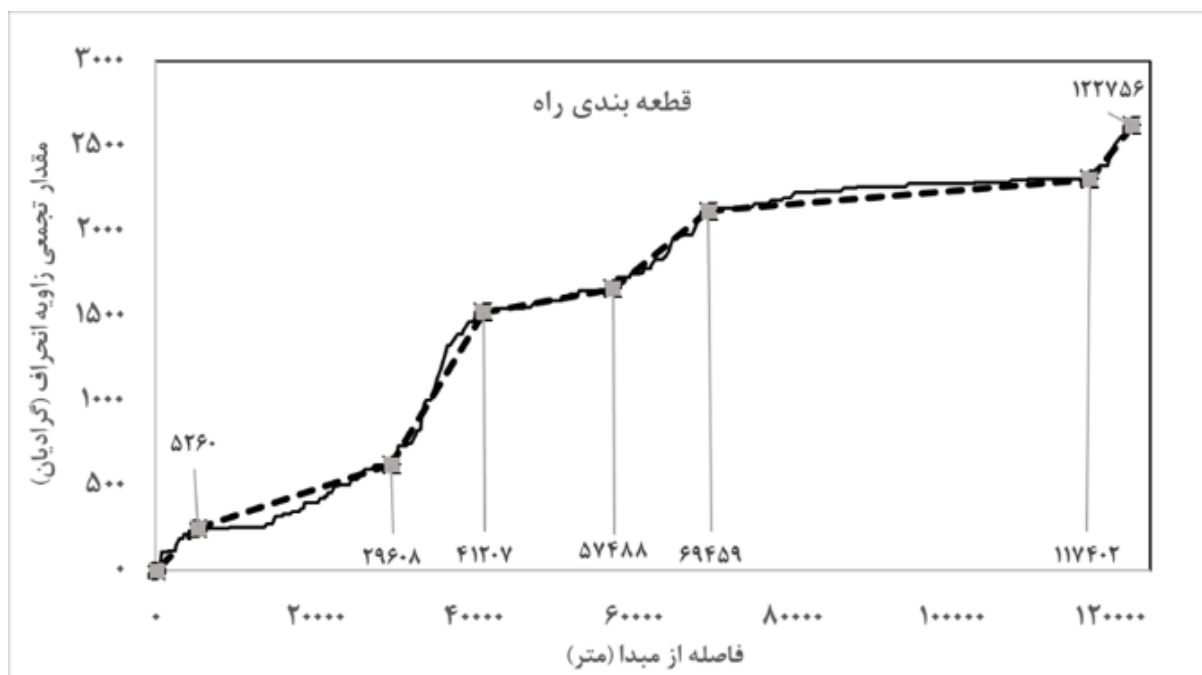
برای قطعه‌بندی با روش طول ثابت، ۵ مقدار برای آن با طول‌های ۱ تا ۵ کیلومتر در نظر گرفته شد و تعداد قطعات برای هر مقدار طول قطعه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. تعداد قطعات در روش قطعه‌بندی با طول ثابت

طول قطعه	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰
تعداد قطعه	۱۲۲	۶۱	۴۰	۳۰	۲۴

همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، قسمت‌هایی از نمودار که دارای شیب یکنواختی هستند، به عنوان یک قطعه همگن در نظر گرفته شده‌اند و مشخصات هر قطعه به همراه تعداد قوس و تانژانت قرار گرفته در آن‌ها در جدول (۶) قابل مشاهده است.

در محور بردسکن - سبزواری تقاطعی که در اثر آن تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در جریان ترافیک (AADT) و رفتار رانندگان ایجاد کند، وجود ندارد. نتیجه تقسیم‌بندی به روش HSM با توجه به عرض خط، عرض شانه و نوع شانه، ۵۸ قطعه با میانگین طول ۲،۱۱۳ متر است. در روش ژرمن نیز تنها بر اساس شیب یکنواخت قسمت‌های مختلف نمودار مقدار تجمعی زاویه انحراف مطابق شکل (۵)، تقسیم‌بندی انجام شده است.



شکل ۵. نتیجه قطعه‌بندی به روش ژرمن

نتیجه قطعه‌بندی به روش ژرمن، ۷ قطعه با حداقل طول ۵،۲۶۰ متر، حداکثر طول ۴۷،۹۴۳ متر و میانگین طول ۱۷،۵۳۵ که کوتاه‌ترین قطعه دارای ۷ قوس و ۵ تانژانت و بلندترین قطعه دارای ۱۶ قوس و ۱۶ تانژانت است.

جدول ۶. مشخصات قطعات به روش قطعه‌بندی ژرمن

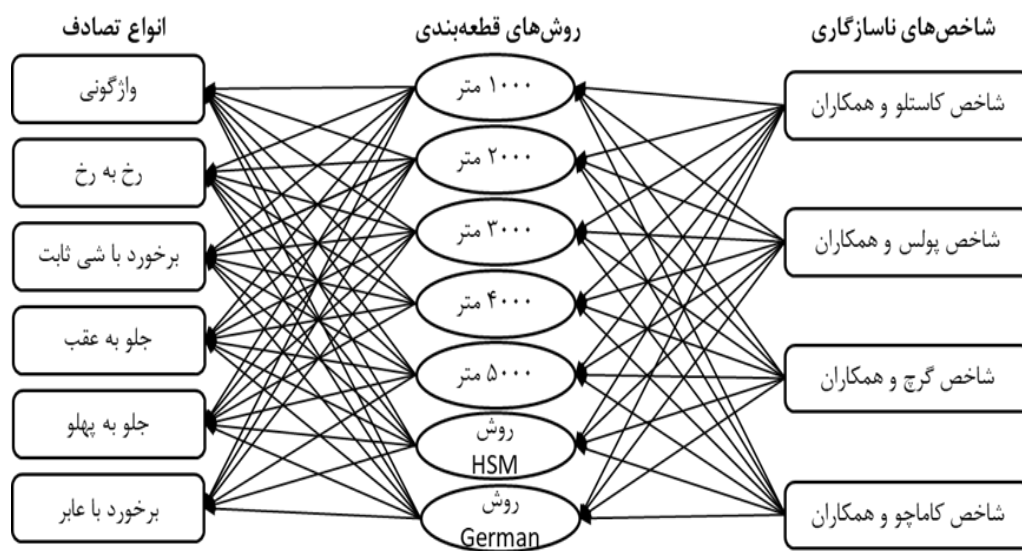
قطعه	طول (متر)	ابتدای قطعه	انتهای قطعه	تعداد قوس	تعداد تائزانت
۱	۵۲۶۰	۰	۵۲۶۰	۷	۵
۲	۲۴۳۴۸	۵۲۶۰	۲۹۶۰۸	۱۸	۱۷
۳	۱۱۵۹۹	۲۹۶۰۸	۴۱۲۰۷	۲۴	۱۵
۴	۱۶۲۸۱	۴۱۲۰۷	۵۷۴۸۸	۱۰	۱۰
۵	۱۱۹۷۱	۵۷۴۸۸	۶۹۴۵۹	۱۳	۱۱
۶	۴۷۹۴۳	۶۹۴۵۹	۱۱۷۴۰۲	۱۶	۱۶
۷	۵۳۵۴	۱۱۷۴۰۲	۱۲۲۷۵۶	۵	۴

شش حالت تصادف (تصادفات واژگونی، رخ به رخ، برخورد با شی ثابت، جلو به عقب، جلو به پهلو و برخورد با عابر) به عنوان متغیر وابسته و هر بار یک شاخص از چهار شاخص ناسازگاری به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و مدل پواسون یا دو جمله‌ای منفی برای آن در نرم‌افزار *STATA/MP 17.0* ساخته شده‌است.

۴-۴ نتایج مدل‌ها به همراه شاخص‌های ناسازگاری معنادار

و انتخاب روش قطعه‌بندی

برای هر قطعه راه تعداد تصادفات کل و تعداد تصادفات به تفکیک نوع آن و شاخص‌های ناسازگاری محاسبه شده‌است. پس از جمع‌آوری داده‌ها در هر روش قطعه‌بندی (۷ روش)، برای



شکل ۶. انواع شاخص‌ها، تصادفات و روش‌های قطعه‌بندی

واژگونی، قطعات ۵۰۰۰ متری شاخص‌های ناسازگاری کاستلو، پولس و گرج با تصادفات واژگونی معنادار شده‌اند. در روش قطعه‌بندی ژرمن، شاخص ناسازگاری کاماچو با تصادفات جلو به پهلو ارتباط معناداری را نشان داد ولی با توجه به عدم معنادار

جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی برای انواع تصادف در روش‌های مختلف قطعه‌بندی مطابق جدول (۷) است. در قطعات ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری تنها شاخص ناسازگاری گرج با تصادفات واژگونی، قطعات ۳۰۰۰ متری شاخص ناسازگاری کاماچو با تصادفات

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزواری)

شدن این شاخص با تصادفات واژگونی در همین روش و سایر روش‌های قطعه‌بندی، معناداری آن
روش‌های قطعه‌بندی و همچنین این نوع تصادفات (جلو به پهلو) قابل بررسی است.

جدول ۷. شاخص‌های ناسازگاری معنادار در هر روش قطعه‌بندی

ردیف	نوع تصادف	شاخص	روش قطعه‌بندی	عدد ثابت (P-Value)	ضریب	P-Value	Pseudo R ²
۱	واژگونی	گرچ	۱۰۰۰ متر	-۰/۴۸۱ (۰/۱۲۷)	-۰/۲۹۹	**۰/۰۲۱	۰/۰۲۵۹
۲	واژگونی	گرچ	۲۰۰۰ متر	-۰/۰۲۵۶ (۰/۹۳۰)	-۰/۲۴۱	**۰/۰۷۱	۰/۰۲۰۵
۳	واژگونی	کاماچو	۴۰۰۰ متر	-۰/۴۲۶ (۰/۰۹۲)	-۰/۰۰۰۰۸	**۰/۰۲۰	۰/۰۴۱۹
۴	واژگونی	کاستلو	۵۰۰۰ متر	-۰/۲۰۵۴ (۰/۵۲۰)	۰/۲۸۵	**۰/۰۱۷	۰/۰۸۵۲
۵	واژگونی	پولس	۵۰۰۰ متر	-۰/۸۲۸ (۰/۰۰۷)	-۰/۲۵۹	**۰/۰۸۲	۰/۰۳۸۳
۶	واژگونی	گرچ	۵۰۰۰ متر	۰/۸۵۱ (۰/۰۰۳)	-۰/۲۶۳	**۰/۰۵۰	۰/۰۴۶۳
۷	جلو به پهلو	کاماچو	روش ژرمن	-۰/۳۲۰ (۰/۰۰۰)	-۰/۰۰۰۰۸	**۰/۰۰۲	۰/۰۲۰۴۹

* سطح معناداری بیش از ۹۹ درصد
** سطح معناداری بیش از ۹۵ درصد
*** سطح معناداری بیش از ۹۰ درصد

با توجه به نتایج جدول (۷) بهترین عملکرد را روش طول ثابت داشته‌است که با مطالعه بن‌ظاهر مطابقت دارد (Tahir et al. 2022).

۴-۶ بررسی سایر پارامترهای ناسازگاری ارائه شده در

مطالعه کاستلو

در مطالعه کاستلو پارامترهای دیگری نیز برای شاخص ناسازگاری پیشنهاد و بررسی شده است. در این تحقیق نیز ارتباط آن پارامترها با تصادفات واژگونی مورد تحقیق قرار گرفت. جدول زیر نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول (۷) بهترین عملکرد را روش طول ثابت داشته‌است که با مطالعه بن‌ظاهر مطابقت دارد (Tahir et al. 2022). قطعات ۵۰۰۰ متری با توجه به تعداد شاخص‌های معنادار (کاستلو، پولس و گرچ) و همچنین وجود بهترین سطح معناداری در آن، به عنوان طول مناسب قطعات، برای دستیابی به قطعات همگن راه، انتخاب شده‌است.

۴-۵ انتخاب شاخص ناسازگاری مناسب

از میان شاخص‌های معنادار در روش قطعه‌بندی با طول ثابت ۵۰۰۰ متر، شاخص کاستلو با بیشترین سطح معناداری (سطح ۹۵ درصد) و حداکثر مقدار توضیح دهنده در تصادفات واژگونی

جدول ۸. بررسی ارتباط سایر پارامترهای ارائه شده در مطالعه کاستلو با تصادفات واژگونی

ردیف	معادله پارامتر سازگاری	نوع تصادف	عدد ثابت (P-Value)	ضریب	P-Value	Pseudo R ²
۱	$\frac{A(+)\sigma}{L}$	واژگونی	-۱/۲۹۴۳ (۰/۱۲۲)	۰/۲۹۸۱	۰/۳۳۱	۰/۰۶۱۹
۲	$\frac{A.\sigma}{L}$	واژگونی	۰/۲۹۳۵ (۰/۱۲۲)	۰/۸۰۱۰	۰/۴۴۰	۰/۰۰۷۲
۳	$\frac{A(+)}{L(+)}$	واژگونی	-۰/۶۰۴۷ (۰/۱۹۴)	۰/۴۳۸۱	***۰/۰۱۷	۰/۰۹۴۷
**۴	$\frac{A(> 5 \text{ km/h})}{L}$	واژگونی	۰/۲۷۶۶ (۰/۱۵۲)	۰/۸۰۶۹	۰/۳۵۱	۰/۰۱۰۳
۵	$\frac{A(> 15 \text{ km/h})}{L}$	-		این پارامتر با توجه به محدوده داده‌ها قابل محاسبه نیست.		
۶	$\frac{A(> 20 \text{ km/h})}{L}$	-		این پارامتر با توجه به محدوده داده‌ها قابل محاسبه نیست.		
۷	$\sqrt{\frac{A(+)\sigma}{L(+)}}$	واژگونی	۰/۳۶۹۸ (۰/۵۲۲)	۰/۱۲۷۵	۰/۴۷۰	۰/۰۳۴۱

*این پارامتر در مقاله اصلی بر اساس مقدار ۱۰ کیلومتر بر ساعت محاسبه شده است و در محاسبات این تحقیق مقدار ۵ کیلومتر بر ساعت با توجه به محدودیت داده‌ها مبنای محاسبه قرار گرفته است.
**سطح معناداری بیش از ۹۵ درصد

از بین ۷ پارامتر ناسازگاری پیشنهادی کاستلو، ۲ پارامتر به دلیل محدودیت داده‌های سرعت در این تحقیق غیرقابل محاسبه بوده و از سایر آن‌ها، تنها پارامتر شماره ۳ از جدول (۸)، ارتباط معناداری با مقدار آماره P برابر ۰/۰۱۷ دارد.

۴-۷ توسعه شاخص ناسازگاری کاستلو و بهینه‌سازی آن

در این تحقیق بازه زمانی پیش‌رو نیز علاوه بر بازه زمانی قبل با شرایط زیر در نظر گرفته شد

- مقدار بازه زمانی قبل از ۵ تا ۲۰ ثانیه و با گام‌های ۱ ثانیه‌ای
- مقدار بازه زمانی قبل از ۰ تا ۱۰ ثانیه و با گام‌های ۱ ثانیه‌ای
- مقدار پارامتر α از ۰ تا ۱۰ و با گام‌های ۰/۱ واحدی برای هر دو حالت بازه زمانی قبل و بعد

برای تصادفات واژگونی که بهترین معناداری را با شاخص ناسازگاری کاستلو داشتند، در ابتدا تمامی ترکیب‌های ممکن از

بازه‌ی زمانی قبل و همچنین مقادیر α ، پروفیل سرعت اینرشیال ترسیم شد و بر اساس آن شاخص ناسازگاری کاستلو برای هر قطعه محاسبه شده و بهینه‌ترین حالت آن با توجه به کمترین آماره P یک مدل پواسون با در نظر گرفتن شاخص ناسازگاری به عنوان متغیر مستقل انتخاب شده است. در مرحله بعد با داشتن مقادیر بازه زمانی و α ، تمامی ترکیب‌های ممکن از بازه‌ی زمانی بعد و همچنین مقادیر α ، نیز در محاسبات سرعت اینرشیال لحاظ شد و محاسبات تا بهینه‌ترین حالت با توجه به کمترین آماره P یک مدل پواسون با در نظر گرفتن شاخص ناسازگاری به عنوان متغیر مستقل تکرار شد. در مجموع ۱۵ حالت برای بازه زمانی قبل و ۱۰۰ حالت برای α بازه قبل برای قسمت اول بهینه‌سازی و ۱۰ حالت برای بازه زمانی بعد و نیز ۱۰۰ حالت برای α بازه بعد برای قسمت دوم بهینه‌سازی وجود دارد که نتیجه آن ۲،۵۰۰ حالت متفاوت است. بهترین نتیجه از نظر بیشترین مقدار فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره دوم (۶۳) / زمستان ۱۴۰۳

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح‌های مهندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزواری)

معناداری به عنوان حالت بهینه شاخص ناسازگاری انتخاب و نتایج نهایی این بهینه‌سازی در جدول (۹) خلاصه شده است.

جدول ۹. نتایج بهینه‌سازی شاخص ناسازگاری

نوع تصادف	بازه زمانی قبل (ثانیه)	مقدار α برای بازه زمانی قبل	بازه زمانی بعد (ثانیه)	مقدار α برای بازه زمانی بعد	عدد ثابت (P-Value)	ضریب	P-Value	Pseudo R^2
واژگونی	۱۴	۴/۱	۰	۰	-۰/۳۵۰۴ (۰/۳۳۱)	۰/۱۷۶۷	۰/۰۱۲	۰/۱۰۰۱

با تصادفات واژگونی در روش قطعه‌بندی با طول ثابت ۵۰۰۰ متر بود. همچنین بررسی دیگر شاخص‌های ناسازگاری پیشنهاد شده توسط کاستلو در قطعات ۵۰۰۰ متری نشان داد شاخص $\frac{A+}{L+}$ نتایج مشابهی (P-Value = ۰/۰۱۷) با شاخص نهایی ارائه شده کاستلو $(\sqrt{\frac{(A+)(\sigma+)}{L+}})$ دارد.

در ادامه به توسعه و بهینه‌سازی شاخص کاستلو پرداخته شد، به صورتی که در محاسبه سرعت اینرشیا علاوه بر بازه زمانی پیش از نقطه مورد نظر، بازه زمانی دیگری برای پس از آن نقطه نیز در نظر گرفته شد. برای هر ترکیب از بازه‌های زمانی قبل و بعد از هر نقطه و مقدار α ، یک مدل پواسون ساخته شد. بالاترین سطح معناداری شاخص کاستلو در ارتباط با تصادفات واژگونی در قطعات ۵۰۰۰ متری در حالت α برابر با ۴/۱، بازه زمانی قبل برابر با ۱۴ ثانیه و بازه زمانی بعد برابر با ۰ حاصل شد.

استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند کاهش تصادفات واژگونی در راه‌های دوخطه را در پی داشته باشد. بدین منظور، با استخراج اطلاعات مهندسی مسیر به کمک نقشه‌های متن‌باز و محاسبه شاخص کاستلو برای قطعات به طول ثابت ۵۰۰۰ متر، می‌توان قطعات دارای ناسازگاری طرح مهندسی را شناسایی کرد و اقدام به اصلاح مهندسی مسیر نمود. همچنین در مرحله طراحی می‌توان وجود قطعات ناسازگار در طرح اولیه مسیر را بررسی نمود و در صورت نیاز قبل از احداث راه به باز طراحی آن برای رفع ناسازگاری‌ها پرداخت.

در داده‌های حاضر در این تحقیق به علت عدم وجود ساعت وقوع تصادفات امکان بررسی تأثیر ناسازگاری بر تصادفات شب

بر اساس جدول (۹) بهترین ارتباط معنادار شاخص ناسازگاری کاستلو، در حالتی که مقدار بازه زمانی قبل معادل ۱۴ ثانیه باشد و مقدار α برابر با ۴/۱ بدون نظر گرفتن بازه زمانی پیش‌رو است. این مقادیر در مقایسه با مقادیر ارائه شده توسط کاستلو (بازه زمانی برابر ۱۵ ثانیه و مقدار α برابر با ۶) باعث بهبود در سطح معناداری (P-Value) از مقدار ۰/۰۱۷ به مقدار ۰/۰۱۲ شده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در تحقیق حاضر، ابتدا اطلاعات مهندسی محور بردسکن به سبزواری با کمک نقشه‌های متن‌باز و استفاده از نرم‌افزار QGIS استخراج شده است. اطلاعات مهندسی مسیر با مقدار آستانه شعاع حداکثری ۲۰۰۰ متر برای قوس‌ها انتخاب شد. در مرحله بعد، پروفیل سرعت عملکردی برای محور مورد مطالعه با استفاده از روابط توسعه یافته مطالعات پیشین، ترسیم شد. سپس بر اساس آن به محاسبه و بررسی شاخص‌های ناسازگاری کلی پرداخته شد و ارتباط هر کدام از آن‌ها با هر یک از انواع تصادفات برای داده‌های سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ محور بردسکن - سبزواری مورد تحلیل قرار گرفته است.

شاخص‌های ناسازگاری در قطعات همگن محاسبه می‌شوند، که در این تحقیق سه روش قطعه‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. برای هر روش قطعه‌بندی، ارتباط بین چهار شاخص ناسازگاری و شش نوع تصادف با مدل پواسون سنجیده شد که نتیجه آن ارتباط معنادار شاخص‌های کاستلو (P-Value = ۰/۰۱۷)، پولس (P-Value = ۰/۰۸۲) و گرچ (P-Value = ۰/۰۵۰)

۷. مراجع

– Al-Masaeid, HR, M. Hamed, ... M. Aboul-Ela-Transportation Research, Undefined 1995, and and Adnan G. Ghannam. Al-Masaeid, Hashem R., Mohammad Hamed, Mohammad Aboul-Ela. 1995. "Consistency of Horizontal Alignment for Different Vehicle Classes." *Transportation Research Record* 1500 178–83.

– American Association of State Highway and Transportation Officials. 2010. "Highway Safety Manual." *The Handbook of Highway Engineering*.

– Andueza, P. J. 2000. "Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads." *Transportation Research Record* (1701):104–10. doi: 10.3141/1701-13.

– Cafiso, Salvatore, Carmelo D'Agostino, and Bhagwant Persaud. 2018. "Investigating the Influence of Segmentation in Estimating Safety Performance Functions for Roadway Sections." *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 5(2):129–36. doi: 10.1016/j.jtte.2017.10.001.

– Camacho-Torregrosa, Francisco J., Ana M. Pérez-Zuriaga, J. Manuel Campoy-Ungría, and Alfredo García-García. 2013. "New Geometric Design Consistency Model Based on Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation." *Accident Analysis and Prevention* 61:33–42. doi: 10.1016/j.aap.2012.10.001.

– Choudhari, Tushar, Gourab Sil, and Avijit Maji. 2022. "Speed-Based Safety Evaluation of Horizontal Curves in Rural Highways." 221–32. doi: 10.1007/978-981-16-9636-7_12.

– Garach, Laura, Francisco Calvo, Miguel Pasadas, and Juan de Oña. 2014. "Proposal of a New Global Model of Consistency: Application in Two-Lane Rural Highways in Spain."

و روز میسر نشد، پیشنهاد می‌گردد تأثیر شاخص‌های ناسازگاری در انواع تصادف به تفکیک بازه روز و بازه شب بررسی شود. تغییرات سرعت تجربه متفاوتی برای رانندگان وسایل نقلیه سبک و سنگین در پیش دارد. لذا پیشنهاد می‌گردد اثرات شاخص‌های ناسازگاری بر انواع تصادف با توجه به نوع وسیله نقلیه درگیر مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات بسیاری در زمینه سرعت عملکردی انجام شده که تعدد در آن علاوه بر نقص مدل‌ها به دلیل تفاوت رفتار رانندگان است. لذا پیشنهاد می‌گردد مدل‌های دیگری برای دستیابی به پروفیل سرعت عملکردی با اولویت مدل‌های کالیبره شده برای راه‌های ایران نیز بررسی گردد. سرعت مطلوب در این تحقیق مطابق با رویه تحقیقات گذشته، ۹۵ کیلومتر بر ساعت بر اساس حداکثر سرعت مجاز تابلوها، که مقداری محافظه‌کارانه است، انتخاب شد و پیشنهاد می‌گردد با مطالعه در این زمینه به تخمین دقیق‌تر آن پرداخته شود.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. German Method
2. HSM (Highway Safety Manual)
3. Local
4. Global
5. Castello
6. Inertial
7. Lamm
8. Al-Masaeid
9. Polus
10. Garach
11. Camacho
12. Granada
13. Perez
14. Passeti
15. Andueza
16. Cafiso
17. Quantum Geographic Information System
18. Pixel
19. Raster
20. Poisson
21. log-linear

- Llopis-Castelló, David, Francisco Javier Camacho-Torregrosa, and Alfredo García. 2019. "Analysis of the Influence of Geometric Design Consistency on Vehicle CO₂ Emissions." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 69:40–50. doi: 10.1016/J.AAP.2019.03.013.
- Llopis-Castelló, David, Daniel J. Findley, Francisco Javier Camacho-Torregrosa, and Alfredo García. 2019. "Calibration of Inertial Consistency Models on North Carolina Two-Lane Rural Roads." *Accident Analysis & Prevention* 127:236–45. doi: 10.1016/J.AAP.2019.03.013.
- Llopis-Castelló, David, Daniel J. Findley, and Alfredo García. 2020. "Comparison of the Highway Safety Manual Predictive Method with Safety Performance Functions Based on Geometric Design Consistency." <https://doi.org/10.1080/19439962.2020.1738612> 13(12):1365–86. doi: 10.1080/19439962.2020.1738612.
- Malaghan, Vinayak, Digvijay S. Pawar, and Hussein Dia. 2021. "Modeling Acceleration and Deceleration Rates for Two-Lane Rural Highways Using Global Positioning System Data." *Journal of Advanced Transportation* 2021. doi: 10.1155/2021/6630876.
- Matikana, S., B. Kadali-Transactions on transport sciences, and undefined. 2022. n.d. "Evaluation of Vehicle Speed with Impact of Vehicular Driver Behaviour at Horizontal Curves." *Tots.Upol.Cz*.
- Montella, Alfonso, Luigi Pariota, Francesco Galante, Lella Liana Imbriani, and Filomena Mauriello. 2014. "Prediction of Drivers' Speed Behavior on Rural Motorways Based on an Instrumented Vehicle Study." <https://doi.org/10.3141/2434-07> 2434:52–62. doi: 10.3141/2434-07.
- Journal of Transportation Engineering 140(8):04014030. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000683.
- Gibreel, G. M., S. M. Easa, Y. Hassan, and I. A. El-Dimeery. 1999. "State of the Art of Highway Geometric Design Consistency." *Journal of Transportation Engineering* 125(4):305–13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(305).
- Jacob, Anitha, R. Dhanya, and M. V. L. R. Anjaneyulu. 2013. "Geometric Design Consistency of Multiple Horizontal Curves on Two-Lane Rural Highways." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104:1068–77. doi: 10.1016/J.SBSPRO.2013.11.202.
- Lamm, Ruediger, Elias M. Choueiri, John C. Hayward, and Anand Paluri. 1988. "Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads." *Transportation Research Record* (1195):111–22.
- Lamm, Ruediger, Basil Psarianos, and Theodor Mailaender. 1999. *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*.
- Llopis-Castelló, David, Francisco Javier Camacho-Torregrosa, and Alfredo García. 2018a. "Calibration of the Inertial Consistency Index to Assess Road Safety on Horizontal Curves of Two-Lane Rural Roads." *Accident Analysis & Prevention* 118:1–10. doi: 10.1016/J.AAP.2018.05.014.
- Llopis-Castelló, David, Francisco Javier Camacho-Torregrosa, and Alfredo García. 2018b. "Development of a Global Inertial Consistency Model to Assess Road Safety on Spanish Two-Lane Rural Roads." *Accident Analysis & Prevention* 119:138–48. doi: 10.1016/J.AAP.2018.07.018.

- Ottesen, Jeffery L., and Raymond A. Krammes. 2000. “Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States.” *Transportation Research Record* 1701(00):76–85.
- Passetti, Karl A., and Daniel B. Fambro. 1999. “Operating Speeds on Curves With and Without Spiral Transitions.” <https://doi.org/10.3141/1658-02> (1658):9–16. doi: 10.3141/1658-02.
- Pérez Zuriaga, Ana María, Alfredo García García, Francisco Javier Camacho-Torregrosa, Pierangelo D’Attoma, Ana Maria Pérez Zuriaga, Alfredo García García, Francisco Javier Camacho Torregrosa, and Pierangelo D’Attoma. 2010. “Modeling Operating Speed and Deceleration on Two-Lane Rural Roads with Global Positioning System Data.” *Transportation Research Record* 2171(2171):11–20. doi: 10.3141/2171-02.
- Polus, Abishai, and Caroline Mattar-Habib. 2004. “New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety.” *Journal of Transportation Engineering* 130(3):286–93. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(286).
- Tahir, Hassan Bin, Simon Washington, Shamsunnahar Yasmin, Mark King, and Md Mazharul Haque. 2022. “Influence of Segmentation Approaches on the Before-after Evaluation of Engineering Treatments: A Hypothetical Treatment Approach.” *Accident Analysis and Prevention* 176. doi: 10.1016/j.aap.2022.106795.

تعیین شاخص‌های ناسازگاری در راه‌های برون‌شهری با استفاده از داده‌های متن‌باز طرح هندسی و بررسی ارتباط آن با انواع

تصادفات (مطالعه موردی: محور بردسکن - سبزوار)

محمد رضا خیراندیش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه شیراز اخذ نمود. ایشان در سال ۱۴۰۱ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - حمل و نقل از دانشگاه شهید بهشتی گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی جاده‌ای، تصادفات ترافیکی، مدلسازی و بهینه‌سازی است.



سینا صاحبی، دارای دکتری مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه صنعتی شریف هستند. هم‌چنین پس از گذراندن دوره پس‌دکتری در مرکز پایداری و تاب‌آوری زیرساخت‌های دانشگاه صنعتی شریف، از اسفندماه سال ۱۳۹۹ به عنوان عضو هیئت علمی تمام وقت در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به فعالیت شدند. حوزه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از؛ تحلیل داده های حمل و نقل، تکنولوژی های نوظهور در حمل و نقل، تلماتیک و بیمه‌های مصرف محور و مدلسازی آماری ایمنی ترافیک.



حمید مدنی، دارای درجه کارشناسی در رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی از دانشگاه تهران می‌باشد. علاقه مندی ایشان سیستم های اطلاعات مکانی تحت وب، پایگاه داده مکانی، مدل‌های مکانی و تحلیل شبکه است.

