



## Modeling Rear-End and Lane-Change Crash Severity Of Passenger Vehicles At Urban Roundabouts

Ali Rahmani<sup>1</sup> | Amin Mirza Boroujerdian<sup>2\*</sup>

1. Department of Highway and Transportation, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: [Ali.rahmani@edu.ikiu.ac.ir](mailto:Ali.rahmani@edu.ikiu.ac.ir)

2. Corresponding Author, Associated Professor, Department of Highway and Transportation & Road and Transportation Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: [boroujerdian@modares.ac.ir](mailto:boroujerdian@modares.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**  
Received 26 November 2025  
Revised 29 December 2025  
Accepted 25 February 2026  
Published Online 01 June 2026

**Keywords:**  
Urban roundabout,  
processing,  
Collision,  
Conflict,  
Speed.

### ABSTRACT

Predicting crash severity based on recorded crash data is associated with several challenges, including limited accessibility, incomplete information, and potential reporting errors. Consequently, surrogate safety measures provide a proactive approach that reduces reliance on crash data and enables the assessment of factors influencing crash severity prior to crash occurrence. Urban roundabouts, as intersections with a circular central island, play an important role in moderating vehicle speeds, making the analysis of factors affecting interaction severity particularly relevant. In this study, aerial image processing techniques were used to analyze rear-end interactions among passenger cars at the Roudband roundabout, located in Dezful County, Khuzestan Province, Iran. Performance-related variables were extracted using safety analysis software, and gamma regression models were employed to examine the factors influencing interaction severity. Surrogate safety measures, including time to collision (TTC), were used as the dependent variable to evaluate factors affecting the severity of rear-end and lane-change interactions. The results indicate that maximum speed has the strongest effect in the final rear-end interaction model, such that a one-unit increase in maximum speed leads to a 0.488-unit reduction in interaction severity. This finding highlights the statistically significant mitigating effect of maximum speed on the safety level of traffic interactions and demonstrates the influence of speed variations on reducing interaction severity at urban roundabouts.

**Cite this article:** Rahmani, A. & Mirza Boroujerdian, A. (2026). Modeling Rear-End and Lane-Change Crash Severity Of Passenger Vehicles At Urban Roundabouts. *Urban Development Policy Making*, 3 (2), 233-247. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.574180.1088>



© Ali Rahmani, Amin Mirza Boroujerdian  
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.574180.1088>

### Introduction

Road safety has consistently been regarded as a fundamentally important topic in scientific research. One of the most extensively investigated aspects of road safety is reflected in traffic crashes. Considering that vehicles approaching a roundabout must yield to circulating traffic, entry legs are treated as minor roads, while circulating lanes are regarded as major roads. In this sense, a roundabout can be conceptualized as a priority-controlled conventional intersection.

At a broader level, methods for evaluating the safety and operational performance of roundabouts are generally classified into two main categories: crash-based and conflict-based approaches. The challenges associated with crash-based analyses have led to the development of surrogate safety measures. These measures enable rapid evaluation of innovative intersection designs and traffic control strategies without requiring crash data, and they utilize identified traffic conflicts to assess

safety conditions. Surrogate safety indicators are considered among the most precise approaches for the functional analysis of roundabouts.

### Materials and Methods

Given the importance, availability, and crash-related relevance of surrogate safety measures, a more detailed examination of the factors influencing each traffic conflict can significantly enhance the prediction of safety conditions and the severity of conflicts at an intersection. Aerial video recording using an unmanned aerial vehicle (UAV) is one of the techniques for collecting traffic and operational data, and it was employed in this study as well.

Prior to conducting the aerial recording, the traffic conditions of the roundabout were assessed during different hours of the day in terms of level of service. Filming was performed under free-flow conditions so that vehicles could execute their corrective movements and maneuvers without constraints, as congestion may affect such maneuvers and consequently alter the nature of operational analysis compared to free-flow situations.

Considering the selected UAV-based data collection method and its inherent limitations, the video recording was carried out under sunny weather and on a dry asphalt surface. Heavy vehicles (such as trucks and trailers) are prohibited from entering this roundabout during the day; therefore, the rare instances of their presence (if any) were excluded from the analysis. Moreover, due to the relatively high altitude of the UAV, identifying conflicts involving motorcycles and pedestrians is challenging. As a result, this study focuses exclusively on conflicts between passenger vehicles.

### Results

In summary, the results obtained from the three regression models indicate that the intercept is negative and statistically significant in all specifications. The variable PET consistently appears as positive and highly significant across all three models, exhibiting the strongest influence on the dependent variable.

In the models incorporating additional explanatory variables, the behavior of MaxS and PostCrashV differs. Specifically, MaxS was statistically insignificant in Model 2 in certain analyses; however, in the final model, with the inclusion of PostCrashV, it became significant and demonstrated a negative effect. The variable PostCrashV appears only in Model 3 and shows a statistically significant impact on conflict severity at this stage.

A comparison of goodness-of-fit indicators, including AIC and BIC, as well as changes in Log-Likelihood and Pseudo  $R^2$ , suggests that Model 3 provides a superior fit. Owing to the greater number of significant variables and its higher explanatory power, this model is considered more appropriate for explaining variations in TTC.

Overall, although PET remains the most influential variable in all model specifications, the inclusion of MaxS and PostCrashV in the final model enriches the predictive structure and enhances overall model performance. Based on the results presented in Tables 4 and 6–7, PET consistently exhibits a positive and statistically significant coefficient across all three modeling scenarios, indicating that higher PET values are associated with increased TTC.

From both behavioral and physical perspectives, this finding is consistent with the theoretical foundations of surrogate safety measures. A larger PET reflects a greater temporal separation between two road users at the conflict point, thereby reducing the likelihood of an immediate collision. In other words, the results confirm that PET can serve as a reliable predictive indicator for describing the safety level of traffic interactions and demonstrates a clear structural relationship with TTC.

### Discussion and Conclusion

- The results of the three modeling frameworks indicate that PET is the most stable and influential variable in explaining variations in TTC. Across all model specifications, PET exhibits a positive and statistically significant relationship with conflict severity.
- In Type 1 models (lane-changing conflicts), only the base model including PET was statistically significant, while the speed-related variables, MaxS and PostCrashV, did not show significant

effects. This suggests that, in lane-changing conflicts, temporal variables play a more dominant role than speed variables in explaining variations in TTC.

- In Type 2 models (rear-end conflicts), the inclusion of speed variables altered the effect pattern. The increase in the PET coefficient from 1.917 in Model 1 to 2.393 in Model 3 indicates that when speed is simultaneously controlled, the importance of PET is further strengthened.
- The Type 3 models (all conflicts combined) confirmed a similar pattern. PET remained positive and statistically significant in all specifications, with its coefficient increasing from 1.42 in Model 1 to 1.70 in Model 3.
- A comparison of goodness-of-fit measures shows that adding explanatory variables improves model performance. In Type 1 models, Model 2 provided the best combination of AIC, BIC, and Pseudo R<sup>2</sup>. However, in Type 2 models, Model 3 demonstrated the best overall fit among all specifications, with the highest Log-Likelihood, the lowest AIC, and the highest Pseudo R<sup>2</sup>.
- The Gamma regression model with a log link function demonstrated strong performance in modeling the TTC indicator. This model is consistent with the strictly positive and right-skewed nature of TTC data and achieved appropriate Log-Likelihood values, reduced AIC and BIC, and acceptable Pseudo R<sup>2</sup> values. Overall, it provided robust goodness-of-fit and statistical stability across all model structures and effectively explained variations in conflict severity.
- The goodness-of-fit statistics further confirm the satisfactory performance of the Gamma models. For lane-changing conflicts (Type 1), Model 2 achieved the best fit (Log-Likelihood = -30.21, AIC = 54.194, BIC = 77.79, Pseudo R<sup>2</sup> = 0.544). For rear-end conflicts (Type 2), Model 3 showed the best overall performance (Log-Likelihood = -21.476, AIC = 50.953, highest Pseudo R<sup>2</sup> = 0.386). For the combined conflict type (Type 3), although AIC and BIC values were relatively close across models, Model 3 provided greater explanatory power (Pseudo R<sup>2</sup> = 0.41). Collectively, these findings confirm the suitability and effectiveness of the Gamma regression approach in modeling TTC.



## مدل پیش‌بینی شدت تصادفات جلو به عقب و تغییر خط خودروهای سواری در میدان شهری

علی رحمانی<sup>۱</sup> | امین میرزا بروجردیان<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی راه و ترابری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(\*)</sup>، قزوین، ایران. رایانامه: [Ali.rahmani@edu.ikiu.ac.ir](mailto:Ali.rahmani@edu.ikiu.ac.ir)  
۲. نویسنده مسؤل، دانشیار گروه مهندسی راه و ترابری و رئیس مرکز تحقیقات راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: [boroujerdian@modares.ac.ir](mailto:boroujerdian@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>نوع مقاله:</b> پژوهشی	
<b>تاریخ‌های مقاله:</b> تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱	
<b>کلیدواژه:</b> میدان، پردازش، تصادف، تداخلات، سرعت.	پیش‌بینی شدت تصادفات بر پایه داده‌های ثبت‌شده، به دلیل محدودیت‌های دسترسی، ناقص بودن اطلاعات و احتمال بروز خطا در فرایند ثبت، با دشواری‌هایی همراه است. به همین دلیل، استفاده از معیارهای جایگزین ایمنی به عنوان رویکردی پیش‌نگر می‌تواند وابستگی به داده‌های تصادفات را کاهش دهد و امکان تحلیل عوامل اثرگذار بر شدت حوادث را پیش از وقوع فراهم کند. میدان‌های شهری به عنوان یکی از انواع تقاطع‌های دارای جزیره مرکزی دایره‌ای، نقش مؤثری در تعدیل سرعت وسایل نقلیه داشته و بررسی عوامل مؤثر بر شدت تداخلات در آن‌ها اهمیت دارد. در این مطالعه، با استفاده از پردازش تصاویر هوایی، تداخلات جلو به عقب خودروهای سواری در میدان رودبند واقع در شهرستان دزفول، استان خوزستان، مورد تحلیل قرار گرفت. مقادیر ویژگی‌های عملکردی از طریق نرم‌افزار تحلیل ایمنی استخراج شد و سپس رگرسیون گاما برای بررسی عوامل مؤثر بر شدت تداخلات به کار گرفته شد. در این پژوهش، معیارهای جایگزین ایمنی از جمله زمان تا برخورد (TTC) به عنوان متغیر وابسته مورد استفاده قرار گرفت تا عوامل مؤثر بر آن به عنوان معیاری جایگزین برای شدت تداخلات جلو به عقب و تغییر خط بررسی شود. نتایج نشان داد بیشینه سرعت بیشترین اثر را در مدل نهایی تداخلات جلو به عقب دارد؛ به طوری که با افزایش هر واحد در مقدار بیشینه سرعت، شدت تداخل به میزان ۰/۴۸۸ واحد کاهش می‌یابد. این یافته بیانگر نقش کاهنده و معنادار سرعت بیشینه بر سطح ایمنی تداخلات است و نشان می‌دهد تغییرات سرعت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش شدت تداخلات و بهبود ایمنی در میدان‌های شهری داشته باشد.

**استناد:** رحمانی، علی و بروجردیان، امین میرزا (۱۴۰۵). مدل پیش‌بینی شدت تصادفات جلو به عقب و تغییر خط خودروهای سواری در میدان شهری. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۲) ۲۳۳-۲۴۷.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.574180.1088>

© علی رحمانی، امین میرزا بروجردیان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.574180.1088>



## ۱. مقدمه

ایمنی معابر همواره یک موضوع بااهمیت بنیادین برای پژوهش علمی بوده است. یکی از جنبه‌هایی که بیشتر مورد تحقیق قرار گرفته، توسط تصادفات جاده‌ای نمایان می‌شود [۱]. با توجه به اینکه وسایل نقلیه در رویکرد ورودی باید به دلیل رعایت حق تقدم، به وسایل نقلیه در خطوط گردش توقف کنند، خطوط ورودی به عنوان جاده فرعی و خطوط گردشی به عنوان جاده اصلی در نظر گرفته می‌شوند. میدان را می‌توان به عنوان تقاطع معمولی با اولویت کنترل در نظر گرفت [۲]. در سطح وسیع‌تر ارزیابی ایمنی و عملکرد میدان‌ها، روش‌های ارزیابی به دو دسته کلی تصادف‌محور<sup>۱</sup> و تداخل‌محور<sup>۲</sup> تقسیم می‌کنند [۳]. چالش‌های مرتبط با تحلیل‌های مبتنی بر تصادف، منجر به توسعه معیارهای جایگزین ایمنی<sup>۳</sup> بوده‌اند. معیارهای جایگزین ایمنی، ارزیابی سریع طرح‌های نوآورانه تقاطع و استراتژی‌های کنترل ترافیک را بدون نیاز به داده‌های تصادفات پشتیبانی می‌کنند و تداخلات<sup>۴</sup> ایمنی مشخص را به منظور ارزیابی وضعیت ایمنی به کار می‌بندند [۴]. شاخص‌های ایمنی جایگزین از دقیق‌ترین رویکردها برای تحلیل عملکردی میدان‌ها به شمار می‌روند [۵].

مطالعات مرتبط با ایمنی میدان‌ها نشان می‌دهند دو تکنیک اصلی، شامل رویکرد مبتنی بر تصادف و رویکرد مبتنی بر تداخل، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. تکنیک تداخل ترافیکی<sup>۵</sup> ماهیتی پیش‌نگرانه دارد، زیرا برای انجام این تحلیل، نیازی به انتظار برای ثبت یا وقوع تصادف‌ها نیست [۶]. شاخص ایمنی<sup>۶</sup> TTC یا زمان برخورد<sup>۷</sup> که رایج‌ترین معیار مجاورت زمانی است، نخستین بار توسط هیوارد<sup>۸</sup> در سال ۱۹۷۱ معرفی شد. این شاخص به صورت «زمان باقی‌مانده تا وقوع برخورد، در صورتی که دو وسیله نقلیه با سرعت فعلی خود و در امتداد یک مسیر یکسان به حرکت ادامه دهند»، تعریف می‌شود. شاخص<sup>۹</sup> PET که از شاخص‌های ایمنی به شمار می‌رود؛ به مدت زمان سپری‌شده از پایان تعدی<sup>۱۰</sup> تا لحظه‌ای که وسیله نقلیه دارای حق تقدم عبور، به نقطه بالقوه برخورد می‌رسد [۴]. PET یک معیار جایگزین ایمنی است که برای سنجش شدت تداخلات ترافیکی در تقاطع‌ها، گذرگاه‌های عابر پیاده و موقعیت‌های تداخلی مشابه به کار می‌رود. مقادیر کوچک PET نشان‌دهنده نزدیکی زمانی بیشتر بین کاربران راه و در نتیجه ریسک بالاتر برخورد هستند، در حالی که مقادیر بزرگ‌تر PET بیانگر شرایط ایمن‌تر هستند. تداخل‌های ترافیکی معمولاً بر اساس شش نوع اصلی تداخل طبقه‌بندی می‌شوند؛ حرکت هم‌جهت، گردش به چپ در جهت مخالف، تداخل جریان‌های متقاطع، گردش به راست در زمان چراغ قرمز، تداخل با عابر پیاده و تداخل ثانویه. تداخل هم‌جهت زمانی رخ می‌دهد که وسیله نقلیه اول سرعت خود را کاهش دهد و یا مسیر حرکت خود را تغییر دهد و در نتیجه، وسیله نقلیه دنبال‌کننده را در معرض خطر برخورد از عقب قرار دهد [۷].

در اغلب مطالعات مرتبط با تحلیل ایمنی میدان‌ها، خط سیر وسایل نقلیه در محدوده داخلی میدان به عنوان داده ورودی اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خط سیرها عموماً از طریق دو رویکرد اصلی استخراج می‌شوند. در رویکرد نخست، مسیر حرکت وسایل نقلیه از داده‌های تصویری ثبت‌شده توسط پهپادها و با بهره‌گیری از روش‌های پردازش تصویر استخراج می‌شود. در رویکرد دوم، خط سیر وسایل نقلیه از طریق نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک نظیر VISSIM و AIMSUN تولید می‌شود که امکان تحلیل سناریوهای مختلف ترافیکی را فراهم می‌سازد. این مسیرهای حرکتی، مبنای اصلی شناسایی و ارزیابی تداخلات ترافیکی و محاسبه شاخص‌های ایمنی جانشین در مطالعات ایمنی میدان‌ها محسوب می‌شوند [۳].

در مطالعه‌ای که بر پایه تحلیل ۲۶ میدان در کشور اسلونی انجام شده است، به منظور استخراج اطلاعات عملکردی وسایل نقلیه، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک AIMSUN و VISSIM استفاده شد. خط سیر وسایل نقلیه شبیه‌سازی شده به عنوان

1. Crash-based
2. Conflict-based
3. Surrogate Safety Measures
4. Conflict
5. Traffic Conflict Technique – TCT
6. Time To Collision
7. Time Measured to Collision
8. Hayward
9. Post Encroachment Time
10. Encroachment

داده‌های ورودی اصلی، جهت شناسایی، استخراج و ارزیابی تداخلات ترافیکی مورد استفاده قرار گرفتند. در این مطالعه، آستانه بالای TTC برابر با ۱/۵ ثانیه و آستانه بالای PET برابر با ۲/۵ ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد مدل شبه‌پواسون<sup>۱</sup> از نظر برازش آماری با داده‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته و در مقایسه با مدل دوجمله‌ای منفی<sup>۲</sup>، دقت پیش‌بینی اندکی بالاتر را ارائه می‌دهد [۵].

در پژوهشی دیگر، میدان برق (بسیج) در شهر مشهد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد که جزیره مرکزی آن به شکل جداشده<sup>۳</sup> است. داده‌های ترافیکی در ساعت‌های اوج با استفاده از پهپاد جمع‌آوری و ویدئوها در نرم‌افزار DataFromSky پردازش شدند تا مسیر حرکت وسایل نقلیه استخراج شود. فایل‌های مسیر حرکت به نرم‌افزار SSAM 3.0 منتقل شدند و شاخص‌های ایمنی جانشین شامل TTC، MaxΔV (حداکثر اختلاف سرعت دو وسیله) و MaxS (حداکثر سرعت وسیله) برای تحلیل تداخلات ترافیکی محاسبه شد. نتایج نشان داد بیش از ۵۰ درصد تداخلات دارای TTC کمتر از ۱/۵ ثانیه بوده که بیانگر سطح ریسک ایمنی بالا در این میدان است [۳].

پرکاربردترین شاخص مجاورت زمانی TTC است که به دلیل مسائل نظری و قابلیت اطمینان، نسبت به بسیاری از معیارهای دیگر ترجیح داده می‌شود [۸]. حداقل TTC به دست آمده هنگام نزدیک شدن دو وسیله نقلیه در مسیر برخورد یا یکدیگر، به عنوان شاخصی برای شدت یک تداخل در نظر گرفته می‌شود و هر چه مقدار TTC کمتر باشد، سطح برخورد بالقوه بالاتر است [۹]. به طور کلی، TTC کمتر از زمان ادراک و واکنش، ناایمن تلقی می‌شود [۱۰]. مقادیر آستانه بحرانی TTC در مطالعات مختلف متفاوت است، اما مقادیری مانند ۱/۰ تا ۲/۰ ثانیه برای تقاطع‌ها و ۱/۶ تا ۳/۰ ثانیه برای سطوح مختلف تداخل گزارش شده است [۱۱ و ۱۲]. شاخص PET برای ارزیابی تداخلات تقاطعی<sup>۴</sup> مناسب‌تر از TTC است و رفتار راننده را نشان می‌دهد [۱۳]. معمولاً مقادیر PET کمتر از ۱/۰ یا ۱/۵ ثانیه بحرانی در نظر گرفته می‌شوند [۱۴].

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، به منظور برداشت اطلاعات مربوط به خط سیر حرکتی وسایل نقلیه در میدان‌های شهری، روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری، برداشت فیلم هوایی یا تلفیق این دو روش به کار گرفته شده است. در پژوهش [۵] که در اسلوانی انجام شد از نرم‌افزار شبیه‌ساز ترافیکی برای شبیه‌سازی خط سیر ترافیکی و در ادامه برداشت اطلاعات عملکردی وسایل نقلیه با در نظرگیری آستانه TTC کمتر از ۱/۵ ثانیه و PET کمتر از ۲/۵ ثانیه توسط نرم‌افزار SSAM به کار گرفته شده است. در پژوهش [۳] که در میدانی با جزیره مرکزی جداشده در ایران انجام شد، پردازش فیلم‌های هوایی برداشت‌شده و پردازش آن‌ها در نرم‌افزار DataFromSky و SSAM، با شاخص تداخلی TTC در آستانه بحرانی ۱/۵ ثانیه انجام شد. در این پژوهش از رگرسیون خطی برای پیش‌بینی عوامل مؤثر بر شدت تداخلات بحرانی استفاده شده است. تحقیقات انجام‌شده میدان‌های شهری در اروپا و میدانی با جزیره مرکزی جداشده در مشهد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر شاخص تداخلی هر یک در شاخص TTC برابر بوده، ولی در مطالعه [۵]، شاخص تداخلی PET به عنوان متغیری برای در نظرگیری ارتباط آن با شاخص TTC در آستانه ۲/۵ ثانیه استفاده شد، در حالی که در مطالعه [۳]، از سرعت عملکردی وسایل نقلیه همراه با TTC در نظر گرفته شد.

در مطالعات پیشین، ارتباط متغیرهای برداشت‌شده عمدتاً بدون تمرکز بر یک نوع خاص از تداخلات (مانند تداخلات جلو به عقب یا تداخلات تغییر خط) بررسی شده است؛ به گونه‌ای که رابطه شاخص‌های تداخلی با مجموع این تداخلات سنجیده شده‌اند. در این پژوهش، از شاخص‌های تداخلی TTC، PET و سرعت عملکردی وسایل نقلیه در میدان، به منظور بررسی تداخلات جلو به عقب و همچنین، تداخلات تغییر خط استفاده شده است.

این پژوهش مبتنی بر داده‌های گردآوری‌شده از یک میدان شهری مشخص است و تمرکز اصلی آن بر ارائه یک چارچوب تحلیلی و بررسی روابط رفتاری میان شاخص‌های تداخل ترافیکی و شدت پیامدهای تصادف قرار دارد. از این رو، هدف مطالعه تعمیم مستقیم نتایج به تمامی شبکه‌های شهری نبوده است. محدود بودن دامنه داده‌ها به یک موقعیت مکانی خاص می‌تواند بر میزان

1. Quasi-Poisson

2. Negative Binomial – NB

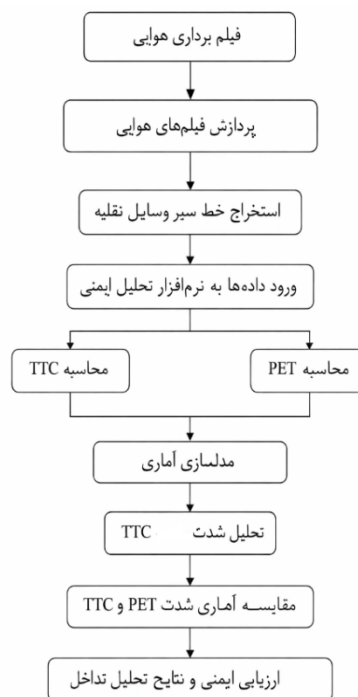
3. Separated Central Island- SCI

4. intersecting conflicts

تعمیم‌پذیری یافته‌ها تأثیرگذار باشد و اعتبار خارجی نتایج را با محدودیت مواجه سازد. بر همین اساس، نتایج این پژوهش باید با احتیاط تفسیر شوند. بدیهی است که ارزیابی جامع‌تر اعتبار یافته‌ها مستلزم به‌کارگیری داده‌های چندمکانه و بررسی شرایط متنوع هندسی و ترافیکی در مطالعات آتی خواهد بود، امری که می‌تواند به تعمیم‌پذیری بیشتر و تقویت قابلیت کاربرد نتایج منجر شود.

## ۲. روش پژوهش

با توجه به اهمیت استفاده از معیارهای جایگزین ایمنی، در دسترس بودن و ارتباط آن‌ها با تصادفات، بررسی هرچه دقیق‌تر عوامل موثر بر هر تداخل می‌تواند در پیش‌بینی هرچه بیشتر شرایط ایمنی و شدت تداخلات یک تقاطع مؤثر باشد. فیلم‌برداری هوایی با پهپاد، از روش‌های برداشت اطلاعات از شرایط ترافیکی و عملکردی است که در این پژوهش نیز از آن بهره گرفته شده است. پیش از فیلم‌برداری هوایی، شرایط ترافیکی میدان در ساعت‌های مختلف یک روز، از نظر سطح سرویس ترافیکی مورد بررسی قرار گرفت و فیلم‌برداری در حالتی انجام شد که جریان آزاد وسایل نقلیه در جریان بود تا وسایل نقلیه بتواند حرکات و مانورهای اصلاحی خود را آزادانه انجام دهند، زیرا ممکن است در موقعیت ازدحام ترافیک، انجام مانورهای اصلاحی تحت تأثیر قرار گرفته و نحوه تحلیل عملکردی نیز متفاوت از جریان آزاد باشد. با توجه به انتخاب روش فیلم‌برداری هوایی و محدودیت‌های آن، فیلم‌برداری در شرایط آب‌وهوایی آفتابی و در شرایطی که سطح رویه آسفالتی خشک است، انجام شده است. تردد وسایل نقلیه سنگین (کامیون و تریلی) در روز در این میدان ممنوع است و از اندک تردد آن‌ها (در صورت وجود) صرف نظر شده و با توجه به بالا بودن ارتفاع پهپاد، تشخیص تداخلات موتورسیکلت و عابران پیاده، با مشکل روبه‌رو است. بنابراین، در این پژوهش فقط تداخلات وسایل نقلیه سواری با سواری مورد بررسی است. مراحل انجام پژوهش در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. روند نمای پژوهش

## ۲-۱. استخراج خط سیر و شناسایی تداخلات ترافیکی

فیلم تهیه‌شده از میدان رودبند، با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر<sup>۱</sup>، پردازش شده است. با استفاده از این نرم‌افزار خط سیر وسایل نقلیه به تفکیک استخراج و از آن برای استفاده در نرم‌افزار تحلیل ایمنی<sup>۲</sup> استفاده شده است. نرم‌افزار تحلیل ایمنی، همان‌گونه که در

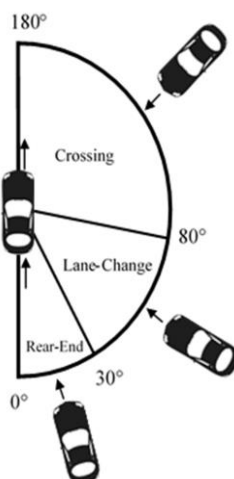
1. DataFromSky  
2. SSAM

تحقیقات پیشین گفته شد، از خط سیر ترافیکی وسایل نقلیه به عنوان ورودی بهره می‌گیرد و فایلی شامل ویژگی‌های عملکردی و همچنین، معیارهای تداخلی را با در نظرگیری آستانه بحرانی آن‌ها، به عنوان خروجی‌های عددی می‌دهد. در این پژوهش معیارهای ایمنی TTC و PET برای ارزیابی وضعیت تداخلات، از ویژگی‌های تداخلات جلو به عقب و تداخلات تغییر خط خودروهایی سواری، در میدان رودبند استفاده شده است. با توجه اهمیت مقدار آستانه بحرانی تداخلات، در نظرگیری مقدار TTC و PET می‌تواند در ارزیابی مؤثر باشد. با توجه به پیشنهاد این مقادیر در پژوهش‌های [۱۱ و ۱۲]، مقدار معیار TTC و PET در این پژوهش، مقدار ۱/۵ ثانیه برای هر یک از معیارهای ایمنی در نظر گرفته شده است. نمونه خط سیرهای استخراج‌شده از طریق نرم‌افزار پردازش تصویر در شکل ۲ به نمایش درآمده است که خروجی خط سیرها در نرم‌افزار تحلیل ایمنی، استفاده شده است.



شکل ۲. خط سیر تحلیل‌شده در نرم‌افزار DFS

تداخلات ترافیکی با توجه به زاویه نزدیکی وسایل نقلیه به یکدیگر در نرم‌افزار تحلیل ایمنی به سه دسته تقسیم شده است. در این پژوهش تداخلات از نوع جلو به عقب یا (Read-End) و همچنین، تداخلات تغییر خط (Lane Changing) مورد بررسی قرار گرفته است و معیارهای ایمنی برای این نوع تداخلات برداشت شده‌اند. همچنین، دو معیار عملکردی وسایل نقلیه از جمله بیشترین سرعت وسیله نقلیه بر حسب متربرثانیه (MaxS) و سرعت پس از تداخل (PostCrashV) نیز بر حسب متربرثانیه برداشت شد. جزئیات تقسیم‌بندی تداخلات در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. تقسیم‌بندی تداخلات بر اساس زاویه نزدیک شدن آن‌ها

در این پژوهش میدان رودبند که یکی از میدان‌های مهم شهرستان دزفول واقع در استان خوزستان است، مورد پژوهش قرار گرفته است. این میدان در قسمت شمال غربی شهر دزفول قرار دارد. محل میدان در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. پیکربندی و رویکردهای منتهی به میدان رودبند

## ۲-۲. روش مدل‌سازی آماری

توزیع گاما یکی از توزیع‌های احتمال پیوسته و فرم تعمیم‌یافته توزیع نمایی است [۱۵]. یکی از روش‌های آماری قابل اجرا برای تحلیل داده‌هایی که از توزیع گاما پیروی می‌کنند و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده آن‌ها، رگرسیون گاما است. رگرسیون گاما نوعی رگرسیون غیرخطی محسوب می‌شود. یک مدل رگرسیون غیرخطی، دست‌کم شامل یک پارامتر با فرم غیرخطی است [۱۶ و ۱۷]. رگرسیون گامایی که دارای چندین متغیر پاسخ باشد، به اصطلاح رگرسیون گامای چندمتغیره (MGR) نامیده می‌شود. مدل خطی تعمیم‌یافته<sup>۲</sup> برای توزیع گاما به طور گسترده در مدل‌سازی داده‌های پیوسته، غیرمنفی و با چولگی مثبت، به کار گرفته می‌شود. با این حال، انتخاب مدل برای به معیارهای AIC/BIC بستگی دارد [۱۸]. فرض کنید  $TTC_i$  نشان‌دهنده مقدار پیوسته TTC برای تعامل  $i$  باشد، به طوری که  $TTC_i > 0$  است. فرض توزیعی [۱۹]، (رابطه ۱):

$$TTC_i \sim \text{Gamma}(\mu_i, \phi) \quad (1)$$

که در آن:  $\mu_i = E(TTC_i) > 0$  میانگین شرطی و  $\phi$  پارامتر پراکندگی است. و از یک تابع پیوند لگاریتمی (Log-link function) برای تضمین مثبت بودن میانگین استفاده شد. رابطه ۲ نشان‌دهنده رابطه گفته شده است:

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 PET_i + \beta_2 \text{Post Crash } V_i + \beta_3 \text{Max } S_i \quad (2)$$

## ۳. بحث و یافته‌ها

### ۳-۱. تحلیل توصیفی تداخلات ترافیکی

در این پژوهش، شدت تداخل‌های جلو به عقب و تغییر خط سواری با سواری با استفاده از شاخص زمان تا برخورد پیوسته (TTC) در بازه صفر تا ۱/۵ ثانیه تحلیل شد. بررسی‌های آماری اولیه نشان داد TTC متغیری پیوسته، مثبت و دارای تجمع شدید نزدیک صفر

است؛ بنابراین، برای مدل‌سازی آن از رگرسیون خطی تعمیم‌یافته با توزیع گاما و تابع پیوند لگاریتمی استفاده شد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از متغیرهای برداشت‌شده توسط نرم‌افزار تحلیل ایمنی آمده است.

**جدول ۱. خلاصه متغیرهای برداشت‌شده از نرم‌افزار SSAM**

متغیر	میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
TTC	۰/۷۱	۰	۱/۵
PET	۰/۵۷	۰	۲/۱۳
MaxS	۴/۱	۰/۷۳	۸/۹۹
PostCrashV	۲/۸۶	۰/۰۵	۸/۲۶

آمار توصیفی ارائه‌شده در جدول ۱ نشان می‌دهد متغیرهای مورد استفاده دامنه تغییرات مناسبی را پوشش می‌دهند و از نظر رفتاری و فیزیکی قابل تفسیر هستند. متغیر TTC با میانگین ۰/۷۱ و بازه‌ای از ۰ تا ۱/۵ بیانگر وجود طیف متنوعی از شرایط زمانی برخورد، از موقعیت‌های بسیار بحرانی تا وضعیت‌های نسبتاً ایمن است. به طور مشابه، متغیر PET دارای میانگین ۰/۵۷ بوده و با تغییرات بین ۰ تا ۲/۱۳ نشان‌دهنده تنوع قابل توجه در فاصله زمانی عبور وسایل نقلیه و سطوح مختلف ریسک تصادف است. متغیر MaxS با میانگین ۴/۱ و دامنه‌ای بین ۰/۷۳ تا ۸/۹۹ بیانگر پراکندگی بالای سرعت بیشینه در داده‌هاست که می‌تواند نقش مهمی در تبیین شدت تصادفات ایفا کند.

بین متغیر وابسته TTC و متغیر PET همبستگی مثبت و نسبتاً قوی به میزان ۰/۷۲ وجود دارد که بیانگر رابطه مستقیم و قابل توجه این دو شاخص زمانی است. این مقدار نشان می‌دهد با افزایش PET، مقدار TTC نیز افزایش می‌یابد و از نظر شدت رابطه، قوی‌ترین ارتباط در بین تمامی زوج متغیرها مربوط به این دو متغیر است. در مقابل، TTC با متغیرهای سرعت شامل MaxS و PostCrashV همبستگی منفی و ضعیفی حدود ۰/۱۴- دارد. این مقدار نشان می‌دهد افزایش سرعت بیشینه یا سرعت پس از تداخل، با کاهش جزئی TTC همراه است، اما شدت این رابطه پایین بوده و بیانگر اثر خطی محدود این متغیرها بر TTC در سطح همبستگی ساده است (جدول ۲).

**جدول ۲. بررسی همبستگی متغیرهای مستقل و وابسته**

متغیر	TTC	PET	MaxS	PostCrashV
TTC	۱	۰/۷۲	-۰/۱۴	-۰/۱۴
PET	۰/۷۲	۱	-۰/۲۴	-۰/۳۱
MaxS	-۰/۱۴	-۰/۲۴	۱	۰/۴۲
PostCrashV	-۰/۱۴	-۰/۳۱	۰/۴۲	۱

طبق نتایج (جدول ۳) مقدار VIF مربوط به PET برابر با ۰/۵۷ است که نشان‌دهنده سطح بسیار پایین هم‌خطی و استقلال مناسب این متغیر از سایر متغیرهای مدل است. مقادیر VIF متغیرهای MaxS و PostCrashV اگرچه نسبت به PET بالاترند، اما همچنان در دامنه قابل قبول برای مدل‌های رفتاری و ایمنی ترافیک قرار می‌گیرند و فقط بیانگر وجود هم‌خطی متوسط هستند.

**جدول ۳. بررسی هم‌خطی چندگانه (VIF)**

متغیر	VIF
PET	۰/۵۷
MaxS	۵/۳۱
PostCrashV	۵/۵۳

## ۳-۲. مقایسه مدل‌های رگرسیون گاما

مدل‌سازی آماری پژوهش به این صورت است که به تفکیک عوامل مؤثر بر هر تداخل (تغییرخط و جلو به عقب) را بررسی کرده و در مدل پایانی، مدل‌سازی آماری را با استفاده از ترکیب تداخلات یادشده انجام داده و مقایسه شده است. در گام نخست، رابطه بین TTC و شاخص زمانی خطر (PET) به صورت رابطه ۳ بررسی شد:

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{PET}_i \quad (3)$$

سپس، برای بررسی نقش عوامل رفتاری، متغیرهای مرتبط با رفتار راننده به مدل افزوده شدند ابتدا متغیر MaxS به رابطه ۳ اضافه شد که رابطه آن در زیر نشان داده شده است (رابطه ۴).

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{PET}_i + \beta_2 \text{MaxS}_i \quad (4)$$

در مدل سوم، متغیر مستقل و رفتاری PostCrashV در مدل قرار داده شد که شکل نهایی رابطه آن به صورت رابطه ۵ شده است.

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{PET}_i + \beta_2 \text{MaxS}_i + \beta_3 \text{PostCrashV}_i \quad (5)$$

نتایج مدل‌سازی انجام‌شده برای تداخلات تغییر خط (نوع ۱)، جلو به عقب (نوع ۲) و (نوع ۳) که دو تداخل در آن هستند به ترتیب با رگرسیون گاما که با زبان برنامه‌نویسی پایتون توسعه پیدا کرده، در ادامه آمده است. هر یک از حالت‌های گفته‌شده در جدول‌های زیر آمده است.

نتایج سه مدل نشان می‌دهد مقدار ثابت در تمامی مدل‌ها منفی و معنادار است. متغیر PET در هر سه مدل اثر مثبت و پایدار دارد و با ضرایب تقریباً یکسان و سطح معناداری ۰/۰۰۱، مهم‌ترین متغیر تبیین‌کننده شدت تداخلات محسوب می‌شود. در مقابل، متغیر MaxS در مدل دوم و پس از ورود متغیر PostCrashV در مدل سوم به سطح معناداری آماری نمی‌رسد. همچنین، PostCrashV که تنها در مدل سوم لحاظ شده، اثر معناداری بر متغیر وابسته نشان نمی‌دهد. به طور کلی، افزودن متغیرهای جدید تأثیری بر معناداری PET نداشته و این متغیر در تمامی ساختارهای مدل‌سازی قوی‌ترین و تنها عامل معنادار باقی مانده است (جدول ۴).

یافته‌ها نشان می‌دهد عرض از مبدأ در هر سه مدل منفی و از نظر آماری معنادار است. متغیر PET در تمامی مدل‌ها اثری مثبت و بسیار معنادار دارد و افزایش مقدار ضریب آن بیانگر نقش پایدار و قوی این شاخص در تبیین متغیر وابسته است. در مدل دوم، MaxS معنادار نیست، اما با ورود متغیر PostCrashV در مدل سوم، اثر MaxS معنادار می‌شود و PostCrashV نیز تأثیر مثبت و معناداری از خود نشان می‌دهد. به طور کلی، نتایج بیانگر آن است که هر چند PET در همه مدل‌ها متغیر کلیدی است، اما مدل سوم با حضور هم‌زمان MaxS و PostCrashV از غنای تبیینی بالاتری برخوردار است (جدول ۵).

جدول ۴. نتایج مدل‌های آماری تداخلات تغییرخط (مدل نوع ۱)

متغیر	مدل ۱:	مدل ۲:	مدل ۳:
ثابت (Constant)	ضریب -۲/۲۵ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۲/۵۸ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۲/۶۲ P-value ۰/۰۰۱
PET	ضریب ۱/۹۳ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۱/۹۴ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۱/۹۵ P-value ۰/۰۰۱
MaxS	— P-value —	ضریب ۰/۰۸ P-value ۰/۲۴۰	ضریب ۰/۱۵۷ P-value ۰/۳۴۴
PostCrashV	— P-value —	— P-value —	ضریب -۰/۱۱ P-value ۰/۵۹۷

جدول ۵. نتایج مدل‌های آماری تداخلات جلو به عقب (مدل نوع ۲)

متغیر	مدل ۱:	مدل ۲:	مدل ۳:
ثابت (Constant)	ضریب -۱/۳۶۴ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۱/۰۲۹ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۱/۴۳۲ P-value ۰/۰۰۱
PET	ضریب ۱/۹۱۷ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۱/۸۸۷ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۲/۳۹۳ P-value ۰/۰۰۱
MaxS	— P-value —	ضریب -۰/۰۷۹ P-value ۰/۱۶۶	ضریب -۰/۴۸۸ P-value ۰/۰۰۱
PostCrashV	— P-value —	— P-value —	ضریب ۰/۶۱۴ P-value ۰/۰۰۱

نتایج برآورد سه مدل که در (جدول ۶) آمده است؛ نشان می‌دهد مقدار ثابت در تمامی مدل‌ها منفی و از نظر آماری معنادار است. متغیر PET در همه ساختارهای مدل‌سازی اثری مثبت و معنادار داشته و افزایش تدریجی ضرایب آن بیانگر پایداری و اهمیت این شاخص در تبیین متغیر وابسته است. متغیر MaxS در مدل دوم معنادار نیست، اما با ورود متغیر PostCrashV در مدل سوم، اثر آن منفی و معنادار می‌شود. همچنین، PostCrashV که تنها در مدل سوم لحاظ شده، اثر مثبت و معناداری بر متغیر وابسته دارد. به طور کلی، مدل سوم با معنادار شدن هم‌زمان هر سه متغیر PET، MaxS و PostCrashV، بالاترین غنای تبیینی را نشان می‌دهد.

مقدار Log-Likelihood از  $-33/797$  در مدل ۱ به  $-30/21$  در مدل ۲ و  $-25/46$  در مدل ۳ بهبود یافته است که نشان‌دهنده بهبود نسبی برازش مدل با افزودن متغیرهای جدید است. شاخص AIC در مدل ۲ کمترین مقدار ( $54/194$ ) را دارد و در مقایسه با مدل ۱ ( $71/59$ ) و مدل ۳ ( $58/92$ ) عملکرد بهتری نشان می‌دهد. از نظر BIC نیز مدل ۱ کمترین مقدار ( $74/96$ ) را دارد، در حالی که مدل‌های ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر  $77/79$  و  $81/9$  را نشان می‌دهند. مقدار  $Pseudo R^2$  در هر سه مدل بسیار نزدیک به هم است ( $0/541$ ،  $0/544$  و  $0/534$ ) که بیانگر تفاوت اندک در توان تبیینی مدل‌هاست. در مجموع، اگرچه مدل ۳ دارای بالاترین مقدار Log-Likelihood است، اما بر اساس AIC مدل ۲ عملکرد بهتری دارد و از نظر BIC مدل ۱ کمترین مقدار را نشان می‌دهد. در ادامه، به منظور ارزیابی نیکویی برازش مدل رگرسیون گاما، مقایسه مقادیر AIC و BIC در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج مدل‌های آماری تداخلات جلو به عقب و تغییر خط (مدل نوع ۳)

متغیر	مدل ۱:	مدل ۲:	مدل ۳:
ثابت (Constant)	ضریب -۱/۳۶ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۱/۲۴ P-value ۰/۰۰۱	ضریب -۱/۴۶ P-value ۰/۰۰۱
PET	ضریب ۱/۴۲ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۱/۴۱۴ P-value ۰/۰۰۱	ضریب ۱/۷ P-value ۰/۰۰۱
MaxS	— P-value —	ضریب -۰/۰۲۹ P-value ۰/۴۹۰	ضریب -۰/۳۵ P-value ۰/۰۰۱
PostCrashV	— P-value —	— P-value —	ضریب ۰/۴۷ P-value ۰/۰۰۱

جدول ۷. مقایسه شاخص‌های نیکویی برازش مدل‌های تداخلات تغییر خط (مدل نوع ۱)

شاخص	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
Log-Likelihood	-۳۳/۷۹۷	-۳۰/۲۱	-۲۵/۴۶
AIC	۷۱/۵۹	۵۴/۱۹۴	۵۸/۹۲
BIC	۷۴/۹۶	۷۷/۷۹	۸۱/۹
Pseudo R <sup>2</sup>	۰/۵۴۱	۰/۵۴۴	۰/۵۳۴

طبق جدول ۸، مقدار Log-Likelihood هر سه مدل نسبت به جدول قبل بهبود قابل توجهی دارد؛ به طوری که مقدار آن از  $-47/072$  در مدل ۱ به  $-24/097$  در مدل ۲ و  $-21/476$  در مدل ۳ افزایش یافته است. این روند مشابه جدول قبل است و همچنان نشان می‌دهد با اضافه شدن متغیرها، برازش مدل بهتر شده است. شاخص AIC نیز همان الگوی قبلی را دنبال می‌کند؛ مدل ۲ کمترین مقدار AIC ( $54/194$ ) را دارد و عملکرد بهتری نسبت به مدل ۱ ( $71/59$ ) و مدل ۳ ( $58/92$ ) نشان می‌دهد. این الگو کاملاً هم‌راستا با تحلیل جدول قبلی است که مدل ۲ را از نظر AIC مناسب‌تر معرفی می‌کرد. در مورد BIC، مقادیر نسبت به جدول قبل همگی بسیار بزرگ‌تر گزارش شده‌اند، اما الگوی مقایسه‌ای مشابه باقی مانده است. در این جدول، مدل ۳ کمترین مقدار را دارد ( $338/16$ )، در حالی که مدل ۱ بیشترین مقدار ( $340/25$ ) را نشان می‌دهد. به خلاف جدول قبلی که مدل ۱ بهترین مقدار BIC را داشت، در این سری مدل ۳ بهترین عملکرد را از نظر BIC ارائه می‌دهد. مقادیر  $Pseudo R^2$  نیز مانند جدول قبلی به هم نزدیک‌اند، اما الگوی تغییر این بار متفاوت است. در جدول قبلی مدل ۲ بهترین مقدار را داشت، اما در این جدول مدل ۳ با مقدار  $0/386$  بهترین عملکرد را نشان می‌دهد.

جدول ۸. مقایسه شاخص‌های نیکویی برازش مدل‌های تداخلات جلو به عقب (مدل نوع ۲)

شاخص	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
Log-Likelihood	-۴۷/۰۷۲	-۲۴/۰۹۷	-۲۱/۴۷۶
AIC	۹۸/۱۴۴	۵۴/۱۹۴	۵۰/۹۵۳
BIC	۳۴۰/۲۵	۳۴۳/۰۳	۳۳۸/۱۶
Pseudo R <sup>2</sup>	۰/۳۳۸	۰/۳۳۳	۰/۳۳۶

مقایسه شاخص‌های برازش نشان می‌دهد مدل ۲ از نظر مقدار Log-Likelihood و AIC بهترین عملکرد را دارد و نسبت به مدل‌های ۱ و ۳ بهبود محسوسی نشان می‌دهد. در مقابل، بر اساس BIC تفاوت محسوسی میان مدل‌های ۱ و ۳ مشاهده نمی‌شود و هر دو عملکردی مشابه و بهتر از مدل ۲ دارند. از نظر Pseudo R<sup>2</sup>، مدل ۳ با بالاترین مقدار، بیشترین توان تبیینی را ارائه می‌دهد. به طور کلی، نتایج بیانگر آن است که ارزیابی برتری مدل‌ها به شاخص مورد استفاده وابسته بوده و در حالی که مدل ۲ از منظر برازش کلی مطلوب‌تر است، مدل ۳ از نظر قدرت تبیین برتری نسبی دارد (جدول ۹).

جدول ۹. مقایسه شاخص‌های نیکویی برازش مدل‌های تداخلات مختلف (مدل نوع ۳)

شاخص	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
Log-Likelihood	-۱۱۲/۹۱	-۱۰۳/۴	-۱۲۳/۹۸
AIC	۲۲۹/۸۲	۲۱۲/۷۷	۲۵۵/۶۹
BIC	۳۰۷/۳۱	۳۱۲/۰۹	۳۰۷/۰۸
Pseudo R <sup>2</sup>	۰/۳۵۹	۰/۳۵۶	۰/۴۱

### ۳-۳. تفسیر ایمنی نتایج مدل‌ها

به طور خلاصه، نتایج حاصل از سه مدل رگرسیونی نشان می‌دهد در تمام مدل‌ها مقدار ثابت منفی و از نظر آماری معنادار است و متغیر PET در هر سه مدل به صورت پایدار، مثبت و با سطح معناداری بسیار بالا ظاهر شده و قوی‌ترین تأثیر را بر متغیر وابسته داشته است. در مدل‌های شامل متغیرهای افزوده‌شده، رفتار MaxS و PostCrashV متفاوت گزارش شده است؛ به طوری که MaxS در برخی تحلیل‌ها در مدل دوم غیرمعنادار بوده اما در مدل نهایی و همراه با ورود PostCrashV معنادار شده و اثری منفی نشان داده است. متغیر PostCrashV نیز تنها در مدل سوم ظاهر شده و در این مرحله دارای اثر معنادار بر شدت تداخلات بوده است. مقایسه شاخص‌های برازش از جمله AIC و BIC و همچنین، تغییرات Log-Likelihood و Pseudo R<sup>2</sup> نشان می‌دهد مدل سوم، به دلیل برخورداری از بیشترین تعداد متغیرهای معنادار و توان تبیینی بالاتر، گزینه مناسب‌تری برای تبیین تغییرات TTC محسوب می‌شود. به طور کلی، اگرچه PET در همه مدل‌ها مؤثرترین متغیر است، اما ورود MaxS و PostCrashV در مدل نهایی باعث غنی‌تر شدن ساختار پیش‌بینی و بهبود کیفیت مدل شده است. به طور کلی، در هر سه حالت مدل‌سازی، متغیر PET دارای ضریب مثبت و از نظر آماری کاملاً معنادار است که نشان می‌دهد افزایش PET با افزایش مقدار TTC همراه است. این یافته از منظر رفتاری و فیزیکی کاملاً قابل انتظار و سازگار با مفاهیم معیارهای ایمنی است؛ چراکه PET بزرگ‌تر بیانگر فاصله زمانی بیشتر میان دو کاربر راه در محل تداخل بوده و در نتیجه، احتمال برخورد آنی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، نتایج تأیید می‌کنند که PET می‌تواند به عنوان یک شاخص پیش‌بینی معتبر برای توصیف سطح ایمنی تعاملات ترافیکی مورد استفاده قرار گیرد و ارتباط ساختاری مشخصی با TTC دارد.

### ۴. نتیجه‌گیری

- نتایج سه مدل نشان داد PET پایدارترین و اثرگذارترین متغیر در تبیین تغییرات TTC است و در همه ساختارهای مدل‌سازی، رابطه‌ای مثبت و معنادار با شدت تداخلات دارد.

- در مدل‌های نوع ۱ (تداخلات تغییرخط) تنها مدل پایه شامل PET از نظر آماری معنادار بود و متغیرهای سرعت شامل MaxS و PostCrashV اثر معناداری نداشتند؛ موضوعی که نشان می‌دهد در تداخلات تغییر خط، متغیرهای زمانی نقش غالب‌تری نسبت به سرعت در توضیح تغییرات TTC ایفا می‌کنند.
- در مدل‌های نوع ۲ (تداخلات جلو به عقب) افزودن متغیرهای سرعت موجب تغییر الگوی اثرگذاری شد؛ افزایش ضریب PET از ۱/۹۱۷ در مدل اول به ۲/۳۹۳ در مدل سوم نشان می‌دهد با کنترل هم‌زمان سرعت، اهمیت PET حتی تقویت نیز می‌شود.
- مدل‌های نوع ۳ (کل تداخلات) نیز همین الگو را تأیید کردند؛ به طوری که PET در تمام مدل‌ها اثر مثبت و معنادار داشت و مقدار ضریب آن از ۱/۴۲ در مدل اول به ۱/۷۰ در مدل سوم افزایش یافت.
- مقایسه معیارهای برازش نشان داد افزودن متغیرهای توضیحی عملکرد مدل‌ها را بهبود می‌دهد؛ در مدل‌های نوع ۱، مدل دوم بهترین ترکیب AIC، BIC و  $Pseudo R^2$  را ارائه داد، اما در مدل‌های نوع ۲، مدل سوم با بیشترین Log-Likelihood، کمترین AIC و بالاترین  $Pseudo R^2$ ، بهترین نیکویی برازش را در میان تمامی مدل‌ها نشان داد.
- استفاده از مدل رگرسیونی گاما با لینک لگاریتمی عملکرد مناسبی در مدل‌سازی شاخص TTC نشان داد؛ زیرا این مدل با ماهیت مثبت و چولگی داده‌های TTC سازگار بوده و توانست با مقادیر مناسب Log-Likelihood، کاهش AIC و BIC و مقادیر قابل قبول  $Pseudo R^2$  برازش قوی و پایداری آماری مطلوبی را در تمامی ساختارهای مدل ارائه دهد و به خوبی تغییرات شدت تداخلات را تبیین کند.
- نتایج شاخص‌های نیکویی برازش مدل گاما نشان‌دهنده عملکرد قوی و قابل قبول مدل‌ها است؛ به طوری که در تداخلات تغییرخط (نوع ۱)، بهترین برازش مربوط به مدل ۲ با Log-Likelihood برابر ۳۰/۲۱-، AIC معادل ۵۴/۱۹۴، BIC برابر ۷۷/۷۹ و  $Pseudo R^2$  برابر ۰/۵۴۴ است، در حالی که در تداخلات جلو به عقب (نوع ۲)، مدل ۳ بهترین عملکرد کلی را با بیشترین Log-Likelihood (۲۱/۴۷۶-)، کمترین AIC (۵۰/۹۵۳) و بیشترین  $Pseudo R^2$  (۰/۳۸۶) نشان می‌دهد؛ همچنین در تداخلات مختلف (نوع ۳)، اگرچه مقادیر AIC و BIC بین مدل‌ها نزدیک است، اما مدل ۳ با  $Pseudo R^2$  برابر ۰/۴۱ توان تبیینی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌دهد که در مجموع، کارایی مناسب مدل گاما در تبیین TTC را تأیید می‌کند.

## منابع

1. de Oña J, de Oña R, Eboli L, Forciniti C, Mazzulla G. How to identify the key factors that affect driver perception of accident risk. A comparison between Italian and Spanish driver behavior. *Accident Analysis & Prevention*. 2014;73:225–35.
2. Guo R, Liu L, Wang W. Review of Roundabout Capacity Based on Gap Acceptance. *Journal of Advanced Transportation*. 2019;2019:1–11.
3. Hasanvand M, Nasiri ASA, Rahmani O, Shaaban K, Samadi H. A Conflict-Based Safety Diagnosis of SCI Roundabouts Using a Surrogate Safety Measure Model. *Sustainability*. 2023;15(17):13166.
4. Lord D, Qin X, Geedipally SR. *Highway safety analytics and modeling*: Elsevier; 2021.
5. Giuffrè O, Granà A, Tumminello ML, Giuffrè T, Trubia S, Sferlazza A, et al. Evaluation of Roundabout Safety Performance through Surrogate Safety Measures from Microsimulation. *Journal of Advanced Transportation*. 2018;2018(1):4915970.
6. Sadeq H, Sayed T. Automated roundabout safety analysis: diagnosis and remedy of safety problems. *Journal of Transportation Engineering*. 2016;142(12):04016062.
7. Parker Jr M, Zegeer CV. *Traffic conflict techniques for safety and operations: Observers manual*. United States. Federal Highway Administration; 1989.
8. Harwood DW, Bauer KM, Potts IB, Torbic DJ, Richard KR, Rabhani ER, et al. Safety effectiveness of intersection left-and right-turn lanes. *Transportation Research Record*. 2003;1840(1):131–9.
9. Ambros RT, Paukrt J, Ambros J, Turek R, Paukrt J, editors. *Road safety evaluation using traffic conflicts: pilot comparison of micro-simulation and observation*-Jiří. International Conference on Traffic and Transport Engineering-Belgrade; 2014.
10. Yang H. *Simulation-based evaluation of traffic safety performance using surrogate safety measures*: Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies; 2012.
11. Hydén C. The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. *Bulletin Lund Institute of Technology, Department*. 1987(70).
12. Saunier N, Sayed T. Probabilistic framework for automated analysis of exposure to road collisions. *Transportation research record*. 2008;2083(1):96–104.
13. Yang H, Ozbay K, Bartin B. Application of simulation-based traffic conflict analysis for highway safety evaluation. *Proceedings of the 12th WCTR, Lisbon, Portugal*. 2010;4.
14. Songchitruksa P, Tarko AP. Practical method for estimating frequency of right-angle collisions at traffic signals. *Transportation research record*. 2006;1953(1):89–97.
15. Tripathi RC, Gupta RC, Pair RK. Statistical tests involving several independent gamma distributions. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. 1993;45(4):773–86.
16. Pan J-J, Mahmoudi MR, Baleanu D, Maleki M. On comparing and classifying several independent linear and non-linear regression models with symmetric errors. *Symmetry*. 2019;11(6):820.
17. Bates DM, Watts DG. *Nonlinear regression analysis and its applications*: Wiley New York; 1988.
18. Burnham KP, Anderson DR. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*: Springer; 2002.
19. Hardin JWH, J. M. *Generalized Linear Models and Extensions*. 2nd ed. College Station, TX: Stata Press; 2007.