Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir
Online ISSN : 3060-7620
Razi University

Application of the Fuzzy Delphi Method in Proactive Identification of Hazardous Road Locations Based on Perceived Safety (Case Study: Kerman-Gonabad Road)

Mohammad Hossain Jalal Kamali[1]✉, Parmida Pedram[2]

1.Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.
E-mail: jalalkamali@gonabad.ac.ir
2.Urban Engineering Dept., College of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
E-mail: parmida.pedram@mail.um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2026-03-10
Received in revised form
2026-05-17
Accepted
2026-06-04
Available online
2026-06-22

Keywords:
Road Safety,
Perceived Safety,
Proactive Assessment,
Hazardous Road Locations,
Fuzzy Delphi Method

ABSTRACT

Traffic crashes on two-lane rural roads present a critical challenge to transportation safety, traditionally evaluated through retrospective crash data. To address this limitation, the present study aims to proactively identify Hazardous Road Locations by evaluating subjective safety and experts' risk perception, and to compare these findings with the objective safety of the roadway. To achieve this, the Fuzzy Delphi Method (FDM) was employed as a robust and structured tool. For validation, a case study on the Kerman-Gonabad route involved 19 experts assessing driver-perspective images. By utilizing triangular fuzzy numbers (l, m, u), FDM effectively modeled the uncertainties inherent in visual and linguistic judgments, successfully achieving expert consensus in two rounds.

The findings demonstrated that the outputs of this novel analytical tool are completely consistent with the statistical analyses from previous studies. Specifically, "horizontal curves with inadequate sight distance" (Z=0.88), "vertical curves with inadequate sight distance" (Z=0.81), and "sharp horizontal curves" (Z=0.80) were classified by the experts as "completely unsafe," highlighting the critical role of sight distance limitations in elevating perceived risk. Conversely, a standard road section was accurately categorized as "safe" (Z=0.27), as expected. The most significant contribution of this research is demonstrating the high efficacy and potential of the Fuzzy Delphi Method as an innovative preventive tool. It enables the precise screening of high-risk locations even in the absence of historical crash data, thereby opening new horizons for proactive road safety management.

Cite this article: Jalal Kamali, Mohammad Hossain., & Pedram, Parmida. (2026). Application of the Fuzzy Delphi Method in Proactive Identification of Hazardous Road Locations Based on Perceived Safety (Case Study: Kerman-Gonabad Road). *Advanced Modeling in Civil Engineering,* 3(1),92-113. DOI: 10.22126/amcen.2026.13743.1079

© The Author(s).
DOI: 10.22126/amcen.2026.13743.1079
Publisher: Razi University

Introduction

Traffic accidents constitute a severe public health crisis both globally and in Iran. The high rate of fatalities (including the recording of 16,778deaths in Iran between March 2022 and March 2023) underscores the imperative need for formulating fundamental safety strategies and systematically identifying Hazardous Road Locations (HRLs). These locations are typically identified through the analysis of statistical data over a period of 3 to 5 years, employing standard methodologies (as outlined in the Highway Safety Manual) or normalization techniques based on exposure rates.

However, the effectiveness of safety interventions is not solely limited to statistical data; it fundamentally relies on users' perceptions as well. Accordingly, road safety comprises two distinct dimensions: "objective safety" and "subjective safety." Objective safety is predicated on quantitative metrics that are independent of users' senses and experiences (such as crash frequency and severity). In contrast, subjective safety is a multidimensional psychological construct comprising cognitive (risk perception) and affective (feelings of fear and insecurity) components. It is profoundly influenced by an individual's sense of control (a perception that may occasionally contradict statistical realities).

The fundamental distinction between these two concepts lies in the nature of their evaluation. The assessment of objective safety is an inherently "retrospective" process, necessitating the occurrence of accidents over time. Conversely, subjective safety analysis adopts a "proactive" approach. This enables the evaluation of safety levels and the identification of potential hazards prior to the operational phase of the road, relying solely on its design characteristics. Therefore, as an indispensable complement, subjective safety assessment plays a vital role in the proactive modification of projects prior to the occurrence of any adverse incidents.

Method

This research was conducted with the aim of proactively identifying Hazardous Road Locations (HRLs) based on the assessment of subjective safety on two-lane rural roads (specifically, the Kerman-Gonabad). Due to the high proportion of accidents on these types of roads and the logistical limitations of conducting field visits for all evaluators, the initial data were collected through standardized imagery captured from the driver's perspective (under appropriate lighting and weather conditions). These images comprised sections with potential hazards arising from geometric and operational constraints, including a vertical curve with insufficient sight distance, a sharp horizontal curve, an unsafe intersection, insufficient road width, a combination of horizontal and vertical curves, the absence of a road shoulder, the presence of rigid obstacles adjacent to the road, as well as a normal road segment serving as a control point.

To evaluate the images, a panel consisting of 19 experts (including safety specialists from the Ministry of Roads and Urban Development, municipal safety specialists, and university professors) was convened. The evaluations were conducted using a five-point Likert scale. To model the inherent uncertainty and ambiguity in human judgments, the Fuzzy Delphi Method (FDM) was employed, utilizing Triangular Fuzzy Numbers (TFNs). For the aggregation of expert opinions, the fuzzy arithmetic mean approach was selected to place

greater emphasis on the central tendency of the data, thereby yielding a stable representation of the collective wisdom.

To ensure a robust consensus, the framework implemented two distinct thresholds to manage the consensus-building process. First, the "outlier identification threshold," which was set at 0.227 based on the average distances of the fuzzy numbers within the Likert scale; opinions deviating from the group mean by a distance greater than this value were referred back to the respective expert for re-evaluation. Second, the "convergence and stopping criterion" which, in accordance with Fuzzy Delphi standards, required the variation in opinions between two consecutive rounds to be less than 0.2 to confirm the adequacy of the iterations.

In the final stage, following the successful attainment of expert consensus, the aggregated fuzzy evaluations were converted into actionable, definitive metrics. To achieve this, a center-weighted defuzzification technique was employed. This specific approach strategically assigned greater significance to the central (more probable) value of the fuzzy numbers, thereby mitigating the influence of extreme boundaries and providing a highly stable representation of the collective perception. Subsequently, the resulting crisp values were mapped to predefined linguistic risk intervals. Aligning logically with the established five-point assessment scale, critical thresholds of 0.6 and 0.8 were designated for "unsafe" and "completely unsafe", respectively. Consequently, road sections yielding a crisp risk score exceeding these thresholds were systematically categorized into the top two risk categories ("unsafe" and "completely unsafe") and definitively classified as proactive Hazardous Road Locations (HRLs).

Results

The results of implementing the Fuzzy Delphi Method (FDM) indicated that the evaluation process successfully achieved full expert consensus in the second round. The maximum degree of disagreement between the first and second rounds was calculated at 0.026, which was significantly lower than the predefined stopping threshold of 0.2. Consequently, the survey process was concluded successfully at the end of the second round without the need for further iterations.

Following the application of the defuzzification technique, definitive risk values were extracted for each road section. Data analysis revealed that "horizontal curves with inadequate sight distance" (with a crisp value of 0.88) exhibited the highest level of risk within the studied corridor, followed by "vertical curves with inadequate sight distance" (with a crisp value of 0.81) and "sharp horizontal curves" (with a crisp value of 0.80). Conversely, the "normal road sections," as anticipated, accounted for the lowest risk level with a crisp value of 0.27.

Finally, to identify proactive Hazardous Road Locations (HRLs), the road sections were categorized by mapping these crisp values to predefined linguistic risk intervals. Based on the findings, two sections, vertical curves with inadequate sight distance and sharp horizontal curves, were placed in the "completely unsafe" risk category. Furthermore, four sections, including unsafe intersections, inadequate road width, combined horizontal and vertical curves, and the absence of road shoulders, fell into the "unsafe" category. Collectively, these sections are classified as HRLs. Additionally, the presence of rigid

roadside obstacles was evaluated as having a "moderate" risk, while the normal road sections were assessed as "safe."

Conclusions

The findings of this study highlight the critical role of sight distance limitations in shaping drivers' perceived risk on two-lane rural roads. Road sections where the driver's field of view is restricted, particularly along horizontal and vertical curves, were consistently perceived as more hazardous than ordinary roadway segments. This pattern suggests that limited visibility substantially affects the driver's ability to anticipate upcoming roadway conditions and traffic movements. From a behavioral and operational perspective, restricted sight distance may reduce the available perception–reaction time, increase the likelihood of traffic conflicts, and impose greater cognitive workload on drivers. These mechanisms collectively contribute to higher levels of perceived danger in such locations and explain why curved segments with inadequate visibility are frequently associated with elevated safety concerns.

Beyond identifying these patterns, this study demonstrates the value of integrating expert perception-based assessment with the Fuzzy Delphi Method as a structured approach for proactive road safety evaluation. By utilizing real roadway images captured from the driver's field of view and aggregating expert judgments through triangular fuzzy numbers, the proposed framework provides a systematic way to account for uncertainty in safety perception. Importantly, the results suggest that this approach can support the early identification of potentially hazardous road locations even when reliable crash data are limited or unavailable. Consequently, the proposed framework can complement traditional accident-based analyses and serve as a practical tool for road safety audits, prioritizing safety improvements, and supporting proactive road safety management strategies.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران
وبگاه نشریه : https://amcen.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی : ۷۶۲۰-۳۰۶۰
دانشگاه رازی

کاربرد روش دلفی فازی در شناسایی پیشگیرانه نقاط حادثه‌خیز بر اساس ایمنی ادراکی (مطالعه موردی: محور کرمان–گناباد)

محمدحسین جلال‌کمالی[1]✉، پارمیدا پدرام[2]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. رایانامه: jalalkamali@gonabad.ac.ir

۲. گروه مهندسی شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: parmida.pedram@mail.um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۱۲/۱۹

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۳/۱۴

تاریخ انتشار:
۱۴۰۵/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
ایمنی راه،
ایمنی ادراکی،
ارزیابی پیشگیرانه،
نقاط حادثه خیز،
روش دلفی فازی

چکیده

حوادث ترافیکی در راه‌های دوخطه برون‌شهری چالشی جدی در حوزه‌ی ایمنی حمل و نقل است. ارزیابی این نقاط تاکنون غالبا به روش‌های سنتی و صرفا متکی بر آمار تصادفات گذشته محدود بوده است. پژوهش حاضر با هدف شناسایی پیشگیرانه نقاط حادثه‌خیز، از رویکرد دلفی فازی به عنوان ابزاری نوآورانه برای سنجش ایمنی ذهنی و ادراک خطر کارشناسان و مقایسه‌ی آن با ایمنی عینی مسیر بهره برده است. برای اعتبارسنجی این روش، مطالعه موردی در محور کرمان-گناباد انجام گرفت. در این مطالعه، ایمنی مقاطع مختلف راه با استفاده از تصاویر ثبت شده از زاویه دید راننده، توسط ۱۹ متخصص ارزیابی شد. استفاده از تکنیک دلفی فازی بر مبنای اعداد فازی مثلثی، امکان مدل‌سازی دقیق عدم قطعیت در قضاوت‌های زبانی را فراهم آورد و پس از دو دور ارزیابی، اجماع کارشناسان حاصل گردید. یافته‌های پژوهش نشان داد که نتایج این ابزار تحلیلی کاملا با نتایج حاصل از بررسی‌های آماری تحقیقات پیشین منطبق است؛ به طوری‌که قوس افقی با دید ناکافی ($Z = 0.88$)، قوس قائم با دید ناکافی ($Z = 0.81$) و قوس افقی تند ($Z = 0.80$) از سوی کارشناسان در دسته کاملاً ناایمن ارزیابی شدند که نشان‌دهنده نقش حیاتی محدودیت دید در افزایش ریسک درک شده است. در مقابل، یک مقطع عادی از مسیر مطابق انتظار در دسته ایمن ($Z = 0.27$) قرار گرفت. برجسته‌ترین دستاورد این تحقیق، اثبات کارایی و ظرفیت بالای روش دلفی فازی به عنوان ابزاری پیشگیرانه است که امکان غربالگری دقیق نقاط پرخطر را در غیاب داده‌های آماری تصادفات فراهم آورده و افق‌های تازه‌ای در مدیریت پیش‌گیرانه ایمنی راه‌ها ارائه می‌دهد.

استناد: جلال‌کمالی، محمدحسین؛ پدرام، پارمیدا. (۱۴۰۵). کاربرد روش دلفی فازی در شناسایی پیشگیرانه نقاط حادثه‌خیز بر اساس ایمنی ادراکی (مطالعه موردی: محور کرمان-گناباد). *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۱)،۱۱۳-۹۲.

DOI: 10.22126/amcen.2026.13743.1079

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

حوادث ترافیکی همچنان یکی از نگرانی‌های عمده‌ی بهداشت عمومی در سطح جهانی به شمار می‌رود که سالانه حدود ۱.۱۹ میلیون کشته و ۲۰ تا ۵۰ میلیون مجروح را در سراسر جهان به همراه داشته و یکی از علل اصلی مرگ و میر به ویژه در گروه‌های سنی پایین محسوب می‌شود. در ایران نیز آسیب‌های ناشی از حوادث ترافیکی یکی از عوامل اصلی مرگ و میر است. ثبت بیش از ۱۶۷۰۰ مورد فوتی در سال ۱۴۰۱ که فراتر از میانگین‌های جهانی و منطقه‌ای است نشان دهنده‌ی یک بحران جدی در حوزه‌ی ایمنی راه‌ها است [۱]. تحلیل‌های ملی در دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که حوادث ترافیکی، پس از بیماری‌های قلبی عروقی، دومین عامل اصلی مرگ و میر در ایران است بطوری که بین سال های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ بیش از ۵.۷ میلیون مجروح و حدود ۴۷۲۰۰۰ مورد مرگ و میرناشی از این حوادث ثبت شده است [۲, ۳]. تداوم این چالش، ضرورت اتخاذ راهبردهای اساسی برای بهبود ایمنی را برجسته می‌سازد که مهم‌ترین آن‌ها شناسایی سیستماتیک و اصلاح نقاط حادثه خیز جاده (HRLs[1]) است.

مقاطع خاص از راه یا تقاطع‌ها که فراوانی یا شدت حوادث ترافیکی در آن‌ها نسبت به مکان‌های مشابه بیشتر است به عنوان نقاط حادثه خیز تعریف می‌شوند. تحلیل داده‌ها در یک دوره سه تا پنج ساله نشان می‌دهد که این مکان‌ها معمولا الگوهای غیر تصادفی پیروی می‌کنند که نیازمند مداخلات مهندسی هدفمند هستند. با وجود آنکه برای شناسایی این نقاط تعاریف متفاوتی بیان شده است، عموما از آستانه‌های عددی ساده‌ای مانند تعداد ثابت تصادفات فوتی در هر کیلومتر، یا روش‌های آماری پیشرفتهای که در مراجعی مانند راهنمای ایمنی بزرگراه‌ها (HSM[2]) ارائه شده است، استفاده می‌شود [۴]. در شبکه‌های پیچیده یا دارای بار ترافیکی بالا، مانند شبکه‌های راه‌های ایران، شناسایی نقاط یا قطعات پر خطر عمدتا بر نرمال سازی بر اساس میزان مواجهه (برای مثال، تعداد تصادفات در هر میلیون وسیله نقلیه-کیلومتر) متکی است تا اطمینان حاصل شود که اقدامات اصلاحی به شکل موثری اولویت بندی می شوند [۵-۷].

با این حال اثربخشی شناسایی و اصلاح نقاط حادثه خیز نه تنها به داده‌های آماری تصادفات بلکه به نحوه ادراک رانندگان نیز بستگی دارد. ایمنی راه شامل دو عنصر مجزاست که لزوما همگرا نیستند؛ ایمنی عینی و ایمنی ذهنی. در حالی که ایمنی عینی تعداد تصادفات و ریسک آسیب را با استفاده از داده‌های آماری اندازه‌گیری می‌کند، ایمنی ذهنی توصیف کننده احساس شخصی کاربر از ایمنی به عنوان یک ویژگی روانی است. تمایز میان این دو مفهوم حائز اهمیت است، زیرا ادراک ایمنی اغلب با واقعیت آماری در تضاد قرار می‌گیرد. به عنوان مثال شریانی‌های بزرگ ممکن است با وجود نرخ بالای تصادفات، حس کاذب ایمنی ایجاد کنند در مقابل، خیابان‌های تو در تویی که از منظر ترافیکی ایمن هستند، ممکن است موجب اضطراب شوند. از آنجا که این ادراکات، رفتار کاربر و اقدامات کنترلی او را شکل می‌دهند، ایجاد تطابق میان احتمال خطر واقعی و احساس امنیت یک چالش اساسی در طراحی راه‌های مدرن محسوب می‌شود [۸].

بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی ایمنی ذهنی، شناسایی پیشگیرانه و اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز با بهره‌گیری از نظرات خبرگان و روش دلفی فازی در محور کرمان-گناباد است. در بخش بعدی، ضمن ارائه تعاریف عملیاتی ایمنی عینی و ذهنی، پیشینه مطالعات مرتبط مرور خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه‌ی تحقیق

در این بخش، ابتدا مفاهیم بنیادین مرتبط با رویکردهای مختلف ارزیابی ایمنی راه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، مطالعات اخیر انجام‌شده در حوزه ادراک خطر و ایمنی ذهنی مرور شده و پس از بیان کارایی روش دلفی فازی در حل مسائل مشابه، شکاف پژوهشی موجود و نوآوری این مقاله تبیین می‌گردد.

۲-۱. مفاهیم و رویکردهای ارزیابی ایمنی

در حوزه‌ی مباحث مهندسی ترافیک و مدیریت ایمنی راه‌ها، ارزیابی سطح ایمنی عموماً از دو منظر متفاوت اما کاملاً مکمل

[1] Hazardous Road Locations
[2] Highway Safety Manual

ارزیابی می‌شود: ایمنی عینی[۳] و ایمنی ذهنی[۴]. درک دقیق این دو مفهوم و تمایزهای بنیادین آن‌ها، پیش‌نیاز ضروری برای به کار گیری رویکردهای موثر در مدیریت نقاط حادثه‌خیز است.

ایمنی عینی معمولا بر پایه‌ی معیارهای کمّی و مستقل از ادراک کاربران راه، مانند تعداد و شدت تصادفات در مکان‌های خاص یا در امتداد قطعات همگن تعریف می‌شود. فراوانی تصادفات غالبا به صورت شمارش تصادفات ثبت شده در طول یک دوره‌ی مشخص اندازه‌گیری می‌شود در حالی که شدت تصادفات، حوادث را به دسته‌های خسارتی، جرحی، جرحی شدید و فوتی تفکیک می‌کند. این طبقه‌بندی‌ها گاهی در قالب شاخص‌های شدت یا هزینه‌های وزن دار تصادفات تجمیع می‌شوند. این معیارهای مبتنی بر تصادف، برای مقایسه‌ی بهتر اغلب بر اساس میزان مواجهه[۵] نرمال سازی می‌شوند (مثلا نرخ تصادفات در هر میلیون وسیله نقلیه-کیلومتر، بر اساس ورود خودروها به تقاطع ها یا حجم عبور پیاده). در تحلیل‌های نوین ایمنی، ایمنی عینی همچنین با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، مانند آنچه در دستورالعمل ایمنی بزرگراه‌ها (HSM[6]) بیان شده است، برآورد می‌شود. مدل‌هایی که در آن طرح هندسی راه، حجم ترافیک و ویژگی‌های کنترلی به تعداد و شدت تصادفات مرتبط می‌گردند [۶].

ایمنی ذهنی یک ساختار روان شناختی چند بعدی است که نشان دهنده‌ی تجربه شخصی فرد و ارزیابی وی از ریسک در یک موقعیت خاص است. این ساختار اساسا از دو مولفه متمایز و در عین حال به هم پیوسته تشکیل شده است: مولفه شناختی[۷] و مولفه هیجانی[۸] (یا عاطفی). مولفه شناختی، ریسک درک شده[۹] توسط فرد را شکل می‌دهد که حاصل از ارزیابی ذهنی دو عامل است: احتمال وقوع تصادف و شدت پیش‌بینی شده‌ی پیامدهای آن (شامل احتمال بروز آسیب جدی). مولفه عاطفی شامل پاسخ عاطفی به این ریسک ادراک شده است که به صورت احساس ناراحتی، ناامنی، ترس، اضطراب یا نگرانی ظاهر می‌شود. شدت این احساسات به طور قابل توجهی تحت تاثیر میزان احساس کنترل فرد بر وضعیت ترافیک قرار دارد به نحوی که فقدان کنترل، منجر به تشدید احساس ناامنی می‌شود. این مفهوم می‌تواند از حیطه‌ی ایمنی شخصی فراتر رفته و جنبه‌های نوع‌دوستامه را نیز در بر گیرد. این جنبه در نگرانی‌های والدین در مورد ایمنی کودکانشان بیشتر مشخص است. بنابراین ایمنی ذهنی یک ارزیابی جامع است که از طریق قضاوت در مورد خطر، واکنش‌های احساسی، احساس کنترل و نگرانی برای دیگران شکل می‌گیرد [۸].

همانطور که مشخص شد ارزیابی ایمنی عینی ذاتا ماهیتی پس‌نگرانه[۱۰] دارد. این امر به جمع‌آوری داده‌های تصادفات به ویژه فراوانی و شدت آن‌ها وابسته است که تنها پس از بهره‌برداری از یک زیرساخت در یک بازه زمانی مشخص قابل گردآوری هستند. در مقابل، تحلیل ایمنی ذهنی رویکردی پیش‌گیرانه[۱۱] ارائه می‌دهد که امکان ارزیابی عملکرد ایمنی را پیش از بهره‌برداری از زیرساخت و وقوع رویدادهای ناگوار، فراهم می‌آورد [۹].

این رویکرد آینده نگر، شناسایی موقعیت‌های بالقوه خطرناک را از طریق ارزیابی مستقیم ویژگی‌های طراحی مسیر، محیط پیرامون و ادراک پیش‌بینی شده‌ی کاربران، پیش از وقوع تصادفات، امکان‌پذیر می‌کند. در نتیجه تحلیل ایمنی ذهنی به عنوان مکمل ضروری برای مداخلات پیشگیرانه و اصلاحات طراحی، به ویژه در مراحل اولیه توسعه پروژه و پیش از آنکه شواهد عینی ایمنی در دسترس باشند، به کار گرفته می‌شود.

۲-۲. پیشینه مطالعات ایمنی ذهنی و ادراک خطر

در ادبیات ایمنی راه، اگرچه داده‌های واقعی مبتنی بر تصادفات هسته اصلی اطلاعات را تشکیل می‌دهند، اما ارزیابی ایمنی ذهنی، که دربرگیرنده احساسات ادراک‌شده از امنیت یا نگرانی کاربران راه است نیز به همان اندازه حائز اهمیت تلقی می‌شود . گنجاندن داده‌های ذهنی قادر است تحلیل‌های سنتی تصادفات را، به‌ویژه در شرایطی که دستیابی به اطلاعات دقیق دشوار است، به شکل

[3] Objective Safety
[4] Subjective Safety
[5] Exposure
[6] Highway Safety Manual
[7] Cognitive Component
[8] Affective/Emotional Component
[9] Perceived Risk
[10] Retrospective
[11] Proactive

مؤثری تکمیل نماید [۱۰]. ارزش بنیادین این داده‌ها در توانایی آن‌ها برای ثبت عوامل انسانی نظیر رفتارها، نگرش‌ها و ادراک ریسک نهفته است که مستقیماً بر پیامدهای ایمنی اثر می‌گذارند. از همین رو، بسیاری از محققین بر لزوم درک و ادغام داده‌های ایمنی ذهنی در توسعه سیاست‌های ارتقای ایمنی تأکید کرده اند و نیز ارزیابی این ادراکات را در محیط‌های متنوع جاده‌ای بسیار مهم برآورد نموده‌اند [۱۱].

با این وجود، تأثیر عینی و ذهنی اقدامات ایمنی همواره هم‌سو نیست؛ در مواردی یک اقدام به تنهایی ایمنی ادراک‌شده را بدون کاهش معنادار تصادفات افزایش می‌دهد، در حالی که در شرایط دیگر می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر تصادفات واقعی گردد. به عنوان نمونه، برخی مطالعات نشان می‌دهد که توسعه زیرساخت‌های مناسب نظیر خطوط اختصاصی، مسیرهای عابر پیاده و بهبود روشنایی، نه‌تنها ایمنی واقعی را ارتقا می‌دهد، بلکه احساس امنیت کاربران را نیز به‌طور معناداری تقویت می‌کند [۱۲, ۱۳].

علیرغم اهمیت این موضوع، مطالعات اندکی به بررسی مستقیم رابطه میان ایمنی عینی و ذهنی پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها عمدتاً نامقطوع و مبتنی بر نمونه‌های کوچک بوده است [۸]. برخی تحقیقات نشان می‌دهند که ممکن است رابطه مستقیمی میان ایمنی ذهنی و عینی وجود داشته باشد، اما این رابطه ضعیف بوده و اثر میزان مواجهه در آن لحاظ نشده است ولی در مقابل، تحقیقات دیگر، هم‌راستایی آماری معناداری را میان این شاخص و داده‌های عینی برای شناسایی نواحی مسئله‌دار به اثبات رساندند [۱۴]. مطالعات جدیدتر بر روی دوچرخه‌سواران نیز نشان می‌دهد که اگرچه شاخص‌های عینی و ذهنی عموماً در یک راستا قرار دارند، اما کاربران در برخی سناریوها ریسک واقعی را دست‌کم می‌گیرند. همچنین با بررسی روش‌های امتیازدهی ایمنی مشخص شد که اگرچه نمرات ادراک ذهنی به‌تنهایی برای پیش‌بینی دقیق وقوع تصادفات در یک مکان کافی نیستند، اما ایمنی ذهنی به‌عنوان یک سازه کاملاً مستقل از ایمنی عینی، نقشی غیرقابل‌انکار در ارزیابی‌های جامع ایمنی ایفا می‌کند [۱۵, ۱۶].

در راستای توسعه روش‌های نوین سنجش ایمنی ذهنی، پژوهش‌های جدید به سمت مدل‌سازی‌های ترکیبی حرکت کرده‌اند. به عنوان نمونه، در یک مطالعه اخیر چارچوب یکپارچه‌ای تحت عنوان حمل و نقل ایمن معرفی شده است که با استفاده از شبیه‌سازهای رانندگی و پایش واکنش‌های فیزیولوژیکی و احساسی، ایمنی عینی را با ایمنی ادراک شده توسط کاربران عادی ترکیب می‌کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که قرارگیری کاربران در محیط‌های مختلف ترافیکی می‌تواند سناریوهای متضادی (نظیر محیط‌های با ایمنی عینی پایین اما حس ایمنی کاذب بالا) ایجاد کند که منجر به بروز رفتارهای پرخطر می‌شود [۱۷]. با این حال، پیاده‌سازی چنین روش‌های پیچیده‌ای که نیازمند تجهیزات شبیه‌ساز و پایش کاربران است، در سطح کلان و برای ارزیابی شبکه‌های گسترده جاده‌ای بسیار زمان‌بر و غیرکاربردی خواهد بود.

از سوی دیگر، همان‌طور که در نتایج برخی مطالعات نوین دیگر نیز مشاهده می‌شود ادراک خطر توسط کاربران عادی جاده همواره با ایمنی عینی و آمار تصادفات تطابق کامل ندارد و عواملی نظیر خطای انسانی، تغییرات رفتاری و تئوری هم‌ترازی ریسک می‌توانند به شکاف میان این دو شاخص دامن بزنند [۱۸, ۱۹]. به عبارت دیگر، ارزیابی ذهنی کاربران عمومی از مشکلات طراحی و هندسه راه، لزوماً منعکس‌کننده دقیق پتانسیل تصادف در آن نقاط نیست. همین امر ضرورت گذر از ارزیابی‌های ذهنی کاربران عادی و بهره‌گیری از دانش و ادراک تخصصی کارشناسان ایمنی را برجسته می‌سازد. از آنجا که قضاوت متخصصان بر پایه دانش مهندسی و تجربه استوار است، سنجش ایمنی ذهنی از دیدگاه آنان می‌تواند رویکردی پیشگیرانه و بسیار معتبرتر برای شناسایی نواقص زیرساختی، پیش از وقوع تصادفات فراهم آورد. برای کمّی‌سازی و مدل‌سازی این قضاوت‌های تخصصی که غالباً با عدم قطعیت همراه است، تکنیک‌هایی نظیر دلفی فازی کارایی بالایی از خود نشان داده‌اند.

با وجود شکاف میان ادراک خطر کاربران عادی و آمار عینی تصادفات، مطالعات نشان می‌دهند که ارزیابی‌های ساختاریافته متخصصان ایمنی تطابق بسیار بالایی با واقعیت عینی دارد. پژوهشی در این خصوص با بررسی روش‌های بازرسی ایمنی راه نشان داد که شاخص‌های کمی مستخرج از قضاوت و ارزیابی کارشناسان، همبستگی معناداری با نرخ تصادفات داشته و قادر است تا ۹۳٪ از تغییرات در آمار تصادفات واقعی را تبیین کند [۲۰]. بر این اساس، در مطالعه حاضر برای غلبه بر خطاهای ادراکی

کاربران عادی و همچنین محدودیت‌های داده‌های تصادفات، از دانش تخصصی کارشناسان در قالب روش دلفی فازی بهره گرفته شده است.

۲-۳. روش دلفی فازی و کاربرد آن در مهندسی ترافیک

استفاده از رویکردهای مبتنی بر منطق فازی و روش دلفی در مهندسی ترافیک سابقه‌ای موفق دارد. به عنوان نمونه، در یک تحقیق که در آن سیستمی برای ارزیابی ایمنی ترافیک جاده‌ای جامع مبتنی بر دلفی و فازی ارائه شد، نشان داده شد که این رویکرد می‌تواند بدون وابستگی به داده‌های تاریخی و آمار تصادفات گذشته، سطح ایمنی مقاطع جاده‌ای را به شکلی علمی و کمی ارزیابی کند [۲۱].

استفاده از منطق فازی برای مدل‌سازی تصادفات شهری نیز اخیرا مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهشی که با این رویکرد بر روی داده‌های ترافیکی و تصادفات شهر مشهد انجام شد، نشان داده شد که اگرچه ضرایب همبستگی به دست آمده برای پیش‌بینی تصادفات فوتی چندان مناسب نیست، اما می‌توان از آن برای برآورد ریسک وقوع رخداد تصادف استفاده کرد [۲۲].

در زمینه کاربرد منطق فازی برای تحلیل ایمنی در جاده‌های دوخطه، تحقیق دیگری مدلی ترکیبی مبتنی بر درخت رگرسیون و طبقه‌بندی فازی (FCART[12]) برای پیش‌بینی شدت تصادفات ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از منطق فازی می‌تواند بر عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ورودی غلبه کرده و دقت پیش‌بینی‌ها را نسبت به مدل‌های کلاسیک افزایش دهد. نتایج این مطالعه حاکی از تأثیر معنادار عوامل مکانی و هندسی نظیر نزدیکی به قوس‌ها بر شدت تصادفات بود [۲۳]. با این حال، غالب این مطالعات از جمله پژوهش یاد شده، رویکردی پس‌نگرانه داشته و صرفاً متکی بر آمار تصادفات گذشته و شدت آن‌ها هستند. در مقابل، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با استفاده از روش دلفی فازی و تمرکز بر مفهوم ایمنی ادراکی، پیش از وقوع تصادف به ارزیابی پیشگیرانه و اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز بپردازد

۲-۴. شکاف پژوهشی

علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه ارزیابی ایمنی راه، شکاف‌های پژوهشی مهمی همچنان باقی مانده است. اولاً، رویکردهای سنتی شناسایی نقاط حادثه‌خیز عمدتاً بر تحلیل داده‌های تاریخی تصادفات متکی هستند [۴-۷] که ذاتاً یک فرآیند پس‌نگرانه و واکنشی است و تنها پس از وقوع حوادث و جمع‌آوری آمار در یک بازه زمانی قابل اجرا می‌شود. ثانیاً، اگرچه اهمیت ایمنی ذهنی و ادراک خطر در ادبیات مطرح شده است [۸, ۱۰-۱۳]، اما مطالعات اندکی به بررسی مستقیم رابطه میان ایمنی عینی و ذهنی پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها عمدتاً نامقطوع و مبتنی بر نمونه‌های کوچک بوده است [۸, ۱۴-۱۶].

ثالثاً، روش‌های کلاسیک دلفی در مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام ذاتی موجود در قضاوت‌های تخصصی محدودیت دارند و نمی‌توانند به‌طور کامل پیچیدگی‌های ارزیابی‌های کیفی را پوشش دهند. رابعاً، با وجود اینکه برخی مطالعات نشان داده‌اند ارزیابی‌های ساختاریافته متخصصان همبستگی معناداری با نرخ تصادفات دارد [۲۰]، اما کاربرد رویکردهای پیشگیرانه مبتنی بر دانش تخصصی برای شناسایی نقاط حادثه‌خیز در جاده‌های دوخطه برون‌شهری ایران به‌ویژه در شرایطی که داده‌های تصادفات ناقص یا غیرقابل دسترس است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. خامساً، فقدان چارچوب یکپارچه‌ای که بتواند دانش تجربی کارشناسان را با ابزارهای ریاضی قدرتمند نظیر منطق فازی ترکیب کند و در عین حال قابلیت اجرایی در سطح شبکه‌های گسترده جاده‌ای را داشته باشد [۱۷, ۲۱]، به‌عنوان یک خلأ پژوهشی مهم باقی مانده است.

۳. روش شناسی تحقیق

در این بخش، چارچوب اجرایی و گام‌های پژوهش برای ارزیابی ایمنی راه و شناسایی پیشگیرانه نقاط حادثه‌خیز تشریح می‌گردد. روند کار شامل معرفی ویژگی‌های محدوده مطالعاتی، شیوه طراحی پرسشنامه و جمع‌آوری نظرات خبرگان مبتنی بر مشاهدات بصری (تصاویر میدانی)، و در نهایت پیاده‌سازی گام به گام تکنیک دلفی

[12] Fuzzy Classification and Regression Tree

فازی جهت مدل سازی عدم قطعیت‌ها، ارزیابی همگرایی نظرات کارشناسان و قطعی‌سازی نتایج می‌باشد.

۳-۱. محدوده‌ی مورد مطالعه

این پژوهش بر جاده‌های دوخطه بین شهری متمرکز است. اگرچه این نوع جاده‌ها در اکثر کشورها سهم اندکی از طول در شبکه‌ی راه‌های بین شهری را به خود اختصاص می‌دهند، اما در ایران همچنان بخش عمده‌ای از شبکه‌ی جاده‌ای کشور را تشکیل می‌دهند. همچنین مطالعات حوزه‌ی ایمنی انجام شده در کشورهای مختلف نشان داده است سهمی نامتناسب و سنگین از تلفات جانی ناشی از تصادفات جاده‌ای در این جاده‌ها به وقوع می‌پیوندند. به‌طور مشخص، تخمین زده می‌شود که سهم تصادفات ترافیکی در جاده‌های دوطرفه بین شهری، بین ۵۰ تا ۸۰ درصد بیشتر از سایر طبقه‌بندی‌های عملکردی، از جمله بزرگراه‌های دوطرفه (مجزا) یا معابر اصلی شهری باشد [۲۴]. افزایش سهم تصادفات در راه‌های برون شهری دو طرفه می‌تواند ناشی از محدودیت‌های ذاتی هندسی و عملکردی باشد. از جمله‌ی این محدودیت‌ها می‌توان به نبود جدا ساز یا میانه راه، تفاوت سرعت وسایل نقلیه استفاده کننده از راه و پیچیدگی فرایند سبقت‌گیری اشاره کرد [۲۵].

از این رو در پژوهش حاضر بخش‌هایی از محور کرمان-گناباد که دارای مقطع دوخطه و دوطرفه هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. شهرهای مهم واقع در امتداد این محور، به ترتیب عبارتند از؛ کرمان، زرند، راور، دیگ رستم، دیهوک، فردوس و گناباد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این محور، تنوع توپوگرافی آن است؛ به نحوی که در بخش‌های حد فاصل فردوس تا گناباد و همچنین بخشی از محور کرمان تا زرند مسیر کاملا کوهستانی بوده، در حالی که بخش‌های دیگری از آن، مانند حد فاصل راور تا دیگ رستم، در منطقه‌ای دشتی و هموار واقع شده‌اند.

به منظور ارائه تصویری روشن از وضعیت فیزیکی محدوده‌ی مورد مطالعه، مشخصات هندسی کلی مسیر مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های هندسی در طول این مسیر، متغیر است؛ به طوری‌که عرض خطوط عبوری در بازه ۳.۲ تا ۳.۶۵ متر و عرض شانه راه از صفر (در مقاطع فاقد شانه) تا ۱.۸ متر تغییر می‌کند. همچنین، قدر مطلق شیب طولی مسیر نوساناتی در محدوده‌ی ۰.۵٪ تا ۹.۵٪ را تجربه می‌کند. این تنوع در مشخصات هندسی در کنار تغییرات توپوگرافی، بستر بسیار مناسبی را برای ارزیابی ایمنی ادراکی در سناریوهای مختلف راه فراهم می‌آورد. موقعیت جغرافیایی و محدوده‌ی مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. محدوده‌ی مورد مطالعه

۳-۲. جامعه‌ی آماری گروه خبرگان

تحقیقات مختلف برای تعداد کارشناسان در روش دلفی فازی نظرات مختلفی داده‌اند اما در اکثر پژوهش‌های پیشین که در حوزه‌ی ایمنی کار کرده‌اند، تعداد کافی کارشناسان را ۱۳ الی ۱۵ نفر بیان کرده‌اند. البته شایان ذکر است که تعداد بیشتر خبرگان می‌تواند به بالا بردن دقت ارزیابی منجر شود [۲۶, ۲۷]. در این تحقیق تعداد ۱۹ نفر کارشناس مورد سوال گرفته‌اند که از این میان، ۸ نفر از متخصصان فعال در حوزه ایمنی ترافیک با حداقل

مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مهندسی حمل‌ونقل یا مهندسی راه و ترابری بوده اند و در نهادهایی نظیر وزارت راه و شهرسازی و شهرداری‌های تهران و کرج مشغول به فعالیت هستند. ۱۱ نفر دیگر نیز از اعضای هیئت علمی دانشگاه‌های معتبر کشور انتخاب شدند که در حوزه ایمنی راه دارای سوابق پژوهشی و تخصصی هستند.

۳-۳. جمع‌آوری داده‌ها و ابزار پژوهش

از آنجا که هدف این پژوهش شناسایی نقاط حادثه‌خیز به صورت پیشگیرانه و قبل از وقوع تصادفات و جمع‌آوری آمار است، بایستی خبرگان این مسیر را بازدید کرده و نقاطی که از نظر ایمنی به نظر مساله‌دار می‌باشند را مورد بررسی دقیق‌تر قرار دهند. در ارزیابی‌های مبتنی بر ایمنی ذهنی، درک درست از زاویه دید و پرسپکتیو راننده اهمیت بالایی دارد. استفاده از عکس‌برداری از مسیر برای تشخیص سطح ایمنی، پیش از این نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ با این تفاوت که در تحقیقات پیشین، تمرکز محققان بیشتر بر تحلیل ویژگی‌های هندسی مقطع در محدوده دید راننده در تصاویر واقعی استوار بوده است [۲۸, ۲۹].

با الهام از این رویکرد و با توجه به محدودیت‌های عملی جهت بازدید میدانی هم‌زمانِ تمامی خبرگان، نویسندگان با حضور در محور مورد مطالعه، اقدام به ثبت تصاویر از زاویه دید راننده[۱۳] در نقاط دارای پتانسیل خطر نمودند و تصاویر آن برای بررسی ایمنی برای خبرگان ارسال شده است. همچنین از یک بخش عادی مسیر نیز به عنوان نقطه‌ی کنترل عکس‌برداری شده است و برای ارزیابی ایمنی در پرسشنامه‌ها برای خبرگان ارسال شده است. با توجه به تحقیقات پیشین نقاط زیر به عنوان مسیرهای دارای پتانسیل خطر شناسایی شده و از آنها تصویر برداری شده است [۳۰].

- طرح هندسی نامناسب: که خود شامل قوس افقی تند، قوس افقی با فاصله دید ناکافی و قوس قائم با فاصله دید ناکافی می‌باشد.
- وضعیت نامناسب شانه راه: شامل نبود شانه یا شانه‌ی کم عرض و یا افتادگی بیش از اندازه شانه‌ی راه
- وضعیت نامناسب مقطع عرضی: شامل عرض ناکافی در برخی معابر

شایان ذکر است که نقاط متعدد دیگری (مانند وضعیت نور ناکافی، تابلوهای ترافیکی و ...) نیز وجود[۳۱] دارد که در گستره‌ی موضوع این تحقیق نمی‌گنجند.

در تحقیقات پیشین برای پایش وضعیت ایمنی و نمره‌دهی مجازی (بدون حضور میدانی ارزیاب) بعضا از ویدئو مسیر و یا شبیه ساز ترافیک استفاده شده است [۳۲]. در این تحقیق، به‌منظور افزایش دقت ادراک بصری کارشناسان و با توجه به رویکرد مطالعات پیشین، تصاویر مورد استفاده دقیقاً از زاویه دید راننده و در محل چشم وی برداشت شدند. برای یکسان‌سازی شرایط تصویربرداری، از یک خودروی سواری استاندارد استفاده شد و ارتفاع دوربین مطابق با مقدار پیشنهادی منابع، برابر با ۱۰۸ سانتی‌متر از سطح زمین تنظیم گردید[۳۳].

تمامی تصاویر در شرایط نوری روز و در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۵ تهیه شدند تا از ایجاد خیرگی یا سایه‌های شدید ناشی از زاویه تابش خورشید در زمان طلوع یا غروب جلوگیری شود. زیرا تصویر برداری در ساعات ابتدایی صبح و نزدیک غروب آفتاب ممکن است موجب کاهش کیفیت تصاویر و ایجاد احساس ناایمنی در نظر کارشناسان شوند. شکل ۲ نمونه‌ای از این تصاویر را نمایش می‌دهد.

از آنجایی که ارزیابی ایمنی نقاط مورد نظر به کمک عدد فازی مثلثی ممکن است کمی برای خبرگان موجب صعوبت باشد، برای ارزیابی ایمنی در این پژوهش از شاخص‌های توصیفی لیکرت پنج نقطه‌ای استفاده می‌کنیم به نحوی که خبرگان می‌توانند وضعیت ایمنی هر عکس را با یکی از عبارات جدول ۱ توصیف کنند[۳۴]. به منظور شفافیت بیشتر و آشنایی دقیق‌تر با نحوه گردآوری نظرات خبرگان در خصوص ایمنی ادراکی مقاطع مورد مطالعه، ساختار و متن کامل پرسشنامه مورد استفاده در این پژوهش در پیوست ۱ ارائه شده است.

[13] Driver's Perspective

جدول ۱. معادل سازی توصیف کیفی لیکرت با اعداد فازی مثلثی

عدد فازی مثلثی معادل	توصیف زبانی
(۱ و ۱ و ۰.۷۵)	کاملا نا ایمن
(۱ و ۰.۷۵ و ۰.۵)	نا ایمن
(۰.۷۵ و ۰.۵ و ۰.۲۵)	معمولی
(۰.۵ و ۰.۲۵ و ۰)	ایمن
(۰.۲۵ و ۰ و ۰)	کاملا ایمن

۳-۴. روایی و پایایی ابزار پژوهش

با توجه به اینکه ابزار گردآوری داده‌ها در این پژوهش، پرسشنامه مبتنی بر تصاویر میدانی مقاطع حادثه‌خیز و طیف زبانی لیکرت است و تحلیل نتایج با استفاده از روش دلفی فازی انجام می‌شود، سنجش روایی و پایایی آن به شرح زیر انجام گرفت:

روایی: برای اطمینان از اینکه پرسشنامه دقیقاً همان چیزی را می‌سنجد که هدف پژوهش است، از روایی محتوایی و روایی صوری استفاده شد. پیش از توزیع نهایی پرسشنامه میان خبرگان، نسخه اولیه شامل تصاویر مقاطع محور کرمان-گناباد (گرفته شده از زاویه دید راننده) و طیف زبانی پنج‌گانه لیکرت، در اختیار پنج نفر از متخصصان و اساتید دانشگاهی حوزه مهندسی ترافیک و ایمنی راه قرار گرفت. پس از اعمال نظرات اصلاحی ایشان در خصوص وضوح تصاویر، حذف مقاطع مشابه و تدقیق متغیرهای زبانی، روایی ابزار پژوهش تایید گردید.

پایایی: در تکنیک دلفی فازی، پایایی ابزار و فرآیند پژوهش از طریق سنجش میزان همگرایی و پایداری نظرات خبرگان در دورهای متوالی ارزیابی می‌شود. در این پژوهش، پایایی بر اساس محاسبه فاصله میانگین نظرات فازی در دور اول و دور دوم سنجیده شد. برای این منظور از رابطه فاصله دو عدد فازی استفاده گردید.

بر اساس ادبیات روش دلفی فازی، چنانچه اختلاف میانگین نظرات در دو دور متوالی کمتر از حد آستانه (معمولاً ۰.۲) باشد، نشان‌دهنده دستیابی به اجماع، ثبات نظرات و در نتیجه پایایی بالای فرآیند و ابزار پژوهش است. در این مطالعه، از آنجا که شرط توقف برای تمامی مقاطع مورد ارزیابی محقق گردید، فرآیند در دور دوم متوقف شده و پایایی ابزار نظرسنجی تایید شد.

شکل ۲. قوس افقی با دید ناکافی

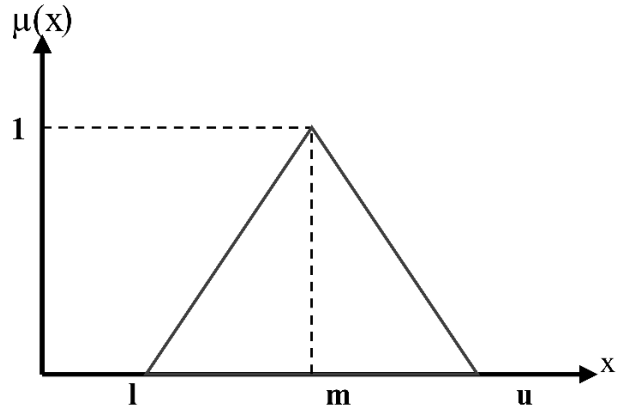
۳-۵. گام‌های اجرایی روش دلفی فازی

تکنیک دلفی یک روش شناخته‌شده برای کسب دانش گروهی مبتنی بر قضاوت خبرگان است که نتایج آن به دقت و سازگاری نظرات آنان وابسته می‌باشد. با این حال، در رویکردهای سنتی دلفی، کمی‌سازی نظرات خبرگان همواره قادر به بازتاب کامل شیوه تفکر انسانی نیست. به‌کارگیری مجموعه‌ها و اعداد فازی با توصیف‌های زبانی خبرگان، سازگاری بیشتری داشته و موجب کاهش خطا در فرآیند تصمیم‌گیری می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که تکنیک دلفی فازی می‌تواند معیارها را تنها در یک دور به‌طور مؤثر غربالگری کرده و راهکاری روشن برای خاتمه دادن به تکرار دورهای دلفی ارائه دهد [۳۵, ۳۶].

در روش دلفی فازی، برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت‌های خبرگان از منطق فازی و اعداد فازی استفاده می‌شود. عدد فازی نوعی مجموعه فازی است که در آن مقادیر به‌صورت قطعی تعریف نمی‌شوند و هر مقدار دارای درجه‌ای از عضویت است. در میان انواع اعداد فازی، اعداد فازی مثلثی[14] به دلیل سادگی محاسباتی و کفایت در نمایش عدم قطعیت

[14] Triangular Fuzzy Numbers

قضاوت‌های خبرگان، در پژوهش‌های دلفی فازی کاربرد گسترده‌ای دارند و در این پژوهش نیز از همین نوع استفاده شده است. یک عدد فازی مثلثی با سه پارامتر (l, m, u) نمایش داده می‌شود که به‌ترتیب بیانگر حد پایین، مقدار محتمل یا بیشترین درجه عضویت و حد بالای عدد فازی هستند. تابع عضویت این عدد به‌صورت قطعه‌ای تعریف می‌شود؛ به‌طوری‌که درجه عضویت در بازه [l,m] به‌صورت افزایشی و در بازه [m,u] به‌صورت کاهشی تغییر می‌کند و خارج از این بازه مقدار آن صفر است. این ساختار امکان نمایش مناسب قضاوت‌های زبانی و تقریبی خبرگان را فراهم کرده و به کاهش خطای ناشی از کمی‌سازی مستقیم نظرات آنان در فرآیند تصمیم‌گیری کمک می‌کند. شکل ۳ تجسم هندسی عدد فازی مثلثی را نشان می‌دهد [۳۵].



شکل ۳. تجسم هندسی عدد فازی مثلثی

۳-۶. جمع‌بندی نظرات خبرگان

پس از آنکه نظرات خبرگان جمع‌آوری شد بایستی میانگین نظرات خبرگان به دست آید. در ادبیات تصمیم‌گیری مبتنی بر نظر خبرگان، روش‌های مختلفی برای میانگین‌گیری نظرات وجود دارد، از جمله میانگین‌گیری حسابی فازی، میانگین هندسی فازی و برخی روش‌ها که در آن‌ها حد پایین و حد بالای عدد فازی مثلثی بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر نظرات خبرگان تعیین می‌شود. با این حال، در مطالعات حوزه ایمنی راه که داده‌ها معمولاً بر اساس طیف لیکرت و برداشت ادراکی متخصصان جمع‌آوری می‌شوند، میانگین‌گیری حسابی یکی از مناسب‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش‌ها محسوب می‌شود. در این روش، مقدار مرکزی و حدود عدد فازی بر اساس میانگین نظرات خبرگان محاسبه می‌شود و بنابراین نسبت به روش‌هایی که از مقادیر حداقل و حداکثر استفاده می‌کنند، حساسیت کمتری نسبت به نظراتی دارد که اختلاف بیشتری نسبت به میانگین دارند، نشان می‌دهد. به همین دلیل رویکرد میانگین‌گیری حسابی تمرکز بیشتری بر گرایش مرکزی داده‌ها داشته و می‌تواند نماینده دقیق‌تر و پایدارتری از نظر جمعی خبرگان ارائه دهد [۳۵, ۳۷, ۳۸]. (روش میانگین گیری نظرات خبرگان به روش حسابی برای هر سوال را توضیح می‌دهد.

$$F_{ave} = (\frac{\sum l}{n}, \frac{\sum m}{n}, \frac{\sum u}{n}) \qquad (۱)$$

که در آن F_{ave} تجمیع نظر کارشناسان است و l، m و u همانطور که پیشتر توضیح داده شد به ترتیب بیانگر حد پایین، مقدار محتمل یا بیشترین درجه عضویت، و حد بالای عدد فازی هستند و n تعداد خبرگان است که در این پژوهش برابر با ۱۹ در نظر گرفته شده است.

از آنجا که در هر نظر سنجی به دلایل متعدد ممکن است نظر کارشناسان با یکدیگر اختلاف داشته باشد بایستی برای همگرا شدن نظر کارشناسان، نظراتی که از میانگین اختلاف دارند را مجددا برای ارزیابی به متخصصان داده شود تا در صورت تشخیص نظرات خود را اصلاح کنند. برای به دست آوردن میزان اختلاف نظر هر کارشناس از میانگین نظرات از رابطه‌ی () استفاده شده است [۳۹].

$$d(A,B) = \sqrt{\frac{1}{3}[(A_l - B_l)^2 + (A_m - B_m)^2 + (A_u - B_u)^2]} \qquad (۲)$$

که در آن $d(A,B)$ فاصله دو عدد فازی A و B می‌باشد و اندیس‌های l، m و u نمایانگر به ترتیب بیانگر حد پایین، مقدار محتمل یا بیشترین درجه عضویت، و حد بالای اعداد فازی A و B هستند.

در این پژوهش، به منظور مدیریت دقیق فرآیند تصمیم‌گیری در روش دلفی فازی و تفکیک مفهوم اختلاف نظر با گروه از همگرایی فرآیند، از دو آستانه متفاوت با اهداف مجزا استفاده گردید:

الف) آستانه شناسایی نظرات دور از میانگین و ارزیابی توافق گروهی: برای سنجش میزان هم‌راستایی نظر هر کارشناس با خرد جمعی در یک دور مشخص، فاصله نظر فردی از میانگین فازی کل گروه مطابق رابطه‌ی () محاسبه شد. برای آنکه بتوان مشخص کرد کدام کارشناسان نظری متفاوت از میانگین نظرات داده‌اند باید یک حد برای مقدار d مشخص کرد. در ادبیات تحقیق مقادیر متعددی برای بیان نزدیک یا دور بودن دو عدد فازی از یکدیگر بیان شده است. به صورت معمول فاصله‌ی کمتر از ۰.۲ به عنوان اختلاف ناچیز و مقادیر بیشتر از ۰.۶ به عنوان اختلاف معنادار بیان شده است [۲۰]. در این تحقیق چون نظر خبرگان بر اساس طیف لیکرت پنج نقطه‌ای جمع‌آوری شده است، حد اختلاف معنا داری برابر فاصله‌ی دو طیف متوالی در نظر گرفته شده است. جدول ۲ فاصله بازه‌های متوالی در طیف لیکرت پنج نقطه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول و با میانگین‌گیری از این مقادیر عدد ۰.۲۲۷ به عنوان آستانه‌ی اختلاف در نظر گرفته شده است. بنابراین، نظراتی که فاصله آن‌ها از میانگین خبرگان بیش از ۰.۲۲۷ بود، به عنوان نظرات دارای اختلاف معنادار شناسایی شده و در دور بعدی دلفی، به همراه بازخورد میانگین گروه، جهت ارزیابی مجدد یا ارائه استدلال به همان کارشناس ارجاع داده شدند.

جدول ۲. اختلاف اعداد فازی معادل بازه‌های طیف‌های لیکرت متوالی

اختلاف اعداد مثلثی فازی	بازه‌های متوالی
۰.۲۰۴	نا ایمن و کاملا نا ایمن
۰.۲۵	معمولی و نا ایمن
۰.۲۵	ایمن و معمولی
۰.۲۰۴	کاملا ایمن و ایمن

ب) آستانه همگرایی و شرط توقف فرآیند دلفی: برای تصمیم‌گیری در خصوص پایان یافتن تکرار مراحل دلفی، ثبات نظرات کارشناسان در دو دور متوالی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس استانداردهای پذیرفته‌شده در ادبیات دلفی فازی، شرط توقف فرآیند، کاهش درجه‌ی عدم توافق[15] کارشناسان به کمتر از ۰.۲ است. به عبارت دیگر اگر میانگین نظر خبرگان در دو دور متوالی که از رابطه‌ی () محاسبه می‌شود از ۰.۲ بیشتر باشد، نظر سنجی یک دور دیگر تکرار می‌شود [۳۸].

$$S = \left|\frac{1}{3}\left[(F_{1l}, F_{1m}, F_{1u}) - (F_{2l}, F_{2m}, F_{2u})\right]\right| \qquad (۳)$$

که در آن F_2 و F_1 میانگین نظرات خبرگان در مرحله‌ی اول و دوم می‌باشد و سایر اندیس‌های آن نیز پیشتر توضیح داده شده است.

پس از اتمام موفقیت‌آمیز مراحل دلفی و دستیابی به همگرایی نهایی، به منظور رتبه‌بندی و تعیین مقاطع حادثه‌خیز، بایستی میانگین نظرات کارشناسان که به صورت عددی فازی است به یک عدد قطعی[16] تبدیل شود تا بتوان بازه‌ی خطرپذیری مقطع مورد نظر از راه به صورت کیفی بیان شود. در فرآیند قطعی‌سازی اعداد فازی، روش‌های متنوعی وجود دارد؛ از جمله میانگین‌گیری ساده، روش‌هایی که بر مقدار مرکزی تمرکز بیشتری دارند، و رویکردهای مبتنی بر بیشینه‌سازی مقدار حد پایین، حد بالا یا نقطه مرکزی [۳۵]. انتخاب میان این روش‌ها معمولاً به هدف تحلیل و ماهیت داده‌ها بستگی دارد. در داده‌های حاصل از طیف لیکرت که ماهیت ادراکی دارند و از آنجا که هدف ما دستیابی به یک مقدار نماینده و نزدیک به نظر غالب خبرگان است، استفاده از روش میانگین‌گیری با تأکید بیشتر بر مقدار مرکزی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. این روش با کاهش اثر مقادیر حدی و تمرکز بر بخش میانی توزیع، عدد نهایی پایدارتر و منعکس کننده‌تری از ادراک جمعی ارائه می‌دهد. بنابراین، در این مطالعه از رابطه () مربوط به این روش استفاده شده است و سپس برای تبدیل عدد قطعی حاصل از مجموع نظرات به توصیف کیفی لیکرت از جدول ۳ استفاده می‌شود [۴۰].

$$Z = \frac{l + 4m + u}{6} \qquad (۴)$$

[15] Degree of Disagreement
[16] Crisp Values

که در آن Z بیانگر عدد قطعی معادل عدد فازی (l, m, u) است.

جدول ۳. معادل خطر پذیری مقادیر قطعی شده‌ی نظر کارشناسان

میزان خطر پذیری	بازه‌ی عدد قطعی
کاملا نا ایمن	۰.۸-۱
نا ایمن	۰.۶-۰.۸
معمولی	۰.۴-۰.۶
ایمن	۰.۲-۰.۴
کاملا ایمن	۰-۰.۲

نهایتا برای تشخیص آنکه آیا هر مقطع از راه را می‌توان به عنوان نقطه‌ی حادثه خیز در نظر گرفت یا خیر راهکارهای متعددی وجود دارد. پژوهش‌های پیشین در حوزه‌ی استفاده از روش دلفی فازی بعضا عدد ۰.۷ را به عنوان آستانه‌ی رد یا قبول یک گزاره در این روش معرفی کرده‌اند. در این تحقیق رد و قبول به معنایی که بعضا در روش دلفی فازی استفاده می‌شود، مد نظر نیست و هدف شناسایی نقاط حادثه خیز است. از آنجایی که در این پژوهش مبنای نظرسنجی اولیه طیف لیکرت پنج نقطه‌ای بوده است و مطابق جدول ۳ عدد قطعی بیش از ۰.۶ به عنوان نا ایمن در نظر گرفته شده است، آستانه‌ی پذیرش هر مقطع راه جهت تطبیق با طیف لیکرت، عدد ۰.۶ در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج

در این بخش نظرات کارشناسان برای مقاطع مختلف انتخاب شده، در دور اول و دوم دلفی در جدول ۴ بیان شده است و با توجه به آنچه پیشتر بیان شد، درجه‌ی عدم توافق نظرات در دور اول و دوم به دست آمد. بیشترین میزان درجه‌ی عدم توافق براس سه سوال (قوس افقی تند، تقاطع نا ایمن و عرض نا کافی راه) برابر ۰.۰۲۶ به دست آمد و برای چهار سوال (قوس افقی با دید ناکافی، تلفیق قوس افقی و قائم، عدم وجود شانه‌ی راه و بخش عادی مسیر) نیز نظرات کارشناسان هیچ تغییری نکرد. مشخص است که این اعداد از ۰.۲ که آستانه‌ی ورود به مرحله‌ی سوم دلفی فازی مرحله‌ای است، به مراتب کمتر بوده و بنابراین نیازی به تکرار نظر سنجی نیست.

جدول ۴. نتایج نظر سنجی ایمنی مقاطع راه

مشخصات مقطع راه	عدد قطعی دور اول	عدد قطعی دور دوم	درجه عدم توافق
قوس افقی با دید ناکافی	۰.۸۸	۰.۸۸	۰
قوس قائم با دید ناکافی	۰.۷۹	۰.۸۱	۰.۰۲۲
قوس افقی تند	۰.۷۸	۰.۸	۰.۰۲۶
تقاطع نا ایمن	۰.۷۵	۰.۷۸	۰.۰۲۶
عرض نا کافی راه	۰.۷۴	۰.۷۷	۰.۰۲۶
تلفیق قوس افقی و قائم	۰.۷۴	۰.۷۴	۰
عدم وجود شانه‌ی راه	۰.۷۳	۰.۷۳	۰
وجود موانع سخت در اطراف راه	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۰۱۳
بخش عادی مسیر	۰.۲۷	۰.۲۷	۰

همانطور که در جدول ۴ مشخص است، بیشترین میزان خطرپذیری (با عدد قطعی ۰.۸۸) متعلق به قوس افقی با دید ناکافی است و پس از آن با اختلاف اندک قوس قائم با دید نا کافی و قوس افقی تند، بیشترین میزان خطر پذیری را دارا هستند. از طرف دیگر

بخش عادی مسیر، مطابق انتظار، با اختلاف کمترین میزان خطر پذیری راه را به خود اختصاص داده است.

از آنجایی که هدف پژوهش جاری به شناسایی نقاط حادثه‌خیز است میزان خطر پذیری مقاطع مورد بررسی، بیان شده‌اند با تطبیق اعداد قطعی حاصل از نظرسنجی کارشناسان، با حدود تعیین شده در جدول ۳ مطابقت داده شده و میزان خطر پذیری قسمت‌های مختلف راه در قالب بازه‌های کیفی، به شرح جدول ۵ بیان می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل، در حالی که بخش عادی مسیر از نظر کارشناسان، ایمن ارزیابی شده است،قوس افقی با دید ناکافی، قوس قائم با دید ناکافی و قوس افقی تند کاملا نا ایمن ارزیابی شده‌اند و تقاطع نا ایمن، عرض نا کافی راه، تلفیق قوس افقی و قائم و عدم وجود شانه‌ی راه در محدوده‌ی نا ایمن قرار گرفته‌اند. کارشناسان وجود موانع سخت در اطراف راه را معمولی ارزیابی کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان به جای رویکردهای انفعالی و مبتنی بر آمار تصادفات، از چارچوب دلفی فازی به عنوان یک ابزار پیشگیرانه و قابل‌اطمینان برای شناسایی نقاط پرخطر پیش از وقوع حادثه استفاده کرد.

جدول ۵. میزان خطر پذیری مقاطع مختلف راه

میزان خطر پذیری	مشخصات مقطع راه
کاملا نا ایمن	قوس افقی با دید ناکافی
کاملا نا ایمن	قوس قائم با دید ناکافی
کاملا نا ایمن	قوس افقی تند
نا ایمن	تقاطع نا ایمن
نا ایمن	عرض نا کافی راه
نا ایمن	تلفیق قوس افقی و قائم
نا ایمن	عدم وجود شانه‌ی راه
معمولی	وجود موانع سخت در اطراف راه
ایمن	بخش عادی مسیر

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که محدودیت دید در قوس‌های مسیر، مهم‌ترین عامل در ادراک خطر توسط متخصصان ایمنی راه است. به طور خاص، قوس افقی با فاصله دید ناکافی بیشترین سطح خطر ادراک‌شده را به خود اختصاص داد (Z=۰.۸۸) و پس از آن قوس قائم با دید ناکافی (Z=۰.۸۱) و قوس افقی تند (Z=۰.۸۰) قرار گرفتند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که محدودیت دید، بیش از سایر ویژگی‌های هندسی، می‌تواند در شکل‌گیری احساس ناایمنی و افزایش احتمال تعارضات ترافیکی در راه‌های دوخطه نقش داشته باشد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد مقاطع دارای تقاطع نا ایمن، عرض نا کافی راه، تلفیق قوس افقی و قائم و عدم وجود شانه‌ی راه در محدوده‌ی نا ایمن قرار گرفتند. نکته قابل توجه آن است که بخش عادی مسیر، که به عنوان یک مقطع عادی و فاقد ویژگی‌های پرخطر انتخاب شده بود، کمترین میزان خطر ادراک شده را به دست آورد (Z=۰.۲۷). این موضوع نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی و قضاوت کارشناسان توانسته‌اند به‌درستی میان مقاطع عادی و مقاطع بالقوه پرخطر تمایز قائل شوند.

امتیازهای بالای ریسک منتسب به قوس‌های افقی و قائم دارای دید ناکافی را می‌توان با مجموعه‌ای از عوامل ادراکی و عملکردی تبیین کرد. در چنین موقعیت‌هایی، میدان دید پیش‌روی راننده اغلب به واسطه هندسه راه یا عناصر حاشیه‌ای محدود می‌شود و توانایی او را برای پیش‌بینی شرایط ترافیکی پیش رو کاهش می‌دهد. کاهش فاصله دید همچنین زمان درک و واکنش در دسترس را کوتاه‌تر کرده و فرصت راننده را برای تشخیص و مواجهه با مخاطرات بالقوه را محدود می‌کند. افزون بر این، در راه‌های دوخطه برون‌شهری، ناکافی بودن دید احتمال بروز تعارضات ترافیکی، به‌ویژه تعارضات رویاروی و سبقت‌گیری، را افزایش می‌دهد؛ زیرا رانندگان قادر به مشاهده قابل اعتماد وسایل نقلیه‌ی در مسیر مخالف در فاصله مناسب نیستند. از منظر عوامل انسانی نیز این شرایط می‌تواند بار شناختی راننده را افزایش دهد، چراکه وی باید به‌طور هم‌زمان مسیر حرکت خودرو را کنترل کند، سرعت را تنظیم نماید و تعارضات احتمالی را در شرایط محدودیت اطلاعات بصری ارزیابی کند. مجموع این عوامل می‌تواند توضیح دهد که چرا کارشناسان در این پژوهش، قوس‌ها (افقی و قائم) با دید ناکافی را به‌عنوان پرخطرترین نوع مقطع راه تلقی کرده‌اند.

اگر نقاط مورد بررسی در این تحقیق را به دو دسته‌ی کلی مشخصات هندسی مسیر و شرایط پیرامونی آن تقسیم کنیم،

مشخص است که مشخصات هندسی مسیر بیشترین تاثیر را در میزان نا امنی مسیر دارند. از منظر تئوری ایمنی ذهنی، این امر احتمالا به این دلیل است که در مواجهه با مشکلات هندسی نظیر قوس‌های با دید ناکافی، حس کنترل راننده بر وسیله نقلیه به شدت افت کرده و به تبع آن مؤلفه ریسک درک‌شده به حداکثر خود می‌رسد. این موضوع در تحقیقات پیشین هم که بر اساس نظر کارشناسان به ارزیابی ایمنی راه پرداخته‌اند، تایید می‌شود. برای مثال در تحقیق انجام شده به روش AHP، که در آن کلیه عوامل تاثیرگذار بر ایمنی راه مورد بررسی قرار گرفته بودند، تاثیرات طرح هندسی بالغ بر ۲۵ درصد گزارش شده بود. البته این در حالی است که در آن تحقیق عوامل بسیاری از جمله وضعیت روسازی، وضعیت شانه، زه‌کشی سطح راه، نور مسیر و پیرامون آن، تابلوهای رانندگی و وجود جزیره‌های ایمنی هم به عنوان پارامترهای موثر در ایمنی در نظر گرفته شده بود [۳۰]. عرض ناکافی مسیر را اگرچه شاید نتوان به طور مشخص در دسته‌بندی شرایط هندسی راه قرار داد، اما در پژوهش جاری و همچنین پژوهش‌های دیگر به عنوان نقاط نا ایمن شناسایی شده‌اند [۴۱].

نتایج تحقیقات مبتنی بر آمار تصادفات نیز نتایج پژوهش جاری را تایید می‌کنند. میرزا حسین و همکاران در بررسی نقاط حادثه خیز یک مسیر دو خطه و دو طرفه، نشان دادند مهمترین عوامل موثر بر تصادفات شامل عرض راه و شانه، مشخصات قوس‌ها، وضعیت سبقت گیری قوس‌ها (سبقت آزاد یا سبقت ممنوع) و خطرات پیرامون جاده و همچنین نور جاده و پیرامون آن می‌باشند. علیرغم تطبیق مناسب عوامل مشخص شده در این تحقیق و پژوهش جاری اختلافی در میزان خطر پذیری موانع اطراف جاده مشاهده می‌شود. علت این موضوع آن است که در تحقیق میرزا حسین و همکاران که در جاده‌ی کرج-چالوس انجام شده بود، خطرات پیرامون راه مربوط به مکان‌هایی است که امکان ورود و خروج وسایل نقلیه را بدون رعایت ایمنی کافی به مسیر دارند و اساسا با وجود موانع صلب در اطراف جاده اختلاف ماهوی دارد و از نظر ماهیت با خطرات ناشی از وجود موانع صلب در حاشیه راه تفاوت دارد [۴۲].

تحقیق دیگری که با روشی تلفیقی از عکس برداری و همچنین استفاده از دستگاه شبیه‌ساز رانندگی انجام شده بود نیز نتایجی مشابه با پژوهش جاری داشت. در آن تحقیق نشان داده شد رانندگان برای ارزیابی ایمنی راه توجه بیشتری به قوس‌ها، میزان شیب طولی و عرض راه می‌کنند. در آن تحقیق قوس‌های افقی و عرض کم خطوط بیشترین حس نا امنی را در نظر دهندگان ایجاد می‌کردند [۲۸]. در پژوهش جاری قوس قائم با دید ناکافی نیز جز نقاط با پتانسیل خطر بسیار زیاد شناسایی شد و در آن تحقیق شیب های طولی جز نقاط با خطر نسبتا زیاد قرار گرفته بود. به صورت کلی اختلافات جزئی مشاهده‌شده میان نتایج مطالعات مختلف عمدتاً به تفاوت در روش‌شناسی و نوع رویکردهای ارزیابی ایمنی مربوط می‌شود.. البته در این تحقیق نیز محدودیت‌های بسیاری وجود دارد که در بخش بعد به آنها اشاره می‌شود.

در تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، ممکن است قرارگیری مقاطعی نظیر قوس‌های با دید ناکافی در صدر مقاطع پرخطر، امری بدیهی و همسو با دانش عمومی مهندسی ترافیک به نظر برسد. با این وجود، باید تأکید کرد که دستاورد کلیدی و کاربرد اصلی این پژوهش در کشف خطرناک بودن این مقاطع نیست، بلکه تطابق کامل خروجی‌های مدل ریاضی پژوهش با بدیهیات مهندسی، در واقع گواهی بر صحت عملکرد و اعتبارسنجی متدولوژی ارائه‌شده است. اهمیت این موضوع در آن است که با اثبات کارایی این چارچوب (ترکیب تصاویر سطح دید راننده و دلفی فازی) در شناسایی درست نقاط پرخطر شناخته‌شده، اکنون می‌توان از آن به عنوان یک ابزار استاندارد، پیشگیرانه و قابل اتکا برای ارزیابی ایمنی مقاطعی که فاقد تاریخچه و آمار تصادفات هستند (مانند راه‌های جدیدالاحداث) بهره برد.

این مطالعه در سه محور اصلی به ادبیات ایمنی راه‌ها کمک می‌کند. نخست، با به‌کارگیری برداشت کارشناسان از ایمنی، مبتنی بر تصاویر واقعی از راه که در سطح دید راننده ثبت شده‌اند، یک مبنای عملی برای شناسایی پیش‌گیرانه‌ی نقاط پرخطر در راه‌های برون‌شهری دوخطه فراهم می‌سازد. دوم، از طریق ترکیب ارزیابی مبتنی بر ادراک با روش دلفی فازی، رویکردی ساختاریافته برای به‌کارگیری قضاوت کارشناسان ارائه می‌دهد که عدم‌قطعیت موجود در ادراک ایمنی را نیز در نظر می‌گیرد. سوم، چارچوب پیشنهادی نشان می‌دهد که حتی در غیاب داده‌های جامع تصادفات نیز می‌توان نقاط بالقوه پرخطر را با قابلیت اطمینان

مناسب شناسایی کرد؛ موضوعی که این روش را به ابزاری کاربردی برای ارزیابی زودهنگام ایمنی و مدیریت پیشگیرانه ایمنی راه‌ها، به‌ویژه در محیط‌های کم‌داده و یا راه‌های جدیدالاحداث تبدیل می‌کند.

همانطور که از مقایسه‌ی نتایج پژوهش جاری با سایر تحقیقات مشخص است، نتایج حاصل از تجمیع نظرات کارشناسان به روش دلفی فازی همگرایی بسیار مناسبی با نتایج تحقیقات پیشین دارد. استفاده از اعداد فازی مثلثی (l,m,u) در این پژوهش توانست عدم قطعیت موجود در ادراک بصری خبرگان را به خوبی پوشش دهد و همگرایی سریع نظرات (دستیابی به شرط توقف $S<0.2$ در دو دور) نشان‌دهنده کارایی بالای این ابزار در ارزیابی ایمنی راه است.

از منظر کاربردی، استفاده از چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند مزایای متعددی برای مدیریت ایمنی راه به همراه داشته باشد. برخلاف روش‌های سنتی مبتنی بر آمار تصادفات که به داده‌های بلندمدت نیاز دارند، رویکرد پیشگیرانه‌ی این پژوهش، که بر ادراک ایمنی متخصصان استوار است، می‌تواند به عنوان ابزاری برای غربالگری اولیه در شناسایی و اولویت‌بندی نقاط مستعد خطر مورد استفاده قرار گیرد. این قابلیت می‌تواند برای سازمان‌های متولی ایمنی راه که به دنبال شناسایی نقص‌های ایمنی نهفته پیش از بروز گسترده تصادفات هستند، کاربردی باشد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی کارشناسان می‌تواند در فرآیند ممیزی ایمنی راه به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، رتبه‌بندی بخش‌های مختلف مسیر بر اساس سطح خطر ادراک‌شده می‌تواند به تصمیم‌گیران در تخصیص بهینه منابع و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی کمک کند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که محدودیت فاصله دید در قوس‌های مسیر، به‌ویژه در قوس‌های افقی و قائم، مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری ادراک خطر در راه‌های دوخطه برون‌شهری محسوب می‌شود. به‌کارگیری روش دلفی فازی در ترکیب با ارزیابی مبتنی بر تصاویر ثبت‌شده از دید راننده، امکان بهره‌گیری نظام‌مند از قضاوت کارشناسان و در نظر گرفتن عدم‌قطعیت موجود در ادراک ایمنی را فراهم ساخت. نتایج همچنین نشان داد که چارچوب پیشنهادی قادر است میان مقاطع عادی و مقاطع بالقوه پرخطر تمایز مناسبی ایجاد کند و بدین ترتیب به عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی اولیه نقاط مستعد خطر مورد استفاده قرار گیرد. از این منظر، رویکرد ارائه‌شده می‌تواند به عنوان مکملی برای روش‌های سنتی مبتنی بر آمار تصادفات در فرآیندهای ارزیابی و مدیریت ایمنی راه، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های تصادف محدود یا ناکامل هستند، مورد توجه قرار گیرد. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت توجه به محدودیت دید در طراحی و ارزیابی ایمنی راه‌های دوخطه تأکید کرده و نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مبتنی بر ارزیابی کارشناسان می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شناسایی پیشگیرانه مخاطرات بالقوه و ارتقای مدیریت ایمنی راه‌های دوخطه مورد استفاده قرار گیرد.

۶. محدودیت‌ها و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

هدف اصلی این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از روش دلفی فازی برای شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز بود. در این راستا تلاش شد مقاطعی از راه که دارای پتانسیل خطرپذیری بودند با یکدیگر مقایسه شوند. بدین منظور تصاویری تهیه شد که در هر یک تنها یک عامل ایمنی به‌صورت برجسته نمایش داده شود. همچنین برای درک بهتر خبرگان، مشخصه مورد نظر به صورت توضیحی در زیر هر تصویر درج گردید. با این حال، در شرایط واقعی بسیاری از مقاطع راه دارای چندین مسئله ایمنی به طور همزمان هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفتند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تأثیر همزمان چند عامل خطر در یک مقطع راه بر ایمنی راه مورد بررسی قرار گیرد.

با وجود آنکه استفاده از تصاویر مقاطع راه در برخی پژوهش‌های پیشین نیز به‌کار گرفته شده است، برای دستیابی به درک دقیق‌تر از وضعیت ایمنی هر نقطه، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از ویدئوی مقاطع مورد نظر استفاده شود. در این صورت متخصصان می‌توانند با مشاهده شرایط مسیر پیش از رسیدن به نقطه پرخطر، ارزیابی جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تری از سطح ایمنی آن انجام دهند. با این حال، به دلیل محدودیت‌های موجود در تهیه و ارسال فایل‌های ویدئویی برای خبرگان، این موضوع در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار نگرفت.

مسئله دیگری که در این پژوهش مورد توجه قرار نگرفته است، نقش علائم راهنمایی و رانندگی افقی و عمودی در ایمنی راه و نیز تأثیر آن بر قضاوت خبرگان است. به منظور حذف اثر این عامل در تحلیل‌ها، تلاش شد مقاطعی از راه انتخاب شوند که در آن‌ها و همچنین در فاصله پیش از آن‌ها هیچ‌گونه علائم راهنمایی و رانندگی وجود نداشته باشد. با این حال، با توجه به نقش مهم و غیرقابل انکار علائم راهنمایی و رانندگی در ارتقای ایمنی راه، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی تأثیر این عامل بر شناسایی و ارزیابی نقاط حادثه‌خیز و نیز بر قضاوت خبرگان مورد بررسی قرار گیرد.

از آنجا که ارزیابی‌ها توسط متخصصان ایمنی انجام شد، نتایج این پژوهش بازتاب‌دهنده ادراک حرفه‌ای کارشناسان است و لزوماً بیانگر ادراک تمامی کاربران راه نیست. در مطالعات آتی می‌توان با مشارکت رانندگان عادی و کاربران مختلف راه، تفاوت میان ادراک ایمنی متخصصان و کاربران را بررسی کرد.

اگرچه در این پژوهش، ارزیابی‌ها بر پایه درک کل‌نگرانه از محیط راه استوار بود، اما عدم دسترسی به برداشت‌های دقیق هندسی برای تک‌تک مقاطع عکس برداری شده می‌تواند به عنوان یکی از محدودیت‌های توسعه این روش در نظر گرفته شود. لذا برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد مشخصات هندسی دقیق (نظیر شعاع قوس افقی، شیب عرضی، عرض دقیق شانه و غیره) به تفکیک هر تصویر برداشت و ثبت شود. این امر امکان تحلیل همبستگی میان پارامترهای عینی راه و خروجی‌های ادراکی مدل دلفی فازی را فراهم می‌آورد. با این رویکرد ترکیبی، می‌توان دریافت که به عنوان مثال، تغییرات جزئی در یک عارضه مشخص (مانند درجات مختلف تندی در یک قوس افقی) دقیقاً چه تاثیری بر نوسانات ایمنی ادراکی کاربران دارد و تمایز دقیق‌تری بین درجات ناایمنی قائل شد.

References

[1] Khedri, E., R. Amin, and A. Khodaee, "Mortality trend due to traffic accident in Iran in Years 2018-2021". Civil and Project. 5(4): p. 40-56. 2023

[2] Saadat, S., et al., "The most important causes of death in Iranian population; a retrospective cohort study". Emergency. 3(1): p. 16. 2015

[3] Sadeghian, F., Ahmad Mehri, Zahra Ghodsi, Mohadaseh S. Bardsiri, Vali Baigi, Mahdi Sharif-Alhoseini, Gerard O'Reilly, Ali Mokdad, and Vafa Rahimi-Movaghar, "Road traffic injuries and associated mortality in the Islamic Republic of Iran". Eastern Mediterranean health journal. 29(10): p. 796-803. 2023

[4] Elvik, R., "Comparative analysis of techniques for identifying locations of hazardous roads". Transportation Research Record. 2083(1): p. 72-75. 2008

[5] Farzana RAHMAN, F.U., Md. Mostafizur RAHMAN, Md. Ariful ISLAM., "Characterizing Hazardous Road Locations and Black Spots on Route N8 (Dhaka-Barisal National Highway) of Bangladesh". Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 11. 2017

[6] National Research Council, T.R.B., Task Force on Development of the Highway Safety Manual and T.O.J.T.F.o.t.H.S. Manual, Highway safety manual. Vol. 1. 2010: AASHTO.

[7] Shin Hyoung Parka, K.J., Dong-Kyu Kimc, Seung-Young Khoc, Seungmo Kangd., "Spatial Analysis Methods for Identifying Hazardous Locations on Expressways in Korea". Scientia Iranica. 22(4): p. 1594-1603. 2015

[8] Sorensen, M. and M. Mosslemi, "The Effect of Road Safety Measures on Subjective Safety among Vulnerable Road Users". 2009

[9] Singh, H.P. and A. Verma. "Review of Reactive and Proactive Aspects". in Proceedings of the 13th Asia Pacific Conference on Transportation and the Environment (APTE) 2024. Springer Nature. 2026

[10] Han, I., "Analysis of vehicle collision accidents based on qualitative mechanics". Forensic science international. 291: p. 53-61. 2018

[11] Griffith, M.S., C. Hayden, and H. Kalla, "Data is key to understanding and improving safety". Public roads. 66(4): p. 42-42. 2003

[12] Lawson, A.R., et al., "Perception of safety of cyclists in Dublin City". Accident Analysis & Prevention. 50: p. 499-511. 2013
[13] Teschke, K., et al., "Route infrastructure and the risk of injuries to bicyclists: a case-crossover study". American journal of public health. 102 :(۱۲)p. 2336-2343. 2012
[14] Leur, P.d. and T. Sayed, "Development of a road safety risk index". Transportation Research Record. 1784(1): p. 33-42. 2002
[15] Fuest, S., et al., "I bet you feel safe! assessing cyclists' subjective safety by objective scores ." Journal of Urban Mobility. 4: p. 100066. 2023
[16] von Stülpnagel, R., C. Petinaud, and S. Lißner, "Crash risk and subjective risk perception during urban cycling: Accounting for cycling volume". Accident Analysis & Prevention. 164: p. 106470. 2022
[17] Boffi, M., et al., "Investigating objective and perceived safety in road mobility". Transportation research procedia. 60: p. 600-607. 2022
[18] Abedi, M.M. and E. Sacchi, "Statistical Relationship Between Objective and Subjective Road Safety Using Social Media Data: A Bayesian Multivariate Modeling Approach". Transportation Research Record: p. 03611981251393240. 2025
[19] Costa, M., et al., "Bridging the gap: a scoping review exploring the relationship between objective and subjective cycling safety ."Transport Reviews. 45(6): p. 993-1015. 2025
[20] Montella, A., "Safety reviews of existing roads: Quantitative safety assessment methodology". Transportation research record. 1922(1): p. 62-72. 2005
[21] Zhou, J., L. Cheng, and J. Shi, Traffic Safety Evaluation by Using a Comprehensive Method that Based on Delphi-AHP-Fuzzy, in ICLEM 2010: Logistics For Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration. 2010. p. 3594-3600.
[22] Moorvari, E., "Evaluating The Effectiveness Of Fuzzy Logic In Modeling Inner-City Highway Accidents". Human Ecology. 1(1): p. 14-28. 2022
[23] Effati, M., et al., "Prediction of crash severity on two-lane, two-way roads based on fuzzy classification and regression tree using geospatial analysis". Journal of Computing in Civil Engineering. 29(6): p. 04014099. 2015
[24] Cox, J.A., V. Beanland, and A.J. Filtness, "Risk and safety perception on urban and rural roads: Effects of environmental features, driver age and risk sensitivity". Traffic Inj Prev. 18(7 :(p. 703-710. 2017
[25] Carlo Giacomo Prato, T.K.R., Sigal Kaplan., "Risk Factors Associated with Crash Severity on LowVolume Rural Roads in Denmark". Journal of Transportation Safety & Security: p. 39. 2013
[26] Ma, Z., et al., "Constructing road safety performance indicators using fuzzy delphi method and grey delphi method". Expert systems with applications. 38(3): p. 1509-1514. 2011
[27] Hasan, A.E. and F.K. Jaber. "Identifying and analysing key criteria affecting the prioritisation of district road maintenance using the fuzzy Delphi method". in AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC. 2024
[28] Charlton, S., et al., Reading the Risk of New Zealand Roads: A comparison of actual and perceived driving risk, in Technical report. 2013, Traffic and Road Safety Research Group.
[29] He, S., et al., "Exploring road safety using alignment perspective features in real driving images: A case study on mountain freeways". PLoS one. 19(6): p. e0305241. 2024
[30] Pradeep Kumar Agarwal, P.K.P., Rakesh Mehar. "A Methodology for Ranking Road Safety Hazardous Locations Using Analytical Hierarchy Process". in 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG). India: Elsevier. 2013
[31] J.P. Thompson, M.R.J.B., J.L. Mathias, L.N. Wundersitz" ,.An examination of the environmental, driver and vehicle factors associated with the serious and fatal crashes of older rural drivers". Accident Analysis and Prevention. 50: p. 8. 2013
[32] Morteza Asadamraji, M.S., Aminmirza Borujerdian, Tayebe Ferdosi, "HAZARD DETECTION PREDICTION MODEL FOR RURAL ROADS BASED ON HAZARD AND ENVIRONMENT PROPERTIES". Promet – Traffic & Transportation. 30(6): p. 10. 2018
[33] Hancock, M.W. and B. Wright, "A policy on geometric design of highways and streets". American Association of State Highway and

Transportation Officials: Washington, DC, USA. 3(20): p. 5. 2013
[34] Harpe, S.E., "How to analyze Likert and other rating scale data". Currents in pharmacy teaching and learning. 7(6): p. 836-850. 2015
[35] Arash Habibi ,F.F.J., Azam Sarafrazi., "Fuzzy Delphi Technique for Forecasting and Screening Items". Asian Journal of Research in Business Economics and Management. 5(2): p. 14. 2015
[36] Okoli, C. and S.D. Pawlowski, "The Delphi method as a research tool: an example ,design considerations and applications". Information & management. 42(1): p. 15-29. 2004
[37] Wu, C.-H. and W.-C. Fang, "Combining the Fuzzy Analytic Hierarchy Process and the fuzzy Delphi method for developing critical competences of electronic commerce professional managers". Quality & Quantity. 45(4): p. 751-768. 2011
[38] Dehghan Nayeri, M., A. Sadeghpour Firouzabad, and S. Safari, "Comparison across X, Y and Z generation employees' attraction and retention factors: multigroup analysis (MGA)". International Journal of Organizational Analysis. 34(2): p. 385-414. 2026
[39] Chen, C.-T., "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment". Fuzzy sets and systems. 114(1): p. 1-9. 2000
[40] Sepahvand, S., S.J. Hejazi, and M.H .Jalal Kamali, "Advancing Tunnel Safety Management: A Simple and Adaptable Method for Comprehensive Evaluation". Contributions of Science and Technology for Engineering. 3(1): p. 20-30. 2026
[41] RAHMAN, F., et al. "Characterizing Hazardous Road Locations and Black Spots on Route N8 (Dhaka-Barisal National Highway) of Bangladesh". in Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2017
[42] Mirzahossein, H., et al., "Evaluating geometric design characteristics of two-lane two-way rural roads on crash frequencies occurrences". Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering. 47(4): p. 2497-2506. 2023

پیوست ۱. پرسشنامه‌ی مورد استفاده در این پژوهش

با سلام و احترام پرسشنامه‌ی حاضر برای بررسی ایمنی برخی نقاط از مسیر دو طرفه‌ی کرمان-گناباد است. در قالب هر سوال یک عکس به شما نمایش داده می‌شود تا ایمنی آن را ارزیابی کنید. از آنجایی که ممکن است در برخی از عکس‌ها چند مورد نا ایمن وجود داشته باشد، خواهشمند است تا حد امکان با عنایت به نوشته‌ی سوال (مورد نا ایمن مد نظر) ارزیابی خود را انجام دهید.		وجود موانع سخت اطراف راه	
قوس قائم با دید ناکافی		قوس افقی با دید ناکافی	
تقاطع نا ایمن		قوس افقی تند	
تلفیق قوس افقی و قائم		عدم وجود شانه راه	
عرض نا کافی راه		بخش عادی مسیر	