رویکرد چندمعیاره در شرایط عدم قطعیت مبتنی بر تئوری شواهد برای شناسایی و رتبه‌بندی نقاط پرتصادف جاده‌ها

مقاله علمی-پژوهشی

عظیم سهرابی، گروه مهندسی صنایع، واحد بین المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش ، ایران
*علی جهان (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، سمنان، ایران
کاوه خلیل دامغانی، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Alijahan@iau.ir

دریافت:۱۴۰۴/۱۰/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
صفحه ۴۵۲-۴۲۷

چکیده

شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای، گامی بنیادی در ارتقای ایمنی راه‌ها و کاهش تصادفات محسوب می‌شود. در این پژوهش، یک مدل تصمیم‌گیری ترکیبی نوآورانه بر پایه تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) ، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و تئوری شواهد ارائه شده است که با هدف مدیریت عدم قطعیت موجود در داده‌ها و افزایش دقت رتبه‌بندی نقاط پرخطر توسعه یافته است. در گام نخست، کارایی هر یک از ده نقطه فرضی حادثه‌خیز با استفاده از مدل DEA محاسبه شد. سپس، نتایج حاصل به روش TOPSIS برای رتبه‌بندی اولیه نقاط مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نهایی، تئوری شواهد به‌منظور تجمیع نتایج و ارائه رتبه‌بندی نهایی مقاوم و قابل اعتماد به‌کار گرفته شد. داده‌های ورودی شامل ده شاخص کمی و کیفی مرتبط با ایمنی جاده‌ای است که با استفاده از نظرات خبرگان و داده‌های فرضی استخراج گردید. نتایج نشان داد نقطه P7 با امتیاز ۰,۸۹۲ به‌عنوان ایمن‌ترین و نقطه P9 با امتیاز ۰,۳۱۷ به‌عنوان پرخطرترین مکان شناسایی شد. مدل پیشنهادی ضمن ارائه نتایج پایدار در برابر نوسانات ورودی‌ها، از توانایی بالایی در مدیریت عدم قطعیت برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در پشتیبانی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و بهبود ایمنی شبکه‌های جاده‌ای مورد استفاده قرار گیرد .

واژه‌های کلیدی: تحلیل پوششی داده‌ها، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تئوری شواهد، نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای، عدم قطعیت

۱-مقدمه

افزایش تصادفات جاده‌ای و پیامدهای ناشی از آن ضرورت شناسایی و اولویت‌بندی دقیق نقاط حادثه‌خیز را بیش از پیش مطرح می‌کند. ایمنی راه‌ها یکی از مهم‌ترین موضوعات در حوزه حمل‌ونقل و مدیریت شهری است که تأثیر مستقیم بر سلامت و جان انسان‌ها دارد. نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای به مناطقی اطلاق می‌شوند که در آن‌ها وقوع تصادفات به‌طور مکرر و با شدت بالا رخ می‌دهد و شناسایی دقیق این نقاط، اولین گام مؤثر در کاهش تصادفات و بهبود ایمنی جاده‌ها محسوب می‌شود (صفرزاده، پیردوایی و عبدی ، 2008)، (Milan Tešić et al., 2018). روش‌های متعددی برای شناسایی و رتبه‌بندی این نقاط ارائه شده‌اند، اما چالش اصلی، مواجهه با داده‌های نامطمئن و شرایط عدم قطعیت است که می‌تواند دقت تحلیل‌ها را کاهش دهد. در این زمینه، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش‌های سنجش کارایی مانند تحلیل پوششی داده‌ها می‌تواند

مفید باشد. تحلیل پوششی داده‌ها به‌عنوان یک روش غیرپارامتریک، امکان ارزیابی عملکرد نقاط با در نظر گرفتن چندین معیار ورودی و خروجی را فراهم می‌آورد(Hermans et al., 2006)، و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند تاپسیس برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی به گزینه ایده‌آل کاربرد فراوانی دارند (بیراوند و ندیمی، ۱۳۹۷).

با این حال، برای مقابله با عدم قطعیت موجود در داده‌ها و نتایج، به کارگیری رویکردهای مبتنی بر تئوری شواهد اهمیت ویژه‌ای دارد (رصافی، گنجی و پورخانی،۲۰۱۸). این تئوری امکان ترکیب شواهد مختلف و ارائه رتبه‌بندی‌های مقاوم‌تر و قابل اطمینان‌تر را فراهم می‌کند.

در این مقاله، یک مدل ترکیبی که شامل DEA، TOPSIS و تئوری شواهد ارائه می‌شود که هدف آن شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای در شرایط عدم قطعیت است. استفاده از این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیرندگان در حوزه ایمنی راه‌ها باشد. با وجود تلاش‌های گسترده در شناسایی و تحلیل نقاط حادثه‌خیز، هنوز چند چالش اساسی باقی مانده است. نخست آن که اغلب مطالعات تنها از روش‌های آماری یا یک رویکرد منفرد مانند تحلیل پوششی داده‌ها یا روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده‌اند و همین امر موجب محدودیت در دقت رتبه‌بندی‌ها شده است (Chang, L.Y, 2005)،(Heydecker, B.G., Wu, J., 2001).

دوم، در بسیاری از پژوهش‌ها به موضوع عدم قطعیت موجود در داده‌های تصادفات که ناشی از خطای ثبت، تغییرات شرایط محیطی و یا کمبود داده‌هاست توجه کافی نشده است. این امر می‌تواند نتایج رتبه‌بندی را شکننده و غیرقابل اعتماد سازد.

هرچند در برخی مطالعات، مدیریت عدم قطعیت با استفاده از رویکردهای فازی یا TOPSIS فازی انجام شده است، اما تاکنون مطالعه‌ای که ترکیبDEA، TOPSIS و تئوری شواهد برای شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای ارائه دهد، ارائه نشده است. بنابراین، مدل پیشنهادی این پژوهش علاوه بر ارائه رتبه‌بندی دقیق، توانایی مدیریت سیستماتیک عدم قطعیت را نیز فراهم می‌آورد.

۲-پیشینه تحقیق

با توجه به این نکات، نوآوری مدل حاضر در ترکیبDEA، TOPSIS و تئوری شواهد نهفته است. مدل پیشنهادی این پژوهش این خلأ را پر می‌کند و امکان ارائه رتبه‌بندی مقاوم‌تر و قابل اعتمادتر را فراهم می‌سازد، که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در حوزه ایمنی راه‌ها کمک شایانی کند. شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای از جمله چالش‌های مهم در حوزه مهندسی حمل‌ونقل و ایمنی راه‌ها است که هدف آن کاهش تصادفات و افزایش ایمنی کاربران جاده‌ای می‌باشد (مومنی، ۱۳۷۸)، (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). پژوهش‌های متعددی تاکنون به بررسی این موضوع پرداخته‌اند و روش‌های مختلفی از جمله تحلیل آماری، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (Miroslav Rosić et al., 2017)، (محمد جواد زارعین، محمود عامری، ۱۴۰۱) و مدل‌های عدم قطعیت به کار گرفته شده‌اند، (Fakuda, T., 2005)، (Huynh et al., 2006).

تحلیل پوششی داده‌ها یکی از روش‌های غیرپارامتریک در ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده است که در سال‌های اخیر کاربرد قابل توجهی در حوزه ایمنی راه‌ها یافته است(حسینی، رضایی، ۱۴۰۰)، (Charnes, A., Cooper, & Rhodes., 1978) ، (Cooper et al., 1997). این روش به دلیل توانایی در ارزیابی چندمعیاره و بدون نیاز به فرضیات آماری خاص، برای بررسی عملکرد نقاط حادثه‌خیز، مراکز درمانی مرتبط با تصادفات، و مدیریت منابع ایمنی بسیار مناسب است. به عنوان نمونه، در مطالعاتی DEA برای ارزیابی کارایی ایستگاه‌های پلیس راهنمایی، مراکز امداد و نجات و سایر نهادهای مرتبط با مدیریت ایمنی ترافیک به کار گرفته شده است که نتایج آن‌ها در بهینه‌سازی منابع و بهبود عملکرد موثر بوده است (رمضان زاده ، مومنی، تباشیر ، ۱۳۹۳)، (Yongjun, S., Hermans, E., , Da Ruan, Geert Wets., 2009) ، (F. Chen et al., 2015)، (Fancello, G., Uccheddu, B., Fadda, P., 2014) (Barnum, D.T., Tandon, S., McNeil, S., 2008).

از آنجایی که مسائل دنیای واقعی بسیار پیچیده هستند، وظیفه تصمیم‌گیری مرتبط با آنها نیز به همان اندازه پیچیده است. بنابراین، به تکنیک‌های کارآمدی نیاز است که بهترین راه‌حل را برجسته کنند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله TOPSIS،AHP و VIKOR برای رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز کاربرد فراوانی داشته‌اند. روش تاپسیس به ویژه به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر آسان، در تحلیل‌های رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس معیارهای مثبت و منفی، مورد استقبال قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تلفیق تاپسیس با دیگر روش‌های ارزیابی کارایی مانند DEA می‌تواند موجب افزایش دقت و

اعتبار نتایج شود ((Singh, A., Malik, K.S. (2014)، (بهشتی‌نیا، سیدی‌نیا و برگبید،۱۴۰۰)، (بهبهانی، یزدان پورو قوری شیعه، ۱۳۹۴)، (Hwang, C. L., & Yoon, K., 1981)، (Qiong Bao et al.,2012)، (Saaty, T. L., 2008) ، (Priyank Trivedi et al., 2024).

مدیریت عدم قطعیت با تئوری شواهد

داده‌های مربوط به تصادفات جاده‌ای به دلیل عوامل مختلفی مانند عدم دقت ثبت اطلاعات، شرایط محیطی متغیر و محدودیت‌های فنی، اغلب با عدم قطعیت و ناقص بودن مواجه هستند. تئوری شواهد دَمپسْتر–شَفَر به عنوان یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای مدیریت عدم قطعیت در داده‌ها مطرح شده است (Shafer, G., 1976)، [Dempster, A.P., 1967]، که بر اهمیت در نظر گرفتن این عوامل و اجرای استراتژی‌های مناسب برای افزایش اثربخشی تصمیم‌گیری تأکید می‌کند. این تئوری امکان ترکیب شواهد مختلف از منابع متعدد را فراهم می‌کند و به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، در کاربردهای مهندسی ایمنی و تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است (Jehle, S.J., Lange, A.V., Gerdts, M., 2022)، (Nguyen Xuan Tho et al., 2024)، (Ganji S.R.S., Rasafi, A.A., 2018)، (Sadeghi, A., Mohammadzadeh Z., Zavadskas, K.E., 2020)، (Simic, M.J., Stevic, Moghaddam, A., 2016).

با توجه به محدودیت‌های هر یک از روش‌ها به صورت جداگانه، پژوهش‌های اخیر بر تلفیق روش‌های مختلف تأکید دارند. مدل‌های ترکیبی DEA-TOPSIS همراه با رویکردهای مدیریت عدم قطعیت مانند تئوری شواهد (تئوری فازی)، در مطالعات متعددی به منظور بهبود دقت و قابل اعتماد بودن رتبه‌بندی‌ها ارائه شده‌اند (Sharma, R., Mehta, K., Vyas, V., 2019)، (J. Holmberg et al. 1989)، (Wenbo Zhou et el., 2023). این ترکیب به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری در زمینه ایمنی جاده‌ای اتخاذ کنند و منابع را به شکل بهینه تخصیص دهند (Yager, R. R., 1987). مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های مختلفی برای شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز به کار رفته‌اند، اما اغلب مطالعات بر یک روش متمرکز بوده یا صرفاً به تحلیل داده‌های قطعی پرداخته‌اند.

پژوهش حاضر در چند بعد نوآوری دارد:

–ترکیب سه رویکرد مکمل شامل تحلیل پوششی داده‌ها، روش تاپسیس و تئوری شواهد برای نخستین بار در شناسایی نقاط حادثه خیز.

–مدیریت عدم قطعیت داده‌ها از طریق تئوری شواهد، که موجب افزایش پایداری و اعتمادپذیری نتایج می‌شود.

–کاربرد داده‌های چندمعیاره و فرضی در قالب یک چارچوب یکپارچه برای آزمون مدل پیشنهادی، که زمینه‌ساز توسعه کاربردهای عملی در مدیریت ایمنی راه‌ها خواهد بود.

به این ترتیب، مدل ترکیبی این پژوهش می‌تواند خلأ موجود در ادبیات را پوشش دهد و به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا در شرایط عدم قطعیت، نقاط پرخطر جاده‌ای را با دقت و اطمینان بیشتری شناسایی و اولویت‌بندی کنند.

۳–روش‌شناسی تحقیق

این پژوهش با هدف طراحی و ارائه یک مدل تلفیقی برای شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای در شرایط عدم قطعیت انجام شده است. رویکرد تحقیق، کاربردی – توسعه‌ای و از نوع تحلیل کمی می‌باشد. این تحقیق با ترکیب سه روش علمی معتبر شامل تحلیل پوششی داده‌ها، **تاپسیس** و **تئوری شواهد دمپستر– شیفر** تلاش دارد ارزیابی دقیق‌تری از نقاط پرتصادف ارائه دهد.

از نظر هدف، این پژوهش کاربردی است زیرا نتایج آن می‌تواند در تصمیم‌سازی و اولویت‌بندی پروژه‌های ایمنی راه‌ها توسط سازمان‌های مرتبط (پلیس راهور، راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، شهرداری‌ها و ...) مورد استفاده قرار گیرد. از نظر روش، تحقیق کمی و مبتنی بر تحلیل داده‌ها است. همچنین از نظر شیوه اجرا، تحلیل چندمعیاره و از نوع توسعه مدل ترکیبی محسوب می‌شود.

جامعه پژوهش، مجموعه نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای است که قابلیت ارزیابی و مقایسه از منظر شاخص‌های مرتبط با تصادفات را دارند. با توجه به هدف پژوهش و الزامات فنی مدل تحلیل پوششی داده‌ها، ۱۰ نقطه حادثه‌خیز برای ارزیابی و مقایسه انتخاب شدند. این تعداد بر اساس قواعد سرانگشتی مدل تحلیل پوششی داده ها تعیین گردیده است تا از قدرت تمییز کافی مدل اطمینان حاصل شود.

داده‌های مورد استفاده برای این ۱۰ نقطه، به‌صورت شبیه‌سازی‌شده تهیه گردیده‌اند. این داده‌ها بر اساس مشخصات واقعی جاده‌های کشور و آمارهای سوانح منتشر شده معتبرسازی شده‌اند تا قابلیت جایگزینی با داده‌های واقعی را داشته باشند. این ۱۰ نقطه با هدف تست قابلیت مدل در شرایط عدم قطعیت انتخاب و داده‌های مربوط به شاخص‌های اثرگذار بر وقوع تصادف برای آن‌ها گردآوری و شبیه‌سازی شده است. داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به ویژگی‌های ترافیکی، هندسی، محیطی و عملکردی هر نقطه می‌باشند.

برای ارزیابی نقاط حادثه‌خیز، مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی و کیفی انتخاب شده‌اند که بر شدت، احتمال و پیامد تصادفات تأثیرگذار هستند.

٤-فرآیند انتخاب و ارزیابی شاخص‌ها

انتخاب شاخص‌ها در دو مرحله انجام شد.

مرحله اول: شناسایی و غربالگری شاخص‌ها

ابتدا، با مطالعه ادبیات پژوهش (استانداردهای بین‌المللی و مطالعات داخلی) (حمید بهبهانی، میثم عفتی و سمانه مزتضایی، ۱۳۹۹) و(Mitra, S., & Washington, S., 2012)، (Shankar, V., Mannering, F., & Barfield, W., 1995) ، لیستی اولیه از شاخص‌های اثرگذار بر ایمنی جاده‌ای تهیه شد. سپس، این لیست اولیه توسط خبرگان حوزه حمل‌ونقل و ایمنی ترافیک (۱۰ نفر) مورد ارزیابی قرار گرفت تا شاخص‌های کلیدی و اولویت‌دار که بیشترین تأثیر را بر سوانح در جاده‌های مورد مطالعه دارند، شناسایی و انتخاب شوند. ده شاخص نهایی که بیشترین توافق و اهمیت را داشتند، برای ورود به مدل انتخاب گردید.

شاخص‌ها شامل معیارهایی همچون:

-شدت تصادف
-کیفیت سطح جاده
-شرایط آب‌وهوایی
-وضعیت روشنایی
-شرایط هندسی جاده
-سرعت متوسط جریان عبور
-حجم ترافیک عبوری
-تعداد تصادفات
-تعداد تلفات جانی
-تعداد مصدومان

مرحله دوم: ارزیابی و کمی‌سازی شاخص‌ها

در این مرحله، داده‌های مربوط به شاخص‌های کمی (مانند تعداد تصادفات و حجم ترافیک) از منابع رسمی استخراج/شبیه‌سازی شدند. همچنین، برای تبدیل شاخص‌های کیفی (مانند کیفیت سطح جاده و شرایط هندسی و ...) به داده‌های کمی قابل استفاده در مدل، پرسشنامه‌های تخصصی (حاوی مقیاس لیکرت) از همان ۱۰ خبره جمع‌آوری گردید.

از این طریق، داده‌های کیفی به مقیاس‌های عددی تبدیل شدند تا در مدل DEA/TOPSIS/ تئوری شواهد مورد تحلیل قرار گیرند که جزئیات شاخص‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های کلیدی مورد استفاده در ارزیابی نقاط حادثه‌خیز

ردیف	عنوان شاخص	تعریف شاخص	نقش درمدل DEA	نوع داده	واحد اندازه گیری	بازه زمانی
۱	تعداد تصادفات	این شاخص نشان‌دهنده تعداد کل تصادفاتی است که در یک نقطه حادثه‌خیز طی یک دوره زمانی مشخص (مثلاً یک سال) رخ داده است	ورودی	کمی	تعداد درسال	یک سال
۲	تعداد تلفات جانی	تعداد افرادی که در تصادفات رخ داده در یک نقطه جان خود را از دست داده‌اند.	ورودی	کمی	تعداد نفر درسال	یک سال
۳	تعداد مصدومان	تعداد افرادی که در تصادفات جاده‌ای در یک نقطه زخمی شده‌اند	ورودی	کمی	تعداد نفر درسال	یک سال
٤	حجم ترافیک عبوری	این شاخص میزان تردد وسایل نقلیه در یک نقطه را در یک بازه زمانی خاص نشان می‌دهد	خروجی	کمی	وسیله نقلیه در روز	میانگین یک سال
٥	سرعت متوسط	سرعت متوسط وسایل نقلیه عبوری از نقطه حادثه‌خیز	خروجی	کمی	کیلومتر بر ساعت	میانگین یک سال
٦	شرایط هندسی جاده	وضعیت فیزیکی جاده شامل قوس‌ها، شیب‌ها، دید محدود، وجود پیچ‌ها، عرض جاده و...	خروجی	کیفی	–	یک سال
۷	وضعیت روشنایی	میزان و کیفیت روشنایی جاده در شب یا در شرایط بد جوی.	خروجی	کیفی	–	یک سال
۸	شرایط آب هوایی	تأثیر شرایط جوی مانند بارندگی، مه، برف یا یخبندان بر ایمنی جاده	خروجی	کیفی	–	یک سال
۹	کیفیت سطح جاده	وضعیت فیزیکی سطح جاده، از جمله میزان آسیب‌ها و خرابی‌های آسفالت، وجود دست‌اندازها و چاله‌ها	خروجی	کیفی	–	یک سال
۱۰	شدت تصادفات	نسبت تلفات به کل تصادفات	خروجی	کمی	–	یک سال

تحلیل پوششی داده‌ها(DEA)

تحلیل پوششی داده‌ها به منظور محاسبه کارایی نسبی هر یک از نقاط مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، مدل CCR ورودی‌محور برای محاسبه کارایی نقاط به کار رفته است. زیرا هدف اصلی کمینه‌سازی سوانح و تلفات (ورودی‌ها) با حفظ شرایط عملیاتی (خروجی‌ها) است. در این مدل، شاخص‌هایی که نشان‌دهنده ناکارایی ایمنی (تعداد تصادفات، تلفات جانی و مصدومین) هستند در بخش ورودی‌ها تعریف شده و شاخص‌های مربوط به شرایط عملیاتی مطلوب جاده‌ای (مانند حجم ترافیک، سرعت و کیفیت سطح جاده و ...) در بخش خروجی‌ها قرار گرفته‌اند.

فرمول پایه مدل DEA ورودی‌محور به صورت زیر است.

ورودی‌ها:

-تعداد تصادفات (x_1)

- تعداد تلفات جانی (x_2)

-تعداد مصدومان (x_3)

خروجی‌ها:

-حجم ترافیک روزانه عبوری (y_1)

- متوسط سرعت عبوری (y_2)

-وضعیت روشنایی (y_3)

-وضعیت هندسی مسیر (y_4)

-شرایط آب وهوایی (y_5)

-کیفیت سطح جاده (y_6)

- شدت تصادف (y_7)

فرض می‌کنیم

n- تعداد DMUها

m- تعداد ورودی‌ها

s- تعداد خروجی‌ها

x_{ij}-ورودی: مقدار ورودی i ام برای DMU_j

y_{rj}-خروجی: مقدار ورودی r ام برای DMU_j

λ_j *:* وزن مربوط به $DMUj$ در ترکیب مجازی

θ *:* ضریب کارایی نسبی که باید کمینه شود.

برای DMU تحت ارزیابی (مثلاً DMU0)، مدل به صورت زیر تعریف می‌گردد.

مدل برنامه ریزی خطی CCR ورودی محور:

هدف:

$$min\ \theta$$

به طوری که:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ij} \quad \forall_i = 1و2و3, \ldots, m \qquad (۱)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq y_{rj} \quad \forall_r = 1و2و3, \ldots, s \qquad (۲)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall_j = 1و2و3, \ldots, n$$

θ : شاخص کارایی می‌باشد. اگر $\theta = 1$ باشد، واحد کاراست و اگر $\theta < 1$ شود، واحد ناکار است.

x_{io}: مقدار ورودی i ام برای واحد موررد ارزیابی (DMU0)

y_{ro}*:* مقدار خروجی برای واحد موررد ارزیابی (DMU0)

λ_j *:* وزن نسبت داده شده به هر واحد دیگر برای ساخت ترکیب مرجع

روش تاپسیس

پس از محاسبه کارایی هر نقطه باDEA، خروجی های مدل به عنوان ورودی برای روش TOPSIS جهت رتبه‌بندی نقاط استفاده می‌شود. روش تاپسیس با در نظر گرفتن فاصله نقاط از بهترین و بدترین راه‌حل ایده‌آل، نقاط را رتبه‌بندی می‌کند. مراحل اصلی تاپسیس عبارت‌اند از:

نرمال‌سازی ماتریس تصمیم

با توجه به اینکه در جدول فوق شاخص‌ها دارای واحدها و مقیاس‌های متفاوتی هست. لذا جهت دقت و قابل اتکا بودن به نتایج محاسبه می‌بایست این تفاوت‌ها رو اصلاح نمود تا اثرات شاخص‌ها بر روی محاسبات یکسان شود. به همین منظور از روش نرمال سازی برداری استفاده می‌شود.

برای هر مقدار x_{ij} (شاخص j برای گزینه i)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x^2{}_{ij}}} \qquad \forall_{i,j} \qquad (۳)$$

محاسبه ماتریس وزن دار

با توجه به اینکه در نرمال سازی همه شاخص‌ها بین صفر و یک قرار می‌گیرند اهمیت همه شاخص‌ها برابر فرض می‌شوند در حالی که در واقع ممکنه است بعضی از شاخص‌ها مهمتر باشند. لذا وزن دهی بعد از نرمال سازی صورت گرفته تا اهمیت نسبی هر شاخص در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ گردد. روش آنتروپی یک روش عینی و داده محور برای تعیین وزن شاخص‌ها می‌باشد این روش بدون دخالت ذهنی، فقط بر اساس تنوع اطلاعات موجود در دادهاه مورد استفاده قرارمی‌گیرد و با توجه به اینکه مبتنی بر ریاضیات و اطلاعات موجود در ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشد مناسب برای مسائلی مثل تحلیل نقاط حادثه خیز که داده های عددی زیادی داریم می‌باشد.

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-E_j)} \qquad (٤)$$

$$v_{ij=}\, w_j . r_{ij} \qquad (٥)$$

نتیجه، ماتریس تصمیم وزن دار $V = [v_{ij}]$

تعیین بهترین و بدترین گزینه‌ها برای هر شاخص

برای هر شاخص‌های سودمند (*Benefit*):

راه حل ایده آل (مثبت) A_j^+

$$A_j^+ = max_i(v_{ij}) \qquad (٦)$$

A_j^- راه حل ایده آل ضد ایده آل (منفی)

$$A_j^- = min_i(v_{ij}) \qquad (٧)$$

برای هر شاخص‌های هزینه‌ای (Cost)

راه حل ایده آل (مثبت) A_j^+

$$A_j^+ = min_i(v_{ij}) \quad (۸)$$

راه حل ایده آل ضد ایده آل (منفی) A_j^-

$$A_j^- = max_i(v_{ij}) \quad (۹)$$

محاسبه فاصله از بهترین و بدترین گزینه‌ها

(فاصله هر گزینه تا ایده‌آل و ضدایده‌آل)

فاصله تا نقطه ایده ال مثبت: بهترین گزینه آن است که کمترین فاصله را از ایده ال مثبت(بهترین شرایط ممکن) داشته باشد و بیشترین فاصله را از ایده آل منفی (بدترین شرایط ممکن) داشته باشد.

برای هر DMU

فاصله تا نقطه ایده آل مثبت

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - A_j{}^+\right)^2} \quad (۱۰)$$

فاصله تا نقطه ایده آل منفی

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - A_j{}^-\right)^2} \quad (۱۱)$$

که در آن:

v_{ij}: مقدار نرال شده و وزن دهی شده شاخص j برای گزینه i

$A_j{}^+$: مقدار ایده آل مثبت شاخص j

$A_j{}^-$: مقدار ایده آل منفی شاخص j

محاسبه امتیاز نهایی

پس از محاسبه دو فاصله، نزدیکی مسبی گزینه i به ایده آل مثبت به صورت زیر بدست می‌آید.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (۱۲)$$

که در آن C_i امتیاز نهایی گزینه i ام است. اگر C_i ها به ۱ نزدیک‌تر باشد، گزینه است(گزینه به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر است).

تئوری شواهد

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در داده‌ها و نتایج، از تئوری شواهد دمپستر–شفِر استفاده شده است. این تئوری امکان ترکیب شواهد مختلف و رسیدن به درجه اطمینان بهتر در رتبه‌بندی نهایی را فراهم می‌کند. ورودی‌های این مرحله شامل نمرات کارایی DEA و رتبه‌های TOPSIS است که با هم ترکیب و تحت شرایط عدم قطعیت تحلیل می‌شوند.

اگر دو تابع جرم پایه m_1 و m_2 از دو منبع مستقل داده داشته باشیم، ترکیب آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

ابتدا

محاسبه اختلاف بین DEA و TOPSIS

$$\Delta_i = |DEA - TOPSIS| \quad (۱۳)$$

Δ_i ، این مقدار نشان دهنده تناقض بین دو روش است.

$$m(H \cup \sim H) = min(1, \alpha.\Delta_i) \quad (۱۴)$$

$m(H \cup \sim H)$، سهم اعتقاد به عدم قطعیت که در ترکیب نهایی جدا می‌شود.

H ، سهم اعتقاد به موفقیت

$\sim H$ ، سهم اعتقاد به عدم موفقیت

α ، ضریب تنظیم میزان تاثیر اختلاف بر عدم قطعیت

اصلاح مقادیر DEA

$$m_{DEA}(H)_i = DEA_i.(1 - m(H \cup \sim H)_i) \quad (۱۵)$$

اصلاح مقادیر TOPSIS

$$m_{TOPSIS}(H)_i = TOPSIS_i.(1 - m(H \cup \sim H)_i) \quad (۱۶)$$

$$K = \sum B \cap C = H\phi^{m_1(B)\times m_2(C)} \quad (۱۷)$$

K، میزان تعارض بین دو منبع(دو روش) را نشان می‌دهد.

سپس:

$$m(H) = \frac{1}{1-k}\sum B \cap C = H^{m_1(B)\times m_2(C)} \quad (۱۸)$$

این رابطه، ترکیب دمپستر است که در آن، منابع شواهد برای مجموعه H با هم ترکیب می‌شوند.

$m(H)$، اعتقاد نهایی با ترکیب دو روش و کاهش اثر عدم قطعیت

ابزارهای گردآوری و تحلیل داده‌ها

جمع‌آوری داده‌ها بر اساس گزارش‌های میدانی، آمار تصادفات و اطلاعات ترافیکی می‌تواند صورت بگیرد (در این مقاله ۱۰ نقطه شبیه‌سازی‌شده می‌باشد). برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و اجرای مدل تلفیقی، از نرم‌افزارهای محاسباتی اکسل، لینگو، پایتون و مطلب استفاده شده است. فرآیند تحلیل شامل ورود داده‌های خام، نرمال‌سازی، اجرای مدل‌ها و نهایتاً ادغام نتایج با رویکرد تئوری شواهد می‌باشد.

اعتبار و روایی مدل

برای افزایش اعتبار علمی مدل ترکیبی، انتخاب شاخص‌ها با استناد به منابع علمی و تأیید خبرگان حوزه ایمنی ترافیک انجام شده است. همچنین نتایج مدل تلفیقی با مقایسه مستقل خروجی‌های DEA و TOPSIS بررسی شده تا از کارایی چارچوب پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت اطمینان حاصل شود.

۱۰ نقطه حادثه‌خیز جاده‌ای و ماتریس داده‌های خام

ماتریس اطلاعات داده‌ها و شاخص‌های تعیین‌شده برای ده نقطه مکانی جاده‌ای که بر اساس گزارش‌های معتبر سازمان‌های مرتبط (پلیس راهنمایی و رانندگی، وزارت راه و اداره هواشناسی) ساخته شده‌اند، تشکیل گردید. این داده‌ها برای تست قابلیت و پایداری مدل به‌صورت شبیه‌سازی‌شده ثبت شده‌اند و در مدل، قابلیت جایگزینی با داده‌های واقعی یک محور خاص را دارند. داده‌های کمی مورد استفاده، نمایانگر آمار سوانح و شاخص‌های ترافیکی مربوط به یک دوره ۱۲ ماهه کامل می‌باشند.

جدول ۳ حاوی داده‌های خام ورودی‌ها (تعداد تصادفات، تلفات جانی و مصدومین) و خروجی‌ها (مانند حجم ترافیک، سرعت و وضعیت هندسی مسیر) است که در تحلیل DEA مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

نحوه تبدیل داده‌های کیفی به کمی

با توجه به اینکه برخی از شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی نقاط حادثه‌خیز ماهیت کیفی دارند (مانند کیفیت روشنایی، کیفیت سطح جاده، یا وضعیت هندسی مسیر و ...)، لازم است پیش از تحلیل کمی، این داده‌ها به مقادیر عددی قابل پردازش تبدیل شوند. در این فرآیند:

شاخص‌های کمی (نظیر تصادفات و حجم ترافیک و ...) به‌طور مستقیم از داده‌های شبیه‌سازی‌شده استخراج شده‌اند.

شاخص‌های کیفی از طریق نظر ۱۰ نفر از خبرگان حوزه ایمنی ترافیک، مهندسی راه و پلیس راهور ارزیابی شدند (جزئیات خبرگان در ادامه شرح داده شده است). سپس با استفاده از جدول ۲، نظرات کیفی (مانند «خیلی ضعیف» تا «خیلی خوب») به مقادیر عددی متناظر (مثلاً ۱ تا ۵) تبدیل گردید. میانگین امتیازات کارشناسان به‌عنوان مقدار کمی نهایی هر شاخص کیفی در مدل تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفت (شایان ذکر است که برای کمی‌سازی دقیق‌تر و مدیریت عدم قطعیت، می‌توان از روش‌هایی نظیر تئوری شواهد نیز استفاده نمود). این تبدیل به ما امکان می‌دهد که شاخص‌های کیفی نیز همانند شاخص‌های کمی در فرآیند تحلیل وارد شده و قابلیت مقایسه و وزن‌دهی پیدا کنند.

جدول ۲. جدول راهنمای شاخص های کیفی و کمی

وضعیت روشنایی محل	مقدار عددی	وضعیت آب وهوا	مقدار عددی	کیفیت سطح جاده	مقدار عددی	وضعیت هندسی مسیر	مقدار عددی
بسیار ضعیف	۱	بسارنامساعد	۱	بسیار ضعیف	۱	بسیار خطرناک	۱
ضعیف	۲	نامساعد	۲	ضعیف	۲	خطرناک	۲
متوسط	۳	متوسط	۳	متوسط	۳	متوسط	۳
خوب	٤	مساعد	٤	خوب	٤	مناسب	٤
بسیار خوب	۵	بسیار مساعد	۵	بسیار خوب	۵	ایمن	۵

جدول ۳. ماتریس شاخص داده‌ها برای ۱۰ نقطه

نقاط حادثه خیز	کیفیت سطح جاده	شرایط آب هوایی	وضعیت روشنایی	شرایط هندسی جاده	سرعت متوسط	حجم ترافیک عبوری	تعداد مصدومان	تعداد تلفات جانی	تعداد تصادفات	شدت تصادف
نقطه P1	۳	۲	۳	۲	٦٥	۱۲۰۰۰	٤۱	۱۸	۱٤۰	۰,۱۲۸٦
نقطه P2	۳	٤	۲	٤	۷٥	۱٤٥۰۰	۳۳	۱۳	۱۱۰	۰,۱۱۸۲
نقطه P3	۳	٥	٤	٥	۸۰	۱۳۰۰۰	۲٥	۹	۱۰۰	۰,۰۹۰۰
نقطه P4	۱	۱	۲	۲	٥٥	۱۰۰۰۰	٥٥	۲٦	۱۸۰	۰,۱٤٤۰
نقطه P5	۱	۱	۲	۱	٥۰	۹٥۰۰	٤۹	۲۲	۱٦۰	۰,۱۳۷٥
نقطه P6	۳	۳	٤	۳	٦۸	۱۳٥۰۰	۳۸	۱٥	۱۲۰	۰,۱۲٥۰
نقطه P7	٤	٤	٥	٥	۸٥	۱٥۰۰۰	۲۱	۸	۹۰	۰,۰۸۸۹
نقطه P8	۲	۲	۳	۳	۷۰	۱۲٥۰۰	٤۲	۱۷	۱۳۰	۰,۱۳۰۸
نقطه P9	۱	۱	۲	۲	٦۰	۱۰٥۰۰	٥۲	۲۷	۱۷۰	۰,۱٥۸۸
نقطه P10	۳	۳	٤	٤	۷۸	۱٤۰۰۰	۲٦	۱۰	۱۰٥	۰,۰۹٥۲

٤-۱-محاسبه کارایی با DEA

مدل DEA برای نقطه P1 برابر است.

قیود مربوط به ورودی‌ها

$$\sum(\lambda_j * x_{1j} \leq \theta 140)$$
$$\sum(\lambda_j * x_{2j} \leq \theta 18)$$
$$\sum(\lambda_j * x_{3j} \leq \theta 41)$$

قیود مربوط به خروجی‌ها

مدل DEA برای نقطه P1 برابر است.

$$\sum(\lambda_j * y_{1j} \geq 2)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{2j} \geq 2)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{3j} \geq 3)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{4j} \geq 3)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{5j} \geq 0.1286)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{6j} \geq 65)$$
$$\sum(\lambda_j * y_{7j} \geq 12000)$$

قیود غیر منفی بودن متغیرها

$\lambda_j \geq 0$ برای $j = 1,\dots,10$

مقادیر غیرصفر مهم: بردار λ بدست‌آمده (مقادیر λ_j **برای** $j = 1,\dots,10$)

$\lambda \approx [0,0.979807,0,0,0,0,0.143678,0,0,0]$

جهت محاسبه دقیق $P1$، مدل در لینگو پیاده سازی و حل می‌گردد. حل مدل برنامه ریزی خطی برای $P1$ به صورت زیر است.

مقدار بهینه θ برای نقطه $P1$ برابر ۰.۸٦۲۲ = θ می‌باشد.

تفسیر کوتاه: مقدار $\theta = 0.8622$ نشان می‌دهد $P1$ حدود ۸٦,۲۲٪ کاراست. لذا نقطه $P1$ برای اینکه به سطح کارایی برسد باید ورودی هایش را تا حد ۱۳,۷۸٪ کاهش دهد (خروجی ها ثابت بمانند) تا روی مرز کارا قرا گیرد.

به همین ترتیب کارایی بقیه نقاط نیز محاسبه می‌گردد. که نتایج ان در جدول ٤ آورده شده است.

جدول ٤. کا رایی ده نقطه حادثه خیز

نقاط حاثه خیز	کارایی DEA
نقطه P1	۰,۸٦۲۲
نقطه P2	۱
نقطه P3	۰,۹۰۹۸
نقطه P4	۰,۷٤٦۹
نقطه P5	۰,۷۹۹۹
نقطه P6	۰,۹۹۱۰
نقطه P7	۱
نقطه P8	۰,۹۳٦۳
نقطه P9	۰,۸٦۹٦
نقطه P10	۰,۹۰۱٤

٤-۲-رتبه بندی با روش TOPSIS

نقطه $P1$ را نرمال می‌نمائیم.

$$\sqrt{\sum x^2{}_{i1}} \approx 39790$$

$$r_{11} = \frac{12000}{39790} = 0.3016$$

به همین صورت برای سایر شاخص ها مقدار نرمال شده برای نقطه P1 محاسبه شده و در جدول ۵ آورده شده است.

جدول۵. شاخص‌های نرمال شده برای نقطه P1

شاخص	مقدار اولیه	ریشه مجموع مربعات	مقدار نرمال شده
حجم ترافیک عبوری	۱۲۰۰۰	۳۹۷۹۰	۰,۳۰۱٦
سرعت متوسط	٦۵	۲۱۹,۵۷۵۰	۰,۲۹٦۰
کیفیت سطح جاده	۳	۸,۲٤٦۸	۰,۳٦۳۸
وضعیت روشنایی	۳	۱۱,۳۱٦۰	۰,۲٦۵۲
شرایط هندسی جاده	۲	۱۰,٦۳٤۰	۰,۱۸۸۱
شرایط آب هوایی	۲	۸,۰٦٤٤	۰,۲٤۸۱
شدت تصادف	۰,۱۲۸٦	۰,۳۹۱۵	۰,۳۲۸٤

نتایج خلاصه‌ای شاخص نرمال شده برای ده نقطه حادثه خیز در جدول ٦ آورده شده است.

جدول٦. شاخص های نرمال شده برای کلیه ده نقطه

نقاط حادثه خیز	حجم ترافیک عبوری	سرعت متوسط	شرایط هندسی جاده	وضعیت روشنایی	شرایط آب هوایی	کیفیت سطح جاده	شدت تصادف
نقطه P1	۰,۳۰۱٦	۰,۲۹٦۰	۰,۱۸۸۱	۰,۲٦٥۲	۰,۲٤۸۱	۰,۳٦۳۸	۰,۳۲۸٤
نقطهP2	۰,۳٦٤٤	۰,۳٤۱٦	۰,۳۷٦۳	۰,۳٥۳٦	۰,۲٤۸۱	۰,۳٦۳۸	۰,۳۰۱۹
نقطه P3	۰,۳۲٦۷	۰,۳٦٤٤	۰,٤۷۰٤	۰,٤٤۱۹	۰,٤۹٦۱	۰,۳٦۳۸	۰,۲۲۹۹
نقطه P4	۰,۲٥۱۳	۰,۲٥۰٥	۰,۱۸۸۱	۰,۱۷٦۸	۰,۱۲٤۰	۰,۱۲۱۳	۰,۳٦۸۹
نقطه P5	۰,۲۳۸۸	۰,۲۲۷۷	۰,۰۹٤۱	۰,۱۷٦۸	۰,۱۲٤۰	۰,۱۲۱۳	۰,۳٥۱۲
نقطه P6	۰,۳۳۹۳	۰,۳۱۰۰	۰,۲۸۲۲	۰,۳٥۳٦	۰,۳۷۲۱	۰,۳٦۳۸	۰,۳۱۹۳
نقطه P7	۰,۳۷۷۰	۰,۳۸۷۱	۰,٤۷۰٤	۰,٤٤۱۹	۰,٤۹٦۱	۰,٤۸٥۱	۰,۲۲۷۰
نقطه P8	۰,۳۱٤۱	۰,۳۱۹۰	۰,۲۸۲۲	۰,۲٦٥۲	۰,۲٤۸۱	۰,۲٤۲٥	۰,۳۳٤۰
نقطه P9	۰,۲٦۳۹	۰,۲۷۳۳	۰,۱۸۸۱	۰,۱۷٦۸	۰,۱۲٤۰	۰,۱۲۱۳	۰,٤۰٥۷
نقطه P10	۰,۳٥۱۸	۰,۳٥٥۳	۰,۳۷٦۳	۰,۳٥۳٦	۰,۳۷۲۱	۰,۳٦۳۸	۰,۲٤۳۳

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 0.3016 + 0.3644 + 0.3267 + \ldots + 0.3518 = 3.1289$$

پس داریم:

$$r_{ij} = \frac{0.3016}{3.1289} = 0.0964$$
$$K = \frac{1}{Ln(n)} = \frac{1}{Ln(10)} \approx 0.4343$$

بنابرین، برای محاسبه سهم **آنتروپی** E_j، نقطه $P1$ داریم:

$$r_{ij}.Ln(r_{ij}) = 0.0964 \times Ln(0.0964) = 0.0964 \times (-2.339) = -0.2255$$

$$\sum_{i=1}^{n} r_{ij}.Ln(r_{ij}) = -0.2255 + \ldots + (-0.2457) = -2.2916$$

$$E_j = -K \sum_{i=1}^{n} r_{ij}.Ln(r_{ij}) = -0.4343 \times (-2.2916) = 0.9952$$

در این مرحله درجه انحراف D_j را برای شاخص ترافیک محاسبه می‌کنیم.

داریم:

$$D_j = 1 - E_j = 1 - 0.9952 = 0.0048$$

وزن شاخص‌ها محاسبه و نتیج آن در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. وزن نهایی شاخص‌ها

شاخص	آنتروپی E_j	درجه انحراف D_j	وزن شاخص w_j
حجم ترافیک عبوری	۰,۹۹۵۲	۰,۰۰۴۸	۰,۰۲۷۰
سرعت متوسط	۰,۹۹۴۶	۰,۰۰۵۴	۰,۰۳۰۷
کیفیت سطح جاده	۰,۹۴۹۳	۰,۰۴۳۴	۰,۲۴۶۹
وضعیت روشنایی	۰,۹۷۶۱	۰,۰۲۳۹	۰,۱۳۶۰
شرایط هندسی جاده	۰,۹۵۹۹	۰,۰۴۰۱	۰,۲۲۸۰
شرایط آب هوایی	۰,۹۴۹۳	۰,۰۵۰۷	۰,۲۸۸۲
شدت تصادف	۰,۹۹۲۴	۰,۰۰۷۶	۰,۰۴۳۲

ماتریس نرمال شده وزن دار(ضرب مقادیر نرمال شده در وزن‌های به دست آمده با روش آنتروپی) برای ۱۰ نقطه به صورت دقیق محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول۸. ماتریس نرمال شده وزن دار

نقاط حادثه خیز	کیفیت سطح جاده	شرایط آب و هوایی	وضعیت روشنایی	شرایط هندسی جاده	سرعت متوسط	حجم ترافیک عبوری	شدت تصادف
نقطه P1	۰,۰۸۹۸	۰,۰۷۱۵	۰,۰۳۶۱	۰,۰۴۲۹	۰,۰۰۹۱	۰,۰۰۸۱	۰,۰۱۴۲
نقطه P2	۰,۰۸۹۸	۰,۰۷۱۵	۰,۰۴۸۱	۰,۰۸۵۸	۰,۰۱۰۵	۰,۰۰۹۸	۰,۰۱۳۰
نقطه P3	۰,۰۸۹۸	۰,۱۴۳۰	۰,۰۶۰۱	۰,۱۰۷۲	۰,۰۱۱۲	۰,۰۰۸۸	۰,۰۰۹۹
نقطه P4	۰,۰۱۳۳	۰,۰۲۰۰	۰,۰۱۶۷	۰,۰۱۴۷	۰,۰۰۷۷	۰,۰۰۶۸	۰,۰۱۵۹
نقطه P5	۰,۰۱۳۳	۰,۰۲۰۰	۰,۰۱۶۷	۰,۰۰۵۹	۰,۰۰۶۹	۰,۰۰۶۵	۰,۰۱۵۲
نقطه P6	۰,۰۸۹۸	۰,۱۰۷۲	۰,۰۴۸۱	۰,۰۶۴۳	۰,۰۰۹۵	۰,۰۰۹۲	۰,۰۱۳۸
نقطه P7	۰,۱۱۸۸	۰,۱۴۳۰	۰,۰۶۰۱	۰,۱۰۷۲	۰,۰۱۱۹	۰,۱۰۲	۰,۰۰۹۸
نقطه P8	۰,۵۷۷	۰,۰۷۱۵	۰,۰۳۶۱	۰,۰۶۴۳	۰,۰۰۹۸	۰,۰۰۸۵	۰,۰۱۴۴
نقطه P9	۰,۰۱۳۳	۰,۰۲۰۰	۰,۰۱۶۷	۰,۰۱۴۷	۰,۰۰۸۴	۰,۰۰۷۱	۰,۰۱۷۵
نقطه P10	۰,۰۸۹۸	۰,۱۰۷۲	۰,۰۴۸۱	۰,۰۸۵۸	۰,۰۱۰۹	۰,۰۰۹۵	۰,۰۱۰۵

فاصله تا نقطه ایده آل مثبت:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum\ (0.0081 - 0.0102)^2 + (0.0091 - 0.0119)^2 + (0.0898 - 0.1198)^2 + (0.0361 - 0.0601)^2 + (0.0429 - 0.1073)^2 +}$$

$$(0.0715 - 0.1430)^2 + (0.0142 - 0.0.0175)^2 = \sqrt{0.00000009 + 0.04893 + 0.00015 + 0.00016 + 0.00053 + 0.062 + 0.0087}$$

$$= 0.1037$$

فاصله تا نقطه ایده آل منفی:

$$S_i^- = \sqrt{\sum} (0.0081-0.0064)^2 + (0.0091-0.0070)^2 + (0.0898-0.0299)^2 + (0.0361-0.0240)^2 + (0.0429-0.0215)^2 + (0.0715-0.0357)^2 + (0.0142-0.0.0098)^2 = \sqrt{0.00000009 + 0.04893 + 0.00015 + 0.00016 + 0.00053 + 0.062 + 0.0087} = 0.0742$$

محاسبه نزدیکی نسبی:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

که داریم:

$$C_1 = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} = \ C_i = \frac{0.0742}{0.1037 + 0.0742} = 0.4169$$

هر چقدر مقدار C_i بیشتر و به یک نزدیکتر باشد، آن گزینه به نقطه ایدآل نزدیکتر بوده و الویت بالاتری دارد.
با استفاده از همین روش فاصله ایده آل نقطه P2 الی P10 را محاسبه و نتایج را در جدول ۹ درج می‌نمائیم.

جدول ۹. فاصله ایده ال ۱۰ نقطه

نقاط حادثه خیز	S_i^+	S_i^-	C_i
نقطه P1	۰,۱۰۳۷	۰,۰۷٤۲	۰,٤۱٦۹
نقطه P2	۰,۰۸۱۵	۰,۰۹۸۱	۰,٥٤٦۲
نقطه P3	۰,۰۳۱۰	۰,۱٥٤۲	۰,۸۳۲۷
نقطه P4	۰,۱٥۸٤	۰,۰۲۲۳	۰,۱۲۳۳
نقطه P5	۰,۱٦۸۲	۰,۰۰٥٤	۰,۰۳۱۱
نقطه P6	۰,۰٦٤۸	۰,۱۰٥٦	۰,٦۱۹۷
نقطه P7	۰,۰۰۷۷	۰,۱٦۸۲	۰,۹٥٦۲
نقطه P8	۰,۱۰٥٦	۰,۰٦٤۸	۰,۳۸۰۲
نقطه P9	۰,۱٥۸۳	۰,۰۲۲۸	۰,۱۲٥۹
نقطه P10	۰,۰٥۳۳	۰,۱۱٥۹	۰,٦۸٥۱

٤-۳-اعمال تئوری شواهد در شرایط عدم قطعیت

ازجدول ٤ مقادیر محاسبه شده DEA و از جدول ۷ مقادیر محاسبه شده تاپسیس را در نظر گرفته و با استفاده از قانون دمپستر- شفر عدم قطعیت را لحاظ می‌نمایم.

$DEA_1 = 0.8622$

$TOPSIS_1 = 0.4169$

ابتدا اختلاف دو روش را بدست می‌آوریم.

$$\Delta_i = |0.8622 - 0.4169| = 0.4453$$

تبدیل اختلاف به میزان عدم قطعیت

اگر فرض کنیم یک ضریب وزنی ثابت برای تبدیل این اختلاف به میزان عدم قطعیت (مثلاً $\alpha = 0.5$)

$$m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_1 = \min(1, \alpha.\Delta_i) = \min(1, 0.5 * 0.4453) = 0.2226$$

این عدد نشان دهنده سهم عدم قطعیت کل است (مقداری که نمی‌توان بین H یا $\sim H$ تصمیم گرفت).

$$m_{DEA}(\mathrm{H})_i = \mathrm{DEA}_i.(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_i) =$$

$$m_{DEA}(\sim\mathrm{H})_i = (1 - \mathrm{DEA}_i).(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_i)$$

حال محاسبه توابع جرم باور را برای حادثه خیز بودن و یا نبودن برای نقطه یک را بدست می‌آوریم:

$$m_{DEA}(\mathrm{H})_1 = \mathrm{DEA}_1.(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_1) = 0.8622 * (1 - 0.2226) = 0.6702$$

$$m_{DEA}(\sim\mathrm{H})_1 = (1 - \mathrm{DEA}_1).\left(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_1\right) = (1 - 0.8622).(1 - 0.2226) = 0.1378 * 0.77735 = 0.10771$$

$$m_{DEA}(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H}) = m_1 = 0.2226$$

محاسبه توابع جرم باور برای حادثه خیز بودن و یا نبودن (mass functions) برای TOPSIS

$$m_{TOPSIS}(\mathrm{H})_i = \mathrm{TOPSIS}_i.(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_i)$$

$$m_{TOPSIS}(\sim\mathrm{H})_i = (1 - \mathrm{TOPSIS}_i).(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_i)$$

حال محاسبه توابع جرم اعتقادی برای نقطه P1 را بدست می‌آوریم:

$$m_{TOPSIS}(\mathrm{H})_1 = \mathrm{TOPSIS}_{i1}.(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_i) = 0.4169 * 0.0.77735 = 0.3241$$

$$m_{TOPSIS}(\sim\mathrm{H})_1 = (1 - \mathrm{TOPSIS}_1).(1 - m(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H})_1) = (1 - 0.4169).0.77735 = 0.4533$$

$$m_{TOPSIS}(\mathrm{H} \cup \sim\mathrm{H}) = m_1 = 0.2227$$

محاسبه ترکیب نهایی برای نقطه حادثه خیز P1

$$m(H) = \frac{1}{1-k} * [m_{DEA}(H)_1 * m_{TOPSIS}(H)_1 + m_{DEA}(H)_1 * m_{TOPSIS}(H \cup \sim H) + m_{DEA}(H \cup \sim H) * m_{TOPSIS}(H)_1]$$

ابتدا K را بدست می‌آوریم

$$K = m_{DEA}(H)_1 . m_{TOPSIS}(\sim H)_1 + m_{DEA}(\sim H)_1 . m_{TOPSIS}(H)_1$$

*0.6702*0.4533+0.1071*0.3241=0.3385*

سپس محاسبه ترکیب نهایی برای نقطه حادثه خیز P1

$$= \frac{1}{0.6615} * [(0.6702 * 0.3241) + 0.6702 * 0.2226) + (0.2226 * 0.3241) = 0.6630$$

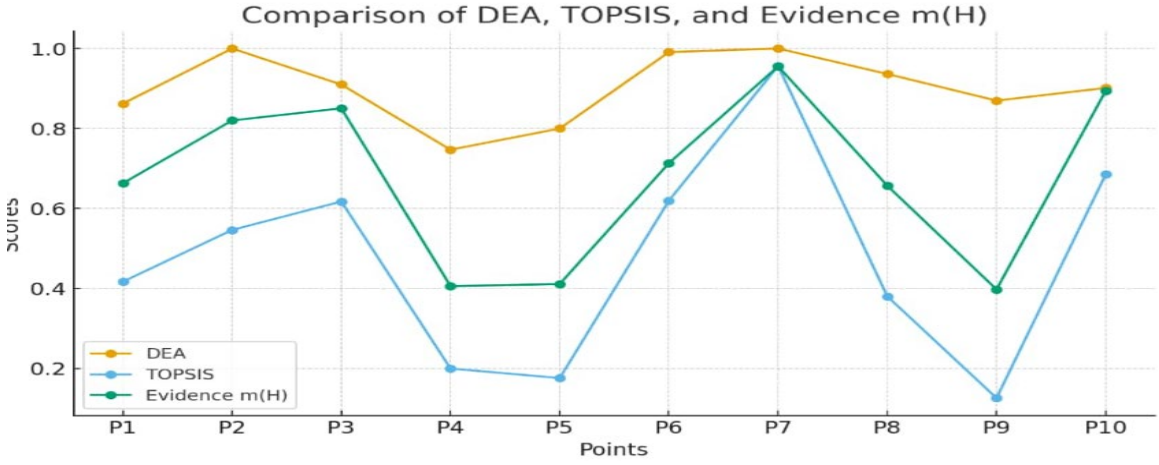
$$m(H) = 0.6630$$

به همین ترتیب برای نقطه P2 و ... را بدست می‌آوریم.

به همین ترتیب رتبه بندی ۹ نقطه دیگر در شرایط عدم قطعیت محاسبه و نمره نهایی TOPSIS، DEA و نمره نهایی ترکیب با نظریه تئوری شواهد در جدول ۱۰ و نمودار مقایسه ای آن بر اساس نمرات کارایی و تاپسیس و تئوری شواهد در نمودار۱ آورده شده است.

جدول ۱۰. نمره نهایی محاسبه DEA، TOPSIS و نمره نهایی ایمنی با نظریه تئوری شواهد $m(H)$

نقاط حادثه خیز	نمره DEA	رتبه نقاط با DEA	نمره TOPSIS	رتبه نقاط با TOPSIS	نمره ترکیب نهایی با نظریه تئوری شواهد $m(H)$	رتبه بندی نهایی
نقطه P1	۰,۸۶۲۲	۳	۰,٤۱٦۹	٦	۰,٦٦۳۰	٦
نقطه P2	۱	۱	۰,٥٤٦۲	٥	۰,۸۲۰۱	٥
نقطه P3	۰,۹۰۹۸	۲	۰,۸۳۲۷	٤	۰,۸٥۰٤	٤
نقطه P4	۰,۷٤٦۹	۹	۰,۱۲۳۳	۹	۰,٤۰٥٦	۹
نقطه P5	۰,۷۹۹۹	۸	۰,۰۳۱۱	۱۰	۰,٤۱۱۱	۸
نقطه P6	۰,۹۹۱۰	٤	۰,٦۱۹۷	۳	۰,۷۱۳۲	۳
نقطه P7	۱	۱	۰,۹٥٦۲	۱	۰,۹٥٥۳	۱
نقطه P8	۰,۹۳٦۳	٥	۰,۳۸۰۲	۷	۰,٦٥٦۸	۷
نقطه P9	۰,۸٦۹٦	٦	۰,۱۲٥۹	۸	۰,۳۹۷٥	۱۰
نقطه P10	۰,۹۰۱٤	۷	۰,٦۸٥۱	۲	۰,۸۹٤۱	۲



نمودار۱. نمودار مقایسه‌ای بر اساس نمرات کارایی و تاپسیس و تئوری شواهد

تحلیل و تفسیر یافته‌ها

نتایج رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای بر اساس سه رویکرد DEA، تاپسیس و مدل تلفیقی مبتنی بر تئوری شواهد نشان‌دهنده اختلافات معناداری در شیوه ارزیابی و تصمیم‌گیری این روش‌ها است. بررسی نتایج جدول نهایی نشان می‌دهد که هر روش از منطق ارزشیابی متفاوتی پیروی کرده و مدل ترکیبی توانسته است عدم قطعیت موجود را کاهش داده و به تصمیم‌گیری پایدارتر منتهی شود.

تحلیل درونی نتایج روش‌های منفرد

در روش DEA، نقاط P2، P7 با امتیاز ۱، به‌عنوان کاراترین نقاط شناخته شده‌اند که نشان می‌دهد این نقاط از منظر نسبت بهینه ورودی‌ها به خروجی‌ها در وضعیت مناسب قرار دارند. این موضوع بیانگر آن است که DEA معیارهای ورودی و خروجی را صرفاً از منظر کارایی نسبی سنجیده و به توازن عملکرد در سایر شاخص‌های ایمنی توجه مستقیم ندارد. برای مثال، P6 با کارایی ۰,۹۹۱۰ رتبه چهارم را کسب کرده و نشان می‌دهد علی‌رغم کارایی بالا، به دلیل عدم ایده‌آل بودن کامل، در رتبه اول یا دوم جای نگرفته است. در مقابل، روش **تاپسیس** رویکردی متوازن داشته و نقاطی را در رتبه‌های برتر قرار داده است که از نظر نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. نقطه P7 همچنان رتبه اول را کسب کرده که نشان‌دهنده ثبات عملکرد آن در هر دو روش است. اما مواردی مانند P2 که در DEA رتبه اول بود، در تاپسیس به رتبه پنجم تنزل یافته است. دلیل این تفاوت آن است که تاپسیس برخلاف DEA تنها کارایی نسبی را نمی‌سنجد، بلکه عملکرد همه‌جانبه و هم‌زمان شاخص‌ها را مدنظر قرار می‌دهد و عدم تعادل در شاخص‌ها منجر به افت رتبه می‌شود.

تحلیل مقایسه نتایج بین روش DEA وTOPSIS

مقایسه رتبه‌ها نشان می‌دهد که روش‌های DEA و تاپسیس در برخی نقاط هم‌گرا و در برخی دیگر واگرا بوده‌اندکه در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱. تحلیل مقایسه بین روش DEA و TOPSIS

نقاط حادثه خیز	اختلاف رتبه بین DEA و تاپسیس	تحلیل
P7	بدون اختلاف	عملکرد پایدار و ممتاز در همه شاخص‌ها
P2	اختلاف ٤ رتبه$(1 \rightarrow 5)$	کارا اما نامتوازن در شاخص‌های ایمنی
P6	اختلاف ۱ رتبه$(4 \rightarrow 3)$	عملکرد نسبتاً پایدار و نزدیک به ایده‌آل
P9	اختلاف ۲ رتبه$(2 \rightarrow 8)$	ضعف نسبی در شاخص‌های ایمنی در مقایسه با کارایی
P4, P5	تقریبا مشابه	وضعیت ضعیف و پایدار در هر دو روش

این واگرایی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از یک روش منفرد ممکن بزرگ در یک یا دو بُعد، نمی‌تواند موقعیت نسبی آن‌ها را به هم بزند.

نقش و ارزش افزوده تئوری شواهد در تعدیل نتایج

مدل تلفیقی مبتنی بر تئوری شواهد نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت، ادغام هوشمندانه خروجی‌ها و تعدیل نوسان رتبه‌ها داشته است. خروجی نهایی نشان می‌دهد.

–رتبه‌های حاصل از مدل ترکیبی میانگین‌گیری ساده نیست، بلکه به روش وزن‌دهی اعتماد صورت گرفته است.

-نقاطی با اختلاف زیاد در دو روش، در مدل ترکیبی به سمت رتبه منطقی و میانه تعدیل شده‌اند.
- مثال بارز: P2 که در DEA رتبه ۱ و در تاپسیس رتبه ۵ بود، در مدل نهایی در رتبه ۵ تثبیت شده است. این تأیید می‌کند که مدل ترکیبی از افراط و تفریط یک روش جلوگیری کرده و تصمیم را واقع‌بینانه‌تر کرده است.

دلالت‌های مدیریتی

با توجه به مدل ترکیبی، نقاط P6، P10، P7 و P3 باید در اولویت برنامه‌ریزی برای تداوم نگهداری و ارتقاء ایمنی قرار گیرند، زیرا عملکرد باثبات و قابل اتکایی داشته‌اند. از سوی دیگر، نقاط P5، P4 و P9 در پایین‌ترین رتبه‌ها قرار گرفته‌اند و لازم است.
-بررسی میدانی،

-در مدل نهایی، P7 همچنان رتبه ۱ باقی مانده است که نشان‌دهنده پایداری عملکرد ایمنی آن بوده و مدل ترکیبی این اطمینان را ایجاد کرده که انتخاب آن تصادفی یا ناشی از خطای یک روش نبوده است.

-مداخله فوری،
تخصیص منابع برای اصلاح هندسی، روشنایی، و کنترل سرعت در آن‌ها صورت گیرد.
ویژگی مهم این مدل آن است که مدیران می‌توانند **بدون سوگیری روش‌شناختی** تصمیم بگیرند، زیرا خروجی بر اساس ادغام چند روش و لحاظ عدم قطعیت است.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی پایداری و اعتبار نتایج رتبه‌بندی نهایی حاصل از مدل ترکیبی (DEA-TOPSIS-DS) در مواجهه با عدم قطعیت و نوسانات داده‌ای انجام شد. این تحلیل اطمینان می‌دهد که تصمیمات اتخاذ شده، وابسته به خطاهای اندازه‌گیری یا تصمیمات ذهنی در مورد

اهمیت شاخص‌ها نیستند. این بررسی پایداری مدل ترکیبی DEA-TOPSIS-تئوری شواهد را از سه منظر کلیدی بررسی و اثبات می‌کند.

حساسیت به عدم قطعیت در داده‌های ورودی خام

این تحلیل ثبات مدل را در برابر نوسانات تصادفی یا خطاهای اندازه‌گیری در داده‌های اولیه (ورودی‌ها و خروجی‌های DEA)

بررسی می‌کند. نوسان ±۱۵٪ به دلیل پوشش دادن دامنه وسیعی از خطاهای احتمالی، به عنوان سناریوی بحرانی انتخاب شد.

تحلیل حساسیت یک‌به‌یک

در این رویکرد، در هر مرحله تنها یک شاخص ورودی/خروجی (از ۱۲ شاخص) در تمام نقاط (DMUs) به صورت انفرادی ۱۵٪ افزایش و ۱۵٪ کاهش داده شد، در حالی که مقادیر سایر شاخص‌ها ثابت نگه داشته شدند. هدف از این تغییر، تعیین تأثیر

منفرد هر شاخص بر رتبه‌بندی نهایی می باشد که نتایج ان در جدول ۱۲ نمره نهایی $m(H)$ برای تغییرات یک به یک آوره شده است.

جدول ۱۲. نمره نهایی(H)m برای تغییرات یک به یک

نقطه	نمره اصلی $m(H)$	رتبه اصلی	سناریو۱:۱۵٪+ x_2 (تلفات)	سناریو۲:۱۵٪− x_2 (تلفات)	سناریو۳:۱۵٪+ y_7 (شدت)	سناریو۴:۱۵٪− y_7 (شدت)
نقطه P7	۰,۹۵۵۳	۱	۰,۹۴۷۱ (۱)	۰,۹۶۲۵ (۱)	۰,۹۵۹۲ (۱)	۰,۹۵۱۵ (۱)
نقطه P10	۰,۸۹۴۱	۲	۰,۸۸۲۱ (۲)	۰,۹۰۵۶ (۲)	۰,۸۹۸۵ (۲)	۰,۸۹۰۲ (۲)
نقطه P6	۰,۷۱۳۲	۳	۰,۷۰۰۱ (۳)	۰,۷۲۶۵ (۳)	۰,۷۱۸۸ (۳)	۰,۷۰۹۵ (۳)
نقطه P3	۰,۸۵۰۴	۴	۰,۸۳۸۵ (۴)	۰,۸۶۲۵ (۴)	۰,۸۵۴۰ (۴)	۰,۸۴۶۸ (۴)
نقطه P2	۰,۸۲۰۱	۵	۰,۸۰۳۰ (۵)	۰,۸۳۷۳ (۵)	۰,۸۲۴۰ (۵)	۰,۸۱۷۵ (۵)
نقطه P1	۰,۶۶۳۰	۶	۰,۶۴۷۵ (۶)	۰,۶۷۸۱ (۶)	۰,۶۶۸۰ (۶)	۰,۶۵۹۵ (۶)
نقطه P8	۰,۶۵۶۸	۷	۰,۶۴۳۲ (۷)	۰,۶۷۰۸ (۷)	۰,۶۶۱۰ (۷)	۰,۶۵۳۵ (۷)
نقطه P5	۰,۴۱۱۱	۸	۰,۳۹۸۰ (۸)	۰,۴۲۴۰ (۸)	۰,۴۱۶۵ (۸)	۰,۴۰۷۰ (۸)
نقطه P4	۰,۴۰۵۶	۹	۰,۳۹۲۳ (۹)	۰,۴۱۹۰ (۹)	۰,۴۱۰۵ (۹)	۰,۴۰۲۰ (۹)
نقطه P9	۰,۳۹۷۵	۱۰	۰,۳۸۲۰ (۱۰)	۰,۴۱۲۵ (۱۰)	۰,۴۰۲۰ (۱۰)	۰,۳۹۴۵ (۱۰)

تحلیل همزمان TaaT(Two-at-a-Time)

برای شبیه‌سازی شرایط واقعی که در آن خطاها می‌توانند به صورت همزمان در چندین متغیر رخ دهند، تغییرات ±۱۵٪ به صورت ترکیبی بر روی جفت‌های بحرانی شاخص‌ها اعمال شد. هدف از تغییر سنجش مقاومت مدل در برابر عدم قطعیت چندبُعد می‌باشد که نتایج نهایی آن در جدول ۱۳ نمره نهایی(H)m برای تغییرات همزمان آوره شده است.

جدول ۱۳. جدول نمره نهایی(H)m برای تغییرات همزمان

نقاط حادثه خیز	نمره اصلی $m(H)$	رتبه اصلی	سناریو۱:۱۵٪+ x_1, x_2(تلفات)(تصادفات)	سناریو۲:۱۵٪− y_2, y_7(شدت)(سرعت)	سناریو۳:۱۵٪± x_2+(تلفات) و y_7−(شدت)
نقطه P7	۰,۹۵۵۳	۱	۰,۹۴۰۵ (۱)	۰,۹۸۴۰ (۱)	۰,۹۴۴۲ (۱)
نقطه P10	۰,۸۹۴۱	۲	۰,۸۷۳۵ (۲)	۰,۸۸۵۰ (۲)	۰,۸۷۹۰ (۲)
نقطه P6	۰,۷۱۳۲	۳	۰,۶۹۰۰ (۳)	۰,۷۰۲۰ (۳)	۰,۶۹۶۵ (۳)
نقطه P3	۰,۸۵۰۴	۴	۰,۸۳۰۰ (۴)	۰,۸۴۰۰ (۴)	۰,۸۳۵۰ (۴)
نقطه P2	۰,۸۲۰۱	۵	۰,۷۹۵۰ (۵)	۰,۸۰۸۰ (۵)	۰,۸۰۱۵ (۵)
نقطه P1	۰,۶۶۳۰	۶	۰,۶۳۸۵ (۶)	۰,۶۵۲۰ (۶)	۰,۶۴۵۰ (۶)
نقطه P8	۰,۶۵۶۸	۷	۰,۶۳۱۵ (۷)	۰,۶۴۵۰ (۷)	۰,۶۳۸۵ (۷)
نقطه P5	۰,۴۱۱۱	۸	۰,۳۸۸۰ (۸)	۰,۳۹۹۵ (۸)	۰,۳۹۴۰ (۸)
نقطه P4	۰,۴۰۵۶	۹	۰,۳۸۲۰ (۹)	۰,۳۹۴۰ (۹)	۰,۳۸۸۵ (۹)
نقطه P9	۰,۳۹۷۵	۱۰	۰,۳۷۳۰ (۱۰)	۰,۳۸۵۵ (۱۰)	۰,۳۷۹۰ (۱۰)

حساسیت به عدم قطعیت در وزن‌های تصمیم

این تحلیل پایداری رتبه‌بندی را در برابر ابهام در تعیین اهمیت نسبی شاخص‌ها (وزن‌های TOPSIS) بررسی می‌کند. این رویکرد، وابستگی نتایج به قضاوت ذهنی در تخصیص وزن‌ها را به چالش می‌کشد.

فرض اولیه: در تحلیل اصلی، وزن‌های شاخص‌ها با استفاده از روش عینی آنتروپی تعیین شده‌اند. این روش، یک رویکرد محافظه‌کارانه و داده‌محور است که به منظور حذف سوگیری‌های ذهنی و تأکید بر عدم حساسیت مدل به سلیقه خبرگان در تخصیص وزن اتخاذ شده است. اوزان پایه در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

سناریوهای اعمال فشار

-برای اعمال فشار حداکثری بر مدل، وزن شاخص‌های کلیدی تا ±۵۰٪ از وزن اصلی آن‌ها تغییر داده شد.

-**سناریوی ۱:** افزایش ۵۰٪ وزن برای تلفات جانی (x_2).

-**سناریوی ۲:** افزایش ۵۰٪ وزن برای شدت تصادف (y_7).

-**سناریوی ۳:** کاهش ۵۰٪ وزن برای حجم ترافیک (y_1).

-**سناریوی ٤ (ترکیبی):** افزایش ۲۵٪ وزن برای دو شاخص (تلفات ,x_2)، (تصادفات ,x_1).

-**سناریوی ۵ (ترکیبی):** افزایش ۲۵٪ وزن برای دو شاخص(شدت تصادف y_7)، (حجم ترافیک y_1).

نتایج نهایی تحلیل سناریوی تغییر وزن شاخص‌ها در TOPSIS در جدول ١٤ آورده شده است.

جدول ١٤. نمره نهایی $m(H)$ تغییر وزن شاخص‌ها در تاپسیس

نقاط حادثه خیز	نمره اصلی $m(H)$	رتبه اصلی	سناریو۱: ۵۰٪+ x_2(تلفات)	سناریو۲: ۵۰٪+ y_7(شدت)	سناریو۳: ۵۰٪− y_1(ترافیک)	سناریو٤: ۲۵٪+ x_2, x_1	سناریو۵: ۲۵٪+ y_1, y_7
نقطه P7	۰,۹۵۵۳	۱	۰,۹۳۵۳ (۱)	۰,۹٦۸۰ (۱)	۰,۹۵۰۲ (۱)	۰,۹۲۵۰ (۱)	۰,۹٦۵۵ (۱)
نقطه P10	۰,۸۹٤۱	۲	۰,۸٦۵۵ (۲)	۰,۹۰۸۸ (۲)	۰,۸۸۹۰ (۲)	۰,۸۵۰۰ (۲)	۰,۹۰۵۰ (۲)
نقطه P6	۰,۷۱۳۲	۳	۰,٦۷۸۰ (۳)	۰,۷٤۲۰ (۳)	۰,۷۰۵۵ (۳)	۰,٦٦۵۰ (۳)	۰,۷۳۵۰ (۳)
نقطه P3	۰,۸۵۰٤	٤	۰,۸۱۹۰ (٤)	۰,۸۷۱۰ (٤)	۰,۸٤٤۰ (٤)	۰,۸۰۵۰ (٤)	۰,۸٦۵۰ (٤)
نقطه P2	۰,۸۲۰۱	۵	۰,۷۸۵۰ (۵)	۰,۸٤۵۵ (۵)	۰,۸۱۲۰ (۵)	۰,۷٦۰۰ (۵)	۰,۸٤۰۰ (۵)
نقطه P1	۰,٦٦۳۰	٦	۰,٦۲۵۰ (٦)	۰,٦۹۵۰ (٦)	۰,٦۵۵۰ (٦)	۰,٦۱۰۰ (٦)	۰,٦۸۵۰ (٦)
نقطه P8	۰,٦۵٦۸	۷	۰,٦۱۸۰ (۷)	۰,٦۸۸۰ (۷)	۰,٦٤۸۵ (۷)	۰,٦۰۵۰ (۷)	۰,٦۸۰۰ (۷)
نقطه P5	۰,٤۱۱۱	۸	۰,۳۷۰۰ (۸)	۰,٤٤۵۰ (۸)	۰,٤۰۲۰ (۸)	۰,۳۵۵۰ (۸)	۰,٤۳۵۰ (۸)
نقطه P4	۰,٤۰۵٦	۹	۰,۳٦۵۰ (۹)	۰,٤۳۹۰ (۹)	۰,۳۹۸۰ (۹)	۰,۳۵۰۰ (۹)	۰,٤۳۰۰ (۹)
نقطه P9	۰,۳۹۷۵	۱۰	۰,۳۵۵۰ (۱۰)	۰,٤۳۰۰ (۱۰)	۰,۳۹۰۰ (۱۰)	۰,۳٤۰۰ (۱۰)	۰,٤۲۰۰ (۱۰)

معیار ارزیابی پایداری

در تمام سناریوهای حساسیت، کل مدل سه‌مرحله‌ای (DEA → TOPSIS → DST) بازاجرا شد و معیار اصلی برای پایداری عبارت بود از: حفظ رتبه‌بندی نهایی بر اساس نمره ترکیب نهایی تئوری شواهد ($m(H)$). اگر ترتیب رتبه‌ها در هیچ سناریویی جابه‌جا نشود، پایداری مدل به صورت مطلق تأیید می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت جامع که از طریق رویکردهای یک‌به‌یک، همزمان، و تغییر وزن‌های تاپسیس انجام شد، به طور قاطعانه پایداری مطلق مدل ترکیبی DEA-TOPSIS-DS را تأیید می‌کند، که نتایج آن در جدول ۱۵ آورده شده است. در مجموع بیش از ۳۰ سناریوی حساسیت، رتبه‌بندی نهایی هیچ‌یک از نقاط حادثه‌خیز (P1 تا P10) جابه‌جا نشد. این ثبات، به ویژه حفظ موقعیت نقطه P7 (بهترین) و P9 (بدترین) در تمامی شرایط تحت فشار، قابلیت اطمینان مدل را در بالاترین سطح ممکن اثبات می‌کند و نتایج زیر حاص گردید.

استقلال از خطا و سوگیری: پایداری شدید در برابر نوسانات داده‌های خام، نشان می‌دهد که نتایج رتبه‌بندی وابسته به خطاهای اندازه‌گیری احتمالی در فرآیند جمع‌آوری داده‌ها نیستند. علاوه بر این، عدم حساسیت به تغییرات شدید وزن‌ها، اطمینان می‌دهد که نتایج مستقل از سوگیری‌های ذهنی در تخصیص اهمیت شاخص‌ها هستند.

قدرت تفکیک‌کنندگی: این پایداری به دلیل وجود فاصله ساختاری قوی میان ویژگی‌های نقاط حادثه‌خیز است. فاصله نقاط از مرز کارایی (DEA) و از راه‌حل‌های ایده‌آل تاپسیس، به اندازه‌ای زیاد است که تغییرات بزرگ در یک یا دو بُعد، نمی‌تواند موقعیت نسبی آن‌ها را به هم بزند.

-اعتبار برای تصمیم‌گیری: از منظر اجرایی، این یافته‌ها اعتبار اجرایی بالایی به مدل می‌بخشند. مسئولین و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با اطمینان کامل بر اساس این رتبه‌بندی نهایی، منابع مالی و مهندسی را برای اصلاح اولویت‌بندی‌شده نقاط حادثه‌خیز تخصیص دهند، زیرا نتایج در برابر عدم قطعیت‌های معمول، پایدار و مطمئن هستند.

لذا تحلیل حساسیت قاطعانه اثبات می‌کند که مدل ترکیبی DEA-TOPSIS-DS، یک چارچوب تحلیلی مستحکم و قابل اتکا است و نتایج حاصل از آن برای استفاده در برنامه‌ریزی‌های کلان ایمنی جاده‌ای، از صحت و اعتبار علمی بالایی برخوردار هستند.

جدول ۱۵. نتایج نهایی تائید پایداری رتبه بندی تحلیل حساسیت مدل ترکیبیDEA–TOPSIS–Evidence

نوع تحلیل	دامنه نوسان	تغییر در رتبه بندی نهایی
داده‌های خام (OTA)	±۱۵٪ انفرادی	بدون جابجایی در خروجی نمره ایمنی (رتبه)
داده‌های خام (TaaT)	±۱۵٪ همزمان	بدون جابجایی در خروجی نمره ایمنی (رتبه)
وزن‌های TOPSIS	±۵۰٪ انتخابی	بدون جابجایی در خروجی نمره ایمنی (رتبه)

۵-نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، طراحی و پیاده‌سازی یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی یکپارچه جهت شناسایی و رتبه‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌ای در شرایط عدم قطعیت بود. در این راستا، مدل ترکیبی سه‌مرحله‌ای DEA–TOPSIS–Evidence Theory توسعه یافت که با تلفیق مزایای روش‌های کمی و شهودی، امکان ارزیابی کارایی، فاصله از حالت ایده‌آل و میزان اطمینان نهایی از تصمیم را به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌سازد. نتایج مدل نشان داد که تفاوت‌های معناداری در سطح کارایی و ایمنی بین نقاط مورد مطالعه وجود دارد. در میان آن‌ها، نقطه P7 به عنوان ایمن‌ترین و کاراترین نقطه و در مقابل، نقطه P9 به عنوان بحرانی‌ترین و دارای بیشترین نیاز به مداخله اصلاحی شناسایی شد. این رتبه‌بندی نهایی بر اساس نمره عددی ترکیب شواهد ($m(H)$) به دست آمده است که یک معیار کمی و قابل مقایسه است. این یافته‌ها به‌وضوح اولویت تخصیص منابع و برنامه‌ریزی ایمنی را برای مدیران حوزه راهنمایی و رانندگی و سازمان‌های متولی آشکار می‌سازد.

از مهم‌ترین نتایج حاصل، پایداری قابل توجه مدل ترکیبی پیشنهادی در برابر نوسانات ورودی‌ها و وزن شاخص‌ها بود. تحلیل حساسیت عددی نشان داد که با اعمال تغییرات تا ±۱۵٪ در داده‌های خام و حتی ±۵۰٪ در وزن شاخص‌ها، رتبه‌بندی نهایی نقاط هیچ تغییری نداشت. این موضوع بیانگر مقاومت بالای مدل در برابر خطاهای آماری و داده‌ای و تأییدی بر روایی و اعتبار علمی مدل ترکیبی DEA–TOPSIS–Evidence Theory است. از دیدگاه روش‌شناسی، این پژوهش چند نوآوری برجسته ارائه می‌دهد که آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد.

مدیریت صریح عدم قطعیت: برای نخستین‌بار، از تئوری شواهد دمپستر–شافر به‌منظور ادغام نتایج حاصل از دو رویکرد متفاوت تصمیم‌گیری DEA و TOPSIS استفاده شد. این تلفیق، ضمن در نظر گرفتن میزان تعارض بین دو روش، منجر به برآورد دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از درجه اطمینان تصمیم نهایی شد.

-ایجاد یک چارچوب ترکیبی پایدار: تحلیل حساسیت چندسطحی شامل تغییرات ورودی‌ها (OAT) و تغییر وزن شاخص‌ها (TaaT) نشان داد که مدل ترکیبی از پایداری تحلیلی بالایی برخوردار است. بدین ترتیب، نتایج حاصل مستقل از خطاهای جزئی اندازه‌گیری بوده و قابلیت استفاده در شرایط واقعی را دارا می‌باشند.

- یکپارچه‌سازی ارزیابی کارایی و نزدیکی به ایده‌آل: ترکیب مفهومی DEA (کارایی نسبی) با TOPSIS (فاصله از راه‌حل ایده‌آل) باعث شد تا تصمیم‌گیری نه‌تنها بر اساس عملکرد کمی، بلکه با لحاظ کردن فاصله ساختاری از حالت مطلوب انجام گیرد.

پیشنهاد کاربردی

به سازمان‌های مرتبط با ایمنی راه، از جمله وزارت راه و پلیس راهور، توصیه می‌شود که اولویت اصلاح و ایمن‌سازی جاده‌ها را مطابق با رتبه‌بندی نهایی مدل (از P9 به‌عنوان بحرانی‌ترین تا P7 به عنوان ایمن‌ترین نقطه) انجام دهند.

-در طراحی و بهبود زیرساخت‌ها، تمرکز ویژه‌ای باید بر نقاط P9، P4 و P5 قرار گیرد، زیرا این نقاط بیشترین احتمال وقوع حوادث جدی را دارند.

-تأکید می‌شود که این رتبه‌بندی نهایی، به دلیل پایداری مطلق مدل در برابر عدم قطعیت، مبنای مطمئنی برای تخصیص بودجه و منابع مالی محدود در سطح ملی قرار گیرد.

-در طراحی و بهبود زیرساخت‌ها، تمرکز ویژه‌ای باید بر نقاط P9، P4 و P5 قرار گیرد، زیرا این نقاط بیشترین احتمال وقوع حوادث جدی را دارند.

-به‌کارگیری مدل ترکیبی در قالب سامانه تصمیم‌یار مدیریتی می‌تواند ابزار مؤثری برای تخصیص منابع محدود ایمنی در سطح ملی باشد.

پیشنهاد برای تحقیقات آتی به شرح ادامه ارایه می‌گردد.

-تحلیل پارامتریک ضریب آلفا (α) در تئوری شواهد و بررسی اثر آن بر ترکیب شواهد و پایداری تصمیم نهایی.

-ترکیب مدل پیشنهادی با منطق فازی جهت لحاظ کردن شاخص‌های کیفی و زبانی مانند " رفتار رانندگان " یا "شرایط دید در شب."

-گسترش مدل به شبکه‌های جاده‌ای بزرگ‌تر یا استان‌های مختلف کشور برای ارزیابی عمومی‌سازی مدل و بررسی تفاوت‌های منطقه‌ای در الگوهای تصادف.

-استفاده از مدل در حوزه‌های دیگر نظیر مدیریت ریسک صنعتی، پایش ایمنی شهری، یا تحلیل حوادث ریلی و هوایی به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی چندمعیاره در شرایط عدم قطعیت.

٦-مراجع

-J. Holmberg et al.,1989. Application of the Dempster-Shafer theory of evidence for accident probability estimates. **doi.org/10.1016/0951-8320(89)90083-5**

-Priyank Trivedi, Jiten ShahDomokos Esztergár-KissSzabolcs Duleba. (2024). Phase-wise injury integrated severity modeling of road accidents: a two-stage hybrid multi-criteria decision-making model. Vol.15, 1275–1295.

-Sharma, R., Mehta, K., Vyas, V. (2019). Efficiency and ranking of sustainability index of India using DEA-TOPSIS. *Journal of Indian Business Research* (2019) 11 (2): 179–199. **doi.org/10.1108/JIBR-02-2018-0057**

-Bao, Q., Ruan, D. Shen, Y., Hermans, E., Janssens, D., (2012). Improved hierarchical fuzzy TOPSIS for road safety performance evaluation. Vol.32, August, 84-90, **doi.org/10.1016/j.knosys.2011.08.014**

- Barnum, D.T., Tandon, S., McNeil, S. (2008). Comparing the performance of bus routes after adjusting for the environment using data envelopment analysis. *Public Transportation Engineering,* 134, 77-85. **doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X (2008)134:2(77)**

-Behbahani, H., Effati, M., Mortezaei, S. (2020). Providing a Method for Accident Severity Analysis Using Geospatial Clustering Functions and Decision Tree, Case Study: Qazvin-Loshan Freeway. Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020) 353-354. **doi: 10.22060/ceej.2019.15376.5903**

- Behbahani, H., Yazdan pour, A., Ghori Shieh, A. (2015). Evaluation and prioritization of road parameters affecting accidents to improve safety using the Accident Modification Factor (CMF) method. (Case study: Qazvin-Abik Highway). *Journal of Traffic Engineering,* No. 63, 39.

- Ganji S.R.S., Rasafi, A.A. (2018). Measuring Road Safety Performance of Iranian Provinces: A Two-Boundary DEA Model and Intuitive Reasoning Approach. International Journal of Injury Control and Safety Promotion. 156-169. **doi.org/10.1080/17457300.2018.1535510**

- Hermans, E., Brijs, T., Wets, G., Vanhoof, K. (2009). Benchmarking road safety: Lessons to learn-from a data envelopment analysis. *Accident Analysis and Prevention,* 41, 174-182. **doi.org/10.1016/j.aap.2008.10.010**

- Heydecker, B.G., Wu, J. (2001). Identification of sites for road accident remedial work by Bayesian statistical methods: an example of uncertain inference. *Advances in Engineering Software,* 32, 859-869. **doi.org/10.1016/S0965-9978(01)00037-0**

- Hosseini, M., Rezaee, F., (2021). Application of DEA in Road Safety Performance Analysis. *Transportation Management Quarterly,* 12(4), 85–97.

- Huynh, V.N., Nakamori, Y., Ho, T.B., Murai, T. (2006). Multiple-attribute decision making under uncertainty: The evidential reasoning approach revisited. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans,* 36, 804-822. **10.1109/TSMCA.2005.855778**

- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. *Springer-Verlag.*

- Jehle, S.J., Lange, A.V., Gerdts, M. (2022). Proposing an Uncertainty Management Framework to Implement the Evidence Theory for Vehicle Crash Applications. *ASME J. Risk Uncertainty Part B*. Jun 2022, 8(2): 021204 (12 pages) Paper No: RISK-21-1057. **doi.org/10.1115/1.4053062**

- Mahmoodi, A., et al. (2018). Investigating the risk factors of road accidents on the Tehran-Qazvin highway using a regression model in the First International Comprehensive Conference on Medical Sciences, *Pharmacy and Nursing,* Tehran.

- Milan Tešić, Hermans, E., Lipovac, K., Pešić, D. (2018). Identifying the most significant indicators of the total road safety performance index. Vol. 113, April, 263-278. **doi.org/10.1016/j.aap.2018.02.003**

- Beheshtinia, M.A., Sayadinia, S., Bargbid, H. (2021). Identifying factors affecting road accidents and providing multi-criteria hybrid decision-making methods for ranking accident-prone areas. *IJTE,* Vol.9, No. 1, Summer, 439-458

- Beiravand, M., Nadimi, n. (2018). Identifying and ranking factors affecting traffic accidents using the TOPSIS method (case study: Tehran-Karaj freeway). In the Conference on Civil Engineering, *Architecture and Urban Planning of the Islamic World Countries.*

-Chang, L.Y. (2005). Analysis of freeway accident frequencies: Negative binomial regression versus artificial neural network. Safety Science, 43, 541-557. **doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.004**

-Charnes, A., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research,* 2(6), 429-444. **doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8**

-Cooper, W.W., Charnes, A., Lewin, A., Seiford, L.M. (1997). Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Application. New York: Kluwer Academic Publisher, *Journal of the Operational Research Society, Vol. 48, Issue 3 (1997)*, 332-333.

- Dempster, A.P. (1967). Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. The Annals of Mathematical Statistics, 38(2), 325-339. **doi.org/10.1214/aoms/1177698950**

- F. Chen et al. (2015). Road safety risk evaluation by means of improved entropy TOPSIS–RSR. **doi.org/10.1016/j.ssci.2015.05.006**

-Fakuda, T. (2005). Empirical study on identifying potential black spots through public participation approach: A case study of Bangkok. *Eastern Asia Society for Transportation Studies,* 6, 3683-3696. **doi.org/10.11175/easts.6.3683**

- Fancello, G., Uccheddu, B., Fadda, P. (2014). Data Envelopment Analysis (D.E.A.) for Urban Road System Performance Assessment. Procedia - Social and Behavioral Sciences. Vol.111, 5 February, 780-789. **doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.112**

- Singh, A., Malik, K.S. (2014). Major MCDM Techniques and their application-A Review. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2278-8719. Vol. 04, Issue 05, May, ||V2||, 15-25.
- Wenbo Zhou, Min Zhu, Min Hu, Juan Du, Tengfei Yuan. (2023). Evaluating the Renewal Degree for Expressway Regeneration Projects Based on a Model Integrating the Fuzzy Delphi Method, the Fuzzy AHP Method, and the TOPSIS Method.
doi.org/10.3390/su15043769
- Yager, R. R. (1987). On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Information Sciences,* 41(2), 93-137.
doi.org/10.1016/0020-0255(87)90007-7
- Yongjun, S., Hermans, E., , Da Ruan, Geert Wets. (2009). Road Safety Performance Evaluation Based on a Multiple Layer Data Envelopment Analysis Model. 315-324.
- Zareen, M.j., Ameri, M. (2022). Prioritizing accident-prone areas on the Rasht-Chabaksar axis using the TOPSIS decision-making model. *Third International Conference on Management, Accounting, Banking and Economics of Iran,* Tehran.
doi.org/10.3390/sym12122006
-Zarei, M. (2018). Data Mining with Fuzzy Logic Approach. Second National Congress on the Development of New Research in Electrical and Computer Engineering, Tehran: Civilica.
doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600342
- Mitra, S., & Washington, S. (2012). On the significance of omitted variables in intersection crash modeling. *Accident Analysis & Prevention*, *49*, 439-448.
doi.org/10.1016/j.aap.2012.03.014
- Shankar, V., Mannering, F., & Barfield, W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention,* 27(3), 371-389.
doi.org/10.1016/0001-4575(94)00078-Z
-Yan, X., Radwan, E., & Abdel-Aty, M. (2005). Characteristics of rear-end accidents at signalized intersections using multiple logistic regression model. *Accident Analysis & Prevention,* 37(6), 983-995.
doi.org/10.1016/j.aap.2005.05.001
-Miroslav Rosić et al. (2017). Method for selection of optimal road safety composite index with examples from DEA and TOPSIS method. Vol. 98, January, 277-286.
doi.org/10.1016/j.aap.2016.10.007
-Momeni, F. (1999). Identifying accident-prone areas on inner-city roads from a case study of Qazvin city), Master's thesis, Faculty of Engineering, Qazvin, *Imam Khomeini International University.*
- Nguyen, Xuan Tho, Anh, Q.N, Chau, K.L.N, Chau, B.L.N., (2024). Evidence-based Drives on Organizational Decision-Making: Literature Review and Practical Implications. Pacific Business Review International; *Udaipur,* Vol. 17, Iss. 4, (Oct 2024).
- Ramazan Zadeh, S., Momeni, A., Tabashir, E. (2023). Evaluation and ranking of provinces based on road safety levels using data envelopment analysis. *Road Journal,* Year 32, Issue 3, Fall, 267–284.
-Rasafi, A.A, Ganji, S.S., Pour Khani, H. (2018). Road safety assessment under uncertainty using multi-criteria decision analysis based on Dempster-Shafer theory. Vol. 22, 3137-3152.
doi.org/10.1007/s12205-017-1854-5
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International *Journal of Services Sciences,* 1(1), 83-98.
doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
-Sadeghi, A., Mohammadzadeh Moghaddam, A. (2016). Uncertainty-based prioritization of road safety projects, *An Application of Data Envelopment Analysis.* Vol. 52, November, 2 8-36.
doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.07.003
-Safarzadeh, M., Pirdavaee, A., Abdi, A., (2008). Identifying effective criteria in prioritizing accident-prone sections and the importance of each of them based on group decision-making methods. *Quarterly Scientific Research Journal of Transportation Research Institute,* Year 5, 145-156.
- Shafer, G. (1976). A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press.
-Simic, M.J., Stevic, Z., Zavadskas, K.E. (2020). A Novel CRITIC-Fuzzy FUCOM-DEA-Fuzzy MARCOS Model for Safety Evaluation of Road Sections Based on Geometric Parameters of Road.

Multi-Criteria approach under Uncertainty based on Evidence Theory for Identifying and Ranking High-Accident Road Spots

Azim Sohrabi, Department of Industrial Engineering, Ki.C., Islamic Azad University, Kish, Iran.
Ali Jahan, *Faculty of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.*

Kaveh Khalil Damghani, Department of Industrial Engineering, S.T., C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: Alijahan@iau.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT
Identification and ranking of road accident hotspots play a crucial role in enhancing road safety and reducing human casualties. In this study, a hybrid decision-making model based on Data Envelopment Analysis (DEA) and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) is proposed, which manages uncertainty in data using Evidence Theory. In the first step, the efficiency of each road segment was calculated through DEA, and based on these results, the initial ranking was performed using TOPSIS. Subsequently, Evidence Theory was applied to integrate the outcomes and provide a final, reliable ranking. The dataset consists of ten simulated accident-prone points characterized by ten quantitative and qualitative performance indicators, which can be replaced with real data. The quantitative results show that point P7, with a safety score of 0.9553, is the safest, while point P9, with a score of 0.3975, is identified as the most hazardous location. The novelty of this research lies in integrating DEA, TOPSIS, and Evidence Theory within a unified framework to handle uncertainty and achieve stable ranking results. This model can serve as an effective decision-support tool for strategic road safety management.

Keywords: Data Envelopment Analysis, Multi-Criteria Decision Making, Evidence Theory, Road Accident Points, Uncertainty