



Scientific Journal of

Sustainable Development of Geographical Environment



Vol. ??, No. ??, ????

Original Article

Development of the IHSE-UI for Integrated HSE Assessment of Urban Parks Based on Performance, Risk, and Decision Stability Under Uncertainty

Akbar Ghodousiyan¹ , Saber Ghasemi^{2*}

¹ Department of Environment, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

² Department of Environment, Thematic Scientific Program for Marine Studies, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Abstract

Introduction: Health, Safety, and Environment (HSE) assessments of urban parks have traditionally relied on performance-oriented indicators while largely overlooking the influence of decision uncertainty and infrastructure-related risks. Consequently, conventional multi-criteria decision-making (MCDM) approaches may produce rankings that inadequately reflect the actual HSE status of urban public spaces, particularly when expert-based weighting schemes and heterogeneous field data introduce uncertainty into the evaluation process. Addressing this limitation requires assessment frameworks capable of integrating performance, risk, and decision robustness within a unified decision-support structure. Accordingly, this study proposes an Integrated Health, Safety and Environment Uncertainty Index (IHSE-UI) that explicitly incorporates uncertainty into HSE evaluation and provides a more reliable basis for prioritizing urban park management interventions.

Materials and Methods: The proposed framework was applied to 11 urban parks in Chabahar, Iran. First, the relative importance of 28 HSE indicators was determined by integrating user requirements and expert judgments through the Quality Function Deployment (QFD) approach. Park performance was then evaluated using Fuzzy TOPSIS, and the performance component (P) was derived from the closeness coefficients. To quantify decision uncertainty, a One-at-a-Time (OAT) sensitivity analysis was conducted under 56 weight-variation scenarios, and a decision stability component (S) was calculated. Infrastructure and equipment risks were assessed using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and the resulting Risk Priority Numbers were transformed into a risk component (R). Finally, the IHSE-UI was developed by integrating the three complementary dimensions of performance, stability, and risk.

Results and Discussion: QFD results indicated that indicators related to equipment safety, infrastructure safety, and sanitation services had the highest influence on users' perceptions of HSE quality. Fuzzy TOPSIS identified the Women's Park (P5) as the best-performing park (CC = 0.59) and Azadegan Park (P4) as the lowest-performing option (CC = 0.38). Sensitivity analysis revealed a highly stable ranking structure, with stability values exceeding 0.98 for all parks. Risk assessment results showed that Women's Park had the lowest risk level (R = 0.05), whereas Shadi Park (P3) exhibited the highest risk level (R = 0.95). After integrating the three components, IHSE-UI scores ranged from 0.019 to 0.558. Women's Park ranked first with an IHSE-UI value of 0.558, while Shadi Park became the lowest-ranked alternative due to its elevated infrastructure risk. The Spearman rank correlation coefficient between the Fuzzy TOPSIS and IHSE-UI rankings was ($\rho=0.945$), confirming strong consistency while demonstrating the model's capability to incorporate risk and uncertainty into the final assessment. Furthermore, the increased discrimination among alternatives indicates that IHSE-UI provides greater decision resolution than conventional performance-based assessments.

Conclusion: The findings demonstrate that the actual HSE condition of urban parks is not solely determined by observed performance but emerges from the interaction among performance, infrastructure risk, and decision stability under uncertainty. The principal methodological contribution of this study is the transformation of sensitivity analysis outcomes into an operational stability component and its integration with performance and risk within a unified assessment framework. By moving beyond conventional performance-based evaluation, the proposed IHSE-UI framework provides a more comprehensive and decision-relevant basis for prioritizing interventions, allocating resources, and supporting risk-informed management of urban parks and other public urban infrastructures.

Keywords: Health, Safety and Environment (HSE), Urban Parks, Uncertainty Modeling, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), IHSE-UI

Citation: Development of the IHSE-UI for Integrated HSE Assessment of Urban Parks Based on Performance, Risk, and Decision Stability Under Uncertainty. *Sustainable Development of Geographical Environment*: Vol. ??, No. ??, (??-??). <https://doi.org/.....>

Received: ??/??/??

Revised: ??/??/??

Accepted: ??/??/??

* Corresponding Author's Email: 0679012640@iaau.ac.ir; saberghasemi@gmail.com

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



مقاله پژوهشی

توسعه شاخص IHSE-UI برای ارزیابی یکپارچه HSE پارک‌های شهری مبتنی بر عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم تحت عدم قطعیت

اکبر قدوسیان^۱ ID، صابر قاسمی^۲ ID

۱- گروه محیط زیست، واحد بندر عباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

۲- گروه محیط زیست، برنامه نظام موضوعات دریا، واحد بندر عباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

چکیده

مقدمه: ارزیابی سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE) در پارک‌های شهری معمولاً بر شاخص‌های عملکردی متمرکز است و عدم قطعیت موجود در فرآیند تصمیم‌گیری و ریسک‌های زیرساختی را به صورت صریح در نظر نمی‌گیرد. این محدودیت می‌تواند منجر به برداشت ناقص از وضعیت واقعی HSE، کاهش قابلیت اعتماد نتایج و اولویت‌بندی‌های مدیریتی کم‌دقت شود. در سال‌های اخیر، اگرچه استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی به طور گسترده توسعه یافته است، اما اغلب مطالعات، تحلیل حساسیت را صرفاً به عنوان یک آزمون اعتبارسنجی گزارش کرده‌اند و آن را در ساختار شاخص نهایی وارد نکرده‌اند. همچنین، ارزیابی عملکرد و ارزیابی ریسک معمولاً به صورت مستقل انجام شده و تعامل میان این دو بعد همراه با پایداری تصمیم مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب ارزیابی مبتنی بر عدم قطعیت، شاخص یکپارچه عدم قطعیت سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (IHSE-UI) را برای ارزیابی پارک‌های شهری ارائه می‌کند؛ شاخصی که عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم را در قالب یک ساختار یکپارچه تلفیق می‌کند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش مبتنی بر داده‌های HSE، ۱۱ پارک شهری بندر چابهار انجام شد. در گام نخست، اهمیت نسبی ۲۸ شاخص HSE از طریق تلفیق نیازهای کاربران و قضاوت خبرگان با استفاده از رویکرد گسترش عملکرد کیفیت (QFD) تعیین شد. سپس عملکرد پارک‌ها با بهره‌گیری از روش F.TOPSIS ارزیابی و مؤلفه عملکرد (P) استخراج گردید. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت، تحلیل حساسیت یک‌متغیره (OAT) در ۵۶ سناریوی تغییر وزن اجرا و مؤلفه پایداری تصمیم (S) محاسبه شد. همچنین ریسک تجهیزات و زیرساخت‌ها با استفاده از روش FMEA ارزیابی و به مؤلفه ریسک (R) تبدیل گردید. در نهایت، شاخص IHSE-UI از ادغام سه مؤلفه عملکرد، پایداری و ریسک توسعه یافت.

نتایج و بحث: نتایج وزن‌دهی QFD نشان داد شاخص‌های مرتبط با ایمنی تجهیزات، ایمنی زیرساخت‌ها و خدمات بهداشتی بیشترین اهمیت را در ادراک کاربران از کیفیت HSE دارند. ارزیابی F.TOPSIS نشان داد پارک بانوان (P5) با ضریب نزدیکی ۰/۵۹ دارای بهترین عملکرد HSE و پارک آزادگان (P4) با مقدار ۰/۳۸ دارای ضعیف‌ترین عملکرد است. تحلیل حساسیت بیانگر پایداری بالای رتبه‌بندی بود، به طوری که مقدار مؤلفه پایداری برای تمامی پارک‌ها بیش از ۰/۹۸ به دست آمد. نتایج ارزیابی ریسک نیز نشان داد پارک بانوان کمترین سطح ریسک (R=0.05) و پارک شادی (P3) بیشترین سطح ریسک (R=0.95) را دارا هستند. پس از ادغام سه مؤلفه در قالب شاخص IHSE-UI، دامنه نتایج از ۰/۱۹ تا ۰/۵۵۸ تغییر کرد. پارک بانوان با مقدار ۰/۵۵۸ در رتبه نخست قرار گرفت، و پارک شادی به دلیل ریسک بالای زیرساختی به ضعیف‌ترین گزینه سیستم تبدیل شد. ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین رتبه‌بندی F.TOPSIS و IHSE-UI برابر با « $p=0.945$ » بود که ضمن تأیید سازگاری مدل، نشان‌دهنده توانایی آن در انعکاس اثرات ریسک و عدم قطعیت در ارزیابی نهایی است.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان دادند که وضعیت واقعی HSE پارک‌های شهری صرفاً تابع عملکرد مشاهده‌شده نیست، بلکه از برهم‌کنش میان عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم در شرایط عدم قطعیت شکل می‌گیرد. مهم‌ترین دستاورد روش شناختی پژوهش در تبدیل نتایج تحلیل حساسیت به یک مؤلفه عملیاتی و ادغام آن با ارزیابی عملکرد و ریسک در قالب شاخص IHSE-UI است. چارچوب پیشنهادی قابلیت گذار از ارزیابی متعارف عملکردمحور به ارزیابی یکپارچه عملکرد-ریسک-پایداری را فراهم کرده و می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار برای اولویت‌بندی مداخلات، تخصیص منابع و مدیریت مبتنی بر ریسک در پارک‌ها و سایر زیرساخت‌های شهری مورد آزمایش و استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سلامت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE)، پارک‌های شهری، مدل‌سازی عدم قطعیت، تصمیم‌گیری چندمعیاره، IHSE-UI

استناد: قدوسیان، ا. و قاسمی، ص. ۱۴۰۵. توسعه شاخص IHSE-UI برای ارزیابی یکپارچه HSE پارک‌های شهری مبتنی بر عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم تحت عدم قطعیت، توسعه پایدار محیط جغرافیایی: دوره ۴، شماره ۴، ۹۴. <https://doi.org/...>

پذیرش: ۹۴/۹۴/۹۴

بازنگری: ۹۴/۹۴/۹۴

دریافت: ۹۴/۹۴/۹۴

* رایانامه نویسنده مسؤول: saberghasemi@gmail.com; 5679512645@iau.ac.ir

تأیید شده نهایی قبل از چاپ الکترونیکی

مقدمه

پارک‌های شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای زیرساخت‌های عمومی شهرها، نقش اساسی در ارتقای کیفیت محیط‌زیست، سلامت عمومی، انسجام اجتماعی و تحقق اهداف توسعه پایدار شهری ایفا می‌کنند. با گسترش شهرنشینی، افزایش تراکم جمعیت و چندمنظوره شدن فضاهای عمومی، تضمین استانداردهای مناسب بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE) در پارک‌های شهری به یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران شهری و سیاست‌گذاران تبدیل شده است. کاستی‌ها در زیرساخت‌های ایمنی، نگهداری محیطی، خدمات بهداشتی و مدیریت بهره‌برداری می‌تواند علاوه بر کاهش کارایی و مطلوبیت این فضاها، احتمال وقوع حوادث، تخریب محیط‌زیست و نارضایتی شهروندان را افزایش دهد. از این‌رو، ارزیابی وضعیت HSE پارک‌های شهری به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی مدیریت پایدار فضاهای سبز شهری و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد مورد توجه روزافزون پژوهشگران و مدیران قرار گرفته است (دیناروندی و همکاران، ۱۳۹۲؛ WHO، ۲۰۲۳).

مطالعات اخیر نیز نشان دادند که تحلیل و ارزیابی هدفمند و مسئله‌محور شاخص‌های HSE در پارک‌ها و فضاهای شهری، نظیر ابعاد مختلف شاخص ایمنی (S) می‌تواند؛ سطح محدود شدن تحرک، کاهش مشارکت اجتماعی و به حاشیه رانده شدن بخشی از جامعه همچون زنان را با جزئیات و معیارهای دقیق تبیین کند. بنابراین استناد و ارجاع به نتایج و خروجی چنین رویکردهای ارزیابی شواهدمحور به عنوان یکی از مصادیق برجسته در مدیریت پایدار فضاهای شهری در قالب شاخص یکپارچه چندمعیاره ضرورت دارد (صدیقی و مومن‌پور آکریدی، ۱۴۰۳).

در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به دلیل توانایی در تلفیق معیارهای متعدد و گاه متعارض، کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی‌های محیط‌زیستی، مطالعات پایداری و مدیریت زیرساخت‌های شهری یافته‌اند. در میان این روش‌ها، تکنیک فازی TOPSIS به دلیل قابلیت مدل‌سازی قضاوت‌های زبانی و لحاظ کردن عدم قطعیت موجود در نظرات خبرگان، به یکی از پرکاربردترین ابزارهای ارزیابی تبدیل شده است (Xu et al., 2023; Stilic and Pucka, 2023). با این حال، مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که چالش اصلی پژوهش‌های نوین دیگر صرفاً انتخاب یا به‌کارگیری یک روش تصمیم‌گیری مناسب نیست، بلکه توسعه چارچوب‌هایی است که بتوانند به‌صورت صریح ابعاد عدم قطعیت، ریسک و قابلیت اعتماد نتایج تصمیم‌گیری را نیز در فرآیند ارزیابی لحاظ کنند (Khodadadi and Shirouyehzad, 2021; Kizielewicz et al., 2023; Mishra et al., 2023).

پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که ارزیابی‌های مبتنی بر عملکرد، به‌تنهایی قادر به ارائه تصویری جامع از وضعیت واقعی سیستم‌های پیچیده شهری و محیط‌زیستی نیستند. زیرساخت‌های شهری معمولاً در شرایطی فعالیت می‌کنند که با محدودیت اطلاعات، قضاوت‌های ذهنی، تغییرات محیطی و ترجیحات متفاوت ذی‌نفعان همراه است. در چنین شرایطی، نتایج حاصل از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است نسبت به تغییرات وزن معیارها یا مفروضات مدل حساس باشند و رتبه‌بندی گزینه‌ها دستخوش تغییر شود (Haag and Chennu, 2023; Hou et al., 2024). به همین دلیل، تحلیل حساسیت یا پایداری تصمیم در مطالعات اخیر از یک ابزار کمکی اعتبارسنجی فراتر رفته و به یکی از مؤلفه‌های اصلی ارزیابی کیفیت و استحکام تصمیم تبدیل شده است (Paradowski et al., 2025).

همزمان، رویکردهای مبتنی بر ریسک نیز جایگاه ویژه‌ای در حوزه مدیریت زیرساخت‌ها و ارزیابی پایداری پیدا کرده‌اند. مطالعاتی که تحلیل حالات خرابی و آثار آن (FMEA) را با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تلفیق کرده‌اند، نشان داده‌اند که عملکرد مطلوب یک سیستم الزاماً به معنای ایمنی یا پایداری آن نیست و آسیب‌پذیری‌های پنهان می‌توانند حتی در شرایط عملکردی مناسب نیز وجود داشته باشند. در نتیجه، ادغام اطلاعات ریسک در فرآیند ارزیابی می‌تواند

۱. Health, Safety and Environment

۲. Multi-Criteria Decision Making

۳. Failure Mode and Effects Analysis

قابلیت اعتماد و کاربردپذیری نتایج را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Khalilzadeh et al., 2021; Shao et al., 2024; Aleksic et al., 2025). با وجود این پیشرفت‌ها، اغلب مطالعات موجود هر یک تنها بر یکی از ابعاد عملکرد، ریسک یا تحلیل حساسیت تمرکز داشته‌اند و چارچوب‌های یکپارچه‌ای که این سه مؤلفه را به‌صورت همزمان در ارزیابی HSE پارک‌های شهری لحاظ کنند، همچنان محدود هستند.

پژوهش حاضر در پاسخ به این شکاف علمی، شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI)^۴ را به‌عنوان یک چارچوب ترکیبی برای ارزیابی وضعیت HSE پارک‌های شهری ارائه می‌کند. برخلاف رویکردهای متداول که صرفاً بر نتایج عملکردی تمرکز دارند، در این پژوهش کیفیت HSE به‌عنوان یک سازه چندبعدی در نظر گرفته می‌شود که از سه مؤلفه مکمل شامل عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم تشکیل شده است. برای تحقق این هدف، روش FMEA، F.TOPSIS و تحلیل حساسیت در قالب یک ساختار ارزیابی یکپارچه تلفیق شده‌اند تا تصویری واقع‌بینانه‌تر و قابل اعتمادتر از وضعیت HSE در شرایط عدم قطعیت ارائه شود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش بندر چابهار، واقع در سواحل مکران در جنوب شرقی ایران است. چابهار به دلیل موقعیت راهبردی خود به عنوان تنها بندر اقیانوسی ایران و یکی از کانون‌های اصلی توسعه دریامحور کشور، طی سال‌های اخیر با رشد سریع جمعیت، گسترش کالبدی شهر و افزایش تقاضا برای خدمات و زیرساخت‌های شهری مواجه بوده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که توسعه شتابان شهری در سواحل مکران، علاوه بر فرصت‌های اقتصادی، چالش‌های متعددی را در زمینه مدیریت پایدار فضاها، عمومی، زیرساخت‌های شهری و کیفیت محیط زندگی ایجاد کرده است (Aflaki Samani et al., 2025; Ganjaeian et al., 2025).

در پژوهش حاضر، ۱۱ پارک شهری منتخب در محدوده بندر چابهار به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱ و شکل ۱). این پارک‌ها طیف متنوعی از سطوح خدمات شهری شامل پارک ملی، پارک‌های ناحیه‌ای، پارک‌های محله‌ای و پارک‌های همسایگی را در بر می‌گیرند و از نظر ویژگی‌های فضایی، عملکردی و سطح بهره‌برداری دارای تفاوت‌های قابل توجهی هستند. چنین تنوعی امکان ارزیابی وضعیت بهداشت، ایمنی و محیط زیست (HSE) را در شرایط ناهمگون شهری فراهم می‌سازد و بستر مناسبی برای مقایسه عملکرد گزینه‌های مختلف مهیا می‌کند.

جدول ۱. مشخصات پارک‌های مورد بررسی (منبع: شهرداری بندر چابهار، ۱۳۹۰)

کد	نام پارک	مقیاس	مساحت	سرانه فضای سبز (متر مربع)	تراکم جمعیت محله
P1	بهاران	ملی (ساحلی)	۱۰۰ هکتار	۵/۲	۱۲۰۰۰
P2	صدف	ناحیه‌ای	۲/۵ هکتار	۴/۳	۱۵۰۶۰
P3	شادی	ناحیه‌ای	۲/۵ هکتار	۴/۳	۱۵۰۶۰
P4	آزادگان	محله‌ای (ساحلی)	۱۵۰۰۰	۵	۴۴۳۰
P5	بانوان	محله‌ای	۱۰۷۲۶	۰/۵	۴۲۴۰
P6	فردوسی	محله‌ای	۱۲۰۰۰	۲/۳۱	۹۹۴۰
P7	موج	محله‌ای	۹۲۰۰	۱/۷۷	۵۱۷۰
P8	الغدیر	محله‌ای (ساحلی)	۸۰۰۰	۵	۴۴۳۰
P9	وحدت	همسایگی	۷۰۰۰	۲/۴	۲۸۹۰
P10	پیوسته	همسایگی	۴۲۰۰	۱/۲۸	۳۲۷۰
P11	گلها	همسایگی	۲۱۰۰	۱/۶۱	۱۳۰۰

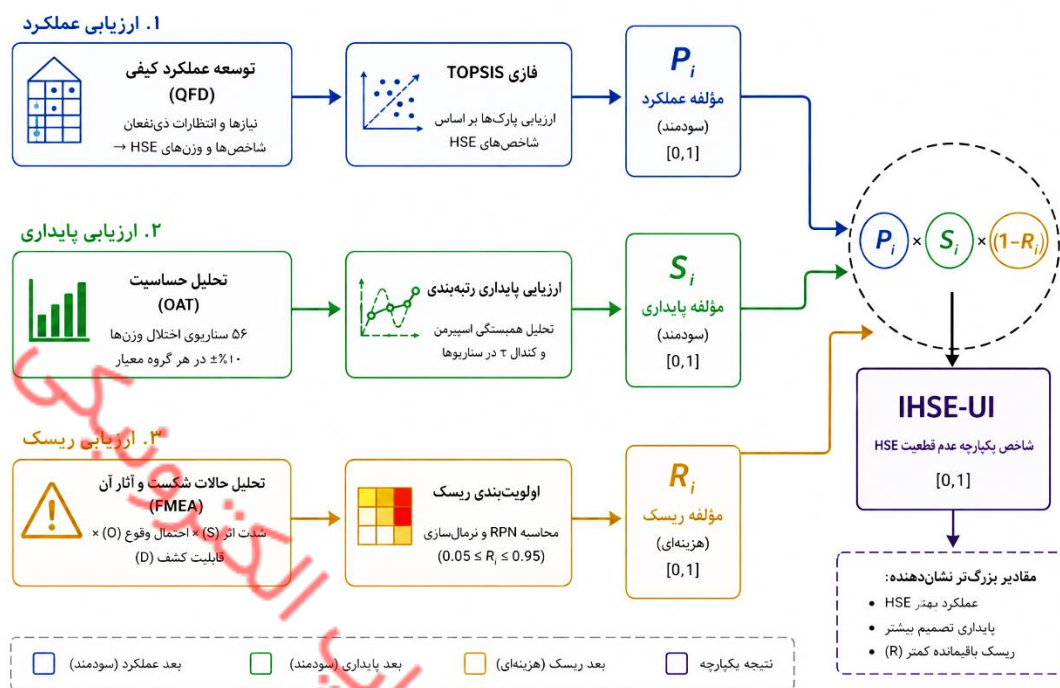
۴. Integrated HSE Uncertainty Index



شکل ۱. پراکنش و موقعیت پارک‌های شهری بندر چابهار (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

شکل ۱. پراکنش و موقعیت پارک‌های شهری بندر چابهار (منبع: یافته‌های

فرآیند تحلیل در چهار گام اصلی انجام گرفت؛ ابتدا وزن معیارها با استفاده از QFD تعیین شد. سپس عملکرد پارک‌ها از طریق F.TOPSIS ارزیابی و رتبه‌بندی گردید. در ادامه، تحلیل حساسیت به‌منظور سنجش پایداری نتایج در سناریوهای مختلف وزن‌دهی اجرا شد. در نهایت، نتایج عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم در قالب شاخص IHSE-UI تلفیق و رتبه‌بندی نهایی پارک‌ها استخراج گردید. ساختار کلی فرآیند پژوهش و ارتباط میان مراحل مختلف تحلیل در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. چارچوب مفهومی توسعه شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

استخراج شاخص‌ها HSE

به‌منظور ارزیابی وضعیت بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست در پارک‌های شهری، ابتدا یک چارچوب شاخص‌محور متناسب با اهداف پژوهش توسعه داده شد. شناسایی اولیه شاخص‌ها بر اساس مرور ساختاریافته مطالعات و منابع مرتبط با ارزیابی HSE در پارک‌ها و فضاهای عمومی، ایمنی پارک‌های شهری، زیرساخت سبز شهری، کیفیت خدمات تفریحی و مدیریت محیط‌زیست شهری انجام شد. در این مرحله، شاخص‌های گزارش‌شده در منابع مرتبط استخراج، از نظر ارتباط مفهومی با سه بعد بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست بررسی و موارد هم‌پوشان یا نامرتبط با هدف پژوهش حذف یا ادغام شدند (دیناروندی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Gonzalez et al., 2023). سپس در گام بعد، مجموعه اولیه شاخص‌ها توسط خبرگان دارای تخصص در معماری منظر، برنامه‌ریزی شهری، مهندسی محیط‌زیست، HSE و مدیریت فضای سبز بازبینی شد. این بازبینی با هدف ارزیابی ارتباط شاخص‌ها با شرایط بهره‌برداری از پارک‌های شهری و انطباق آن‌ها با ویژگی‌های مدیریتی و اقلیمی شهر چابهار انجام گرفت. بر این اساس، شاخص‌های تکراری ادغام و شاخص‌های فاقد ارتباط مستقیم با اهداف ارزیابی کنار گذاشته شدند و مجموعه نهایی شامل ۲۸ شاخص در سه بعد اصلی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست تدوین گردید. این چارچوب مبنای طراحی ابزارهای گردآوری داده، تعیین وزن معیارها، ارزیابی عملکرد پارک‌ها، تحلیل پایداری نتایج و توسعه شاخص IHSE-UI قرار گرفت (جدول ۲).

انتخاب این ابعاد بر مبنای این فرض صورت گرفت که ارزیابی وضعیت HSE تنها زمانی می‌تواند تصویر واقع‌بینانه‌ای از شرایط پارک‌های شهری ارائه دهد که هر سه مؤلفه به صورت همزمان مورد سنجش قرار گیرند. در پژوهش حاضر این چارچوب صرفاً به عنوان ابزاری برای ارزیابی عملکرد استفاده نشده، بلکه لایه پایه توسعه IHSE-UI را تشکیل می‌دهد؛ به گونه‌ای که شاخص‌های HSE ابتدا وضعیت عملکرد پارک‌ها را اندازه‌گیری کرده و سپس نتایج حاصل در مراحل بعدی با تحلیل پایداری تصمیم و ارزیابی ریسک تلفیق می‌شوند.

گردآوری داده‌ها و طراحی ابزارهای اندازه‌گیری

داده‌های مورد نیاز پژوهش از سه منبع مکمل گردآوری شد تا امکان ارزیابی همزمان عملکرد HSE، پایداری تصمیم و ریسک در چارچوب شاخص IHSE-UI فراهم شود. این سه منبع شامل: (۱) ادراک کاربران از وضعیت شاخص‌های HSE در پارک‌ها، (۲) ارزیابی تخصصی خبرگان برای وزن‌دهی و تحلیل تصمیم‌گیری، و (۳) داده‌های ریسک حاصل از ارزیابی تجهیزات و زیرساخت‌های پارکی بودند. طراحی ابزارهای گردآوری داده بر اساس چارچوب ۲۸ شاخصی HSE انجام شد و تمامی پرسشنامه‌ها پیش از اجرا توسط گروهی از متخصصان حوزه‌های HSE، برنامه‌ریزی شهری، معماری منظر و آمار مورد بازبینی قرار گرفتند. روایی محتوایی ابزارها توسط خبرگان تأیید و پایایی آن‌ها با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ ارزیابی شد.

داده‌های عملکردی: به منظور سنجش عملکرد HSE پارک‌ها از دیدگاه کاربران (با هدف تعیین وزن معیارها یا شاخص‌های HSE از طریق QFD)، پرسشنامه‌ای مبتنی بر ۲۸ شاخص معرفی شده در جدول ۲، طراحی و در میان استفاده‌کنندگان ۱۱ پارک منتخب توزیع شد. نمونه‌گیری به صورت تصادفی و در زمان‌های مختلف بهره‌برداری از پارک‌ها انجام گرفت تا تنوع کاربران و الگوهای استفاده از فضاهای عمومی پوشش داده شود. در مجموع، ۳۲۰ پرسشنامه معتبر گردآوری شد. تمامی شاخص‌ها با استفاده از مقیاس شش سطحی لیکرت از «فاقد شاخص» تا «بسیار مطلوب» ارزیابی شدند. ضریب آلفای کرونباخ برابر با ۰/۸۲ نشان‌دهنده پایایی مناسب داده‌های عملکردی بود.

داده‌های تخصصی و وزن‌دهی معیارها: برای تعیین اهمیت نسبی شاخص‌های HSE، ارزیابی ارتباط میان نیازهای کاربران و شاخص‌های تخصصی، و نیز ارزیابی عملکرد پارک‌ها (در F.TOPSIS)، یک پنل متشکل از ۱۲ متخصص یا خبره در حوزه‌های معماری منظر، مهندسی عمران، فضای سبز، بهداشت محیط و مدیریت HSE تشکیل شد. خبرگان پس از بازدید میدانی از پارک‌های مورد مطالعه، وضعیت شاخص‌های HSE را ارزیابی و برداشت کردند. بنابراین، داده‌های خبرگان در مراحل وزن‌دهی معیارها (تشکیل ماتریس QFD و استخراج وزن نهایی ۲۸)، مدل‌سازی فازی، ماتریس تصمیم، و تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمون پایایی برای پرسشنامه تخصصی مقدار آلفای کرونباخ ۰/۸۵ را نشان داد که بیانگر انسجام درونی مطلوب ابزار اندازه‌گیری است.

داده‌های ارزیابی ریسک: برای مدل‌سازی مؤلفه ریسک، ارزیابی مستقلی بر روی تجهیزات و زیرساخت‌های پارکی انجام شد. در این مرحله، شش کارشناس HSE و مدیریت ریسک، سیزده گروه اصلی تجهیزات و تأسیسات پارکی را با استفاده از روش FMEA مورد بررسی قرار دادند. داده‌های حاصل، مبنای محاسبه مؤلفه ریسک (R) در IHSE-UI را تشکیل دادند و امکان ادغام تحلیل عملکرد و تحلیل ریسک را در یک ساختار تصمیم‌یار واحد فراهم ساختند.

تعیین وزن شاخص‌های HSE با استفاده از رویکرد توسعه عملکرد کیفیت (QFD)

در شاخص ترکیبی پیشنهادی IHSE-UI، مؤلفه عملکرد (P) باید بر اساس معیارهایی ارزیابی شود تا علاوه بر اعتبار تخصصی، بازتاب‌دهنده انتظارات و ترجیحات واقعی کاربران پارک‌های شهری نیز باشند. به همین منظور، برای تعیین اهمیت نسبی ۲۸ شاخص HSE از روش توسعه عملکرد کیفیت (QFD) استفاده شد.

QFD یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای تبدیل نیازها و انتظارات ذی‌نفعان به معیارهای فنی و قابل اندازه‌گیری است که به‌طور گسترده در حوزه‌های مدیریت کیفیت، ارزیابی پایداری، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت زیرساخت‌های عمومی و تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار گرفته است (Chan and Wu, 2002; Carnevali and Miguel, 2008).

بر اساس مبنای ماتریس QFD، کاربران پارک‌های شهری به‌عنوان نمایندگان «مشتری» و خبرگان یا کارشناسان HSE به‌عنوان نمایندگان «ارائه دهنده خدمات» در نظر گرفته شدند. ابتدا اهمیت نسبی نیازها و انتظارات کاربران از طریق داده‌های پیمایش میدانی استخراج شد. سپس کارشناسان میزان ارتباط هر یک از این نیازها را با ۲۸ شاخص HSE تعیین کردند. بر این اساس، ماتریس خانه تشکیل شد که در آن سطرها بیانگر نیازهای کاربران و ستون‌ها نمایانگر

شاخص‌های تخصصی HSE بودند. برای کمی‌سازی روابط موجود در ماتریس QFD از مقیاس استاندارد شدت ارتباط استفاده شد. اهمیت مطلق هر شاخص از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$AI_j = \sum_{i=1}^m W_i R_{ij} \quad \text{رابطه ۱.}$$

که در آن:

(AI_j) : اهمیت مطلق شاخص (j)

(W_i) : وزن یا اهمیت نیاز کاربر (i)

(R_{ij}) : شدت ارتباط میان نیاز کاربر (i) و شاخص تخصصی (j)

پس از محاسبه اهمیت مطلق، وزن‌های نسبی شاخص‌ها از طریق نرمال‌سازی به دست آمدند:

$$W_j = \frac{AI_j}{\sum_{j=1}^n AI_j} \quad \text{رابطه ۲.}$$

که در آن (W_j) وزن نهایی شاخص (j) است.

وزن‌های حاصل از QFD بیانگر میزان اهمیت نسبی هر شاخص HSE از منظر تلفیقی کاربران و کارشناسان بوده و به‌عنوان ضرایب اهمیت معیارها در ماتریس تصمیم F.TOPSIS مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، نقش QFD در این پژوهش صرفاً اولویت‌بندی شاخص‌ها نبوده، بلکه به‌عنوان سازوکار انتقال ترجیحات ذی‌نفعان به لایه ارزیابی عملکرد عمل کرده است. این فرآیند موجب شد مؤلفه عملکرد در شاخص IHSE-UI بر پایه تلفیق نظام‌مند دیدگاه کاربران و قضاوت‌های تخصصی شکل گیرد و از مشروعیت و مقبولیت بیشتری در فرآیند تصمیم‌گیری برخوردار باشد.

تشکیل ماتریس تصمیم فازی و استخراج مؤلفه عملکرد^۱ (P) با F.TOPSIS

پس از تعیین وزن شاخص‌های HSE از طریق QFD، گام بعدی پژوهش ارزیابی عملکرد نسبی پارک‌های شهری و استخراج مؤلفه عملکرد (P) برای شاخص IHSE-UI بود. از آنجا که ارزیابی شاخص‌های HSE عمدتاً مبتنی بر قضاوت‌های انسانی و متغیرهای کیفی است، از روش F.TOPSIS به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در شرایط عدم قطعیت استفاده شد. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی ابهام موجود در ارزیابی‌های کارشناسی و مقایسه همزمان گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای ناهمگن، کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی پایداری شهری، زیرساخت‌های عمومی و سیستم‌های محیط‌زیستی یافته است (Foroozesh et al., 2022; Hu et al., 2023; Tronnebati et al., 2023).

در این پژوهش، عملکرد ۱۱ پارک شهری بر اساس ۲۸ شاخص HSE و با استفاده از ارزیابی‌های ۱۲ خبره مورد سنجش قرار گرفت. به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان، متغیرهای زبانی به اعداد فازی مثلثی (TFNs) تبدیل شدند. سپس ماتریس تصمیم فازی اولیه برای تمامی پارک‌ها و شاخص‌ها تشکیل گردید. در مرحله بعد، ماتریس تصمیم فازی نرمال‌سازی شد و وزن‌های معیارها که در مرحله QFD استخراج شده بودند، بر آن اعمال گردیدند. حاصل این فرآیند، ماتریس تصمیم فازی وزن‌دار بود که مبنای محاسبه عملکرد نسبی پارک‌ها قرار گرفت.

پس از تعیین راه‌حل ایده‌آل فازی مثبت (FPIS) و راه‌حل ایده‌آل فازی منفی (FNIS)، فاصله هر پارک از این دو نقطه مرجع محاسبه شد. در روش Fuzzy TOPSIS، عملکرد هر گزینه یا پارک بر اساس ضریب شباهت یا نزدیکی^۸ (CC) تعیین می‌شود:

^۱Performance Component

^۷Triangular Fuzzy Numbers

^۸Closeness Coefficient

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad \text{رابطه ۳.}$$

که در آن:

(D_i^+) فاصله گزینه (i) از راه حل ایده آل مثبت؛

(D_i^-) فاصله گزینه (i) از راه حل ایده آل منفی است.

مقادیر بزرگتر ضریب نزدیکی نشان دهنده عملکرد بهتر گزینه و نزدیکی بیشتر آن به وضعیت مطلوب HSE هستند. نتایج رتبه بندی پارکها بر اساس مقادیر فاصله و ضرایب نزدیکی، بیانگر تفاوت معنادار عملکرد پارکها در ابعاد بهداشت، ایمنی و محیط زیست بوده و مبنای اولیه مقایسه گزینهها را فراهم می کند. همچنین در چارچوب توسعه شاخص IHSE-UI، خروجی F.TOPSIS صرفاً یک رتبه بندی عملکردی تلقی نمی شود، بلکه مستقیماً به عنوان مؤلفه عملکرد (P) در ساختار شاخص نهایی مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین مقدار ضریب نزدیکی هر پارک به صورت $P_i = CC_i$ تعریف شد.

که در آن (P_i) بیانگر سطح عملکرد HSE پارک (i) است. این مؤلفه در مراحل بعدی همراه با مؤلفه پایداری تصمیم (S) و مؤلفه ریسک (R) در توسعه IHSE-UI ادغام می شود.

توسعه مؤلفه پایداری (S)

اگرچه مؤلفه عملکرد (P) تصویری از وضعیت فعلی HSE هر پارک ارائه می دهد، اما به تنهایی نشان دهنده میزان اطمینان پذیری نتایج تصمیم گیری نیست. در مدل های تصمیم گیری چندمعیاره، نتایج رتبه بندی معمولاً تحت تأثیر عدم قطعیت موجود در وزن معیارها قرار دارند و تغییرات محدود در اوزان می تواند به تغییر در مقادیر عملکرد منجر شود. از این رو، در چارچوب شاخص IHSE-UI علاوه بر عملکرد، یک مؤلفه مستقل تحت عنوان «پایداری» توسعه داده شد تا میزان استحکام نتایج در برابر تغییرات منطقی وزن معیارها اندازه گیری شود. این رویکرد با مطالعات اخیر در حوزه تصمیم گیری چندمعیاره مقاوم $(R-MCDM)$ و تحلیل عدم قطعیت همسو است که بر ضرورت ارزیابی همزمان عملکرد و پایداری تصمیم تأکید دارند (Zavadskas et al., 2019; Wieckowski and Salabun, 2023; Gonzalez et al., 2023; Demir et al., 2024).

برای محاسبه مؤلفه پایداری، از تحلیل حساسیت یک متغیره (OAT) ^۹ استفاده شد. در این روش، وزن هر یک از ۲۸ شاخص HSE به صورت مستقل ۲۰ درصد افزایش و ۲۰ درصد کاهش می یابند در حالی که سایر اوزان ثابت نگه داشته شده، و پس از هر تغییر، اوزان مجدداً نرمال سازی شده و کل فرآیند F.TOPSIS تکرار می شود. در نتیجه، برای هر پارک مجموعه ای از مقادیر ضریب نزدیکی یا شباهت (CC) تحت ۵۶ سناریو مختلف عدم قطعیت حاصل می گردد. به منظور سنجش میزان حساسیت عملکرد هر پارک، ابتدا میانگین و انحراف معیار مقادیر ضریب نزدیکی (CC) در تمامی سناریوها محاسبه شد:

$$\mu_i = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} CC_i^{(k)} \quad \text{رابطه ۴.}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{k=1}^{N_s} (CC_i^{(k)} - \mu_i)^2} \quad \text{رابطه ۵.}$$

سپس ضریب تغییرات به عنوان شاخص پراکندگی نسبی عملکرد محاسبه گردید:

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad \text{رابطه ۶.}$$

۹ One-at-a-Time Sensitivity Analysis

از آنجا که مقادیر بزرگ‌تر ضریب تغییرات نشان‌دهنده حساسیت بیشتر نتایج نسبت به تغییرات وزن معیارها هستند، مؤلفه پایداری به صورت مکمل آن تعریف شد:

$$[S_i = 1 - CV_i] \quad \text{رابطه ۷.}$$

که در آن (S_i) بیانگر میزان پایداری تصمیم برای پارک (i) است. بر این اساس، مقادیر بزرگ‌تر (S) نشان‌دهنده ثبات بیشتر نتایج و وابستگی کمتر عملکرد به تغییرات وزن معیارها هستند، در حالی که مقادیر کوچک‌تر بیانگر حساسیت بالاتر و استحکام کمتر نتایج تصمیم‌گیری می‌باشند.

مزیت اصلی این تعریف آن است که پایداری مستقیماً بر مبنای خروجی واقعی مدل F.TOPSIS محاسبه می‌شود و به تغییرات رتبه وابسته نیست. بنابراین، مؤلفه (S) نه تنها میزان مقاومت هر گزینه در برابر عدم قطعیت وزن‌ها را منعکس می‌کند، بلکه امکان مقایسه مستقیم استحکام نتایج میان پارک‌های مختلف را نیز فراهم می‌سازد.

توسعه مؤلفه ریسک (R)

از آنجایی که ارزیابی عملکرد و پایداری به تنهایی برای توصیف وضعیت واقعی HSE پارک‌های شهری کافی نیست؛ زیرا یک پارک ممکن است از نظر عملکرد جاری در وضعیت و رتبه مطلوبی قرار داشته باشد، اما هم‌زمان دارای تجهیزات فرسوده، زیرساخت‌های ناایمن یا مخاطرات بالقوه‌ای باشد که احتمال وقوع حوادث و آسیب به کاربران را افزایش دهد (Khodadadi-Karimvand and Shirouyehzad, 2021; González et al., 2023). از این رو، علاوه بر مؤلفه عملکرد (P) و مؤلفه پایداری (S) ، یک مؤلفه مستقل تحت عنوان «ریسک (R) » برای IHSE-UI توسعه داده شد تا سطح مخاطرات بالقوه موجود در هر پارک نیز در ارزیابی نهایی لحاظ شود.

به منظور کمی‌سازی ریسک، از داده‌های ارزیابی تجهیزات و زیرساخت‌های پارکی استفاده شد. این ارزیابی بر پایه روش تحلیل حالات شکست و آثار آن (FMEA) صورت گرفت که یکی از متداول‌ترین ابزارهای شناسایی و اولویت‌بندی مخاطرات در مطالعات ایمنی، مدیریت دارایی‌ها و ارزیابی زیرساخت‌های عمومی محسوب می‌شود (Zhang et al., 2024; Chen et al., 2025). در این پژوهش، شش کارشناس HSE و مدیریت ریسک، وضعیت تجهیزات و عناصر فیزیکی پارک‌ها را در قالب ۱۳ گروه تجهیز شامل وسایل بازی، کفپوش‌ها، معابر، روشنایی، تابلوها، مبلمان شهری، عناصر آبی، تجهیزات خدماتی و سایر زیرساخت‌های اصلی مورد ارزیابی قرار دادند.

در روش FMEA، سطح ریسک هر تجهیز از طریق عدد اولویت ریسک (RPN) محاسبه می‌شود (Lv et al., 2019):

$$RPN = S \times O \times D \quad \text{رابطه ۸.}$$

که در آن:

(S) شدت پیامد خطر (Severity)؛

(O) احتمال وقوع خطر (Occurrence)؛

(D) قابلیت کشف خطر پیش از وقوع حادثه (Detection) است.

پس از محاسبه RPN برای تمامی تجهیزات، میانگین مقادیر ریسک هر پارک به عنوان شاخص ریسک کلی آن پارک محاسبه شد:

$$\overline{RPN}_i = \frac{1}{m} \sum_j = {}^m RPN_{ij} \quad \text{رابطه ۹.}$$

که در آن:

$(\overline{RPN}_i)$ میانگین ریسک پارک (i) ؛

(RPN_{ij}) مقدار ریسک تجهیز (j) در پارک (i) ؛

($m = ۱۳$) تعداد گروه‌های تجهیز مورد ارزیابی است.

از آنجا که مقادیر RPN دارای مقیاس متفاوتی نسبت به مؤلفه‌های عملکرد و پایداری هستند، لازم بود پیش از ادغام در ساختار محاسباتی IHSE-UI به یک مقیاس استاندارد تبدیل شوند. بدین منظور از نرمال‌سازی min-max اصلاح‌شده استفاده شد:

$$R_i = ۰.۰۵ + ۰.۹۰ \left(\frac{\overline{RPN}_i - \min(\overline{RPN})}{\max(\overline{RPN}) - \min(\overline{RPN})} \right) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن:

(R_i) مؤلفه ریسک پارک (i);

($\max(\overline{RPN})$) و ($\min(\overline{RPN})$) به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار میانگین ریسک در میان پارک‌های مورد مطالعه در بازه [$۰.۰۵ \leq R_i \leq ۰.۹۵$] هستند. استفاده از بازه اصلاح‌شده [$۰.۰۵, ۰.۹۵$] به جای بازه کلاسیک [$۰, ۱$] با دو هدف انجام شد. نخست، جلوگیری از ایجاد مقادیر حدی صفر و یک که معمولاً در مدل‌های ترکیبی منجر به اثرات نامطلوب محاسباتی می‌شوند. دوم، لحاظ نمودن مفهوم «ریسک باقیمانده»^{۱۲} به این معنا که حتی کم‌ریسک‌ترین پارک نیز کاملاً فاقد خطر نبوده و همواره سطحی از ریسک باقی‌مانده در سیستم وجود دارد. به همین ترتیب، پریسک‌ترین گزینه نیز لزوماً بیانگر وضعیت بحرانی مطلق نیست، بلکه صرفاً نشان‌دهنده بیشترین سطح ریسک در میان گزینه‌های مورد بررسی است.

برخلاف مؤلفه‌های عملکرد (P) و پایداری (S) که ماهیت سودمند دارند و افزایش مقدار آن‌ها مطلوب تلقی می‌شود، مؤلفه ریسک (R) یک معیار هزینه‌ای است. بنابراین افزایش مقدار (R_i) بیانگر افزایش آسیب‌پذیری HSE و کاهش مطلوبیت پارک است. از این رو، در ساختار نهایی شاخص IHSE-UI، مؤلفه ریسک به عنوان عامل کاهنده کیفیت HSE وارد مدل خواهد شد.

توسعه شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI)

بر مبنای ادبیات پژوهش، ارزیابی جامع HSE در پارک‌های شهری را می‌توان بر سه بعد مکمل استوار دانست: «عملکرد»، «ریسک» و «پایداری تصمیم». عملکرد بیانگر وضعیت مشاهده‌شده پارک بر اساس مجموعه شاخص‌های HSE است. ریسک، آسیب‌پذیری‌ها و مخاطرات بالقوه تجهیزات و زیرساخت‌ها را منعکس می‌کند. و پایداری تصمیم، میزان مقاومت نتایج ارزیابی در برابر تغییرات معقول در مفروضات وزن‌دهی را نشان می‌دهد. بنابراین، این ابعاد دارای نقش‌های مفهومی متفاوت و غیرتکراری هستند: عملکرد به این پرسش پاسخ می‌دهد که وضعیت فعلی پارک چگونه است، ریسک مشخص می‌کند چه مخاطرات بالقوه‌ای می‌تواند این وضعیت را تهدید کند، و پایداری تصمیم نشان می‌دهد نتیجه حاصل تا چه اندازه در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از ساختار تصمیم‌گیری قابل اتکا است. بر این اساس، تلفیق این سه بعد صرفاً ترکیب چند تکنیک نیست، بلکه بر این استدلال استوار است که مطلوبیت HSE زمانی می‌تواند به صورت جامع ارزیابی شود که وضعیت عملکردی، آسیب‌پذیری بالقوه و قابلیت اتکای نتیجه تصمیم‌گیری به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. این منطق نظری، مبنای توسعه شاخص IHSE-UI و ساختار یکپارچه آن را تشکیل می‌دهد.

پس از محاسبه سه مؤلفه P ، S و R ، شاخص ترکیبی «IHSE-UI» مدلسازی و محاسبه می‌شود این شاخص بر مبنای رویکردهای نوین «تصمیم‌گیری مقاوم» و «ارزیابی تحت عدم قطعیت» طراحی شده است؛ رویکردهایی که در سال‌های اخیر به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های حوزه پایداری، مدیریت زیرساخت‌های شهری و تصمیم‌گیری چندمعیاره تبدیل شده‌اند (Zavadskas et al., 2019; Cinelli et al., 2020; Daripour et al., 2026).

مطالعات نشان می‌دهند که نتایج بسیاری از مدل‌های MCDM به عدم قطعیت موجود در وزن معیارها، قضاوت خبرگان و ساختار مدل حساس هستند و در صورت عدم بررسی این عدم قطعیت‌ها، قابلیت اعتماد رتبه‌بندی‌ها کاهش

می‌یابد (Saltelli et al., 2019; Cinelli et al., 2020). از این رو، ارزیابی کیفیت تصمیم باید علاوه بر عملکرد، پایداری نتایج و سطح ریسک‌های نهفته در سیستم را نیز در بر گیرد (Khalilzadeh et al., 2021; Greco et al., 2022). در شاخص ترکیبی پیشنهادی، مؤلفه P از ضریب نزدیکی (CC) حاصل از F.TOPSIS استخراج شده و میزان انطباق هر پارک با وضعیت ایده‌آل HSE را نشان می‌دهد. مؤلفه S بر اساس تحلیل حساسیت OAT و بررسی رفتار رتبه‌بندی در ۵۶ سناریوی اختلال وزن‌ها محاسبه شده و بیانگر میزان مقاومت نتایج در برابر عدم قطعیت وزن معیارها است (Saltelli et al., 2019). همچنین مؤلفه R ریسک از تحلیل FMEA به دست آمده و سطح مخاطرات بالقوه موجود در تجهیزات و زیرساخت‌های پارک را منعکس می‌کند (Lv et al., 2019).

از منظر ساختار IHSE-UI، انتخاب تابع تجمیع باید با ماهیت مفهومی ابعاد و میزان جبران‌پذیری قابل قبول میان آن‌ها سازگار باشد. در این پژوهش، عملکرد HSE پایداری تصمیم و ایمنی ناشی از سطح ریسک به‌عنوان سه بعد مکمل در نظر گرفته شدند، به‌گونه‌ای که ضعف شدید در هر یک از آن‌ها باید مطلوبیت نهایی را کاهش دهد و عملکرد مطلوب در یک بعد نتواند به‌سادگی ضعف جدی در بعد دیگر را جبران کند. بر این اساس، به جای تجمیع خطی، از ساختار ضربی استفاده شد. زیرا تجمیع ضربی نسبت به تجمیع جمعی دارای جبران‌پذیری محدودتری است و مقادیر پایین هر مؤلفه اثر بیشتری بر شاخص نهایی اعمال می‌کنند (Salvatore, 2023; OECD & JRC, 2008). بنابراین، این انتخاب با منطق ارزیابی HSE سازگار است. هرچند ساختار ضربی به معنای غیرجبرانی بودن کامل مؤلفه‌ها نیست. از آنجا که سه مؤلفه (P) ، (S) و (R) پیش از تجمیع به بازه $([0,1])$ تبدیل شدند، امکان ترکیب مستقیم آن‌ها فراهم شد. همچنین، برای تعیین وزن‌های ثانویه میان این سه بعد، داده تجربی یا قضاوت خبرگی مستقلاً که بتواند نسبت اهمیت آن‌ها را به‌طور معتبر برآورد کند، در دسترس نبود. از این رو، به‌منظور پرهیز از تحمیل وزن‌های دلخواه و افزودن یک منبع جدید عدم قطعیت به ساختار شاخص، هر سه مؤلفه با توان واحد وارد رابطه شدند. این انتخاب به معنای اثبات تجربی اهمیت برابر سه مؤلفه نیست، بلکه یک فرض ساختاری پارسیمونیک در نسخه اولیه شاخص است که بر نقش مکمل هر سه بعد در تفسیر وضعیت HSE استوار است (Dobbie and Dail, 2013). ارزیابی حساسیت نسبت به ساختارهای وزنی جایگزین می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، شاخص IHSE-UI برای پارک (i) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IHSE-UI_i = P_i \times S_i \times (1 - R_i)$$

رابطه ۱۱.

که در آن:

(P_i) : مؤلفه عملکرد حاصل از F.TOPSIS؛

(S_i) : مؤلفه پایداری حاصل از تحلیل حساسیت؛

(R_i) : مؤلفه ریسک نرمال‌شده حاصل از FMEA.

در رابطه مزبور، عبارت $(1 - R_i)$ بیانگر سطح ایمنی سیستم پس از لحاظ نمودن ریسک‌های باقیمانده است. از این رو، شاخص نهایی را می‌توان به صورت مفهومی « $IHSE-UI = f(Performance \times Stability \times Safety)$ » تفسیر کرد. در نتیجه، IHSE-UI صرفاً یک شاخص عملکردی نیست، بلکه معیاری از «عملکرد قابل اعتماد HSE تحت شرایط عدم قطعیت و ریسک» محسوب می‌شود؛ به‌گونه‌ای که کاهش هر یک از مؤلفه‌ها مستقیماً موجب کاهش مقدار شاخص نهایی خواهد شد. از آنجا که هر سه مؤلفه در بازه $([0,1])$ نرمال‌سازی شده‌اند، دامنه تغییرات شاخص نیز به صورت $0 \leq IHSE-UI \leq 1$ خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر، پایداری بیشتر و ریسک کمتر بوده و در نتیجه بیانگر وضعیت مناسب‌تر HSE هستند. در مقابل، مقادیر کوچک‌تر نشان می‌دهند که عملکرد سیستم تحت تأثیر ریسک‌های زیرساختی یا ناپایداری نتایج تصمیم‌گیری قرار گرفته است. خروجی این مرحله یک مقدار واحد برای هر پارک است که مبنای رتبه‌بندی نهایی و تحلیل‌های مقایسه‌ای پژوهش قرار می‌گیرد.

از منظر نظری، این ساختار بر مبنای منطق جبران‌پذیری محدود^۲ طراحی شده است؛ به این معنا که ضعف شدید در هر یک از ابعاد عملکرد، پایداری یا ریسک به‌سادگی نمی‌تواند با مقادیر بالای سایر مؤلفه‌ها جبران شود. این فرض با مبانی تصمیم‌گیری مقاوم، مدیریت ریسک و ارزیابی تاب‌آوری سازگار است (Cinelli et al., 2020; Greco et al., 2022). استفاده از تجمیع ضریبی موجب می‌شود مؤلفه‌های دارای مقادیر پایین اثر کاهنده بیشتری بر مقدار نهایی شاخص داشته باشند، هرچند این ساختار از نظر روش‌شناختی یک سازوکار کاملاً غیرجبرانی محسوب نمی‌شود. از این‌رو، رابطه $(P_i \times (1 - R_i) \times S_i)$ با هدف کاهش جبران‌پذیری میان ابعاد مکمل HSE و منعکس کردن اثر هم‌زمان عملکرد، قابلیت اتکای تصمیم و ایمنی در شاخص نهایی انتخاب شد. بر این اساس، به جای مدل‌های جمعی جبرانی، یک ساختار ضریبی برای ادغام مؤلفه‌ها انتخاب شد تا اثر هم‌زمان عملکرد، پایداری و ایمنی حفظ شود و ضعف‌های بحرانی در میانگین‌گیری پنهان نگردد (Greco et al., 2022; Daripour et al., 2026).

اعتبارسنجی روش‌شناختی شاخص IHSE-UI پس از توسعه IHSE-UI، ارزیابی آن با هدف بررسی سازگاری ساختاری، همگرایی نتایج با ارزیابی پایه و توان تمایز گزینه‌ها انجام شد. با توجه به اینکه برای «وضعیت واقعی HSE» پارک‌ها یک معیار مرجع مستقل یا داده بیرونی قابل مقایسه در دسترس نبود، ارزیابی حاضر به‌عنوان اعتبارسنجی بیرونی یا اثبات برتری IHSE-UI نسبت به F.TOPSIS تفسیر نمی‌شود، بلکه مجموعه‌ای از آزمون‌های درون‌مطالعه‌ای برای بررسی رفتار روش‌شناختی، قابلیت تفسیر نتایج، میزان همگرایی و سازگاری ساختار کلی رتبه‌بندی جدید با ارزیابی عملکرد پایه را نشان می‌دهد. بر این اساس، سه جنبه شامل اعتبار ساختاری، همگرایی رتبه‌بندی با F.TOPSIS و قدرت تفکیک یا توان تمایز مقادیر شاخص مورد بررسی قرار گرفت. این رویکرد با رویه‌های متداول اعتبارسنجی در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره، شاخص‌های ترکیبی و مدل‌های ارزیابی پایداری سازگار است (Cinelli et al., 2020; Greco et al., 2022). در گام نخست، اعتبار ساختاری IHSE-UI بر مبنای ارزیابی مفهومی انجام شد. در این مرحله بررسی گردید که آیا ساختار مدل یا شاخص IHSE-UI با مبانی نظری تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت، مدیریت ریسک و توسعه شاخص‌های ترکیبی سازگار است یا خیر. بر اساس چارچوب نظری IHSE-UI، ارزیابی واقعی HSE نمی‌تواند صرفاً بر عملکرد مبتنی باشد، بلکه باید سه بعد مکمل شامل عملکرد، پایداری و تصمیم و ریسک را به طور هم‌زمان در نظر گیرد. از این‌رو، ساختار پیشنهادی مدل که بر ادغام مؤلفه‌های « P ، « S و « R استوار است، از نظر مفهومی با اصول تصمیم‌گیری مقاوم، نظریه تاب‌آوری سیستم‌ها و ادبیات مدیریت ریسک سازگاری دارد.

از آنجا که مؤلفه P در پژوهش حاضر مبتنی بر F.TOPSIS است، مناسب‌ترین مدل مرجع برای اعتبارسنجی، رتبه‌بندی کلاسیک حاصل از F.TOPSIS محسوب می‌شود. در این راستا ابتدا دو رتبه‌بندی مستقل « $Rank_{FTOPSIS}$ »، « $Rank_{IHSE-UI}$ » تولید شده، سپس تغییرات رتبه هر پارک محاسبه می‌شود:

$$\Delta Rank_i = Rank_{FTOPSIS} - Rank_{IHSE-UI} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

هدف از این مقایسه آن است که مشخص شود ورود مؤلفه‌های ریسک و پایداری تصمیم چه تأثیری بر نتایج نهایی داشته است. چنانچه رتبه برخی پارک‌ها به طور معنادار تغییر کند، می‌توان استدلال نمود که روش کلاسیک بخشی از واقعیت سیستم را نادیده گرفته است.

در گام دوم، اعتبار همگرایی مدل از طریق مقایسه رتبه‌بندی حاصل از IHSE-UI با رتبه‌بندی کلاسیک F.TOPSIS ارزیابی شد. بدین منظور از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده گردید:

$$\rho = 1 - \frac{\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

^۲Limited Compensability

که در آن (ρ) ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن، (d_i) اختلاف رتبه گزینه (i) در دو روش و (n) تعداد گزینه‌ها است. مقادیر بالای (ρ) نشان‌دهنده حفظ ساختار کلی رتبه‌بندی و سازگاری مناسب مدل پیشنهادی با روش مرجع است، در حالی که اختلاف‌های محدود مشاهده‌شده بیانگر اثرگذاری مؤلفه‌های ریسک و پایداری بر نتایج نهایی خواهد بود (Spearman, 1904).

در گام سوم، قدرت تفکیک یا توان تمایز و پراکندگی امتیازهای نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادبیات تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، یکی از ویژگی‌های مهم یک روش تجمیع، توان ایجاد تمایز آلمیان گزینه‌هاست، به‌گونه‌ای که روش‌های مختلف ممکن است علی‌رغم تولید رتبه‌بندی مشابه، در میزان «فشرده‌گی یا پراکندگی امتیازهای نهایی» تفاوت معناداری داشته باشند. از این منظر، شاخص‌های مبتنی بر پراکندگی به‌عنوان ابزارهای مکمل برای ارزیابی کیفیت اطلاعاتی خروجی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zavadskas et al., 2014; Mardani et al., 2015). در این چارچوب، یکی از ساده‌ترین و در عین حال کاربردی‌ترین شاخص‌ها برای سنجش توان تمایز، دامنه تغییرات (Range) امتیازهای نهایی است. دامنه به‌عنوان یک معیار آماری پایه، میزان گستره توزیع خروجی را نشان می‌دهد و در مطالعات مقایسه‌ای TOPSIS و سایر روش‌های MCDM به‌عنوان شاخصی برای بررسی «قدرت تفکیک نسبی» مورد استفاده قرار گرفته است (Behzadian et al., 2012; Santi et al., 2017). مزیت اصلی این شاخص، تفسیری بودن، عدم پیچیدگی محاسباتی و قابلیت مقایسه مستقیم بین مدل‌ها با مقیاس یکسان خروجی است. بر این اساس، دامنه امتیازهای حاصل از F.TOPSIS و شاخص پیشنهادی IHSE-UI به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$Range_{TOPSIS} = CC_{max} - CC_{min}$$

$$Range_{IHSE-UI} = IHSE - UI_{max} - IHSE - UI_{min} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$DP = \frac{Range_{IHSE-UI}}{Range_{TOPSIS}}$$

انتخاب این رابطه مبتنی بر منطق نرمال‌سازی دامنه‌ها برای مقایسه بین دو مدل با ساختار تجمیع متفاوت است، زیرا در روش‌های MCDM، تغییر در تابع تجمیع یا ورود مؤلفه‌های جدید (مانند ریسک و پایداری) می‌تواند به‌طور طبیعی مقیاس پراکندگی خروجی را تغییر دهد. بنابراین، استفاده از نسبت دامنه‌ها امکان مقایسه هم‌مقیاس را فراهم می‌کند. از منظر روش‌شناختی، این شاخص در دسته معیارهای مقایسه‌ای پراکندگی قرار می‌گیرد و هدف آن سنجش «افزایش یا کاهش توان تفکیک نسبی» یک مدل نسبت به مدل مرجع است، نه اندازه‌گیری مطلق کیفیت تصمیم. در اینجا:

۱ $DP > 1$: نشان‌دهنده افزایش پراکندگی نسبی خروجی IHSE-UI نسبت به F.TOPSIS است که می‌تواند بیانگر افزایش اطلاعات تمایزبخش در سطح داده‌های مورد مطالعه باشد.

۱ $DP = 1$: نشان‌دهنده پراکندگی مشابه دو روش است.

۱ $DP < 1$: نشان‌دهنده فشرده‌گی بیشتر خروجی IHSE-UI نسبت به روش مرجع است.

با این حال، مطابق ادبیات MCDM، شاخص‌های مبتنی بر دامنه به‌تنهایی برای قضاوت درباره «برتری روش» کافی نیستند، زیرا به مقیاس نرمال‌سازی و ساختار تابع تجمیع حساس‌اند (Mardani et al., 2015). از این رو، در این پژوهش DP صرفاً به‌عنوان یک شاخص مکمل در کنار معیارهای اعتبار ساختاری و همگرایی رتبه‌ای استفاده شد. در مجموع، انتخاب این معیار بر سه مبنای روش‌شناختی استوار است: (۱) جایگاه دامنه به‌عنوان شاخص پایه در سنجش پراکندگی در MCDM، (۲) کاربرد گسترده معیارهای پراکندگی در ارزیابی قدرت تفکیک روش‌های TOPSIS، و (۳) امکان نرمال‌سازی و مقایسه نسبی بین دو مدل با ساختارهای تجمیع متفاوت. بنابراین، DP نه به‌عنوان شاخص مطلق کارایی،

بلکه به عنوان یک ابزار مقایسه‌ای برای سنجش تغییر در «توان تمایز نسبی خروجی‌ها» در اثر ورود مؤلفه‌های ریسک و عدم قطعیت در ساختار IHSE-UI به کار گرفته شده است.

نتایج و بحث

خروجی وزن دهی شاخص‌های HSE با استفاده از QFD: یافته‌های تحلیل QFD نشان می‌دهد که اهمیت نسبی ۲۸ شاخص HSE یکسان نبوده و توزیع وزن‌ها بیانگر ناهمگنی قابل توجه در اولویت‌های کاربران و خبرگان است. وزن‌های نهایی معیارها پس از نرمال‌سازی در بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۸۳ قرار گرفتند (جدول ۲).

جدول ۲. وزن نهایی شاخص‌های ارزیابی HSE پارک‌های شهری (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

کد	شاخص‌ها یا معیارهای HSE	وزن	کد	شاخص‌ها یا معیارهای HSE	وزن
H1	خدمات و پاکیزگی محیط پارک	۰/۰۸۳	S1	وضعیت ورودی و مسیرها (دسترسی، عرض و...)	۰/۰۴۷
H2	وضعیت سطل‌های زباله	۰/۰۶۶	S2	ایمنی تجهیزات عمومی (مبل‌ها، و...)	۰/۰۸۳
H3	سرویس‌های بهداشتی	۰/۰۶۶	S3	تجهیزات مناسب (متناسب با اقلیم و کاربری)	۰/۰۴۲
H4	تأمین آب سالم	۰/۰۱۶	S4	توزیع مناسب تجهیزات و تأسیسات	۰/۰۰۱
H5	نظافت کارکنان و پارک‌بانان	۰/۰۰۱	S5	ایمنی تأسیسات (سیستم برق و...)	۰/۰۷۵
E1	فضای سبز (تنوع گیاهی و زیستی متناسب با اقلیم)	۰/۰۰۵	S6	ایمنی سطوح یا کفپوش مسیر و معابر	۰/۰۷۵
E2	آفات‌زدایی و سم‌پاشی	۰/۰۰۱	S7	ایمنی زمین‌های بازی و ورزش	۰/۰۷۵
E3	دفع آب‌های سطحی و فاضلاب	۰/۰۱۶	S8	ایمنی وسایل بازی کودکان	۰/۰۰۱
E4	تنوع و زیبایی بصری پارک	۰/۰۰۱	S9	توزیع و تفکیک فضاهای کاربردی	۰/۰۳۳
E5	نگهداری محیط زیست پارک (کوددهی، آبیاری و...)	۰/۰۰۵	S10	کنترل امنیت	۰/۰۶۶
E6	وسعت پارک متناسب با تراکم جمعیتی	۰/۰۰۱	S11	نظارت و مدیریت	۰/۰۰۱
E7	آرامش و آسایش (مکان‌جانی و...)	۰/۰۰۱	S12	سیستم روشنایی (نورپردازی)	۰/۰۰۵
E8	حریم و حفاظ‌گذاری (معابر، گیاهان و...)	۰/۰۳۳	S13	تابلوهای راهنما و علائم هشدار دهنده	۰/۰۰۵
E9	راندمان اکولوژیکی و تکنولوژی‌های سبز	۰/۰۱۶	S14	امکانات امدادی	۰/۰۰۱

بالاترین وزن به شاخص‌های «خدمات و پاکیزگی محیط پارک» (H1) و «ایمنی تجهیزات عمومی» (S2) با مقدار ۰/۰۸۳ اختصاص یافت. پس از آن، شاخص‌های «ایمنی تأسیسات» (S5)، «ایمنی کفپوش و معابر» (S6) و «ایمنی زمین‌های بازی» (S7) با وزن ۰/۰۷۵ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین «وضعیت سطل‌های زباله» (H2)، «سرویس‌های بهداشتی» (H3) و «کنترل امنیت» از جمله معیارهای دارای اهمیت نسبتاً بالا بودند که هر یک وزن ۰/۰۶۶ را کسب کردند.

در مقابل، برخی شاخص‌ها از جمله «نظافت کارکنان»، «توزیع مناسب تجهیزات»، «نظارت و مدیریت»، «امکانات امدادی»، «آفات‌زدایی»، «تنوع و زیبایی بصری»، «تناسب وسعت پارک با جمعیت استفاده‌کننده» و «آرامش و آسایش» کمترین وزن را دریافت کردند. سهم اندک این شاخص‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با مؤلفه‌های مرتبط با ایمنی زیرساخت‌ها و کیفیت خدمات روزمره، نقش محدودتری در شکل‌دهی اولویت‌های استخراج‌شده از مدل QFD داشته‌اند. به‌طور کلی، الگوی وزن‌دهی بیانگر آن است که مؤلفه‌های مرتبط با ایمنی فیزیکی، پاکیزگی محیط و خدمات بهداشتی بیشترین تأثیر را بر ادراک کیفیت HSE پارک‌های شهری دارند. این یافته نشان می‌دهد که کاربران بیش از هر چیز به شرایط ایمن استفاده از فضا، وضعیت تجهیزات و کیفیت خدمات پایه توجه دارند؛ موضوعی که اهمیت سرمایه‌گذاری در نگهداشت زیرساخت‌ها و ارتقای کیفیت خدمات شهری را برجسته می‌سازد.

وزن‌های حاصل از این مرحله به‌عنوان بردار وزن نهایی معیارها در تحلیل F.TOPSIS مورد استفاده قرار گرفتند و مبنای محاسبه مؤلفه عملکرد (P) و در نهایت شاخص IHSE-UI را تشکیل دادند.

نتایج ارزیابی عملکرد HSE و مؤلفه عملکرد (P)

نتایج عملکرد HSE پارک‌ها مبتنی بر F.TOPSIS همانطور که در جدول ۳ ارائه شده، شامل فاصله از راه‌حل ایده‌آل فازی مثبت (D^+)، فاصله از راه‌حل ایده‌آل فازی منفی (D^-) و ضریب نزدیکی یا شباهت (CC) است. مقادیر (CC) همه پارک‌ها در بازه ۰/۳۸ تا ۰/۵۹ قرار گرفت که نشان‌دهنده ناهمگنی قابل توجه وضعیت HSE در میان پارک‌های مورد مطالعه است. بر اساس نتایج، پارک بانوان (P5) با مقدار $CC=0.59$ بالاترین سطح عملکرد HSE را کسب کرد. پس از آن، پارک‌های الغدیر (P8) با مقدار ۰/۵۷ و وحدت (P9) با مقدار ۰/۵۰ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج بیانگر نزدیکی بیشتر این پارک‌ها به وضعیت مطلوب تعریف‌شده بر اساس مجموعه شاخص‌های HSE است. در مقابل، پارک‌های موج (P7)، شادی (P3) و آزادگان (P4) پایین‌ترین مقادیر ضریب نزدیکی را به دست آوردند. پارک آزادگان (P4) با مقدار $CC=0.45$ کمترین سطح عملکرد را نشان داد که بیانگر فاصله بیشتر این پارک از شرایط مطلوب HSE و نیاز به مداخلات اصلاحی در حوزه زیرساخت‌ها، خدمات و ایمنی است. به‌طور کلی، اختلاف حدود ۵۰ درصدی میان بهترین و ضعیف‌ترین گزینه نشان می‌دهد که سطح تحقق الزامات HSE در پارک‌های شهری مورد بررسی یکنواخت نبوده و تفاوت‌های معناداری میان آن‌ها وجود دارد. این موضوع بیانگر ظرفیت قابل توجه برای بهبود وضعیت HSE در بخشی از پارک‌های مورد مطالعه است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی عملکرد پارک‌ها با روش F.TOPSIS (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها (Rank)	شاخص نزدیکی $P (CC)$	فاصله از حل ضدایده آل (D^-)	فاصله از حل ایده آل (D^+)	گزینه‌ها (Park)
۶	۰.۴۵	۰.۵۶	۰.۶۷	P1
۵	۰.۴۶	۰.۵۶	۰.۶۶	P2
۱۰	۰.۳۹	۰.۴۷	۰.۷۴	P3
۱۱	۰.۳۸	۰.۴۵	۰.۷۴	P4
۱	۰.۵۹	۰.۷۲	۰.۵۱	P5
۴	۰.۵۰	۰.۶۱	۰.۶۱	P6
۹	۰.۳۹	۰.۴۷	۰.۷۳	P7
۲	۰.۵۷	۰.۷۰	۰.۵۲	P8
۳	۰.۵۰	۰.۶۱	۰.۶۲	P9
۷	۰.۴۳	۰.۵۲	۰.۷۰	P10
۸	۰.۴۰	۰.۴۹	۰.۷۲	P11

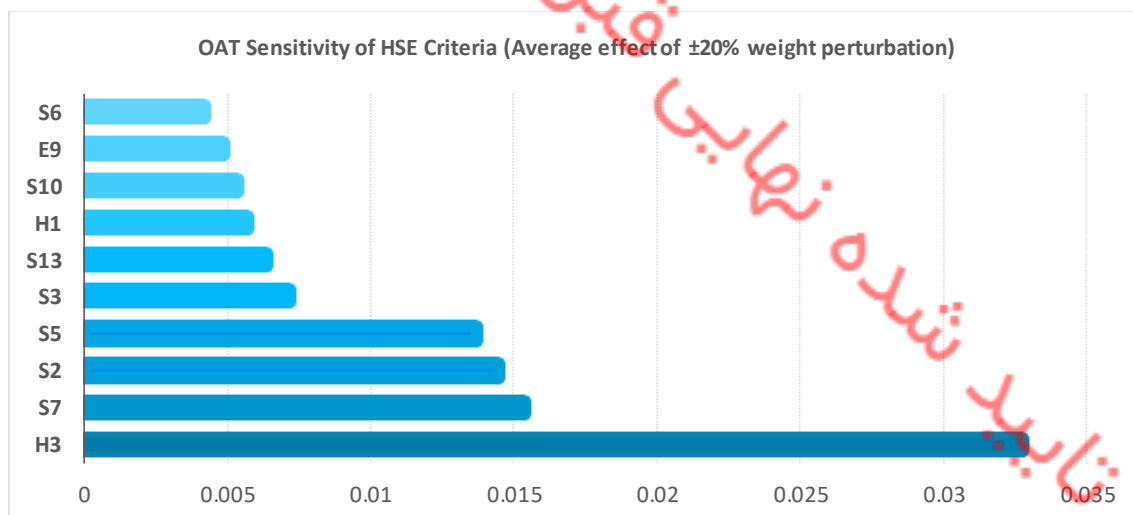
مطابق چارچوب توسعه‌یافته IHSE-UI، ضریب نزدیکی (CC) حاصل از F.TOPSIS به‌صورت مستقیم به‌عنوان مؤلفه عملکرد (P) مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین مقادیر مؤلفه عملکرد نیز در همان بازه ۰/۳۸ تا ۰/۵۹ قرار گرفت در این چارچوب، مقادیر بزرگ‌تر P بیانگر انطباق بیشتر با شرایط مطلوب HSE و مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهنده فاصله بیشتر از وضعیت ایده‌آل هستند. اگرچه مؤلفه عملکرد تصویری از میزان تحقق الزامات HSE در هر پارک ارائه می‌دهد، اما هنوز اثر عدم قطعیت وزن معیارها و مخاطرات زیرساختی را منعکس نمی‌کند.

نتایج تحلیل حساسیت و مؤلفه پایداری (S)

خروجی مؤلفه پایداری نشان می‌دهد که تمامی پارک‌های مورد مطالعه از سطح پایداری بسیار بالایی برخوردار هستند و مقادیر S در همه موارد بیش از $0/98$ است (جدول ۴). این موضوع بیانگر آن است که رتبه‌بندی حاصل از F.TOPSIS نسبت به تغییرات منطقی در وزن معیارها حساسیت محدودی داشته و از استحکام مناسبی برخوردار است. در میان گزینه‌ها، پارک بانوان ($P5$) با مقدار $S=0.9968$ بالاترین سطح پایداری را نشان داد. پس از آن، پارک‌های وحدت ($P9$) و صدف ($P2$) به ترتیب با مقادیر $0/9951$ و $0/9931$ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. مقادیر بالای S در این پارک‌ها نشان می‌دهد که عملکرد آن‌ها به یک یا چند معیار خاص وابسته نبوده و در سناریوهای مختلف تحلیل حساسیت، تغییرات بسیار محدودی را تجربه کرده‌اند. در مقابل، پارک‌های آزادگان ($P4$) و موج ($P7$) کمترین مقادیر پایداری را به دست آوردند. با این حال، مقادیر S این پارک‌ها نیز همچنان در محدوده بسیار بالا قرار دارد که نشان‌دهنده قابلیت اتکای مناسب نتایج برای تمامی گزینه‌های مورد مطالعه است.

بررسی پراکندگی مقادیر ضریب نزدیکی در سناریوهای تحلیل حساسیت نیز این نتایج را تأیید کرد. انحراف معیار مقادیر CC برای تمامی پارک‌ها بسیار محدود بود که بیانگر نوسان اندک نتایج در اثر تغییر وزن معیارها است. این یافته نشان می‌دهد که ساختار رتبه‌بندی استخراج‌شده از پایداری آماری مطلوبی برخوردار بوده و تحت تأثیر تغییرات جزئی در ترجیحات تصمیم‌گیرندگان دچار نوسان قابل توجه نمی‌شود.

تحلیل حساسیت همچنین امکان شناسایی شاخص‌های اثرگذار بر نتایج IHSE-UI را فراهم کرد. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد شاخص‌های «سرویس‌های بهداشتی ($H3$)»، «ایمنی زمین‌های بازی و ورزش ($S7$)»، «ایمنی تجهیزات عمومی ($S2$)» و «ایمنی تأسیسات ($S5$)» بیشترین تأثیر را بر تغییرات مقادیر CC دارند. این موضوع بیانگر نقش کلیدی مؤلفه‌های ایمنی و بهداشت در ساختار ارزیابی HSE پارک‌های شهری است. در مقابل، معیارهایی که در مرحله QFD وزن نهایی ناچیز یا صفر دریافت کرده بودند، تأثیر محسوسی بر نتایج تحلیل حساسیت نشان ندادند.



شکل ۳. نمودار اثرگذارترین شاخص‌های HSE بر نتایج IHSE-UI تحت آزمون حساسیت OAT (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

نتایج ارزیابی مؤلفه ریسک (R)

محاسبات ارزیابی ریسک عناصر و تجهیزات پارک‌ها نشان داد میانگین RPN پارک‌های مورد مطالعه در بازه $1/51$ تا $4/13$ قرار دارد. که بیانگر تفاوت قابل توجه سطح مخاطرات بالقوه در میان پارک‌های شهری است. کمترین مقدار ریسک به پارک بانوان ($P5$) با میانگین RPN برابر $1/51$ تعلق داشت، در حالی که پارک شادی ($P3$) با مقدار $4/14$ بالاترین سطح ریسک را نشان داد. این تفاوت عمدتاً ناشی از وضعیت نگهداری تجهیزات، کیفیت زیرساخت‌های دسترسی، شرایط روشنایی، ایمنی زمین‌های بازی و وضعیت عناصر خدماتی و رفاهی پارک‌ها است.

پس از نرمال‌سازی، مقادیر مؤلفه ریسک (R) در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۹۵ قرار گرفت. بر این اساس، پارک بانوان (P5) با مقدار $R=0.05$ کم‌ریسک‌ترین گزینه و پارک شادی (P3) با مقدار $R=0.95$ پرریسک‌ترین پارک در میان گزینه‌های مورد مطالعه شناخته شدند. همچنین پارک‌های آزادگان (P4)، پیوسته (P10) و موج (P7) نیز مقادیر نسبتاً بالایی از ریسک را نشان دادند که بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر این پارک‌ها از منظر ایمنی تجهیزات و زیرساخت‌ها است (جدول ۴).

بررسی جزئیات نتایج FMEA نیز نشان می‌داد که مهم‌ترین منابع ریسک در پارک‌های مورد مطالعه عمدتاً به سیستم‌های روشنایی و برق‌رسانی، کفپوش زمین‌های بازی، کف‌سازی معابر و برخی عناصر آبی و تجهیزات تزئینی مرتبط است. در بسیاری از پارک‌ها، تجهیزات روشنایی بالاترین مقادیر RPN را به خود اختصاص دادند که این موضوع عمدتاً ناشی از فرسودگی تجهیزات، مشکلات حفاظتی و نارسایی‌های نگهداری بوده است. همچنین وضعیت کفپوش زمین‌های بازی و مسیرهای حرکتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش ریسک در چندین پارک شناسایی شد.

مقایسه نتایج این بخش با ارزیابی عملکرد نشان داد که سطح عملکرد HSE و سطح ریسک زیرساختی الزاماً همسو نیستند. برخی پارک‌ها با وجود برخورداری از عملکرد نسبتاً مطلوب، همچنان دارای مخاطرات قابل توجهی در تجهیزات و زیرساخت‌های خود بودند. به همین دلیل، استفاده از مؤلفه ریسک در کنار مؤلفه عملکرد و پایداری موجب می‌شود ارزیابی نهایی تنها بر وضعیت جاری پارک‌ها متکی نباشد، بلکه آسیب‌پذیری بالقوه و احتمال بروز مخاطرات آینده را نیز منعکس کند.

یافته مزبور اهمیت ورود مؤلفه ریسک به فرآیند ارزیابی را آشکار می‌سازد و نشان می‌دهد که رتبه‌بندی صرفاً مبتنی بر عملکرد نمی‌تواند تصویری کامل از وضعیت واقعی HSE ارائه دهد. بنابراین افزایش مقدار R بیانگر افزایش آسیب‌پذیری سیستم است، و در شاخص نهایی (IHSE-UI) به‌عنوان یک عامل کاهنده کیفیت HSE وارد شد.

نتایج شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI) و اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی

پس از استخراج سه مؤلفه « P »، « S » و « R »، شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI) مطابق رابطه توسعه‌یافته در بخش روش‌شناسی برای تمامی پارک‌های مورد مطالعه محاسبه شد. این شاخص با ادغام هم‌زمان کیفیت عملکرد HSE، پایداری رتبه‌بندی در برابر عدم قطعیت وزن معیارها و سطح مخاطرات زیرساختی، تصویری جامع‌تر از وضعیت واقعی پارک‌های شهری ارائه می‌دهد.

نتایج محاسبات نشان داد که مقادیر IHSE-UI در دامنه ۰/۰۱۹ تا ۰/۵۵۸ قرار دارند (جدول ۴). پارک بانوان (P5) با مقدار ۰/۵۵۸ بالاترین امتیاز را کسب کرد و به‌عنوان مطلوب‌ترین گزینه از منظر عملکرد، پایداری و ایمنی شناسایی شد. این پارک علاوه بر کسب بالاترین عملکرد $HSE (P=0.59)$ ، کمترین سطح ریسک ($R=0.05$) و بیشترین پایداری رتبه‌بندی ($S=0.9968$) را نیز نشان داد. هم‌زمانی این سه ویژگی موجب شد P5 به مقاوم‌ترین گزینه در چارچوب IHSE-UI تبدیل شود. در رتبه‌های بعدی، پارک‌های وحدت (P9)، الغدیر (P8)، صدف (P2)، فردوسی (P6) و بهاران (P1) قرار گرفتند. اگرچه برخی از این پارک‌ها از نظر عملکرد HSE به یکدیگر نزدیک هستند، اما تفاوت در سطح ریسک زیرساختی موجب تغییر جایگاه آن‌ها در رتبه‌بندی نهایی شده است. به‌عنوان مثال، پارک وحدت (P9) با وجود عملکرد پایین‌تر نسبت به پارک الغدیر (P8)، به دلیل برخورداری از ریسک کمتر توانست رتبه بالاتری در شاخص نهایی کسب کند.

در مقابل، پارک شادی (P3) با مقدار IHSE-UI برابر ۰/۵۵۸ ضعیف‌ترین وضعیت را به خود اختصاص داد. اگرچه این پارک در ارزیابی عملکردی F.TOPSIS پایین‌ترین عملکرد را نداشت، اما سطح بسیار بالای ریسک تجهیزات و زیرساخت‌ها ($R=0.95$) موجب افت شدید امتیاز نهایی آن شد. این یافته به‌روشنی نشان می‌دهد که عملکرد مطلوب به‌تنهایی نمی‌تواند وجود مخاطرات بحرانی را جبران کند و ضرورت ورود مؤلفه ریسک به فرآیند ارزیابی را تأیید می‌کند.

جدول ۴. نتایج نهایی شاخص یکپارچه عدم قطعیت HSE (IHSE-UI) (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها (Rank)	IHSE-UI	(1 - R)	R	S	P (CC)	گزینه‌ها (پارک)
------------------------------------	---------	---------	---	---	--------	--------------------

۶	۰.۲۷۷	۰.۶۲۰	۰.۳۸۰	۰.۹۹۲۵	۰.۴۵	P1
۴	۰.۳۰۲	۰.۶۶۱	۰.۳۳۹	۰.۹۹۳۱	۰.۴۶	P2
۱۱	۰.۰۱۹	۰.۰۵۰	۰.۹۵۰	۰.۹۹۰۹	۰.۳۹	P3
۱۰	۰.۰۸۹	۰.۲۳۹	۰.۷۶۱	۰.۹۸۵۷	۰.۳۸	P4
۱	۰.۵۵۸	۰.۹۵۰	۰.۰۵۰	۰.۹۹۶۸	۰.۵۹	P5
۵	۰.۲۹۲	۰.۵۹۰	۰.۴۱۰	۰.۹۹۰۵	۰.۵۰	P6
۸	۰.۱۳۰	۰.۳۳۹	۰.۶۶۱	۰.۹۸۶۵	۰.۳۹	P7
۳	۰.۳۴۵	۰.۶۱۰	۰.۳۹۰	۰.۹۹۱۴	۰.۵۷	P8
۲	۰.۳۸۴	۰.۷۷۲	۰.۲۲۸	۰.۹۹۵۱	۰.۵۰	P9
۹	۰.۱۱۷	۰.۲۷۷	۰.۷۲۳	۰.۹۸۹۸	۰.۴۳	P10
۷	۰.۱۷۹	۰.۴۵۲	۰.۵۴۸	۰.۹۸۹۲	۰.۴۰	P11

مقایسه رتبه‌بندی حاصل از F.TOPSIS و IHSE-UI نشان داد که ورود مؤلفه‌های ریسک و پایداری موجب اصلاح بخشی از رتبه‌ها شده است، اما ساختار کلی رتبه‌بندی حفظ شده است (جدول ۵). نتایج اعتبارسنجی بیانگر آن است که شاخص پیشنهادی ضمن حفظ اطلاعات عملکردی مدل پایه، قادر است اثرات ناشی از عدم قطعیت و مخاطرات زیرساختی را نیز به فرآیند تصمیم‌گیری منتقل کند. بطوری که IHSE-UI از سه منظر مکمل، دارای اعتبار روش‌شناختی و قابلیت اتکای مناسب است. نخست، اعتبار ساختاری مدل نشان داد که ورود مؤلفه‌های ریسک و پایداری تصمیم موجب بازآرایی محدود اما معنادار رتبه‌بندی‌ها شده است، به‌گونه‌ای که حداکثر جابه‌جایی رتبه برابر با دو پله بوده و ساختار کلی رتبه‌بندی مبتنی بر F.TOPSIS حفظ شده است. این موضوع بیانگر آن است که مدل پیشنهادی بدون تخریب منطق ارزیابی عملکرد، توانسته است اطلاعات جدید مرتبط با ریسک و عدم قطعیت را وارد فرآیند تصمیم‌گیری نماید.

دوم، مقدار بالای ضریب اسپیرمن ($p = 0.945$) بیانگر همگرایی بالای دو رتبه‌بندی است که شاخص IHSE-UI ضمن حفظ سازگاری با ساختار تصمیم‌گیری پایه، قادر به اصلاح رتبه‌بندی بر اساس اطلاعات تکمیلی مرتبط با ریسک زیرساختی و پایداری تصمیم بوده است. این ویژگی از منظر توسعه شاخص‌های ترکیبی اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان می‌دهد تغییرات مشاهده‌شده ناشی از افزودن محتوای اطلاعاتی جدید است. در عین حال، تفاوت‌های مشاهده‌شده میان رتبه‌ها نشان‌دهنده حساسیت شاخص IHSE-UI به شرایطی است که عملکرد مشاهده‌شده به‌تنهایی برای توصیف وضعیت HSE کافی نیست، به‌ویژه در مواردی که سطح بالاتر ریسک زیرساختی موجب تعدیل جایگاه نهایی گزینه می‌شود.

سوم، ارزیابی قدرت تفکیک یا توان تمایز شاخص نشان داد که دامنه تغییرات خروجی IHSE-UI ($0/593$) تقریباً دو برابر دامنه تغییرات مدل F.TOPSIS ($0/27$) است و شاخص قدرت تفکیک برابر با $DP = 1.996$ به دست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که چارچوب پیشنهادی توان بیشتری در آشکارسازی تفاوت‌های واقعی میان گزینه‌ها داشته و قادر است گزینه‌های دارای عملکرد مشابه اما سطوح متفاوت ریسک و عدم قطعیت را با دقت بیشتری از یکدیگر متمایز سازد.

در مجموع، هم‌زمانی سه معیار اعتبارسنجی شامل حفظ سازگاری ساختاری، همگرایی بالا با مدل مرجع و افزایش چشمگیر قدرت تفکیک، نشان می‌دهد که IHSE-UI یک چارچوب معتبر و قابل اتکا برای ارزیابی یکپارچه عملکرد، ریسک و عدم قطعیت در پارک‌های شهری است و می‌تواند مبنایی مناسب برای تصمیم‌گیری ریسک‌محور و مدیریت پایدار زیرساخت‌های شهری فراهم آورد. همچنین چارچوب IHSE-UI قادر است ارزیابی HSE را از یک فرآیند صرفاً عملکردمحور به یک ارزیابی مبتنی بر عملکرد، ریسک و عدم قطعیت ارتقا دهد. همبستگی بالای نتایج با مدل پایه، همراه با افزایش قدرت تفکیک و اصلاح منطقی رتبه‌بندی‌ها، اعتبار و قابلیت اتکای شاخص پیشنهادی را تأیید می‌کند. از این رو، IHSE-UI را می‌توان به‌عنوان یک شاخص تصمیم‌یار برای اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی، تخصیص منابع و مدیریت مبتنی بر ریسک در پارک‌های شهری معرفی نمود.

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی IHSE-UI شامل اعتبار ساختاری، همگرایی و قدرت تفکیک (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۵)

گزینه‌ها (پارک)	Rank F.TOPSIS	Rank IHSE-UI	Δ Rank	معیارهای اعتبارسنجی
P5	۱	۱	۰	مقدار
P8	۲	۳	▼ ۱	معیار
P9	۳	۲	▲ ۱	بعد اعتبارسنجی
P6	۴	۵	▼ ۱	اعتبار ساختاری
P2	۵	۴	▲ ۱	اعتبار همگرایی
P1	۶	۶	۰	دامنه تغییرات F.TOPSIS
P10	۷	۹	▼ ۲	دامنه تغییرات IHSE-UI
P11	۸	۷	▲ ۱	تفکیک
P7	۹	۸	▲ ۱	شاخص قدرت تفکیک (DP)
P3	۱۰	۱۱	▼ ۱	وضعیت اعتبار مدل
P4	۱۱	۱۰	▲ ۱	ارزیابی نهایی
				تأیید شد

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که رتبه‌بندی مبتنی بر عملکرد به‌تنهایی برای توصیف وضعیت HSE پارک‌های شهری کافی نیست. زیرا عملکرد مشاهده‌شده عمدتاً وضعیت فعلی گزینه را بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌ها نشان می‌دهد، در حالی که ریسک‌های نهفته در تجهیزات و زیرساخت‌ها و نیز میزان حساسیت نتیجه به مفروضات تصمیم‌گیری ممکن است در این ارزیابی منعکس نشوند. تغییر جایگاه برخی پارک‌ها پس از تلفیق مؤلفه‌ها، این تمایز را آشکار کرد: گزینه‌ای با عملکرد نسبتاً مطلوب می‌تواند به دلیل آسیب‌پذیری زیرساختی، وضعیت مطلوب‌تری در ارزیابی یکپارچه کسب نکند. این تفسیر با مطالعات تلفیق FMEA و تصمیم‌گیری چندمعیاره همسو است که نشان می‌دهند اطلاعات مربوط به ریسک می‌تواند اولویت‌بندی حاصل از ارزیابی صرف عملکرد را تعدیل کند (Khalilzadeh et al., 2021; Khodadadi & Karimvand & Shirouyehzad, 2021; Veskovc et al., 2025). بنابراین، تفاوت میان رتبه‌بندی F.TOPSIS و IHSE-UI را نباید به‌عنوان ناسازگاری دو روش تفسیر کرد، بلکه این تفاوت نشان‌دهنده تغییر زاویه ارزیابی از «سطح عملکرد» به «عملکرد تعدیل‌شده با ریسک و پایداری تصمیم» است.

نقش مؤلفه پایداری نیز نیازمند تفسیر متفاوتی از یک معیار صرفاً تمایزبخش است. مقادیر بیش از ۰/۹۸ برای تمامی پارک‌ها نشان داد که در دامنه اختلال $\pm 20\%$ درصدی وزن معیارها، ضرایب نزدیکی F.TOPSIS تغییرپذیری محدودی داشته‌اند. از آنجا که $(S = 1 - CV)$ تعریف شده است، پراکندگی پایین مقادیر CC به‌طور طبیعی به مقادیر S نزدیک به یک منجر شد. بنابراین، نزدیک بودن مقادیر پایداری به یک به این معنا نیست که این مؤلفه به‌طور مستقل عامل اصلی تفکیک پارک‌ها بوده است، بلکه نشان می‌دهد رتبه‌بندی عملکردی پایه در برابر سناریوهای وزنی بررسی‌شده از مقاومت نسبی برخوردار بوده است. این نتیجه با ادبیات تحلیل حساسیت در MCDM سازگار است که تأکید می‌کند میزان حساسیت نتایج تابع ساختار وزن‌ها، فاصله عملکرد گزینه‌ها و دامنه اختلال مفروض است و پایداری بالا در یک مطالعه الزاماً به معنای پایداری مدل یا شاخص در برابر تمامی منابع عدم قطعیت نیست (Kizielewicz et al., 2023; Mishra et al., 2023). در نتیجه، نقش اصلی S در داده‌های حاضر، افزودن اطلاعاتی درباره قابلیت اتکای نتیجه در برابر عدم قطعیت وزن‌ها است، نه الزاماً ایجاد فاصله زیاد میان گزینه‌ها. این تفسیر همچنین نشان می‌دهد که اثر عملی هر مؤلفه در ساختار IHSE-UI باید تابع ویژگی‌های داده و شرایط تحلیل تلقی شود و نه یک اثر ثابت و از پیش تعیین‌شده.

در مقابل، مؤلفه ریسک نقش ملموس‌تری در بازتنظیم اولویت‌ها ایفا کرد. این یافته از نظر ماهیت سیستم مورد مطالعه قابل تبیین است؛ زیرا در پارک‌های شهری، وضعیت مطلوب برخی شاخص‌های عملکردی الزاماً احتمال وجود مخاطرات ناشی از فرسودگی، ضعف نگهداری یا نایمنی تجهیزات را منتفی نمی‌کند. FMEA در این پژوهش امکان داد این آسیب‌پذیری‌ها از سطح توصیفی خارج شده و به یک مؤلفه کمی در ارزیابی نهایی تبدیل شوند. اهمیت این موضوع در آن است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند میان دو وضعیت مدیریتی متفاوت تمایز قائل شود: پارکی که اساساً عملکرد HSE ضعیفی دارد و پارکی که عملکرد فعلی آن قابل قبول است، اما به دلیل سطح بالاتر ریسک زیرساختی نیازمند مداخله

پیشگیرانه است (Khalilzadeh et al., 2021; Veskovice et al., 2025). چنین تفکیکی از منظر تخصیص منابع اهمیت دارد، زیرا اقدامات اصلاحی در دو وضعیت یکسان نیستند. در حالت نخست، بهبود عملکرد شاخص‌ها اولویت دارد، در حالی که در حالت دوم، کاهش مخاطرات و ارتقای نگهداری پیشگیرانه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این نتیجه با جهت‌گیری رویکردهای نوین در ادغام ارزیابی ریسک و روش‌های MCDM، به‌ویژه استفاده از FMEA برای اولویت‌بندی تحت شرایط عدم قطعیت، همخوان است (Doloi, 2018; Shao et al., 2024; Gunduz et al., 2026).

همبستگی رتبه‌ای بالای IHSE-UI با F.TOPSIS نیز باید در همین چارچوب تفسیر شود. مقدار ($\rho = 0.945$) نشان می‌دهد که ورود ریسک و پایداری، ساختار کلی ارزیابی عملکرد را به‌طور اساسی دگرگون نکرده است. بنابراین، شاخص یکپارچه از منطق عملکرد پایه فاصله نگرفته است. در عین حال، عدم یکسانی کامل رتبه‌ها نشان می‌دهد که مؤلفه‌های افزوده‌شده اطلاعاتی غیرهمسان با عملکرد صرف را وارد تصمیم نهایی کرده‌اند. این دو ویژگی در کنار یکدیگر اهمیت دارند: همگرایی بالا از حفظ پیوستگی با ارزیابی پایه حکایت دارد، در حالی که تغییرات محدود رتبه‌ها نشان می‌دهد شاخص تلفیقی صرفاً بازتولید F.TOPSIS نیست. با این حال، این همبستگی نباید به‌عنوان اعتبارسنجی بیرونی یا اثبات برتری IHSE-UI تفسیر شود؛ بلکه صرفاً شواهدی از همگرایی درون‌مطالعه‌ای و سازگاری ساختار کلی رتبه‌بندی فراهم می‌کند. به همین ترتیب، پراکندگی بیشتر یا دامنه متفاوت امتیازات IHSE-UI نسبت به F.TOPSIS تنها بیانگر تفاوت در رفتار خروجی دو رویکرد در نمونه مورد مطالعه است و به‌تنهایی نشان‌دهنده اعتبار یا برتری روش‌شناختی شاخص پیشنهادی نیست.

از منظر نظری، نتایج از این دیدگاه حمایت می‌کنند که ارزیابی HSE در فضاهای عمومی را می‌توان یک مسئله چندبعدی دانست که در آن «عملکرد»، «مخاطره یا ریسک» و «پایداری تصمیم» ابعاد یکسانی از واقعیت را اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه اطلاعات مکملی فراهم می‌سازند. عملکرد نشان می‌دهد گزینه تا چه اندازه با وضعیت مطلوب تعریف‌شده منطبق است؛ ریسک آسیب‌پذیری‌های بالقوه‌ای را منعکس می‌کند که ممکن است در ارزیابی عملکرد آشکار نباشند. و پایداری، میزان مقاومت نتیجه در برابر تغییرات مشخص در مفروضات وزن‌دهی را نشان می‌دهد. بر این مبنا، ارزش ساختار IHSE-UI در استفاده منفرد از F.TOPSIS، OAT یا FMEA نیست، بلکه در قرار دادن خروجی این سه تحلیل در یک منطق ارزیابی مشترک است. در این ساختار، تحلیل حساسیت دیگر صرفاً گزارشی جانبی پس از رتبه‌بندی نیست، بلکه اطلاعات حاصل از آن به‌صورت یک مؤلفه قابل مشاهده در خروجی نهایی حفظ می‌شود. با این حال، نتایج حاضر نشان می‌دهد میزان اثر هر مؤلفه بر امتیاز نهایی به ویژگی‌های تجربی داده‌ها وابسته است؛ چنان‌که در مطالعه حاضر، ریسک نقش بیشتری در تمایز نهایی نسبت به پایداری داشت.

پیامد مدیریتی این یافته‌ها نیز فراتر از انتخاب «بهترین» یا «بدترین» پارک است. ساختار سه‌بعدی شاخص امکان می‌دهد اولویت‌های مدیریتی بر اساس منشأ ضعف هر پارک تعیین شوند. برای گزینه‌هایی با عملکرد پایین، بهبود شاخص‌های HSE باید محور مداخله باشد. برای گزینه‌هایی با عملکرد مناسب اما ریسک بالا، اقدامات پیشگیرانه، نگهداری و کاهش مخاطرات زیرساختی اهمیت بیشتری دارد و در شرایطی که پایداری تصمیم پایین باشد، تصمیم‌گیرنده باید با احتیاط بیشتری به رتبه‌بندی اتکا کرده و منابع عدم قطعیت را پیش از اتخاذ تصمیم بررسی کند. بنابراین، مهم‌ترین کارکرد کاربردی IHSE-UI در مطالعه حاضر، تبدیل یک رتبه‌بندی واحد به مبنایی برای تشخیص منشأ ضعف و جهت‌دهی نوع مداخله مدیریتی است.

محدودیت‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده: اگرچه شاخص IHSE-UI در این مطالعه امکان تلفیق عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم را فراهم کرد، اما نتایج باید با توجه به چند محدودیت تفسیر شوند. عدم قطعیت عمدتاً از طریق حساسیت وزن معیارها مدل‌سازی شد و منابعی مانند خطاهای اندازه‌گیری، تغییرپذیری زمانی و ناهمگنی شرایط بهره‌برداری به‌طور صریح وارد مدل نشدند. همچنین، مؤلفه ریسک مبتنی بر FMEA کلاسیک بود و وابستگی‌های متقابل میان عوامل خطر را مدل‌سازی نکرد. افزون بر این، ارزیابی بر ۱۱ پارک شهری در چابهار و در یک مقطع زمانی متمرکز بود؛ بنابراین، نتایج

نیازمند آزمون در نمونه‌ها و شرایط مستقل هستند. مطالعات آینده می‌توانند با شبیه‌سازی مونت کارلو، روش‌های پیشرفته و فازی FMEA، مدل‌های احتمالاتی و یادگیری ماشین، تحلیل‌های پویا و داده‌های مکانی-زمانی، دامنه عدم قطعیت و ریسک را گسترده‌تر بررسی کنند. همچنین، آزمون شاخص در شهرها و زمینه‌های مدیریتی متفاوت و استفاده از GIS، IoT یا سامانه‌های پایش مستمر می‌تواند برای ارزیابی رفتار، پایداری و قابلیت انتقال آن در شرایط متنوع مفید باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف رفع یکی از محدودیت‌های اساسی ارزیابی‌های متعارف HSE، یعنی نادیده گرفتن و توجه محدود به ریسک‌های زیرساختی و پایداری نتایج تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت؛ شاخص یکپارچه IHSE-UI را در چارچوب ارزیابی ۱۱ پارک شهری بندر چابهار توسعه داد. نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی صرفاً مبتنی بر عملکرد نمی‌تواند تمامی ابعاد مؤثر بر وضعیت HSE گزینه یا پارک‌های مورد مطالعه را منعکس کند، زیرا بخشی از واقعیت سیستم در قالب مخاطرات زیرساختی و میزان اعتمادپذیری نتایج تصمیم‌گیری پنهان باقی می‌ماند. رهیافت اصلی پژوهش در ادغام سه مؤلفه مکمل شامل عملکرد (P)، ریسک (R) و پایداری تصمیم (S) در یک شاخص ترکیبی و تبدیل نتایج تحلیل حساسیت به یک مؤلفه عملیاتی در ساختار آن است. این رهیافت یا رویکرد، اثر عدم قطعیت ناشی از تغییرات وزن معیارها را در ارزیابی لحاظ کرده و سنجش وضعیت شاخص‌های HSE را از یک رویکرد ایستای عملکردمحور به یک چارچوب تصمیم‌گیری آگاه از عدم قطعیت ارتقاء می‌دهد.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که عملکرد، ریسک و پایداری تصمیم، در نمونه مورد بررسی، ابعاد مکمل ارزیابی HSE هستند و اتکای صرف به هر یک از آن‌ها می‌تواند تصویری ناقص از شرایط پارک‌ها ارائه دهد. بنابراین، در بستر تجربی این پژوهش، ارزیابی جامع‌تر مستلزم توجه هم‌زمان به کیفیت عملکرد، آسیب‌پذیری زیرساختی و پایداری نتایج تصمیم‌گیری است. شاخص IHSE-UI علاوه بر اطلاعات عملکردی، تغییرات مرتبط با سطح ریسک و میزان مقاومت نتایج در برابر دامنه تغییرات وزن‌های بررسی‌شده را نیز منعکس می‌کند. با این حال، یافته‌ها و کارایی تجربی این شاخص به ۱۱ پارک شهری چابهار و شرایط داده‌ای و روش‌شناختی مطالعه حاضر محدود است و تعمیم آن به سایر شهرها یا انواع زیرساخت‌های عمومی نیازمند آزمون و اعتبارسنجی مستقل در مطالعات آینده است. بر این اساس، IHSE-UI را می‌توان یک گام روش‌شناختی در جهت توسعه ارزیابی‌های یکپارچه‌تر و ریسک‌آگاه HSE در فضاهای عمومی شهری دانست.

سپاسگزاری: نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شهرداری بندر چابهار، به‌ویژه جناب مهندس یونس حقانی (شهردار محترم)، معاونت خدمات شهری و کارشناسان فضای سبز شهری، به دلیل همکاری در بازدیدهای میدانی، تسهیل دسترسی به پارک‌های مورد مطالعه و فراهم‌سازی اطلاعات مورد نیاز پژوهش اعلام می‌دارند. همچنین، از تمامی کارشناسان، پارکبانان، مشارکت‌کنندگان و کاربران پارک‌ها که در گردآوری داده‌ها و تکمیل پرسشنامه‌ها همکاری نمودند، قدردانی می‌شود.

حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهیم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

Aflaki Samani, E., Fanni, Z., & Jafarpour Ghalehtemouri, K. (2025). Integrating informal settlements into sustainable land use planning: A phased development framework for addressing spatial inequalities in Chabahar, Iran. *City and Built Environment*, 3. <https://doi.org/10.1007/s44213-025-00061-8>

- Aleksic, A., Tadic, D., Komatina, N., & Nestic, S. (2025). Failure mode and effects analysis integrated with multi-attribute decision-making methods under uncertainty: A systematic literature review. *Mathematics*, 13(13), 2216. <https://doi.org/10.3390/math13132216>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Carnevali, J. A., & Miguel, P. A. C. (2008). Review, analysis and classification of the literature on QFD: Types of research, difficulties and benefits. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 737–754. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.03.006>
- Chababar Municipality. (2011). Comprehensive and detailed plan studies of Chababar City (Unpublished technical report). Chababar Municipality. (In Persian)
- Chan, L. K., & Wu, M. L. (2002). Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 143(3), 463–497. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00178-9)
- Chen, X., et al. (2025). A new approach for failure mode and effect analysis based on Fermatean fuzzy Z-number weighted Muirhead mean operator. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 143, 110080. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110080>
- Cinelli, M., Kadziński, M., Gonzalez, M., & Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*, 96, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>
- Daripour, M., Asgharizadeh, E., & Taghizadeh-Yazdi, M. (2026). ED-ELEC: A robust multi-criteria decision-making framework for evaluating sustainable urban delivery systems. *Industrial Management Journal*, 18(2). <https://doi.org/10.22059/imj.2026.405611.1008271>
- Demir, G., Chatterjee, P., & Pamucar, D. (2024). Sensitivity analysis in multi-criteria decision making: A state-of-the-art research perspective using bibliometric analysis. *Expert Systems with Applications*, 237, 121660. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121660>
- Dinarvandi, M., Jafari, H. R., Salehi, E., Yavari, A. R., & Tassa, H. (2013). Health, safety, and environmental management in urban parks (Case study: District 6 of Tehran Municipality). *Journal of Environmental Studies*, 39(3), 75–90. <https://doi.org/10.22059/jes.2013.35891> (In Persian)
- Dobbie, M. J., & Dail, D. (2013). Robustness and sensitivity of weighting and aggregation in constructing composite indices. *Ecological Indicators*, 29, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.025>
- Doloi, H. (2018). Risk-based resilience assessment model focusing on urban infrastructure system restoration. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.144>
- Foroozesh, N., et al. (2021). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103402>
- Ganjaeian, H., et al. (2025). Geospatial assessment of suitable areas for residential development along the Makran coastal strip, Southern Iran. *Asian Journal of Geographical Research*, 8(4), 247–264. <https://doi.org/10.9734/AJGR/2025/v8i4333>
- Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J. (Eds.). (2022). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>
- Gunduz, M., Naji, K. K., & Eltagy, A. (2026). A risk-informed sustainability index for infrastructure drainage projects: A fuzzy decision-making framework. *Sustainability*, 18(7), 3311. <https://doi.org/10.3390/su18073311>
- González, T., Berger, P., Sánchez, C. N., & Mahichi, F. (2023). Sustainability of urban parks: Applicable methodological framework for a simple assessment. *Sustainability*, 15(21), 15262. <https://doi.org/10.3390/su152115262>
- Haag, A., & Chennu, N. S. (2023). Assessing whether decisions are more sensitive to preference or prediction uncertainty with a value of information approach. *Omega*, 121, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102936>
- Hou, Y., Zhang, X., et al. (2024). Application of a novel multi-criteria decision analysis approach for evaluating the sustainability of contaminated site management. *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107327. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107327>
- Hu, Q., Zhang, S., Hu, C., & Liu, Y. (2023). A new fuzzy multi-attribute group decision-making method based on TOPSIS and optimization models. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.15933>
- Kabisch, S., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_1

- Khalilzadeh, M., Ghasemi, P., Afrasiabi, A., & Shakeri, H. (2021). Hybrid fuzzy MCDM and FMEA integrating with linear programming approach for the health and safety executive risks: A case study. *Journal of Modelling in Management*, 16(4), 1250–1278. <https://doi.org/10.1108/JM2-12-2019-0285>
- Kizielewicz, B., Shekhovtsov, A., Sałabun, W., & Wątróbski, J. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing*, 146, 110662. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110662>
- Khodadadi-Karimvand, M., & Shirouyehzad, H. (2021). Well drilling fuzzy risk assessment using fuzzy FMEA and fuzzy TOPSIS. *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, 2(2), 144–155. <https://doi.org/10.22105/JFEA.2021.275955.1086>
- Lotfi, S and Momenpour Akerdi, M (2024). The effect of Security on the willingness of women to use public spaces in the city (Case study: Behshahr City), *Sustainable Development of Geographical Environment*, 6(11), 59–78. <https://doi.org/10.48308/sdge.2025.236238.1201> (In Persian)
- Lv, L., Li, H., Wang, L., Xia, Q., & Ji, L. (2019). Failure mode and effect analysis with extended MULTIMOORA method based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets: Application in operational risk evaluation for infrastructure. *Information*, 10(10), 313. <https://doi.org/10.3390/info10100313>
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Mishra, A. R., Rani, P., Cavallaro, F., Mardani, A., & Pamucar, D. (2023). Sensitivity analysis in multi-criteria decision making: A state-of-the-art research perspective using bibliometric analysis. *Expert Systems with Applications*, 232, 120858. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120858>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) & Joint Research Centre (JRC). (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. *OECD Publishing*. <https://doi.org/10.1787/533411815016>
- Paradowski, B., Celczyński, L., & Więckowski, J. (2025). Novel coefficients for improved robustness in multi-criteria decision analysis: Rank stability and equilibrium. *Artificial Intelligence Review*, 58, 94. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11307-6>
- Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., et al. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental Modelling & Software*, 114, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012>
- Santi, E., Ferreira, L., & Borenstein, D. (2017). Enhancing the discrimination of alternatives in fuzzy-TOPSIS. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 53 (4), 155–169. <https://doi.org/10.3138/infor.53.4.155>
- Salvatore, A. L. (2023). The complexity of social phenomena and the construction of indicators. In *Fuzzy logic and social sciences*. 31–60. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41486-2_2
- Shao, J., Zhong, S., Tian, M., Liu, Y., et al. (2024). Combining fuzzy MCDM with Kano model and FMEA: A novel three-phase MCDM method for reliable assessment. *Annals of Operations Research*, 342, 725–765. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05878-w>
- Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Stilic, A., & Puska, A. (2023). Integrating multi-criteria decision-making methods with sustainable engineering: A comprehensive review of current practices. *Standards*, 4(2), 88. <https://doi.org/10.3390/eng4020088>
- Tronnebati, I., & El Boujidi, Z. (2024). Green supplier selection using fuzzy AHP, fuzzy TOPSIS, and fuzzy WASPAS: A case study in the automotive industry. *Sustainability*, 16(11), 4580. <https://doi.org/10.3390/su16114580>
- Vesković, S., Pamucar, D., Božanić, D., & Deveci, M. (2025). Failure mode and effects analysis integrated with multi-attribute decision-making methods under uncertainty: A systematic literature review. *Mathematics*, 13(13), 2216. <https://doi.org/10.3390/math13132216>
- Więckowski, J., & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing*, 148, 110915. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110915>
- World Health Organization Regional Office for Europe. (2023). *Assessing the value of urban green and blue spaces for health and well-being*. World Health Organization. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2023-7508-47275-69347>

- Xu, Z., Liu, Y., & Chen, H. (2023). Multi-criteria decision-making methods applied to achieve sustainable design: A systematic review. *Proceedings of the Design Society*, 3, 2289–2298. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.273>
- Yang, Y., Wang, Z., & Lin, G. (2021). Performance assessment indicators for comparing recreational services of urban parks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3337. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073337>
- Zhang, P., Zhang, Z., & Qing, D. (2024). An improved failure mode and effect analysis method for group decision-making in utility tunnels construction project risk evaluation. *Reliability Engineering & System Safety*, 244, 109943. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.109943>
- Zavadskas, E. K., Bausys, R., & Mazonaviciute, I. (2019). Safety evaluation methodology of urban public parks by multi-criteria decision making. *Landscape and Urban Planning*, 189, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.05.014>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildiene, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165–179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>

تأیید شده نهایی قبل از چاپ الکترونیکی