

Optimizing the Spatial Configuration and Performance of Upper Floors in Shopping Centers Using Generative Design and the TOPSIS Technique: A Case Study of the G2 Floor of Iran Mall

1. Shahla Naderi Delpak[✉]: PhD Student, Department of Architecture, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Azadeh Shahcheraghi^{*}: PhD Student, Department of Architecture, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Zahra Sadat Saeideh Zarabadi[✉]: Department of Urban Development, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding Author's Email Address: shahcheraghi@iau.ac.ir

How to Cite: Naderi Delpak, S., Shahcheraghi, A., & Saeideh Zarabadi, Z. S. (2026). Optimizing the Spatial Configuration and Performance of Upper Floors in Shopping Centers Using Generative Design and the TOPSIS Technique: A Case Study of the G2 Floor of Iran Mall. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 4(4), 1-24.

Abstract:

This study aimed to generate redesign alternatives based on previously extracted soft design rules, evaluate and rank the alternatives using the TOPSIS multi-criteria decision-making technique, and simulate the performance of the optimal alternative to improve space-syntax and footfall indicators on the G2 floor of Iran Mall. A quantitative, algorithmic, simulation-based design was employed. Six soft design rules derived from the preceding research phase were parameterized within predefined ranges of physical modification, resulting in five distinct spatial alternatives. The alternatives were evaluated using five key performance indicators—footfall, space occupancy rate, user satisfaction, social interactions, and economic value—and three key risk indicators—remaining blind spots, deviation from predicted footfall, and budget deviation. Criterion weights were determined using the Analytic Hierarchy Process, after which the alternatives were ranked using TOPSIS. Sensitivity analysis and expert feedback were subsequently applied to refine the leading alternative and develop the optimized Alternative +3. Spatial, visual, network, and pedestrian-flow analyses were conducted using DepthmapX, Gephi/AGraph, and MassMotion. TOPSIS identified Alternative 3 as the leading solution, with a relative closeness coefficient of 0.766, a distance of 0.234 from the positive ideal solution, and a distance of 0.766 from the negative ideal solution. Sensitivity analysis confirmed the stability of this selection in six scenarios; only reducing the occupancy-rate weight from 0.25 to 0.20 caused Alternative 4 to replace it. Following further optimization, Alternative +3 achieved a mean integration value of 21.60, mean spatial depth of 4.35 steps, choice value of 5,450, visual permeability of 0.55, only five remaining blind spots, and daily footfall of 5,750 users. Space occupancy reached 82%, while the final TOPSIS score increased to 0.790. Integrating generative design, space-syntax analysis, and TOPSIS provides a systematic and evidence-based framework for optimizing large-scale shopping-center layouts. The optimized configuration demonstrates that restructuring circulation loops, strengthening horizontal and vertical connectivity, and enhancing visual permeability can simultaneously reduce spatial isolation, improve movement distribution and accessibility, and enhance the commercial performance of upper retail floors.

Keywords: Generative Design; Space Syntax; Multi-Criteria Decision-Making; TOPSIS; Spatial Optimization; Commercial Footfall; Iran Mall.

Received: 16 May 2026

Revised: 19 September 2026

Accepted: 27 September 2026

Initial Publication: 27 September 2026

Final Publication: 22 December 2026



بهینه‌سازی پیکربندی و عملکرد فضایی طبقات فوقانی مراکز تجاری با رویکرد طراحی مولد و تکنیک تاپسیس (مطالعه موردی: طبقه G۲ ایران‌مال)

۱. شهلا نادری دلپاک^{۱*}: دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. آزاده شاهچراغی^{۲*}: گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. زهرا سادات سعیده زرآبادی^{۳*}: شهرسازی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: shahcheraghi@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: نادری دلپاک، شهلا، شاهچراغی، آزاده، و سعیده زرآبادی، زهرا سادات. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی پیکربندی و عملکرد فضایی طبقات فوقانی مراکز تجاری با رویکرد طراحی مولد و تکنیک تاپسیس (مطالعه موردی: طبقه G۲ ایران‌مال). تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۴(۴)، ۱-۲۴.

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تولید گزینه‌های بازطراحی مبتنی بر قواعد نرم طراحی، ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، و شبیه‌سازی عملکرد گزینه بهینه برای ارتقای شاخص‌های نحو فضا و پآخور طبقه G۲ ایران‌مال انجام شد. این پژوهش با رویکرد کمی، الگوریتمیک و مبتنی بر شبیه‌سازی انجام شد. شش قاعده نرم طراحی استخراج شده از مرحله پیشین پژوهش پارامتری‌سازی و بر مبنای دامنه‌های مجاز تغییرات کالبدی، پنج گزینه فضایی متمایز تولید شد. ارزیابی گزینه‌ها بر اساس پنج شاخص کلیدی عملکرد شامل پآخور، نرخ اشغال فضا، رضایت کاربران، تعاملات اجتماعی و ارزش اقتصادی فضاها و سه شاخص کلیدی ریسک شامل نقاط کور باقی‌مانده، انحراف از پآخور پیش‌بینی شده و انحراف از بودجه انجام گرفت. اوزان معیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین و گزینه‌ها از طریق تکنیک TOPSIS رتبه‌بندی شدند. سپس گزینه برتر با توجه به تحلیل حساسیت و بازخورد کارشناسان اصلاح و گزینه ۳+ ایجاد شد. تحلیل‌های نحو فضا، دیداری، شبکه‌ای و شبیه‌سازی جریان کاربران با استفاده از DepthmapX، Gephi/AGraph و MassMotion انجام گرفت. نتایج TOPSIS نشان داد گزینه ۳ با ضریب نزدیکی ۰.۷۶۶، کمترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت (۰.۲۳۴) و بیشترین فاصله از راه‌حل ضداپده‌آل (۰.۷۶۶) را داشت و به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد. تحلیل حساسیت نشان داد این انتخاب در شش سناریو پایدار بود و تنها با کاهش وزن نرخ اشغال از ۰.۲۵ به ۰.۲۰، گزینه ۴ جایگزین آن شد. پس از اصلاح، گزینه ۳+ به همپوندی ۰.۷۹۰، ۲۱.۶۰، عمق فضایی ۴.۳۵ گام، شاخص انتخاب ۵.۴۵۰، نفوذپذیری بصری ۰.۵۵، پنج نقطه کور و پآخور ۵.۷۵۰ نفر در روز دست یافت؛ نرخ اشغال به ۸۲٪ و امتیاز TOPSIS به ۰.۷۹۰ افزایش یافت. تلفیق طراحی مولد، تحلیل نحو فضا و TOPSIS می‌تواند چارچوبی نظام‌مند، عینی و مبتنی بر شواهد برای بهینه‌سازی پیکربندی فضایی مراکز تجاری بزرگ‌مقیاس فراهم کند. نتایج نشان داد بازآرایی شبکه حرکتی، تقویت پیوندهای عمودی و افقی و افزایش شفافیت بصری می‌تواند هم‌زمان نقاط کور را کاهش داده، دسترسی و توزیع حرکت را بهبود بخشد و عملکرد تجاری طبقات فوقانی را ارتقا دهد.

کلیدواژه‌ها: طراحی مولد؛ نحو فضا؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ TOPSIS؛ بهینه‌سازی فضایی؛ پآخور تجاری؛ ایران‌مال.

تاریخ دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۵

تاریخ بازنگری: ۲۸ شهریور ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۵ مهر ۱۴۰۵

اولین انتشار: ۵ مهر ۱۴۰۵

انتشار نهایی: ۱ دی ۱۴۰۵



مقدمه

مراکز تجاری بزرگ مقیاس در دهه‌های اخیر از الگوی ساده «مجموعه‌ای از واحدهای خرده‌فروشی» فاصله گرفته و به سامانه‌هایی پیچیده، چندعملکردی و چندسطحی تبدیل شده‌اند که در آنها موفقیت اقتصادی، تجربه کاربری، خوانایی محیط، قابلیت دسترسی و الگوی حرکت عابران به‌طور مستقیم با سازمان فضایی مجموعه ارتباط دارد. در چنین بناهایی، صرف افزایش مساحت تجاری یا تعداد واحدها تضمین‌کننده عملکرد مطلوب نیست؛ زیرا نحوه توزیع جریان حرکت، پیوند میان طبقات، محل استقرار عناصر جابه‌جایی عمودی، میدان دید، موقعیت فضاهای عمومی و چگونگی اتصال مسیرهای اصلی و فرعی می‌تواند تعیین کند که کدام بخش‌های مجموعه به هسته‌های پررفت‌وآمد و کدام بخش‌ها به نواحی منزوی و کم‌پاخور تبدیل شوند. پژوهش‌های مبتنی بر تحلیل ساختار فضایی نیز نشان داده‌اند که الگوی توزیع عابران در فضاهای تجاری به شکل معناداری تحت تأثیر ساختار شبکه حرکت و روابط توپولوژیک میان فضاها قرار می‌گیرد (1). این مسئله در مراکز تجاری عمودی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا با افزایش تعداد طبقات، حفظ پیوستگی حرکت و انتقال جریان کاربران از طبقات پایین به طبقات فوقانی به یکی از مسائل اساسی طراحی تبدیل می‌شود؛ چالشی که در ادبیات معاصر از آن با عنوان مسئله «عمودیت» مراکز تجاری یاد شده است (2).

ریشه نظری تحلیل رابطه میان سازمان فضایی و رفتار استفاده‌کنندگان را می‌توان در نظریه نحو فضا جست‌وجو کرد. هیلیر و هنسون با طرح مفهوم «منطق اجتماعی فضا» نشان دادند که پیکربندی فضایی تنها یک ویژگی هندسی نیست، بلکه الگویی از روابط است که می‌تواند امکان مواجهه، حرکت، دسترسی و تعامل اجتماعی را شکل دهد (3). در ادامه، هیلیر با توسعه این رویکرد، فضا را همچون «ماشینی» در نظر گرفت که ساختار ارتباطی آن می‌تواند جریان حرکت و نحوه استفاده از محیط را هدایت کند (4). بر این اساس، شاخص‌هایی نظیر هم‌پیوندی، عمق فضایی و انتخاب به ابزارهای مهمی برای سنجش میزان دسترسی نسبی، جدایی فضایی و احتمال عبور از بخش‌های مختلف شبکه تبدیل شدند. در مطالعات معماری ایران نیز کاربرد نحو فضا برای تحلیل بناها و مجموعه‌های تجاری توسعه یافته و نشان داده شده است که بررسی روابط پیکره‌بندی می‌تواند در شناخت نواحی پرتحرک، نقاط کم‌جاذبه و ساختار حرکت در بازارها و مراکز خرید سودمند باشد (5). تحلیل مقایسه‌ای بازارهای سنتی و مراکز خرید تهران نیز بر اهمیت رابطه میان ساختار فضایی و نحوه استفاده کاربران از فضاهای تجاری تأکید کرده است (6). همچنین، مطالعه بازار سنتی و مرکز خرید دیپلمات بروجرده نشان داد که تفاوت در سازمان پیکره‌بندی می‌تواند به الگوهای رفتاری متفاوتی در محیط‌های تجاری منجر شود (7).

توسعه ابزارهای محاسباتی، امکان تبدیل اصول نظری نحو فضا به شاخص‌های قابل اندازه‌گیری را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. Turner با معرفی نرم‌افزار Depthmap امکان اجرای تحلیل گراف دیداری و بررسی روابط فضایی بر مبنای میدان دید را فراهم ساخت (8). در ادامه، DepthmapX به‌عنوان نسخه توسعه‌یافته و چندسکویی این ابزار، امکان تحلیل محوری، تحلیل دیداری و استخراج طیفی از شاخص‌های پیکره‌بندی فضایی را در مطالعات معماری و شهری فراهم کرد (9). مطالعات جدیدتر نیز با عبور از خطوط محوری کلاسیک و استفاده از داده‌های هندسی با وضوح بالا، ظرفیت تحلیل‌های نوین برای فهم دقیق‌تر ساختار محیط ساخته‌شده را نشان داده‌اند (10). کاربرد این رویکرد در مسائل واقعی طراحی شهری نیز گسترش یافته است؛ برای مثال، تحلیل ایستگاه‌های مترو نشان داده است که می‌توان از شاخص‌های نحو فضا برای بهینه‌سازی سازمان فضایی، بهبود دسترسی و کاهش نواحی کم‌نفوذ استفاده کرد (11). همچنین،

استفاده از مدل‌های دوجوهری نحو فضا و کلان‌داده در تحلیل ازدحام شهری نشان می‌دهد که تلفیق ساختار فضایی با داده‌های رفتاری و جریانی می‌تواند ظرفیت پیش‌بینی و تصمیم‌گیری طراحی را افزایش دهد (12).

بالین‌حال، شاخص‌های کلاسیک نحو فضا به‌تنهایی قادر به پوشش کامل پیچیدگی شبکه‌های فضایی نیستند. تحلیل شبکه بر پایه مفاهیم مرکزیت، امکان بررسی نقش هر گره در ساختار کلی شبکه را فراهم می‌کند. مفهوم مرکزیت بینایی که توسط Freeman صورت‌بندی شد، میزان قرارگیری یک گره در مسیرهای کوتاه میان سایر گره‌ها را نشان می‌دهد و از این طریق می‌تواند اهمیت واسطه‌ای نقاط مختلف شبکه را آشکار سازد (13). تبیین مفهومی بعدی مرکزیت، تمایز میان شاخص‌های مختلف نظیر نزدیکی و بینایی را روشن‌تر کرد و زمینه استفاده گسترده آنها در مطالعات شبکه‌ای را فراهم ساخت (14). ابزار AGraph نیز با هدف تحلیل شبکه‌های فضایی در چارچوب مطالعات نحو فضا توسعه یافت و امکان استخراج و تفسیر شاخص‌های مرکزیت را در محیط‌های معماری فراهم کرد (15). پژوهش‌های جدید درباره شبکه‌های کوچک‌جهان در مقیاس منطقه‌ای نیز نشان داده‌اند که ترکیب منطق مرکزیت محلی و جهانی می‌تواند درک جامع‌تری از عملکرد ساختارهای فضایی ارائه کند (16). از این‌رو، سنجش همزمان شاخص‌های نحو فضا و مرکزیت شبکه‌ای می‌تواند ابعاد مکمل ساختار فضایی مراکز تجاری را آشکار سازد.

بعد رفتاری مسئله نیز اهمیت اساسی دارد؛ زیرا موفقیت یک بازطراحی زمانی قابل دفاع است که تغییرات پیکره‌بندی به تغییر واقعی یا محتمل در حرکت کاربران منجر شود. ارزیابی پس از بهره‌برداری در پروژه‌های تجاری و عمومی نشان داده است که الگوی استفاده از فضا، توزیع تراکم و کیفیت تجربه کاربر باید به‌عنوان معیارهای اصلی ارزیابی طراحی در نظر گرفته شوند (17). در این زمینه، شبیه‌سازی عامل‌بنیان امکان مدل‌سازی رفتار عابران و برآورد پیامدهای مداخلات طراحی پیش از اجرای فیزیکی آنها را فراهم می‌کند. نرم‌افزار MassMotion یکی از ابزارهای تخصصی برای شبیه‌سازی حرکت جمعیت و بررسی نحوه توزیع عابران در محیط‌های پیچیده است (18). بدین ترتیب، ترکیب خروجی‌های نحو فضا با شبیه‌سازی حرکت کاربران می‌تواند رابطه میان تغییرات ساختاری شبکه و پیامدهایی مانند افزایش پاخور، تراکم تعاملات اجتماعی و تغییر در توزیع جمعیت را به‌شکلی عینی‌تر بررسی کند.

همزمان با رشد ظرفیت‌های تحلیلی، حوزه معماری نیز به‌سمت طراحی داده‌محور حرکت کرده است. Deutsch بر این نکته تأکید دارد که ورود داده به فرایند طراحی می‌تواند تصمیم‌های معماری را از قضاوت‌های صرفاً شهودی به تصمیم‌هایی مستند، قابل سنجش و قابل دفاع تبدیل کند (19). مرور نظام‌مند پژوهش‌های طراحی داده‌محور نیز نشان می‌دهد که استفاده از داده، الگوریتم و بازخوردهای عملکردی، در حال تبدیل شدن به یکی از بنیان‌های اصلی روش‌های معاصر طراحی معماری است (20). پژوهش‌های مرتبط با کلان‌داده نیز بر ظرفیت این داده‌ها برای شناخت رفتار پیچیده محیط ساخته‌شده تأکید کرده‌اند، هرچند همزمان محدودیت‌هایی مانند کیفیت داده، قابلیت تفسیر و نیاز به پیوند مؤثر میان تحلیل و تصمیم طراحی را مطرح ساخته‌اند (21). توسعه سامانه‌های هوشمند برنامه‌ریزی و طراحی شهری مبتنی بر کلان‌داده نیز بیانگر حرکت از تحلیل منفعل داده به سمت استفاده مستقیم از داده در تولید و ارزیابی راه‌حل‌های طراحی است (22). در همین راستا، رویکردهای جدید «از داده تا طراحی» تلاش دارند یک مسیر روش‌شناختی منسجم میان گردآوری داده، تحلیل، تولید گزینه و انتخاب راه‌حل طراحی ایجاد کنند (23).

طراحی مولد یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحقق این گذار است. برخلاف شیوه‌های سنتی که در آنها طراح تعداد محدودی راه‌حل را به‌صورت دستی تولید می‌کند، طراحی مولد با تعریف قواعد، محدودیت‌ها و پارامترهای قابل تغییر، امکان ایجاد و کاوش مجموعه گسترده‌ای از گزینه‌ها را فراهم می‌سازد. رویکرد

پارامتریک با تبدیل ویژگی‌های هندسی و عملکردی به متغیرهای کنترل‌پذیر، بستری برای بررسی نظام‌مند اثر تغییرات طراحی فراهم می‌کند Knight (24). و Stiny نیز طراحی مولد را بخشی از چرخش محاسباتی معماری دانسته‌اند که در آن قواعد و الگوریتم‌ها به جای تولید مستقیم یک فرم واحد، فضای گسترده‌ای از راه‌حل‌ها را ایجاد می‌کنند Carpo (25). این تحول را در چارچوب «چرخش دیجیتال دوم» تفسیر می‌کند؛ مرحله‌ای که در آن محاسبات نه صرفاً وسیله بازنمایی، بلکه عاملی فعال در تولید و ارزیابی فرم معماری است (26). بنابراین، در مسئله بازطراحی مراکز تجاری، می‌توان قواعد مستخرج از تحلیل فضایی را به پارامترهایی مانند محل پله‌برقی، تعداد مسیرهای جدید، عرض کریدورها، مساحت وید مرکزی یا موقعیت فضاهای عمومی تبدیل و سناریوهای مختلف را به‌طور نظام‌مند تولید کرد.

یکی از مسیرهای مهم برای استخراج چنین قواعدی، مهندسی معکوس نمونه‌های موفق است. مهندسی معکوس در معماری امکان حرکت از محصول نهایی به سوی منطق شکل‌گیری آن را فراهم می‌سازد و می‌تواند قواعد نهفته در سازمان فضایی یا فرمی نمونه‌های موجود را آشکار کند (27). مرور روش‌های جدید مهندسی معکوس مبتنی بر مدل نیز نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند برای بازسازی منطق سیستم‌ها و تبدیل ویژگی‌های مشاهده‌شده به مدل‌های قابل استفاده در فرایند طراحی به کار رود (28). از منظر روش‌شناختی، این رویکرد برای محیط‌هایی که داده رفتاری گسترده در دسترس نیست اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا می‌توان با تحلیل نمونه‌های مرجع و استخراج قواعد عملکردی، بخشی از کمبود داده را جبران و دانش حاصل را به‌صورت قواعد نرم وارد فرایند طراحی مولد کرد.

با وجود قابلیت طراحی مولد برای تولید گزینه‌های متعدد، مسئله اصلی پس از تولید گزینه‌ها انتخاب راه‌حلی است که میان معیارهای گاه متعارض تعادل ایجاد کند. بهینه‌سازی چندهدفه یکی از پاسخ‌های محاسباتی به این مسئله است. الگوریتم NSGA-II با استفاده از مرتب‌سازی غیرمغلوب و حفظ تنوع راه‌حل‌ها امکان دستیابی به مجموعه‌ای از گزینه‌های پارتو را در مسائل چندهدفه فراهم کرده است (29). بااین‌حال، در بسیاری از مسائل طراحی معماری علاوه بر اهداف هندسی و عملکردی، معیارهایی مانند رضایت کاربران، ارزش اقتصادی، ریسک، هزینه یا میزان انحراف از هدف نیز باید همزمان لحاظ شوند. ازاین‌رو، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توانند مرحله مکمل تولید الگوریتمیک گزینه‌ها باشند.

تکنیک TOPSIS که توسط Yoon و Hwang معرفی شد، یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب گزینه بهینه در شرایط وجود معیارهای متعدد است (30). منطق اصلی آن بر این فرض استوار است که گزینه مطلوب باید کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ضدایده‌آل داشته باشد. مقایسه TOPSIS با سایر روش‌های تصمیم‌گیری مصالحه‌ای نشان داده است که این تکنیک به دلیل ساختار محاسباتی روشن و امکان ترکیب معیارهای سود و هزینه، قابلیت بالایی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها دارد (31). این قابلیت در مسائل طراحی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا یک گزینه ممکن است از نظر پاخور و اتصال فضایی مطلوب باشد، اما هزینه یا ریسک بیشتری ایجاد کند، درحالی‌که گزینه دیگری ممکن است در شاخص‌های دیداری برتری داشته باشد اما بهبود ساختاری محدودی ایجاد کند. بنابراین، TOPSIS بستری برای تبدیل مجموعه‌ای از شاخص‌های ناهمگن به یک نظام رتبه‌بندی قابل تکرار فراهم می‌سازد.

این تحول روش‌شناختی با مفهوم طراحی مبتنی بر شواهد نیز همسو است. در طراحی مبتنی بر شواهد، تصمیم طراحی نه صرفاً بر اساس ترجیح شخصی طراح، بلکه با استفاده از داده‌های قابل اندازه‌گیری، تحلیل‌های تجربی و ارزیابی پیامدهای گزینه‌ها اتخاذ می‌شود (32). چنین رویکردی می‌تواند بخشی از مشکلات

بهره‌وری در صنعت معماری، مهندسی و ساخت را نیز کاهش دهد؛ صنعتی که شکاف بهره‌وری آن در مقایسه با سایر بخش‌ها بارها مورد توجه قرار گرفته است (33). مطالعات قدیمی‌تر حوزه ساخت نیز نشان داده‌اند که ارتقای بهره‌وری مستلزم شناخت نظام‌مند عوامل مؤثر و استفاده از روش‌های تحلیلی برای کاهش عدم قطعیت در تصمیم‌گیری است (34). در نتیجه، حرکت از طراحی شهودی به فرایندهای محاسباتی، داده‌محور و قابل ارزیابی می‌تواند نه تنها کیفیت طراحی، بلکه شفافیت و قابلیت دفاع تصمیم‌های معماری را نیز ارتقا دهد.

باین حال، مرور رویکردهای موجود نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات تنها یکی از اجزای این زنجیره را بررسی کرده‌اند؛ برخی بر تحلیل پیکره‌بندی و رفتار کاربران تمرکز دارند، برخی از طراحی پارامتریک برای تولید فرم بهره می‌گیرند و برخی نیز صرفاً از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب میان گزینه‌های ازپیش تعریف شده استفاده می‌کنند. در مراکز تجاری بزرگ‌مقیاس، به‌ویژه در طبقات فوقانی، نیاز به چارچوبی یکپارچه وجود دارد که نخست نقاط ضعف پیکره‌بندی را شناسایی کند، سپس قواعد اصلاحی را به پارامترهای طراحی تبدیل نماید، چند سناریوی قابل مقایسه ایجاد کند، عملکرد آنها را از نظر فضایی، دیداری، شبکه‌ای و رفتاری شبیه‌سازی نماید و نهایتاً بر اساس معیارهای عملکرد و ریسک، گزینه مطلوب را انتخاب کند. اهمیت این یکپارچگی از آنجا ناشی می‌شود که افزایش پاخور تنها با بهبود یک شاخص منفرد حاصل نمی‌شود؛ بلکه برآیند پیچیده‌ای از کاهش عمق فضایی، افزایش هم‌پیوندی، تقویت انتخاب، ارتقای نفوذپذیری بصری، بهبود مرکزیت شبکه، ایجاد پیوندهای عمودی مؤثر و توزیع مناسب کاربری‌های جاذب است. مطالعات مربوط به حرکت عابران در فضاهای تجاری نیز بر همین پیوند میان ساختار ترافیکی فضا و توزیع واقعی کاربران تأکید دارند (1).

در این میان، طبقات فوقانی مراکز تجاری نمونه‌ای بارز از مسئله‌ای هستند که در آن راه‌حل صرفاً کالبدی یا صرفاً مدیریتی کفایت نمی‌کند. کاهش تدریجی پاخور با افزایش ارتفاع، ضعف خوانایی مسیرهای عمودی، تمرکز جریان در تعداد محدودی از هسته‌های حرکتی و شکل‌گیری نواحی کم‌جاذبه می‌تواند ظرفیت اقتصادی طبقات فوقانی را به‌طور جدی محدود کند (2). از سوی دیگر، پیشرفت‌های اخیر در تحلیل هندسی با وضوح بالا، کلان‌داده، شبکه‌های فضایی و سامانه‌های هوشمند طراحی، امکان آن را فراهم کرده‌اند که این چالش نه به‌صورت شهودی، بلکه با استفاده از مدل‌های ترکیبی و سنجش‌پذیر بررسی شود (10, 12, 22). از این منظر، استفاده هم‌زمان از طراحی مولد، تحلیل نحو فضا، شبیه‌سازی عامل‌بنیان و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند مسیر مناسبی برای تبدیل شواهد تحلیلی به مداخلات فضایی عملیاتی باشد.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر پارامتری‌سازی قواعد نرم طراحی، تولید الگوریتمیک گزینه‌های بازطراحی، ارزیابی و رتبه‌بندی آنها با تکنیک TOPSIS و شبیه‌سازی گزینه بهینه به‌منظور ارتقای پیکره‌بندی فضایی، کاهش نقاط کور و افزایش پاخور و عملکرد طبقه G2 مجتمع ایران‌مال است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر رویکرد، کمی، الگوریتمیک و مبتنی بر شبیه‌سازی فضایی و تصمیم‌گیری چندمعیاره بود که با هدف بهینه‌سازی پیکره‌بندی و عملکرد فضایی طبقات فوقانی مراکز تجاری انجام شد. نمونه مورد مطالعه، طبقه G2 مجتمع تجاری ایران‌مال بود که بر اساس نتایج فاز پیشین پژوهش، دارای ۲۸ نقطه کور تجاری، میانگین هم‌پیوندی ۱۶.۷۷، میانگین عمق فضایی ۶.۰۶ گام و پاخور روزانه حدود ۴,۲۰۰ نفر بود و از این رو به‌عنوان بستر اعمال و ارزیابی مداخلات فضایی انتخاب شد. فرایند پژوهش در قالب یک زنجیره پنج‌گام یکپارچه شامل پارامتری‌سازی قواعد نرم طراحی، تولید الگوریتمیک گزینه‌های

فضایی، تعریف و وزن دهی شاخص های ارزیابی، رتبه بندی گزینه ها با تکنیک TOPSIS و در نهایت شبیه سازی و بهینه سازی گزینه منتخب انجام گرفت. در مرحله نخست، شش قاعده نرم استخراج شده از تحلیل پیشین پیکره بندی فضایی و نقاط کور، به متغیرهای کمی قابل کنترل تبدیل شدند. این متغیرها شامل موقعیت پله برقی ها با دامنه جابه جایی ۵ تا ۲۰ متر و مقدار پیش فرض ۱۰ متر، تعداد مسیرهای جدید در دامنه صفر تا چهار مسیر با مقدار پیش فرض دو مسیر، افزایش عرض کریدورهای اصلی در دامنه ۲۰ تا ۵۰ درصد با مقدار پیش فرض ۳۵ درصد، جابه جایی برندهای اصلی در دامنه ۱۰ تا ۳۰ متر با مقدار پیش فرض ۲۰ متر، افزایش مساحت وید مرکزی در دامنه ۱۰ تا ۳۰ درصد با مقدار پیش فرض ۲۰ درصد، و جابه جایی فضاهای عمومی در دامنه ۵ تا ۱۵ متر با مقدار پیش فرض ۱۰ متر بود. شاخص های فضایی متناظر با این پارامترها نیز شامل انتخاب، مرکزیت بینابینی، عمق فضایی، مرکزیت نزدیکی، ظرفیت جریانی، نفوذپذیری بصری و مساحت ایزوویست بودند. بر پایه ترکیب نظام مند این پارامترها، پنج گزینه فضایی متمایز تولید شد. گزینه نخست با منطق حداقل مداخله شامل جابه جایی ۵ متری پله برقی، عدم ایجاد مسیر جدید، افزایش ۲۰ درصدی عرض کریدورها و تغییرات محدود در فضاها بود؛ گزینه دوم یک سناریوی متوازن با یک مسیر جنوبی و افزایش ۳۰ درصدی عرض کریدورها را دنبال می کرد؛ گزینه سوم به عنوان سناریوی مداخله گسترده شامل جابه جایی ۱۵ متری پله برقی، افزودن یک پله برقی جدید، ایجاد دو مسیر جنوبی و غربی، افزایش ۴۰ درصدی عرض کریدورها و بازچیدمان کامل برندهای اصلی بود؛ گزینه چهارم با تأکید بر بهبود بصری، افزایش ۳۰ درصدی وید مرکزی را در کانون مداخله قرار داد؛ و گزینه پنجم با رویکرد دسترسی محور، سه مسیر جنوبی، غربی و شرقی و افزایش ۳۵ درصدی عرض کریدورها را دربر گرفت. رشد مورد انتظار پاخور برای این پنج سناریو به ترتیب ۱۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۰، ۲۰ تا ۲۵، ۳۰ تا ۱۵ و ۲۰ تا ۲۵ درصد در نظر گرفته شد.

داده های پژوهش از طریق مجموعه ای از شاخص های کمی عملکردی، ریسک، نحوی، دیداری و شبکه ای گردآوری شد و برای ارزیابی جامع گزینه های طراحی، دو گروه اصلی شاخص های کلیدی عملکرد و شاخص های کلیدی ریسک تعریف گردید. شاخص های کلیدی عملکرد به عنوان معیارهای سود شامل پاخور با وزن ۰.۳۰، نرخ اشغال فضا با وزن ۰.۲۵، رضایت کاربران با وزن ۰.۲۰، تعاملات اجتماعی با وزن ۰.۱۵ و ارزش اقتصادی فضاها با وزن ۰.۱۰ بودند. پاخور به عنوان مستقیم ترین شاخص موفقیت تجاری و بر مبنای تعداد مراجعه کنندگان روزانه در نظر گرفته شد؛ نرخ اشغال فضا بیانگر نسبت مساحت تجاری فعال به کل مساحت قابل اجاره بود؛ رضایت کاربران بر پایه ارزیابی کیفی خوانایی، آسایش و جذابیت بصری فضا تعریف شد؛ تعاملات اجتماعی بر اساس تراکم مواجهات و توقف کاربران در ایزوویست های عمومی سنجیده شد؛ و ارزش اقتصادی فضاها با توجه به رابطه نرخ اجاره بها و شاخص هم پیوندی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مقابل، شاخص های کلیدی ریسک به عنوان معیارهای هزینه شامل تعداد نقاط کور باقی مانده با وزن ۰.۵۰، انحراف از پاخور پیش بینی شده با وزن ۰.۳۰ و انحراف از بودجه با وزن ۰.۲۰ بودند. نقاط کور باقی مانده بر اساس فضاهایی با هم پیوندی کمتر از ۰.۳ و عمق فضایی نرمال شده بیشتر از ۳ شناسایی شدند؛ انحراف از پاخور به صورت قدر مطلق اختلاف میان پاخور شبیه سازی شده و مقدار هدف تعریف شد؛ و انحراف از بودجه بر اساس درصد اختلاف هزینه های تخمینی تخریب و بازسازی نسبت به سقف بودجه محاسبه گردید. وزن دهی معیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و بر پایه ارزیابی خبرگان انجام شد.

برای استخراج داده های فضایی، نرم افزار DepthmapX به منظور انجام تحلیل محوری و تحلیل گراف دیداری و محاسبه شاخص هایی نظیر هم پیوندی، عمق فضایی، انتخاب، اتصال، مساحت ایزوویست و نفوذپذیری بصری به کار گرفته شد. همچنین Gephi و AGraph برای تحلیل ساختار شبکه مکانی و محاسبه شاخص های مرکزیت، از جمله مرکزیت بینابینی و مرکزیت نزدیکی، استفاده شدند. شبیه سازی عامل بنیان جریان کاربران، پیش بینی پاخور و برآورد تعاملات

اجتماعی از طریق MassMotion انجام شد و داده‌های حاصل از این ابزارها، همراه با شاخص‌های عملکردی و ریسک، ماتریس تصمیم نهایی پژوهش را تشکیل دادند.

تحلیل داده‌ها در چند مرحله متوالی و مکمل انجام شد. ابتدا هر یک از پنج گزینه طراحی با استفاده از تحلیل محوری، تحلیل گراف دیداری، تحلیل شبکه و شبیه‌سازی عامل‌بنیان ارزیابی شد تا مقادیر کمی شاخص‌های فضایی و عملکردی استخراج گردد. سپس ماتریس تصمیم با استفاده از پنج شاخص کلیدی عملکرد و سه شاخص کلیدی ریسک تشکیل شد. برای مقایسه گزینه‌هایی که شاخص‌های آنها دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوت بودند، ماتریس تصمیم با روش نرمال‌سازی برداری بی‌مقیاس شد و سپس مقادیر نرمال‌شده در اوزان تعیین‌شده از طریق AHP ضرب شدند تا ماتریس تصمیم موزون به‌دست آید. رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس تکنیک TOPSIS در شش مرحله شامل تشکیل ماتریس تصمیم، نرمال‌سازی برداری، تشکیل ماتریس موزون، تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت و راه‌حل ضدایده‌آل منفی، محاسبه فاصله اقلیدسی هر گزینه از دو راه‌حل مرجع، و محاسبه ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه انجام شد. در این روش، برای معیارهای سود مانند پاخور، نرخ اشغال، رضایت کاربران، تعاملات اجتماعی و ارزش اقتصادی، مقادیر بالاتر به‌عنوان وضعیت مطلوب و برای معیارهای ریسک، مقادیر پایین‌تر به‌عنوان وضعیت مطلوب در تعیین راه‌حل ایده‌آل لحاظ شدند. ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه از نسبت فاصله آن از راه‌حل ضدایده‌آل به مجموع فاصله از راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل محاسبه شد و گزینه دارای بزرگ‌ترین ضریب نزدیکی به‌عنوان گزینه برتر انتخاب گردید. محاسبات TOPSIS در محیط Excel انجام شد. پس از رتبه‌بندی اولیه، برای بررسی استواری تصمیم، تحلیل حساسیت با تغییر $\pm 20\%$ درصدی اوزان سه شاخص اصلی شامل پاخور، نرخ اشغال فضا و نقاط کور باقی‌مانده انجام گرفت و تغییر رتبه گزینه‌های اصلی در سناریوهای مختلف بررسی شد. در مرحله نهایی، گزینه برتر بر اساس نتایج تحلیل حساسیت و بازخورد کارشناسی تحت اصلاحات تکمیلی قرار گرفت؛ این اصلاحات شامل کاهش ۲۵ درصدی مساحت بیضی گره ۱۴، ایجاد مسیر شرقی جدید با عرض ۱۰ متر برای اتصال گره‌های ۶۳ و ۶۶ به شبکه اصلی، استقرار سه فضای عمومی در نقاط کور پیشین، جابه‌جایی ۱۵ متری یکی از پله‌برقی‌ها و افزودن یک پله‌برقی جدید بود. سپس گزینه اصلاح‌شده با عنوان گزینه ۳+ مجدداً با همان مجموعه شاخص‌های فضایی، دیداری، شبکه‌ای، عملکردی و ترکیبی شبیه‌سازی و ارزیابی شد تا میزان بهبود آن نسبت به وضع موجود و گزینه منتخب اولیه تعیین شود.

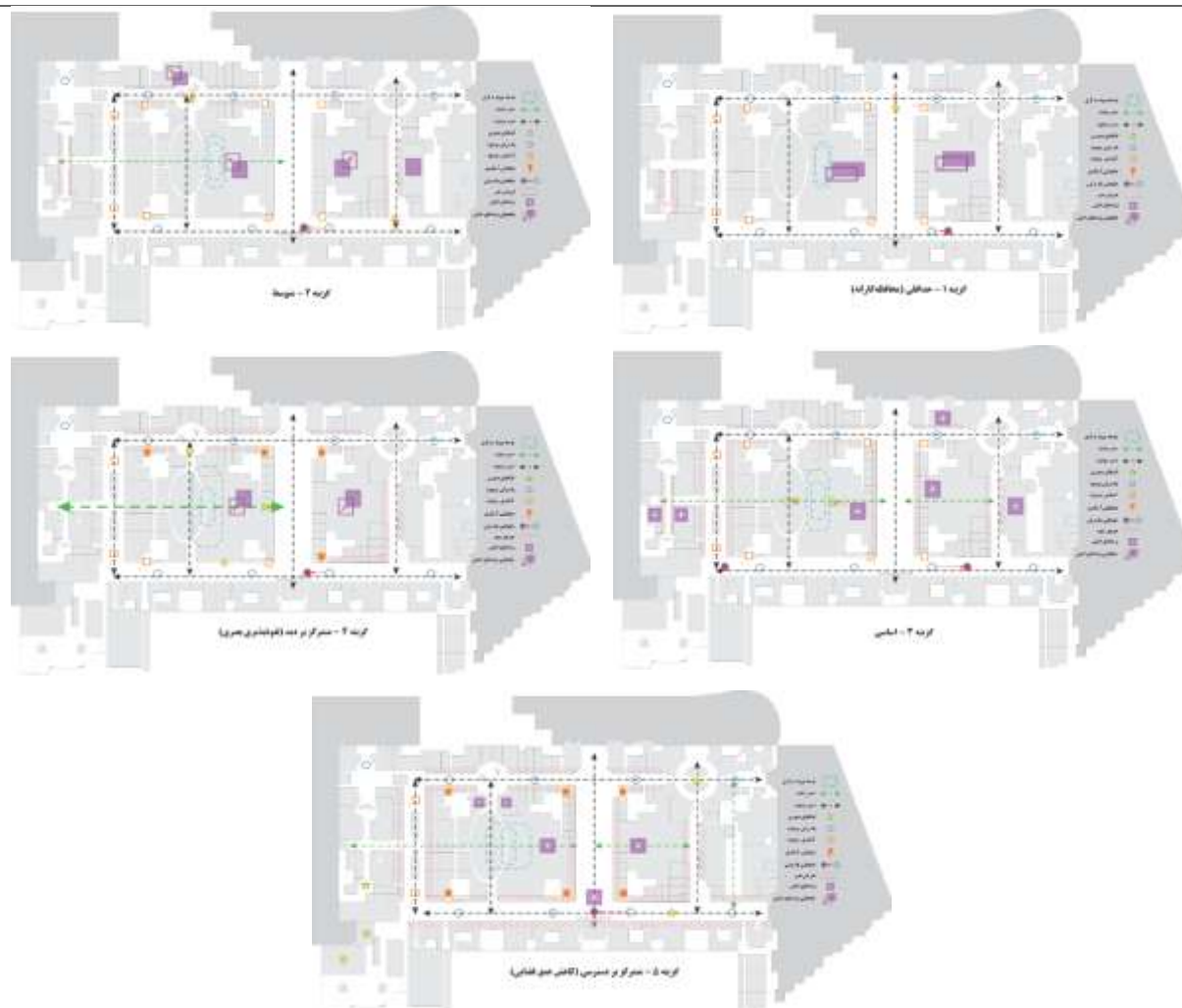
یافته‌ها

پنج گزینه فضایی تولیدشده بر اساس شش قاعده نرم طراحی، با استفاده از تحلیل‌های نحو فضا در نرم‌افزار DepthmapX و شبیه‌سازی عامل‌بنیان MassMotion ارزیابی شدند. مقایسه اولیه نشان داد که شدت و نوع مداخله در شبکه حرکتی، نحوه استقرار پله‌برقی‌ها، تعداد مسیرهای جدید، تغییرات وید مرکزی و بازآرایی عناصر عملکردی، پیامدهای متفاوتی برای هم‌پیوندی، عمق فضایی، انتخاب، نفوذپذیری بصری، تعداد نقاط کور و پاخور ایجاد کرده است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، گزینه ۳ در اغلب شاخص‌های ساختاری و عملکردی نسبت به سایر گزینه‌ها عملکرد بهتری داشت، درحالی‌که گزینه ۴ بیشترین بهبود را در شاخص‌های دیداری نشان داد.

جدول ۱. مقایسه جامع شاخص‌های فضایی و عملکردی گزینه‌های پنج‌گانه طراحی

شاخص / متغیر	وضع موجود	گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴	گزینه ۵
میانگین هم‌پیوندی (Integration)	۱۶.۷۷	۱۷.۶۰ (+۵.۰٪)	۱۸.۹۰ (+۱۲.۷٪)	۲۱.۲۰ (+۲۶.۴٪)	۱۹.۴۰ (+۱۵.۷٪)	۲۰.۱۰ (+۱۹.۹٪)

۴.۶۰ (-۲۴.۱٪)	۴.۹۰ (-۱۹.۱٪)	۴.۵۰ (-۲۵.۷٪)	۵.۱۰ (-۱۵.۸٪)	۵.۷۰ (-۵.۹٪)	۶.۰۶	میانگین عمق فضایی (MD _n)
۵,۰۰۰ (+۲۹.۹٪)	۴,۶۰۰ (+۱۹.۵٪)	۵,۲۰۰ (+۳۵.۱٪)	۴,۸۵۰ (+۲۶.۰٪)	۴,۱۰۰ (+۶.۵٪)	۳,۸۵۰	میانگین شاخص انتخاب (Choice)
۱۰ (-۶۴.۳٪)	۱۲ (-۵۷.۱٪)	۸ (-۷۱.۴٪)	۱۸ (-۳۵.۷٪)	۲۲ (-۲۱.۴٪)	۲۸	تعداد نقاط کور باقی مانده
۴۵ (+۲۸.۶٪)	۵۵ (+۵۷.۱٪)	۴۸ (+۳۷.۱٪)	۴۲ (+۲۰.۰٪)	۳۷ (+۵.۷٪)	۳۵	میانگین ایزوویست (m ²)
۰.۴۴ (+۵۷.۱٪)	۰.۵۲ (+۸۵.۷٪)	۰.۵۰ (+۷۸.۶٪)	۰.۳۶ (+۲۸.۶٪)	۰.۳۰ (+۷.۱٪)	۰.۲۸	نفوذپذیری بصری
۵,۳۰۰ (+۲۶.۳٪)	۵,۰۰۰ (+۱۹.۰٪)	۵,۶۰۰ (+۳۳.۳٪)	۵,۱۰۰ (+۲۱.۴٪)	۴,۶۰۰ (+۹.۵٪)	۴,۲۰۰	پاخور پیش‌بینی شده (نفر/روز)
۷۸٪ (+۱۴.۷٪)	۷۶٪ (+۱۱.۸٪)	۸۰٪ (+۱۷.۶٪)	۷۴٪ (+۸.۸٪)	۷۰٪ (+۲.۹٪)	۶۸٪	نرخ اشغال فضا



شکل ۱. دیاگرام شماتیک پنج گزینه طراحی، گزینه‌های ۱ تا ۵ (منبع: تحلیل نگارنده)

بررسی تفصیلی گزینه ۱ نشان داد که این گزینه با منطق مداخله حداقلی و محافظه کارانه، شامل جابه‌جایی ۵ متری پله‌برقی شرقی میانی و افزایش ۲۰ درصدی عرض کریدورهای اصلی بود. نتایج DepthmapX نشان داد که این تغییرات موجب بهبود موضعی در گره‌های مجاور پله‌برقی شد، اما ساختار کلی شبکه حرکتی تقریباً بدون تغییر باقی ماند. میانگین هم‌پیوندی از ۱۶.۷۷ به ۱۷.۶۰ افزایش یافت، میانگین عمق فضایی از ۶.۰۶ به ۵.۷۰ گام کاهش پیدا کرد، شاخص انتخاب به ۴,۱۰۰ رسید، تعداد نقاط کور از ۲۸ به ۲۲ کاهش یافت، پاخور به ۴,۶۰۰ نفر در روز افزایش یافت و نرخ اشغال فضا به ۷۰ درصد رسید. بنابراین، این گزینه با وجود ایجاد بهبودهای محدود، نتوانست مسئله انزوای ساختاری بخش‌های پیرامونی طبقه را به‌طور اساسی برطرف کند.

گزینه ۲ با رویکردی متوازن و مداخله متوسط طراحی شده بود. ایجاد یک مسیر جدید در ضلع جنوبی موجب شد عمق فضایی گره‌های جنوبی به‌طور متوسط حدود ۱۰۲ گام کاهش یابد و هم‌پیوندی این بخش‌ها تا حدود ۱۵ درصد افزایش پیدا کند. با این حال، گره‌های واقع در گوشه‌های شمال شرقی و شمال غربی، به‌ویژه گره‌های ۳۹، ۴۰، ۵۵ تا ۵۸ و ۶۳ تا ۶۶، همچنان در وضعیت انزوای فضایی باقی ماندند. در این گزینه، هم‌پیوندی به ۱۸،۹۰، عمق فضایی به ۵۰،۱۰ گام، شاخص انتخاب به ۴،۸۵۰، تعداد نقاط کور به ۱۸، پاخور به ۵،۱۰۰ نفر در روز و نرخ اشغال به ۷۴ درصد رسید.

گزینه ۳ با رویکرد تغییرات اساسی و تحول‌آفرین، ساختار شبکه حرکتی طبقه G۲ را به‌صورت بنیادین بازتعریف کرد. افزودن یک پله‌برقی جدید و ایجاد دو مسیر افقی جدید باعث شد میانگین هم‌پیوندی با ۲۶،۴ درصد افزایش به ۲۱،۲۰ برسد و میانگین عمق فضایی با ۲۵،۷ درصد کاهش به ۴۰،۵۰ گام تنزل یابد. شاخص انتخاب با افزایش ۳۵،۱ درصدی به ۵،۲۰۰ رسید و تعداد نقاط کور از ۲۸ به تنها ۸ نقطه کاهش پیدا کرد. همچنین، اتصال به ۲،۴۰ رسید که در مقایسه با وضع موجود افزایش ۱۴۰ درصدی را نشان می‌داد و نفوذپذیری بصری نیز با افزایش ۷۸،۶ درصدی به ۰،۵۰ رسید. پاخور روزانه این گزینه ۵،۶۰۰ نفر و نرخ اشغال فضا ۸۰ درصد برآورد شد.

گزینه ۴ عمدتاً بر بهبود دیداری - ادراکی و ارتقای نفوذپذیری بصری متمرکز بود. افزایش ۳۰ درصدی مساحت وید مرکزی و حذف موانع دیداری کریدورهای اصلی موجب شد میانگین مساحت ایزوویست از ۳۵ به ۵۵ مترمربع افزایش یابد که معادل ۵۷،۱ درصد بهبود بود. نفوذپذیری بصری نیز از ۰،۲۸ به ۰،۵۲ افزایش یافت و بیشترین مقدار این شاخص را در میان گزینه‌های اولیه ثبت کرد. رضایت کاربران به ۴،۳ از ۵ رسید که نسبت به وضع موجود ۳۴،۴ درصد افزایش داشت. با وجود این، به دلیل تکمیل نشدن حلقه‌های حرکتی شرقی - غربی، اثر ساختاری این گزینه محدودتر از گزینه ۳ بود؛ میانگین هم‌پیوندی آن ۱۹،۴۰، عمق فضایی ۴۰،۹۰ گام، شاخص انتخاب ۴،۶۰۰، تعداد نقاط کور ۱۲ و پاخور ۵،۰۰۰ نفر در روز بود.

گزینه ۵ با رویکرد دسترسی محور و تمرکز بر کاهش عمق فضایی طراحی شد. ایجاد سه مسیر جدید جنوبی، غربی و شرقی موجب افزایش انسجام شبکه و کاهش میانگین عمق فضایی به ۴۰،۶۰ گام شد که نسبت به وضع موجود ۲۴،۱ درصد کاهش داشت. هم‌پیوندی به ۲۰،۱۰ و شاخص انتخاب به ۵،۰۰۰ افزایش یافت و تعداد نقاط کور به ۱۰ نقطه کاهش پیدا کرد. پاخور این گزینه ۵،۳۰۰ نفر در روز و نرخ اشغال آن ۷۸ درصد بود. با این حال، به دلیل تمرکز مداخله بر اتصالات افقی و عدم تکمیل مناسب حلقه‌های حرکتی عمودی، ۱۰ نقطه کور عمدتاً در گوشه‌های شمال شرقی و شمال غربی باقی ماند.

جدول ۲. جمع‌بندی ویژگی‌ها و دستاوردهای اصلی گزینه‌های طراحی

گزینه	منطق مداخله	شاخص‌ها و دستاوردهای شاخص
گزینه ۱	تغییرات حداقلی و محافظه‌کارانه	هم‌پیوندی ۱۷،۶۰؛ عمق ۵،۷۰؛ ۲۲ نقطه کور؛ پاخور ۴،۶۰۰ نفر/روز؛ اشغال ۷۰٪
گزینه ۲	مداخله متوازن	هم‌پیوندی ۱۸،۹۰؛ عمق ۵،۱۰؛ ۱۸ نقطه کور؛ پاخور ۵،۱۰۰ نفر/روز؛ اشغال ۷۴٪
گزینه ۳	تغییرات اساسی	هم‌پیوندی ۲۱،۲۰؛ عمق ۴،۵۰؛ انتخاب ۵،۲۰۰؛ ۸ نقطه کور؛ پاخور ۵،۶۰۰ نفر/روز؛ اشغال ۸۰٪
گزینه ۴	بهبود بصری - ادراکی	ایزوویست $m^2 55$ ؛ نفوذپذیری بصری ۰،۵۲؛ رضایت ۴،۳؛ ۱۲ نقطه کور؛ پاخور ۵،۰۰۰ نفر/روز
گزینه ۵	بهبود دسترسی	عمق ۴،۶۰؛ انتخاب ۵،۰۰۰؛ ۱۰ نقطه کور؛ پاخور ۵،۳۰۰ نفر/روز؛ اشغال ۷۸٪

پس از استخراج شاخص‌های عملکردی و ریسک، هشت معیار ارزیابی شامل پنج شاخص کلیدی عملکرد و سه شاخص کلیدی ریسک وارد ماتریس تصمیم شدند و پس از اعمال اوزان حاصل از AHP، فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و ضدایده‌آل و در نهایت ضریب نزدیکی نسبی محاسبه شد. نتایج نشان داد

که گزینه ۳ با ضریب نزدیکی ۰.۷۶۶ در رتبه نخست قرار گرفت. این گزینه کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت، برابر با ۰.۲۳۴، و بیشترین فاصله را از راه‌حل ضدایده‌آل، برابر با ۰.۷۶۶، داشت و بنابراین مطلوب‌ترین توازن را میان حداکثرسازی عملکرد و حداقل‌سازی ریسک ایجاد کرد.

جدول ۳. نتایج رتبه‌بندی گزینه‌های پنج‌گانه بر اساس تکنیک TOPSIS

گزینه	فاصله از ایده‌آل مثبت (S_i^+)	فاصله از ضدایده‌آل (S_i^-)	امتیاز TOPSIS (C_i^*)	رتبه	نتیجه ارزیابی
گزینه ۱	۰.۷۸۵	۰.۲۱۵	۰.۲۱۵	۵	غیرقابل قبول
گزینه ۲	۰.۵۴۲	۰.۴۵۸	۰.۴۵۸	۴	متوسط
گزینه ۳	۰.۲۳۴	۰.۷۶۶	۰.۷۶۶	۱	گزینه برتر
گزینه ۴	۰.۳۸۷	۰.۶۱۳	۰.۶۱۳	۲	گزینه دوم؛ برتری دیداری
گزینه ۵	۰.۴۴۱	۰.۵۵۹	۰.۵۵۹	۳	گزینه سوم

به‌منظور بررسی استواری نتایج رتبه‌بندی، اوزان سه شاخص کلیدی شامل پاخور، نرخ اشغال فضا و تعداد نقاط کور باقی‌مانده به میزان $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شدند. همان‌گونه که جدول ۴ نشان می‌دهد، گزینه ۳ در شش سناریو از هفت سناریوی بررسی‌شده همچنان رتبه نخست را حفظ کرد. تنها در سناریوی کاهش ۲۰ درصدی اهمیت نرخ اشغال، که وزن این شاخص را از ۰.۲۵ به ۰.۲۰ کاهش داد، گزینه ۴ به رتبه نخست منتقل شد و گزینه ۳ در رتبه دوم قرار گرفت. این الگو نشان داد که انتخاب گزینه ۳ نسبت به تغییرات اوزان معیارها از استواری قابل‌توجهی برخوردار بود.

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت اوزان شاخص‌های کلیدی

سناریوی تحلیلی	وزن پاخور	وزن نرخ اشغال	وزن نقاط کور	رتبه گزینه ۳	رتبه گزینه ۴	گزینه منتخب
پایه	۰.۳۰	۰.۲۵	۰.۵۰	۱	۲	گزینه ۳
تأکید بر پاخور	۰.۳۶ (+۲۰٪)	۰.۲۵	۰.۵۰	۱	۲	گزینه ۳
کاهش اهمیت پاخور	۰.۲۴ (-۲۰٪)	۰.۲۵	۰.۵۰	۱	۲	گزینه ۳
تأکید بر نرخ اشغال	۰.۳۰	۰.۳۰ (+۲۰٪)	۰.۵۰	۱	۲	گزینه ۳
کاهش اهمیت نرخ اشغال	۰.۳۰	۰.۲۰ (-۲۰٪)	۰.۵۰	۲	۱	گزینه ۴
تأکید بر نقاط کور	۰.۳۰	۰.۲۵	۰.۶۰ (+۲۰٪)	۱	۲	گزینه ۳
کاهش اهمیت نقاط کور	۰.۳۰	۰.۲۵	۰.۴۰ (-۲۰٪)	۱	۲	گزینه ۳

پس از انتخاب گزینه ۳ به‌عنوان مناسب‌ترین سناریوی اولیه، اصلاحات تکمیلی بر اساس تحلیل حساسیت و بازخورد کارشناسان اعمال شد و گزینه بهینه‌شده ۳+ شکل گرفت. در نخستین مداخله، مساحت بیضی گره ۱۴ به میزان ۲۵ درصد کاهش یافت و فضای خالی پیرامون آن به‌صورت متناسب افزایش داده شد تا جریان و پیوستگی بصری تقویت شود. در دومین مداخله، یک مسیر جدید شرقی با عرض ۱۰ متر برای اتصال گره‌های ۶۳ و ۶۶ به شبکه اصلی ایجاد شد. در سومین مداخله، سه فضای عمومی یا رویدادی در نقاط کور سابق، شامل گره‌های ۶۳، ۳۹ و ۱۴۷، استقرار یافتند. در نهایت، برای تکمیل حلقه‌های حرکتی عمودی، پله‌برقی گره ۰ به میزان ۱۵ متر به سمت غرب جابه‌جا و یک پله‌برقی جدید در گره ۱۴۶ افزوده شد.

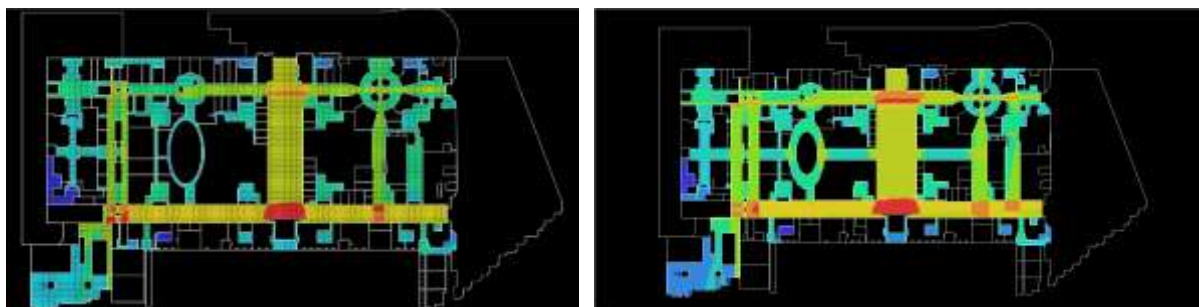
جدول ۵. اصلاحات تکمیلی اعمال شده برای تبدیل گزینه ۳ به گزینه ۳+

حوزه اصلاح	مداخله انجام شده	هدف فضایی - عملکردی
هندسه مرکزی	کاهش ۲۵٪ مساحت بیضی گره ۱۴	بازسازی جریان دید و افزایش پیوستگی بصری
اتصال شرقی	ایجاد مسیر ۱۰ متری میان گره‌های ۶۳ و ۶۶ و شبکه اصلی	رفع انزوای بخش شرقی
فعال‌سازی نقاط کور	استقرار ۳ فضای عمومی/رویدادی در گره‌های ۶۳، ۳۹ و ۱۴۷	تبدیل نقاط کم‌تردد به نقاط جذب و توقف
حلقه‌های عمودی	جابه‌جایی ۱۵ متری پله‌برقی گره ۰ و افزودن پله‌برقی در گره ۱۴۶	تکمیل پیوندهای عمودی و توزیع متوازن جریان

ارزیابی مجدد گزینه ۳+ نشان داد که اصلاحات تکمیلی افزون بر بهبود گزینه ۳، فاصله قابل توجهی نیز با وضع موجود ایجاد کرده است. هم‌پوندی از ۲۱.۲۰ در گزینه ۳ به ۲۱.۶۰ در گزینه ۳+ افزایش یافت و نسبت به وضع موجود ۲۸.۸ درصد رشد نشان داد. عمق فضایی از ۴.۵۰ به ۴.۳۵ گام کاهش یافت و در مقایسه با وضع موجود ۲۸.۲ درصد کمتر شد. شاخص انتخاب نیز به ۵,۴۵۰ افزایش یافت که ۴۱.۶ درصد بالاتر از وضع موجود بود. در تحلیل دیداری، اتصال به ۲.۶۰، مساحت ایزوویست به ۵۸ مترمربع و نفوذپذیری بصری به ۰.۵۵ رسید. در سطح عملکردی، تعداد نقاط کور به ۵ نقطه کاهش یافت، پاخور روزانه به ۵,۷۵۰ نفر، نرخ اشغال به ۸۲ درصد، رضایت کاربران به ۴.۲ از ۵ و تعاملات اجتماعی به ۷۵ مواجهه یا توقف در ساعت افزایش یافت. امتیاز TOPSIS گزینه نهایی نیز به ۰.۷۹۰ رسید.

جدول ۶. شاخص‌های گزینه بهینه شده ۳+ و تغییرات آن نسبت به گزینه ۳ و وضع موجود

دسته	شاخص	مقدار گزینه ۳+	تغییر نسبت به گزینه ۳	تغییر نسبت به وضع موجود
تحلیل محوری	هم‌پوندی	۲۱.۶۰	+۱.۹٪	+۲۸.۸٪
تحلیل محوری	عمق فضایی	۴.۳۵ گام	-۳.۳٪	-۲۸.۲٪
تحلیل محوری	شاخص انتخاب	۵,۴۵۰	+۴.۸٪	+۴۱.۶٪
تحلیل VGA	اتصال	۲.۶۰	+۸.۳٪	+۱۶۰.۰٪
تحلیل VGA	مساحت ایزوویست	۵۸ m ²	+۵.۵٪	+۶۵.۷٪
تحلیل VGA	نفوذپذیری بصری	۰.۵۵	+۱۰.۰٪	+۹۶.۴٪
تحلیل شبکه‌ای	مرکزیت بینابینی	≈۹۲۰	+۸.۲٪	+۸.۲٪
تحلیل شبکه‌ای	مرکزیت نزدیکی	≈۰.۱۹۰	+۲.۷٪	+۲.۷٪
عملکردی	نقاط کور	۵	-۳۷.۵٪	-۸۲.۱٪
عملکردی	پاخور	۵,۷۵۰ نفر/روز	+۲.۷٪	+۳۶.۹٪
عملکردی	نرخ اشغال	۸۲٪	+۲.۵٪	+۲۰.۶٪
عملکردی	رضایت کاربران	۴.۲	+۲.۴٪	+۳۱.۳٪
عملکردی	تعاملات اجتماعی	۷۵ در ساعت	+۷.۱٪	+۶۶.۷٪
ترکیبی	امتیاز TOPSIS	۰.۷۹۰	+۳.۱٪	+۶۵۲.۴٪



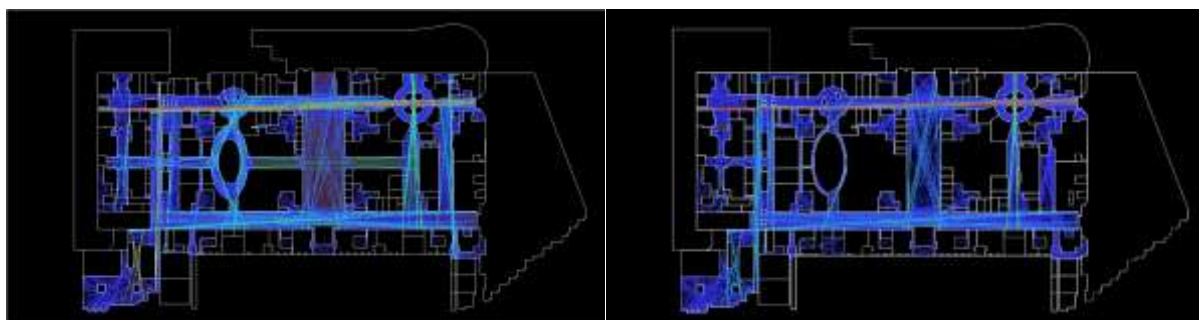
شکل ۲. مقایسه نقشه هم‌پیوندی؛ وضع موجود در مقابل گزینه ۳+ (منبع: خروجی نرم‌افزار DepthmapX)

مقایسه نقشه‌های هم‌پیوندی نشان داد که در وضع موجود، مقادیر بالای هم‌پیوندی عمدتاً در هسته مرکزی متمرکز بودند، درحالی‌که در گزینه ۳+ نواحی دارای مقادیر بالاتر هم‌پیوندی در سطح گسترده‌تری از طبقه توزیع شدند. این تغییر با افزایش ۲۸۸ درصدی میانگین هم‌پیوندی از ۱۶.۷۷ به ۲۱.۶۰ همراه بود و نشان داد که مداخله نهایی، دسترسی پیکره‌بندی‌شده را از حالت تمرکز شدید در هسته مرکزی به توزیعی متوازن‌تر در کل طبقه منتقل کرده است.



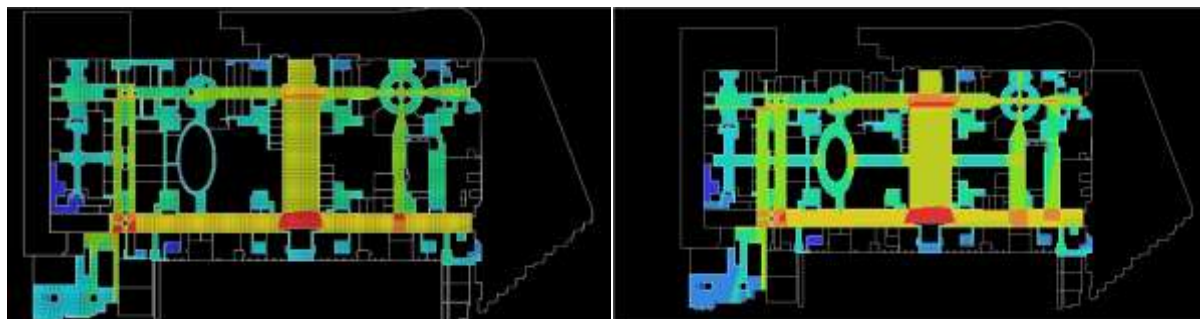
شکل ۳. مقایسه نقشه عمق فضایی؛ وضع موجود در مقابل گزینه ۳+ (منبع: خروجی نرم‌افزار DepthmapX)

در نقشه عمق فضایی وضع موجود، بخش‌های انتهایی شرقی و غربی دارای عمق بیش از ۸ گام بودند، درحالی‌که در گزینه ۳+ عمق فضاهای طبقه به زیر ۶ گام کاهش یافت. میانگین عمق فضایی نیز از ۶.۰۶ به ۴.۳۵ گام رسید که معادل ۲۸.۲ درصد کاهش بود. این یافته نشان داد که ایجاد پیوندهای جدید، فاصله توپولوژیک فضاهای پیرامونی را از شبکه اصلی کاهش داده است.



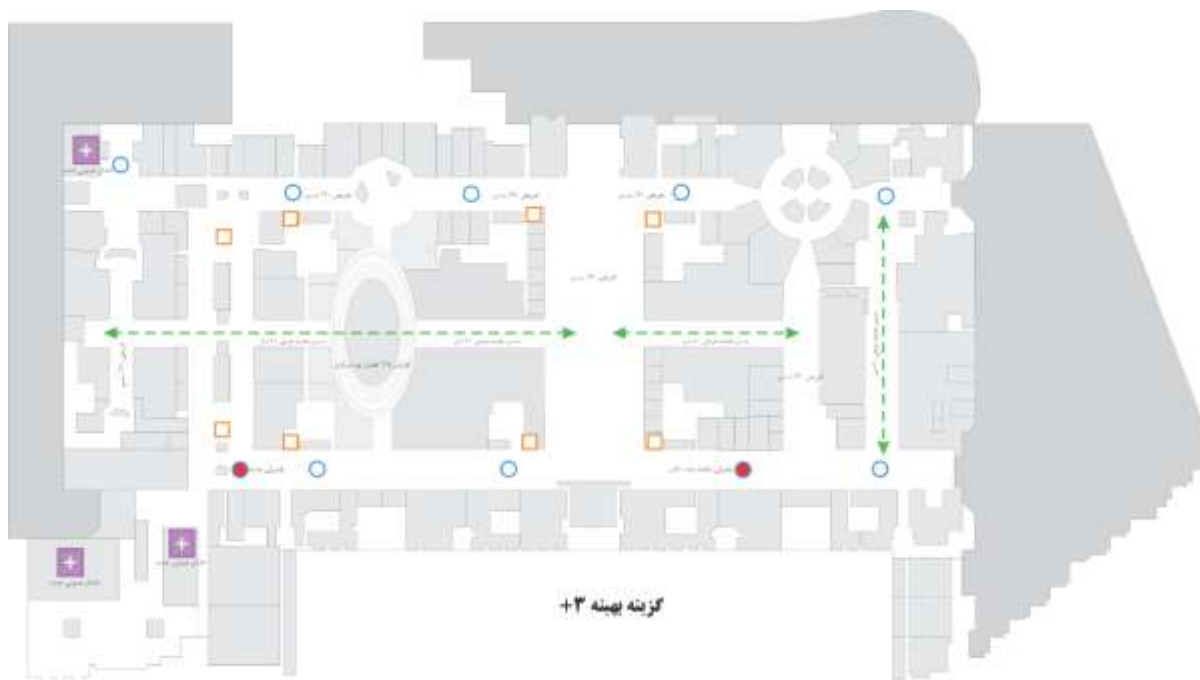
شکل ۴. مقایسه نقشه شاخص انتخاب؛ وضع موجود در مقابل گزینه ۳+ (منبع: خروجی نرم‌افزار DepthmapX)

تحلیل شاخص انتخاب نشان داد که تعداد خطوط جریانی با مقدار Choice بیش از ۱۰,۰۰۰ از ۳۰ خط در وضع موجود به ۸۵ خط در گزینه ۳+ افزایش یافت. هم‌زمان، میانگین شاخص انتخاب از ۳,۸۵۰ به ۵,۴۵۰ رسید که معادل ۴۱.۶ درصد رشد بود. این تغییر نشان‌دهنده افزایش تعداد مسیرهای محتمل عبور و توزیع متوازن‌تر جریان پیاده در شبکه فضایی طبقه بود.



شکل ۵. مقایسه نقشه نفوذپذیری بصری؛ وضع موجود در مقابل گزینه ۳+ (منبع: خروجی نرم‌افزار DepthmapX)

نتایج تحلیل دیداری نشان داد که اصلاح هندسه بیضی گره ۱۴ و ایجاد کریدور شرقی ۱۰ متری موجب اتصال بخش‌هایی شد که در وضع موجود به‌صورت جزایر دیداری جدا افتاده عمل می‌کردند. در نتیجه، نفوذپذیری بصری از ۰.۲۸ به ۰.۵۵ افزایش یافت و رشد ۹۶.۴ درصدی را ثبت کرد. همچنین، مساحت میانگین ایزویست از ۳۵ به ۵۸ مترمربع رسید.



شکل ۶. پلان شماتیک نهایی گزینه ۳+ (بهینه) با نمایش اصلاحات (منبع: تحلیل نگارنده)

در پلان شماتیک نهایی، محل مسیر جدید شرقی با خط‌چین، فضاهای عمومی جدید در نقاط کور سابق و موقعیت اصلاح‌شده پله‌برقی‌ها مشخص شده است. این پلان، نحوه اتصال گره‌های ۶۳ و ۶۶ به شبکه اصلی، فعال‌سازی گره‌های ۳۹، ۶۳ و ۱۴۷ و تکمیل حلقه‌های عمودی از طریق جابه‌جایی و افزودن پله‌برقی را نشان می‌دهد.

مقایسه مستقیم وضع موجود با گزینه ۳+ نشان داد که بهینه‌سازی نهایی در تمامی ابعاد محوری، دیداری، شبکه‌ای و عملکردی با بهبود همراه بوده است. بیشترین تغییر نسبی در میان شاخص‌های فضایی مربوط به اتصال با افزایش ۱۶۰ درصدی و نفوذپذیری بصری با افزایش ۹۶.۴ درصدی بود. تعداد نقاط کور نیز ۸۲.۱ درصد کاهش یافت. از منظر عملکرد تجاری، پاخور روزانه ۳۶.۹ درصد، نرخ اشغال ۲۰.۶ درصد، رضایت کاربران ۳۱.۳ درصد و تعاملات اجتماعی ۶۶.۷ درصد افزایش یافت.

جدول ۷. خلاصه نهایی بهبود شاخص‌های کلیدی گزینه ۳+ نسبت به وضع موجود

دسته‌بندی	شاخص	وضع موجود	گزینه ۳+	میزان بهبود
محوری	هم‌پیوندی	۱۶.۷۷	۲۱.۶۰	+۲۸.۸٪
محوری	عمق فضایی	۴.۰۶ گام	۴.۳۵ گام	-۲۸.۲٪
محوری	شاخص انتخاب	۳.۸۵۰	۵.۴۵۰	+۴۱.۶٪
دیداری	اتصال	۱.۰۰	۲.۶۰	+۱۶۰.۰٪
دیداری	مساحت ایزوویست	۳۵ m ²	۵۸ m ²	+۶۵.۷٪
دیداری	نفوذپذیری بصری	۰.۲۸	۰.۵۵	+۹۶.۴٪
شبکه‌ای	مرکزیت بینابینی	≈۸۵۰	≈۹۲۰	+۸.۲٪
شبکه‌ای	مرکزیت نزدیکی	≈۰.۱۸۵	≈۰.۱۹۰	+۲.۷٪
عملکردی	پاخور	۴,۲۰۰ نفر/روز	۵,۷۵۰ نفر/روز	+۳۶.۹٪
عملکردی	نرخ اشغال فضا	۶۸٪	۸۲٪	+۲۰.۶٪
عملکردی	رضایت کاربران	۳.۲	۴.۲	+۳۱.۳٪
عملکردی	تعاملات اجتماعی	۴۵ در ساعت	۷۵ در ساعت	+۶۶.۷٪
عملکردی	نقاط کور	۲۸	۵	-۸۲.۱٪
ترکیبی	امتیاز TOPSIS	۰.۱۰۵	۰.۷۹۰	+۶۵۲.۴٪

در مجموع، نتایج نشان داد که گزینه ۳ در میان پنج سناریوی اولیه مناسب‌ترین توازن را میان شاخص‌های عملکردی و ریسک برقرار کرد و انتخاب آن در اغلب سناریوهای تحلیل حساسیت نیز پایدار باقی ماند. اعمال اصلاحات تکمیلی و تبدیل آن به گزینه ۳+ موجب شد علاوه بر حفظ مزایای ساختاری گزینه ۳، نارسایی‌های باقی‌مانده در اتصال شرقی، پیوستگی دیداری، نقاط کور و حلقه‌های حرکت عمودی نیز کاهش یابد؛ به گونه‌ای که گزینه نهایی در مقایسه با وضع موجود به هم‌پیوندی ۲۱.۶۰، عمق فضایی ۴.۳۵ گام، شاخص انتخاب ۵.۴۵۰، نفوذپذیری بصری ۰.۵۵، پنج نقطه کور، پاخور ۵,۷۵۰ نفر در روز، نرخ اشغال ۸۲ درصد و امتیاز TOPSIS برابر با ۰.۷۹۰ دست یافت.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که تلفیق طراحی مولد، تحلیل نحو فضا، شبیه‌سازی عامل‌بنیان و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به عنوان یک چارچوب منسجم برای بازطراحی فضایی طبقات فوقانی مراکز تجاری به کار رود. مقایسه پنج گزینه طراحی نشان داد که شدت مداخله و نحوه توزیع تغییرات در شبکه فضایی، آثار متفاوتی بر شاخص‌های ساختاری، دیداری و عملکردی ایجاد می‌کند. در میان گزینه‌های اولیه، گزینه ۳ با رویکرد تغییرات اساسی، بهترین عملکرد کلی را به دست آورد؛ به گونه‌ای که میانگین هم‌پیوندی از ۱۶.۷۷ در وضع موجود به ۲۱.۲۰ افزایش یافت، عمق فضایی از ۴.۰۶ به ۴.۵۰ گام کاهش پیدا کرد،

شاخص انتخاب از ۳,۸۵۰ به ۵,۲۰۰ رسید و تعداد نقاط کور از ۲۸ به ۸ نقطه کاهش یافت. همچنین، پاخور روزانه در این گزینه به ۵,۶۰۰ نفر و نرخ اشغال فضا به ۸۰ درصد افزایش یافت. این الگو نشان می‌دهد که بهبود عملکرد فضایی در یک مرکز تجاری بزرگ‌مقیاس صرفاً از طریق یک تغییر موضعی حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند مداخلات هماهنگ در پیوندهای افقی و عمودی، مسیرهای حرکتی و ساختار دسترسی است. این نتیجه با مبانی نظری نحو فضا همسو است که سازمان پیکره‌بندی را عاملی اساسی در شکل‌گیری حرکت، دسترسی و حضور کاربران در محیط می‌داند (3, 4).

افزایش ۲۶,۴ درصدی هم‌پیوندی و کاهش ۲۵,۷ درصدی عمق فضایی در گزینه ۳ را می‌توان بر اساس رابطه میان دسترسی توپولوژیک و احتمال استفاده از فضا تبیین کرد. در منطق نحو فضا، فضایی که با تعداد گام‌های کمتر و روابط مستقیم‌تر به سایر بخش‌های شبکه متصل باشد، از موقعیت ادراکی و حرکتی مطلوب‌تری برخوردار است و احتمال ورود کاربران به آن افزایش می‌یابد. در مقابل، عمق بالا، به‌ویژه در نقاط انتهایی، می‌تواند به انزوای عملکردی و کاهش پاخور منجر شود. یافته حاضر با مطالعات انجام‌شده در بازارها و مراکز خرید ایران همخوانی دارد؛ تحلیل پیکره‌بندی این فضاها نشان داده است که موقعیت نسبی فضاها در شبکه حرکتی می‌تواند تفاوت‌های قابل‌توجهی در الگوهای حضور، حرکت و استفاده ایجاد کند (6, 7). همچنین، یافته پژوهش Najafpour و Haghlesan درباره بهینه‌سازی فضایی ایستگاه‌های مترو نشان داد که کاهش عمق و تقویت شاخص‌های دسترسی می‌تواند ساختار حرکت را منسجم‌تر و توزیع جریان را متعادل‌تر کند (11). از این منظر، کاهش نقاط کور در گزینه ۳ را می‌توان پیامد مستقیم شکستن ساختارهای عمیق و ایجاد مسیرهای جایگزین در شبکه دانست.

نتایج همچنین نشان داد که گزینه ۴، اگرچه از نظر عملکرد کلی در رتبه دوم قرار گرفت، بیشترین بهبود را در مؤلفه‌های دیداری ایجاد کرد؛ به‌طوری‌که مساحت ایزوویست به ۵۵ مترمربع و نفوذپذیری بصری به ۰,۵۲ افزایش یافت. این نتیجه حاکی از آن است که افزایش شفافیت بصری و کاهش موانع دید می‌تواند کیفیت ادراک محیط را به‌شدت بهبود بخشد، حتی اگر تغییرات ساختاری شبکه محدودتر باشد. اهمیت این موضوع با بنیان‌های تحلیل گراف دیداری همخوان است؛ Turner نشان داد که روابط دیداری بین نقاط فضا را می‌توان به‌صورت شبکه‌ای تحلیل کرد و از این طریق میزان اتصال و امکان درک مسیرها را سنجید (8). توسعه DepthmapX نیز امکان بررسی دقیق‌تر این روابط را فراهم کرده است (9). مطالعات جدیدتر مبتنی بر تحلیل هندسی با وضوح بالا نیز نشان داده‌اند که ویژگی‌های ظریف هندسی و میدان دید می‌توانند در فهم کیفیت اتصال فضایی اهمیت زیادی داشته باشند (10). بنابراین، برتری گزینه ۴ در نفوذپذیری بصری نشان می‌دهد که هندسه وید مرکزی و حذف موانع دیداری، حتی بدون بازآرایی گسترده کل شبکه، قادر است کیفیت ادراک و خوانایی محیط را ارتقا دهد.

باین‌حال، نتایج نشان داد که بهبود صرف شاخص‌های بصری برای دستیابی به بهترین عملکرد کلی کافی نیست. گزینه ۴ با وجود دستیابی به بالاترین نفوذپذیری بصری در میان گزینه‌های اولیه، به دلیل عدم تکمیل حلقه‌های حرکتی شرقی - غربی و محدودیت در کاهش عمق فضایی، رتبه پایین‌تری از گزینه ۳ کسب کرد. این یافته اهمیت همزمان ساختار حرکتی و ساختار دیداری را برجسته می‌کند. در یک مرکز تجاری بزرگ‌مقیاس، کاربر ممکن است مقصد را ببیند، اما اگر مسیر دسترسی به آن طولانی، غیرمستقیم یا فاقد پیوستگی باشد، مزیت بصری الزاماً به افزایش حرکت واقعی منجر نمی‌شود. این نتیجه با دیدگاه‌های معاصر در طراحی داده‌محور همسو است که تأکید دارند ارزیابی طراحی باید بر چندین شاخص مکمل استوار باشد و اتکا به یک معیار منفرد نمی‌تواند پیچیدگی عملکرد محیط را توضیح دهد (19, 20). از این‌رو، ترکیب شاخص‌های پیکره‌بندی، دیداری، عملکردی و اقتصادی در پژوهش حاضر یکی از عوامل اصلی دستیابی به ارزیابی جامع‌تر گزینه‌ها بود.

یافته دیگر پژوهش، افزایش شاخص انتخاب در گزینه‌های دارای مسیرهای جدید، به‌ویژه گزینه ۳ و گزینه ۵ بود. شاخص انتخاب در گزینه ۳ به ۵,۲۰۰ و در گزینه ۵ به ۵,۰۰۰ رسید، درحالی‌که مقدار آن در وضع موجود ۳,۸۵۰ بود. این تغییر نشان می‌دهد که افزودن مسیرهای جایگزین می‌تواند تعداد مسیرهای کوتاه عبوری از بخش‌های مختلف شبکه را افزایش دهد و از تمرکز شدید جریان در تعداد محدودی از کریدورها جلوگیری کند. این نتیجه از منظر تحلیل شبکه نیز قابل تبیین است. نظریه مرکزیت Freeman نشان می‌دهد که افزایش نقش واسطه‌ای برخی گره‌ها و توزیع بهتر مسیرهای کوتاه می‌تواند ساختار شبکه را از حالت تمرکز شدید خارج کند (13, 14). همچنین، مطالعات مبتنی بر AGraph و تحلیل شبکه‌های فضایی بر اهمیت شاخص‌های بینایی و نزدیکی در تشخیص نقش نقاط مختلف شبکه تأکید کرده‌اند (15). یافته‌های Altafini و همکاران نیز نشان می‌دهد که تحلیل همزمان منطق‌های مرکزیت محلی و جهانی می‌تواند توضیح دقیق‌تری از نحوه عملکرد شبکه فضایی ارائه دهد (16). بنابراین، افزایش شاخص انتخاب در گزینه‌های دارای مسیرهای جدید را می‌توان نشانه‌ای از توزیع متوازن‌تر ظرفیت عبور در شبکه دانست.

در بعد رفتاری، افزایش پاخور از ۴,۲۰۰ نفر در روز در وضع موجود به ۵,۶۰۰ نفر در گزینه ۳ و سپس ۵,۷۵۰ نفر در گزینه بهینه‌شده ۳+ یکی از مهم‌ترین نتایج پژوهش بود. این افزایش با بهبود همزمان هم‌پیوندی، کاهش عمق، افزایش انتخاب و ارتقای نفوذپذیری بصری همراه بود. نتایج با مطالعه Zhou و همکاران همسو است که نشان داد ساختار فضایی شبکه ترافیکی در مراکز تجاری با توزیع عابران ارتباط دارد و برخی بخش‌های دارای موقعیت پیکره‌بندی مناسب‌تر، سهم بیشتری از جریان کاربران را جذب می‌کنند (1). همچنین، چالش کاهش پاخور در طبقات فوقانی مراکز تجاری که توسط Yurtseven مطرح شده، نشان می‌دهد که شکست در ایجاد ارتباط مؤثر میان طبقات می‌تواند به کاهش جذابیت و عملکرد اقتصادی سطوح بالاتر منجر شود (2). نتایج حاضر نشان می‌دهد که این چالش را می‌توان تا حدی از طریق بازطراحی شبکه حرکت، تقویت عناصر عمودی و ایجاد حلقه‌های کامل‌تر حرکتی کنترل کرد.

نقش شبیه‌سازی عامل‌بنیان نیز در این پژوهش قابل توجه بود. MassMotion امکان آن را فراهم کرد که تأثیر گزینه‌های فضایی بر پاخور و تعاملات اجتماعی پیش از اجرای واقعی مداخلات بررسی شود. در گزینه ۳+، تعاملات اجتماعی از ۴۵ به ۷۵ مورد در ساعت افزایش یافت که معادل رشد ۶۶.۷ درصدی بود. این افزایش نشان می‌دهد که بهبود پیکره‌بندی نه‌تنها بر عبور کاربران، بلکه بر احتمال توقف و مواجهه در فضاهای عمومی نیز اثر می‌گذارد. ابزارهای شبیه‌سازی حرکت جمعیت برای ارزیابی چنین پیامدهایی طراحی شده‌اند و می‌توانند سناریوهای متفاوت حرکت را تحت شرایط کالبدی مختلف بازنمایی کنند (18). از سوی دیگر، گزارش‌های ارزیابی پس از بهره‌برداری در پروژه‌های تجاری نیز بر اهمیت سنجش واقعی نحوه استفاده کاربران از فضا و نه صرفاً ارزیابی هندسی آن تأکید دارند (17). بنابراین، هم‌زمانی نتایج ساختاری و شبیه‌سازی رفتاری در پژوهش حاضر، اعتبار تفسیر عملکرد گزینه ۳+ را تقویت می‌کند.

نتایج رتبه‌بندی TOPSIS نشان داد که گزینه ۳ با امتیاز ۰.۷۶۶ رتبه نخست را به دست آورد، درحالی‌که گزینه‌های ۴، ۵، ۲ و ۱ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این یافته نشان می‌دهد که انتخاب بهترین سناریو صرفاً بر اساس بیشینه‌سازی یک متغیر مانند نفوذپذیری بصری یا کمینه‌سازی عمق فضایی انجام نشد، بلکه نتیجه برآیند همزمان شاخص‌های عملکرد و ریسک بود. منطق TOPSIS نیز دقیقاً بر همین اصل استوار است؛ گزینه مطلوب باید به راه‌حل ایده‌آل نزدیک و از وضعیت ضدایده‌آل دور باشد (30). بررسی‌های مقایسه‌ای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز نشان داده‌اند که TOPSIS برای مسائلی که معیارهای سود و هزینه به‌صورت همزمان وجود دارند، ابزار مناسبی برای دستیابی به یک راه‌حل مصالحه‌ای است (31). در پژوهش حاضر، گزینه ۴ از نظر دیداری عملکرد بسیار مطلوبی

داشت، اما گزینه ۳ به دلیل توازن مناسب‌تر میان پاخور، اشغال فضا، نقاط کور، عمق فضایی و سایر شاخص‌ها در رتبه بالاتری قرار گرفت. این امر اهمیت تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل پیچیده معماری را نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت نیز نشان داد که انتخاب گزینه ۳ از استواری مطلوبی برخوردار است. در شش سناریو از هفت سناریوی تغییر اوزان، گزینه ۳ رتبه نخست خود را حفظ کرد و تنها در صورت کاهش ۲۰ درصدی وزن نرخ اشغال، گزینه ۴ به رتبه نخست انتقال یافت. این یافته نشان می‌دهد که برتری گزینه ۳ محصول یک ترکیب بسیار خاص و شکننده از اوزان نبوده، بلکه در محدوده نسبتاً وسیعی از ترجیحات تصمیم‌گیری پایدار باقی مانده است. چنین تحلیلی در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره اهمیت زیادی دارد، زیرا اوزان معیارها ممکن است تحت تأثیر دیدگاه سرمایه‌گذار، طراح، مدیر مجموعه یا کاربران تغییر کنند. بنابراین، استفاده از تحلیل حساسیت، قابلیت دفاع از تصمیم نهایی را افزایش داده و با رویکرد طراحی مبتنی بر شواهد که بر شفافیت و قابلیت بازبینی تصمیم‌ها تأکید دارد، سازگار است (32).

نتایج گزینه نهایی ۳+ نشان داد که اصلاحات تکمیلی توانست عملکرد گزینه منتخب اولیه را بیشتر ارتقا دهد. هم‌پیوندی به ۲۱.۶۰ رسید، عمق فضایی به ۴.۳۵ گام کاهش یافت، شاخص انتخاب به ۵,۴۵۰ افزایش پیدا کرد و نفوذپذیری بصری به ۰.۵۵ رسید. در عین حال، تعداد نقاط کور از ۲۸ در وضع موجود به تنها ۵ نقطه کاهش یافت. این تغییرات نشان می‌دهد که مداخله در مقیاس گره و مسیر، در صورتی که بر اساس تحلیل دقیق ساختار شبکه انجام شود، می‌تواند پیامدهای کلان در عملکرد کلی طبقه ایجاد کند. این رویکرد با منطق طراحی پارامتریک و مولد همخوان است که در آن متغیرهای طراحی به صورت کنترل‌شده تغییر می‌کنند تا تأثیر آنها بر عملکرد کل سیستم بررسی شود (24, 25). رویکردهای جدید طراحی داده‌محور نیز بر حرکت از داده و تحلیل به سمت تولید و اصلاح گزینه‌ها تأکید دارند (23). از این نظر، گزینه ۳+ نمونه‌ای از فرایند تکرارشونده‌ای است که در آن تحلیل، تولید، ارزیابی و اصلاح به صورت پیوسته به یکدیگر متصل شده‌اند.

بهبود حاصل از گزینه ۳+ را می‌توان همچنین در چارچوب طراحی مولد تفسیر کرد. طراحی مولد برخلاف طراحی خطی، امکان مقایسه چندین پاسخ و بازگشت مجدد به فضای راه‌حل را فراهم می‌کند. Carpo این تحول را نشانه عبور معماری دیجیتال از بازنمایی به سمت تولید محاسباتی می‌داند (26). الگوریتم‌های چندهدفه مانند NSGA-II نیز نشان داده‌اند که در مسائل دارای اهداف متعارض، تولید چند راه‌حل و بررسی جبهه پاسخ می‌تواند نسبت به انتخاب مستقیم یک گزینه منفرد کارآمدتر باشد (29). اگرچه پژوهش حاضر از TOPSIS برای مرحله نهایی انتخاب استفاده کرد، منطق تولید چند گزینه و اصلاح سناریوی برتر با همین رویکرد چندراه‌حلی سازگار است. در نتیجه، این مطالعه نشان می‌دهد که در بازطراحی فضاهای موجود نیز می‌توان از منطق مولد نه صرفاً برای خلق فرم جدید، بلکه برای آزمون نظام‌مند سناریوهای مداخله استفاده کرد.

استخراج قواعد نرم از نمونه‌های پیشین و تبدیل آنها به پارامترهای قابل تغییر نیز از دیگر وجوه مهم یافته‌های پژوهش بود. این فرایند با مفهوم مهندسی معکوس در معماری همخوان است؛ رویکردی که تلاش می‌کند منطق عملکردی یا ساختاری نمونه موجود را استخراج و به دانشی قابل انتقال برای طراحی جدید تبدیل کند (27). مرور روش‌های مبتنی بر مدل در مهندسی معکوس نیز نشان داده است که تبدیل ویژگی‌های موجود به ساختارهای صریح و قابل پردازش، امکان بازسازی و نوسازی سیستم‌ها را افزایش می‌دهد (28). در پژوهش حاضر، این منطق موجب شد قواعد کیفی حاصل از تحلیل نمونه‌ها به پارامترهایی مانند جابه‌جایی پله‌برقی، تعداد مسیر، عرض کریدور، وید مرکزی و محل فضاهای عمومی تبدیل شوند و قابلیت آزمون کمی پیدا کنند.

در سطحی گسترده‌تر، نتایج پژوهش حاضر ضرورت حرکت از تصمیم‌گیری صرفاً تجربی به سمت طراحی داده‌محور را تأیید می‌کند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که کلان‌داده و سامانه‌های هوشمند می‌توانند فرایند برنامه‌ریزی و طراحی را به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد سوق دهند (21, 22). همچنین، کاربرد داده‌های فضایی در تحلیل حرکت و ازدحام شهری نشان داده است که تلفیق مدل‌های فضایی و داده‌های رفتاری، قدرت توضیحی و پیش‌بینی را افزایش می‌دهد (12). این رویکرد می‌تواند بخشی از شکاف بهره‌وری در صنعت معماری، مهندسی و ساخت را نیز کاهش دهد، زیرا تصمیم‌های طراحی را قابل مقایسه، قابل بازتولید و قابل کنترل می‌سازد (33, 34). بر این اساس، اهمیت یافته‌های حاضر تنها به طبقه G۲ ایران‌مال محدود نمی‌شود، بلکه در ارائه یک فرایند تصمیم‌گیری نظام‌مند برای بازطراحی فضاهای تجاری پیچیده نیز قابل توجه است.

محدودیت‌های این پژوهش عمدتاً به ماهیت مطالعه موردی و وابستگی بخشی از نتایج به شبیه‌سازی مربوط است. تحلیل تنها بر یک طبقه از یک مرکز تجاری بزرگ‌مقیاس متمرکز بود و ویژگی‌های خاص معماری، ترکیب کاربری، الگوی دسترسی، موقعیت پله‌برقی‌ها و رفتار کاربران این مجموعه می‌تواند قابلیت تعمیم مستقیم نتایج به سایر مراکز تجاری را محدود کند. همچنین، بخشی از شاخص‌های رفتاری، از جمله پاخور و تعاملات اجتماعی، بر اساس شبیه‌سازی عامل‌بنیان برآورد شدند و اجرای واقعی مداخلات ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند ترکیب مستأجران، سیاست‌های مدیریت مرکز، رویدادهای فصلی، ساعات اوج مراجعه، قیمت‌گذاری واحدها و تفاوت‌های رفتاری کاربران قرار گیرد. وزن‌دهی معیارها نیز به قضاوت خبرگان وابسته بود و اگرچه تحلیل حساسیت برای بررسی استواری نتایج انجام شد، تغییر ساختار کلی ترجیحات ذی‌نفعان ممکن است بر رتبه‌بندی نهایی اثر بگذارد.

برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود چارچوب حاضر در مراکز تجاری مختلف با ساختارهای خطی، حلقوی، چندآتریومی و چندسطحی آزمون شود تا امکان مقایسه میان تیپ‌های معماری فراهم گردد. همچنین، استفاده از داده‌های واقعی حاصل از شمارش عابران، حسگرهای مکانی، Bluetooth، Wi-Fi، دوربین‌های شمارشگر و داده‌های زمانی می‌تواند به کالیبراسیون دقیق‌تر مدل‌های شبیه‌سازی کمک کند. بررسی تغییرات ساعتی، روزانه و فصلی پاخور، تحلیل جداگانه رفتار گروه‌های مختلف کاربران و تلفیق شاخص‌های انرژی، آسایش محیطی، هزینه ساخت و درآمد اجاره با معیارهای فضایی نیز می‌تواند مدل را توسعه دهد. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای تولید تعداد بیشتری از سناریوها و مقایسه روش‌هایی مانند VIKOR، TOPSIS و سایر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز برای سنجش پایداری روش انتخاب پیشنهاد می‌شود.

از منظر کاربردی، پیشنهاد می‌شود مدیران و طراحان مراکز تجاری پیش از انجام مداخلات پرهزینه، ابتدا نقشه‌های هم‌پیوندی، عمق فضایی، انتخاب، اتصال دیداری و نقاط کور را استخراج و بر اساس آنها محل مداخلات را اولویت‌بندی کنند. در طبقات کم‌پاخور، اصلاح محل عناصر حرکت عمودی، ایجاد مسیرهای پیونددهنده میان بخش‌های منزوی، فعال‌سازی نقاط کور با فضاهای عمومی یا رویدادی، کاهش موانع دید و بازآرایی برندهای جاذب می‌تواند به صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد. همچنین، توصیه می‌شود انتخاب گزینه نهایی صرفاً بر مبنای زیبایی‌شناسی یا افزایش مساحت تجاری انجام نشود، بلکه مجموعه‌ای از شاخص‌های فضایی، رفتاری، اقتصادی و ریسک در یک چارچوب تصمیم‌گیری واحد ارزیابی شود و پیش از اجرای نهایی، سناریوی منتخب از طریق شبیه‌سازی مورد آزمون قرار گیرد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

Large-scale shopping centers have evolved from relatively simple retail environments into complex, multi-level spatial systems in which commercial performance is closely associated with accessibility, visibility, pedestrian circulation, spatial configuration, and the distribution of attractive functions. One of the most persistent challenges in such complexes is the progressive decline in pedestrian footfall on upper floors. Vertical separation, insufficient visual continuity, poorly positioned escalators, excessive spatial depth, fragmented circulation loops, and the formation of poorly integrated peripheral areas may collectively cause upper-level retail units to become spatially isolated. Recent research has highlighted the “verticality challenge” in shopping malls, emphasizing that maintaining pedestrian movement across successive levels requires careful coordination between vertical circulation and horizontal spatial structure (2). Similarly, empirical analysis of pedestrian distribution in commercial environments has demonstrated that the spatial structure of movement networks is associated with the distribution and concentration of users (1).

Space syntax provides an appropriate theoretical and analytical basis for investigating these relationships. The foundational proposition of space syntax is that spatial configuration is not merely a geometric property but a relational structure capable of shaping accessibility, movement, encounter, and social use (3, 4). Indicators such as integration, normalized mean depth, and choice make it possible to quantify how accessible or segregated individual spaces are within the entire configuration. The application of these concepts to Iranian bazaars and contemporary shopping centers has confirmed their utility for identifying movement hierarchies, spatial isolation, and differences in behavioral use (5-7). Computational advances have further

strengthened this analytical framework. Depthmap and subsequently DepthmapX enabled axial analysis and visibility graph analysis to quantify spatial and visual relationships systematically (8, 9). More recent high-resolution geometric approaches have further expanded the ability to examine fine-grained relationships within complex built environments (10).

Network analysis provides a complementary perspective on spatial performance. Betweenness and closeness centrality allow researchers to identify nodes that play important intermediary or accessibility roles within a network (13, 14). AGraph has facilitated the application of such network measures to architectural and spatial systems (15), while more recent research on local and global centrality has demonstrated that different scales of network organization may jointly explain spatial performance (16). Alongside configurational analysis, agent-based simulation makes it possible to estimate how modifications in spatial structure may translate into changes in pedestrian movement and social interaction before physical implementation. MassMotion is specifically designed for modeling pedestrian flows and testing alternative spatial scenarios (18).

Contemporary architectural design has simultaneously shifted toward data-driven and computationally supported decision-making. Data-driven design reduces reliance on intuition alone by incorporating measurable evidence into design generation and evaluation (19, 20). The increasing integration of big data into architecture and urban planning has further expanded the potential for identifying spatial patterns and transforming analytical outputs into design decisions (21-23). Generative and parametric design are central to this transition because they enable designers to define rules and variable ranges rather than producing only one predetermined solution. Parametric modeling allows spatial attributes to be manipulated systematically (24), whereas generative design expands the solution space by algorithmically producing multiple alternatives from explicitly defined constraints and rules (25, 26). Reverse engineering can further support this process by extracting transferable design logic from existing successful precedents and translating implicit spatial knowledge into explicit rules (27, 28).

However, generating multiple alternatives does not by itself determine which alternative offers the most appropriate balance among potentially conflicting criteria. Multi-objective optimization approaches such as NSGA-II demonstrate the value of exploring multiple non-dominated solutions rather than seeking a single simplistic optimum (29). In architectural decision-making, this logic can be complemented by multi-criteria decision-making techniques. TOPSIS selects alternatives according to their simultaneous proximity to a positive ideal solution and distance from a negative ideal solution (30). Its suitability for problems containing both benefit and cost criteria has been demonstrated in comparative MCDM research (31). This evidence-based approach is consistent with broader developments in architectural design, which emphasize measurable performance, transparent evaluation, and reproducible decision processes (32). Such systematic procedures are particularly relevant to the AECO sector, where persistent productivity limitations have encouraged greater use of computational and analytical methods (33, 34). Accordingly, the present study aimed to parameterize previously derived soft design rules, generate and evaluate alternative redesign scenarios, rank them using TOPSIS, and simulate an optimized configuration to improve spatial performance, reduce commercial blind spots, and increase pedestrian footfall on the G2 floor of Iran Mall.

Methods and Materials

The study employed a quantitative, computational, simulation-based design focusing on the G2 floor of Iran Mall. The baseline configuration contained 28 commercial blind spots, a mean integration value of 16.77, a normalized mean spatial depth of 6.06 steps, and an estimated daily footfall of 4,200 users. The research procedure consisted of five integrated stages: parameterization of six previously derived soft design rules, algorithmic generation of alternatives, definition and weighting of performance and risk indicators, TOPSIS-based evaluation, and final simulation and optimization. Six design variables were operationalized within predefined ranges: escalator location, number of new circulation paths, width of main corridors, location

of major brands, central void area, and location of public spaces. Five distinct alternatives were subsequently generated, ranging from minimum intervention to extensive structural, visual, or accessibility-oriented modifications.

Evaluation incorporated five key performance indicators—footfall, occupancy rate, user satisfaction, social interaction, and economic value—and three key risk indicators—remaining blind spots, deviation from projected footfall, and budget deviation. The corresponding weights were determined through the Analytic Hierarchy Process. Spatial indicators were calculated using DepthmapX through axial analysis and visibility graph analysis. Gephi/AGraph was used to examine network centrality, while MassMotion was used for agent-based pedestrian simulation and estimation of footfall and social interaction. The alternatives were then ranked using TOPSIS by constructing and normalizing the decision matrix, applying criterion weights, defining positive and negative ideal solutions, calculating Euclidean distances, and estimating relative closeness coefficients. Sensitivity analysis was performed by changing the weights of footfall, occupancy, and remaining blind spots by $\pm 20\%$. Finally, the highest-performing alternative was refined through targeted spatial modifications and re-evaluated as Alternative 3+.

Findings

The five initial alternatives produced substantially different spatial and functional outcomes. Alternative 1 generated only limited improvements: integration increased from 16.77 to 17.60, spatial depth decreased to 5.70 steps, blind spots declined from 28 to 22, and daily footfall increased to 4,600. Alternative 2 produced greater improvements, with integration reaching 18.90, depth falling to 5.10, blind spots declining to 18, footfall increasing to 5,100, and occupancy reaching 74%.

Alternative 3 produced the strongest overall performance among the initial scenarios. Mean integration increased by 26.4% to 21.20, normalized mean depth decreased by 25.7% to 4.50 steps, and choice increased by 35.1% from 3,850 to 5,200. The number of blind spots decreased by 71.4%, from 28 to 8. Visual permeability increased by 78.6% to 0.50, daily footfall increased by 33.3% to 5,600 users, and occupancy increased from 68% to 80%. Alternative 4 achieved the strongest visual performance, increasing mean isovist area from 35 to 55 m² and visual permeability from 0.28 to 0.52, but its structural improvements were weaker than those of Alternative 3. Alternative 5 reduced spatial depth to 4.60 steps and blind spots to 10 while increasing daily footfall to 5,300.

TOPSIS analysis ranked Alternative 3 first with a relative closeness coefficient of 0.766, followed by Alternative 4 at 0.613, Alternative 5 at 0.559, Alternative 2 at 0.458, and Alternative 1 at 0.215. Alternative 3 had the shortest distance from the positive ideal solution (0.234) and the greatest distance from the negative ideal solution (0.766). Sensitivity analysis demonstrated considerable ranking stability: Alternative 3 remained first in six of seven scenarios. Only when the occupancy-rate weight decreased by 20%, from 0.25 to 0.20, did Alternative 4 replace it as the highest-ranked alternative.

The subsequent refinement of Alternative 3 involved reducing the area of the elliptical geometry at Node 14 by 25%, creating a new 10-m-wide eastern route connecting Nodes 63 and 66 to the main network, locating three public/event spaces at former blind spots, relocating the escalator at Node 0 by 15 m westward, and adding a new escalator at Node 146. The resulting Alternative 3+ achieved a mean integration value of 21.60, representing a 28.8% improvement over the existing condition, while mean spatial depth decreased to 4.35 steps, a 28.2% reduction. Mean choice increased by 41.6% to 5,450. Visual connectivity increased by 160% to 2.60, mean isovist area increased by 65.7% to 58 m², and visual permeability increased by 96.4% to 0.55. Betweenness centrality increased from approximately 850 to 920, while closeness centrality increased from approximately 0.185 to 0.190.

Functional performance also improved considerably. Daily footfall increased from 4,200 to 5,750 users, representing a 36.9% increase. Occupancy rose from 68% to 82%, user satisfaction increased from 3.2 to 4.2, and simulated social interactions

increased from 45 to 75 per hour. The number of commercial blind spots declined from 28 to only 5, an 82.1% reduction. The final TOPSIS score increased from 0.105 for the baseline configuration to 0.790 for Alternative 3+.

Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that upper-floor commercial underperformance is not attributable to a single spatial characteristic but to the combined effects of topological depth, insufficient route choice, weak visual continuity, incomplete horizontal and vertical circulation loops, and spatially isolated commercial areas. The superior performance of Alternative 3 indicates that substantial improvements require coordinated modifications rather than isolated geometric interventions. In particular, introducing additional horizontal routes while simultaneously strengthening vertical circulation substantially reduced spatial segregation and redistributed movement opportunities across the floor.

The contrast between Alternatives 3 and 4 is especially informative. Alternative 4 achieved the highest visual permeability among the initial scenarios, yet it did not achieve the highest overall TOPSIS score. This indicates that visual enhancement alone is insufficient when the movement network remains structurally fragmented. By contrast, Alternative 3 achieved a more balanced combination of structural accessibility, route choice, visual performance, occupancy, and footfall. The results therefore support a multi-dimensional conception of commercial spatial performance in which visual, topological, behavioral, and economic indicators must be evaluated simultaneously.

The sensitivity analysis further strengthens confidence in the decision model. The persistence of Alternative 3 as the highest-ranked solution under six of seven weighting scenarios indicates that its selection was not dependent on a narrowly defined set of preferences. The final refinement to Alternative 3+ demonstrates the value of an iterative workflow in which the initially preferred option is not treated as a final solution but is subjected to targeted correction based on residual weaknesses. The dramatic reduction of blind spots, improvement in visual permeability, increase in pedestrian footfall, and rise in occupancy illustrate how relatively focused interventions at strategically important nodes can generate system-wide effects.

Overall, the study demonstrates that integrating generative design, space syntax, network analysis, agent-based simulation, AHP weighting, and TOPSIS provides a transparent and reproducible framework for evidence-based redesign of complex shopping environments. The optimized Alternative 3+ substantially improved configurational accessibility, visual continuity, pedestrian distribution, user-related performance, and commercial indicators while sharply reducing spatial blind spots. The proposed framework can therefore serve as a practical model for diagnosing and redesigning underperforming upper floors in large-scale shopping centers, particularly where design decisions must be made under multiple and potentially conflicting performance and risk criteria.

References

1. Zhou W, Guo H, Hou X, Lai W, Yao L. A Statistical Study of the Pedestrian Distribution in a Commercial Wholesale Centre Based on the Traffic Spatial Structure. *Buildings*. 2024;14(6):1782.
2. Yurtseven M. The Verticality Challenge in Shopping Malls. *Journal of Urban Design*. 2024;29(3):301-18.
3. Hillier B, Hanson J. *The Social Logic of Space*: Cambridge University Press; 1984.
4. Hillier B. *Space Is the Machine*: Cambridge University Press; 1996.
5. Jalalian-Hoseini S. *Space Syntax in Architectural Design*: University of Tehran Press; 2020.
6. Jalalian-Hoseini S. Analysis of Bazaars and Shopping Centers as Urban Spaces via Space Syntax Software: Case Studies of Iranian Bazaars and Tehran Shopping Centers. *Journal of Iranian Architecture Studies*. 2022.
7. Sajadzadeh H, Arianpour S, Talischi G. A Comparative Study of Behavioral Camps in the Traditional Bazaar and Shopping Center of Boroujerd Diplomat Based on Spatial Configuration Analysis. *Journal of Researches in Islamic Architecture*. 2023;11(1).
8. Turner A, editor *Depthmap: A Program to Perform Visibility Graph Analysis*. *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium*; 2001.
9. Varoudis T. *DepthmapX: A Cross-Platform Software for Space Syntax Analysis*. *Journal of Space Syntax*. 2020;11(1):45-62.

10. Varoudis T, Hanna S. Beyond Axial Lines: High-Resolution Geometric Analysis of London's Urban Fabric Using LIDAR Scans. UCL Discovery; 2024.
11. Najafpour I, Haghlesan M. Optimizing the Spatial Design of Urban Metro Stations Using the Space Syntax Method. Journal of Architect, Urban Design & Urban Planning. 2023;16(44):49-67.
12. Wang Y, editor Research on Urban Traffic Congestion Using Dual-Modal Model of Space Syntax Based on Big Data. Proceedings of ICAICE '24; 2024: ACM.
13. Freeman LC. A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. Sociometry. 1977;40(1):35-41.
14. Freeman LC. Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. Social Networks. 1978;1(3):215-39.
15. Manum B, editor AGraph: A Tool for Spatial Analysis. Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium; 2009.
16. Altafini D, Salardi-Jost M, Cutini V, editors. Decoding Small-Worlds Networks in a Regional Context: Unveiling Local-Local and Local-Global Centrality Logics with Space Syntax. Proceedings of the 14th Space Syntax Symposium; 2024: Tab Edizioni.
17. Space S. Broadgate Arena: Post-Occupancy Evaluation Report. UCL Space Syntax Lab; 2018.
18. Oasys S. MassMotion User Manual. Oasys Ltd.; 2020.
19. Deutsch R. Data-Driven Design and Construction: John Wiley & Sons; 2015.
20. Bier H, Knight T. Data-Driven Design in Architecture: A Systematic Review. Journal of Architectural Computing. 2024;22(1):15-38.
21. Liu Y, Wang S. Big Data in Architectural Design: A Critical Review. Automation in Construction. 2024;158:105-23.
22. Li J, Bian K. Construction of Urban Spatial Intelligent Planning and Design System under the Background of Big Data. International Journal of Information Technology and Systems. 2024;17(1).
23. Zhang H, Zheng Y. From Data to Design: A Methodology for Big-Data-Driven Architecture. Design Studies. 2025;86:101-19.
24. Kim M. Parametric Design and Architectural Form. International Journal of Architectural Computing. 2014;12(3):245-62.
25. Knight T, Stiny G. Generative Design and the Computational Turn in Architecture. Architectural Design. 2015;85(5):24-31.
26. Carpo M. The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence: MIT Press; 2017.
27. Davis M. Reverse Engineering in Architecture. Architectural Design. 2013;83(4):88-95.
28. Khachouch MK, Korchi A, Lakhri Y. Architecture Driven Modernization: A Review on Reverse Engineering Techniques Based on Models' Approach. WSEAS Transactions on Information Science and Applications. 2023;20:293-302.
29. Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002;6(2):182-97.
30. Hwang CL, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: Springer; 1981.
31. Opricovic S, Tzeng GH. Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 2004;156(2):445-55.
32. Elshafei A, Ibrahim A. Evidence-Based Design in Architecture. Architectural Science Review. 2023;66(2):112-28.
33. Loyola M. The Productivity Gap in the AECO Industry. Building Research & Information. 2018;46(5):489-504.
34. El-Ghandour W, Al-Huss M. Productivity in Construction Industry: A Review. Journal of Construction Engineering and Management. 2004;130(5):718-27.