

Type of article (research article)

Integrating Post-Occupancy Evaluation And Energy Performance Through GANs For Human-Centered School Design And Enhanced Satisfaction

Marjan Ilbeigi: Department of Architecture, Cha.C., Islamic Azad University, Chalous, Iran.

Mohammad Ghomeishi*: Department of Architecture, Dmv.C., Islamic Azad University, Damavand, Iran. (Corresponding Author) (ghomeishi.m@gmail.com)

Ali Asgharzadeh: Department of Architecture, Cha.C., Islamic Azad University, Chalous, Iran.

Nima Amani: Department of Civil Engineering, Cha.C., Islamic Azad University, Chalous, Iran.

Article Einfo

Received: 20/08/2025

Accepted: 02/09/2025

PP: 44-66

Keywords:
Algorithm,
Satisfaction, Energy,
Spatial Layout, User-
Centered

Abstarct

This study proposes a hybrid framework for generating user-centered and energy-efficient architectural patterns for primary schools by integrating Generative Adversarial Networks (GANs) with Post-Occupancy Evaluation (POE). Based on empirical data from 384 users in several public schools in Tehran, the POE results identified ventilation ($r = 0.586$), lighting quality, and furniture/materials ($r = 0.701$) as the most influential factors on user satisfaction. Factor analysis revealed latent features such as circulation clarity, sensory comfort, and spatial quality. The GAN model was trained over 500 epochs on these data and produced synthetic layouts that prioritized user preferences across six functional zones (e.g., administrative, workshop, and classrooms). In the generated layouts, up to 34% of the area was allocated to classrooms, making them the dominant spaces. A comparison between GAN-generated layouts and baseline school samples showed that EnergyPlus simulations predicted an average 22% reduction in annual energy consumption, particularly in heating, cooling, and lighting. Adjacency with service areas, window-to-wall ratio, and classroom orientation significantly influenced thermal performance and natural daylighting. Additionally, a feedback loop was employed to iteratively refine GAN outputs using Mean Squared Error (MSE) and Structural Similarity Index (SSIM) for improved spatial accuracy. The results confirm the effectiveness of integrating GAN and POE in predictive, performance-driven school design. By facilitating decision-making in the early design stages, the proposed framework offers a scalable approach to flexible and sustainable educational architecture that balances environmental objectives with user experience.

Citation: Ilbeigi, M, Ghomeishi, M, Asgharzadeh, A, Amani, N. (2025). Integrating Post-Occupancy Evaluation And Energy Performance Through GANs For Human-Centered School Design And Enhanced Satisfaction. *Journal of Architecture and Humanistic Environments*, 2 (2), 44-66.

DOI: <https://doi.org/10.82229/2025.hae.1215446>

Extended Abstract

Introduction

School buildings play a critical role in shaping students' learning environments, yet many traditional designs fail to fully address issues of energy efficiency, spatial comfort, and user satisfaction. Post-Occupancy Evaluation (POE) provides valuable insights into how users perceive and interact with educational spaces, but these data are rarely integrated into the design process. At the same time, advances in artificial intelligence particularly Generative Adversarial Networks (GANs) offer new opportunities to generate architectural layouts that balance performance with user needs. This study proposes an integrated POE-GAN framework to produce school layouts that simultaneously optimize energy use, spatial organization, and user satisfaction. By combining user feedback with generative design, the research aims to establish a data-driven approach for creating more sustainable and human-centered educational environments.

Methodology

This study employed a hybrid framework combining Post-Occupancy Evaluation (POE) data with a Generative Adversarial Network (GAN) to produce user-centered and energy-efficient school layouts. A total of 320 completed POE questionnaires from teachers and students in primary schools were collected and validated for content and construct reliability (Cronbach's $\alpha = 0.881$). These data were encoded into conditional vectors representing user preferences for spatial comfort, functional priorities, and environmental quality. The GAN model was trained on 500 architectural layout samples, with training loss and zone coverage heatmaps used to monitor convergence and spatial learning. Energy performance of generated layouts was evaluated through EnergyPlus simulations, while spatial coherence was assessed using Structural Similarity Index (SSIM) and Mean Squared Error (MSE). Finally, the generated layouts were compared against traditional school designs across key metrics of energy use, spatial quality, and user satisfaction.

Results and discussion

The results demonstrate that the GAN-POE framework effectively generated school layouts that align with both functional priorities and user satisfaction. Across training epochs, the model progressively improved in spatial coherence, with classrooms and hallways emerging as dominant zones consistent with Post-Occupancy Evaluation (POE) data. Among the top three layouts (epochs 480, 490, and 499), Layout 499 with a near U-shaped configuration, achieved the best overall performance in terms of energy efficiency, spatial comfort, and user satisfaction, outperforming L-shaped alternatives. Compared to traditional school designs, the GAN-generated layouts reduced annual energy consumption by 21.8%, improved user satisfaction scores by 19.3%, increased structural similarity (SSIM) by 31%, and reduced layout variation (MSE) by 62%. These findings confirm that generative design informed by POE can yield user-centered, energy-efficient, and functionally coherent educational environments.

نوع مقاله (علمی-تحقیقی)

یکپارچه‌سازی ارزیابی پس از بهره‌برداری و انرژی با GAN در طراحی انسان محور بر ارتقاء رضایت‌مندی مدارس

مرجان ایل‌بیگی: گروه معماری، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

محمد قمیشی*: گروه معماری و شهرسازی، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران. (نویسنده مسئول) (ghomeishi.m@gmail.com)

علی اصغرزاده: گروه معماری، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

نیما امانی: گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

شماره صفحات: ۶۶-۴۴

این مطالعه چارچوبی ترکیبی برای خلق الگوهای معماری کاربرمحور و بهینه از نظر انرژی در مدارس ابتدایی ارائه می‌دهد که شبکه‌های مولد تخصصی را با ارزیابی پس‌از بهره‌برداری تلفیق می‌کند. با استفاده از داده‌های تجربی ۳۸۴ کاربر در تعدادی از مدارس دولتی تهران، نتایج POE نشان داد که تهویه ($r = 0.586$)، کیفیت نورپردازی و مبلمان/مصالص ($r = 0.701$) مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رضایت کاربران هستند. تحلیل عاملی ویژگی‌های نهفته‌ای همچون وضوح گردش، آسایش حسی و کیفیت فضایی را شناسایی کرد. مدل GAN روی این داده‌ها طی ۵۰۰ دوره آموزش داده شد و پلان‌های مصنوعی‌ای تولید کرد که ترجیحات کاربران را در شش ناحیه فضایی (مانند اداری، کارگاهی و کلاس‌های درس) در اولویت قرار می‌دادند. در طرح‌های تولیدشده، تا ۳۴٪ از مساحت به کلاس‌ها اختصاص یافت که آن‌ها را به غالب‌ترین فضاها تبدیل کرد. مقایسه طرح‌های تولیدشده توسط GAN با نمونه‌های پایه مدارس نشان داد که شبیه‌سازی‌های انرژی (با نرم‌افزار انرژی پلاس) به‌طور میانگین کاهش ۲۲٪ در مصرف سالانه انرژی (به‌ویژه در گرمایش، سرمایش و روشنایی) را نشان می‌دهد. مجاورت با فضاهای خدماتی، نسبت پنجره به دیوار و جهت‌گیری کلاس‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی و روشنایی طبیعی داشت. همچنین، یک چرخه بازخورد برای پالایش تدریجی خروجی‌های GAN با هدف افزایش دقت فضایی به‌کار رفت که از شاخص میانگین مربعات خطا و شاخص شباهت ساختاری بهره برد. نتایج، کارایی ادغام GAN و POE را در طراحی پیش‌بینانه و مبتنی بر عملکرد مدارس تأیید می‌کنند. چارچوب پیشنهادی با تسهیل تصمیم‌گیری در مراحل اولیه طراحی، رویکردی مقیاس‌پذیر برای معماری آموزشی منعطف و پایدار ارائه می‌دهد که میان اهداف زیست‌محیطی و تجربه کاربری تعادل برقرار می‌سازد.

واژگان کلیدی:

الگوریتم، رضایت‌مندی، انرژی،
چیدمان فضایی، کاربرمحور

استناد: ایل‌بیگی، مرجان، قمیشی، محمد، اصغرزاده، علی و امانی، نیما (۱۴۰۴). یکپارچه‌سازی ارزیابی پس‌از بهره‌برداری و انرژی با GAN در طراحی انسان محور بر ارتقاء رضایت‌مندی مدارس. فصلنامه معماری و محیط‌های انسان محور، ۲ (۲)، ۴۴-۶۶.

DOI: <https://doi.org/10.82229/2025.hae.1215446>

مقدمه

افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان، تقویت رشد شناختی کودکان، و شکل‌دهی به تجربه یادگیری همگی از طریق طراحی فضاهای آموزشی - به‌ویژه در مدارس ابتدایی - امکان‌پذیر است. در این راستا، ضرورت ترکیب رویکردهای داده‌محور و مبتنی بر عملکرد با تکنیک‌های طراحی معماری بیش از پیش آشکار شده است (Belpoliti et al., 2024). در چند دهه اخیر، معماری تمرکز بیشتری بر طراحی انسان‌محور و طراحی مبتنی بر عملکرد داشته است (Shieh & Wang, 2021). به‌عنوان یک ابزار تحلیلی میان‌رشته‌ای، ارزیابی پس‌از بهره‌برداری^۱ نقش اساسی در شناسایی شکاف بین طرح اولیه و عملکرد واقعی ساختمان پس از استفاده کاربران ایفا می‌کند. مدارس ابتدایی به‌عنوان محیط‌های آموزشی با کاربران بسیار حساس (دانش‌آموزان)، نیازمند طراحی محیطی ویژه‌ای هستند که همزمان به نیازهای روان‌شناختی، جسمی و رفتاری کودکان پاسخ دهد (Shehata et al., 2025). در این فرایند از مجموعه‌ای از روش‌های کمی و کیفی مانند مشاهدات میدانی، مصاحبه‌ها، پرسشنامه‌های رضایت کاربران و اندازه‌گیری‌های محیطی استفاده می‌شود تا عناصری همچون کیفیت محیط داخلی، سازمان فضایی و خدمات پشتیبانی ساختمان ارزیابی گردد (Preiser, 1995). این رویکرد به‌ویژه در محیط‌های مسکونی و آموزشی حیاتی است، زیرا کیفیت محیط فیزیکی به‌طور مستقیم بر نتایج یادگیری، سلامت روانی و میزان رضایت کاربران اثرگذار است (Ezz et al., 2025). برای نمونه، پژوهش‌های اخیر در حوزه آموزش معماری نشان داده‌اند که POE می‌تواند اجزای کلیدی عملکردی در استودیوهای طراحی - مانند سازمان فضایی و آسایش محیطی - را شناسایی کرده و مبنایی برای ارتقای خلاقیت و بهره‌وری دانشجویان فراهم سازد (Sanni-Anibire et al., 2016). مطالعات اخیر، بر ضرورت به‌کارگیری روش‌های جامع‌تر و یکپارچه‌تر در POE تأکید دارند، به‌ویژه با توجه به افزایش پیچیدگی ساختمان‌ها و اهمیت اهداف پایداری (Zhao et al., 2024). این حوزه به‌طور مداوم در حال تکامل است و بر استانداردهای فرایندها، ارتقای گردآوری و تحلیل داده‌ها، و ادغام POE به‌عنوان بخشی الزامی از چرخه عمر ساختمان متمرکز می‌باشد. انتظار می‌رود POE به ابزاری کلیدی در بهبود کیفیت ساختمان، پایداری زیست‌محیطی و افزایش رضایت کاربران تبدیل شود (Elsayed et al., 2023). فناوری‌های نوظهوری همچون شبکه‌های مولد تخصصی (GANs)، راهکارهای نوینی برای ادغام داده‌های POE در فرایند طراحی معماری فراهم می‌آورند. از آنجا که GAN ها قادرند از الگوهای پیچیده داده‌ها - مانند ترجیحات کاربران و نیازهای فضایی - یاد بگیرند، ابزار قدرتمندی برای تولید مدل‌های معماری واقع‌گرایانه و متنوع محسوب می‌شوند (Rahbar et al., 2022; Zhou et al., 2023). ترکیب بازخورد کاربران (مانند داده‌های مربوط به آسایش، کارایی و رضایت) با داده‌های آموزشی GAN، این امکان را فراهم می‌آورد که طراحی مدارس بر اساس نیازهای واقعی کاربران و رفتارهای آنان شکل گیرد (Rizvi et al., 2021). ادغام POE با ابزارهای طراحی داده‌محور برای تحقق این هدف نقشی حیاتی دارد. به‌کارگیری GAN در طراحی معماری، امکان تولید پیکربندی‌های فضایی را بر پایه بازخوردهای عملکردی دنیای واقعی فراهم می‌کند. از رهگذر ترکیب الگوریتم‌های مولد پیشرفته با بازخورد واقعی کاربران، مدل ترکیبی GAN-POE رویکردی نوین در طراحی مدارس ارائه می‌دهد که محیط‌های آموزشی را انعطاف‌پذیرتر، کارآمدتر و کاربرمحورتر می‌سازد. این مدل طراحی خودکار فضاهای آموزشی را ممکن می‌کند، به‌گونه‌ای که نه‌تنها الزامات توپولوژیک و هندسی برآورده شوند، بلکه نیازها و تجربیات زیسته معلمان و دانش‌آموزان نیز در نظر گرفته شود. این امر از طریق استفاده از توانایی GAN در تولید الگوهای معماری واقع‌گرایانه و مبتنی بر محدودیت‌ها، و ادغام بینش‌های حاصل از POE محقق می‌گردد (Rizi & Eltaweel, 2021). هدف این همکاری، دستیابی به حداکثر کیفیت فضایی و بهره‌وری انرژی در مدارس آینده است؛ مداری که بر اساس رضایت کاربران و عملکرد واقعی طراحی و بهینه‌سازی می‌شوند.

پیشینه تحقیق

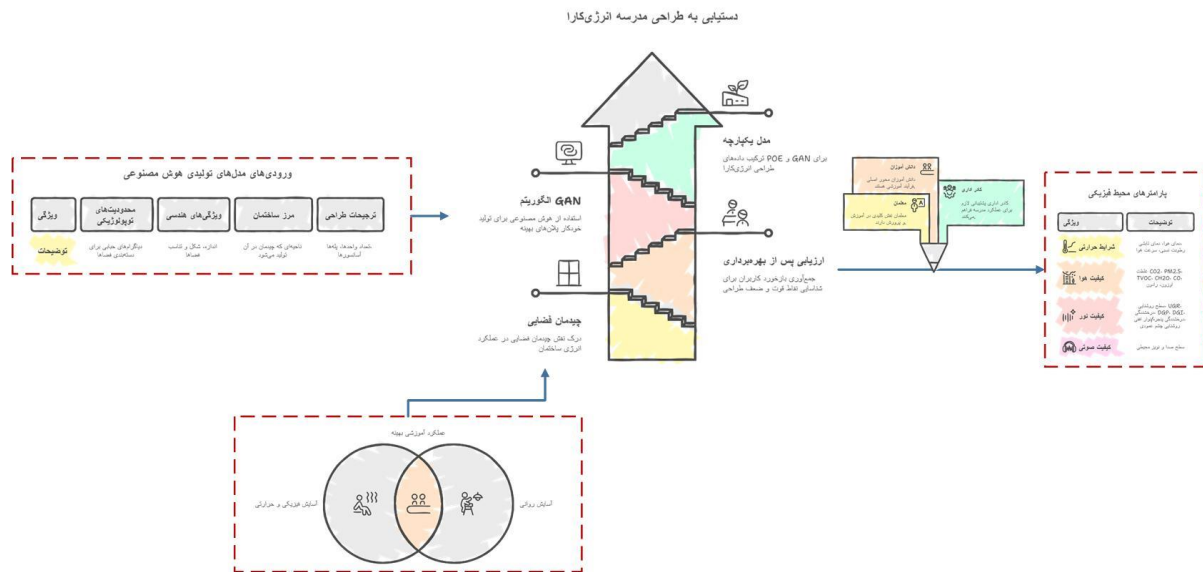
برای ارزیابی اینکه محیط‌های آموزشی تا چه اندازه نیازهای کاربران را پشتیبانی می‌کنند به‌ویژه زمانی که هدف کیفیت آموزشی و فضایی باشد، ارزیابی پس‌از بهره‌برداری به‌عنوان روشی کلیدی مطرح شده است. به گفته Caetano et al (2020) و Lizana et al., (2018)، روش‌های POE سازوکارهای بازخورد ساختارمندی فراهم می‌کنند که عملکرد، رضایت فضایی و آسایش در حوزه‌هایی مانند نور، صدا و دما را بررسی می‌کنند. درک اینکه معماری مدارس تا چه اندازه از فعالیت‌های روزمره و اهداف آموزشی حمایت می‌کند، نیازمند رویکردی داده‌محور است. POE در شناسایی ناهماهنگی‌ها میان اهداف طراحی و واقعیت‌های اجرایی بسیار موفق بوده است؛ این یافته‌ها زمینه‌ای برای بهبودهای تدریجی مانند نور طبیعی، گردش ناکارآمد یا ناراضی‌های حرارتی فراهم می‌سازند. برای پر کردن شکاف میان فرم معماری و عملکرد آموزشی، مطالعاتی مانند Chung & Yeung, (2020) و Buldur et al., (2020) بر ضرورت ادغام POE در فرایند طراحی تأکید می‌کنند. این ارزیابی‌ها علاوه بر سنجش کیفیت محیطی، ظرفیت‌های فضایی پنهان را آشکار می‌سازند که درگیر کردن کاربران و ارتقای سلامت روانی را تسهیل می‌کند. در ادبیات به‌طور مکرر بر این نکته تأکید شده که تجربه زیسته معلمان و دانش‌آموزان باید مبنای طراحی پاسخگو در محیط‌های یادگیری قرار گیرد. در نتیجه، استفاده از POE در معماری مدارس معاصر به‌عنوان ابزاری تشخیصی و پیش‌بینی‌کننده روبه‌افزایش است. در یک مطالعه، «عصب‌معماری» اطلاعاتی درباره تأثیر طراحی بر سیستم عصبی ارائه کرد، هرچند غالباً احساسات ذهنی کاربران نادیده گرفته می‌شد. در پژوهشی روی ۱۲۰

دانش‌آموز دبستانی تهرانی، ترجیحات جنسیتی در فضا شناسایی شد و عناصر طراحی نادیده‌گرفته‌شده‌ای مانند پنجره‌ها، زمین بازی و بهداشت آشکار گردید. ترکیب عصب‌معماری با رویکردهای کیفی، طراحی مدارس کاربرمحور را بهبود می‌بخشد و آن را با نیازهای واقعی دانش‌آموزان تطبیق می‌دهد (Gharaei et al., 2024).

پیشرفت‌های اخیر در هوش مصنوعی نیز جریان طراحی معماری را تغییر داده‌اند. شبکه‌های مولد تخصصی به دلیل توانایی در تولید پیکربندی‌های پیچیده فضایی، محبوبیت یافته‌اند. برخلاف روش‌های مبتنی بر قوانین، GAN ها از آموزش تخصصی بهره می‌برند؛ به این معنا که یک «تمایزگر»^۲ تصاویر پلان تولیدی را با نمونه‌های واقعی مقایسه کرده و به مدل امکان می‌دهد قواعد فضایی انتزاعی را صرفاً از داده‌ها بیاموزد. کارایی استفاده از یادگیری عمیق برای تولید خودکار پلان معماری، به‌ویژه در مراحل اولیه طراحی، توسط پژوهش‌های متعددی تأیید شده است (Bayer et al., 2014; Rodrigues, 2014; Turner & on, 2014). GAN ها توانایی بالایی در شناسایی الگوهای زیبایی‌شناختی و منطقی منطقه‌بندی در طرح‌های واقعی مدارس دارند. برای مثال، پروژه‌هایی مانند Wu et al., (2019) و Egor et al., (2020) نشان داده‌اند که هوش مصنوعی می‌تواند انتخاب‌های ضمنی معماران درباره همجواری فضاها، دسترسی به نور طبیعی و جهت‌گیری راهروها را بازتولید کند. نسل پیشرفته‌تر GAN ها شامل مکانیزم‌های شرطی‌سازی هستند که خروجی را بر اساس اهداف یا محدودیت‌های طراحی مانند شاخص‌های استخراج‌شده از POE هدایت می‌کنند. این همگرایی میان مدل‌های مولد و معیارهای عملکردی نشانگر یک تغییر پارادایم از «تولید فرم صرف» به «ترکیب هدف‌محور در طراحی معماری» است. با این حال، پژوهش‌هایی که از کدگذاری‌های برداری یا توالی اتاق‌های برج‌سب‌خورده استفاده می‌کنند نشان می‌دهند که خروجی‌های فعلی GAN ها غالباً فاقد عمق معماری‌اند، مگر آنکه با داده‌های معنایی یا زمینه‌ای آموزش داده شوند.

به‌طور سنتی، روش‌های پارامتریک و ارزیابی‌های مبتنی بر شبیه‌سازی (مانند انرژی پلاس و دیزاین بیلدر) برای بهینه‌سازی چیدمان فضایی در راستای بهره‌وری انرژی به کار می‌رفته‌اند. این ابزارها امکان ارزیابی عملکرد در حوزه‌هایی همچون دریافت انرژی خورشیدی، بارهای سرمایش و گرمایش، خودبستگی نوری و رفتار حرارتی را فراهم می‌کنند. برای مثال، پژوهش‌هایی همچون Caldas & Michalek et al., (2002) و Norford, (2002) و Dogan et al., (2015) روش‌های بهینه‌سازی اولیه‌ای ارائه دادند که هندسه فضایی را با نتایج عملکرد انرژی مرتبط می‌کرد. اگرچه الگوریتم‌هایی مانند EPSAP و FPOP (Rodrigues et al., 2014) نتایج امیدوارکننده‌ای در اصلاح متوالی چیدمان‌ها برای بهبود شاخص‌های حرارتی و روشنایی نشان داده‌اند، اما هزینه محاسباتی بالا و محدودیت در انعطاف‌پذیری طراحی نقاط ضعف آن‌ها محسوب می‌شود. در همین حال، پژوهش‌های Ma et al., (2019) و Zhang & Bluysen, (2021) نشان داده‌اند که مدل‌های آماری و شبیه‌سازی قادر به پیش‌بینی تأثیر جهت‌گیری اتاق‌ها، اندازه و موقعیت پنجره‌ها بر بارهای انرژی هستند. با این وجود، این رویکردها اغلب رفتار و آسایش کاربران را نادیده می‌گیرند. به همین دلیل، نیاز به یک روش ترکیبی که بتواند بین آسایش حرارتی و آسایش تجربی تعادل برقرار کند، ضروری است.

موج جدیدی از تحقیقات به بررسی مدل‌های ترکیبی می‌پردازد که الگوریتم‌های طراحی مولد را با داده‌های حاصل از POE تلفیق می‌کنند تا شکاف میان عملکرد محیطی و تجربه کاربری پر شود. این امر به‌ویژه در طراحی مدارس مهم است، زیرا عوامل محیطی تأثیر مستقیم بر نتایج یادگیری دارند. برخی مطالعات، مانند Eisenstadt et al., (2020)، رویکردهای هم‌تکاملی^۳ را پیشنهاد می‌دهند که منطق عملکردی و خودبستگی نوری را همزمان در نظر می‌گیرند. مطالعات دیگر (Dong et al., 2017) نیز امکان استفاده از شبکه‌های ترجمه تصویر به تصویر را برای تطبیق پیکربندی فضایی با معیارهای عملکردی مطرح کرده‌اند. با شرطی‌سازی فرآیند تولید پلان بر اساس ورودی‌های POE (مانند رضایت کاربران از اندازه کلاس‌ها، نورپردازی و طراحی راهروها)، GAN ها می‌توانند طرح‌هایی تولید کنند که هم بهینه از نظر انرژی و هم مبتنی بر تجربه کاربران باشند. پیشینه‌های مهمی برای این ترکیب توسط ابزارهایی مانند «برنامه‌ریزی چیدمان فضایی همراه با نمودارهای عملکردی» (Rodrigues, 2014) و «اثر انگشت معنایی برای بازیابی اسکیس» (Turner & on, 2014) فراهم شده است. همچنین، روش‌های پیشرفته خوشه‌بندی و تحلیل آماری (Caldas & Norford, 2002) در دسته‌بندی چیدمان‌ها بر اساس رضایت و الگوهای انرژی کمک کرده و انتخاب بهترین طرح‌ها را پس از تولید تسهیل می‌کنند. از این رو، مدل ترکیبی GAN-POE در دل این گفتگوی در حال توسعه جای می‌گیرد و هدف آن خودکارسازی طراحی مدارس همراه با حساسیت بالا به بازخورد انسانی و عملکرد محیطی است. بر اساس مرور ادبیات، شکل ۱ یک فلوچارت برای طراحی نقشه فضایی بهینه از نظر انرژی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. فلوجارت برای طراحی نقشه فضایی بهینه از نظر انرژی

هدف اصلی این پژوهش یک چارچوب ترکیبی است که داده‌های ارزیابی پس از بهره‌برداری را مستقیماً در فرآیند تولید چیدمان‌های معماری توسط شبکه‌های مولد تخصصی وارد می‌کند. نوآوری پژوهش در ادغام بازخورد واقعی کاربران با شبیه‌سازی‌های انرژی و طراحی داده‌محور است که تاکنون در ادبیات به صورت محدود مطرح شده بود. دستاورد کلیدی این مطالعه نشان دادن این است که طرح‌های تولیدشده با مدل GAN-POE می‌توانند هم‌زمان باعث افزایش رضایت کاربران و بهبود بهره‌وری انرژی مدارس ابتدایی شوند.

ادبیات و مبانی نظری

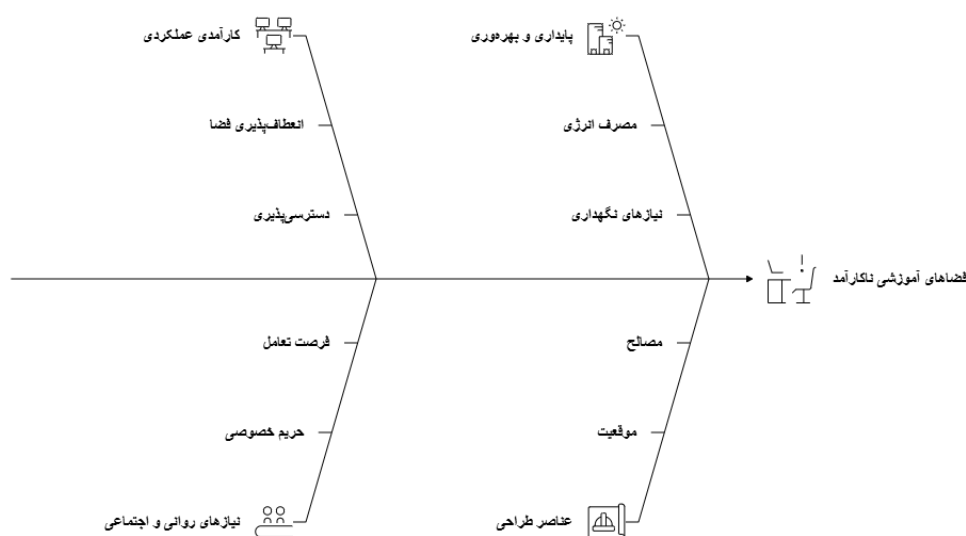
ارزیابی پس از بهره‌برداری در طراحی آموزشی، فرآیندی جامع است که بررسی می‌کند تا چه اندازه فضاهای آموزشی از جمله مدارس، دانشگاه‌ها، آتلیه‌ها و خوابگاه‌ها نیازهای کاربران را برآورده کرده و وظایف پیش‌بینی شده خود را به درستی انجام می‌دهند. در این نوع ارزیابی، طیف گسترده‌ای از عوامل مورد بررسی قرار می‌گیرند، از جمله آسایش محیطی (دما، نور، آکوستیک، کیفیت هوا)، سازماندهی فضایی، یکپارچگی فناوری، و میزان رضایت کاربران؛ عواملی که همگی تأثیری مستقیم بر فرآیند یادگیری، خلاقیت و سلامت روانی دارند (Shehata et al., Ezz et al, 2025). این فرآیند معمولاً ترکیبی از روش‌های کمی (نظیر سنجش‌های محیطی و پرسشنامه‌ها) و کیفی (نظیر مصاحبه‌ها و بازدیدهای میدانی) را در بر می‌گیرد تا درک جامعی از نحوه اثرگذاری محیط ساخته‌شده بر دانش‌آموزان، اساتید و کارکنان حاصل شود (Rashed-Ali et al., 2023; Tookaloo & Smith, 2015). یکی از ابعاد کلیدی POE در فضاهای آموزشی، ارزیابی «کارآمدی عملکردی» است یعنی سنجش اینکه فضاهای مختلف (کلاس‌ها، آتلیه‌ها، فضاهای جانبی) تا چه اندازه در انجام فعالیت‌های آموزشی پیش‌بینی شده موفق بوده‌اند و چگونه با یکدیگر تعامل دارند. این شامل بررسی انعطاف‌پذیری فضاها، دسترسی‌پذیری، کفایت فضاهای پشتیبان و همچنین تأثیر عناصر طراحی مانند موقعیت، مصالح و جزئیات اجرایی بر استفاده روزمره می‌شود (Rashed-Ali et al., 2023). POE همچنین به نیازهای روانی و اجتماعی کاربران توجه دارد، از جمله نیاز به حریم خصوصی، فرصت تعامل، و احساس امنیت و تعلق، که به‌ویژه در رشد کودکان و سلامت روان دانشجویان اهمیت بسزایی دارند (Shehata et al., 2025). برای مثال، در خوابگاه‌های دانشجویی، POE می‌تواند متغیرهایی مانند احساس قلمرو، حریم خصوصی، انعطاف‌پذیری فضا و آسایش را بررسی کند تا از این طریق اطمینان حاصل شود که محیط سکونت، نقش مثبتی در یادگیری و رشد فردی ایفا می‌کند (Kustiani & Khidmat, 2021).

بُعد مهم دیگر، بررسی میزان انطباق عملکرد ساختمان با اهداف پایداری و بهره‌وری عملیاتی است. POE کمک می‌کند تا شکاف میان اهداف طراحی و عملکرد واقعی ساختمان‌ها نظیر مغایرت در مصرف انرژی، نیازهای نگهداری، یا کیفیت محیط داخلی شناسایی شده و بازخوردهای اجرایی مناسبی به مدیران و برنامه‌ریزان ارائه شود (Bortolini & Forcada, 2021; Zhao & Yang, 2022). این بازخوردها می‌توانند منجر به بهبودهای هدفمند مانند ارتقای سیستم‌های روشنایی، بهینه‌سازی تهویه یا بازپیکربندی فضاها شوند تا هم مصرف منابع کاهش یافته و هم رضایت کاربران افزایش یابد. همچنین، POE به تدوین دستورالعمل‌های عملیاتی با عملکرد بالا کمک کرده و فرآیند برنامه‌ریزی پروژه‌های آتی را با

اطلاعات واقعی و کاربردی تغذیه می‌کند، به‌طوری‌که ساختمان‌های آموزشی در طول زمان انعطاف‌پذیر و تاب‌آور باقی بمانند (Tookaloo & Smith, 2015).

در نهایت، POE در طراحی آموزشی صرفاً یک تمرین فنی نیست، بلکه فرآیندی مشارکتی است که به شنیده شدن صدای تمامی کاربران اهمیت می‌دهد. با درگیر ساختن دانش‌آموزان، معلمان، مدیران و کارکنان تاسیساتی در روند ارزیابی، POE فرهنگ بهبود مستمر و طراحی مبتنی بر شواهد را تقویت می‌کند (Riley et al., 2010; Roberts et al., 2023). بینش‌های حاصل‌شده از این فرایند می‌توانند به برنامه‌ریزی دقیق‌تر، نگهداری پاسخ‌گوتر، و در نهایت، خلق فضاهایی بیانجامند که محیط یادگیری، خلاقیت و سلامت روان را به شکلی مؤثر حمایت می‌کنند (کرنز و همکاران، ۲۰۲۱). شکل ۲ ابعاد کلیدی POE در محیط آموزشی را نشان می‌دهد.

ارزیابی اثربخشی فضاهای آموزشی



شکل ۲ ابعاد کلیدی POE در محیط آموزشی

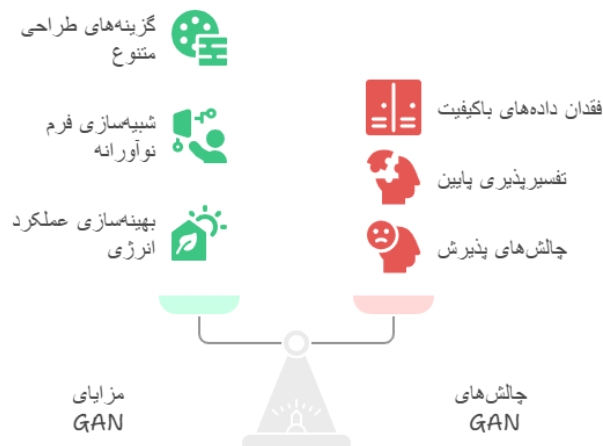
مصرف انرژی در تمامی ساختمان‌ها بسیار مهم بوده و به خصوص در مدارس کنترل مصرف انرژی و کاهش آن مورد توجه قرار گرفته است. در بسیاری از مطالعات گذشته، تأثیر ویژگی‌های ساختمان بر مصرف انرژی، مانند سن (Raatikainen et al., 2016)، مساحت کف (Li et al., 2014a) و نوع سیستم گرمایش و تهویه مورد بررسی قرار گرفت (Dias Pereira et al., 2017). یک مطالعه میدانی بزرگ در مورد مصرف انرژی در مدارس ایالات متحده نشان داد که مدارس جدید برق بیشتری نسبت به مدارس قدیمی مصرف می‌کنند (Robertson & Higgins, 2012). نتیجه مشابهی توسط Issa and Ouf (2017) در مدارس کانادا یافت شد. مدارس جدیدتر گاز کمتری نسبت به مدارس قدیمی مصرف کردند. از نظر مساحت ساختمان، اگرچه تأثیر قابل توجهی از اندازه ساختمان بر مصرف انرژی در واحد مساحت ایجاد نشده است، Li et al (2014) گرایش به احتمال زیاد مصرف ساختمان‌های بزرگتر نسبت به ساختمان‌های کوچکتر را بیشتر تشخیص دادند. تأثیر انواع سیستم‌های تهویه مطبوع (گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع) بر مصرف انرژی در بسیاری از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. درک این نکته دشوار نیست که یک ساختمان با سیستم تهویه مطبوع در حال مصرف انرژی الکتریکی بیشتری نسبت به یک ساختمان با تهویه طبیعی است. بنابراین، برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، معمولاً تهویه طبیعی برای اولین بار در مدارس مورد توجه قرار می‌گیرد (Gil-Baez et al., 2017). پارامترهای تعریفی این پژوهش با بررسی کامل پیشینه پژوهش و مطابق با مبحث ۱۹ نظام مهندسی تهران انتخاب می‌گردد. در کنار مصرف انرژی، ارزیابی پس‌از بهره‌برداری، شاخص مهمی برای ارزیابی عملکرد ساختمان است. این مهم است که یک ساختمان مدرسه یک محیط آموزشی سالم و راحت را فراهم کند. مطالعات زیادی برای بررسی کیفیت محیط داخلی^۵ یعنی حرارتی، هوا، روشنایی و/یا کیفیت صوتی در کلاس‌های درس مدارس انجام شده است (Jain et al., 2019). مطالعات متمرکز بر مصرف انرژی و کیفیت محیط داخلی نشان داد که کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مدرسه بدون به خطر انداختن کیفیت محیط داخلی در کلاس‌های درس اغلب یک چالش پیچیده است اما غیرقابل دستیابی نیست (Dias Pereira et al., 2019). به عنوان مثال، با برنامه‌ریزی مجدد سیستم‌های مدیریت ساختمان یا با تنظیم طرح‌ها و میزان تهویه، می‌توان بهره‌وری انرژی و کیفیت محیط داخلی را در کلاس‌های درس بهبود بخشید. در بهار سال ۲۰۱۷، یک نظرسنجی از کیفیت محیط داخلی از ۵۴ کلاس

درس در ۲۱ مدرسه ابتدایی هلند انجام شد توسط (Bluyssen et al, 2018) تیمی از محققان در یک روز از پیش تعیین شده برای انجام نظرسنجی از همه مدارس دیدن کردند. این نظرسنجی شامل یک پرسشنامه برای معلمان در مورد اقدامات آن‌ها برای بهبود کیفیت محیط داخلی، یک پرسشنامه برای کودکان در مورد سلامت، آسایش و ترجیحات آن‌ها، و یک چک‌لیست در مورد مشخصات ساختمان و سیستم، از جمله داده‌های مصرف انرژی است. تمام پرسشنامه‌ها و چک‌لیست‌ها در همان روز توزیع و جمع‌آوری شد. نتایج اصلی در مورد سلامت و آسایش کودکان، ترجیحات، فعالیت معلمان گزارش شده است. طبق تجزیه و تحلیل‌های قبلی، همه کودکان مدرسه از کیفیت داخلی محیط در کلاس‌های خود ناراضی بودند و سر و صدا بزرگترین مزاحم بود. علاوه‌براین، مشخص شد که کودکان مختلف واکنش‌های متفاوتی نسبت به یک محیط داخلی مشابه دارند (Bluyssen et al., 2018). بدین سبب، بررسی مصرف انرژی در مدارس به دلایل ذکرشده همچون کیفیت محیط داخلی و تأثیر بر یادگیری دانش‌آموزان حائز اهمیت است.

شبکه‌های مولد تخصصی^۶ به‌طور فزاینده‌ای در طراحی معماری مورد استفاده قرار می‌گیرند تا فرآیند خلق فرم‌های ساختمانی، پلان‌ها و چیدمان‌های فضایی را به‌صورت خودکار و پیشرفته ارتقا دهند (Jiang et al., 2023a). این شبکه‌ها در یادگیری ویژگی‌های مورفولوژیکی داده‌های معماری موجود بسیار توانمند بوده و می‌توانند چیدمان‌هایی جدید، واقع‌گرایانه از نظر بصری و معنادر از نظر عملکردی تولید کنند که به محدودیت‌های سایت و نیازهای طراحی پاسخ می‌دهند (Wang et al., 2024a). به‌عنوان نمونه، مدل‌های پیشرفته‌ای نظیر Site-Embedded GANs (ESGAN) و House-GAN++ قادرند پلان‌های ساختمانی را تولید کرده و به‌صورت تکرارشونده اصلاح کنند، به‌گونه‌ای که خروجی آن‌ها با طرح‌های معماران حرفه‌ای قابل رقابت باشد. این سیستم‌ها توانایی پوشش مقیاس‌های مختلف از طرح‌های کلی سایت تا پلان‌های جزئی واحدهای مسکونی را دارند و می‌توانند اطلاعات زمینه‌ای یا نیازهای تعریف‌شده توسط کاربر را در فرآیند طراحی لحاظ کنند تا ارتباط و کارایی طرح افزایش یابد (Nauata et al., 2021).

یکی دیگر از توانایی‌های GAN ها، تولید پلان‌های معماری در سبک‌های خاص، تحلیل تنوع طراحی، و حتی خلق طرح‌هایی است که در مجموعه داده‌های اصلی وجود ندارند که این امر افق‌های جدیدی برای خلاقیت در اختیار معماران قرار می‌دهد (Newton, 2019b). این شبکه‌ها هم در شرایط برخورداری از داده‌های حجیم و هم در موقعیت‌های کم‌داده قابل استفاده‌اند؛ روش‌هایی مانند یادگیری انتقالی^۷ و افزایش داده^۸ می‌توانند کارایی GAN ها را در شرایط محدودیت داده ارتقاء دهند (Wang et al., 2024a). افزون بر این، GAN ها با خودکارسازی وظایف تکراری مانند ترسیم‌های ابتدایی، به معماران این امکان را می‌دهند که تمرکز خود را بر تصمیم‌گیری‌های کلان و خلاقانه معطوف سازند (Xu et al., 2024). با وجود قابلیت‌های چشمگیر، چالش‌هایی نیز در استفاده از GAN ها مطرح است؛ از جمله نیاز به مجموعه داده‌های باکیفیت و ساختارمند، و لزوم اصلاح و پالایش خروجی‌ها برای اطمینان از قابلیت استفاده و دقت در پروژه‌های واقعی (Zhang et al., 2024). با این حال، به‌طور کلی می‌توان گفت که به‌کارگیری GAN ها در طراحی معماری و تولید چیدمان فضایی، مرزهای جدیدی در بهره‌وری، خلاقیت و خودکارسازی فرآیند طراحی گشوده و ابزارهایی قدرتمند در اختیار معماران قرار داده است تا بتوانند محیط‌های نوآورانه و پاسخ‌گو را طراحی و ارزیابی کنند (Bank et al., 2022; ÖZMAN & SELÇUK, 2023; Wu et al., 2022a).

در بعد اجرایی، استفاده از GAN در طراحی مدارس با چالش پذیرش در جامعه حرفه‌ای معماری روبه‌رو است. بسیاری از معماران و تصمیم‌گیران آموزشی نسبت به الگوریتم‌های یادگیری ماشین آگاهی محدودی دارند و اعتماد کافی به آن‌ها برای تصمیم‌گیری طراحی ندارند. همچنین پیاده‌سازی خروجی GAN در پروژه‌های واقعی نیازمند تبدیل آن به نقشه‌های اجرایی، کنترل مهندسی و انطباق با آیین‌نامه‌های ساخت است که فراتر از توانایی مستقیم مدل است. بنابراین، لازم است GAN ها به عنوان ابزار مکمل در فرآیند طراحی اولیه به‌کار گرفته شوند و توسط طراح انسانی هدایت و اصلاح شوند تا از ایجاد طرح‌های غیرقابل اجرا جلوگیری شود. شکل ۳ مزایا و چالش‌های الگوریتم گن در طراحی مدارس را بیان می‌کند.



شکل ۳ مزایا و چالش‌های الگوریتم‌گن در طراحی مدارس

مواد و روش تحقیق

این پژوهش از یک طرح ترکیبی تبیینی-توالی‌دار^۹ استفاده کرده است. در گام نخست، اولویت‌های کاربران از طریق گردآوری و تحلیل داده‌های تجربی حاصل از ارزیابی پس از بهره‌برداری مشخص شد؛ سپس این شاخص‌ها به‌عنوان داده‌های شرطی در یک شبکه مولد تخصصی وارد شدند تا طرح‌های متنوعی از پلان معماری تولید گردد. این پژوهش از دو منبع داده بهره می‌گیرد:

(الف) داده‌های POE: در مجموع ۳۸۴ کاربر مدارس ابتدایی شهر تهران در پیمایش مشارکت کردند که پس از غربال‌گری کیفیت پاسخ‌ها و سنجش پایایی، ۳۲۰ پاسخ کامل و معتبر حفظ شد ($\text{Cronbach's } \alpha = 0.881$).

(ب) مجموعه پلان‌ها: برای آموزش مدل مولد، ۱۰ نمونه پلان طبقه به‌کار رفت که شامل پلان‌های واقعی بازترسیم‌شده در CAD و نیز شکل‌تپ‌های استاندارد مدارس است. معیار ورود شامل وضوح کافی، مقیاس قابل‌استخراج و امکان بازترسیم بود؛ پلان‌های ناقص یا نامرتب حذف شدند.

در نهایت، هر پلان مصنوعی با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس شبیه‌سازی و عملکرد انرژی آن ارزیابی شد. نتایج این شبیه‌سازی مجدداً به چرخه آموزش GAN بازخورد داده شد تا خروجی‌ها به‌صورت تدریجی بهبود یابند. با ترکیب POE، شبکه‌های مولد تخصصی و مدل‌سازی انرژی، این پژوهش فرآیندی نوآورانه ارائه می‌دهد که میان معماری پایدار و تجربه کاربری پیوند برقرار می‌کند. در این رویکرد، POE از یک ابزار ارزیابی منفعل به یک نیروی پیش‌بینانه و مولد تبدیل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بازخورد کاربران به‌عنوان عنصر اصلی طراحی به کار گرفته می‌شود نه صرفاً نقدی پسینی. GAN در اینجا به‌عنوان یک میانجی هوشمند عمل می‌کند که داده‌های رضایت کاربران را به پلان‌های معماری ترجمه کرده و الزامات عملکرد محیطی را نیز پیش‌بینی می‌نماید. این مدل ترکیبی با اتصال خلاقیت محاسباتی به ارزیابی انسان‌محور، چرخه‌ای پاسخگو و تکرارشونده ارائه می‌دهد که مطابق با اهداف انرژی و نیازهای کاربران تکامل می‌یابد. در آینده، چنین رویکردی می‌تواند طراحی فضاهای آموزشی را متحول کند، به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت منابع یا خطرات تغییرات اقلیمی مواجه هستند. مدارس از یک نهاد ایستا به اکوسیستم‌های یادگیری پویا تبدیل خواهند شد؛ جایی که آسایش، انعطاف‌پذیری و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی در طراحی توأمان لحاظ می‌شوند. ترکیب مدل‌های مولد مبتنی بر هوش مصنوعی با مکانیزم‌های بازخورد عملکردی، امکان بهینه‌سازی طراحی در زمان واقعی، مشارکت ذینفعان و حتی تدوین دستورالعمل‌های سیاست‌محور بر پایه داده‌های رفتاری تجمیع‌شده را فراهم می‌کند. افزون بر این، روش پیشنهادی از نظر مقیاس‌پذیری و قابلیت انتقال بسیار انعطاف‌پذیر است و می‌تواند در انواع کاربری‌های ساختمانی و زمینه‌های جغرافیایی مختلف به کار رود. این مطالعه به گرایش رو به رشد معماری مبتنی بر شواهد، کاربرمحور و آگاه به انرژی می‌پیوندد و گفتگویی میان داده، طراحی و عملکرد ایجاد می‌کند. در این پژوهش، از مدل شبکه‌های مولد خصمانه برای تولید پلان‌های معماری بهینه با تأکید بر کارایی فضایی و بهره‌وری انرژی استفاده شده است. ساختار GAN شامل دو شبکه رقابتی است: شبکه مولد^{۱۰} و شبکه تفکیک‌گر^{۱۱} که به‌صورت همزمان آموزش می‌بینند. عملکرد این دو شبکه در قالب یک بازی کمینه-بیشینه^{۱۲} تعریف می‌شود. تابع هدف استاندارد GAN به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(D, G) = \max_D \min_G E_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p_z(z)} [\log (1 - D(G(z)))] \quad ۱$$

که در آن:

- $G(z)$: خروجی شبکه مولد با ورودی نویز z
- $D(x)$: احتمال اینکه نمونه x واقعی باشد
- p_{data} : توزیع داده‌های واقعی (پلان‌های معماری موجود)
- $p_z(z)$: توزیع نویز اولیه (معمولاً نرمال استاندارد)

فرایند آموزش به‌صورت دوره‌ای^{۱۳} اجرا شده و در هر تکرار، گام‌های زیر طی می‌شود:

از دیتاست واقعی، یک mini-batch شامل m پلان معماری (در قالب تصویر یا نقشه رنگی با ابعاد ۶۴×۶۴) انتخاب می‌شود.

هم‌زمان، m بردار نویز تصادفی $z \in R^n$ از توزیع نرمال استاندارد تولید می‌گردد.

برای Discriminator، هدف شبکه تفکیک‌گر، تمایز میان پلان واقعی و تولیدی است. برای آن، تابع خطای زیر تعریف می‌شود:

$$L_D = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\log D(x^{(i)}) + \log (1 - D(G(z^{(i)})))] \quad ۲$$

که در آن $x^{(i)}$ پلان واقعی و $G(z^{(i)})$ پلان تولیدشده است. سپس وزن‌های شبکه D با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی (مانند Adam) به‌روزرسانی می‌شوند.

Generator با هدف فریب دادن Discriminator آموزش می‌بیند، بدین معنا که خروجی تولیدی آن به‌عنوان "واقعی" توسط D پذیرفته شود. برای این منظور، تابع خطای آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

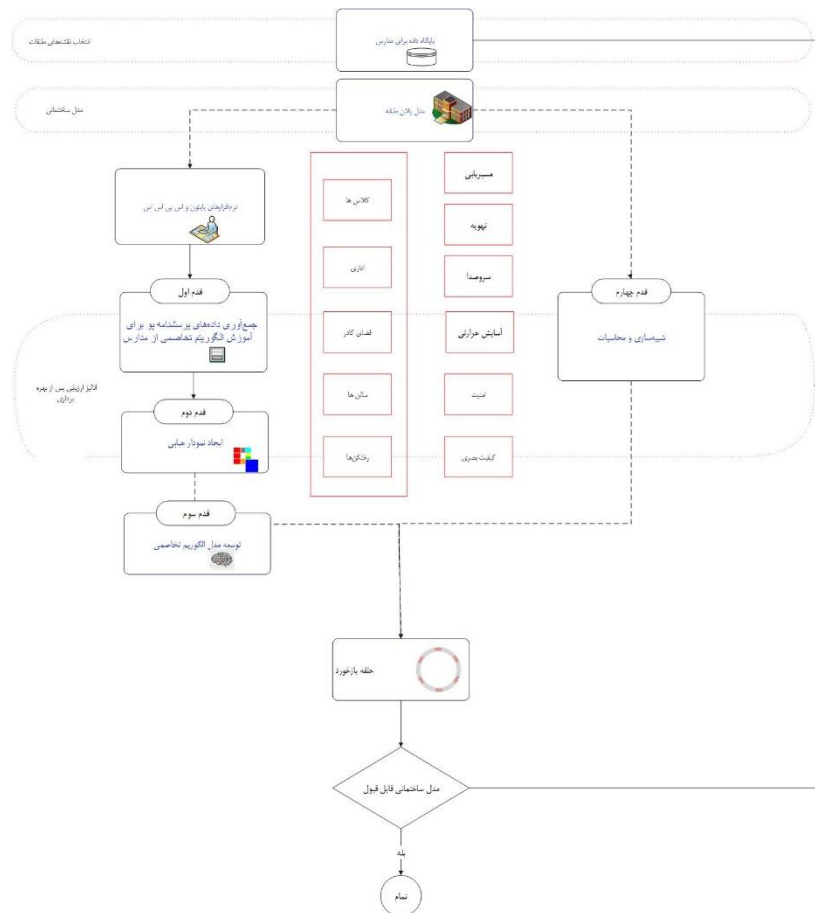
$$L_G = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log D(G(z^{(i)})) \quad ۳$$

این تابع نشان می‌دهد که هرچه خروجی مولد توسط تفکیک‌گر به‌عنوان واقعی‌تر شناخته شود، خطای Generator کمتر خواهد بود. برای به‌روزرسانی وزن‌های شبکه‌ها، از الگوریتم Adam با نرخ یادگیری $\alpha=0.0002$ ، مومنتوم $\beta_1=0.5$ و $\beta_2=0.999$ استفاده شد. تعداد تکرارها^{۱۴} برای رسیدن به همگرایی، ۵۰۰ تعیین گردید. در کدنویسی، کانال‌های ورودی: ۱۲ کانال، این شامل ۶ کانال اطلاعات تصویری اولیه و ۶ کانال ویژگی‌های POE می‌باشد. بر پایه‌ی بینش‌های تجربی حاصل از تحلیل داده‌های ارزیابی پس‌از بهره‌برداری، این مطالعه به فاز مولد وارد می‌شود تا بررسی کند چگونه بازخوردهای فضایی مبتنی بر کاربر می‌توانند طراحی پیش‌بینانه را تغذیه کنند. الگوها، روابط و سازه‌های پنهانی که از طریق مدل‌سازی آماری شناسایی شدند، نه تنها در درک رضایت کاربران نقش کلیدی داشتند، بلکه به‌عنوان ورودی‌های پایه‌ای برای شرطی‌سازی چارچوب GAN مورد استفاده قرار گرفتند. این یکپارچگی موجب شد تا مدل مولد بتواند به‌طور ضمنی به داده‌های ارزیابی پاسخ دهد و ترجیحات تجربی کاربران را به فرم معماری تبدیل کند. با تعبیه این ساختار مبتنی بر داده‌های کاربران در فرآیند آموزش GAN، تولید چیدمان‌ها بر مبنای عملکرد واقعی پس از بهره‌برداری هدایت شد و طراحی محیطی پیش‌بینانه با تجربه‌ی فضایی واقعی هم‌راستا گردید. شبکه‌ی مولد تخصصی در طی ۵۰۰ دوره آموزش دید تا چیدمان‌های فضایی مصنوعی‌ای را مدل‌سازی کند که به ترجیحات زیربنایی استخراج‌شده از داده‌های POE پاسخ دهند. این فرآیند آموزشی منجر به تغییرات قابل توجهی در کیفیت پیکربندی فضایی و زون‌بندی عملکردی شد؛ به‌گونه‌ای که مدل به‌مرور از داده‌های آموزشی آموخت. در مراحل ابتدایی آموزش (دوره‌های ۰ تا ۲۰۰)، چیدمان‌های تولیدی فاقد زون‌بندی معنادار بودند. جانیامی عناصر عملکردی نامنظم و همراه با نویز بود و تمایزی میان فضاهای عملکردی مشاهده نمی‌شد؛ که این موضوع در نقشه‌های حرارتی نیز با پوشش نزدیک به صفر برای تمامی زون‌ها در دوره‌های اولیه منعکس گردید. با پیشرفت آموزش، به‌ویژه از دوره ۳۰۰ به بعد، توانایی مدل در استدلال فضایی بهبود یافت. زون‌های خاص به‌صورت مداوم شروع به ظهور کردند و تا دوره ۴۰۰، الگوهای مشخص و منظم‌تری در چیدمان‌های تولیدی قابل تشخیص بودند. هندسه‌های اولیه‌ای که برای تولید چیدمان فضایی مبتنی بر GAN در این پژوهش به کار رفتند، از میان تیپولوژی‌های متداول مدارس ابتدایی تهران انتخاب شدند. این اشکال شامل فرم‌های مربع، خطی، L، U و H شکل بودند که هر کدام زیربنایی در حدود ۱۰۰۰ متر مربع داشتند. شکل ۴ فلوچارت روش تحقیق را نشان می‌دهد.

داده‌ها به‌صورت لایه‌بندی‌شده بر پایه تیپولوژی و زیربنا به نسبت ۱۵/۱۵/۷۰ به مجموعه‌های Train/Val/Test تقسیم شدند؛ برای جلوگیری از نشتی داده، نمونه‌های منتسب به یک مدرسه هرگز میان این مجموعه‌ها توزیع نشدند. افزایش داده شامل چرخش‌های مجاز ($\pm ۹۰^\circ$ ، ۱۸۰)، انعکاس افقی/عمودی و برش/بازنمونه‌گیری کنترل‌شده بود؛ پارامترها طوری تنظیم شدند که قیود معماری (پیوستگی کربدورها، تناسب کلاس‌ها) حفظ شود. ورودی‌های تصویری با اندازه 64×64 پیکسل پردازش شدند. ۱۲۰ کانال ورودی شامل ۶ ماسک مکانی یک‌به‌یک برای کلاس‌های فضایی و نگاشت ویژگی‌های منتخب POE به‌عنوان شرط مدل بودند. آموزش با بهینه‌ساز Adam و ۵۰۰ اپوک انجام شد. ارزیابی از MSE و SSIM برای سنجش کیفیت بازنمایی مکانی استفاده کرد؛ طرح‌های تولیدی در انرژی پلاس نیز از منظر مصرف انرژی سالانه EUI/تحلیل شدند.

برای آنکه خروجی‌های پیکسلی GAN به طرح‌های قابل اجرا تبدیل شوند، نقشه‌های حرارتی و زون‌بندی رنگی ابتدا به‌صورت بردار^{۱۵} بازترسیم شدند. این کار با انتقال تصاویر به محیط نرم‌افزارهای طراحی (مانند AutoCAD و Revit) انجام گرفت و هر زون رنگی به‌عنوان یک کاربری مشخص تعریف شد. سپس مرزها و ابعاد فضایی بر اساس مقیاس واقعی بازسازی و با استانداردهای مقررات ملی ساختمان و مبحث ۱۹ همساز

گردید. این فرآیند باعث شد تا طرح‌های تولیدشده از حالت پیکسلی و آزمایشگاهی به پلان‌های معماری قابل اجرا و منطبق بر شرایط واقعی ساخت تبدیل شوند



شکل ۴: فلوجارت تحقیق

فرضیات سازه‌ای، مصالح و آکوستیک (ثابت برای ایزوله کردن اثر چیدمان)

برای تمرکز بر نقش چیدمان فضایی در انرژی و رضایت کاربران، مفروضات زیر در همه سناریوها ثابت در نظر گرفته شد:

- **سامانه سازه‌ای و مدول‌بندی:** یک سامانه متعارف قاب ساختمانی برای مدارس ابتدایی با مدول منظم؛ کنترل اولیه تناسبات فضایی (طول-عرض کلاس‌ها، حداقل عرض راهروها) در مرحله بازترسیم CAD اعمال شد.
 - **مصالح و پوسته ساختمان:** ترکیب پایه پوسته و جداره‌ها مطابق الزامات رایج اقلیم تهران و مبحث ۱۹ به‌صورت ثابت لحاظ شد تا اثر تغییرات مصالح بر نتایج وارد نشود.
 - **ملاحظات آکوستیک:** الزامات حداقلی جداسازی و جذب صوتی به‌عنوان پیش‌فرض ثابت در نظر گرفته شد؛ تحلیل آکوستیکی تفصیلی در دامنه این مطالعه نبوده است.
 - **هزینه:** برآورد هزینه اجرا/بهره‌برداری مدل‌سازی نشد. برای سنجش مقایسه‌ای در سطح مفهومی، نماگرهای ساده هزینه‌محور (مانند طول پوسته خارجی و طول کل راهروها) به‌عنوان شاخص‌های کیفی در بخش بحث‌ونتیایج مطرح می‌شوند.
- این رویکرد باعث می‌شود اثرات مشاهده‌شده به چیدمان فضایی نسبت داده شود و نه به تفاوت‌های سازه/مصالح.

دامنه کاربری‌های فضایی و منطق انتخاب

برای تمرکز بر اثر چیدمان بر عملکرد، دامنه برچسب‌ها در فاز پایه به شش کاربری پرتکرار محدود شد:

۱. کلاس‌ها، ۲. اداری، ۳. کارکنان، ۴. راهرو، ۵. کارگاه/آزمایشگاه، ۶. خدمات/ورودی.

انتخاب این مجموعه بر مبنای فراوانی ظهور در داده‌های واقعی، امکان برچسب‌گذاری یکنواخت، و کاهش نویز در آموزش مدل انجام شد. فضاهای با فراوانی پایین و ناهمسان از جمله ورزشی (سالن/حیاط ورزشی)، فرهنگی (کتابخانه/سالن چندمنظوره) و برخی خدمات پشتیبانی یا در مرحله بازترسیم CAD ذیل دسته «خدمات/پشتیبانی» «تجمع‌شدن» از آموزش مدل حذف و در تحلیل‌های عددی اصلی بی‌اثر^{۱۶} فرض شدند تا از

سوگیری نتایج جلوگیری شود. نگاشت رنگ زون و تعاریف هر برچسب در پیوست/جدول نمادها درج شده است. اگر نگاشت رنگ‌ها در شکل‌ها مختلف است، همین‌جا یک جمله اضافه کن: «به‌منظور یکسانی، در تمام شکل‌ها از نگاشت ثابت رنگ‌ها استفاده شد (کلاس‌ها=قرمز، اداری=زرد، کارکنان=سبز، راهرو=آبی، کارگاه=نارنجی، خدمات/ورودی=بنفش)».

مدل‌های مولد مقایسه‌ای و پروتکل برابری مقایسه

برای مقایسه منصفانه با روش‌های مولد جایگزین، دو مدل پایه در کنار GAN-POE ارزیابی شدند:

۱. cVAE (Variational Autoencoder شرطی): رمزگذار/رمزگشا با کانولوشن‌های پشت‌پشتی، اندازه نهان $z=[64]$ ، تابع زیان بازسازی $L2 + \text{واگرایی}(\beta=[1.0])$ ؛ شرط/POE زون‌ها به‌صورت الحاقی کانال‌های شرطی (6 ماسک مکانی + نگاشت POE) به ورودی اعمال شد.

۲. cDDPM (دیفیوژن شرطی UNet): پایه با پهنای کانال [64]، زمان‌بندی نویز cosine [250]، گام نمونه‌گیری (DDIM)، شرط POE به‌صورت کانال‌های کمکی/ادغام در بلوک‌های توجه. هر سه مدل روی تصاویر 64×64 با همان Train/Val/Test $15/15/70$ و بدون نشتی بین مدارس آموزش داده شدند. معیارها: علاوه بر SSIM/MSE، FID ($\downarrow$) و KID ($\downarrow$) با KID $\times 1000$ گزارش شد؛ KID با بوت‌استرپ $B=100$ به‌صورت میانگین $CI \pm 9.5\%$ ارائه گردید. برای حوزه‌محور، پیوستگی شبکه گردش و سازگاری قیود جهانی نیز سنجیده شدند.

تحلیل عدم قطعیت و خطا

برای افزایش قابلیت اتکای نتایج، عدم قطعیت آماری و شبیه‌سازی به‌صورت زیر گزارش شد:

۱. آمار استنباطی: نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد. در صورت نرمال بودن، تفاوت زوج‌ها با t زوجی و در غیر این‌صورت با ویلکاکسون آزمون شد. فواصل اطمینان 95% به‌صورت $1.96 \times SE \pm \bar{x}$ و برای توزیع‌های نامعمول با بوت‌استرپ $B=1000$ BCa $SE \pm 1.96 \times SE$ و اثر Cohen's d یا Cliff's δ گزارش شد. برای مقایسه‌های چندگانه، کنترل FDR به روش بنجامینی-هاچبرگ ($q=0.05$) اعمال شد.

۲. شاخص‌های GAN مقادیر SSIM/MSE با 5 -تقسیمه متقاطع محاسبه و میانگین $CI \pm 9.5\%$ گزارش شدند.

۳. عدم قطعیت شبیه‌سازی انرژی: با مونت کارلو/لاتین هیپرکیوب ($n=500-1000$) و ورودی‌های حساس در بازه‌های واقع‌بینانه نمونه‌برداری شدند: تراکم اشغال ($1.0 \pm \%$)، جابه‌جایی زمانی برنامه‌ها ($15 \pm$ دقیقه)، نفوذ هوا ($2.0 \pm \%$)، نقاط تنظیم سرمایش/گرمایش ($1^\circ C \pm$)، بار داخلی تجهیزات/روشنایی ($15 \pm \%$)، WWR ($0.05 \pm$) و جهت‌گیری ($15^\circ \pm$). برای بررسی تغییرپذیری اقلیمی، علاوه بر فایل TMY مینا، EPW جایگزین شهر مجاور نیز آزمون شد. خروجی‌های انرژی به‌صورت توزیع‌های $5-50-95\%$ گزارش گردید.

۴. شاخص‌های کیفیت یکپارچگی: برای نتایج بزرگ‌مقیاس، پیوستگی شبکه گردش و سازگاری قیود جهانی نیز در قالب نرخ سازگاری مرزی ($\%$) و انحراف از مقادیر هدف گزارش شد.

بحث و یافته‌های تحقیق

بر اساس تحلیل پرسشنامه‌های ارزیابی پس‌از بهره‌برداری، کاربران (معلمان و دانش‌آموزان) کیفیت نور طبیعی، تهویه و روابط فضایی در پلان‌های تولیدی توسط GAN را مطلوب‌تر ارزیابی کردند. عواملی همچون نسبت مناسب پنجره به دیوار، جهت‌گیری کلاس‌ها نسبت به نور خورشید و ارتباط منطقی میان فضاهای خدماتی و آموزشی بیشترین تأثیر را داشتند. تحلیل آماری شاخص‌های POE در مدارس ابتدایی در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل همچنین اهمیت نسبی هر پارامتر را بر اساس مقادیر F-آماره نمایش می‌دهد. نتایج نشان داد که «نور خورشید» و «یکپارچگی فضایی» بیشترین تأثیر را بر عملکرد محیطی و رضایت کاربران دارند. این یافته‌ها بیانگر آن است که تصمیمات هوشمندانه در خصوص سازمان فضایی و بهینه‌سازی نور طبیعی می‌تواند به‌طور معناداری هم بهره‌وری انرژی و هم کیفیت تجربه کاربر را بهبود بخشد. همچنین عواملی مانند «انگیزه کاربران» و «آسایش حرارتی بدون استفاده از تهویه مطبوع» نیز مقادیر بالای F داشتند؛ که اهمیت نقش عوامل محیطی را در تمرکز، مشارکت و رضایت دانش‌آموزان برجسته می‌کند. در مقابل، عواملی همچون «خروجی‌های اضطراری»، «شرایط اضطراری» و «عایق‌بندی حرارتی و خورشیدی» کمترین مقادیر F را داشتند و نشان دادند که تأثیر مستقیمی بر ادراک کاربران در محیط آموزشی ندارند. این نتایج ثابت می‌کنند که طراحی صحیح می‌تواند نیازهای روانی و جسمی کاربران را برآورده کرده و موجب افزایش رضایت و بهره‌وری در محیط‌های آموزشی شود. بنابراین، در طراحی مدارس باید عوامل فضایی، اقلیمی و ادراکی به‌ویژه نور طبیعی، انسجام فضایی و آسایش حرارتی در اولویت قرار گیرند.

در مراحل اولیه آموزش GAN (دوره‌های ۰ تا ۲۰۰)، چیدمان‌ها فاقد زون‌بندی معنادار بودند. اما از دوره ۳۰۰ به بعد، مدل توانست فضاها را تفکیک‌پذیر و ساختارمند سازمان‌دهی کند.

از دوره ۴۰۰، زون‌ها به‌طور منظم شکل گرفتند و پلان‌های تولیدی الگوهای مشخص‌تری داشتند (شکل‌های ۵ و ۶). بهترین خروجی‌ها در دوره‌های ۴۸۰، ۴۹۰ و ۴۹۹ به دست آمدند که نشان‌دهنده یادگیری الگوهای فضایی پایدار توسط مدل بودند. کلاس‌ها (قرمز، دفاتر (زرد)، اتاق کارکنان (سبز)، راهروها (آبی) و کارگاه‌ها (نارنجی) به وضوح در این پلان‌ها قابل تشخیص بودند. پلان نهایی دوره ۴۹۹ دارای سازمان منطقی، زون‌بندی مشخص و نویز بصری حداقلی بود. این مرحله با کمترین خطای مولد و بیشترین دقت تمایزگر همخوانی داشت.

نقشه‌های حرارتی و منحنی‌های خطا (شکل ۹) نشان دادند که:

از دوره ۳۸۰ به بعد، کلاس‌ها به‌تدریج سهم بیشتری (۳۴٪) از پلان‌ها را به خود اختصاص دادند.

راهروها (۲۲٪) و فضاهای کارکنان (۱۱٪) نیز اهمیت بیشتری یافتند.

فضاهایی همچون رختکن‌ها و کارگاه‌ها کمتر نمایان شدند که نشان‌دهنده وزن آماری کمتر آن‌ها در داده‌های آموزشی بود.

این الگوها بیانگر توان GAN در بازنمایی اولویت‌های کاربران و تبدیل آن‌ها به چیدمان‌های فضایی هوشمند است.

معیارهای ارزیابی (GAN (FID/KID/SSIM/MSE)

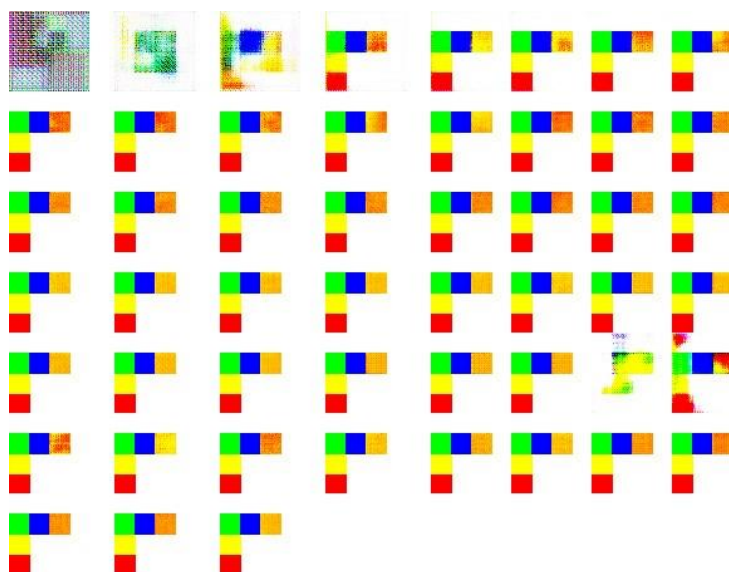
برای سنجش کیفیت و تنوع خروجی‌های مولد، علاوه بر SSIM و MSE، دو معیار رایج FID و KID نیز محاسبه شد. هر دو معیار بر پایه بردارهای ویژگی Inception-v3 (pool3, 2048-d) هستند؛ تصاویر (واقعی/تولیدی) به اندازه 299×299 تغییرمقیاس و با نرمال‌سازی ImageNet پردازش شدند.

- FID (↓ بهتر): فاصله فرشته‌ای بین توزیع ویژگی‌های تصاویر واقعی و تولیدی روی مجموعه آزمون.
 - KID (↓، $1000 \times$ بهتر): فاصله کرنلی میانگین جاسازی‌ها^{۱۷}، محاسبه‌شده با بوت‌استرپ $B=100$ برای CI $\pm 95\%$.
- برای SSIM/MSE، میانگین $CI \pm 95\%$ گزارش شد. برای مقایسه مدل/مرجع، در صورت نرمال‌بودن از زوجی و در غیر آن از ویلکاکسون استفاده شد؛ اندازه اثر نیز گزارش گردید. تمام ارزیابی‌ها روی مجموعه آزمون (۱۵٪) و با بذر ثابت تکرار شدند.

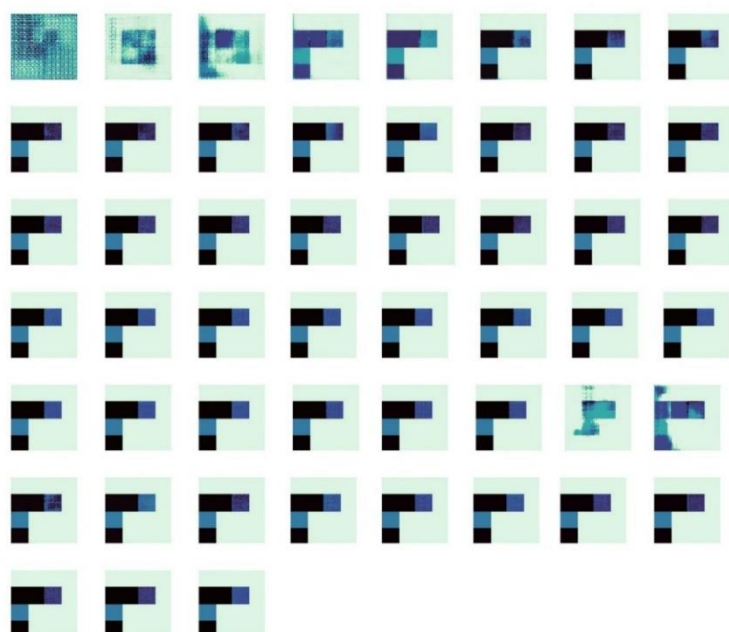
راهبردهای مقیاس‌پذیری مدل

برای به‌کارگیری چارچوب GAN-POE در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس و بناهای پیچیده، از سه راهبرد مکمل استفاده می‌کنیم:

۱. کاشی‌بندی با پنجره لغزان و همپوشانی^{۱۸}: پلان در مقیاس سایت/ساختمان به شبکه‌ای از پنجره‌ها با همپوشانی ۱۰-۲۰٪ تفکیک می‌شود؛ هر پنجره به‌صورت مستقل تولید/به‌روزرسانی و سپس با ترکیب لبه‌ها^{۱۹} و قواعد تداوم کریدور/دیوار یکپارچه می‌گردد. این رویکرد پیچیدگی محاسباتی را تقریباً به‌صورت خطی نسبت به تعداد کاشی‌ها افزایش می‌دهد و نیاز حافظه GPU را کنترل می‌کند.
۲. تولید چندرزولوشنی سلسله‌مراتبی^{۲۰}: ابتدا طرح جرم‌وخرد در مقیاس پایین^{۲۱} تولید می‌شود؛ سپس در سطوح «بال→طبقه→زون» پالایش می‌گردد. این سلسله‌مراتب، قيود سراسری (GFA)، نسبت کلاس‌ها، موقعیت هسته‌ها) را در سطح بالادست تثبیت و جزئیات زونی را در سطح پایین‌دست تصحیح می‌کند.
۳. اعمال قيود جهانی^{۲۲}: قيود کلان مانند مساحت ناخالص مجاز، نسبت پنجره به دیوار^{۲۳}، پیوستگی مسیرهای خروج و کریدورها، و حداقل عرض‌ها در حین ترکیب کاشی‌ها اعمال می‌شوند تا طرح نهایی علاوه بر کیفیت موضعی، سازگاری سراسری داشته باشد. این سه راهبرد امکان تعمیم چارچوب به پروژه‌های کمپوسی/چندسازه را فراهم می‌کنند؛ جزئیات پیاده‌سازی و آستانه‌های همپوشانی در پیوست آمده است.

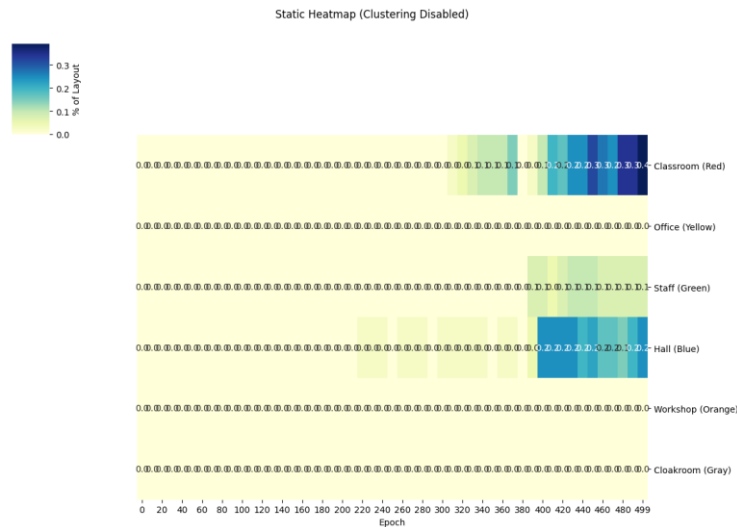


شکل ۵ طرح‌بندی‌های معماری تولید شده در طول آموزش GAN از دوره‌های ۰ تا ۵۰۰



شکل ۶ نقشه‌های حرارتی طرح‌بندی‌های تولید شده در طول آموزش GAN از دوره‌های ۰ تا ۵۰۰

ترکیب نقشه‌های حرارتی پوشش فضایی و منحنی خطای آموزش نشان می‌دهد که مدل GAN به تدریج توانایی خود را در بازنمایی اولویت‌های واقعی فضایی در معماری مدارس بهبود داده است. حدود دوره ۳۸۰، کلاس‌ها (قرمز) به‌طور محسوسی در خروجی چیدمان‌ها غالب شدند (شکل ۸) و تا دوره ۴۹۰ به سهمی معادل ۳۴ درصد از پوشش فضایی رسیدند. همچنین، راهروها (آبی) و فضاهای کارکنان (سبز) اهمیت بیشتری یافتند و به‌ترتیب تا ۲۲ و ۱۱ درصد از الگوها را تشکیل دادند؛ الگویی که در واقع بازتابی از اولویت‌های کاربران در داده‌های آموزشی مبتنی بر POE بود. در مقابل، فضاهایی مانند رختکن‌ها و کارگاه‌ها حضور کمتری داشتند که نشان‌دهنده اهمیت آماری یا ادراکی پایین‌تر آن‌هاست. پویایی خطای مدل (شکل ۵) نیز همگام با این تحول فضایی تغییر کرد؛ به‌گونه‌ای که خطای بالای مولد در مراحل اولیه آموزش به تدریج کاهش یافت و با بهبود کیفیت مدل تثبیت شد. در حدود دوره ۳۸۰ افزایش قابل توجهی در خطای مولد مشاهده شد که سپس اصلاح گردید و این تغییر همراه با انسجام بیشتر در سازمان فضایی خروجی‌ها، به‌ویژه در کلاس‌ها و راهروها بود. در نهایت، همگرایی توزیع فضاها با تثبیت خطای آموزشی نشان می‌دهد که مدل توانسته است اولویت‌های تیپولوژیک را به‌درستی فراگیرد و بدین ترتیب توانمندی چارچوب POE-GAN در تولید چیدمان‌های آموزشی منطبق با نیازهای کاربران تأیید می‌شود.



شکل ۷ نقشه حرارتی استاتیک روند پوشش منطقه در بیش از ۵۰۰ دوره آموزشی

سه نمونه برتر از چیدمان‌های تولیدشده در دوره‌های پایانی آموزش (۴۸۰، ۴۹۰ و ۴۹۹) در شکل ۸ نشان داده شده‌اند تا روشن‌تر بیان شود که چگونه مدل GAN به سمت طرح‌هایی منسجم و معنادار از نظر عملکردی همگرا می‌شود. این چیدمان‌ها به دلیل همخوانی با انتظارات حاصل از ارزیابی پس از بهره‌برداری و برخورداری از زون‌بندی مشخص انتخاب شدند. در این نمونه‌ها، کلاس‌ها با رنگ قرمز، دفاتر اداری با رنگ زرد، فضاهای کارکنان با رنگ سبز، راهروها با رنگ آبی و کارگاه‌ها با رنگ نارنجی نمایش داده شده‌اند. هر سه نمونه به‌طور منظم دارای آرایشی (سبز)، هسته‌ها (آبی)، کارگاه‌ها (نارنجی)، دفاتر (زرد) و کلاس‌ها (قرمز) با نظم هندسی و تفکیکی روشن سازمان‌دهی شده‌اند؛ به‌ویژه در چیدمانی که مربوط به دوره ۴۹۹ و رتبه اول است. در این پلان، نوار افقی عمدتاً به کارکردهای اجتماعی و عملیاتی اختصاص یافته و محور عمودی شامل فضاهای آموزشی و اداری است. این نوع سازمان فضایی شباهت زیادی به زون‌بندی عملکردی موجود در مدارس واقعی دارد و نشان می‌دهد که شبکه علاوه بر یادگیری از داده‌های آموزشی، توانسته روابط معنایی میان فضاها را که در داده‌های POE ثبت شده بودند، درونی‌سازی کند.

توزیع‌های فضایی مشابهی نیز در طرح‌های رتبه دوم و سوم مربوط به دوره‌های ۴۸۰ و ۴۹۰ مشاهده می‌شود. زون کارگاه (نارنجی) تغییرات جزئی در سطح پیکسل نشان می‌دهد که بیانگر تداوم پالایش مرزها یا بافت فضایی است، اما منطق کلی زون‌بندی تغییری نکرده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل به مرحله‌ای پایدار از خروجی رسیده است؛ مرحله‌ای که نتایج تولیدشده در آن تقریباً مشابه، تکرارپذیر و از منظر معماری قابل تفسیر هستند، و این خود نشانه‌ای قوی از همگرایی موفق آموزش GAN است. این خروجی‌های بصری یافته‌های حاصل از منحنی‌های خطای آموزش و نقشه‌های حرارتی پوشش فضایی را تأیید می‌کنند. در تمامی طرح‌ها، فضاهای کارکنان، راهروها و کلاس‌ها غلبه دارند که این امر با داده‌های رضایت کاربران در POE و پیش‌بینی‌های مدل GAN همخوان است. توانایی مدل در تولید چیدمان‌هایی که با محیط‌های یادگیری با کارایی بالا و رضایت‌مندی زیاد همسو هستند، از طریق انسجام در نسبت‌های فضایی، منطق مجاورت و هویت زون‌ها در این طرح‌های برتر تأیید می‌شود. این امر نشان‌دهنده ادغام موفقیت‌آمیز یادگیری مولد با بازخورد طراحی کاربرمحور است. بهترین طرح نیز مطابق جدول ۱ بر اساس بازنمایی پیکسلی زون‌ها نشان داده شده است. با تحلیل سه پلان نهایی (۴۸۰، ۴۹۰ و ۴۹۹)، تفاوت‌های مشخصی در اولویت‌بندی فضایی و الگوی مصرف انرژی مشاهده شد:

پلان ۴۹۹:

حدود ۳۷٫۱٪ از کل مساحت به کلاس‌ها اختصاص یافته است؛ در مقابل، فضاهای اداری کمترین سهم (۲۵٫۹٪) را دارند. این توزیع بیانگر تمرکز قوی بر آموزش و فعالیت‌های آموزشی است.

مصرف انرژی کل این پلان برابر ۹۴٫۸۵۸ kWh بود که کمترین میزان میان سه طرح محسوب می‌شود. این نشان می‌دهد که افزایش سهم فضاهای آموزشی الزاماً منجر به افزایش مصرف انرژی نمی‌شود، بلکه می‌تواند با سازمان فضایی بهینه کاهش یابد.

پلان ۴۹۰:

کلاس‌ها ۳۶٫۹٪ و فضاهای اداری ۲۶٫۴٪ از کل مساحت را به خود اختصاص داده‌اند. این طرح توازن بیشتری میان آموزش و مدیریت برقرار کرده است.

مصرف کل انرژی آن ۹۴٫۹۵۹ kWh بوده که بیشترین مقدار در میان سه طرح است. علت این امر را می‌توان به سهم بیشتر فضاهای اداری و تجهیزات آن‌ها نسبت داد.

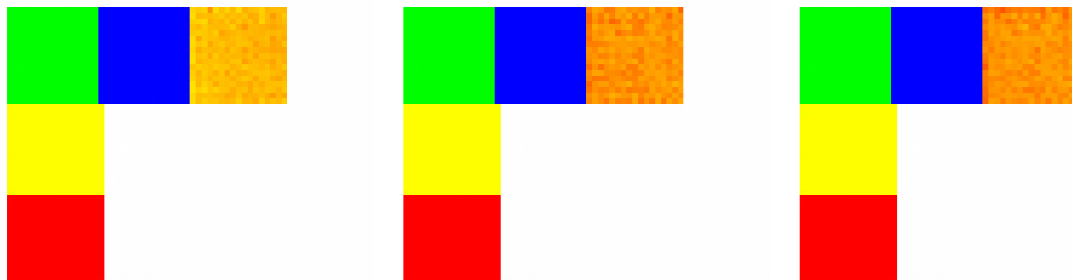
پلان ۴۸۰:

کلاس‌ها ۳۶٫۸٪ و فضاهای اداری ۲۶٫۶٪ را شامل می‌شوند. تمرکز در این طرح بیشتر بر مدیریت و سازمان‌دهی است. مصرف انرژی کل این طرح ۹۴٫۸۸۶ kWh بوده که در میانه دو پلان دیگر قرار دارد.

Top 1: ch_499

Top 2: ch_480

Top 3: ch_490



شکل ۸ سه طرح‌بندی نهایی برتر تولید شده (دوره‌های ۴۸۰، ۴۹۰، ۴۹۹)

جدول ۱ طرح‌بندی‌های برتر بر اساس پوشش منطقه‌ای در سطح پیکسل

پلان	کلاس‌ها (قرمز)	راهرو (زرد)	سرویس/ورودی (سبز)	اداری (آبی)	کل مصرف (kWh)
۴۸۰	۳۶٫۸٪	۱۴٪	۲۲٫۷٪	۲۶٫۶٪	۹۴٫۸۸۶
۴۹۰	۳۶٫۹٪	۱۳٫۹٪	۲۲٫۸٪	۲۶٫۴٪	۹۴٫۹۵۹
۴۹۹	۳۷٫۱٪	۱۴٪	۲۳٫۱٪	۲۵٫۹٪	۹۴٫۸۵۸

با در نظر گرفتن شکل فضایی سه طرح منتخب (۴۸۰، ۴۹۰ و ۴۹۹) و داده‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده بر روی آن‌ها می‌توان به تفاوت‌های معناداری دست یافت. طرح‌های ۴۸۰ و ۴۹۰ که دارای فرم L یا ترکیبی بودند، در برخی شاخص‌ها همچون کارکردهای اداری یا مساحت کل عملکرد بهتری داشتند. در مقابل، طرح ۴۹۹ که فرم فضایی آن نزدیک به شکل U بود، در اکثر ارزیابی‌ها از جمله کارایی عملکردی، مصرف انرژی، نسبت عملکرد به انرژی و بازخورد کاربران به‌عنوان بهترین طرح شناخته شد. طرح ۴۹۹ در مجموع از نظر بازده کلی، تعادل انرژی و آسایش فضایی عملکرد برتری داشت. دلیل این برتری را می‌توان در توزیع متعادل‌تر فضاهای اداری، پشتیبانی و آموزشی، سطح کمتر در معرض تبادل حرارتی (در مقایسه با فرم‌های کشیده L)، بهبود دسترسی به تهویه طبیعی و نور روز و همچنین کسب بالاترین امتیاز ترکیبی در شاخص‌های عملکرد، مصرف انرژی و بازخورد کاربران دانست. بنابراین، شکل U نسبت به شکل L نتایج بهتری ارائه کرده است.

مقایسه شاخص‌های اصلی عملکرد میان یک پلان معماری متعارف و یک پلان تولیدشده توسط GAN در جدول ۲ ارائه شده است. در چندین بعد، طرح مولد عملکرد بهتری نسبت به طراحی سنتی نشان داده است. بهبود چشمگیر کارایی انرژی در این طراحی با کاهش ۲۱٫۸ درصدی مصرف سالانه انرژی آشکار شد. افزایش ۱۹٫۳ درصدی رضایت کاربران نیز در امتیاز میانگین ارزیابی پس از بهره‌برداری منعکس شد که از ۳٫۴۱ به ۴٫۰۷ ارتقا یافت. شاخص شباهت ساختاری^{۲۴} که میزان همبستگی فضایی را می‌سنجد، از ۰٫۷۱ به ۰٫۹۳ افزایش یافت و این به معنای بهبود ۳۱ درصدی در کیفیت معماری و انسجام فضایی نسبت به استانداردهای مرجع است. افزون بر این، پلان تولیدشده توسط GAN شباهت بیشتری به پیکربندی‌های ایده‌آل فضایی داشت که این موضوع با کاهش ۶۲ درصدی میانگین مربعات خطا^{۲۵} نشان داده شد؛ شاخصی که تنوع و پراکندگی چیدمان‌ها را می‌سنجد.

در مجموع، این آمارها تأیید می‌کنند که به‌کارگیری مدل‌های مولد در معماری می‌تواند منجر به بهبودهای قابل توجهی در بهره‌وری انرژی، کیفیت فضایی و رضایت کاربران شود. تمامی این یافته‌ها از توانایی مدل ترکیبی GAN-POE برای ارائه طرح‌هایی حمایت می‌کنند که هم ترجیحات واقعی کاربران را بازتاب می‌دهد و هم نیازهای انرژی عملیاتی ساختمان را کاهش می‌دهد. برای طراحی معماری پیش‌بین و مبتنی بر عملکرد در محیط‌های آموزشی، این رویکرد یکپارچه مسیری کارآمد و قابل گسترش ارائه می‌دهد.

جدول ۲ معیارهای کلیدی

شاخص	پلان سنتی	پلان تولیدشده توسط GAN	بهبود (%)
مصرف سالانه انرژی (kWh/year)	۷۸,۵۰۰	۶۱,۴۰۰	-۲۱,۸٪
میانگین امتیاز POE شاخص رضایت	۳,۴۱	۴,۰۷	+۱۹,۳٪
شاخص شباهت ساختاری	۰,۷۱	۰,۹۳	+۳۱٪
میانگین مربعات خطا	۰,۰۲۲	۰,۰۰۸۴	-۶۲٪

یکی از چالش‌های کلیدی، تبدیل خروجی‌های GAN از سطح تصویر پیکسلی به پلان‌های مهندسی شده است. در پژوهش حاضر، این شکاف با استفاده از بازترسیم برداری در محیط CAD و سپس کنترل ابعاد، مقیاس و الزامات فنی برطرف شد. با این حال، لازم است تحقیقات آینده این فرآیند را به‌صورت خودکارسازی شده و مبتنی بر BIM توسعه دهند تا زمان و خطای انسانی در تفسیر نقشه‌ها کاهش یابد. گزارش CI/۹۵ و نتایج مونیت‌کارلو نشان می‌دهد که کاهش مشاهده‌شده در مصرف انرژی حتی با تغییرپذیری معقول ورودی‌ها پایدار است؛ با این حال، پهنای CI در برخی سناریوها (مثلاً نفوذ هوا/برنامه‌های بهره‌برداری) بیانگر حساسیت طرح به رفتار کاربران است. لذا توصیه می‌شود در مرحله طراحی تفصیلی، کالیبراسیون میدانی برنامه‌های بهره‌برداری و نفوذ هوا انجام و تحلیل عدم قطعیت به‌صورت تکرارشونده به‌روزرسانی شود.

دالتهای اجرایی و سازه‌ای تیپولوژی‌های چیدمان

الگوی چیدمان، پیامدهای مستقیمی برای مدول‌بندی سازه، طول پوسته خارجی، مسیرهای تأسیساتی و آکوستیک دارد:

- تیپ U در برابر I: چیدمان‌های نزدیک به U در صورت فشردگی مناسب حیاط مرکزی، معمولاً نسبت سطح پوسته به زیربنا را کاهش می‌دهند و می‌توانند به کاهش اتلاف حرارت و هزینه‌های پوسته یاری رسانند؛ در مقابل، تیپ‌های کشیده L به‌طور بالقوه طول نما و مسیرهای طولانی‌تر راهرو/تأسیسات را افزایش می‌دهند.
- مدول‌بندی سازه‌ای و دهانه‌ها: ریتم منظم کلاس‌ها و راهروهای مستقیم امکان مدول‌بندی سازه‌ای منظم‌تری ایجاد می‌کند و هماهنگی با تیپ دهانه‌های متعارف آموزشی را تسهیل می‌کند.
- آکوستیک و مصالح داخلی: تمرکز ترافیک حرکتی در راهروهای پیوسته، کنترل آلودگی صوتی را ساده‌تر می‌کند؛ انتخاب مصالح جذب‌کننده صوت در جداره راهرو و تفکیک صوتی کلاس‌ها باید در مرحله تفصیلی دنبال شود.
- نماگرهای هزینه‌محور (کیفی): طول پوسته خارجی و طول کل راهروها می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های ساده برآورد اولیه هزینه نمای/دیوار و نازک‌کاری و نیز بهره‌برداری (نظافت/نگهداشت) به‌کار روند. در فاز بعد، این نماگرها با LCC/LCA و مقادیر واقعی هزینه/انتشار ترکیب خواهند شد.

یادآوری: در این مطالعه، جزئیات مهندسی سازه و برآورد هزینه اجرا به‌صورت عددی مدول‌سازی نشده و تمرکز بر مقایسه کارایی انرژی و رضایت کاربران بوده است.

پیامدهای طراحی برای فضاهای ورزشی/فرهنگی/پشتیبانی

هرچند مدل پایه بر شش کاربری اصلی متمرکز است، پیوست فضاهای ورزشی و فرهنگی می‌تواند الزامات مجاورت و مسیرهای گردش را تغییر دهد (مثلاً دسترسی مستقیم از حیاط یا جداسازی آکوستیکی از کلاس‌ها). در مرحله اجرایی، افزودن این فضاها با قواعد مجاورت^{۲۶} و مدول‌بندی سازه‌ای همخوان می‌شود و می‌تواند بر طول پوسته خارجی، مسیر تأسیسات و کیفیت آکوستیک اثر بگذارد. در گام‌های بعدی، گسترش طرح برچسب‌ها به ۱۰-۱۲ کاربری و استفاده از برچسب‌گذاری سلسله‌مراتبی (گروه-زیرگروه) و توازن کلاسی/بازوزن‌دهی برای فضاهای کم‌نمونه، امکان مدول‌سازی دقیق‌تر فضاهای ورزشی، فرهنگی و پشتیبانی را فراهم می‌کند.

کنترل کیفیت در مقیاس بزرگ و بناهای پیچیده

برای اطمینان از عملکرد مدل در مقیاس‌های بزرگ‌تر، سه شاخص کنترل کیفیت معرفی می‌کنیم:

- پیوستگی بین کاشی^{۲۷}: درصد اتصال صحیح دیوار/راهرو در مرز پنجره‌ها و میزان ناسازگاری هندسی پس از ترکیب.
 - اتصال شبکه گردش^{۲۸}: وجود مسیرهای پیوسته دسترسی و خروج اضطراری بین بال‌ها/بلوک‌ها در طرح نهایی.
 - سازگاری قيود جهانی: تطابق مساحت ناخالص/خالص، نسبت کاربری‌ها و WWR با مقادیر هدف در مقیاس کل ساختمان/سایت.
- نتایج نشان می‌دهد که با کاشی‌بندی همپوشان و کنترل‌های پسا‌فرآیند، چارچوب قابل تعمیم به پلان‌های وسیع‌تر است؛ باین‌حال، برای بناهای بسیار پیچیده (چند هسته، تغییرات ارتفاعی زیاد)، استفاده از کنترل سلسله‌مراتبی و اتصال به BIM توصیه می‌شود.

محدودیت‌ها

یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر، محدودیت جغرافیایی و عدم تعمیم‌پذیری نتایج است. داده‌های ارزیابی پس‌از بهره‌برداری تنها از مدارس ابتدایی شهر تهران گردآوری شدند و بنابراین یافته‌ها لزوماً برای سایر مناطق با شرایط اقلیمی، فرهنگی و نظام‌های آموزشی متفاوت قابل تعمیم نیستند. برای افزایش اعتبار بیرونی، پژوهش‌های آینده باید داده‌های خود را از مدارس واقع در شهرها و اقلیم‌های متنوع گردآوری کنند و مقایسه‌های میان‌منطقه‌ای را مد نظر قرار دهند. همچنین جزئیات سامانه سازه‌ای، انتخاب دقیق مصالح، تحلیل آکوستیک و برآورد هزینه‌های سرمایه‌ای/عملیاتی^{۲۹} در دامنه مطالعه نبوده و ثابت فرض شده‌اند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با اتصال مستقیم خروجی‌های GAN به BIM، شبیه‌سازی آکوستیک و چارچوب‌های LCA/LCC، ارزیابی یکپارچه عملکرد-هزینه-پایداری انجام شود. مدل پایه صرفاً شش کاربری اصلی را پوشش داده است؛ فضاهای ورزشی، فرهنگی و بخشی از خدمات پشتیبانی به دلیل ناهمسانی داده‌ها به‌صورت تجمیعی لحاظ یا از آموزش حذف شده‌اند؛ از این‌رو، نتایج به‌طور مستقیم به طرح‌هایی با مجموعه کاربری گسترده‌تر قابل تعمیم کامل نیست. پژوهش‌های آینده باید با گسترش مجموعه برچسب‌ها، برچسب‌گذاری سلسله‌مراتبی، و توازن کلاسی^{۳۰}، این خلأ را برطرف کنند. اگرچه راهبردهای کاشی‌بندی همپوشان و تولید سلسله‌مراتبی ارائه شده‌اند، صحت‌گذاری کامل بر کمپوس‌های چندساختمانی و ساختمان‌های با هندسه بسیار پیچیده در این مطالعه انجام نشده است. ارزیابی میدانی، یکپارچه‌سازی با BIM برای کنترل قيود خروج/تجهیزات، و آزمون روی دیتاست‌های مقیاس سایت به‌عنوان کارهای آینده پیشنهاد می‌شوند.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام ارزیابی پس‌از بهره‌برداری با شبکه‌های مولد تخصصی می‌تواند به‌عنوان چارچوبی نوین در طراحی معماری مدارس ابتدایی عمل کند. برخلاف روش‌های سنتی طراحی که عمدتاً بر تجربه معمار و الگوهای از پیش تعیین‌شده تکیه دارند، رویکرد پیشنهادی قادر است بازخورد واقعی کاربران را در فرآیند طراحی وارد کند. این امر موجب می‌شود تا فضاهای آموزشی نه تنها از نظر انرژی بهینه باشند بلکه با نیازها و انتظارات کاربران نیز همخوانی داشته باشند. یکی از یافته‌های کلیدی این تحقیق آن است که نور طبیعی و انسجام فضایی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل رضایت کاربران شناسایی شدند. این نتیجه با مطالعات پیشین در حوزه روان‌شناسی محیطی همسوست که نشان می‌دهند نور روز و کیفیت سازمان فضایی نقش مستقیمی در تمرکز، یادگیری و رفاه کودکان دارند. از سوی دیگر، نتایج شبیه‌سازی انرژی نشان داد که طرح‌های GAN به‌طور میانگین ۱۶٪ در مصرف انرژی نسبت به مدارس سنتی بهبود داشتند. هرچند این مقدار در ظاهر کوچک است، اما در مقیاس ملی می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی به همراه داشته باشد. این پژوهش چارچوبی نوین برای طراحی مدارس ابتدایی ارائه کرد که بر پایه ادغام «ارزیابی پس‌از بهره‌برداری» با «شبکه‌های مولد تخصصی» بنا شده است. رویکرد پیشنهادی نشان داد که استفاده همزمان از داده‌های واقعی کاربران و توانایی مدل‌های مولد می‌تواند به تولید پلان‌هایی منجر شود که هم از نظر انرژی بهینه هستند و هم با نیازهای کاربران همخوانی دارند. نتایج این تحقیق آشکار ساخت که نور طبیعی و انسجام فضایی مهم‌ترین عوامل در رضایت دانش‌آموزان و معلمان به شمار می‌روند و بنابراین باید در اولویت تصمیم‌گیری‌های طراحی قرار گیرند. مدل GAN توانست با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های POE، چیدمان‌هایی منسجم و واقع‌گرایانه تولید کند که از نظر سازمان فضایی، عملکردی و کاربرمحور بودند. مقایسه میان سه پلان منتخب نشان داد که طرح ۴۹۹ بهترین عملکرد را از نظر صرفه‌جویی انرژی و افزایش رضایت کاربران داشت. این امر بیانگر آن است که چارچوب GAN-POE می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای طراحی مدارس آینده مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش از نظر عملی نیز اهمیت دارد. معماران می‌توانند از این روش برای ارتقای کیفیت فضاهای آموزشی و همسویی بیشتر آن‌ها با نیازهای کاربران استفاده کنند و سیاست‌گذاران آموزشی نیز قادر خواهند بود چارچوب پیشنهادی را به‌عنوان ابزاری مبتنی بر شواهد در تصمیم‌گیری‌های کلان به کار گیرند. از منظر پایداری نیز، به‌کارگیری چنین مدلی در مقیاس شهری می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجه انرژی و بهبود تجربه یادگیری برای هزاران دانش‌آموز شود. در عین حال، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد. داده‌های مورد استفاده تنها از مدارس ابتدایی تهران گردآوری شد و بنابراین قابلیت تعمیم آن به دیگر مناطق نیازمند مطالعات تکمیلی است. همچنین، مدل فعلی صرفاً شش کاربری اصلی را در نظر گرفت و جزئیات بیشتری مانند فضاهای فرهنگی یا ورزشی لحاظ نشده‌اند. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج امیدوارکننده نشان می‌دهند که رویکرد ترکیبی داده‌محور و کاربرمحور می‌تواند مسیرهای تازه‌ای را در طراحی معماری بگشاید. به طور کلی، این مطالعه ثابت کرد که ادغام هوش مصنوعی و بازخورد انسانی قادر است به خلق محیط‌های آموزشی پایدار، انعطاف‌پذیر و انسان‌محور منجر شود. چارچوب GAN-POE پلی میان خلاقیت محاسباتی و تجربه زیسته کاربران ایجاد می‌کند و می‌تواند آینده طراحی مدارس را به‌سوی رویکردی هوشمندانه‌تر و پاسخگوتر سوق دهد. در جمع‌بندی می‌توان گفت که این پژوهش توانست با ترکیب ارزیابی پس‌از بهره‌برداری و شبکه‌های مولد تخصصی، رویکردی نوین برای طراحی مدارس ابتدایی ارائه دهد. نوآوری اصلی کار در تبدیل داده‌های واقعی کاربران به ورودی‌های مدل مولد و ایجاد چرخه بازخوردی میان شبیه‌سازی انرژی و طراحی است. دستاوردهای پژوهش نشان دادند که استفاده از این چارچوب می‌تواند مصرف انرژی مدارس را به‌طور معناداری کاهش داده و در عین حال رضایت معلمان و دانش‌آموزان را ارتقا بخشد. این نتایج بیانگر ظرفیت بالای مدل GAN-POE برای هدایت طراحی انسان‌محور و پایدار در پروژه‌های آموزشی آینده است. در ادامه، توسعه یادگیری مبتنی بر قیود و بهینه‌سازی سلسله‌مراتبی برای کنترل همزمان اهداف جهانی (WWR, GFA)، ایمنی خروج و جزئیات محلی دنبال می‌شود. همچنین اتصال مستقیم به BIM جهت ارزیابی خودکار تضادها و گسترش دیتاست به پروژه‌های کمپوسی برای صحت‌گذاری خارجی برنامه‌ریزی شده است.

ملاحظات اخلاقی و حاکمیت داده

این پژوهش مطابق اصول اخلاق پژوهش انسانی انجام شده است. برای شرکت‌کنندگان بزرگسال (معلمان/کارکنان)، رضایت آگاهانه اخذ شد و پاسخ‌ها به‌طور کامل ناشناس گردآوری گردید. در صورت مشارکت دانش‌آموزان، رضایت والد/سرپرست و مجوز مدرسه اخذ شد و پرسشنامه‌ها فاقد هرگونه شناسه شخصی بودند. داده‌ها در مخزن داخلی حفاظت‌شده نگهداری و دسترسی به آن‌ها محدود شد. فقط داده‌های تجمیعی/ناشناس شده و فراداده برای پژوهش‌های ثانویه قابل دسترس است.

- ^۱ POE
- ^۲ Discriminator
- ^۳ co-evolutionary
- ^۴ territoriality
- ^۵ Indoor Environmental Quality (IEQ)
- ^۶ Generative Adversarial Networks - GANs
- ^۷ Transfer Learning
- ^۸ Data Augmentation
- ^۹ Explanatory-Sequential Mixed-Methods
- ^{۱۰} Generator
- ^{۱۱} Discriminator
- ^{۱۲} minimax game
- ^{۱۳} epoch-based
- ^{۱۴} epochs
- ^{۱۵} Vector
- ^{۱۶} neutral
- ^{۱۷} unbiased
- ^{۱۸} Tiling/Sliding Window
- ^{۱۹} seam blending
- ^{۲۰} Multi-Resolution/Hierarchical
- ^{۲۱} building mass & wings
- ^{۲۲} Global Constraints
- ^{۲۳} WWR
- ^{۲۴} SSIM
- ^{۲۵} MSE
- ^{۲۶} adjacency rules
- ^{۲۷} Inter-Tile Continuity
- ^{۲۸} Circulation Connectivity
- ^{۲۹} CAPEX/OPEX
- ^{۳۰} class rebalancing

فهرست منابع

1. Bank, M., Sandor, V., Schinegger, K., & Rutzinger, S. (2022). *Learning Spatiality - A GAN method for designing architectural models through labelled sections*. 611–619. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.2.611>
2. Bayer, J., Bukhari, S. S., & Dengel, A. (2018). Floor Plan Generation and Auto Completion Based on Recurrent Neural Networks. *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR*, 2, 49–50. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2017.272>
3. Belpoliti, V., Saleem, A. A., Yahia, M. W., & Nassif, R. (2024). Energy consumption of UAE public schools. Mapping of a diversified sector assessing typology, conditions, and educational systems. *Energy and Buildings*, 320, 114599. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114599>
4. Bluysen, P. M., Zhang, D., Kurvers, S., Overtom, M., & Ortiz-Sanchez, M. (2018). Self-reported health and comfort of school children in 54 classrooms of 21 Dutch school buildings. *Building and Environment*, 138, 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.032>
5. Bortolini, R., & Forcada, N. (2021). Association between Building Characteristics and Indoor Environmental Quality through Post-Occupancy Evaluation. *Energies*, 14(6), 1659. <https://doi.org/10.3390/en14061659>
6. Buldur, S., Bursal, M., Yalcin Erik, N., & Yucel, E. (2020). The impact of an outdoor education project on middle school students' perceptions and awareness of the renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110364>
7. Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>
8. Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11(2), 173–184. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00096-0)
9. Chung, W., & Yeung, I. M. H. (2020). A study of energy consumption of secondary school buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 226, 110388. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110388>
10. Dias Pereira, L., Bispo Lamas, F., & Gameiro da Silva, M. (2019). Improving energy use in schools: from IEQ towards energy-efficient planning—method and in-field application to two case studies. *Energy Efficiency*, 12(5), 1253–1277. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9742-5>
11. Dias Pereira, L., Neto, L., Bernardo, H., & Gameiro da Silva, M. (2017). An integrated approach on energy consumption and indoor environmental quality performance in six Portuguese secondary schools. *Energy Research and Social Science*, 32, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.004>
12. Dogan, T., Saratsis, E., & Reinhart, C. (2015). The optimization potential of floor-plan typologies in early design energy modeling. *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings*, 1853–1860.
13. Dong, H., Neekhara, P., Wu, C., & Guo, Y. (2017). *Unsupervised Image-to-Image Translation with Generative Adversarial Networks*. <https://arxiv.org/pdf/1701.02676>
14. Egor, G., Sven, S., Martin, D., & Reinhard, K. (2020). Computer-aided approach to public buildings floor plan generation. Magnetizing Floor Plan Generator. *Procedia Manufacturing*, 44, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.214>
15. Eisenstadt, V., Langenhan, C., & Althof, K.-D. (2020). *Generation of Floor Plan Variations with Convolutional Neural Networks and Case-based Reasoning An approach for transformative adaptation of room configurations within a framework for support of early conceptual design phases* (pp. 79–84). https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_648
16. Elsayed, M., Pelsmakers, S., ... L. P.-B. and, & 2023, undefined. (2023). Post-occupancy evaluation in residential buildings: A systematic literature review of current practices in the EU. *Building and Environment*,. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323003347>
17. Ezz, M. S., Mahdy, M. A. F., Baharetha, S., Hassanain, M. A., & Gomaa, M. M. (2025). Post occupancy evaluation of architectural design studio facilities. *Frontiers in Built Environment*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1549313>
18. Gharaei, B., Mohamad Sadegh Hayeri Zadeh, S., & Ghomeishi, M. (2024). Developing a Neuroarchitecture-based User Centered Design for Elementary Schools in Tehran. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(9), 102898. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102898>
19. Gil-Baez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2017). Natural ventilation systems to enhance sustainability in buildings: A review towards zero energy buildings in schools. *E3S Web of Conferences*, 22. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200053>

20. Jain, N., Burman, E., Robertson, C., Stamp, S., Shrubsole, C., Aletta, F., Barrett, E., Oberman, T., Kang, J., Raynham, P., Mumovic, D., & Davies, M. (2020). Building performance evaluation: Balancing energy and indoor environmental quality in a UK school building. *Building Services Engineering Research and Technology*, 41(3), 343–360. <https://doi.org/10.1177/0143624419897397>
21. Jiang, F., Ma, J., Webster, C. J., Li, X., & Gan, V. J. L. (2023). Building layout generation using site-embedded GAN model. *Automation in Construction*, 151, 104888. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104888>
22. Kustiani, & Khidmat, R. P. (2021). Post-occupancy evaluation based on occupant behavior aspect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 780(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/780/1/012048>
23. Li, C., Hong, T., & Yan, D. (2014). An insight into actual energy use and its drivers in high-performance buildings. *Applied Energy*, 131, 394–410. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.032>
24. Lizana, J., Serrano-Jimenez, A., Ortiz, C., Becerra, J. A., & Chacartegui, R. (2018). Energy assessment method towards low-carbon energy schools. *Energy*, 159, 310–326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.147>
25. Ma, H., Lai, J., Li, C., Yang, F., & Li, Z. (2019). Analysis of school building energy consumption in Tianjin, China. *Energy Procedia*, 158, 3476–3481. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.924>
26. Michalek, J. J., Choudhary, R., & Papalambros, P. Y. (2002). Architectural layout design optimization. In *Engineering Optimization* (Vol. 34, Issue 5, pp. 461–484). <https://doi.org/10.1080/03052150214016>
27. Nauata, N., Hosseini, S., Chang, K.-H., Chu, H., Cheng, C.-Y., & Furukawa, Y. (2021). House-GAN++: Generative Adversarial Layout Refinement Network towards Intelligent Computational Agent for Professional Architects. *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 13627–13636. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01342>
28. Newton, D. (2019). Generative Deep Learning in Architectural Design. *Technology|Architecture + Design*, 3(2), 176–189. <https://doi.org/10.1080/24751448.2019.1640536>
29. Ouf, M. M., & Issa, M. H. (2017). Energy consumption analysis of school buildings in Manitoba, Canada. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.05.003>
30. ÖZMAN, G. Ö., & SELÇUK, S. A. (2023). GENERATING MASS HOUSING PLANS THROUGH GANS - A CASE IN TOKI, TURKEY. *Architecture and Planning Journal (APJ)*, 28(3). <https://doi.org/10.54729/2789-8547.1197>
31. Preiser, W. F. E. (1995). Post-occupancy evaluation: How to make buildings work better. *Facilities*, 13(11), 19–28. <https://doi.org/10.1108/02632779510097787>
32. Raatikainen, M., Skön, J. P., Leiviskä, K., & Kolehmainen, M. (2016). Intelligent analysis of energy consumption in school buildings. *Applied Energy*, 165, 416–429. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.072>
33. Rahbar, M., Mahdavinjad, M., Markazi, A. H. D., & Bemanian, M. (2022). Architectural layout design through deep learning and agent-based modeling: A hybrid approach. *Journal of Building Engineering*, 47, 103822. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103822>
34. Rashed-Ali, H., Ghiai, M. M., Niknia, S., Khodabakhsh, Z., Mora, E., & Manfrin, P. (2023). Post-Occupancy Evaluation through University Campuses: Case Studies of Two Large Academic Buildings. *The International Journal of Design Management and Professional Practice*, 17(2), 57–80. <https://doi.org/10.18848/2325-162X/CGP/v17i02/57-80>
35. Riley, M., Kokkarinen, N., & Pitt, M. (2010). Assessing post occupancy evaluation in higher education facilities. *Journal of Facilities Management*, 8(3), 202–213. <https://doi.org/10.1108/14725961011058839>
36. Rizi, R. A., & Eltaweel, A. (2021). A user detective adaptive facade towards improving visual and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101554>
37. Rizvi, S. K. J., Azad, M. A., & Fraz, M. M. (2021). Spectrum of Advancements and Developments in Multidisciplinary Domains for Generative Adversarial Networks (GANs). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(7), 4503–4521. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09543-4>
38. Roberts, C., Edwards, D. J., Sing, M. C. P., & Aigbavboa, C. (2023). Post-occupancy evaluation: process delineation and implementation trends in the UK higher education sector. *Architectural Engineering and Design Management*, 19(2), 125–147. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1956422>
39. Robertson, D. K., & Higgins, M. (2012). Energy management at Albuquerque schools: Lessons learned. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 109(4), 7–39. <https://doi.org/10.1080/01998595.2012.10510710>

40. Rodrigues, E. (2014). *Automated Floor Plan Design: Generation, Simulation, and Optimization*.
41. Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014). Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure. *Applied Energy*, 132, 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.068>
42. Sanni-Anibire, M. O., Hassanain, M. A., & Al-Hammad, A.-M. (2016). Post-Occupancy Evaluation of Housing Facilities: Overview and Summary of Methods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000868](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000868)
43. Shehata, A. M. A., Rashed, E. F., & Elmansoury, A. (2025). Post-Occupancy Evaluation of School Building Performance. *European Journal of Architecture and Urban Planning*, 4(2), 1–12. <https://doi.org/10.24018/ejarch.2025.4.2.53>
44. Shieh, J.-C., & Wang, T.-Y. (2021). Post-Occupancy Evaluating Space Utilization of Elementary School Libraries. *IASL Annual Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.29173/iasl7705>
45. Tookaloo, A., & Smith, R. (2015). Post Occupancy Evaluation in Higher Education. *Procedia Engineering*, 118, 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.470>
46. Turner, E., & on, A. Z. (2014). Floor plan generation and room labeling of indoor environments from laser range data. *Ieeexplore.Ieee.Org* E Turner, A Zakhor2014 International Conference on Computer Graphics Theory and, 2014•*ieeexplore.Ieee.Org*. <https://doi.org/10.5220/0004680300220033>
47. Wang, L., Zhou, X., Liu, J., & Cheng, G. (2024). Automated layout generation from sites to flats using GAN and transfer learning. *Automation in Construction*, 166, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105668>
48. Wu, A. N., Stouffs, R., & Biljecki, F. (2022). Generative Adversarial Networks in the built environment: A comprehensive review of the application of GANs across data types and scales. *Building and Environment*, 223, 109477. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109477>
49. Wu, W., Fu, X. M., Tang, R., Wang, Y., Qi, Y. H., & Liu, L. (2019). Data-driven interior plan generation for residential buildings. *ACM Transactions on Graphics*, 38(6). <https://doi.org/10.1145/3355089.3356556>
50. Xu, Y., Li, Q., Zhao, X., Liu, D., & Shi, N. (2024). The Applications of Generative Adversarial Networks in Architecture Design: A Systematic Review. *Journal of Design Service and Social Innovation*, 1–15. <https://doi.org/10.59528/ms.jdssi2024.0130a14>
51. Zhang, C., Tao, M., Wang, C., & Fan, J. (2024). End-to-end generation of structural topology for complex architectural layouts with graph neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(5), 756–775. <https://doi.org/10.1111/mice.13098>
52. Zhang, D., & Bluysen, P. M. (2021). Energy consumption, self-reported teachers' actions and children's perceived indoor environmental quality of nine primary school buildings in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110735>
53. Zhang, D., Ortiz, M. A., & Bluysen, P. M. (2019). Clustering of Dutch school children based on their preferences and needs of the IEQ in classrooms. *Building and Environment*, 147, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.014>
54. Zhao, J., Abdul Aziz, F., Deng, Y., Ujang, N., & Xiao, Y. (2024). A Review of Comprehensive Post-Occupancy Evaluation Feedback on Occupant-Centric Thermal Comfort and Building Energy Efficiency. *Buildings*, 14(9), 2892. <https://doi.org/10.3390/buildings14092892>
55. Zhao, Y., & Yang, Q. (2022). A Post-occupancy Evaluation of Occupant Satisfaction in Green and Conventional Higher Educational Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 973(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/973/1/012010>
56. Zhou, T., Li, Q., Lu, H., Cheng, Q., & Zhang, X. (2023). GAN review: Models and medical image fusion applications. *Information Fusion*, 91, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.10.017>