Journal of Architectural and Environmental Research, Volume 4, Issue 6, September 2026, pp.18-45.

Journal of Architectural and Environmental Research

DOI: 10.30470/jaer.2026.2090122.1222

Investigating the Potential of Artificial Intelligence in the Ideation Stage of the Architectural Design Process

Majid Yazdani [1]*, Amirreza Davari Roshkhar [2]

1. Assistant Professor, Department of Art and Architecture, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran, Majid.Yazdani@khavaran.ac.ir
2. M.Sc. Graduate in Interior Architecture, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran, Dramirreza4@gmail.com

Research Article

***Corresponding Author:**
Majid Yazdani
Majid.Yazdani@khavaran.ac.ir

Received: 2026/05/30
Accepted: 2026/09/01

Keywords: Architectural Design, Artificial Intelligence, Design Ideation, Conceptual Design, Architectural Design Process.

Abstract

The rapid expansion of generative artificial intelligence (AI) has created new opportunities for ideation in the architectural design process. However, variations in the performance of AI tools and their dependence on the type of input underscore the need for systematic evaluation. This study aimed to identify evaluation criteria and compare the performance of selected generative AI tools during the ideation stage of architectural design. The research was applied in purpose and employed a mixed-methods approach with a sequential exploratory design. First, an evaluation framework was developed through a meta-synthesis of previous studies. Subsequently, the performance of three selected AI tools—Midjourney, DALL-E 2, and Stable Diffusion—was examined through two experiments conducted over eight iterations. The first experiment focused on design generation based solely on textual input, whereas the second examined the integration of textual and visual inputs. The generated outputs were evaluated by eight architecture professors with experience in artificial intelligence, using a five-point Likert scale. The findings of the meta-synthesis identified five dimensions for evaluating AI-generated architectural ideation: input conformity, creativity, idea quality, representational quality, and usability. In multimodal interaction, two additional dimensions were identified: multimodal input integration and design control and development. In the first experiment, Midjourney demonstrated superior performance in input conformity and creativity, Stable Diffusion performed better in idea quality, and DALL-E 2 achieved the highest performance in representational quality. Midjourney and Stable Diffusion showed comparable performance in usability. In the second experiment, Midjourney performed best in creativity and idea quality, while Stable Diffusion demonstrated superior performance across the other five dimensions. DALL-E 2 did not demonstrate superior performance in any of the evaluated dimensions. Overall, the findings indicate that the performance of generative AI tools is contingent upon the type of input and the specific design objective, and that no single tool demonstrates absolute superiority across all evaluation dimensions. Midjourney appears to be more suitable for exploring creative design ideas from text-based inputs, whereas Stable Diffusion is more appropriate for developing and controlling design alternatives through the integration of textual and visual inputs.

Cite this article: Yazdani, M., & Davari Roshkhar, A. (2026). Investigating the Potential of Artificial Intelligence in the Ideation Stage of the Architectural Design Process. *Journal of Architectural and Environmental Research*, *4*(6), 18–45. https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2090122.1222

Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

Authors

نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، دوره ۴ ، شماره ۶ ، شهریور ۱۴۰۵، صفحات ۱۸-۴۵.

پژوهش‌های معماری و محیط
دوفصلنامه پژوهش‌های معماری و محیط
دانشگاه زنجان

DOI: 10.30470/jaer.2026.2090122.1222

بررسی پتانسیل‌های هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری

مجید یزدانی [۱*]، امیررضا داوری رشخوار [۲]

۱. استادیار، گروه هنر و معماری، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران، Majid.Yazdani@khavaran.ac.ir
۲. دانش‌آموخته کارشناس ارشد معماری داخلی، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران، Dramirreza4@gmail.com

مقاله پژوهشی

*** نویسنده مسئول:**
مجید یزدانی
Majid.Yazdani@khavaran.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹
انتشارمقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:
طراحی معماری، هوش مصنوعی، ایده‌پردازی، طراحی مفهومی، فرآیند طراحی معماری.

چکیده:

گسترش هوش مصنوعی مولد ظرفیت‌های جدیدی برای ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری فراهم کرده است؛ بااین‌حال، تفاوت عملکرد ابزارها و وابستگی آن به نوع ورودی، ضرورت ارزیابی نظام‌مند را نشان می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی معیارهای ارزیابی و مقایسه عملکرد ابزارهای منتخب هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی طراحی معماری انجام شد. پژوهش از نظر هدف کاربردی و با رویکرد آمیخته و ساختار متوالی – اکتشافی انجام گرفت. ابتدا با فراترکیب مطالعات پیشین، چارچوب ارزیابی تدوین و سپس عملکرد سه ابزار «میدجرنی»، «دال ای ۲» و «استیبل دیفیوژن» در دو آزمایش و طی هشت نوبت بررسی شد. آزمایش نخست بر تولید طرح از ورودی صرفاً متنی و آزمایش دوم بر ترکیب ورودی متنی و تصویری متمرکز بود. خروجی‌ها توسط هشت نفر از استادان رشته معماری دارای تجربه در زمینه هوش مصنوعی و با مقیاس پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی شدند. یافته‌های فراترکیب، پنج بُعد «انطباق با ورودی، خلاقیت، کیفیت ایده، کیفیت بازنمایی و کاربردپذیری» و در تعامل چندوجهی، دو بُعد «تلفیق ورودی‌های چندوجهی» و «کنترل و توسعه طراحی» را شناسایی کرد. در آزمایش نخست، «میدجرنی» در انطباق با ورودی و خلاقیت، «استیبل دیفیوژن» در کیفیت ایده و «دال ای ۲» در کیفیت بازنمایی عملکرد برتر داشتند و «میدجرنی» و «استیبل دیفیوژن» در کاربردپذیری عملکرد برابر نشان دادند. در آزمایش دوم، «میدجرنی» در خلاقیت و کیفیت ایده و «استیبل دیفیوژن» در پنج بُعد دیگر برتری داشتند، درحالی‌که «دال ای ۲» در هیچ‌یک از ابعاد عملکرد برتر نشان نداد. در مجموع، نتایج نشان داد عملکرد ابزارها به نوع ورودی و هدف طراحی وابسته است و هیچ ابزار واحدی برتری مطلق ندارد. «میدجرنی» برای اکتشاف ایده‌های خلاقانه از ورودی متنی و «استیبل دیفیوژن» برای توسعه و کنترل گزینه‌های طراحی مبتنی بر ترکیب متن و تصویر مناسب‌تر است.

استناد به این مقاله: یزدانی، مجید و داوری رشخوار، امیررضا (۱۴۰۵)، بررسی پتانسیل‌های هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری، *نشریه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۴ (۶)، ۱۸-۴۵.
https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2090122.1222

شاپا چاپی: ۲۵۸۷-۶۲۶۳
شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۷-۲۹۸۱
پدیدآورندگان

مقدمه

تحولات فناورانه همواره در شکل‌گیری و تحول روش‌های طراحی معماری نقش داشته‌اند. انقلاب‌های صنعتی با ایجاد تغییر در ابزارها، فرآیندهای تولید و شیوه‌های تفکر طراحی، مسیر تحول معماری را دستخوش تغییر کرده‌اند. در این میان، توسعه فناوری اطلاعات و ابزارهای طراحی دیجیتال در انقلاب صنعتی سوم، زمینه شکل‌گیری فرآیندهای پیچیده‌تر و دقیق‌تر طراحی را فراهم ساخت و در انقلاب صنعتی چهارم، فناوری‌هایی همچون هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و سامانه‌های مولد، مرحله جدیدی از تحول در فرآیند طراحی معماری را رقم زده‌اند. این تحولات، در کنار ایجاد فرصت‌های جدید، پرسش‌هایی درباره تغییر نقش معمار، نحوه تعامل انسان و فناوری و جایگاه خلاقیت در فرآیند طراحی مطرح کرده‌اند. هوش مصنوعی به دلیل قابلیت پردازش حجم گسترده‌ای از داده‌ها، شناسایی الگوها، تولید گزینه‌های طراحی و پشتیبانی از برخی فعالیت‌های پیچیده، به یکی از فناوری‌های اثرگذار در معماری تبدیل شده است. تجربه استفاده از ابزارهای طراحی دیجیتال نیز نشان داده است که فناوری می‌تواند فراتر از تسهیل ترسیم و بازنمایی، شیوه جست‌وجو، توسعه و ارزیابی گزینه‌های طراحی را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، هوش مصنوعی تفاوتی اساسی با ابزارهای دیجیتال متعارف دارد؛ زیرا ظرفیت مشارکت در برخی فعالیت‌های مرتبط با حل مسئله، تولید گزینه و تصمیم‌گیری را نیز داراست. از این منظر، هوش مصنوعی می‌تواند در فرآیند ایده‌پردازی معماری، علاوه بر نقش ابزار بازنمایی، به‌عنوان عاملی پشتیبان در تولید، اکتشاف و توسعه ایده‌ها عمل کند. اهمیت این موضوع در مرحله ایده‌پردازی معماری، با توجه به پیچیدگی روزافزون مسائل طراحی، دوچندان می‌شود. در مراحل اولیه طراحی، معمار با مجموعه‌ای از اطلاعات مرتبط با نیازهای کاربران، شرایط محیطی، الزامات عملکردی و محدودیت‌های فنی مواجه است که پردازش و ترکیب هم‌زمان آن‌ها می‌تواند دشوار باشد. هوش مصنوعی با امکان پردازش سریع اطلاعات و تولید گزینه‌های متنوع، ظرفیت پشتیبانی از فرآیند اکتشاف و توسعه ایده‌های معماری را فراهم می‌کند. با وجود این، قابلیت‌های فنی این فناوری لزوماً به معنای اثربخشی آن در ایده‌پردازی نیست و پرسش‌هایی درباره کیفیت ایده‌های تولیدشده، میزان ارتباط آن‌ها با مسئله طراحی، خلاقیت، اصالت و امکان توسعه آن‌ها در فرآیند طراحی مطرح است.

با وجود گسترش استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی مولد در معماری، شواهد تجربی درباره عملکرد واقعی این ابزارها در مرحله ایده‌پردازی همچنان محدود است. بخش قابل توجهی از مطالعات بر قابلیت‌های بالقوه این فناوری تمرکز دارند، در حالی که ارزیابی نظام‌مند عملکرد ابزارهای مختلف و مقایسه آن‌ها بر اساس ابعاد و شاخص‌های مؤثر در کیفیت و قابلیت استفاده از خروجی‌های طراحی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، بررسی تجربی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی مولد در ایده‌پردازی معماری و شناسایی ابعاد مؤثر بر ارزیابی آن‌ها می‌تواند به درک دقیق‌تر ظرفیت‌ها و محدودیت‌های این فناوری و تبیین جایگاه آن در فرآیند طراحی معماری کمک کند.

پرسش‌های پژوهش

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری انجام می‌شود و در این راستا، به دو سؤال اصلی پاسخ می‌دهد:

۱. معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری کدام‌اند؟

۲. ابزارهای منتخب هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری، هنگام دریافت ورودی‌های مشابه، چه تفاوت‌هایی در عملکرد، کیفیت خروجی‌ها و ویژگی‌های طراحی ارائه می‌دهند؟

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف بررسی پتانسیل‌های هوش مصنوعی مولد در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری و مقایسه عملکرد ابزارهای منتخب در تولید و توسعه ایده‌های اولیه معماری انجام شده است. از نظر هدف، پژوهش حاضر کاربردی و با رویکردی آمیخته دارای ساختاری متوالی– اکتشافی است (میریام و تیسدل، ۱۳۹۸، ص.۶۱)؛ منطق کلی پژوهش بر این اساس استوار است که ارزیابی قابلیت ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری مستلزم وجود معیارهایی مشخص و مبتنی بر ادبیات پژوهش است. ازاین‌رو، ساختار پژوهش در دو مرحله اصلی سازمان‌دهی شد. ابتدا از طریق فراترکیب مطالعات مرتبط، معیارهای مناسب برای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی

معماری شناسایی و عملیاتی شدند. سپس، با کنترل شرایط ورودی، ۳ ابزار هوش مصنوعی منتخب که از بین ۷ ابزار معرفی شده بصورت هدفمند انتخاب شده‌اند در یک چارچوب آزمایشی دو مرحله‌ای در ۸ نوبت برای ارزیابی و مقایسه مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله اول، توانایی ابزارها در تبدیل ورودی متنی به ایده و طرح‌های معماری و در مرحله دوم، توانایی آنها در تلفیق ورودی متنی و تصویری و ایجاد گزینه‌های جدید بر مبنای تصویر پایه ارزیابی شد. سپس طرح های تولید شده در اختیار ۸ نفر از اساتید دانشگاه که در زمینه استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی تجربه کافی دارند قرار گرفت. در نهایت جهت ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی منتخب، خروجی‌های حاصل بر اساس معیارهای تعیین‌شده و با استفاده از طیف ۵ گزینه‌ای لیکرت امتیازدهی و به‌صورت تطبیقی تحلیل شدند و در کنار تحلیل امتیازها، ویژگی‌های کیفی و متمایز خروجی هر ابزار نیز مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین، مسیر کلی پژوهش در ۸ گام به صورت زیر تعریف شد:

۱–فراترکیب مطالعات پیشین ۲–استخراج معیارها ۳– عملیاتی‌سازی معیارها و تدوین مقیاس امتیازدهی ۴– انتخاب ابزارها ۵–اجرای دو مرحله آزمایش ۶– ارزیابی و امتیازدهی خروجی‌ها ۷– تحلیل تطبیقی امتیازها ۸– تحلیل کیفی ویژگی‌های متمایز

پیشینه پژوهش

کاربرد هوش مصنوعی در طراحی معماری در امتداد تحول طراحی محاسباتی و گسترش روش‌های تولید، تحلیل و ارزیابی رایانه‌ای شکل گرفته است. در مراحل نخست، روش‌های هوشمند عمدتاً برای تحلیل داده‌ها، شناسایی الگوها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شدند؛ اما با توسعه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، کاربرد آن‌ها به تولید و توسعه گزینه‌های طراحی نیز گسترش یافت. آس و همکاران (As et al., 2018) با بهره‌گیری از یادگیری عمیق و ساختار فضایی، امکان تولید طراحی مفهومی معماری را بررسی کردند و نشان دادند که روش‌های یادگیری ماشین می‌توانند در تولید گزینه‌های اولیه طراحی نیز به کار گرفته شوند. در ادامه، کاسترو پنا و همکاران (Castro Pena et al., 2021) در یک مرور نظام‌مند، کاربردهای هوش مصنوعی در طراحی مفهومی معماری را در حوزه‌هایی همچون تولید، ارزیابی و پشتیبانی از تصمیم‌های طراحی بررسی کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که عملکرد هوش مصنوعی در معماری به نوع الگوریتم، داده ورودی، هدف طراحی و شیوه تعامل کاربر وابسته است و ارزیابی آن نمی‌تواند صرفاً بر امکان تولید خروجی متمرکز باشد.

در مطالعات داخلی نیز کاربرد روش‌های هوشمند در معماری مورد توجه قرار گرفته است. محتاج، طاهباز و دهقان توران‌پشتی (۱۴۰۳) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به گونه‌بندی و استخراج ویژگی‌های پلان خانه‌های بومی بندر کُنگ پرداختند و قابلیت این روش‌ها را در شناسایی الگوها و روابط فضایی نشان دادند. با وجود این، ماهیت پژوهش مذکور تحلیلی و طبقه‌بندی‌کننده است و مستقیماً به تولید و ارزیابی ایده‌های معماری نمی‌پردازد. همچنین، زرگران خوزانی و زارع (۱۴۰۳) به بررسی برهم‌کنش هوش مصنوعی و شکل‌گیری ایده‌های طراحی معماری پرداختند که از نظر تمرکز بر ایده‌پردازی به پژوهش حاضر نزدیک است؛ با این حال، ارزیابی معیارمحور و مقایسه کنترل‌شده عملکرد چند ابزار را دنبال نکرده است.

مرحله ایده‌پردازی به دلیل ماهیت باز و غیرقطعی آن، جایگاه ویژه‌ای در بررسی عملکرد هوش مصنوعی دارد. در این مرحله، طراح همزمان با تفسیر مسئله، شناسایی روابط میان مؤلفه‌ها، تولید گزینه‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها مواجه است. نجاتی، بمانیان و کلانتری (۱۴۰۰) نیز با تأکید بر تفاوت مرحله مفهومی با یک فضای مسئله کاملاً تعریف‌شده، نشان دادند که هوش مصنوعی می‌تواند در کشف نیازهای طراحی و توسعه راه‌حل‌ها نقش داشته باشد. ازاین‌رو، ارزیابی عملکرد این ابزارها مستلزم توجه همزمان به ارتباط خروجی با مسئله طراحی، امکان اکتشاف گزینه‌های متفاوت و قابلیت توسعه و اصلاح ایده است. با ظهور مدل‌های مولد تصویر، کاربرد هوش مصنوعی در مراحل اولیه طراحی شکل تازه‌ای یافت. ابزارهایی مانند Midjourney، DALL-E2 و Stable Diffusion امکان تبدیل توصیف‌های متنی به تصاویر در قالب ایده‌های معماری و در برخی موارد اصلاح و توسعه تصاویر موجود را فراهم کرده‌اند. پلانیگز و برگر (Ploennigs & Berger, 2023) کاربرد ابزارهای تولید تصویر مبتنی بر هوش مصنوعی را در فعالیت‌هایی همچون ایده‌پردازی، اسکیس، مدل‌سازی مفهومی و تولید تصاویر معماری بررسی کردند. آنان نشان دادند که تفاوت در معماری مدل، نحوه تعامل کاربر و امکانات کنترل و اصلاح خروجی می‌تواند به تفاوت عملکرد ابزارها منجر شود. بنابراین، مقایسه ابزارهای مولد نیازمند شرایط ورودی و معیارهای ارزیابی نسبتاً یکسان است.

پنانن و همکاران (Paananen et al., 2024) در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد Midjourney، Stable Diffusion و DALL-E 2 را در یک مسئله طراحی معماری با مشارکت ۱۷ دانشجوی معماری بررسی کردند. یافته‌های آنان نشان داد که تولید تصویر می‌تواند به کشف ایده‌های غیرمنتظره و تقویت رویکرد اکتشافی کمک کند، اما اثربخشی ابزارها به نحوه تعریف محدودیت‌های طراحی و تعامل طراح با سیستم وابسته است. این پژوهش از اهمیت بررسی چند ابزار در یک مسئله طراحی مشترک و حفظ نقش فعال طراح در تفسیر و استفاده از خروجی‌ها حمایت می‌کند. در مطالعات داخلی، پردل و ضیاءبخش (۱۴۰۲) کاربرد هوش مصنوعی در ایده‌پردازی فرمی فضای معماری را با رویکرد روان‌شناسی محیط بررسی کردند. این پژوهش بر ظرفیت هوش مصنوعی در تولید ایده تمرکز دارد، اما مقایسه چند ابزار تحت شرایط ورودی مشابه و بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای مشترک را دنبال نمی‌کند. همچنین، طاهری و رسول‌زاده (۱۴۰۴) کاربرد ابزارهای هوش مصنوعی و نقش سامانه‌های عامل‌محور در معماری داخلی را بررسی کردند. یافته‌های آنان نشان‌دهنده آشنایی گسترده معماران داخلی با ابزارهای هوش مصنوعی و ادراک مثبت از نقش ابزارهایی مانند Midjourney در کاهش زمان و افزایش کارایی بود. با این حال، تمرکز این مطالعه بر معماری داخلی، سامانه‌های عامل‌محور و ساختمان سالم، با ارزیابی تجربی عملکرد ابزارهای مولد در مرحله ایده‌پردازی تفاوت دارد.

در مطالعات جدیدتر، تمرکز پژوهش‌ها از بررسی صرفِ امکان استفاده از هوش مصنوعی به بررسی تناسب فناوری با نوع مسئله طراحی و نحوه تعامل آن با طراح تغییر یافته است. ویسرز–سیمی‌لون و همکاران (Vissers-Similon et al., 2025) در یک مرور نظام‌مند، تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌کاررفته در مراحل اولیه طراحی معماری را در چهار سطح «ورودی»، «خروجی»، «تعامل و همکاری» و «خلاقیت» طبقه‌بندی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که انتخاب فناوری مناسب به عواملی مانند نوع مسئله طراحی، داده‌های در دسترس و مهارت‌های کاربر وابسته است. این یافته بر اهمیت توجه به نوع ورودی و نوع فعالیت طراحی در ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی تأکید می‌کند. به بیان دیگر، ارزیابی این ابزارها نباید تنها بر قابلیت‌های فنی آن‌ها متمرکز باشد، بلکه باید میزان تناسب آن‌ها با نوع فعالیت و نیازهای هر مرحله از فرایند طراحی نیز مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر، مطالعات مربوط به کیفیت خروجی‌های تولیدشده نشان می‌دهند که ارزیابی عملکرد هوش مصنوعی را نمی‌توان به جذابیت بصری تصاویر محدود کرد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) در مقایسه آثار گائودی با طرح‌های تولیدشده توسط هوش مصنوعی، مؤلفه‌هایی همچون اصالت، جذابیت، خلاقیت، هماهنگی و ترجیح کلی را در ارزیابی خروجی‌ها در نظر گرفتند و تفاوت عملکرد خروجی‌ها در ابعاد مختلف را نشان دادند. همچنین، سایر پژوهشگران قابلیت مدل‌های مولد از جمله DALL-E 2، Midjourney و Stable Diffusion را در انتقال فضا و اتمسفر معماری بررسی کردند و نشان دادند که این ابزارها از نظر ویژگی‌های خروجی و قابلیت بازنمایی فضا عملکرد یکسانی ندارند (Odiah& Gosling, 2024). این یافته‌ها بر ضرورت تفکیک ابعاد مختلف کیفیت خروجی، از جمله کیفیت بصری و کیفیت بازنمایی معماری، تأکید می‌کنند. در سطح گسترده‌تر، جانگ و همکاران با مرور نظام‌مند ۱۶۱ مقاله درباره هوش مصنوعی مولد در طراحی معماری نشان دادند که بخش عمده کاربردهای بررسی‌شده به مراحل اولیه طراحی اختصاص دارد و تصاویر رایج‌ترین نوع خروجی بوده‌اند (Jang et al., 2025). همچنین، ارزیابی مقایسه‌ای یکی از روش‌های متداول ارزیابی در مطالعات پیشین بوده است. با این حال، غلبه ارزیابی‌های ذهنی و نبود توافق کامل درباره نحوه عملیاتی‌کردن معیارهای کیفیت نشان می‌دهد که تدوین چارچوب‌های روشن‌تر و معیارمحور برای ارزیابی عملکرد ابزارهای مولد همچنان مورد نیاز است. برآیند مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری ماهیتی چند بعدی دارد و ارزیابی آن به مؤلفه‌هایی فراتر از کیفیت بصری تصویر وابسته است. انطباق خروجی با ورودی و مسئله طراحی، تنوع و تفاوت در ایده‌ها، خلاقیت و اصالت، کیفیت و انسجام ویژگی‌های فرمی و فضایی، قابلیت توسعه و اصلاح ایده و میزان کنترل‌پذیری و تعامل‌پذیری ابزار، از جمله ابعاد قابل توجه در این ارزیابی هستند. از این منظر، میان «توانایی تولید تصویر» و «توانایی پشتیبانی از ایده‌پردازی معماری» می‌توان تمایز قائل شد؛ زیرا یک خروجی از نظر بصری جذاب ممکن است ارتباط محدودی با مسئله طراحی یا قابلیت اندکی برای توسعه داشته باشد.

در مجموع، پیشینه پژوهش را می‌توان در سه مسیر اصلی خلاصه کرد: نخست، مطالعات مربوط به کاربرد یادگیری ماشین و روش‌های هوشمند در تحلیل و تولید طراحی مفهومی؛ دوم، پژوهش‌های مرتبط با کاربرد مدل‌های مولد تصویر در ایده‌پردازی و اکتشاف گزینه‌های طراحی؛ و سوم، مطالعاتی که به ارزیابی کیفیت، قابلیت بازنمایی و عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی پرداخته‌اند. در ادبیات داخلی نیز پژوهش‌هایی درباره تحلیل

داده‌های معماری، شکل‌گیری ایده، ایده‌پردازی فرمی و کاربرد حرفه‌ای ابزارهای هوش مصنوعی انجام شده است. با وجود این، کنترل شرایط ورودی، پیوند میان تعیین معیارهای ارزیابی و مقایسه تجربی عملکرد چند ابزار هوش مصنوعی در یک مسئله ایده‌پردازی معماری همچنان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، خلأ پژوهشی موجود نه فقدان مطالعات درباره کاربرد هوش مصنوعی در معماری، بلکه نبود رویکردی نظام‌مند برای مقایسه معیارمحور عملکرد ابزارهای مختلف در مرحله ایده‌پردازی، تحت شرایط ورودی مشابه و با توجه هم‌زمان به ابعاد مختلف کیفیت و قابلیت استفاده از خروجی‌ها است. پژوهش حاضر در پاسخ به این خلأ، ابتدا به شناسایی و سازمان‌دهی معیارهای مناسب برای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری می‌پردازد و سپس عملکرد ابزارهای منتخب را در شرایط ورودی مشابه از نظر ابعاد مختلف کیفیت خروجی مقایسه می‌کند. از این منظر، پژوهش حاضر به‌جای فرض برتری یک ابزار، رویکردی تجربی و معیارمحور را برای شناسایی تفاوت عملکرد ابزارهای منتخب در فرآیند ایده‌پردازی معماری دنبال می‌کند.

مفاهیم نظری پژوهش

شخصیت و مهارت‌های حرفه‌ای معمار در طول تاریخ بشر تحولات بی‌شماری را تجربه کرده است و اگرچه وظیفه معمار اساساً طراحی ساختمان‌ها و فضاها است، استفاده از ابزارهای دیجیتال بدون شک بزرگ‌ترین تغییر در طراحی معماری از زمان رنسانس بوده است (Gallo, Wirz & Tuzzolino, 2019). امروزه حرفه معماری، روش‌ها و دانش فنی آن تحت تأثیر تحولات فناوری و رویکردهای نوین طراحی با چالش‌های جدی مواجه شده است. ورود هوش مصنوعی و فناوری‌های محاسباتی نیز موجب بازاندیشی در شیوه‌های سنتی طراحی و نقش معمار شده و زمینه‌ساز تحولی بنیادین در این حرفه شده است (Chaillou, 2020). این تغییرات، آن‌قدر عمیق است که در حال تغییر در نحوه درک ما از فضا و درنتیجه سکونت در آن است که فرهنگ ما را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gallo, 2021). در چند دهه گذشته، مطالعات متعددی به تغییرات اساسی حرفه معماری اشاره‌کرده‌اند، به گفته بسیاری از محققان، این تغییرات به‌طور چشمگیری راه‌های جدیدی را برای نقش‌هایی که معماران می‌توانند ایفا کنند باز می‌کند و شاید نقش معمولی معمار را تغییر دهد. در این راستا، تعداد قابل‌توجهی از مطالعات و نوشته‌ها با نگرانی عمیق در مورد آینده این حرفه و ماهیت خدماتی که معماران باید بتوانند به مشتریان، کاربران و جوامعی که در آن فعالیت می‌کنند ارائه دهند، وجود دارد (Salama, 2009).

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر تحول حرفه معماری، ابزارهایی است که معماران در فرایند طراحی به کار می‌گیرند. این ابزارها، از وسایل ترسیمی ساده مانند خط‌کش، پرگار و مداد تا ابزارهای بازنمایی و توسعه ایده مانند نقشه‌ها و ترسیمات طراحی، کلاژ، نمودارها، اینفوگرافیک و مدل‌های حجمی را دربرمی‌گیرند. با پیشرفت فناوری، ابزارهای مورد استفاده در معماری نیز تغییر و گسترش یافته‌اند و امکانات جدیدی برای شکل‌گیری و توسعه ایده‌های طراحی فراهم شده است. امروزه، ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی نیز به این مجموعه افزوده شده‌اند و می‌توانند در مرحله ایده‌پردازی و تولید گزینه‌های طراحی مورد استفاده قرار گیرند (Avermaete & Hurx, 2019). معماران معاصر در عمل خود از ابزارهای مختلف طراحی استفاده می‌کنند که انتخاب آن‌ها بر اساس تجربه، ترجیحات، عملکرد و وظایف خاص است، از نقشه‌کشی سنتی گرفته تا سیستم‌های خودکار پیشرفته، این ابزارها و روش‌ها همیشه در نحوه طراحی ساختمان تأثیر داشته‌اند. با تغییر در روش‌های طراحی و رویکردهای جدید نسبت به فرآیند خلاقیت، آن‌ها بیش از هر زمان دیگری به عناصر حیاتی فرآیند طراحی تبدیل شدند؛ این ابزارها مدام در حال تکامل هستند، از طراحی دوبعدی و مدل فیزیکی گرفته تا ایجاد ابزارهای طراحی پیشرفته که به راه‌حل‌های خاص اختصاص داده شده است. معماران معاصر اغلب از یک سیستم محاسباتی پیشرفته برای ایجاد فرم‌های پیچیده و به دست آوردن ابزارهایی برای کنترل و تغییر آزادانه آن استفاده می‌کنند. بااین‌حال، بیشتر ابزارهای طراحی دیجیتال موجود در حال حاضر محدود به دستورات از پیش تعریف‌شده است و بسیاری از آن‌ها دیگر پاسخ‌گوی نیازهای امروزه حرفه معماری نیستند (Cudzik & Radziszewski, 2018b).

هوش را می‌توان به‌عنوان یک توانایی ذهنی کلی برای استدلال، حل مسئله و یادگیری تعریف کرد (Colom et al., 2010) . هوش به دلیل ماهیت کلی خود، عملکردهای شناختی مانند ادراک، توجه، حافظه، زبان یا برنامه‌ریزی را باهم ترکیب می‌کند (Jensen, 2000; Neisser et al., 1996). جنسن به تعریف هوش از کارل برتِیر[1] اشاره می‌کند: «چیزی که وقتی نمی‌دانید چه‌کاری باید انجام دهید، از آن استفاده می‌کنید»

(Jensen, 2000). اشنایدرمن و راثمن پس از بررسی گسترده خود، استدلال، حل مسئله و یادگیری را به‌عنوان عوامل ضروری برای هوش دانستند (Sternberg, 1985). گزارش «علم رایج درباره هوش» که توسط گاتفریدسون تهیه شده است، بر استدلال، برنامه‌ریزی، حل مسئله، تفکر انتزاعی، درک مفاهیم پیچیده، یادگیری سریع و یادگیری از تجربه، به‌عنوان مهم‌ترین جنبه‌های هوش تأکید می‌کند (Gottfredson, 1994) . هوش مصنوعی پدیده‌ای ناگهانی نیست، بلکه حاصل چندین دهه نوآوری و پژوهش در حوزه‌های علوم رایانه و علوم شناختی است. اصطلاح «هوش مصنوعی» در سال ۱۹۵۶، در چارچوب کارگاه پژوهشی دارتموث در دانشگاه دارتموث آمریکا و با مشارکت جان مک‌کارتی و دیگر پژوهشگران مطرح شد. از همان آغاز، مطالعه و شبیه‌سازی قابلیت‌های هوشمندانه انسان، از جمله یادگیری و استدلال، از اهداف اصلی این حوزه بود (McCarthy et al., 2006). بااین‌حال، ایده سامانه‌های نرم‌افزاری هوشمند و مستقل که علاوه بر انجام وظایف مشخص، می‌توانند تا حدی از تجربه یاد بگیرند، به پژوهش‌های دهه ۱۹۶۰ توسط پیشگام هوش مصنوعی، اولیور سلفریج[۲]، بازمی‌گردد (Mitchell, 1996).

برای دهه‌ها توسعه هوش مصنوعی نسبتاً به‌کندی پیش می‌رفت. ۲۰۱۶ سال پیشرفت بود، زمانی که برنامه آلفاگو بر بهترین بازیکن (کره‌ای) گو[۳] غلبه کرد (Mérő, 2019a). دلیل این پیشرفت افزایش سرسام‌آور قدرت پردازش و حافظه رایانه‌ها (همین‌طور افزایش شگفت‌انگیز میزان اطلاعات و داده‌های بزرگ) بود که درنتیجه، علاوه بر محاسبات، به‌واسطه فراوانی عظیم داده‌ها، در یادگیری عمیق نیز بسیار کارآمد شده‌اند (Lukovich, 2023). با این حال هوش مصنوعی فاقد اختیار آزاد یا خودآگاهی است (Christian, 2020)، بطوریکه ما قادر نیستیم به کسی ذهن (مغز) ارائه دهیم؛ این الگوریتم‌ها فقط می‌توانند به یادگیری برای حل وظایف خاص بپردازند، اما در این وظایف بهتر از ما عمل می‌کنند (Chollet, 2019; Martela, 2025). در جدول۱ تاریخچه هوش مصنوعی به اختصار بیان شده است.

هوش مصنوعی به بازنمایی و شبیه‌سازی برخی از توانایی‌های شناختی انسان در ماشین‌ها و سامانه‌های رایانه‌ای اطلاق می‌شود که برای انجام وظایفی مانند تفکر، یادگیری، استدلال و تصمیم‌گیری طراحی شده‌اند (Kaplan & Haenlein, 2019). جان مک‌کارتی، که نخستین بار اصطلاح «هوش مصنوعی» را مطرح کرد، بر این باور بود که رایانه‌ها می‌توانند وظایفی را انجام دهند که مستلزم هوش انسانی هستند (Bernstein, 2022). اندیشه‌های مک‌کارتی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر پژوهش‌های وارن مک‌کالاک و والتر پیتس قرار داشت؛ آن‌ها در مقاله خود به شباهت میان فرایندهای عصبی انسان و محاسبات ماشینی اشاره کردند (McCulloch & Pitts, 1943). از منظر مفهومی، هوش مصنوعی به‌عنوان «توانایی یک سیستم در تفسیر صحیح داده‌های خارجی، یادگیری از این داده‌ها و به‌کارگیری این یادگیری‌ها برای دستیابی

جدول ۱. تاریخچه هوش مصنوعی (Russell & Norvig, 2021).

سال	توضیح	رویداد / پیشرفت
1943	مدل نورون مصنوعی مک‌کالوچ و پیتس	اولین مدل ریاضی از نورون‌ها
1950	آزمون تورینگ (Alan Turing)	معیار هوش ماشین
1956	کنفرانس دارتموث	تولد رسمی و معرفی اصطلاح (Artificial Intelligence)
1958	ابداع زبان برنامه‌نویسی Lisp توسط جان مک‌کارتی	زبان برنامه‌نویسی هوش مصنوعی
1965	برنامه شطرنج اولیه	استفاده از جستجوی منطقی
1966	برنامه شبیه‌سازی گفت‌وگوی یک انسان (ELIZA)	اولین برنامه پردازش زبان طبیعی
1970	Shakey robot	اولین ربات هوشمند که حرکت و تصمیم می‌گیرد
1974–1980	زمستان اول هوش مصنوعی	کاهش بودجه و رشد کند پژوهش‌ها
1980	سیستم‌های خبره	کاربرد صنعتی و پزشکی (مثلاً XCON)
1987–1993	زمستان دوم هوش مصنوعی	ناکارآمدی سیستم‌های خبره در مسائل پیچیده
1997	ساخت ابررایانه شطرنج‌باز (Deep Blue)	شکست قهرمان شطرنج جهان (Kasparov)
2006	آغاز یادگیری عمیق	کمک جفری هینتون (Geoffrey Hinton) به احیای شبکه‌های عصبی چندلایه
2012	موفقیت مدل شبکه عصبی (AlexNet)	جهش بزرگ در بینایی ماشین با شبکه‌های عمیق
2016	هوش مصنوعی برتر در بازی (AlphaGo)	غلبه برنامه آلفاگو بر بهترین بازیکن گو
2020	مدل‌های زبانی بزرگ (GPT, BERT)	پیشرفت NLP و یادگیری زبان طبیعی
2023	هوش مصنوعی مولد (Generative)	تولید متن، تصویر و ویدئو با کیفیت بالا

به اهداف مشخص از طریق سازگاری انعطاف‌پذیر» تعریف می‌شود (Kaplan & Haenlein, 2019). همچنین، هوش مصنوعی به‌مثابه علمی در نظر گرفته می‌شود که به آموزش ماشین‌ها برای انجام وظایفی می‌پردازد که پیش‌تر مختص انسان بوده‌اند (PwC, 2019).

در این چارچوب، داده‌ها نقش زیربنایی ایفا می‌کنند و افزایش حجم و کیفیت داده‌ها معمولاً به بهبود عملکرد سامانه‌های هوش مصنوعی منجر می‌شود (Cudzik & Radziszewski, 2018a). با این حال، اغلب سامانه‌های هوش مصنوعی معاصر «تخصص‌محور» هستند؛ بدین معنا که در انجام یک وظیفه خاص عملکرد بالایی دارند، اما در سایر حوزه‌ها کارایی چندانی ندارند. افزون بر این، پیچیدگی روزافزون این سامانه‌ها سبب شده است که حتی طراحان آن‌ها نیز همواره قادر به توضیح دقیق فرایندهای تصمیم‌گیری داخلی آن‌ها نباشند (Mérő, 2019b).

بر اساس یک رویکرد فناورانه، هوش مصنوعی را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد: هوش مصنوعی محدود[۴] (ANI)، هوش مصنوعی عمومی[۵] (AGI) و هوش مصنوعی فوق‌هوشمند[۶] (ASI) (Hassani et al., 2020). در حوزه معماری، توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی و رایانه‌ای به‌تدریج بر فرآیندهای طراحی تأثیر گذاشت. از دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ نیز رایانه به‌عنوان ابزاری برای ترسیم، مدل‌سازی، تحلیل و پشتیبانی از طراحی معماری وارد این حوزه شد و زمینه را برای توسعه طراحی به کمک رایانه (CAAD) فراهم کرد (McCarthy et al., 2006; Lawson, 1998). گسترش فناوری‌های رایانه‌ای و هوش مصنوعی به‌تدریج مورد توجه معماران قرار گرفت و بر شیوه‌های تفکر و فرآیندهای خلاقانه طراحی تأثیر گذاشت. در این روند، رایانه از ابزاری صرفاً محاسباتی به وسیله‌ای برای بازنمایی، تحلیل و تولید گزینه های طراحی تبدیل شد و زمینه را برای شکل‌گیری طراحی دیجیتال و در ادامه کاربرد هوش مصنوعی در معماری فراهم کرد (Hawkes, 2017; Pacheco et al., 2026). اسکیچ‌پد[۷] اولین برنامه طراحی معماری بود که توسط ایوان ساترلند در سال ۱۹۶۳ اختراع شد و امکان طراحی روی یک صفحه سیاه واقعی را برای طراحان فراهم کرد. در اواخر دهه ۱۹۶۰، رایانه‌های الکترونیکی عمدتاً به‌عنوان ابزارهایی برای حل مسئله، تصمیم‌گیری و طراحی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Carpo, 2013).

در قرن بیستم، معماران و مهندسان به‌تدریج از رایانه برای تسریع و پشتیبانی از فرآیند طراحی بهره گرفتند. نیکلاس نگروپونته با تأکید بر تعامل انسان و ماشین، در گروه «ماشین معماری»[۸] در موسسه «ام آی تی» به بررسی قابلیت‌هایی مانند یادگیری، سازگاری و مشارکت ماشین در فرآیند طراحی پرداخت. او این دیدگاه‌ها را در کتاب[۹] خود مطرح کرد و رایانه را فراتر از یک ابزار ترسیم، به‌عنوان عاملی هوشمند و مشارکت‌کننده در طراحی معماری در نظر گرفت (Negroponte, 1970). امروزه هوش مصنوعی و روش‌های یادگیری ماشین در معماری برای حل مسائل پیچیده طراحی، تحلیل فضایی و ارزیابی گزینه‌های مختلف به‌کار گرفته می‌شوند و می‌توانند سرعت و کارایی فرآیند طراحی را افزایش دهند. این فناوری‌ها امکان تحلیل داده‌های فضایی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طرح‌ها را فراهم کرده و معماران را در تولید و ارزیابی گزینه‌های متنوع طراحی یاری می‌کنند (Tamke et al., 2018; Castro Pena et al., 2021; Li et al., 2025). هوش مصنوعی با خودکارسازی و پشتیبانی از بخش‌های مختلف فرآیند طراحی معماری، می‌تواند به افزایش کارایی، دقت و بهره‌وری در فرآیند طراحی کمک کند و در نتیجه، نقش و شیوه فعالیت طراحان معماری را تحت تأثیر قرار دهد. روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی امکان تحلیل حجم زیادی از داده‌ها و بررسی گزینه‌های متعدد طراحی را فراهم می‌کنند و می‌توانند در مراحل مختلف طراحی و ساخت به کار گرفته شوند (Tamke et al., 2018). همچنین، کاربرد هوش مصنوعی در طراحی مفهومی معماری، به‌ویژه از طریق روش‌های محاسبات تکاملی و سیستم‌های مولد، امکان تولید و ارزیابی گزینه‌های متنوع طراحی و بهینه‌سازی فرم معماری را فراهم کرده است (Castro Pena et al., 2021).

در سال‌های اخیر، پیشرفت مدل‌های هوش مصنوعی مولد، قابلیت‌های جدیدی را برای تولید محتوای بصری، ایجاد مدل‌های سه‌بعدی و پشتیبانی از مراحل مختلف فرآیند طراحی معماری فراهم کرده است. این فناوری‌ها با امکان تولید سریع گزینه‌های متعدد، می‌توانند فرآیند ایده‌پردازی و اکتشاف گزینه‌های طراحی را تسهیل کرده و به معماران در توسعه و بررسی ایده‌های اولیه کمک کنند (Li et al., 2025). افزون بر این، روش‌های یادگیری ماشین در رویکردهای مولد در طراحی معماری برای تولید، اکتشاف و بهینه‌سازی گزینه‌های طراحی به کار گرفته شده‌اند و امکان بررسی سریع‌تر مجموعه‌ای گسترده از راه‌حل‌های طراحی را فراهم می‌کنند (Zhuang et al., 2025). از این منظر، هوش مصنوعی را می‌توان نه صرفاً به‌عنوان ابزاری برای خودکارسازی فعالیت‌های طراحی، بلکه به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از ایده‌پردازی، اکتشاف گزینه‌های طراحی و تصمیم‌گیری در فرآیند طراحی معماری در نظر گرفت. بر این اساس، بررسی و مقایسه عملکرد ابزارهای مختلف هوش

مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی و ارزیابی کیفیت و ویژگی‌های خروجی‌های حاصل از آن‌ها، می‌تواند به شناخت ظرفیت‌ها و محدودیت‌های این ابزارها در فرآیند طراحی معماری کمک کند.

تحلیل مفاهیم

۱. معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی

در پاسخ به نخستین سؤال پژوهش، مبنی بر اینکه «معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری کدام‌اند؟»، مطالعات مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی و به‌ویژه هوش مصنوعی مولد در فرآیند طراحی معماری بررسی و مفاهیم مرتبط با قابلیت‌ها و عملکرد این ابزارها در تولید و توسعه ایده‌های اولیه استخراج و سنتز شدند. فرآیند تحلیل مطالعات منتخب با شناسایی مفاهیم مرتبط، استخراج کدهای اولیه، ادغام کدهای هم‌معنا و سازمان‌دهی آنها در قالب مقوله‌های مفهومی انجام شد. در ادامه، مقوله‌های حاصل بر اساس ارتباط آنها با ماهیت مرحله ایده‌پردازی معماری و قابلیت عملیاتی‌شدن در ارزیابی خروجی‌های تولیدشده، بعنوان نتایج فراترکیب در قالب ۷ بُعد و ۱۳معیار سازمان‌دهی شدند (جدول ۲). ازاین‌رو، معیارهای نهایی حاصل از یک مطالعه منفرد نبوده و نتیجه سنتز مفاهیم مشترک و مکمل موجود در مجموعه مطالعات بررسی‌شده هستند. بر اساس نتایج فراترکیب، معیارهای شناسایی‌شده پس از بررسی ارتباط مفهومی آنها با هدف پژوهش، در قالب یک چارچوب ارزیابی، عملیاتی شدند (جدول ۳). این چارچوب چندبُعدی امکان ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی را فراتر از کیفیت ظاهری تصویر و در ارتباط با فرآیند شکل‌گیری، توسعه و بازنمایی ایده معماری فراهم می‌کند؛ از یک سو ابعاد عمومی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری را پوشش می‌دهد و از سوی دیگر، قابلیت‌های خاص موردنیاز در تعامل هم‌زمان با ورودی متنی و تصویری را دربرمی‌گیرد. در سطح نخست، انطباق با ورودی بیانگر توانایی ابزار در درک و بازنمایی الزامات طراحی ارائه‌شده است. در سطح دوم، خلاقیت از طریق مؤلفه‌های نوآوری، تنوع و الهام‌بخشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. کیفیت ایده نیز از طریق انسجام و بسط مفهوم اولیه سنجیده می‌شود. در کنار این مؤلفه‌ها، کیفیت بازنمایی با توجه به کیفیت بصری و واقع‌گرایی خروجی بررسی می‌شود. در نهایت، قابلیت استفاده در ایده‌پردازی نشان‌دهنده ظرفیت خروجی برای ایفای نقش به‌عنوان محرک یا مبنای توسعه طراحی است. بر این اساس، در پاسخ به سؤال نخست پژوهش می‌توان بیان کرد که عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی معماری، در ابعاد «محتوایی، خلاقانه، ایده‌ای،

جدول ۳. چارچوب نهایی معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری (تدوین: پژوهش نگارندگان بر اساس یافته‌های فراترکیب).

بُعد	معیارهای نهایی
انطباق با ورودی	انطباق با پرامپت[۱۰]
خلاقیت	نوآوری، تنوع، الهام‌بخشی
کیفیت ایده	کیفیت ایده، بسط ایده
کیفیت بازنمایی	کیفیت بصری، واقع‌گرایی
کاربردپذیری	قابلیت استفاده در ایده‌پردازی
تلفیق ورودی‌های چندوجهی	وفاداری به تصویر پایه، هماهنگی متن و تصویر
کنترل و توسعه طراحی	تغییر هدفمند، قابلیت توسعه ایده

بصری و کاربردی» قابل ارزیابی است. همچنین، در تعاملات چندوجهی، «قابلیت حفظ، تفسیر و توسعه اطلاعات متنی و تصویری» به‌عنوان مؤلفه‌ای مکمل، به این چارچوب ارزیابی افزوده می‌شود. چارچوب حاصل از این فراترکیب، مبنای ارزیابی و مقایسه عملکرد ابزارهای منتخب در دو مرحله آزمایش تجربی پژوهش قرار گرفت. به‌منظور استفاده از معیارهای کیفی در مرحله آزمایش، معیارهای نهایی در قالب مقیاس پنج‌درجه‌ای عملیاتی شدند. در این مقیاس، امتیاز ۱ بیانگر پایین‌ترین سطح تحقق معیار و امتیاز ۵ بیانگر بالاترین سطح تحقق آن است. بدین‌ترتیب، چارچوب حاصل از فراترکیب علاوه بر فراهم‌کردن مبنای مفهومی ارزیابی، قابلیت تبدیل‌شدن به یک ابزار عملیاتی برای مقایسه خروجی ابزارهای منتخب را نیز پیدا کرد.

۲. ارزیابی تطبیقی ابزارهای منتخب هوش مصنوعی

در پاسخ به سؤال دوم پژوهش، عملکرد ابزارهای منتخب هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری و در شرایط دریافت ورودی‌های مشابه، از نظر عملکرد، کیفیت خروجی و ویژگی‌های طراحی مقایسه شد.

جدول ۲. نتایج فراترکیب و معیارهای استخراج‌شده برای ارزیابی عملکردهای هوش مصنوعی (تدوین: یافته‌های فراترکیب مطالعات منتخب نگارندگان).

بُعد ارزیابی	معیار نهایی	تعریف عملیاتی معیار	مبنای استخراج / مفهوم سنتزشده	منابع پشتیبان معیار
انطباق با ورودی	انطباق با پرامپت	میزان تطابق خروجی تولیدشده با عناصر، مفاهیم، ویژگی‌ها و الزامات طراحی تصریح‌شده در دستور متنی	دقت در بازنمایی محتوای موردنظر و توجه به قیود طراحی	Paananen et al. (2024); Odiah & Gosling (2024)
خلاقیت	نوآوری	میزان تازگی، اصالت و غیرتکراری بودن ایده یا راه‌حل معماری تولیدشده	نوآوری و تازگی راه‌حل به‌عنوان شاخص اثربخشی ایده‌پردازی	Shah et al. (2003); Nelson et al. (2009); Paananen et al. (2024)
	تنوع	میزان تفاوت میان گزینه‌های طراحی تولیدشده و میزان گسترش فضای راه‌حل‌های قابل بررسی	گوناگونی راه‌حل‌ها و میزان گستردگی کاوش در فضای طراحی	Shah et al. (2003); Nelson et al. (2009)
	الهام‌بخشی	ظرفیت خروجی برای تحریک تفکر طراحی، ایجاد تداعی‌های جدید و گشودن مسیرهای متفاوت ایده‌پردازی	کشف غیرمنتظره ایده‌ها و تقویت ذهنیت تخیلی در فرآیند طراحی	Paananen et al. (2024); Horvath & Pouliou (2024)
کیفیت ایده	کیفیت ایده	میزان مطلوبیت، ارزش و قابلیت پذیرش خروجی به‌عنوان یک مفهوم اولیه معماری	کیفیت به‌عنوان مؤلفه اثربخشی ایده‌پردازی	Shah et al. (2003); Nelson et al. (2009)
	بسط ایده	میزان توسعه و غنی‌شدن مفهوم اولیه در قالب ویژگی‌های فرمی، فضایی و بصری قابل تفسیر	توسعه و غنی‌سازی مفهوم در فرآیند طراحی مفهومی	Paananen et al. (2024); Horvath & Pouliou (2024)
کیفیت بازنمایی	کیفیت بصری	میزان وضوح، جزئیات، ترکیب‌بندی، انسجام و کیفیت کلی بازنمایی تصویری	کیفیت بازنمایی و قابلیت انتقال اطلاعات معماری از طریق تصویر	Odiah & Gosling (2024); Horvath & Pouliou (2024)
	واقع‌گرایی	میزان باورپذیری و واقع‌نمایی بازنمایی معماری و فضای تولیدشده	توانایی تصویر در نمایش باورپذیرِ فضای معماری و حال‌وهوای حسی آن	Odiah & Gosling (2024)
کاربردپذیری	قابلیت استفاده در ایده‌پردازی	میزان قابلیت استفاده از خروجی به‌عنوان محرک، مرجع یا مبنای توسعه و ارتباط ایده معماری	نقش خروجی‌های مولد در پشتیبانی از ایده‌پردازی و ارتباط مفاهیم	Paananen et al. (2024); Horvath & Pouliou (2024)
تلفیق ورودی‌ها	وفاداری به تصویر پایه	میزان حفظ ویژگی‌های اصلی، ساختار، ترکیب‌بندی و اطلاعات معماری تصویر پایه در خروجی جدید	حفظ و انتقال ویژگی‌های تصویر مبنا به خروجی	Horvath & Pouliou (2024)
	هماهنگی متن و تصویر	میزان انطباق هم‌زمان خروجی با اطلاعات موجود در تصویر پایه و الزامات دستور متنی جدید	تلفیق و تعامل ورودی‌های متنی و تصویری در تولید گزینه جدید	Horvath & Pouliou (2024)
کنترل و توسعه طراحی	تغییر هدفمند	میزان توانایی ابزار در اعمال تغییرات موردنظر بر تصویر پایه، بدون ایجاد تغییرات نامرتبط یا از دست رفتن ویژگی‌های اصلی	کنترل فرایند تولید و تغییر تصویر	Horvath & Pouliou (2024)
	قابلیت توسعه ایده	ظرفیت خروجی برای تبدیل‌شدن به مبنایی برای تولید گزینه‌های بعدی و ادامه فرآیند طراحی	استفاده از خروجی مولد به‌عنوان نقطه شروع برای توسعه و تکرار ایده معماری	Paananen et al. (2024); Horvath & Pouliou (2024)

از میان هفت ابزار معرفی‌شده در جدول ۴، سه ابزار «میدجرنی»، «دال ای ۲» و «استیبل دیفیوژن» برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. مبنای انتخاب «استیبل دیفیوژن»، ماهیت متن‌باز و محدودیت کمتر آن در تولید تصاویر، در مورد «میدجرنی» و «دال ای ۲»، قابلیت تولید فرم‌ها و طرح‌های پیچیده‌ای بود که مدل‌سازی آن‌ها با ابزارهای متداول طراحی معماری دشوارتر است. هدف از این مقایسه، شناسایی ابزاری بود که بتواند با استفاده از پرامپت‌های متنی ساده و بدون نیاز به مهارت تخصصی در مهندسی پرامپت، خروجی‌هایی با بیشترین میزان انطباق و کیفیت برای ایده‌پردازی معماری تولید کند. واژگان مورد استفاده در پرامپت‌ها نیز بر اساس مطالعات و نمونه‌های مطرح‌شده در میان معماران و مدارس معماری پیشرو انتخاب شد و طیفی از سبک‌های معماری، سبک معماران شناخته‌شده و فرم‌های پیچیده الهام‌گرفته از طبیعت را دربر گرفت.

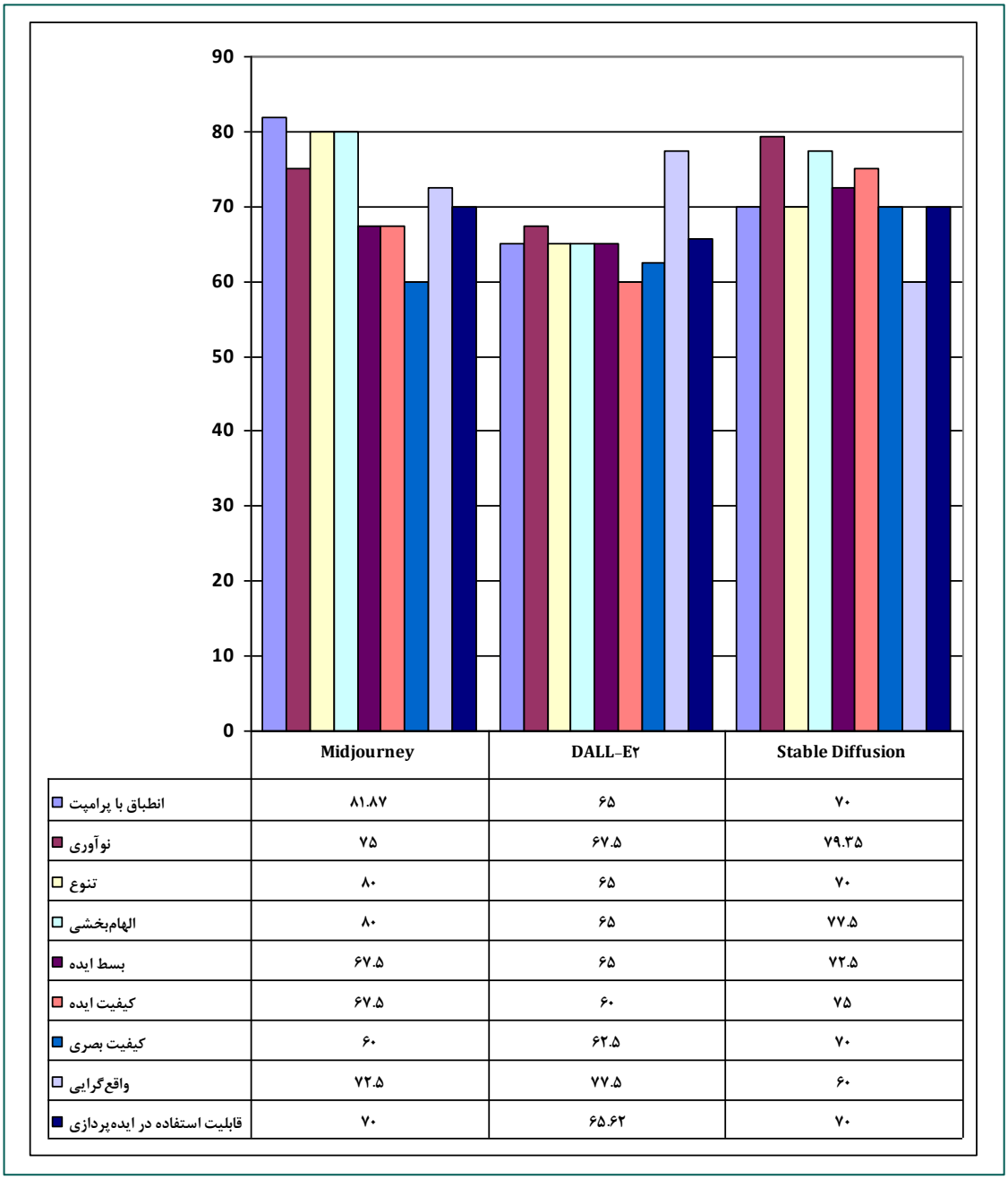
۲.۱. آزمایش اول: تولید ایده با استفاده از ورودی متنی

در مرحله نخست، عملکرد سه ابزار منتخب در تولید طرح‌های معماری صرفاً بر اساس ورودی متنی و با استفاده از پرامپت‌های یکسان، در چهار نوبت ارزیابی شد[۱۰] (جدول ۵ و نمودار ۱). در این مرحله، تمرکز بر ارزیابی توانایی ابزارهای هوش مصنوعی در تفسیر یک دستور متنی و تبدیل آن به ایده و بازنمایی تصویری معماری بود. بنابراین، ۹ معیار مرتبط شامل: «انطباق با پرامپت، نوآوری، تنوع، الهام‌بخشی، انسجام و بسط ایده، کیفیت بصری، واقع‌گرایی و قابلیت استفاده در ایده‌پردازی» در این مرحله مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که «میدجرنی» در معیار «انطباق با پرامپت» با کسب امتیاز ۸۱.۸۷ درصد، بالاترین عملکرد را داشت. این ابزار همچنین در دو معیار «تنوع» و «الهام‌بخشی»، هر دو با

جدول ۴. معرفی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی مورد استفاده در مرحله ایده‌پردازی معماری؛ مأخذ: نگارندگان

نام ابزار / فناوری	نوع هوش مصنوعی	کاربرد در ایده‌پردازی	ورودی‌ها	خروجی‌ها	مزایا	محدودیت‌ها	منبع
MidJourney	Generative (Text-to-Image)	تولید تصاویر مفهومی	متن توصیفی	تصاویر اولیه کانسپت	افزایش سرعت، الهام‌بخشی	وابستگی به کیفیت متن	Zhang et al., 2024; Del Campo & García, 2024
DALL·E2	Generative (Text-to-Image)	تبدیل توصیف به تصویر	متن توصیفی	تصاویر مفهومی	مشاهده سریع گزینه‌ها	نیاز به اصلاح دستی	Liu et al., 2024; Amer, 2023
RunwayML	Generative / Diffusion	خلق ایده‌های فضایی	متن یا تصویر اولیه	تصاویر پیشنهادی	تنوع فرم و فضا	محدود به داده‌های آموزش	Cudzik & Radziszewski, 2018a
ChatGPT / GPT-4	LLM	ایده‌پردازی و سناریو	متن / سوال طراحی	پیشنهادات متنی	تولید سریع ایده، ترکیب مفاهیم	فاقد بازنمایی بصری	Avermaete & Hurx, 2019; Verganti et al., 2020
Spacemaker	for spatial design	طراحی فرم و چیدمان فضایی	پارامتر سایت	پیشنهادهای فرم و چیدمان	بهینه‌سازی فضایی	محدود به پارامترها	Vardhan, 2020; Emaminejad et al., 2022
Autodesk Generative Design	Generative	خلق فرم و پلان	محدودیت‌ها و الزامات	گزینه‌های طراحی	تحلیل سریع گزینه‌ها	محدودیت در خلاقیت آزاد	Amer,2023
Stable Diffusion	Generative / Diffusion Model	تولید کانسپت‌های بصری، الهام برای طراحی، خلق ایده‌های اولیه هنری، طراحی کاراکتر، فضا و محصول	متن، تصویر، ناحیه انتخابی (ماسک) و تنظیمات عددی	تصاویر دیجیتال با کیفیت بالا در سبک‌های متنوع، از جمله واقع‌گرایانه، هنری، فانتزی و پویانمایی ژاپنی (انیمه)	متن‌باز بودن، قابلیت اجرا به‌صورت آفلاین، کنترل دقیق روی خروجی، امکان شخصی‌سازی مدل، هزینه کم نسبت به رقبا	نیاز به سخت‌افزار مناسب، وابستگی کیفیت به مهارت پرامپت نویسی، چالش‌های حقوقی در استفاده تجاری	Richharia, M., & Gupta, A. 2025

امتیاز ۸۰ درصد، بالاترین امتیاز را به دست آورد و در مجموع، در تولید گزینه‌های متنوع و الهام‌بخش که با ایده اصلی پرامپت همخوانی داشتند، عملکرد مطلوبی نشان داد. در مقابل، «دال ای ۲» در معیار «انطباق با پرامپت» با امتیاز ۶۵ درصد، پایین‌ترین عملکرد را در میان سه ابزار داشت. بررسی خروجی‌ها نشان داد که همه مؤلفه‌های مورد درخواست در پرامپت به‌طور کامل در تصاویر تولیدشده بازنمایی نشده‌اند. بااین‌حال، «دال ای ۲» در معیار «واقع‌گرایی» با کسب امتیاز



	Midjourney	DALL-E۲	Stable Diffusion
انطباق با پرامپت	۸۱.۸۷	۶۵	۷۰
نوآوری	۷۵	۶۷.۵	۷۹.۳۵
تنوع	۸۰	۶۵	۷۰
الهام‌بخشی	۸۰	۶۵	۷۷.۵
بسط ایده	۶۷.۵	۶۵	۷۲.۵
کیفیت ایده	۶۷.۵	۶۰	۷۵
کیفیت بصری	۶۰	۶۲.۵	۷۰
واقع‌گرایی	۷۲.۵	۷۷.۵	۶۰
قابلیت استفاده در ایده‌پردازی	۷۰	۶۵.۶۲	۷۰

نمودار ۱. نتایج آزمایش مرحله اول: ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری
با استفاده از ورودی‌های صرفا متن بر مبنای ۹ معیار. تدوین: نگارندگان.

۷۷.۵ درصد، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داد و از این نظر، خروجی‌هایی با ظاهر واقع‌گرایانه‌تری نسبت به دو ابزار دیگر تولید کرد. «استیبل دیفیوژن» در معیار «نوآوری» با امتیاز ۷۹.۳۵ درصد، بالاترین عملکرد را در میان سه ابزار نشان داد. اگرچه این ابزار در معیار «انطباق با پرامپت» با امتیاز ۷۰ درصد در رتبه دوم قرار گرفت و همه مؤلفه‌های موردنظر

در پرامپت را در خروجی‌ها بازنمایی نکرد، در معیار «کیفیت ایده» با امتیاز ۷۳.۷۵ درصد عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دو ابزار دیگر داشت. همچنین، در معیار «کیفیت بصری» با امتیاز ۷۰ درصد، در مقایسه با دو ابزار دیگر عملکرد بالاتری نشان داد. در ارزیابی کلی این مرحله، میانگین امتیاز ۹ معیار نشان داد که «میدجرنی» با ۷۲.۷۰ درصد، «استیبل دیفیوژن» با ۷۱.۵۹ درصد و «دال ای ۲» با ۵۸.۶۸ درصد به‌ترتیب بالاترین عملکرد کلی را داشتند. بنابراین، در شرایط استفاده از ورودی صرفاً متنی، «میدجرنی» در مجموع عملکرد مطلوب‌تری داشت، در حالی که«استیبل دیفیوژن» در کیفیت ایده و نوآوری و «دال ای ۲» در واقع‌گرایی مزیت نسبی نشان داد.

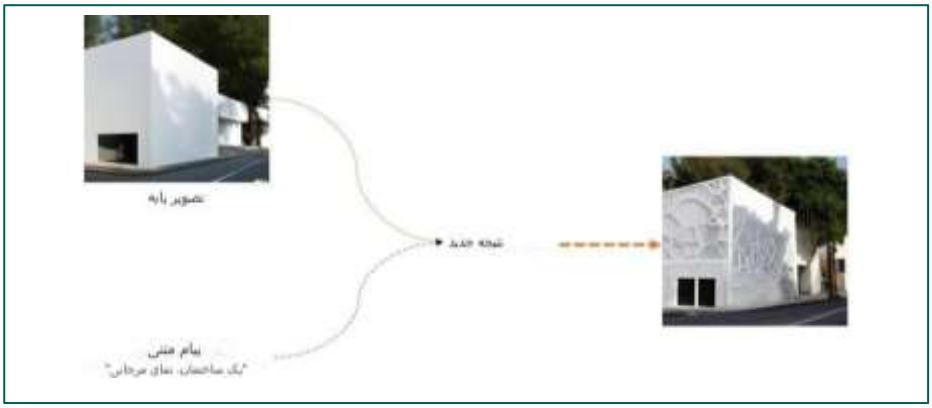
جدول ۵. نمونه‌ای از جداول ارزیابی و مقایسه طرح‌های تولید شده توسط ابزارهای هوش مصنوعی از پرامپت "یک برج بلند در بیابان با نمای مرجانی مغزی و گل اسطوخودوس به سبک آنتونی گائودی. تدوین: نگارندگان.

ابزارهای هوش مصنوعی منتخب	طرح‌های تولید شده با استفاده از پرامپت مشترک (آزمایش مرحله اول: متن ← تصویر)	معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری[11]							
		انطباق با پرامپت	نوآوری	تنوع	الهام‌بخشی	بسط ایده	کیفیت ایده	کیفیت بصری	واقع‌گرایی	قابلیت استفاده در ایده‌دا...
Midjourney		۴	۳.۵	۴	۴	۳	۳	۲	۳	۳
DALL-E2		۴	۴.۵	۴	۴.۵	۴	۳.۵	۳.۵	۳.۵	۳.۱۲
Stable Diffusion		۳	۴.۸۷	۴	۴.۵	۴	۴	۳	۳	۳.۵

۲.۲. آزمایش دوم: تولید ایده با استفاده هم‌زمان از ورودی متنی و تصویری

در مرحله دوم، با توجه به استفاده هم‌زمان از تصویر پایه و دستور متنی، علاوه بر معیارهای عمومی مرحله نخست، «قابلیت ابزارها در حفظ و تفسیر اطلاعات تصویری و اعمال تغییرات موردنظر و ایجاد ظرفیت برای تولید گزینه‌های بعدی» نیز ارزیابی شد. بر این اساس، در مجموع ۴ معیارِ «وفاداری به تصویر پایه، هماهنگی متن و تصویر، تغییر هدفمند و قابلیت توسعه ایده» به مجموعه معیارهای این مرحله افزوده شدند. بطوریکه ۲ بُعد تکمیلی نیز علاوه بر ۵ بُعد مورد استفاده در آزمایش اول اهمیت پیدا می‌کنند: نخست، تلفیق ورودی‌ها که توانایی ابزار در حفظ و ترکیب اطلاعات تصویری و متنی را نشان می‌دهد؛ و دوم، کنترل و توسعه طراحی که به توانایی ابزار در اعمال تغییرات هدفمند بر تصویر پایه، بدون ایجاد تغییرات نامرتبط یا از دست رفتن ویژگی‌های اصلی اشاره دارد و توسعه طراحی که به فراهم‌کردن زمینه برای ادامه فرآیند ایده‌پردازی مربوط است. در ادامه عملکرد سه ابزار در شرایط استفاده هم‌زمان از ورودی متنی و تصویری بررسی شد. در این آزمایش، یک تصویر ساده از ساختمان به‌عنوان تصویر پایه برای هر سه ابزار و در چهار نوبت مورد

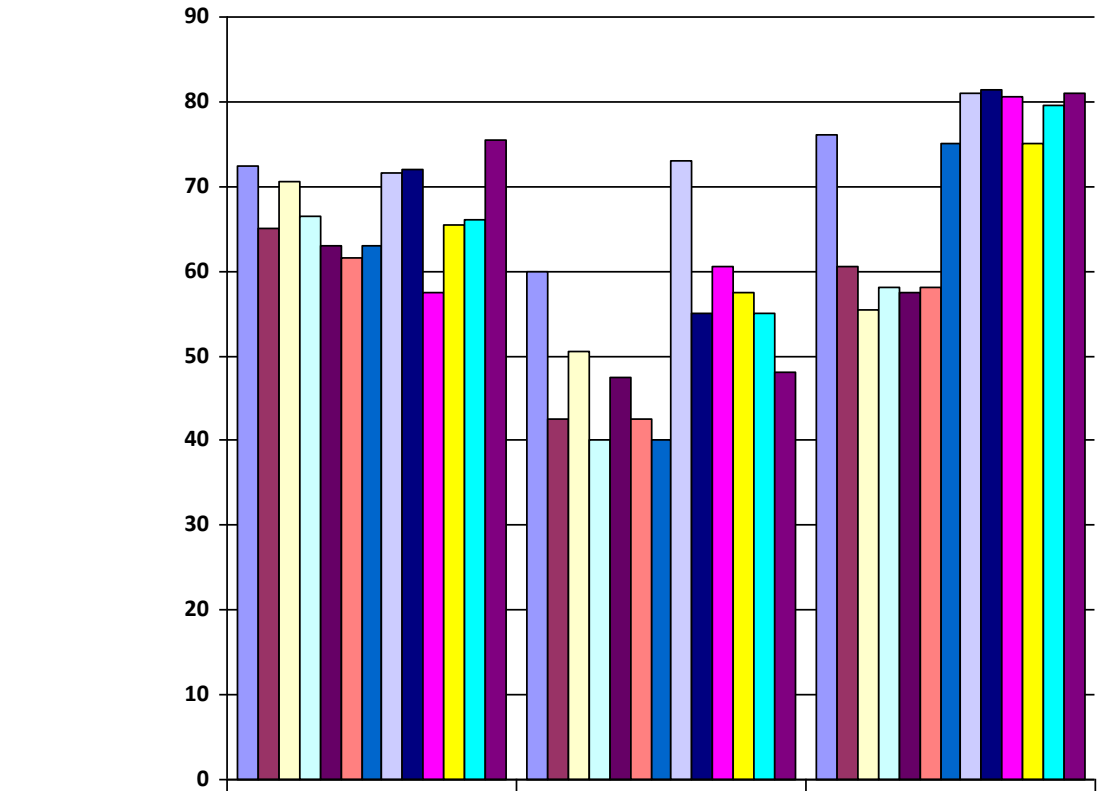
استفاده قرار گرفت (شکل ۱). هدف این مرحله، بررسی توانایی ابزارها در تولید و توسعه گزینه‌های طراحی بر اساس ترکیب یک تصویر مرجع با توصیف متنی بود. در این مرحله، علاوه بر ۹ معیار آزمایش نخست، چهار معیار «وفاداری به تصویر پایه»، «هماهنگی متن و تصویر»، «تغییر هدفمند» و «قابلیت توسعه ایده» نیز مورد ارزیابی قرار گرفت؛ بنابراین، مجموعاً ۱۳ معیار برای ارزیابی خروجی‌ها در نظر گرفته شد. نتایج این مرحله (جدول ۶ و نمودارهای ۲ و ۳) نشان داد که«میدجرنی» در بُعد «خلاقیت» بالاترین عملکرد را داشت. میانگین امتیاز این ابزار در سه معیار «نوآوری»، «تنوع» و «الهام‌بخشی» برابر با ۶۷.۳۳ درصد بود. همچنین،«میدجرنی» در بُعد «کیفیت ایده» و در دو معیار «کیفیت ایده» و «بسط ایده»، با میانگین امتیاز ۶۲.۲۵ درصد، عملکرد بالاتری نسبت به دو ابزار دیگر نشان داد. «دال ای ۲» در این



شکل ۱. نمونه‌ای از طرح‌های تولید شده با Stable Diffusion با استفاده توامان از متن و تصویر به‌عنوان ورودی. تدوین: نگارندگان.

جدول ۶. نمونه‌ای از جداول ارزیابی و مقایسه طرح‌های تولید شده توسط ابزارهای هوش مصنوعی از پرامپت "یک ساختمان به سبک آنتونی گادی" بر روی تصویر پایه. تدوین: نگارندگان.

ابزارهای هوش مصنوعی منتخب	طرح‌های تولید شده با استفاده از پرامپت مشترک (آزمایش مرحله دوم: متن+ تصویر پایه ← تصویر)	معیارهای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری												
		انطباق با پرامپت	نوآوری	تنوع	الهام‌بخشی	بسط ایده	کیفیت ایده	کیفیت بصری	واقع‌گرایی	قابلیت استفاده در ایده‌پردازی	وفاداری به تصویر پایه	هماهنگی متن و تصویر	تغییر هدفمند	قابلیت توسعه ایده
Midjourney		۳	۲.۵	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۳
DALL-E2		۳.۵	۲	۲.۵	۲	۳	۲	۲	۳.۵	۲	۴	۳	۲.۵	۲
Stable Diffusion		۴.۱	۴	۳.۵	۴	۳.۵	۴	۴	۴.۱	۴.۸	۴	۴	۴.۸	۴.۸



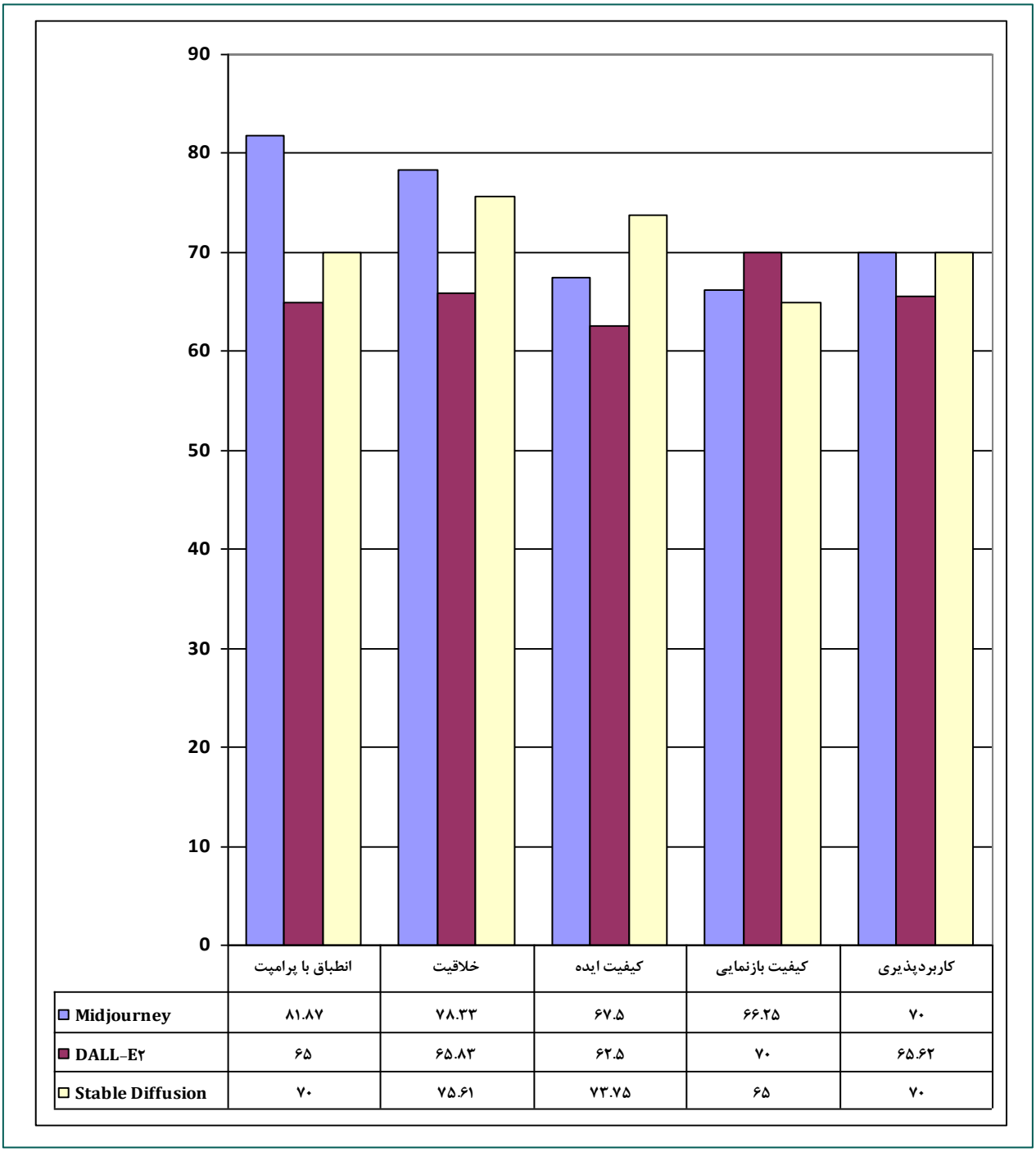
	Midjourney	DALL-E۲	Stable Diffusion
انطباق با پرامپت	۷۲.۵	۶۰	۷۶
نوآوری	۶۵	۴۲.۵	۶۰.۵
تنوع	۷۰.۵	۵۰.۵	۵۵.۵
الهام‌بخشی	۶۶.۵	۴۰	۵۸
بسط ایده	۶۳	۴۷.۵	۵۷.۵
کیفیت ایده	۶۱.۵	۴۲.۵	۵۸
کیفیت بصری	۶۳	۴۰	۷۵
واقع‌گرایی	۷۱.۵	۷۳	۸۱
قابلیت استفاده در ایده‌پردازی	۷۲	۵۵	۸۱.۵
وفاداری به تصویر پایه	۵۷.۵	۶۰.۵	۸۰.۵
هماهنگی متن و تصویر	۶۵.۵	۵۷.۵	۷۵
تغییر هدفمند	۶۶	۵۵	۷۹.۵
قابلیت توسعه ایده	۷۵.۵	۴۸	۸۱

نمودار ۲. نتایج نهایی ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری با استفاده از ورودی‌های صرفا متن بر مبنای۱۳ معیار. تدوین: نگارندگان.

مرحله توانست تصویر مرجع را به‌عنوان مبنای خروجی‌های تولیدشده حفظ کند؛ بااین‌حال، در معیار «انطباق با پرامپت» با کسب امت یاز ۶۰ درصد، پایین‌ترین عملکرد را داشت. در خروجی‌های این ابز ار، تمامی مؤلفه‌های موردنظر در متن پرامپت به‌طور کامل بازنمایی نشدند. همچنین، «دال ای ۲» در بُعد «خلاقیت» با میانگین امتیاز ۴۴.۳۳ درصد، در مقایسه با دو ابزار دیگر عملکرد پایین‌تری داشت. در سایر معیارها نیز، به‌جز «واقع‌گرایی»، برتری محسوسی نسبت به دو ابزار

دیگر مشاهده نشد .در مقابل، «استیبل دیفیوژن» در معیار «انطباق با پرامپت» با کسب امتیاز ۷۶ درصد، بالاترین عملکرد را نشان داد و در حفظ تصویر مرجع نیز عملکرد مطلوبی داشت.

این ابزار همچنین در بُعد «کیفیت بازنمایی»، شامل معیارهای «کیفیت بصری» و «واقع‌گرایی»، بالاترین عملکرد را به دست آورد. افزون بر این، در بُعد «کاربردپذیری» و معیار «قابلیت استفاده در ایده‌پردازی»، در بُعد «تلفیق ورودی‌های چندوجهی» و دو معیار «وفاداری به تصویر پایه» و «هماهنگی متن و تصویر»، و نیز در بُعد «کنترل و توسعه طراحی» و دو معیار «تغییر هدفمند» و «قابلیت توسعه ایده»، عملکرد بالاتری نسبت به دو ابزار دیگر داشت.

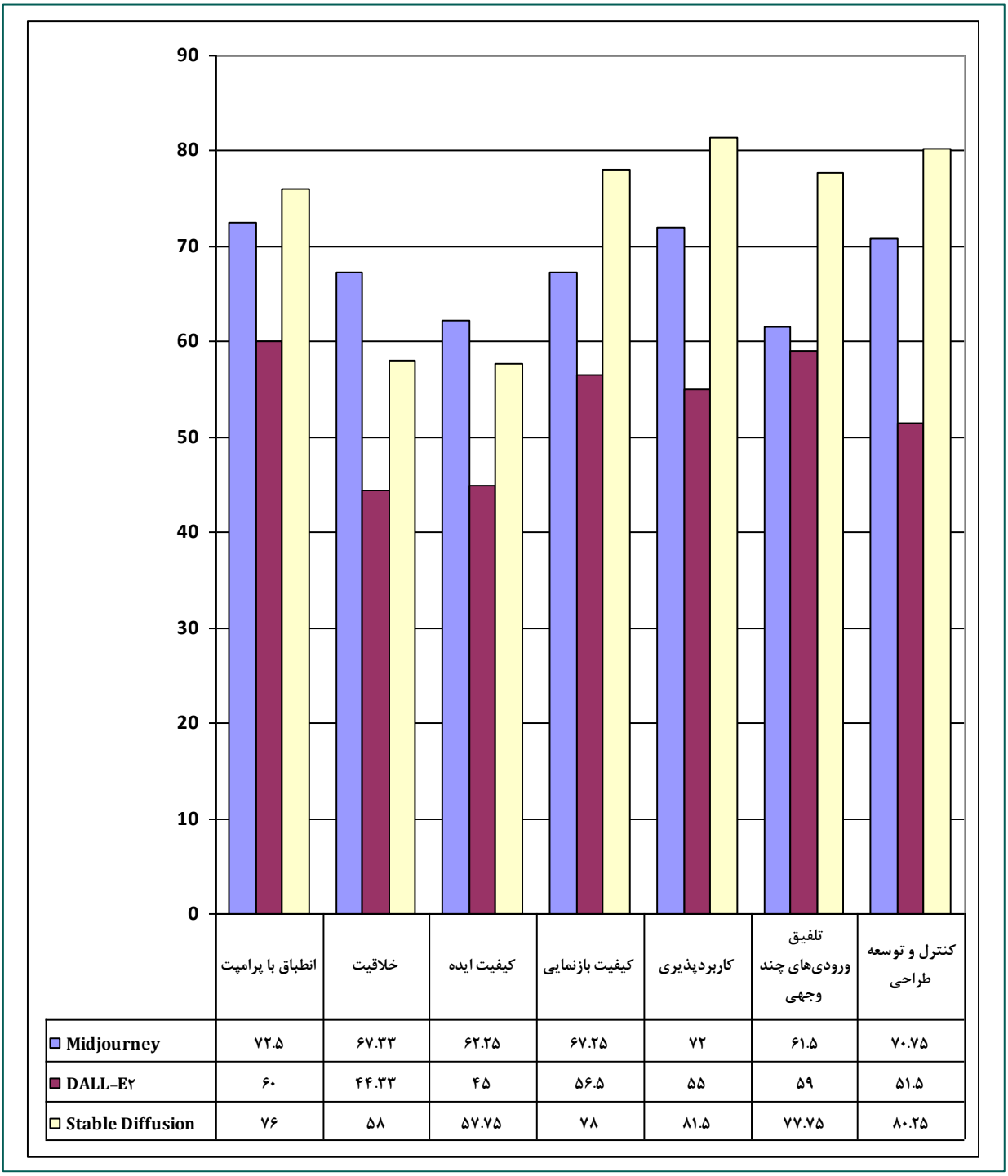


	انطباق با پرامپت	خلاقیت	کیفیت ایده	کیفیت بازنمایی	کاربردپذیری
Midjourney	۸۱.۸۷	۷۸.۳۳	۶۷.۵	۶۶.۲۵	۷۰
DALL-E۲	۶۵	۶۵.۸۳	۶۲.۵	۷۰	۶۵.۶۲
Stable Diffusion	۷۰	۷۵.۶۱	۷۳.۷۵	۶۵	۷۰

نمودار ۳. نتایج نهایی ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری با استفاده از ورودی‌های صرفا متن بر مبنای۵ بُعد. تدوین: نگارندگان.

۲.۳. مقایسه عملکرد ابزارها بر مبنای ابعاد و معیارهای ارزیابی

مقایسه عملکرد سه ابزار در شرایط استفاده از ورودی‌های صرفاً متنی نشان داد که الگوی عملکرد آن‌ها در ابعاد مختلف یکسان نبود (نمودار ۳). «میدجرنی» در ابعاد «انطباق با ورودی» و «خلاقیت» عملکرد برتری داشت. «دال ای ۲» در بُعد «کیفیت بازنمایی» و از نظر کیفیت بصری و واقع‌گرایی خروجی‌ها، نتایج مطلوب‌تری ارائه کرد. «استیبل دیفیوژن»



	انطباق با پرامپت	خلاقیت	کیفیت ایده	کیفیت بازنمایی	کاربردپذیری	تلفیق ورودی‌های چند وجهی	کنترل و توسعه طراحی
Midjourney	۷۲.۵	۶۷.۳۳	۶۲.۲۵	۶۷.۲۵	۷۲	۶۱.۵	۷۰.۷۵
DALL-E۲	۶۰	۴۴.۳۳	۴۵	۵۶.۵	۵۵	۵۹	۵۱.۵
Stable Diffusion	۷۶	۵۸	۵۷.۷۵	۷۸	۸۱.۵	۷۷.۷۵	۸۰.۲۵

نمودار ۴. نتایج نهایی ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی فرآیند طراحی معماری از ترکیب ورودی متنی و تصویری بر مبنای۷ بُعد. تدوین: نگارندگان.

نیز در بُعد «کیفیت ایده» عملکرد بالاتری نسبت به دو ابزار دیگر نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که در شرایط استفاده از ورودی متنی، هیچ‌یک از ابزارها در تمامی ابعاد مورد ارزیابی عملکرد برتر نداشتند و نقاط قوت آن‌ها به ابعاد مشخصی از فرآیند تولید ایده محدود بود. در آزمایش دوم، که بر استفاده هم‌زمان از ورودی متنی و تصویری متمرکز بود، تفاوت عملکرد ابزارها در هفت بُعد ارزیابی آشکارتر شد (نمودار ۴). «میدجرنی» در دو بُعد «خلاقیت» و «کیفیت ایده» بالاترین عملکرد را به خود اختصاص داد. «دال ای ۲» در هیچ‌یک از هفت بُعد ارزیابی‌شده، عملکرد برتر نسبت به دو ابزار دیگر نداشت. در مقابل، «استیبل دیفیوژن» در پنج بُعد «انطباق با ورودی»، «کیفیت بازنمایی»، «کاربردپذیری»، «تلفیق ورودی‌های چندوجهی» و «کنترل و توسعه طراحی» بالاترین عملکرد را نشان داد.

در مجموع، مقایسه نتایج دو آزمایش و هشت نوبت ارزیابی نشان داد که عملکرد ابزارهای مورد بررسی به نوع ورودی و بُعد مورد ارزیابی وابسته است. در شرایط استفاده از ورودی صرفاً متنی، «میدجرنی» در بیشترین تعداد از ابعاد مورد بررسی عملکرد برتر داشت، در حالی که «استیبل دیفیوژن» در «کیفیت ایده» و «دال ای ۲» در «کیفیت بازنمایی» عملکرد مطلوب‌تری نشان دادند. در مقابل، با افزودن ورودی تصویری به پرامپت متنی، الگوی عملکرد ابزارها تغییر کرد؛ به‌گونه‌ای که «استیبل دیفیوژن» در پنج بُعد از هفت بُعد ارزیابی عملکرد برتر داشت و «میدجرنی» در دو بُعد «خلاقیت» و «کیفیت ایده» بالاترین عملکرد را نشان داد. بر این اساس، یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی طراحی معماری را نمی‌توان مستقل از نوع ورودی و هدف طراحی ارزیابی کرد.

«میدجرنی» به‌ویژه در تولید و توسعه ایده‌های خلاقانه و متنوع، خصوصاً در شرایط استفاده از ورودی متنی، عملکرد متمایزی داشت؛ در حالی که «استیبل دیفیوژن» در شرایط استفاده هم‌زمان از ورودی‌های متنی و تصویری، به‌ویژه در حفظ و تلفیق اطلاعات ورودی، کنترل تغییرات و توسعه گزینه‌های طراحی، عملکرد برتری نشان داد .«دال ای ۲» نیز اگرچه در مجموع امتیاز پایین‌تری نسبت به دو ابزار دیگر داشت، در تولید خروجی‌های واقع‌گرایانه، به‌ویژه در شرایط استفاده از ورودی متنی، مزیت نسبی خود را حفظ کرد.

بحث

پژوهش حاضر با هدف شناسایی معیارهای مناسب برای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری و مقایسه عملکرد سه ابزار «میدجرنی، دال–ای۲ و استیبل دیفیوژن» در شرایط ورودی مشابه انجام شد. نتایج حاصل از فراترکیب مطالعات پیشین و دو مرحله آزمایش تجربی در طی هشت نوبت نشان داد که ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی مولد در ایده‌پردازی معماری را نمی‌توان صرفاً بر اساس کیفیت بصری تصاویر تولیدشده انجام داد؛ بلکه عملکرد این ابزارها ماهیتی چندبُعدی دارد و ارزیابی آن مستلزم توجه هم‌زمان به ابعادی همچون «انطباق با ورودی، خلاقیت، کیفیت ایده، کیفیت بازنمایی و کاربردپذیری» است. همچنین، هنگامی که تصویر پایه در کنار متن به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود، ابعادی همانند «قابلیت ابزار در حفظ و تلفیق اطلاعات متنی و تصویری، اعمال تغییرات هدفمند و فراهم‌کردن امکان توسعه طراحی» اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این یافته با مطالعاتی که بر ضرورت ارزیابی چندبُعدی خروجی‌های هوش مصنوعی و وابستگی عملکرد ابزار به نوع ورودی و هدف طراحی تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد(Paananen et al., 2024; Vissers-Similon et al., 2025; Horvath & Pouliou, 2024).

یافته‌های مربوط به سؤال نخست پژوهش نشان داد که پنج بُعد «انطباق با ورودی»، «خلاقیت»، «کیفیت ایده»، «کیفیت بازنمایی» و «کاربردپذیری» می‌توانند چارچوب مناسبی برای ارزیابی ابزارهای هوش مصنوعی در شرایط استفاده از ورودی صرفاً متنی فراهم کنند. در شرایط استفاده هم‌زمان از متن و تصویر نیز دو بُعد «تلفیق ورودی‌های چندوجهی» و «کنترل و توسعه طراحی» به این چارچوب افزوده شدند. اهمیت این یافته در آن است که یک ابزار ممکن است از نظر

تولید تصاویر باکیفیت عملکرد مطلوبی داشته باشد، اما در تفسیر دقیق دستور طراحی، تولید ایده‌های متنوع یا فراهم‌کردن امکان توسعه ایده عملکرد ضعیف‌تری نشان دهد. ازاین‌رو، «کیفیت تصویر» را نمی‌توان معادل «کیفیت عملکرد در ایده‌پردازی معماری» دانست. این تمایز با یافته‌های ژانگ و همکاران (Zhang et al. , 2023) نیز همخوان است که نشان می‌دهد خروجی‌های هوش مصنوعی می‌توانند در ابعادی مانند «جذابیت، خلاقیت، اصالت و هماهنگی» عملکردهای متفاوتی داشته باشند.

در آزمایش نخست، که با استفاده از ورودی‌های صرفاً متنی انجام شد، میدجرنی بالاترین میانگین عملکرد کلی را به دست آورد. بااین‌حال، بررسی نتایج در سطح ابعاد نشان داد که این برتری کلی به معنای برتری مطلق این ابزار در تمامی جنبه‌ها نیست. میدجرنی در «انطباق با ورودی» و «خلاقیت» عملکرد مطلوب‌تری داشت. این ویژگی نشان می‌دهد که این ابزار در تبدیل توصیف متنی به بازنمایی تصویری و همچنین ایجاد گزینه‌هایی متنوع و الهام‌بخش، ظرفیت بیشتری برای مرحله ایده‌پردازی دارد. در مرحله‌ای از طراحی که هدف اصلی آن گسترش فضای جست‌وجوی ایده و مواجهه با گزینه‌های متفاوت است، چنین قابلیتی می‌تواند ارزش عملی قابل‌توجهی داشته باشد. این نتیجه با یافته‌های پنانن و همکاران (Paananen et al. , 2024) درباره ظرفیت ابزارهای مولد تصویر برای ایجاد ایده‌های غیرمنتظره و تقویت رویکرد اکتشافی در مراحل اولیه طراحی همخوانی دارد. در مقابل، استیبل دیفیوژن در بُعد «کیفیت ایده» عملکرد مطلوب‌تری نشان داد. این نتیجه بیانگر آن است که انطباق بیشتر با پرامپت الزاماً به تولید ایده معماری مطلوب‌تر منجر نمی‌شود. یک ابزار ممکن است همه عناصر ذکرشده در متن ورودی را بازنمایی نکند، اما ترکیب ویژگی‌های فرمی، فضایی و بصری حاصل از آن می‌تواند از دیدگاه ارزیابان ارزش ایده‌ای بیشتری داشته باشد. بنابراین، میان «وفاداری به دستور» و «ارزش طراحی» می‌توان تمایز قائل شد. این موضوع یکی از یافته‌های مهم پژوهش حاضر است؛ زیرا نشان می‌دهد ارزیابی ابزارهای هوش مصنوعی در ایده‌پردازی معماری مستلزم فراتر رفتن از سنجش میزان اجرای دستور و توجه هم‌زمان به قابلیت خروجی در شکل‌دهی به یک مفهوم معماریِ قابل‌توسعه است. همچنین، در بُعد «کاربردپذیری»، میدجرنی و استیبل دیفیوژن رتبه برابر داشتند. این نتیجه نشان می‌دهد که هر دو ابزار، علی‌رغم تفاوت در برخی قابلیت‌های دیگر، ظرفیت مشابهی برای استفاده از خروجی به‌عنوان محرک، مرجع یا نقطه شروع توسعه ایده معماری دارند. بنابراین، در این بُعد نمی‌توان یکی از دو ابزار را بر دیگری ترجیح داد. این یافته همچنین نشان می‌دهد که کاربردپذیری یک خروجی را نمی‌توان صرفاً بر اساس کیفیت بصری یا میزان انطباق آن با پرامپت پیش‌بینی کرد؛ بلکه ارزش آن در فرآیند طراحی به قابلیت تفسیر و توسعه آن توسط طراح نیز وابسته است. دال–ای۲ در مقابل، در بُعد «کیفیت بازنمایی» عملکرد مطلوب‌تری داشت و به‌ویژه در مؤلفه واقع‌گرایی نتایج بهتری ارائه کرد. این یافته نشان می‌دهد که نقطه قوت این ابزار بیشتر در کیفیت و باورپذیری بازنمایی تصویری نمود پیدا می‌کند تا در مجموعه قابلیت‌های مورد نیاز برای ایده‌پردازی. ازاین‌رو، اگر هدف طراح ارائه یک بازنمایی بصری واقع‌گرایانه از یک مفهوم اولیه باشد، دال–ای۲ می‌تواند کاربرد مناسبی داشته باشد؛ اما بر اساس نتایج این پژوهش، نمی‌توان آن را به‌عنوان ابزار برتر برای کلیت فرآیند ایده‌پردازی معرفی کرد.

نتایج آزمایش دوم، که در آن تصویر پایه همراه با دستور متنی به‌عنوان ورودی استفاده شد، الگوی متفاوتی را نشان داد. در این شرایط، میدجرنی در دو بُعد «خلاقیت» و «کیفیت ایده» عملکرد برتری داشت، در حالی که استیبل دیفیوژن در پنج بُعد «انطباق با ورودی»، «کیفیت بازنمایی»، «کاربردپذیری»، «تلفیق ورودی‌های چندوجهی» و «کنترل و توسعه طراحی» عملکرد بالاتری نشان داد. دال–ای۲ نیز در هیچ‌یک از ابعاد مورد بررسی عملکرد برتر نداشت. این تغییر در الگوی عملکرد نشان می‌دهد که نوع ورودی می‌تواند جایگاه نسبی ابزارها را در فرآیند ایده‌پردازی تغییر دهد. به عبارت دیگر، ابزاری که در تولید ایده از متن عملکرد مناسبی دارد، لزوماً در شرایطی که باید یک تصویر موجود را حفظ، تفسیر و توسعه دهد، همان میزان کارایی را نشان نمی‌دهد.

برتری استیبل دیفیوژن در ابعاد مرتبط با تلفیق ورودی‌ها و کنترل و توسعه طراحی، از منظر کاربرد معماری اهمیت ویژه‌ای دارد. در بسیاری از فرآیندهای واقعی طراحی، معمار از یک اسکیس، تصویر، مدل یا گزینه اولیه آغاز می‌کند و سپس در چند مرحله به اصلاح و توسعه آن می‌پردازد. بنابراین، قابلیت حفظ ساختار اصلی، ترکیب اطلاعات جدید با ویژگی‌های موجود و اعمال تغییرات هدفمند، برای استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان بخشی از فرآیند طراحی اهمیت زیادی دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استیبل دیفیوژن در این نوع تعامل، نسبت به دو ابزار دیگر ظرفیت بیشتری از خود نشان داده است. ازاین‌رو، مزیت این ابزار در آزمایش دوم را می‌توان بیشتر در پشتیبانی از فرآیند توسعه و کنترل ایده دانست تا صرفاً تولید یک تصویر جدید. در مقابل، عملکرد میدجرنی در «خلاقیت» و «کیفیت ایده» در آزمایش دوم نشان داد که این ابزار حتی در شرایطی که یک تصویر پایه در اختیار آن قرار می‌گیرد، همچنان توانایی قابل‌توجهی در ایجاد تغییرات مفهومی و تولید گزینه‌های متفاوت دارد. بنابراین، تفاوت میان دو ابزار را می‌توان تا حدی به نوع نقش آن‌ها در فرآیند ایده‌پردازی مرتبط دانست: میدجرنی ظرفیت بیشتری برای گسترش فضای ایده و تولید گزینه‌های خلاقانه نشان داد، در حالی که استیبل دیفیوژن در حفظ، اصلاح، کنترل و توسعه گزینه موجود عملکرد متمایزی داشت.

مقایسه دو آزمایش در مجموع نشان داد که نمی‌توان یک ابزار هوش مصنوعی را بدون توجه به نوع ورودی و هدف طراحی، به‌عنوان بهترین گزینه معرفی کرد. در شرایط استفاده از متن، میدجرنی از نظر عملکرد کلی در جایگاه بالاتری قرار گرفت؛ اما استیبل دیفیوژن در کیفیت ایده عملکرد مطلوب‌تری داشت و دو ابزار میدجرنی و استیبل دیفیوژن در کاربردپذیری رتبه برابر کسب کردند. در شرایط استفاده هم‌زمان از متن و تصویر نیز استیبل دیفیوژن در پنج بُعد از هفت بُعد عملکرد برتر بود، در حالی که میدجرنی در ابعاد خلاقیت و کیفیت ایده عملکرد مطلوب‌تری ارائه کرد. بر این اساس، یافته‌های پژوهش از رویکردی وظیفه‌محور در انتخاب ابزارهای هوش مصنوعی حمایت می‌کند؛ به این معنا که انتخاب ابزار مناسب را می‌توان متناسب با هدف طراحی، نوع ورودی و نوع تعامل مورد انتظار انجام داد، نه صرفاً بر مبنای یک رتبه‌بندی کلی. از دیدگاه نظری، این یافته‌ها تمایز میان «توانایی تولید تصویر» و «توانایی پشتیبانی از ایده‌پردازی معماری» را برجسته می‌کند. ابزار هوش مصنوعی زمانی در مرحله ایده‌پردازی ارزشمند است که خروجی آن علاوه بر کیفیت بصری، با مسئله طراحی ارتباط داشته باشد، امکان تولید و مقایسه گزینه‌های متفاوت را فراهم کند، موجب شکل‌گیری مسیرهای جدید برای تفکر طراحی شود و قابلیت توسعه در مراحل بعدی را داشته باشد. بنابراین، هوش مصنوعی مولد را می‌توان در این مرحله نه صرفاً به‌عنوان ابزار بازنمایی، بلکه به‌عنوان ابزار اکتشاف و پشتیبانی از فرآیند طراحی در نظر گرفت. بااین‌حال، این نقش به معنای جایگزینی معمار نیست؛ زیرا انتخاب، تفسیر، ارزیابی و توسعه خروجی همچنان به قضاوت و دانش حرفه‌ای طراح وابسته است. این نتیجه با تأکید مطالعات پیشین بر ضرورت حفظ نقش فعال طراح در تعامل با ابزارهای مولد همسو است(Paananen et al., 2024; Vissers-Similon et al., 2025).

از منظر کاربردی، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در صورت هدف‌گذاری برای تولید سریع و گسترش گزینه‌های خلاقانه از یک توصیف متنی، میدجرنی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. در مقابل، هنگامی که طراح دارای یک تصویر پایه، اسکیس یا گزینه اولیه است و هدف او اصلاح، کنترل و توسعه آن بر اساس دستورات متنی است، استیبل دیفیوژن به دلیل عملکرد بهتر در تلفیق ورودی‌ها و کنترل و توسعه طراحی، گزینه مناسب‌تری به نظر می‌رسد. دال–ای۲ نیز در شرایطی که کیفیت بازنمایی و واقع‌گرایی تصویر اهمیت بیشتری دارد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه، یافته‌های پژوهش به جای پیشنهاد جایگزینی یک ابزار با ابزار دیگر، امکان تقسیم نقش میان ابزارهای مختلف در یک فرآیند ایده‌پردازی ترکیبی را مطرح می‌کند.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای کنترل شرایط آزمایش، شایسته است نتایج پژوهش با توجه به برخی محدودیت‌ها تفسیر شوند. نخست، ارزیابی خروجی‌ها بر اساس قضاوت خبرگان انجام شده است و ازاین‌رو، بخشی از نتایج ماهیتی ادراکی دارد. اگرچه استفاده از هشت نفر از استادان دارای تجربه در زمینه ابزارهای هوش مصنوعی، به تناسب ارزیابی‌ها با موضوع پژوهش کمک کرده است، افزایش تعداد ارزیابان و تنوع‌بخشی به جامعه ارزیابان در مطالعات آینده می‌تواند قابلیت تعمیم نتایج را افزایش دهد. دوم، پژوهش حاضر تنها سه ابزار هوش مصنوعی را بررسی کرده است و ازاین‌رو، نتایج آن قابلیت تعمیم مستقیم به سایر ابزارهای هوش مصنوعی مولد را ندارد. تفاوت در معماری مدل‌ها، داده‌های آموزشی، تنظیمات تولید، رابط کاربری و قابلیت‌های هر سامانه می‌تواند به تفاوت در نتایج منجر شود. سوم، اگرچه ورودی‌های مورد استفاده برای ابزارها تا حد امکان به‌صورت یکسان و کنترل‌شده انتخاب شدند، تفاوت‌های ذاتی در نحوه تفسیر پرامپت و پردازش اطلاعات توسط هر ابزار را نمی‌توان به‌طور کامل حذف کرد. بنابراین، یافته‌های پژوهش مناسب است در چارچوب شرایط آزمایشی تعریف‌شده و به‌عنوان مقایسه‌ای میان عملکرد ابزارهای مورد بررسی تفسیر شوند. چهارم، تمرکز پژوهش بر مرحله ایده‌پردازی و ارزیابی ویژگی‌های ایده و بازنمایی بوده است؛ بنابراین معیارهایی مانند امکان ساخت، عملکرد سازه‌ای، مصرف انرژی، هزینه، ضوابط شهری و الزامات فنی در ارزیابی وارد نشده‌اند. در نتیجه، مطلوبیت یک خروجی از منظر این پژوهش به معنای قابلیت ساخت یا اجرای مستقیم آن نیست. در نهایت، با توجه به سرعت بالای توسعه ابزارهای هوش مصنوعی مولد، نتایج به نسخه‌ها و قابلیت‌های ابزارها در زمان انجام آزمایش وابسته است و ممکن است به‌روزرسانی مدل‌ها در آینده بر عملکرد نسبی آن‌ها تأثیر بگذارد.

پیشنهادات

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده در چند مسیر ادامه یابد. نخست، چارچوب ارزیابی حاضر می‌تواند با افزودن معیارهایی مانند امکان‌پذیری ساخت، عملکرد محیطی، پایداری، تناسب با زمینه، عملکرد سازه‌ای و الزامات فنی توسعه یابد تا ارزیابی ابزارهای هوش مصنوعی از مرحله ایده‌پردازی به مراحل بعدی طراحی معماری نیز گسترش پیدا کند. دوم، پیشنهاد می‌شود ابزارهای بیشتر و نسخه‌های جدیدتر مدل‌های مولد تصویر در شرایط کنترل‌شده و با چارچوب ارزیابی مشابه بررسی شوند. این امر امکان تعیین میزان ثبات یا تغییر الگوی عملکرد ابزارها را در طول زمان فراهم می‌کند. سوم، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده به جای ارزیابی یک خروجی منفرد، فرآیند چندمرحله‌ای تعامل معمار و هوش مصنوعی بررسی شود. مطالعه زنجیره‌ای شامل تولید ایده، انتخاب، اصلاح، تولید مجدد و توسعه گزینه می‌تواند تصویر دقیق‌تری از نقش واقعی هوش مصنوعی در فرآیند طراحی ارائه کند. چهارم، بررسی تأثیر تجربه و مهارت کاربران در استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی و مهندسی پرامپت می‌تواند مشخص کند که چه میزان از تفاوت عملکرد مشاهده‌شده ناشی از قابلیت ابزار و چه میزان ناشی از نحوه تعامل کاربر با آن است. پنجم، پیشنهاد می‌شود ابزارهای مورد بررسی در پروژه‌ها و زمینه‌های معماری متنوع‌تر، از جمله ساختمان‌های مسکونی، آموزشی، فرهنگی و عمومی و در زمینه‌های اقلیمی و فرهنگی متفاوت آزمایش شوند تا میزان وابستگی عملکرد ابزارها به نوع مسئله و زمینه طراحی مشخص شود. ششم، با توجه به نتایج پژوهش، بررسی کاربرد ترکیبی ابزارها می‌تواند مسیر ارزشمندی برای تحقیقات آینده باشد. برای نمونه، می‌توان از میدجرنی برای تولید و گسترش گزینه‌های خلاقانه و از استیبل دیفیوژن برای اصلاح، کنترل و توسعه گزینه منتخب استفاده کرد. چنین رویکردی می‌تواند به جای جست‌وجوی یک ابزار واحد و برتر، امکان بهره‌گیری از قابلیت‌های مکمل چند ابزار را فراهم کند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده نقش معمار را در چرخه انسان-هوش مصنوعی به‌طور دقیق‌تر بررسی کنند و مشخص سازند که در چه نقاطی از فرآیند، قضاوت و مداخله انسانی بیشترین تأثیر را بر کیفیت نهایی طراحی دارد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی مولد در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری و با تمرکز بر نقش نوع ورودی در کیفیت و قابلیت استفاده از خروجی‌های تولیدشده انجام شد. در این راستا، ابتدا با استفاده از فراترکیب مطالعات پیشین، چارچوبی چندبُعدی برای ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی تدوین و سپس عملکرد سه ابزار منتخب «میدجرنی، دال-ای۲ و استیبل دیفیوژن» در شرایط ورودی کنترل‌شده و طی دو آزمایش در هشت نوبت، شامل ورودی صرفاً متنی و ترکیب ورودی متنی و تصویری، مورد بررسی تطبیقی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد ابزارهای مورد مطالعه را نمی‌توان با یک شاخص واحد یا صرفاً بر اساس کیفیت بصری تصاویر ارزیابی کرد؛ بلکه عملکرد آن‌ها تابعی از ابعاد مختلف ایده‌پردازی و همچنین نوع ورودی مورد استفاده است.

در پاسخ به نخستین سؤال پژوهش، یافته‌های فراترکیب نشان داد که ارزیابی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری نیازمند توجه هم‌زمان به ابعاد «انطباق با ورودی، خلاقیت، کیفیت ایده، کیفیت بازنمایی و کاربردپذیری» است. در شرایط استفاده از ورودی‌های چندوجهی نیز ابعاد «تلفیق ورودی‌های چندوجهی و کنترل و توسعه طراحی» اهمیت می‌یابند. بنابراین، نتیجه نظری مهم پژوهش آن است که «توانایی تولید تصویر» را نمی‌توان معادل «توانایی پشتیبانی از ایده‌پردازی معماری» در نظر گرفت. ارزش یک ابزار در مرحله ایده‌پردازی تنها به جذابیت یا واقع‌گرایی خروجی وابسته نیست، بلکه میزان ارتباط خروجی با مسئله طراحی، ظرفیت آن برای تولید و توسعه ایده، قابلیت بهره‌گیری از آن در ادامه فرآیند طراحی و میزان کنترل‌پذیری ابزار، از جمله مؤلفه‌هایی هستند که در ارزیابی ارزش آن در فرآیند ایده‌پردازی معماری اهمیت دارند.

در پاسخ به سؤال دوم پژوهش، نتایج آزمایش نخست نشان داد که در شرایط استفاده از ورودی صرفاً متنی، «میدجرنی» در مجموع عملکرد مطلوب‌تری داشت و به‌ویژه در ابعاد انطباق با ورودی و خلاقیت برتری نشان داد .«استیبل دیفیوژن» نیز در کیفیت ایده عملکرد مطلوبی داشت و «دال ای ۲» در کیفیت بازنمایی، به‌ویژه از نظر کیفیت بصری و واقع‌گرایی، مزیت نسبی نشان داد. با این حال، در بُعد کاربردپذیری، «میدجرنی» و «استیبل دیفیوژن» عملکرد برابر داشتند؛ بنابراین نمی‌توان یکی از این دو ابزار را در این بُعد برتر از دیگری معرفی کرد. این یافته نشان می‌دهد که در تعامل صرفاً متنی، انتخاب ابزار به هدف اصلی طراح وابسته است و نمی‌توان یک ابزار را بدون توجه به معیار موردنظر، به‌عنوان گزینه برتر مطلق معرفی کرد.

نتایج آزمایش دوم نیز نشان داد که با افزوده‌شدن تصویر پایه به ورودی متنی، الگوی عملکرد ابزارها تغییر می‌کند. در این شرایط، «میدجرنی» در ابعاد خلاقیت و کیفیت ایده عملکرد مطلوب‌تری داشت، در حالی که «استیبل دیفیوژن» در بخش عمده ابعاد مرتبط با تعامل چندوجهی، شامل انطباق با ورودی، کیفیت بازنمایی، کاربردپذیری، تلفیق ورودی‌های چندوجهی و کنترل و توسعه طراحی عملکرد برتری نشان داد. «دال ای ۲» نیز در این آزمایش در هیچ‌یک از ابعاد هفت‌گانه عملکرد برتر نسبت به دو ابزار دیگر نداشت. این تفاوت در الگوی عملکرد بیانگر آن است که افزودن تصویر به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی، صرفاً حجم اطلاعات ورودی را افزایش نمی‌دهد، بلکه ماهیت تعامل میان طراح و ابزار هوش مصنوعی را نیز تغییر می‌دهد و اهمیت قابلیت حفظ، تفسیر، ترکیب و اصلاح اطلاعات تصویری را افزایش می‌دهد.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که هیچ‌یک از ابزارهای بررسی‌شده را نمی‌توان به‌عنوان بهترین ابزار مطلق برای ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری معرفی کرد. برتری هر ابزار به نوع ورودی و هدف مورد انتظار از ایده‌پردازی

وابسته است. در شرایط استفاده از متن، «میدجرنی» به دلیل عملکرد مطلوب‌تر در انطباق با ورودی و تولید ایده‌های خلاقانه، گزینه مناسب‌تری برای اکتشاف و تولید اولیه ایده‌های معماری از توصیف‌های متنی است؛ در حالی که «استیبل دیفیوژن» به دلیل عملکرد مطلوب در کیفیت ایده و قابلیت استفاده در ایده‌پردازی، ظرفیت قابل توجهی برای توسعه این ایده‌ها دارد. در شرایط استفاده هم‌زمان از متن و تصویر، قابلیت «استیبل دیفیوژن» در حفظ و تلفیق اطلاعات ورودی و اعمال تغییرات هدفمند، آن را به گزینه مناسب‌تری برای توسعه و کنترل گزینه‌های طراحی بر مبنای یک تصویر پایه تبدیل می‌کند. در مقابل، «میدجرنی» همچنان در تولید گزینه‌های خلاقانه و توسعه کیفیت مفهومی ایده مزیت خود را حفظ می‌کند.

دستاورد پژوهش

مهم‌ترین دستاورد پژوهش حاضر، تبیین چندبُعدی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی مولد در مرحله ایده‌پردازی معماری و ارائه چارچوبی معیارمحور برای ارزیابی آن‌هاست. یافته‌ها نشان داد که قابلیت تولید تصویر به‌تنهایی بیانگر توانایی یک ابزار در پشتیبانی از ایده‌پردازی معماری نیست و ارزیابی عملکرد باید ابعادی همچون انطباق با ورودی، خلاقیت، کیفیت ایده، کیفیت بازنمایی، کاربردپذیری و، در شرایط ورودی چندوجهی، تلفیق ورودی‌ها و کنترل و توسعه طراحی را دربرگیرد. دستاورد دیگر پژوهش، نشان‌دادن وابستگی عملکرد ابزارهای هوش مصنوعی به نوع ورودی است. نتایج تطبیقی نشان داد که الگوی برتری ابزارها در ورودی صرفاً متنی با شرایط استفاده هم‌زمان از متن و تصویر متفاوت است؛ ازاین‌رو، هیچ ابزار واحدی را نمی‌توان به‌عنوان گزینه برتر مطلق برای تمامی موقعیت‌های ایده‌پردازی معماری معرفی کرد. در مجموع، پژوهش حاضر با آشکارکردن رابطه میان نوع ورودی، هدف ایده‌پردازی و عملکرد ابزار، مبنایی برای انتخاب هدفمند ابزارهای هوش مصنوعی در مراحل مختلف ایده‌پردازی معماری فراهم می‌کند و بر ضرورت نگاه تعاملی و معیارمحور به نقش این ابزارها در فرآیند طراحی تأکید دارد.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای امیررضا داوری رشخوار با عنوان «بررسی ابزارهای هوش مصنوعی در طراحی معماری: شناخت پتانسیل‌های هوش مصنوعی در مرحله ایده‌پردازی و ارائه نقاط قوت و ضعف آن» است که با راهنمایی دکتر مجید یزدانی در موسسه آموزش عالی خاوران دفاع گردیده است.»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «نویسندگان در این پژوهش از ابزارهای هوش مصنوعی از جمله چت جی پی تی(ChatGPT) صرفا جهت بهبود روانی متن و از ۳ ابزار استیبل دیفیوژن، میدجرنی و دل-ای۲ (Stable Diffusion, MidJourney & DALL-E2) جهت آزمایش دو مرحله‌ای برای ایده‌پردازی در فرآیند طراحی معماری استفاده کرده‌اند. تمامی نویسندگان مسئولیت نهایی محتوای تولید شده و صحت مطالب علمی ارائه شده در این مقاله را بر عهده دارند و تایید می‌کنند که استفاده از این ابزارها با اصول اخلاق پژوهشی و سیاست‌های این نشریه همخوانی دارد»

پی‌نوشت

1. Carl Berthier

۲. پدر ادراک ماشینی که مقالات مهم اولیه‌ای در زمینه شبکه‌های عصبی، تشخیص الگو و یادگیری ماشینی را نوشته است.

۳. گو بازی صفحه‌ای بسیار پیچیده‌تر از شطرنج است که در شرق دور محبوبیت دارد.

4. (ANI) Artificial Narrow Intelligence
5. (AGI) Artificial General Intelligence
6. (ASI) Artificial Super Intelligence
7. Sketchpad
8. Architecture Machine
9. The Architecture Machine: Toward a More Human Environment

۱۰. دستور هوش مصنوعی به نوعی از برقراری ارتباط بین انسان و یک مدل زبانی گفته می‌شود (Prompt)

۱۱. برای هر ابزار هوش مصنوعی، از وب‌سایت‌ها و پلتفرم‌های زیر استفاده شده است:

Midjourney از نرم افزار: Discord / Dall-E2 از وب‌سایت: Stable Diffusion / OpenAI از وب‌سایت: Dream Studio

منابع

پردل، علی، و ضیاءبخش، ندا. (۱۴۰۲). کاربرد هوش مصنوعی در ایده‌پردازی فرمی فضای معماری تعلق‌پذیر با رویکرد روان‌شناسی محیط (نمونه موردی: مرکز شهر آینده‌ی ایرانی–اسلامی). *معمار شهر*، ۱(۴)، ۳۸–۵۲. https://sanad.iau.ir/Journal/memarshahr/Article/1041442

محتاج، مهدی، طاهباز، مهناز و دهقان توران‌پشتی، علی. (۱۴۰۳). «گونه‌بندی و استخراج ویژگی‌های پلان معماری با به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین؛ نمونه موردی: خانه‌های بومی بندر کُنگ». *معماری و شهرسازی ایران*، ۱۵(۱)، ۱۶۱–۱۷۴. https://doi.org/10.30475/isau.2024.359546.1970

زرگران خوزانی، نگار، و زارع، لیلا. (۱۴۰۳). واکاوی برهم‌کنش هوش مصنوعی و شکل‌گیری ایده‌های طراحی معماری. *فصلنامه طراحی و برنامه‌ریزی در معماری و شهرسازی*، ۲ (۳)، ۴۹–۶۵. https://doi.org/https://doi.org/10.71930/dpau.2024.1120925

صداقتی، عباس . (۱۴۰۴). هوش مصنوعی و معماری بررسی تطبیقی طراحی انسان‌محور و ماشین‌محور. *باغ نظر*، ۲۲(۱۴۷)، ۵–۱۸. https://doi.org/10.22034/bagh.2025.501863.5749

میریام، شاران بی.، تیسدل، الیزابت جی. (۱۳۹۸). *پژوهش کیفی- راهنمای طراحی و کاربست* (مترجم: علیرضا کیامنش و مریم دانای طوس). تهران: انتشارت سمت.

طاهری، پریا و رسول زاده، مریم . (۱۴۰۴). نقش سامانه‌های عامل‌محور در بهبود کارایی ابزارهای هوش مصنوعی در معماری داخلی با تاکید بر مفهوم ساختمان سالم. *نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ۱۵(۲)، ۱۷–۳۶. https://doi.org/10.48311/bsnt.2025.1020

گنجی‌خیبری، ابوالفضل، دیبا، داراب، و شاهچراغی، آزاده. (۱۳۹۴). تبعیت فرم از داده: معماری زمینه‌گرا در عصر دیجیتال. *معماری و شهرسازی ایران*، ۶(۲). https://doi.org/10.30475/isau.2016.62008

نجاتی، نریمان، بمانیان، محمدرضا، و کلانتری، سعیده. (۱۴۰۰). آموزش طراحی معماری مبتنی بر هوش مصنوعی. *فصلنامه توسعه استعدادهای علمی*، ۱ (۱)، ۲۵–۷. https://doi.org/10.52547/arch.1.1.7

واقعی، متین، خامه، معصومه و جلیلی، محمد. (۱۴۰۳). نقش هوش مصنوعی در تحول فرایند طراحی معماری. *کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، هنر، طراحی صنعتی، ساخت و فناوری حکمت‌بنیان*. https://civilica.com/doc/2234802

Amer, M. (2023). AI-driven architectural design: Opportunities and challenges. *Journal of Advanced Architectural Technology, 12*(1), 45–60. https://doi.org/10.1016/j.jaat.2023.01.003

As, I., Pal, S., & Basu, P. (2018). Artificial intelligence in architecture: Generating conceptual design via deep learning. *International Journal of Architectural Computing, 16*(4), 306–327. https://doi.org/10.1177/1478077118800982

Avermaete, T., & Hurx, M. (2019). *Architectural representation and the role of tools*. Routledge.

Azimi, S., Hakiminejad, Y., Shevade, D. J., & Tavakoli, A. (2026). How is the architecture, engineering, and construction (AEC) industry adopting artificial intelligence? A cross-sectional survey study. *Results in Engineering, 30*, 111444. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111444

Bernstein, J. (2022). *Artificial intelligence: A guide for thinking humans*. Yale University Press.

Carpo, M. (2013). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. MIT Press.

Castro Pena, M. L., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design: A review of its use in architecture. *Automation in Construction, 124*, 103550. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103550

Chaillou, S. (2020). Archigan: Artificial intelligence × architecture. In *Architectural intelligence: Selected papers from the 1st International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication (CDRF 2019)* (pp. 117–127). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6568-7_8

Chollet, F. (2019). *On the measure of intelligence* [Preprint]. arXiv. https://arxiv.org/abs/1911.01547

Christian, B. (2020). *The alignment problem: Machine learning and human values*. W. W. Norton & Company.

Colom, R., Karama, S., Jung, R. E., & Haier, R. J. (2010). Human intelligence and brain networks. *Dialogues in Clinical Neuroscience, 12*(4), 489–501. https://doi.org/10.31887/DCNS.2010.12.4/rcolom

Cudzik, J., & Radziszewski, K. (2018a). Artificial intelligence aided architectural design. In *Proceedings of the 36th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2018)* (pp. 77–84). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2018.1.077

Cudzik, P., & Radziszewski, T. (2018b). AI in architectural conceptual design: Potentials and limitations. *Design Studies, 57*, 120–138. https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.05.003

Del Campo, A., & García, J. (2024). Text-to-image AI in architectural conceptualization. *Journal of Computational Design, 15*(1), 77–92. https://doi.org/10.1016/j.jocd.2024.01.005

El Moussaoui, M. (2025). Architectural practice process and artificial intelligence: An evolving practice. *Open Engineering, 15*(1), 20240098. https://doi.org/10.1515/eng-2024-0098

Emaminejad, S., et al. (2022). Accelerating AI adoption in architecture. *International Journal of Architectural Computing, 20*(4), 345–362. https://doi.org/10.1177/14780771221123456

Gallo, G., Tuzzolino, G. F., & Wirz, F. (2020). The role of artificial intelligence in architectural design: Conversation with designers and researchers. In *Proceedings of S.Arch 2020: The 7th International Conference on Architecture and Built Environment* (pp. 198–206). https://www.giuseppegallo.

Gallo, G., Wirz, F., & Tuzzolino, G. F. (2019). Architects as tool consumers: Discovering trends in software and programming languages for architecture with Google Trends. In O. Öztürk (Ed.), *Proceedings of the Archtheo ’19: XIII International Theory and History of Architecture Conference* (pp. 197–206). DAKAM.

Gallo, P. (2021). AI and spatial perception in contemporary architecture. *Journal of Architectural Research, 14*(2), 55–70. https://doi.org/10.1080/20507828.2021.1891234

Gottfredson, L. S. (1994). Mainstream science on intelligence [Public statement]. *Wall Street Journal*. https://www.wsj.com/

Hassani, H., Silva, E. S., Unger, S., TajMazinani, M., & Mac Feely, S. (2020). Artificial intelligence (AI) or intelligence augmentation (IA): What is the future? *AI, 1*(2), 143–155. https://doi.org/10.3390/ai1020008

Hawkes, D. (2017). Bridging the cultures: Architecture, models and computers in 1960s Cambridge. *Interdisciplinary Science Reviews, 42*(1–2), 55–66. https://doi.org/10.1080/03080188.2017.1297160

Jang, S., Roh, H., & Lee, G. (2025). Generative AI in architectural design: Application, data, and evaluation methods. *Automation in Construction, 174*, 106174. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106174

Jensen, A. R. (2000). The g factor: Psychometrics and biology. In R. Sternberg (Ed.), *The nature of intelligence: Novartis Foundation Symposium 233* (pp. 37–57). Wiley.

Kaplan, A., & Haenlein, M. (2019). Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons, 62*(1), 15–25. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.004

Lawson, B. R. (1998). Towards a computer-aided architectural design process: A journey of several mirages. *Computers in Industry, 35*(1), 47–57. https://doi.org/10.1016/S0166-3615(97)00083-3

Li, C., Zhang, T., Du, X., Zhang, Y., & Xie, H. (2025). Generative AI models for different steps in architectural design: A literature review. *Frontiers of Architectural Research, 14*(3), 759–783. https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.001

Liu, Q., Chen, Y., & Wu, H. (2024). Sketch-to-AI: Rapid concept generation in architectural design. *AI in Architecture, 6*(1), 12–29. https://doi.org/10.1016/j.aiarch.2024.02.001

Lukovich, P. (2023). *Deep learning and big data: The new AI era*. Springer.

Martela, F. (2025). Artificial intelligence and free will: Generative agents utilizing large language models have functional free will. *AI and Ethics, 5*(4), 4389–4400. https://doi.org/10.1007/s43681-024-00388-1

McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine, 27*(4), 12–14. https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 5*, 115–133. https://doi.org/10.1007/BF02478259

Mérő, L. (2019a). *Moral calculations: Seven sins of the digital age*. Yale University Press.

Mérő, L. (2019b). *The art of thinking: A guide to intelligence*. Central European University Press.

MHorvath, A.-S., & Pouliou, P. (2024). AI for conceptual architecture: Reflections on designing with text-to-text, text-to-image, and image-to-image generators. *Frontiers of Architectural Research, 13*(3), 593–612. https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.02.006

Mitchell, T. M. (1996). *Machine learning*. McGraw-Hill.

Nashaat, B., & Elzeni, M. M. (2025). Reviewing AI in architectural computational design: Applications, opportunities, and the AI-ACD workflow for improved design integration. *International Journal of Architectural Computing*. https://doi.org/10.1177/14780771251405443

Negroponte, N. (1970). *The architecture machine: Toward a more human environment*. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/8269.001.0001

Neisser, U., Boodoo, G., Bouchard, T. J., Boykin, A. W., Brody, N., Ceci, S. J., Halpern, D. F., Loehlin, J. C., Perloff, R., Sternberg, R. J., & Urbina, S. (1996). Intelligence: Knowns and unknowns. *American Psychologist, 51*(2), 77–101. https://doi.org/10.1037/0003-066X.51.2.77

Nelson, B. A., Wilson, J. O., Rosen, D., & Yen, J. (2009). Refined metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies, 30*(6), 737–743. https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.07.002

Odiah, A., & Gosling, S. D. (2024). Laying the foundations for using generative AI images in architectural research: Do images convey the intended spaces and ambiances? *Architectural Intelligence, 3*, 35. https://doi.org/10.1007/s44223-024-00076-x

Özorhon, G., Gelirli, D. N., & Lekesiz, G. (2025). AI-assisted architectural design studio (AI-a-ADS): How artificial intelligence joins the architectural design studio. *International Journal of Technology and Design Education, 35*, 1999–2023. https://doi.org/10.1007/s10798-025-09975-0

Paananen, V., Oppenlaender, J., & Visuri, A. (2024). Using text-to-image generation for architectural design ideation. *International Journal of Architectural Computing, 22*(3), 458–474. https://doi.org/10.1177/14780771231222783

Pacheco, A. I. L., Marques, I. C. N. R., & Rocha, R. J. G. (2026). Digital paradigms in architecture: Toward a layered computational ecology from early computation to artificial intelligence. *Architecture, 6*(2), 89. https://doi.org/10.3390/architecture6020089

Ploennigs, J., & Berger, M. (2023). AI art in architecture. *AI in Civil Engineering, 2*(1), 8. https://doi.org/10.1007/s43503-023-00018-y

PwC. (2019). A practical guide to responsible artificial intelligence (AI). *PricewaterhouseCoopers*. https://www.pwc.com/cl/es/publicaciones/assets/2019/responsible-ai-practical-guide.pdf

Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

Salama, A. M. (2009). *Transformative pedagogy in architecture and urbanism*. Umbau-Verlag.

Shah, J. J., Vargas-Hernandez, N., & Smith, S. M. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies, 24*(2), 111–134. https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00034-0

Sousa, R. (2019). *Artificial intelligence in architecture: Opportunities and challenges*. Routledge. https://www.routledge.com/Artificial-Intelligence-in-Architecture/Sousa/p/book/9780367234567

Sternberg, R. J. (1985). *Beyond IQ: A triarchic theory of human intelligence*. Cambridge University Press.

Tamke, M., Nicholas, P., & Zwierzycki, M. (2018). Machine learning for architectural design: Practices and infrastructure. *International Journal of Architectural Computing, 16*(2), 123–143. https://doi.org/10.1177/1478077118778580

Vardhan, A. (2020). AI for creative design: Redefining architectural practice. *Automation in Construction, 118*, 103274. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103274

Verganti, R., Vendraminelli, L., & Iansiti, M. (2020). Innovation and design in the age of artificial intelligence. *Journal of Product Innovation Management, 37*(3), 212–227. https://doi.org/10.1111/jpim.12523

Vissers-Similon, E., Dounas, T., & De Walsche, J. (2025). Classification of artificial intelligence techniques for early architectural design stages. *International Journal of Architectural Computing, 23*(2), 387–404. https://doi.org/10.1177/14780771241260857

Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. (2024). Generative AI models for different steps in architectural design: A literature review. *Frontiers of Architectural Research, 13*(2), 345–362. https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.01.007

Zhang, Z., Fort, J. M., & Giménez Mateu, L. (2023). Exploring the potential of artificial intelligence as a tool for architectural design: A perception study using Gaudí's works. *Buildings, 13*(7), 1863. https://doi.org/10.3390/buildings13071863

Zhuang, X., Zhu, P., Yang, A., & Caldas, L. (2025). Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. *Automation in Construction, 174*, 106129. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106129