نوع مقاله: پژوهشی
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷
صفحات: ۱۰۵-۷۵
10.52547/mmi.2292.3

کاربرد الگوریتم‌ها در طراحی معماریِ مولد مبتنی‌بر هوش مصنوعی

آمنه‌سادات فتاحی‌معصوم* هیرو فرکیش** محمد تاجی***

چکیده

تا پیش از پیدایش مفهوم طراحیِ مولد، هوش مصنوعی حضور شایان توجهی در فرایند طراحی به‌ویژه در مراحل آغازین که معمار با تصویری گنگ و مه‌آلود روبه‌روست، نداشت و بیشتر در قالب نرم‌افزارهای دو و سه‌بعدی، او را در تکمیل ایده‌های ابتدایی خود، همراهی می‌کرد. اما در سال‌های اخیر با گسترش این مفهوم، حضور هوش مصنوعی در فرایند طراحی با دگرگونی‌هایی همراه شده است. امروزه الگوریتم‌ها در این پوشش نوین، تلاش می‌کنند با در اختیار گذاشتن تمامی پاسخ‌های ممکن برای حل مسئلهٔ معماری، با سرعت و دقتی بالاتر از انسان، مسیر مبهم فرایند طراحی را برای معمار، روشن و شفاف سازند و با حضور خود از ابتدای فرایند، در شکل‌گیری ایده‌های گوناگون او را یاری رسانند. ازآنجاکه مطالعات بسیاری از الگوریتم‌های گوناگون، در موضوعات مختلف طراحی معماری استفاده کردند، پژوهش حاضر درصدد است درراستای دستیابی به نگاهی جامع، تحقیقاتی را که الگوریتم‌ها در فرایند طراحی مولد به کار برده‌اند، بررسی، و از این رهگذر کاربست آن‌ها را در موضوعات مختلف این فرایند شناسایی نماید. تمرکز این پژوهش بر تحقیقاتی است که از این روش در مراحل آغازین فرایند استفاده کرده‌اند. نحوهٔ انتخاب این مجموعه به‌صورت کتابخانه‌ای بوده است. ابتدا تمامی تحقیقات مرتبط با کلیدواژگان معماری و هوش مصنوعی در بازهٔ زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ از پایگاه‌های معتبر استخراج شدند. مبتنی‌بر هدف مقاله، درمجموع ۷۳ مطالعه انتخاب و باتوجه‌به موضوعات مطرح‌شده در پژوهش‌های پیشین، در شش دسته شامل ایده و کانسپت، فرم‌یابی، طراحی سقف و نما، حجم بنا، جانمایی و پلان، تقسیم‌بندی و با رویکرد بررسیِ آخرین وضعیت و به روش تحلیل محتوا، تحلیل شدند. نتایج این مقاله بیانگر آن است که الگوریتم‌های تکاملی بیشترین کاربرد را در طراحی مولد داشته‌اند و به‌صورت مستقل در جهت یافتن بهینه‌ترین ایده، کانسپت و جانماییِ فضایی مورد استفاده قرار گرفتند. در دهه‌های اخیر و با پیشرفت الگوریتم‌های نوظهوری مانند یادگیری عمیق، تمایل محققان به استفاده از آن‌ها در طراحی مولد بیشتر شده و عمدهٔ کاربردشان بر بهینه‌یابی کانسپت‌های حجم و پلان بوده است. همچنین گونه‌های ترکیبی این الگوریتم‌ها با تکاملی‌ها، نتایج مطلوبی در تولید محصول معماری به‌همراه داشته است.

واژگان کلیدی: فرایند طراحی، طراحی مولد، هوش مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم‌های یادگیری عمیق.

* دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران. a.s.fattahi.m@gmail.com
** استادیار گروه معماری، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران (نویسنده مسئول). herofarkisch64@iau.ac.ir
*** استادیار، گروه معدن، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران. mohammadtaji@yahoo.com

مقدمه

فرایند طراحی معماری، شامل روندی پیچیده و ناشناخته توأم با آزمون و خطا است. معمار در آغاز این راه با مفاهیمی مبهم و تصاویری گنگ روبه‌رو است. او می‌کوشد مبتنی‌بر آنچه آموخته و تجربه کرده است در ترکیب با درونیات خود، برای موضوعات مختلفِ فرایند طراحی راه‌حلی ارائه دهد. نکته‌ای که در این روند مهم و ضروری محسوب می‌شود، دستیابی به طرحی است که درعین آنکه کاربردی است، هم‌زمان از منظر زیبایی‌شناسی، مطلوبیت و ازلحاظ ساختاری، ایستایی داشته باشد (Rakha & Nassar, 2011: 2348)؛ (Mueller & Ochsendorf, 2015: 71)؛ (Song & et al, 2016: 166). در این میان آنچه در فرایند طراحی به‌خصوص در مراحل اولیهٔ آن، کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، این است که انسان در این روند پرپیچ و خم و نامعلوم، تنها قادر به ارائه تعداد محدودی راه‌حل برای مسئله معماری است. او بر روی همان تعداد محدود کار می‌کند تا به نتیجهٔ نهایی، که لزوماً بهینه‌ترین گزینهٔ ممکن نیست، دست یابد (Attia & et al, 2012: 15). بنابر دیدگاه کوالتووسکی (۲۰۱۰) الهامات طراح، گسترده نیست و ذهن خلاق او ممکن است پس از طراحی چند یا حتی ده‌ها طرح، تخلیه شود. بنابراین در این روند احتمال می‌رود گزینه‌های دیگری که پتانسیل‌های بهتری دارند، اصلاً مطرح نشوند (Kowaltowski & et al., 2010: 457). با این توصیف اگر گزینه‌ای وجود داشت که ازطریقِ آن معمار قادر بود به تمامی پاسخ‌های ممکن دسترسی یابد، آنگاه می‌توانست با قدرت و اطمینان بیشتری، بهترین راه‌حل را انتخاب و ارائه نماید.

طراحی مولد[1] که در ساده‌ترین تعریف به معنای استفاده از الگوریتم‌ها در فرایند طراحی معماری است، چندین دهه است که در دنیای معماری و طراحی معرفی شده است. طراحی مذکور سعی می‌کند با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، کارایی فرایند طراحی را بهبود ببخشد. ازآنجایی‌که الگوریتم‌ها منوط به یافتن پاسخ در فضای محدودی از گزینه‌ها نیستند و برای یافتن راه‌حل نهایی و دستیابی به اهداف طرح، به تمامی پاسخ‌های ممکن توجه می‌کنند (McKnight, 2017: 1)، قادر خواهند بود فاز آغازین فرایند طراحی معماری را که معمار با فضایی مه‌آلود مواجه است، شفاف کرده و او را با سرعت و دقتی بالاتر از انسان، در دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ به مسئلهٔ معماری، یاری رسانند (Nagy & et al., 2017: 15). با این توضیح، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با تمرکز بر مطالعات و تحقیقات سه دههٔ اخیر که کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی را در مراحل ابتدایی فرایند طراحی آزموده‌اند، با رویکرد بررسی آخرین وضعیت[2]، ابتدا به شناسایی الگوریتم‌های مؤثر در فرایند طراحی مولد بپردازد. سپس کاربست هرکدام را در موضوعات مختلف این فرایند عنوان نماید. بنابراین سوال‌های پژوهش این‌گونه است؛ مطالعات فرایند طراحی دربردارندهٔ کدام‌یک از الگوریتم‌های هوش مصنوعی است و در موضوعات مختلف فرایند طراحی مولد به‌ویژه مراحل آغازین چه کاربردی دارند؟ لازم به ذکر است که تحقیقات مشابه با پژوهش حاضر به سه صورت، حضور الگوریتم‌ها را در فرایند طراحیِ معماری بررسی کردند. برخی مطالعات، گسترهٔ وسیعی از انواع الگوریتم‌ها را در موضوعات متنوع طراحی معماری مورد توجه قرار داده‌اند (Evins ,2013)؛ (Westermann & Evins , 2019)؛ (Momade et al, 2021)؛ (Baduge et al,) 2022)؛ (Bölek et al, 2023)؛ (Fernberg & Chamberlain, 2023). بعضی دیگر تنها به مرور یک نوع از الگوریتم‌ها مانند تکاملی‌ها در تحقیقات پرداخته‌اند (Dutta & Sarthak, 2011)، و برخی دیگر کاربرد آن‌ها را تنها در یک موضوع از طراحی به‌عنوان مثال طراحی جانمایی، بررسی نموده‌اند (Weber et al, 2022). پراکندگی این مطالعات باعث ایجاد سردرگمی و عدم ارائه دیدی جامع به موضوع کاربرد الگوریتم‌ها در فرایند طراحی معماری می‌شود. با این توصیف و باتوجه‌به اینکه این روش طراحی بسیار نوپا می‌باشد، انجام این مطالعه ازآن‌جهت ضرورت دارد که می‌تواند به معمارانی که به‌تازگی وارد حیطهٔ هوش مصنوعی و معماری می‌شوند، دیدی کلی از موضوع ارائه دهد. علاوه‌برآن، در انتخاب الگوریتم مناسب جهت دستیابی به اهداف مورد نظر، به ایشان کمک می‌کند و ازاین‌طریق از زمان و هزینه‌های تحقیقات آن‌ها بکاهد.

هوش مصنوعی: مفهوم، اهداف و شاخه‌های آن

در یک تعریف ساده، علم هوش مصنوعی به‌دنبال ساخت سیستم‌هایی توانا برای انجام اموری است که درحال‌حاضر انسان آن‌ها را بهتر انجام می‌دهد (Rich & Knight, 1991: 10). پیدایش و گسترش این ایده در حیطهٔ علوم بسیاری مانند فلسفه، مهندسی کامپیوتر، الکترونیک، مکانیک و مهندسیِ ساخت جای گرفته است؛ اما تا پیش از مقالهٔ تورینگ و سؤال معروف او دربارهٔ این‌که آیا ماشین‌ها می‌توانند فکر کنند؟ (Turing, 1950: 433)، از هوش مصنوعی بیشتر به‌عنوان مکانیزمی یاد می‌شد که قادر است محاسبات پیچیدهٔ ریاضی را با دقت بالا و در زمان کوتاه نسبت به انسان انجام دهد. تورینگ با عنوان نمودن این مطلب می‌خواست پا فراتر نهد و از تقلید قوهٔ تفکر انسان توسط ماشین یاد کند. در همین

راستا، راسل و نورویگ در کتاب خود با معرفی «عامل‌های هوشمند» چهار تعریف برای هوش مصنوعی ارائه دادند؛ سامانه‌هایی که مانند انسان فکر می‌کنند (توانایی تصمیم‌گیری، یادگیری و حل مسئله دارند)، سامانه‌هایی که مانند انسان عمل می‌کنند (کارهایی انجام می‌دهند که آن کارها در انسان با فکر کردن انجام می‌پذیرد)، سامانه‌هایی که به‌طور منطقی فکر می‌کنند (ماشین‌های محاسباتی دارای درک و استدلال منطقی)، و سامانه‌هایی که به‌طور منطقی عمل می‌کنند (ماشین‌هایی که با اقدامات منطقی بهترین نتیجه را می‌گیرند). آن‌ها معتقدند عامل‌هایی هوشمند هستند که مانند انسان از قدرت حل مسئله، تصمیم‌گیری، یادگیری و ادراک برخوردارند و بتوانند فکر و استدلال منطقی داشته باشند. هدف نهایی هوش مصنوعی ساخت چنین عامل‌هایی است (Russel & Norvig, 2002: 20). بر این مبنا پژوهشگران برای یک هوش مصنوعی اهداف متنوعی را متصور هستند که در شکل ۱ نشان داده شده است.

اساس هوش مصنوعی بر پایهٔ الگوریتم است که به مجموعه‌ای از مراحل و فرایندهای متوالی برای حل یک مسئله اطلاق می‌شود (Colakoglu & Yazar, 2007: 159). الگوریتم‌ها دارای فهرست دقیقی از دستورالعمل‌ها هستند که با ترتیب خاصی اجرا می‌شوند، می‌توانند ورودی‌های بسیار دریافت کنند و یک خروجی یا مجموعه‌ای از خروجی‌ها را ارائه دهند (Cudzik & Radziszewski , 2018: 78). الگوریتم‌های هوش مصنوعی از زمان پیدایش تاکنون گسترهٔ وسیعی را در برگرفته و همچنان به رشد و توسعهٔ خود ادامه می‌دهند؛ لذا به‌منظور جلوگیری از سردرگمی نیاز است الگوریتم‌ها باتوجه‌به ماهیت خود و روشی که جهت دست‌یابی به اهداف هوش مصنوعی از آن‌ها استفاده می‌شود، منظم و دسته‌بندی گردند. این دسته‌بندی تحت‌عنوان شاخه‌ها[۳] یا زیرمجموعه‌های[۴] هوش مصنوعی شناخته می‌شوند. این شاخه‌ها درواقع روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی هستند که ماشین دارای هوش مصنوعی با استفاده از آن‌ها مسائل مختلف را حل می‌کند. هرکدام از این شاخه‌ها طیف وسیعی از الگوریتم‌ها را شامل می‌شوند. مجموع این روش‌ها به‌همراه مثال‌هایی از الگوریتم‌های هر مجموعه، در شکل ۲ قابل مشاهده هستند.

در این میان شاخهٔ یادگیری ماشینی[۵] از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی محسوب می‌شوند که در سال‌های اخیر با معرفی الگوریتم‌های یادگیری عمیق[۶] در حل مسائل بسیار پیچیده، موفقیت‌های چشمگیری داشته‌اند (رهبر، ۱۳۹۷: ۱۰۷). این دسته از الگوریتم‌ها این قابلیت را دارند تا با آموزش ازطریقِ داده‌های بسیار، الگوها را استخراج نمایند و به حافظه بسپارند تا در موارد مشابه آتی با استفاده از آن‌ها راه‌حل ارائه نمایند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق با اتکا به شبکه‌های عصبی[۷] در دل یادگیری ماشین قرار دارند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، خود زیرمجموعهٔ الگوریتم‌های کلاسیک در هوش مصنوعی تلقی می‌شوند. ارتباط این سه در شکل ۳ ارائه شده است.

بنابر دیدگاه برخی پژوهشگران، دسته‌بندی یادشده به‌تنهایی نمی‌تواند دورنمایی از کاربرد هوش مصنوعی را در حل مسائل مختلف بدست دهد. بنابراین آن‌ها اقدام به ترسیم **نقشهٔ دانش هوش مصنوعی** نمودند (Corea, 2019)؛ (Yigitcanlar et al., 2020)؛ (Abioye & et al,

شکل ۱. اهداف هوش مصنوعی و مفهوم آن‌ها (برگرفته از: Abioye et al., ۲۰۲۱)

2021)، (شکل۴). این نقشه شامل مجموع الگوریتم‌هایی است که تاکنون ابداع و مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Wex Definitions Team, 2022: 5). محور افقی این نقشه به اهدافی اشاره می‌نماید که محققان، دستیابی به آن‌ها را برای یک ماشین با هوش مصنوعی متصور هستند و محور عمودی آن، انواع روش‌ها و تکنیک‌های الگوریتمیکی است که ایشان تاکنون برای دست یافتن به اهداف فوق‌الذکر از آن‌ها استفاده کرده‌اند. مناطق خاکستری درون نقشه، عناوین مجموعهٔ الگوریتم‌های هوش مصنوعی هستند. برای مثال الگوریتم‌های تکاملی‌ها[8]، با روش‌های جست‌وجو و بهینه‌یابی درصدد دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی و ارتباطات هستند؛ درحالی‌که الگوریتم‌های پردازش زبان طبیعی[9] با استفاده از روش‌های دانش‌بنیان، روش‌های احتمالی و یادگیری ماشین به‌دنبال ادراک محیط پیرامونی هستند. بنابراین این نقشه حکم راهنمایی (Corea, 2019: 25) را برای تازه‌واردان به حیطهٔ هوش مصنوعی دارد که علاوه‌بر دریافت نحوهٔ عملکرد هر الگوریتم، می‌توانند از آن در انتخاب روش برای حل مسائل مد نظرشان بهره گیرند.

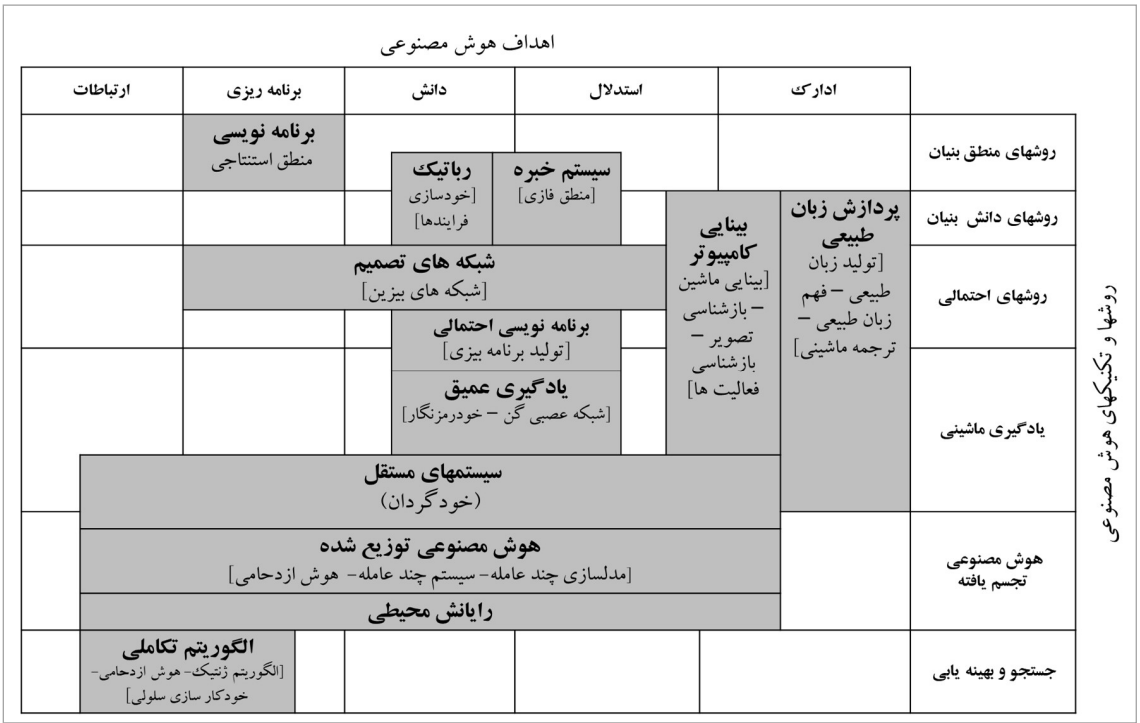
شکل۲. شاخه‌های هوش مصنوعی به‌همراه نمونهٔ الگوریتم (نگارندگان، ۱۴۰۲)

شکل۳. ارتباط بین حوزه‌های مهم هوش مصنوعی و رایج‌ترین الگوریتم‌های هر حوزه (نگارندگان، ۱۴۰۲)

طراحی معماری مولد مبتنی‌بر ای آی[۱۰]

پیش از حضور کامپیوتر در تمامی عرصه‌های بشر ازجمله معماری، معماران مبتنی‌بر آموزه‌های خود و با اتکا به روش‌های سنتی همچون طراحی دست آزاد، روش‌های ترسیم فنی و ساخت ماکت به پیاده کردن ایده‌های خود اهتمام می‌ورزیدند (Colakoglu & Yazar, 2007: 159). با ورود به دورهٔ مدرن، پژوهشگران بسیاری سعی نمودند تا فرایند طراحی معماری را روشمند سازند و برای آن، مراحل و نمودارهای متفاوتی ترسیم نمایند (Broadbent, 1973)؛ (Archer, 1995)؛ (Jones, 1984)؛ (Cross,1999). اکثر مدل‌های ارائه‌شده یک نقطهٔ مشترک داشتند و آن این‌که روند دستیابی به طرح به‌صورت خطی و مرحله‌ای باشد، یعنی فرایندی که با توالی رویدادها همراه است و با بهترین نتیجه به پایان می‌رسد. هر مرحله باید به اتمام برسد تا مرحلهٔ بعدی آغاز شود (Martelaro et al., 2021: 15). اما در دههٔ هفتاد میلادی و به‌واسطهٔ ظهور کامپیوترها، دنیای معماری در شرف تحول عظیم قرار گرفت. مسائل پیچیده، غیرقطعی و غیرخطی عصر حاضر، لزوم بازنگری به فرایند طراحی معماری خطی را می‌طلبید. روش‌های طراحی به کمک کامپیوتر و طراحی پارامتریک گام‌هایی بودند که معماران درراستای دستیابی به این هدف برداشتند. از مهم‌ترین امکاناتی که این روش‌ها به معماران ارائه می‌دادند، امکان امتحان کردن آلترناتیوهای متعدد طراحی به‌همراه اعمال تغییرات در آن‌ها به‌صورت هم‌زمان و بدون صرف هزینه‌های بسیار بود. درواقع این شروع حرکت معماران به استفاده از قدرتِ محاسباتی (رایانشی) کامپیوتر در حل مسائل معماری بود که از این رهگذر عنوان جدیدی را با نام «طراحی معماری محاسباتی»[۱۱] پدید آورد: هر طراحی‌ای که از محاسبات دیجیتالی در فرایند طراحی خود اعم از تولید کانسپت در مراحل اولیهٔ طراحی، توسعهٔ طرح و ترسیم جزئیات بهره برد، به‌عنوان طراحی دیجیتالی- محاسباتی شناخته شود (Liu et al., 2003: 342).

در این میان، علم هوش مصنوعی روزبه‌روز رشد کرد و دریچه‌های تازه‌تری را به روی معماران باز نمود؛ بااین‌وجود تا پیش از شروع قرن بیستم، الگوریتم‌های هوش مصنوعی تحت‌مفهوم طراحی محاسباتی قرار می‌گرفتند و بیشتر در قالب نرم‌افزارهای ترسیمی و شبیه‌سازی یا به‌منظور ارائه دیجیتالی کاربرد داشتند. از دلایل این موضوع می‌توان به عدم وجود سیستم‌های پیشرفته جهت محاسبات پیچیدهٔ هندسی و گرافیکی (Rockwell, 2017: 5)، تمایل نداشتن معماران به یادگیری زبان‌های برنامه‌نویسی (مظفر و خاک‌زند، ۱۳۸۲: ۷۱)، نگاه جامعهٔ معماران به فرایند طراحی از دریچهٔ مفاهیم کیفی مانند خلاقیت[۱۲] و متعاقب آن تمایل نداشتن به استفاده از ای آی در طراحی معماری (Rodrigues, 2014: 3) اشاره نمود. این روند در دهه‌های اخیر به‌دنبال پیدایش



شکل۴. نقشهٔ دانش هوش مصنوعی (منبع: با اقتباس از Abioye & et al, 2021; Yigitcanlar et al., 2020; Corea, 2019)

الگوریتم‌های نوین که امکانات متنوعی را در اختیار معماران برای آفرینش محصول معماری قرار می‌داد، باعث شد تا پیشگامان این عرصه، رویکرد متفاوتی را در فرایند طراحی در پیش گیرند و آن، خلق محصول معماری ازطریقِ انتقال دانش معمار به کامپیوتر بود. اتفاقی که پیش‌از آن در نرم‌افزارهای طراحی پارامتریک نیز افتاده بود؛ اما این بار محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی‌شده در اختیار معمار قرار نداشت و او می‌بایست با استفاده از زبان ماشین که شامل فرمول‌های ریاضی، ماتریس‌ها، بُردارها و کتابخانه‌های زبان برنامه‌نویسی بود، به طراحی می‌پرداخت. خصیصهٔ مولد بودن و خلق کردن برای یک سیستم مبتنی‌بر هوش مصنوعی، طراحی معماری به کمک کامپیوتر را متحول نمود و تحت‌عنوان فرایند طراحی مولد، امکان حضور هوش مصنوعی را در کنار معمار از ابتدای شروع پروسه تا انتهای طراحی فراهم آورد (Caldas & Norford, 2011: 173). به‌عبارت‌دیگر در این سطح، فناوری دیجیتال توانایی فراتر از ابزار پیدا کرد و در کنار تفکر انسانی به‌سمت مولد بودن حرکت کرد. به‌زعم پژوهشگران، توانایی تولید فرم و فضا توسط برنامه‌های کامپیوتری با استفاده از منطق مبتنی‌بر قانون[۱۳] (Terzidis, 2004)، دستیابی طراح یا کاربر به طرح به‌طور مستقیم ازطریقِ اعمال تغییرات در کدها (Queiroz & Vaz, 2015) و دستورنویسی[۱۴] (Humppi & Österlund, 2016) و اعمال دستورالعمل‌های صریح با زبان برنامه‌نویسی برای تولید فرم دیجیتال (Oxman, 2017) مصادیق فرایند طراحی محاسباتی به شمار می‌روند که به آن، عنوان فرایند طراحی مولد مبتنی‌بر ای آی اطلاق می‌شود.

امروزه این نوع فرایند طراحی به‌دنبال به‌کارگیری هرچه بیشتر هوش مصنوعی در حل مسائل معماری است تا با استفاده از قابلیت‌های آن ازجمله خودکارسازی[۱۵]، توانایی یادگیری از نمونه‌های پیشین، قدرت تشخیص الگوها و انجام محاسبات پیچیده در زمان کمتر، فرصت بیشتری را در اختیار معمار قرار دهد. این کار باعث می شود تا او آزادانه به بخش‌هایی از طراحی بپردازد که رایانه در آن فاقد کارایی می‌باشد (غریب‌پور، ۱۳۹۳: ۱۲). بنابر دیدگاه لیکلیدر، انسان‌ها انعطاف‌پذیر و خلاق می‌باشند و قادر به فعالیت‌هایی هستند که برای کامپیوتر دشوار است و در مقابل، برخلاف کامپیوترها در برابر محاسبات محدودتر از آن‌ها هستند؛ بنابراین انسان و ماشین می‌توانند در یک زندگی مشترک با هم هم‌زیستی داشته باشند (Licklider, 1960: 4). اما چون مجموع فرایند طراحی مولد با استفاده از الگوریتم‌ها و زبان‌های برنامه‌نویسی محقق می‌گردد؛ نیاز است معماران مدل‌های متفاوتی از آموزش‌های معماری را دریافت نمایند (فاضل و مستغنی، ۱۴۰۰: ۵۶).

پیشینه پژوهش

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تحقیقات مروری پیشین به سه صورت مطالعاتی را که از الگوریتم‌ها در فرایند طراحی مولد بهره جسته‌اند، بررسی نموده‌اند. برخی به‌صورت گسترده تمامی موضوعات را پوشش داده، برخی تنها نوع خاصی از الگوریتم‌ها را در مطالعات مورد توجه قرار داده، و برخی دیگر بر روی یک موضوع خاص از فرایند طراحی تمرکز داشته‌اند. ازآنجاکه هدف مقالهٔ حاضر، بررسی کاربرد انواع الگوریتم‌ها در موضوعات مختلف فرایند طراحی مولد ازطریقِ مروری بر مطالعات گذشته است، در بخش بررسی پیشینهٔ پژوهش، دستهٔ اول مطالعات با دقت بیشتری مورد توجه قرار گرفت و علاوه‌بر تحلیل نتایج آن‌ها در شناساییِ کاربرد الگوریتم‌ها، دسته‌بندی موضوعی ارائه‌شده توسط ایشان نیز بررسی شد.

اروین (۲۰۱۳) و وسترمن و اروین (۲۰۱۹)، به معرفی کاملی از تحقیقاتِ انجام‌گرفته در حوزهٔ فرایند طراحی مولد مبتنی‌بر ای آی پرداختند. تحقیقات مذکور به‌دنبال استفاده از انواع الگوریتم‌ها و مدل‌های جایگزین[۱۶]، در یافتن بهینه‌ترین پاسخ جهت طراحی و ساخت ساختمان‌های پایدار بودند. مؤلفه‌های مورد بررسی در مطالعات توسط ایشان عبارت‌اند از: تولید ایده و یافتن بهترین کانسپت، بهینه‌یابی در متریال و روش‌های ساخت‌وساز، ملاحظات انرژی و نور روز، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهره‌برداری و چرخهٔ حیات بنا و انرژی نهفته. ازنظرِ اروین پرکاربردترین الگوریتم‌ها در طراحی معماری، مجموعه الگوریتم‌های بهینه‌یابی و جست‌وجو ازجمله الگوریتم‌های تکاملی و تبرید شبیه‌سازی‌شده می‌باشند.

پنا و همکارانش (۲۰۲۱) در مقالهٔ جامعی، مطالعاتی را که در زمینهٔ فرایند طراحی مولد انجام گرفته بودند، بررسی کردند. آن‌ها با اشاره به این‌که طراحی معماری مسئله‌ای غامض و پیچیده است، به دنبال یافتن جایگاه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پاسخ به مسئله معماری در فرایند طراحی مولد بودند. ایشان مطالعات مورد نظر را در موضوعات جست‌وجوی ایده، یافتن کانسپت‌های فرمی، طراحی جانمایی فضایی[۱۷]، طراحی پلان[۱۸] و طراحی نما دسته‌بندی نمودند. نتایج مقاله آن‌ها نیز نشان می‌دهد الگوریتم‌های بهینه‌یابی و جست‌وجو و به‌طور خاص الگوریتم ژنتیک ساده و چندهدفه، پرکاربردترین الگوریتم‌ها در طراحی معماری می‌باشند. در مطالعات اخیر ترکیب آن‌ها با شبکهٔ عصبی مصنوعی نتایج بهتری را ایجاد نموده است.

بادوگه و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعهٔ خود به‌طور بسیار مفصلی به تمام جنبه‌های معماری و ساخت‌وساز پرداختند

و کاربرد گسترهٔ متنوعی از الگوریتم‌ها را در فازهای مختلف طراحی معماری، سازه و ساخت مورد کنکاش قرار دادند. موضوعات عنوان‌شده در بخش طراحی معماری مقالهٔ آن‌ها، عبارت بودند از طراحی پلان و نما، طراحی جانمایی، ترکیب فضاهای داخلی، تولید فرم اولیه و ارائه کانسپت. ازنظرِ ایشان الگوریتم‌های تکاملی، تبرید شبیه‌سازی‌شده و سلول‌سازی خودکار[۱۹]، در بهینه‌یابی فرم و پلان و ملاحظات پایداری و انرژی کاربرد فراوان دارند، ولی در فرایند دستیابی به طرح معماری و تولید پلان، نما و حجم، الگوریتم‌های یادگیریِ عمیق بسیار پرکاربرد هستند.

بولک و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعهٔ خود با دسته‌بندی موضوعات مختلف طراحی معماری در مطالعات پیشین، کاربرد انواع الگوریتم‌ها و بیشترین زبان برنامه‌نویسی مورد استفاده را در مطالعات از منظر آماری بیان کردند. موضوعات عنوان‌شده در مقالهٔ ایشان عبارت بودند از فرم‌یابی[۲۰]، جانمایی، طراحی نما با اهداف چندمنظوره، بازسازی و بهبود عملکرد ساختمان. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری ماشین بیشترین کاربرد را در معماری داشته‌اند. همچنان ایشان اذعان کردند که استفاده از تک‌الگوریتم به‌تنهایی نمی‌تواند به‌طور مطلوب مسائل طراحی معماری را حل نماید و با ترکیب الگوریتم‌ها با یکدیگر نتایج بهتری حاصل می‌شود.

بررسی این مطالعات نشان‌دهندهٔ گستردگی موضوعاتی است که محققان در پژوهش خود به آن‌ها پرداخته‌اند. بااین‌وجود کاربرد هوش مصنوعی در مراحل اولیهٔ شکل‌گیری طرح معماری، به‌عنوان مرحله‌ای مهم در شروع پروسهٔ طراحی، مغفول مانده است. مراحل اولیهٔ طراحی معماری مه‌آلود و ناخوانا می‌باشد و معمار با مؤلفه‌های بی‌شماری روبه‌رو است. در این میان اگر الگوریتم‌های هوش مصنوعی با ماهیتی که برای آن‌ها متصور شده‌اند، بتوانند مسیر معمار را در دستیابی به هدفی که دارد روشن سازند، می‌توان گفت پارادایم نوینی از ترکیب معماری و هوش مصنوعی شکل گرفته است (Rodrigue, 2014: 145). همچنین تحقیقات مذکور به‌طور دقیق نوع الگوریتم را عنوان نکرده و چالش‌های استفاده از آن‌ها را در موضوعات فرایند طراحی بررسی ننموده‌اند. بر این مبنا مطالعهٔ حاضر سعی می‌کند با پر کردن خلأ پژوهش‌های ذکرشده، تمرکز خود را بر موضوعات معماری در مراحل اولیهٔ شکل‌گیری طرح گذارد و با کنکاش در تحقیقات چند دههٔ اخیر، نوع دقیق الگوریتم‌های مورد استفاده را به‌همراه چالش‌هایی که محققان با آن‌ها روبه‌رو بوده‌اند، بیان کند. در جدول ۱ علاوه‌بر تحقیقات فوق، دیگر مطالعات مروری که تنها کاربرد یک الگوریتم و یا تنها یک موضوع خاص را بررسی کرده‌اند، آورده شده است.

جدول ۱. پژوهش‌های مروری انجام‌گرفته در حوزهٔ کاربرد الگوریتم‌ها در طراحی معماری

مطالعات	موضوع	الگوریتم	ضعف‌های پژوهشی
Homayouni (2000)	جانمایی فضایی	بهینه‌یابی- گراف تئوری	معرفی نشدن دقیق الگوریتم‌ها
Gen & Lin (2009)	جانمایی فضایی	تکاملی	بررسیِ صرف یک موضوع و یک مجموعه الگوریتم
Dutta & Sarthak (2011)	جانمایی فضایی	تکاملی	بررسیِ صرف یک موضوع و یک مجموعه الگوریتم
Evins (2013)	فرایند طراحی و ساخت ساختمان‌های پایدار	الگوریتم‌های بهینه‌یابی	بی‌توجهی به فرم‌یابی، تمرکز بر ملاحظات پایداری
Westermann & Evins (2019)	فرایند طراحی و ساخت ساختمان‌های پایدار	روش‌های احتمالی	تمرکز بر ملاحظات پایداری و صنعت ساخت
Pena et al. (2021)	فرایند طراحی	تکاملی- خودکارسازی سلولی، یادگیری عمیق- مدل‌های ریاضی	معرفی نشدن الگوریتم‌ها
Momade et al. (2021)	صنعت ساخت‌وساز	یادگیری عمیق- یادگیری ماشین- روش‌های منطق‌بنیان- تکاملی	گستردگی موضوعات، تمرکز بر صنعت ساخت و استفاده از ابزارها
Abioye et al. (2021)	صنعت ساخت‌وساز	یادگیری ماشین- بینایی ماشین- پردازش زبان طبیعی- بهینه‌یابی- روش‌های دانش‌بنیان	گستردگی موضوعات، تمرکز بر صنعت ساخت

ادامه جدول ۱. پژوهش‌های مروری انجام‌گرفته در حوزهٔ کاربرد الگوریتم‌ها در طراحی معماری

مطالعات	موضوع	الگوریتم	ضعف‌های پژوهشی
Baduge et al. (2022)	فرایند طراحی و ساخت	یادگیری ماشین- یادگیری عمیق- مدل‌های ریاضی	بررسیِ صرف الگوریتم‌های یادگیری عمیق
Weber et al. (2022)	طراحی جانمایی	الگوریتم‌های تکاملی، دانش‌بنیان، بهینه‌یابی	تمرکز بر یک موضوع از طراحی معماری
Fernberg & Chamberlain (2023)	طراحی منظر	یادگیری ماشین، روش‌های دانش‌بنیان، بینایی ماشین	ارائه یک دسته‌بندی کلی و بی‌توجهی به معرفی الگوریتم‌های مطلوب
Bölek et al. (2023)	موضوعات مختلف طراحی	یادگیری عمیق- یادگیری ماشین، تکاملی	گستردگی موضاعات، بررسی الگوریتم‌های تکاملی و بی‌توجهی به معرفی الگوریتم‌های زیرمجموعهٔ آن

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

روش پژوهش

روش پژوهش حاضر مروری با رویکرد بررسی آخرین وضعیت است. به‌طور کلی هنگامی‌که پژوهشگر به دنبال یافتن تمامی مطالب مرتبط با یک موضوع خاص است، از این روش استفاده می‌کند. او با جمع‌آوری، مرتب‌سازی، تحلیل و تلخیص، اطلاعات موجود در مطالعات و پژوهش‌های گذشته و فعلی را استخراج می‌نماید سپس با انتخاب رویکرد مذکور، تحلیل جامع و به‌روزی از وضعیت فعلی یک حوزهٔ خاص ارائه می‌دهد. از فواید این روش، شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و پیشنهاد ایده‌های جدید برای تحقیقات بعدی می‌باشد. چنین تحقیقاتی جزء منابع ارزشمندی برای دانشگاهیان، متخصصان و سیاست‌گذارانی است که به‌دنبال درک وضعیت فعلی دانش در یک حوزهٔ خاص هستند (Grant & Booth, 2009: 101).

باتوجه‌به این توضیحات، به‌منظور دستیابی به مطالعاتی که الگوریتم‌های هوش مصنوعی را به‌صورت عملی در موضوعات مختلف طراحی مورد آزمایش قرار داده‌اند، سه معیار اصلی در نظر گرفته شد: عبارت‌های جست‌وجو، بازهٔ زمانی مطالعات، و اعتبار مطالعات. جست‌وجوی اولیه که بر عنوان، چکیده و روش تحقیق متمرکز بود، مبتنی‌بر دانش نویسندگان و تجزیه‌وتحلیل اولیه ادبیات موضوع در حوزهٔ هوش مصنوعی و معماری آغاز شد. این عبارت‌ها شامل ترکیبی از کلمات تخصصی هوش مصنوعی با دانش معماری بودند: («هوش مصنوعی» یا «ای آی»)، یا («ای آی» و «شبکه‌های عصبی») یا («ای آی» و «یادگیری ماشینی») یا («ای آی» و «یادگیری عمیق») یا («خودکارسازی» و«الگوریتم‌های تکاملی») یا («طراحی مولد») در ترکیب با («ایده» یا «کانسپت معماری») یا («فرایند طراحی معماری») یا («فرم‌یابی») یا («طراحی پلان») یا («طراحی جانمایی») یا («طراحی حجم» یا «نما»).

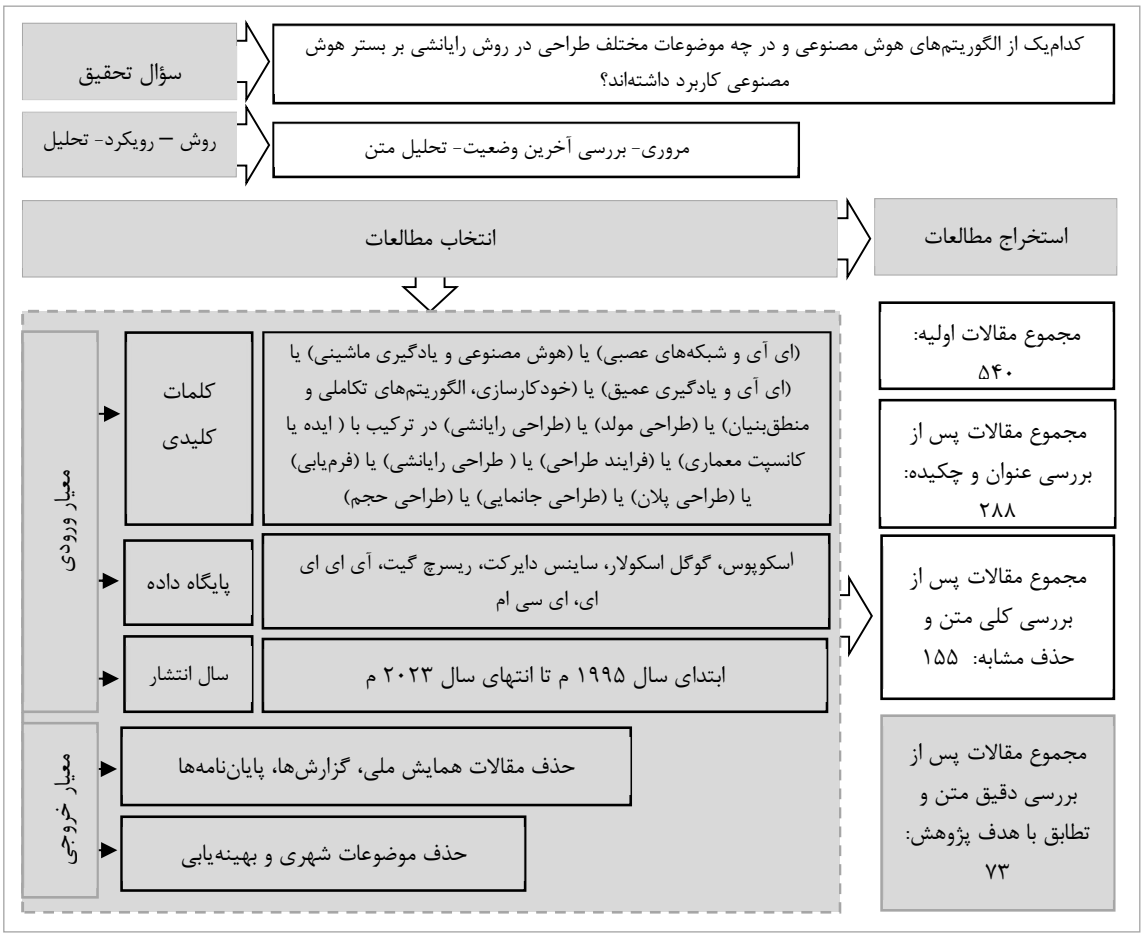
معیار دوم بازهٔ زمانی بود. باتوجه‌به رویکرد پژوهش که بررسی مطالعات اخیر است و همچنین با در نظر گرفتن تعلق این گسترهٔ پژوهشی به تکنولوژی‌های نوین، شروع بازهٔ زمانی مطالعات به سال‌های انتهایی قرن بیستم محدود شد. چراکه بسیاری از سؤالات تحقیق در مطالعات انجام‌گرفتهٔ قبل از دهه ۹۰ به‌دلیل رشد تکنولوژی در سه دههٔ اخیر دیگر چالش محسوب نمی‌شدند. فناوری‌های نوین هوش مصنوعی به بسیاری از آن‌ها پاسخ داده است. بنابراین بازهٔ زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ انتخاب گردید. معیار آخر نیز مرتبط با اعتبار مطالعات بود که می‌بایست در نشریات و کنفرانس‌های برتر و یا در کتبی که انتشارات معتبر دارند، منتشر شوند و به‌صورت آنلاین در دسترس باشند. جست‌وجو در پایگاه‌های اصلی مانند ساینس دایرکت، گوگل اسکولار، ریسرچ گیت، اسکوپوس و سایت‌های برتر حوزهٔ تکنولوژی مانند آی ای ای و آی سی ام[۲۱] انجام گرفت. در مرحله اول تعداد ۵۴۰ مطالعه یافت شد که مقالات همایش‌های ملی، گزارش‌ها و نیز پایان‌نامه‌های نامعتبر نیز از سیر مطالعه خارج و باقی تحقیقات وارد پروسه تحلیل خوانی کل متن و انتخاب نهایی شدند. پس از بررسی دقیق عنوان، فرضیات، روش انجام و یافته‌های پژوهش ها، آن‌ها مجدد مورد بازنگری قرار گرفته و درنهایت ۷۳ مطالعه وارد پروسه مرور شدند (شکل ۵).. به‌منظور نظم‌بخشی و تحلیل دقیق‌تر محتوای مطالعات منتخب، موضوعات طراحی مورد استفاده در این تحقیقات به شش دسته تقسیم شده‌اند که عبارت‌انداز: ایده و کانسپت، فرم‌یابی، حجم بنا، طراحی سقف و نما، جانمایی و پلان. این تقسیم‌بندی موضوعی با نگاهی به مطالعات مروری عنوان‌شده در پیشینهٔ پژوهش و پس از بررسی مطالعات منتخب نهایی، به دست آمده است. پس از تقسیم‌بندی، داده‌های تخصصی هر دسته از مطالعات، شامل

موضوع طراحیِ مورد مطالعه، نوع الگوریتم مورد استفاده، روش انجام پژوهش و نتیجهٔ حاصل، استخراج و مورد تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها

یافته‌های پژوهش در سه بخش قابل بیان هستند. ابتدا پیرو ارائه یک نگاه کلی از اهدافی که پژوهشگران به‌دنبال تحقق آن‌ها در مطالعات خود بوده و روش‌ها و تکنیک‌هایی که برای این منظور استفاده کرده‌اند، جدول ۲ ارائه گشت. در این جدول، مطالعات باتوجه‌به نقشه دانش هوش مصنوعی (شکل ۲) دسته‌بندی شده‌اند. باتوجه‌به یافته‌ها در این بخش می‌توان اذعان داشت که بیشترین اهدافی که محققان درراستای دستیابی به فرایند طراحی مولد مبتنی‌بر ای آی به‌دنبال تحقق آن بوده‌اند، برنامه‌ریزی، به مفهوم توانایی دستیابی به هدف مشخص ازطریقِ چیدمان درست عوامل و ارتباطات، به معنی توانایی فهم متقابل و برقراری ارتباط است. این دو هدف در اکثریت قریب به اتفاق مطالعات توأمان در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در مطالعات مورد بررسی، روش‌های منطق‌بنیان و دانش‌بنیان مورد استفاده قرار نگرفتند در مقابل تکنیک‌های جست‌وجو و بهینه‌یابی بیشترین کاربرد را داشتند.

در قسمت دوم یافته‌ها، باتوجه‌به رویکرد پژوهش که در بخش روش اشاره شد و به‌منظور شناسایی روند توجه محققان به کاربرد الگوریتم‌ها در طراحی معماری، نمودارهای تحقیق ارائه می‌گردد. کنکاش در موضوع و اهداف مطالعات نشان داد در دهۀ پایانی قرن بیستم و سال‌های آغازین بعدی، تمایل محققان به بهره‌گیری از الگوریتم‌ها در مرحلۀ کانسپت، کشف ایده و فرم‌یابی بیشتر از دیگر موضوعات عنوان‌شده بوده است (شکل ۶). در این میان، طراحی پلان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین بخش‌های طراحی همواره مورد توجه بوده است. در دهۀ اخیر در کنار آن، یافتن حجم مناسب نیز تبدیل به بیشترین موضوع مورد نظر محققان گشته است. در بررسی فراوانی موضوعی، با نگاهی به شکل ۷ می‌توان دریافت که پس از عناوین حجم و طراحی پلان، تحقیقات پیرامون یافتن فرم کلی و نیز طراحی سقف و نما به‌عنوان مجموعه تلاش‌هایی جهت دستیابی به پوستۀ معماری، موضوعات بعدی مورد



شکل۵. نمودار فرایند استخراج مطالعات (نگارندگان، ۱۴۰۲)

جدول۲. دسته‌بندی مطالعات بر مبنای اهداف و تکنیک‌های هوش مصنوعی

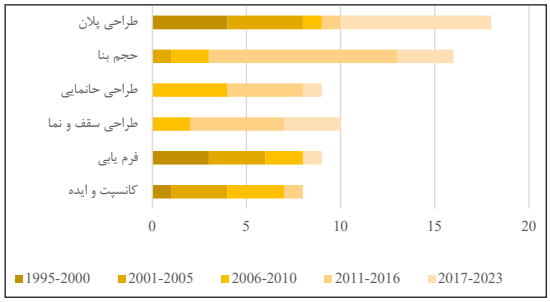
(نگارندگان، ۱۴۰۲)

		منابع		
اهداف هوش مصنوعی	استدلال	Von Neumann (1951Yeh (2006), Liu & et al (2007),Von Mammen & et al (2008), Skavara (2009) Merrell & et al (2010), Chatzikonstantinou & et al (2017), As & et al (2018)Agirbas (2019) Chaillou (2019). Si& et al (2019).) Hu & et al (2020)		
	دانش	Von Neumann (1951) Yeh (2006), Liu & et al (2007),Von Mammen & et al (2008), Skavara (2009) Merrell & et al (2010), Chatzikonstantinou & et al (2017), As & et al (2018)Agirbas (2019) Chaillou (2019). Si& et al (2019).) Hu & et al (2020)		
	برنامه‌ریزی و ارتباطات	Lin & Gerber (2014) Jin & Jeong (2014) Araghi& Stouffs, (2015) Ekici & et al (2016) Herr & Ford (2016) Konis& et al (2016) Cubukcuoglu& et al. (2016) Dino, I. G. (2016) De Almeida& et al (2016) Song& et al (2016) Zaremba (2016) Zhang& et al (2016) Guo & Li (2017) Karaman & et al (2017) Si& et al (2019) Nisztuk & Myszkowski (2019) Fang & Cho (2019) Cubukcuoglu & et al 2019) Agirbas (2019)	Rafiq & et al (2005) Malkawi & et al (2005) Wong& et al (2009) Herr& et al (2016) Liu& et al (2007) Von Mammen& et al (2008) Pugnale& et al (2007) Doulgerakis (2007) Skavara (2009) Inoue & Takagi (2009) Gaspar-Cunha& et al (2011) Gagne & Andersen (2010) Merrell& et al (2010) Tuhus-Dubrow & Krarti (2010) Wen& et al (2010) Caldas (2011) Turrin& et al (2011) Li (2012) Rodrigues & et al (2013)	Frazer (1995) Gero & et al (1995) Coates& et al (1996) Cvetkovic& et al (1999) Funes& et al (1999) Maher& et al (1996) Rosenman& et al (1999) Rafiq& et al (2003) Park & et al (1999) Gero & et al (2000) Graham& et al (2001) Miles & et al. (2001) Grierson & et al (2002) Krawczyk (2002) Michalek& et al (2002) Von Buelow, (2002) Jackson (2002) Anzalone & Clarke (2003) Packham. (2003) Rafiq& et al (2003)	
روش‌های هوش مصنوعی	ادراک	Von Mammen & Jacob (2008)Liu& et al (2007)Agirbas (2019)		
	منطق‌بنیان	-		
	دانش‌بنیان	-		
	احتمالی	Merrell& et al (2010)		
	هوش تجسم‌یافته	Von Mammen & Jacob (2008)Liu& et al (2007)Agirbas (2019)		
	یادگیری ماشینی	Von Neumann (1951) Yeh (2006) Skavara (2009) Chatzikonstantinou & Sariyildiz (2017) As & et al (2018) Si& et al (2019) Chaillou (2019) Hu & et al (2020)		
روش‌های هوش مصنوعی	جست‌وجو و بهینه‌یابی	Konis& et al (2016) Dino (2016) De Almeida& et al (2016) Rian & Asayama (2016) Song& et al (2016) Zaremba (2016) Zhang& et al (2016) Guo & Li (2017) Karaman & et al (2017)	Gaspar-Cunha& et al (2011) Turrin& et al (2011) Caldas (2011) Rakha& Nassar (2011) Li (2012) Rodrigues& et al (2013) Lin & Gerber (2014) Jin & Jeong (2014) Ugurlu& et al (2015)	Malkawi & et al (2005) Doulgerakis (2007) Liu& et al (2007) Von Mammen & Jacob (2008) Inoue & Takagi (2009) Wong & Chan (2009) Gagne & Andersen (2010(

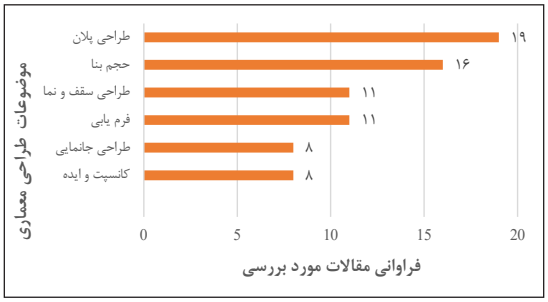
ادامه جدول ۲. دسته‌بندی مطالعات بر مبنای اهداف و تکنیک‌های هوش مصنوعی

		منابع		
روش‌های هوش مصنوعی	جست‌وجو و بهینه‌یابی	Tuhus-Dubrow & Krarti (2010) Wen& et al (2010) Gaspar-Cunha& et al (2011) Tuhus-Dubrow & Krarti (2010) Wen& et al (2010)	Araghi & Stouffs (2015) Araghi & Stouffs (2015) Yi & Kim (2015) Ekici & et al (2016)	Si& et al (2019) Nisztuk & Myszkowski (2019 Fang & Cho (2019) Cubukcuoglu & et al (2019)

(نگارندگان، ۱۴۰۲)



شکل ۶. فراوانی مقالات به‌ترتیب سال انتشار (نگارندگان، ۱۴۰۲)



شکل ۷. فراوانی موضوعات در مقالات مورد بررسی (نگارندگان، ۱۴۰۲)

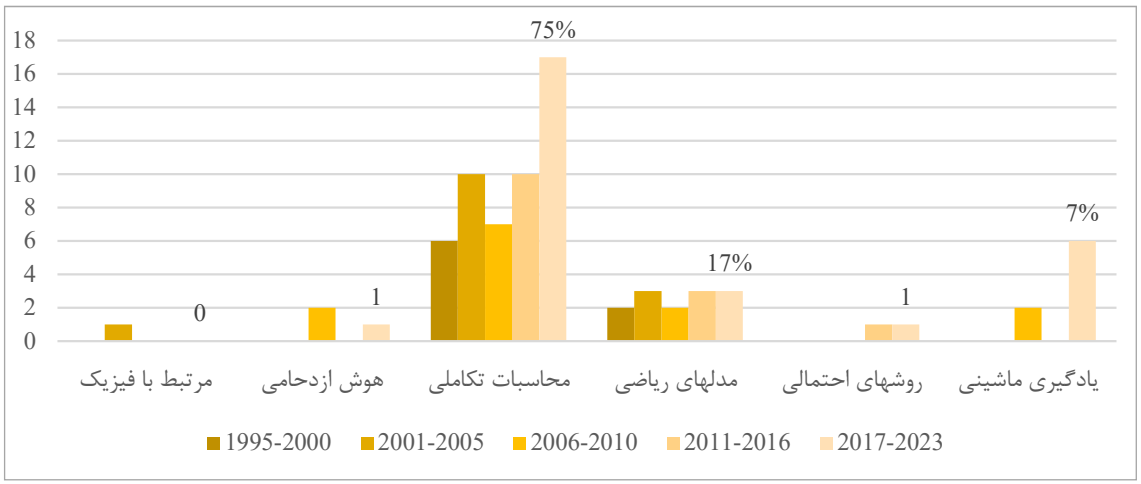
توجه محققان هستند. طراحی جانمایی نیز در ادامهٔ روند تحقیقات در طول زمان به طراحی پلان تغییر رویه داده است. ازاین‌رو مطالعات در این موضوع بخش کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت مطالعات مرتبط با ایده و یافتن کانسپت معماری قرار دارند که همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد در سال‌های اولیه مورد توجه بوده و در ادامه جای خود را به تحقیقات در زمینهٔ مسائل دقیق‌تر در فرایند طراحی مانند پلان و نما داده‌اند.

در بخش سوم، جدول ۳ ارائه می‌گردد که در آن، انواع الگوریتم به‌کاررفته در موضوعات طراحی معماری، دسته‌بندی شدند. این الگوریتم‌ها شامل دو دستهٔ کلی بهینه‌یابی و جست‌وجو و روش‌های آماری هستند. بررسی مطالعات نشان داد که جست‌وجو و یافتن بهینه‌ترین راه‌حل، از مهم‌ترین اهدافی تلقی می‌شود که محققان به‌دنبال آن بودند. آن‌ها می‌خواستند با ترکیب هوش مصنوعی و معماری، به فرایند دستیابی به این پاسخ سرعت و دقت بخشند؛ ازاین‌رو بهره‌گیری از تکنیک‌های جست‌وجو و بهینه‌یابی بیشترین درصد را در مطالعات به خود اختصاص داده است. الگوریتم‌هایی که از این روش استفاده می‌کنند بسیار گسترده هستند؛ اما سازوکار اصلی آن‌ها کنکاش در میان انبوهی از پاسخ‌ها و یافتن بهترین آن‌ها منطبق بر هدف مورد نظر است (Ekici et al., 2019: 359).

آن‌ها خود به سه دستهٔ اصلی تکاملی، مرتبط با فیزیک، و هوش‌جمعی[۲۲] تقسیم‌بندی می‌شوند. بررسی مطالعات در این پژوهش نشان داد بالغ بر ۷۵ درصد تحقیقات در طول سه دههٔ اخیر از تکاملی‌ها در هر شش موضوع طراحی استفاده کرده‌اند (شکل ۸). چراکه این الگوریتم‌ها در بررسی تمامی گزینه‌های ممکن و دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ، بسیار قدرتمند عمل می‌کنند. آن‌ها قادرند در هر تکرار از فرایند تکامل به‌صورت تدریجی کیفیت جواب‌های تولیدشده برای یک مسئله را بهبود بخشیده و در نهایت یک جواب بهینه ارائه دهند (Nisztuk, & Myszkowski, 2019: 63). مهم‌ترین الگوریتم این مجموعه ژنتیک می‌باشد که باتوجه‌به جدول ۴، تنها ۱۷ مقاله در میان مقالاتی که از تکاملی‌ها استفاده کرده‌اند، الگوریتم ژنتیک را به‌تنهایی به کار برده‌اند. دیگر محققان سعی نموده تا با استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه و نیز با ترکیب دیگر الگوریتم‌ها مانند تبرید شبیه‌سازی‌شده (Michalek et al., 2002)، مدل‌های ریاضی (Jackson, 2002)، شبکه‌های عصبی (Skavara, 2009:)، چالش‌های ژنتیک ساده را رفع کرده تا به پاسخ‌های بهینه‌تری دست یابند.

الگوریتم‌های هوش جمعی از دیگر الگوریتم‌های این مجموعه هستند که با سازوکاری الهام‌گرفته از طبیعت می‌توانند ازطریقِ جست‌وجوی تعاملی با محیط، علاوه‌بر

کشف الگوها، موفق‌ترین پاسخ‌های احتمالی را نیز بیابند (Agirbas, 2019: 140). ازاین‌رو در مطالعات معماری مورد توجه قرار گرفته‌اند. در تحقیقات مورد بررسی تنها سه مقاله صرفاً از این روش استفاده کرده‌اند (Agirbas, 2019)؛ (Liu et al., 2007)؛ (Von Mammen & Jacobs, 2008). این روش در دیگر مقالات به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر، در ترکیب با دیگر الگوریتم‌ها یا به‌صورت چندهدفه به کار رفته است. در نهایت نکتهٔ قابل توجه آن‌که استفاده از الگوریتم‌های مرتبط با فیزیک تنها در یک مقاله مشاهده شد که در ترکیب با الگوریتم ژنتیک به‌دنبال طراحی پلان بود (Michalek et al., 2002). این نشان می‌دهد که الگوریتم‌های این گروه در موضوعات طراحی معماری رایانشی



شکل۸. انواع الگوریتم‌های مورد استفاده در مطالعات همراه با درصد به‌تفکیک سال انتشار (نگارندگان، ۱۴۰۲)

جدول۳. الگوریتم‌های پرکاربرد در مطالعات معماری و هوش مصنوعی

روش‌ها	زیرروش	الگوریتم‌ها	هدف مطالعات	چالش‌ها
بهینه‌یابی و جست‌وجو	تکاملی	الگوریتم ژنتیک (GA) برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) الگوریتم ژنتیک چند هدفه (MOGA) الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تجزیه (MOEA) الگوریتم ژنتیک تعاملی خوشه بندی و مصورسازی (IVCGA) الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) بهینه سازی فازی چندهدفه تکاملی تفاضل (BGRID) الگوریتم ژنتیک ساختاریافته (SGA) تکامل تفاضلی (ED)	-یافتن پاسخ در مسائلی با متغیرهای فراوان مانند طراحی معماری، - جست‌وجو برای بهینه‌ترین کانسپت، - پیکربندی کانسپت اولیه، - بهینه‌سازی طراحی موجود.	- گیر کردن در بهینهٔ محلی(Gagne & Andersen,2010) - دارای ماهیتی تصادفی و راندوم عمل کردن (Gaspar-Cunha & et al ,2011) - با بالا رفتن تعداد دفعات الگوریتم به قوانین بی‌توجه می‌شود (Hensel & et al , 2004) - ضعف در ارائه پلان‌های منحنی (Rakha & Nassar, 2011) - عموماً قادر به ارائه راه‌حل برای طبقات نمی‌باشد (Pena & et al, 2021) - دشواری در تولید طرح‌های غیرمتعامد در یک سیستم شبکه‌ای (Doulgerakis,2007) - موضوعات فرایند طراحی را نمی‌توان به‌طور کامل با زبان‌های الگوریتمی بیان نمود (Guo & Li, 2017)
	مرتبط با فیزیک	الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده (SA)		
	هوش جمعی	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO)		
		هوش ازدحامی ذرات(PSO)		

ادامه جدول۳. الگوریتم‌های پرکاربرد در مطالعات معماری و هوش مصنوعی

روش‌ها	زیرروش	الگوریتم‌ها	هدف مطالعات	چالش‌ها
روش‌های آماری	روش‌های احتمالی (مبتنی‌بر ریاضیات)	خودکارسازی سلولی(CA)	- امکان ایجاد یک طرح بسیار پیچیده از اجزا و ورودی‌های ساده - طراحی اکتشافی در زمینهٔ ترکیبات بصری و الگوها - دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ ازطریقِ بررسی تمامی احتمالات از روابط بین متغیرها - نتیجه‌گیری مطلوب از چگونگی توزیع احتمالی فضاها	- ارجحیت فرایند حل مسئله نسبت به جواب مسئله (Ekici & et al ,2016) - دشواری در ترکیب تعاملی با دیگر الگوریتم‌ها و مصورسازی بهینه (Malkawi& et al, 2005) - ضعف در دستیابی به پاسخ قطعی در طراحی مولد فرم (رهبر، ۱۳۹۷)، - عدم پاسخ‌گویی مستقیم سیستم به محدودیت‌ها و وظیفهٔ خواسته‌شده (Gaspar-Cunha & et al ,2011) - راه‌حل‌های ارائه‌شده به‌عنوان کانسپت اولیه مورد قبول هستند نه پاسخ نهایی (Herr, C. & Ford, 2016) - نیازمند سنجش در مقیاس واقعی (Rian & Asayama, 2016)
		ال- سیستم (L-system)		
		فرکتال (Fractal)		
		شبکه بیزین (Bayesian Network)		
	یادگیری ماشینی	شبکهٔ مولد متخاصم (GAN)	- دستیابی به فرایندی خودکار ازطریقِ آموزش الگوریتم - ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی و بهینه‌یابی - دستیابی به طرحی مطلوب به‌لحاظِ ساختاری و زیبایی - سرعت بخشیدن به فرایند بررسی احتمالات طراحی	- درصورت کم بودن داده‌ها، با خطاهای آماری مواجه می‌شوند (باباخانی، ۱۴۰۱) - عدم توانایی در ترسیم سه نما (رهبر، ۱۳۹۷) - دشواری در تولید طرح‌های خلاقانه (Pena & et al, 2021) - ضعف در توانایی تبدیل داده‌های کیفی به زبان ماشین (As & et al, 2018)
		شبکهٔ عصبی مصنوعی ((ANN		
		شبکهٔ عصبی بازگشتی (RNN)		
		شبکهٔ عصبی عمیق ((DNN		
		شبکهٔ عصبی گراف (GNN)		
		شبکهٔ کانولوشنی عصبی (CCN)		

(نگارندگان ۱۴۰۲)

کاربرد چندانی نداشته‌اند. روش‌های آماری، الگوریتم‌های مبتنی‌بر مدل‌های ریاضی هستند که در دو دستهٔ روش‌های احتمالی و یادگیری ماشینی تقسیم‌بندی می‌شوند. دستهٔ اول با اتکا به ریاضیات و روش های احتمالات، امکان دستیابی به گسترهٔ وسیعی از پاسخ‌های مبتنی‌بر اهداف زیبایی‌شناسانه را در معماری فراهم می‌آورند؛ اما لزوماً بهینه‌ترین پاسخ را ارائه نمی‌دهند (Pena et al., 2021: 25). بااین‌وجود در جهت یافتن فرم و ترکیبات حجمی معمارانه، چه به‌صورت تنها و چه در ترکیب با دیگر الگوریتم‌ها کاربرد داشته‌اند؛ اما در سال‌های اخیر کمتر مورد توجه بوده‌اند. آخرین مقاله در سال ۲۰۱۶ منتشر شده است (Herr & Ford 2016). الگوریتم‌های یادگیری ماشینی به‌خصوص شبکه‌های عصبی مصنوعی از دیگر الگوریتم‌هایی هستند که در دهۀ اخیر پژوهشگران بسیار از آن‌ها استقبال کردند؛ آن‌ها نتایج مطلوبی در جهت تولید طرح معماری به دست آورده‌اند. اساس این الگوریتم‌ها یادگیری و آموزش ازطریقِ داده‌های بسیار، به‌منظور استخراج الگوها است تا بتواند به‌صورت خودکار نمونه‌های بعدی را ایجاد کند (Chaillou, 2019: 10). بر این مبنا و باتوجه‌به پیشرفت روزافزون سیستم‌های پردازش در دهۀ اخیر، استفاده از این الگوریتم‌ها در جهت طراحی پلان، بیشتر مورد توجه است. اگرچه همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به‌صورت ترکیبی با دیگر الگوریتم‌ها مانند تبرید شبیه‌سازی‌شده (Yeh, 2006)، با سلول‌سازی خودکار (Skavara, 2009) و تکاملی‌ها (Si, 2019) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

بحث و بررسی

مراحل اولیۀ شکل‌گیری طرح معماری، مبهم و بعضاً سردرگم‌کننده است. در این مرحله معمار با انبوهی داده

مواجه است که سعی می‌کند با تکیه بر اطلاعات دریافتی، دانش و تجربهٔ شخصی و تحلیل خود، مسئله معماری را حل کند. در این فرایند، هوش مصنوعی درصدد است در کنار معمار، بهترین نتیجه را به دست آورد. در این بخش پس از اشاره‌ای کوتاه به مضمون هرکدام از موضوعات مورد بررسی در پژوهش، دربارهٔ یافته‌های مطالعات در هر موضوع بحث خواهد شد.

مجموع مطالعات بررسی‌شده به‌همراه تخصص نویسندگان آن‌ها، موضوع مورد بررسی در مطالعه و نیز هدفی که دنبال می‌کردند، در جدول ۴ آورده شده است.

فرایند اکتشافی کانسپت و ایده: ازآنجایی‌که فرایند طراحی معماری به‌عنوان یک فعالیت حل مسئله در نظر گرفته می‌شود (مطلبی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۱)، معمار همواره در روند طراحی یک محصولِ معماری به‌دنبال یافتن راه‌حل‌هایی برای دستیابی به نتیجه است. ازسوی‌دیگر نمی‌توان برای یافتن نتیجه در امر طراحی از راه‌های رایج جست‌وجو استفاده نمود. چون معماری یک مسئله غامض[۲۳] است که نمی‌توان یک راه‌حل برای یافتن پاسخ پیدا کرد (Rittel & Webber, 1973: 158). بنابراین می‌توان اذعان داشت فرایند طراحیِ معماری در مراحل مختلف به‌دنبال کشف است نه جست‌وجو و در اقدامی اکتشافی مسائل را حل می‌نماید (Logan & Smithers, 1993: 141). این اکتشاف عموماً در مرحلهٔ ایده و کانسپت اتفاق می‌افتد. معمار، فرایند طراحی را با ایده‌های اولیه آغاز می‌کند و در روند پروسهٔ کشف، باقی ایده‌های طراحی فرم، پلان، نما و غیره پدیدار شده و کانسپت‌ها جهت‌دار می‌شوند. بررسی تحقیقات نشان داد که عمده الگوریتم‌های استفاده‌شده در مقالات با این موضوع، زیرشاخهٔ الگوریتم‌های تکاملی هستند که محبوب‌ترین آن‌ها ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک باتوجه‌به ماهیت بهینه‌یابی خود بیشترین تعداد نتیجهٔ بهینه را در مرحلهٔ ایده و کانسپت، و فرم‌یابی و جانمایی‌ها ارائه می‌دهد. ازاین‌طریق معمار می‌تواند باتوجه‌به تمامی‌گزینه‌ها بهترین را انتخاب نماید. بااین‌وجود ماهر و پوون (۱۹۹۶) با ارائه مدل خود مبتنی‌بر الگوریتم ژنتیک با این چالش روبه‌رو بودند که فرایند کشف ازاین‌طریق تا چه زمان ادامه خواهد داشت. بدین معنی که الگوریتم به‌دنبال دستیابی به نتیجه‌ای صددرصدی در مورد تنها یک اصل و قاعده است، یا به دنبال این است که اکثریتِ قریب‌به‌اتفاق اصول و قواعد تعیین‌شده تا حدودی رعایت شوند. بنابراین اذعان داشتند سیستم پیشنهادی آن‌ها نمی‌تواند نتیجهٔ بهینه را ارائه نماید؛ اما قطعاً در یک فرایند اکتشافی قادر است به معمار برای حل مسئله کمک شایانی کند. مرحلهٔ کانسپت و کشف ایده به میزان زیادی با کیفیات در معماری سروکار دارد و نیاز است که این داده‌ها در یک محیط الگوریتمی جامع و با ترکیبی از روش‌ها با هم تحلیل شوند(Mueller & Ochsendorf, 2015: 71). بنابراین تبدیل داده‌های کیفی معماری به زبان عددی یکی از چالش‌های رایج در این پروسه می‌باشد. پارمی و سوتکوویک (۱۹۹۹) با ترکیب الگوریتم ژنتیک و منطق فازی[۲۴]، سیستمی طراحی کردند که قادر است بیانات معمار را به زبان عددی تبدیل نماید. سیستم آن‌ها باتوجه‌به انتخاب معمار از میزان اهمیت موضوع (از بسیار مهم تا خیلی کم) گزینهٔ انتخابی را معیار تصمیم‌گیری قرار می‌دهد و ازاین‌طریق دادهٔ کیفی را آنالیز می‌کند. از دیگر الگوریتم‌هایی که محققان در سال‌های اخیر با استفاده از آن‌ها به نتایج قابل قبولی در این مرحله از طراحی رسیدند می‌توان به هوش ازدحام ذرات (Von Mammen & Jacob, 2008)؛ (Liu et al., 2007)، الگوریتم مبتنی‌بر فرکتال[۲۵] (Wen et al., 2010)، خودکارسازی سلولی (Herr & Ford, 2016)؛ (Herr & Kvan, 2007) و شبکه‌های عصبی (Pérez, 2017) اشاره نمود.

– **رویکردهای فرم‌یابی:** یکی از رویکردهای نوین در طراحی مولد، بهره‌گیری از فرم‌های طبیعت می‌باشد. در این زمینه می‌توان به ریخت‌زایی[۲۶] که یکی از مفاهیم زیست‌شناسی است، اشاره نمود. در مراحل فرم‌یابی، ریخت‌زایی به‌خصوص از نوع بیولوژیکی آن می‌تواند الهام‌بخش معماران باشد؛ چراکه معماری نیز مانند زیست‌شناسی با زمینه تعامل دارد، به‌دنبال رفع چالش‌هایی است که قبلاً در طبیعت حل شده‌اند. همچنین درصدد یافتن ترکیب مفاهیم و تکنیک‌هایی است که مثال‌های آن‌ها در طبیعت موجود می‌باشد، مانند رشد یا سازگاری (رهبر، ۱۳۹۷: ۵۸). در ریخت‌زایی رایانشی در معماری به‌عنوان روش مولد در طراحی، تمامی محدودیت‌ها اعم از جاذبه، هزینه، سایت و فضای اشغال در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این محدودیت‌ها و بهره‌گیری از الگوریتم‌ها، سیستم می‌تواند فرم‌هایی تولید کند که خودساختارگر است و بر مبنای رشد موجودات سازگاری و تکامل می‌یابد (Hensel et al., 2004). بااین‌وجود تصوری که پیش می‌آید این‌که معمار در این فرایند نقشی ندارد. اما به گفتهٔ ترزیدیس، طراحان قادر به محاسبه مسائل عددی پیچیده نیستند و ازطرف‌دیگر فرایندهای محاسباتی حتی تصمیمات ساده را نمی‌توانند توجیه کنند؛ بنابراین رابطهٔ تکمیل‌کننده این دو در کنار هم در نهایت منجر به خلق فرم خواهد شد (Terzidis, 2006: 100). خودکارسازی سلولی از روش‌های طراحی مولد است که مبتنی‌بر مدل‌های ریاضی می‌باشد و در مقالات معماری مورد بررسی این پژوهش به‌منظور فرم‌یابی از آن استفاده

شده است (Herr & Ford, 2016)؛ (Coates et al., 1996)؛ (Anzalone & Clarke, 2003)؛ (Krawczyk, 2002). سیستم سلولی اتوماتیک شامل شبکهٔ منظمی از سلول‌ها است که هر سلول می‌تواند در تعداد محدودی از حالات قرار گیرد. حالت یا وضعیت هر سلول در بازه‌های گسستهٔ زمانی (هر نسل) براساس قوانین تعریف‌شده مشخص می‌شود. این قوانین در هر نسل به وضعیت هر سلول و سلول‌های هم‌جوارش در نسل قبل بستگی دارد (Von Neumann, 1951: 10). کاربست این روش در فرم‌یابی معماری به دو جهت بسیار مورد استقبال است؛ یک آن‌که کیفیت‌های فضایی متفاوتی به وجود می‌آورد که بعضاً از ذهن معمار فراتر می‌باشد (Funes & Pollack, 1999: 402) و دو آن‌که ظرفیت دستیابی به ویژگی‌هایی از طرح را دارد که از ابتدای فرایند طراحی مشخص نیستند و در گذر زمان پدیدار می‌شوند (Cruz et al., 2016). دیگر روش‌های طراحی محاسباتی مولد مانند ال- سیستم[۲۷] و برنامه‌نویسی ژنتیک نیز در ریخت‌زایی ساختمان توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفتند. تمرکز بیشتر این مقالات بر این نکته است که استفاده از روش‌های مذکور را در ابتدای فرایند طراحی برای معمار میسر سازند تا او را در دستیابی به فرم بهینه یاری رساند. به‌عنوان مثال لین و گربر (۲۰۱۴) در جریان تحقیق خود، با استفاده از ترکیبی از تکاملی‌ها ادعا کردند سیستم ارائه‌شده توسط آن‌ها می‌تواند با استفاده از بازخوردهای سریع در فرایند تکرار الگوریتم، شکل کلی بنا را که ازلحاظ انرژی نیز بهینه است، در کمترین زمان پیشنهاد دهد.

– **حجم بنا:** عمده پژوهش‌ها با موضوع یافتن شکل کلی بنا، به‌دنبال دستیابی به بهترین فرم از منظر انرژی، معماری اقلیمی، بهره‌گیری بهینه از نور روز و در نهایت مباحث زیبایی‌شناسی می‌باشند. این مطلب تفاوت آن‌ها با مقالاتی است که تنها به‌دنبال فرم‌یابی ازطریقِ ریخت‌زایی دیجیتال بوده‌اند (Wang et al., 2006)؛ (Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010)؛ (Jin & Jeong, 2014). بدین منظور الگوریتم ژنتیک پراستفاده‌ترین الگوریتم بهینه‌یابی در این تحقیقات بوده است. بااین‌وجود، لی (۲۰۱۲) در مقالهٔ خود به این نتیجه می‌رسد که وقتی بهینه‌ترین فرم مد نظر باشد، الگوریتم ژنتیک به‌تنهایی کارآ نمی‌باشد، بلکه تنها می‌تواند تعدادی از بهترین پاسخ‌ها را در اختیار معمار بگذارد تا او از بین آن‌ها انتخاب نماید. عراقی و استاف (۲۰۱۵) برای فرم‌های مجتمع مسکونی از خودکارسازی سلولی استفاده کردند که نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. پیش‌از آن دینسر و همکاران (۲۰۱۴) سیستم تصمیم‌گیرنده‌ای را به الگوریتم خود، مبتنی‌بر خودکارسازی سلولی اضافه نمودند تا ازاین‌طریق کاربر بتواند با وارد کردن خواسته‌های خود، در طراحی دخیل باشد. در مقالات اخیر، الگوریتم‌های شبکهٔ عصبی مصنوعی محققان را قادر ساخته است که برای ساختمان‌های موجود نیز راهکارهای بهینه‌سازی با کمترین میزان هزینه را پیشنهاد دهند. از فایده‌های این نوع تحقیقات، سنجش عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌یابی بود که برخی مقالات با استفاده از مقایسه بین چندین مورد، در نهایت الگوریتمی که بهترین نتیجه را ارائه نموده بود برای استفاده از ابتدای فرایند طراحی پیشنهاد دادند (Si et al., 2019). خودکارسازی فرایند تولید فرم نیز از موضوعات نوینی است که بیشتر از قبل مورد توجه می‌باشد. چنانچه فنگ و چو (۲۰۱۹) درراستای این هدف، سیستم ترکیبی خودکاری از الگوریتم ژنتیک با روش‌های طراحی پارامتریک و ابزارهای شبیه‌سازی انرژی را پیشنهاد دادند. این سیستم می‌تواند نتیجه‌ای بهینه ازنظر انرژی ارائه دهد.

– **فرم سقف و طراحی نما:** طراحی نما و به‌طور خاص شکل سقف (به‌عنوان عنصر مهم در فرم و نمای معماری) از موضوعات مورد توجه در مقالات مورد بررسی بوده‌اند. هدف اکثر آن‌ها بهره‌گیری بهینه از نور روز و باد مناسب در کنار مباحث زیبایی‌شناسی نما می‌باشد. اسکاوارا (۲۰۰۹) با بهره‌گیری از خودکارسازی سلولی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که می‌توان نمایی طراحی نمود که هوشمندانه خود را با محیط پیرامون وفق دهد و ازاین‌طریق زیبایی بیافریند. الگوریتم‌های تکاملی مانند ژنتیک همچنان پراستفاده‌ترین الگوریتم‌ها در طراحی نما می‌باشند. اما گگنه و اندرسون (۲۰۱۰) در مقالهٔ خود پس از ارائه دو نمونهٔ طراحی‌شده با این الگوریتم‌ها، بیان می‌کنند که ماهیت تصادفی و راندوم عمل کردن آن‌ها و نیز م شکل گیر کردن در بهینهٔ محلی[۲۸] گاه مانع از دستیابی به نتیجه‌ای مطمئن می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌دهند تنها از این روند به‌منظور ارائه گزینه‌های طراحی به معمار استفاده شود و نهایتاً طراحی اصلی توسط معمار و نه ماشین صورت پذیرد. رخا و نَسَر (۲۰۱۱) نیز در مقالهٔ خویش با ارائه هندسه‌ای برای سقف که توانایی دریافت بیشترین نور روز را ازطریقِ المان‌های خود دارد، اذعان می‌دارند که این فرایند الگوریتمیک طراحی می‌تواند گزینه‌های پیشنهادی فراوانی را در اختیار معمار بگذارد ولی در نهایت انتخاب با او می‌باشد. همچنین آگیرباس (۲۰۱۹) در پژوهش خود با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش ازدحام ذرات سعی در خودکارسازی فرایند طراحی نما داشته و با هدف دریافت بیشترین نور روز الگوهایی را به معمار ارائه می‌دهد. برخی محققان در مقالات خود فرایند انتخاب فرم سقف یا نمای نهایی را توسط الگوریتم‌های تصمیم‌گیری در

یادگیری ماشین مانند درخت تصمیم آزموده و نتیجه مطلوبی ارائه داده‌اند (Chatzikonstantinou & Sariyildiz, 2017)؛ (Gaspar-Cunha et al., 2011). در برخی از مقالات به‌جهت ساخت هندسه‌های متنوع برای فرم سقف، علاوه‌بر بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌یابی مانند الگوریتم ژنتیک، از روش‌های مدل‌سازی پارامتریک نیز استفاده شده است (Turrin et al., 2011). این دسته از مقالات به‌دنبال یافتن بهینه‌ترین هندسه برای سقف بودند که قادر باشد با کمترین هزینه ازجمله هزینه‌های سازه، بارهای وارده و نوع مصالح تشکیل‌دهنده، بیشترین فضا را پوشش دهد (Rakha & Nassar, 2011)؛ (Pugnale & Sassone, 2007). اگرچه برخی نیز در جریان تحقیقات این‌چنینی چالش‌های متفاوتی را بیان کردند. ازجمله اینکه این قطعات پارامتریکی که بعضاً از فرم‌های طبیعی الهام گرفته شده‌اند، چگونه می‌توانند به‌لحاظ ساختاری در مقابل بادهای شدید دوام بیاورند؟ یا در هنگام بارش شدید، جمع‌آوری آب‌های سطحی از روی قطعات سقف چگونه خواهد بود؟ همچنین مسائلی مانند رسیدگی، تمیزی و نگهداری پس از ساخت چنین سقف‌هایی نیز مبهم است. پنا و همکاران (۲۰۲۱) در مقالهٔ خود با بیان این چالش‌ها و باتوجه‌به اینکه تمرکز اکثر این مقالات بر استفاده از روش‌های محاسباتی و پارامتریکی در مراحل ابتدایی فرایند طراحی می‌باشد، عنوان می‌کنند که هنوز نمی‌توان به‌طور قطع از این روش‌ها برای طراحی سقف و حتی نمای ساختمان آن‌ها در واقعیت فیزیکی بهره جست و به تحقیقات بیشتر در مقیاس واقعی نیاز دارد. ریان و آسایاما (۲۰۱۶) نیز که در تحقیقات خود موفق شدند با الهام از طبیعت و بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرکتال به طراحی سقف بپردازند، اذعان می‌دارند که این روش برای دریافت نتیجه‌ای مطمئن نیازمند سنجش در مقیاس واقعی می‌باشد و دریافت پاسخ مناسب از تست الگوریتم‌ها نمی‌تواند نتیجهٔ اطمینان‌بخشی تلقی شود.

– **طراحی جانمایی**: طراحی جانمایی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌ها در معماری است که شکل، ابعاد و موقعیت فضاهای داخلی ساختمان را مبتنی‌بر معیارها تعیین می‌کند. روند انجام این کار برای معمار همواره با پیچیدگی‌هایی همراه است چراکه هم‌زمان باید به دو نکتهٔ اصلی توجه داشته باشد. یکی محدودیت‌ها و قیود ابعادی[۲۹] مانند استانداردها، ضوابط، ابعاد و اندازه فضاها، شکل هندسی آن‌ها و غیره؛ دوم محدودیت‌های مکانیت[۳۰] مانند هم‌جواریِ فضاها، روابط بین آن‌ها و سلسله مراتب فضایی (Homayouni, 2000: 1). این دو نکته خود به عوامل عینی و غیرعینی بستگی دارند. عوامل عینی عموماً با داده‌های کمّی و عددی بیان می‌شوند و عوامل غیرعینی مربوط به ذهنیت معمار، خواسته‌های کاربر و داده‌های کیفی هستند (De Almeida et al., 2016). البته باید توجه داشت این عمل با طراحی پلان متفاوت است که در عنوان بعدی به مقالات مرتبط با آن پرداخته می‌شود. همچنین این عنوان لزوماً به معنای قرارگیری فضاها در داخل یک پلان یا سایت معماری نمی‌شود، بلکه می‌تواند بیانگر جانمایی کاربری‌های متفاوت شهری در یک منطقهٔ مشخص باشد. اما همان‌طور که در قسمت روش اشاره شد، مقالات با عناوین طراحی شهری در این بررسی حذف شده‌اند. تحقیقات در این زمینه کاربری‌های متفاوتی ازجمله مسکونی، رستوران، اداری، کتابخانه و بیمارستان را در بر می‌گیرند. بیشتر مقالات به‌دلیل یافتن بهینه‌ترین پاسخ برای کنار هم قرار دادن فضاها و حل روابط بین آن‌ها، از الگوریتم‌های محاسبات تکاملی استفاده کرده‌اند. عمده چالش این مقالات به‌دلیل ماهیت این الگوریتم‌ها بود که تعداد فضاهای کمی را می‌توانستند ازاین‌طریق در یک پلان جانمایی کنند. همچنین با افزایش فضاها، الگوریتم‌ها تصادفی عمل می‌کردند و از قواعد و ضوابط تعیین‌شده برای فضاها (مثلاً ابعاد استاندارد یک اتاق خواب) خارج می‌شدند. بدین‌ترتیب برخی از مقالات با عطف به این موضوع و در جریان ارائه راه‌حل برای جانمایی فضایی و مبلمان با ترکیب الگوریتم‌ها و تکنیک‌های دیگر مانند ماتریس مجاورت، منطق فازی، گراف و درخت‌های تصمیم‌گیری نتایجی به‌مراتب بهتر از الگوریتم‌های پایه مانند الگوریتم ژنتیک دست یافته‌اند (Cubukcuoglu et al., 2016)؛ (Ugurlu et al., 2015)؛ (Wong & Chan, 2009). به‌عنوان مثال وونگ و چان (۲۰۰۹)، برای حل روابط توپولوژیک و هندسی بین فضاها از گراف‌ها و تکاملی‌ها استفاده کردند که به‌نوعی مشابه دیاگرام‌های حرکتی هستند که در فرایند طراحی رایج معمار آن‌ها را ترسیم می‌کند. اما محدودیت تعداد فضا ازجمله چالش‌هایی بود که با آن روبه‌رو بودند. همچنین یِه (۲۰۰۶)، به‌منظور بررسی ایرادات یک جانمایی موجود از شبکهٔ عصبی و الگوریتم‌های یابندهٔ راه‌حل‌های بهینه استفاده کرد و توانست ازطریقِ مهندسی معکوس راه‌حل‌های جانمایی فضایی بهینه را ارائه دهد. محققان در برخی از مقالات سعی داشتند تنها بر حل روابط فضایی و هندسه آن‌ها متمرکز نباشند، بلکه دیگر مانند مطالعهٔ کالداس و نورفورد (۲۰۱۱) خواسته‌های معماری ازجمله بهینه‌سازی انرژی بنا را نیز مرتفع سازند. همچنین از دیگر مفاهیمی‌که برخی تحقیقاتِ جانمایی بر آن تأکید داشتند فرایند خودکارسازی یا طراحی اتوماتیک فضاها (De Almeida et al., 2016) و نیز چالش طراحی اتوماتیک در سه بعد بود (Guo & Li, 2017)؛ (Dino,

(Rodrigues, 2014) ،2016).

– **طراحی پلان:** بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در فرایند طراحی پلان فراتر از اهداف طراحی جانمایی است که پیش‌تر بررسی شد. در این روند محققان به‌دنبال دستیابی به فرایندی هستند که تمامی نکات طراحی یک پلان ازجمله روابط بین‌فضایی، سیرکولاسیون، ضخامت دیوارها، جانمایی و ابعاد درب و بازشوها و حتی جانمایی مبلمان را برآورده سازد. مقالات مذکور با استفاده از الگوریتم‌هایی غیر از تکاملی ساده توانسته‌اند جانمایی دقیق‌تری از فضاها ارائه دهند، مانند مکان قرارگیری ورودی، نحوهٔ اتصال فضاهای رابط مانند راهرو به فضاهای اصلی(Inoue & Takagi, 2009) و جانمایی ارتباطات عمودی مانند پله و آسانسور (Merrell et al., 2010؛ Rodrigues et al., 2013). بااین‌حال با چالش‌هایی نیز روبه‌رو بوده‌اند؛ مانند عدم توانایی محاسبات پیچیده به‌دلیل م شکلات سخت‌افزاری، عدم امکان تغییر شکل اتاق‌ها، قابلیت جانمایی تعداد محدودی از فضاها، ناتوانی در از بین بردن فضاهای خالی بین اتاق‌ها و نهایتاً موفق نشدن در تبدیل داده‌های کیفی معماری به زبان ماشین (Inoue & Takagi, 2009: 11). همین امر باعث شد اکثر معماران همچنان ترجیح دهند این بخش از طراحیِ معماری را به‌صورت دستی و مبتنی‌بر تجربیات خود و نهایتاً به‌وسیلهٔ نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به انجام رسانند تا با چالش‌های هوش مصنوعی روبه‌رو شوند (Homayouni, 2000: 10). همچنین اکثریت ایشان با نحوهٔ کار الگوریتم‌ها آشنا نیستند که بتوانند ملزومات آن را فراهم کنند. بدین معنی که قادر باشند توسط کدنویسی، داده‌های معماری را به ماشین منتقل کنند بلکه آن‌ها ترجیح می‌دهند از ابزارهایی استفاده کنند که با شیوه‌های رایج و فرایندهایی که برای ایشان قابل درک است به طراحی بپردازد (Cadogan, 1998: 21). در همین راستا یکی از مهم‌ترین راهکارهایی که در برخی مقالات ارائه شده است و می‌تواند بین طراحی توسط انسان و طراحی توسط ماشین ارتباط برقرار کند، ترسیم روابط فضایی ازطریقِ گراف و دیاگرام‌های حبابی است. بدین معنی که دقیقاً مشابه فرایندی که معمار برای ترسیم یک پلان معماری دارد، الگوریتم نیز بتواند در ابتدا با ترسیم دیاگرام‌های روابط، ارتباط بین فضاها را بررسی نماید (Nisztuk & Myszkowski, 2019)؛ (Guo & Li, 2017). همچنین برخی از تحقیقات در دهه‌های اخیر به سمت طراحی سیستم‌هایی سوق داده شدند که با دریافت اطلاعات از کاربر (معمار، مهندس ساختمان و یا بهره‌بردار) بتواند گزینه‌های ممکن را باتوجه‌به تمام محدودیت‌ها و خواسته‌ها در کوتاه‌ترین زمان به او پیشنهاد دهند (Michalek et al., 2002)؛ (Miles et al., 2001)؛ (Nisztuk & Myszkowski, 2019)؛ (Rafiq et al., 2003) ؛ (Von Buelow, 2002). افزون‌بر این بیشترین الگوریتم مورد استفاده در مطالعات دهه‌های گذشته، تکاملی‌ها به‌خصوص ژنتیک بوده است (Sisk et al., 2003)؛ (Rosenman & Gero, 1999)؛ (Gero & Schnier, 1995). اما در سال‌های اخیر باتوجه‌به تمایل به خودکارسازی فرایند طراحی پلان توسط اپلیکیشن‌های کاربرمحور (اپلیکیشن‌هایی که بتوانند معماران را به استفاده از هوش مصنوعی در معماری ترغیب نمایند)، اکثر پژوهش‌ها به الگوریتم‌های نوظهور مانند یادگیری ماشین و شبکه‌های مصنوعی روی آوردند. این حرکت، فرایند متفاوتی از ژنتیک می‌باشد و منجر به طرح موضوعی با عنوان «هوش طراحی خودکار»[۳۱] شده است (باباخانی و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۳). از دیگر نکات حائز اهمیت این‌که استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نیاز به آموزش زبان‌های برنامه‌نویسی توسط معماران دارد. این مسئله کمتر از سوی آن‌ها مورد استقبال قرار می‌گیرد. با نگاه به جدول ۴ می‌توان دریافت که پیش‌تر معماران مشارکت کمی در پژوهش‌های هوش مصنوعی و معماری داشتند. در اکثر موارد متخصصین دیگر علوم مانند مهندسان برق و کامپیوتر این تحقیقات را انجام داده‌اند. در سال‌های اخیر این روند بهبود یافته است. براین‌اساس و باتوجه‌به شناختی که تنها معماران از ماهیت مسائل معماری دارند، لازم است آن‌ها علاوه‌بر آموزش زبان‌های برنامه‌نویسی و نحوهٔ کدنویسی الگوریتم‌ها، هدایت و رهبری تحقیقات را در کنار دیگران متخصصان هوش مصنوعی و کامپیوتر در قالب یک تیم بر عهده بگیرند.

نتیجه‌گیری

بهره‌گیری از هوش مصنوعی در طراحی معماری از دهه‌های میانی قرن بیستم و هم‌زمان با شروع روش‌های طراحی به کمک کامپیوتر آغاز شده بود؛ اما تا مدت‌ها نقش مولد و مهمی در طراحی محاسباتی ایفا نمی‌کرد و به‌صورت ابزار و در قالب نرم‌افزارهای گرافیکی به معماران امکان دستیابی به گستره‌ای از طرح‌های متنوع، هندسه و فرم‌های پیچیده و انواع شبیه‌سازی‌ها و ارائه‌های دیجیتالی را ارائه می‌داد. با رشد و توسعهٔ الگوریتم‌ها

و کاربرد گستردهٔ آن‌ها در دیگر زمینه‌ها، چندین سال است که به طراحی معماری مولد مبتنی‌بر هوش مصنوعی بیش‌ازپیش توجه شده است و پژوهشگران بسیاری کاربست الگوریتم‌ها را در دستیابی به طرح معماری مورد آزمایش قرار داده‌اند. در این میان توجه به بهره‌گیری از آن‌ها در ابتدای فرایند طراحی کمتر از دیگر موضوعات فرایند طراحی معماری است. با این توضیح، پژوهش حاضر با بررسی مطالعات در سه دههٔ اخیر به واکاوی کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در موضوعات مختلف طراحی پرداخته است.

در این بررسی موضوعات طراحی معماری باتوجه‌به پیشینهٔ پژوهش، عبارت بودند از فرایند کشف ایده و کانسپت، فرم‌یابی، طراحی حجم بنا، طراحی سقف و نما، طراحی جانمایی و طراحی پلان. خاطر نشان می‌شود آن دسته از مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفتند که از الگوریتم‌ها به‌صورت عملی و در مراحل اولیهٔ فرایند طراحی استفاده کرده بودند و با استفاده از زبان ماشین و الگوریتم‌ها، مبتنی‌بر دانش معماری، اهداف مد نظر را تحقق بخشیدند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که عمده هدف پژوهش‌های مورد بررسی، در سال‌های اولیه بر دستیابی به کانسپت اولیه، فرم‌یابی و طراحی پلان متمرکز بوده‌اند. در این زمینه الگوریتم‌های تکاملی بیشترین کاربرد را داشته‌اند. این الگوریتم‌ها قادر به دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ از میان تمامی گزینه‌های ممکن هستند. در سال‌های اخیر، رشد و توسعهٔ الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکانات ویژه‌ای در اختیار محققان قرار داده و کاربرد گسترده‌ای در مطالعات فرایند طراحی مولد داشته‌اند. انجام محاسبات پیچیده در زمان کمتر، قدرت تشخیص الگوها، توانایی یادگیری از نمونه‌های پیشین، استفاده از حافظه و توانایی خودکارسازی فرایند طراحی معماری ازجمله ویژگی‌های این نوع از الگوریتم‌ها هستند. بررسی تحقیقات نشان می‌دهد که بیشترین کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری عمیق، در طراحی پلان معماری و سپس یافتن حجم مناسب بوده است. لازم به ذکر است هرکدام از این الگوریتم‌ها دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند و در حل مسائل معماری با چالش‌های متعددی همراه هستند که در جدول ۳ به آن‌ها اشاره شده است. در سال‌های اخیر، از مهم‌ترین اقدامات انجام‌یافته توسط محققان به‌منظور رفع چالش‌ها، ترکیب الگوریتم‌ها با یکدیگر است. این کار باعث می‌شود آن‌ها نقاط قوت هرکدام را برجسته کرده و ایرادات یکدیگر را بپوشانند.

باتوجه‌به آن‌که هوش مصنوعی به‌سرعت درحال نفوذ به تمامی حوزه‌های بشری است و معماری هم از آن مستثنی نیست، لازم است معماران نیز توجه ویژه به این نکته داشته باشند و با آموزش علم هوش مصنوعی و فرایند طراحی مولد مبتنی‌بر آن، تحقیقات پیرامون این روش نوین را رهبری نمایند. در این راستا مباحثی مانند انواع داده‌کاوی به‌جهت کشف دانش از داده‌های معماری، خودکارسازی فرایند طراحی در مراحل مختلف و ارتقای الگوریتم‌ها در جهت انتقال مفاهیم کیفی معماری به کامپیوتر می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشند.

جدول ۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجهٔ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۴۵	Frazer معمار	۱۹۹۵	CA	-		*					فرم‌یابی معمارانه با الهام از طبیعت
۵۰	Gero & Schiner مهندس کامپیوتر/ معمار	۱۹۹۵	GA	مسکونی						*	ایجاد چیدمان متنوع فضای جست‌وجو برای خلق

ادامه جدول۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجهٔ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۲۸	Coates مهندس کامپیوتر	۱۹۹۶	CA	-		*					دستیابی به موتور قوی تولید حجم در محیط اتوکد با طیف گسترده‌ای از قوانین تغییردهندهٔ حالت
۸۱	Maher & Poon معمار	۱۹۹۶	CoGA	-						*	خلق فضای جست‌وجوی گسترده جهت دستیابی به کانسپت
۳۵	Cvetkovic مهندس کامپیوتر	۱۹۹۹	MOGA	-	*						تمرکز بر دستیابی به تمامی ایده‌های ممکن به‌جایِ بهینه‌یابی
۴۶	Funes مهندس کامپیوتر	۱۹۹۹	GA	-		*					ایجاد فرم‌های متنوع با ترکیب اجزای مدولار با کمک الگوریتم
۱۰۹	Rosenman & Gero مهندس کامپیوتر/ معمار	۱۹۹۹	GA	مسکونی						*	استفاده از ترکیبات ساده تا پیچیده برای تولید پلان
۹۴	Park مهندس عمران	۱۹۹۹	MOGA	-						*	تولید پلان باتوجه‌به محدودیت‌ها به‌منظور کاهش هزینهٔ ساخت
۴۹	Gero & Kazakov مهندس کامپیوتر	۲۰۰۰	GA	-	*						معرفی روشی برای جست‌وجوی حداکثری میان کانسپت‌های خلاقانه در مرحلهٔ اولیه طراحی
۵۳	Graham مهندس سازه	۲۰۰۱	GA	-	*						ارتقای روش‌های طراحی به کمک کامپیوتر در مرحلهٔ ایده
۸۷	Miles مهندس عمران	۲۰۰۱	BGRID	اداری تجاری						*	ارائه برنامهٔ کاربردی طراحی پلان برای مهندسان و کاربران
۷۲	Krawczyk معمار	۲۰۰۲	CA	-		*					دستیابی به فرم معمارانه با روش‌های طراحی مولد و استخراج الگوها
۸۶	Michalek مهندس مکانیک/ معمار	۲۰۰۲	GA+SA	مسکونی						*	ارائه مدلی ترکیبی برای طراحی پلان با امکان دخالت تصمیم‌های کاربر
۱۲۲	Von Buelow مهندس کامپیوتر	۲۰۰۲	GA	-						*	دستیابی به ابزاری برای کمک به معماران با در نظر گرفتن ملاحظات زیبایی‌شناسانه، معیارهای عملکردی و اقتصادی
۶۶	Jackson مهندس کامپیوتر	۲۰۰۲	GP+ L-system	-		*					ارائه روشی برای تولید فرم مبتنی‌بر روش‌های طراحی مولد
۱۱۳	Sisk مهندس سازه	۲۰۰۳	BGRID	-						*	تأکید بر ساخت مدل با دخالت نظرات مهندسان در طراحی

ادامه جدول۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجهٔ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۱۵	Anzalone مهندس کامپیوتر	۲۰۰۳	CA	-		*					فرم‌یابی بنا باتوجه‌به زمینه، برنامه و ملاحظات معمارانه
۹۳	Packham مهندس کامپیوتر	۲۰۰۳	IVCGA	-	*						ارائه مدل تعاملی بین کاربر و الگوریتم با هدف مصورسازی کانسپت اولیه
۱۰۰	Rafiq مهندس سازه	۲۰۰۳	SGA	-					*		ارائه مدل تعاملی بین کاربر و الگوریتم با هدف مصورسازی کانسپت اولیه و ملاحظات معماری، سازه‌ای و تأسیساتی
۱۰۱	Rafiq مهندس سازه	۲۰۰۵	IVCGA	اداری	*						ارائه مدل تصمیم‌گیری در مرحلهٔ ایده مبتنی‌بر پیکربندی‌های متفاوت، انواع روش‌های ساخت و مصالح گوناگون
۸۲	Malkawi معمار	۲۰۰۵	GA+ CFD	-	*						شبیه‌سازی عملکرد انرژی کانسپت اولیه به‌صورت هم‌زمان
۱۳۲	Yeh مهندس عمران	۲۰۰۶	Annealed NN	درمانی					*		ارائه مدلی برای دستیابی سریع به جانمایی فضایی در موضوعات معماری وسیع
۱۲۵	Wang مهندس سازه	۲۰۰۶	MOGA	اداری				*			طراحی حجم معماری با رویکرد اکولوژیک به‌صورت چندضلعی
۶۰	Herr معمار	۲۰۰۷	CA	-		*					ارائه مدل کاربرمحور برای طراحی فرم هم‌زمان با سنجش مطلوبیت آن
۷۸	Liu مهندس کامپیوتر	۲۰۰۷	PSO	-	*						دستیابی به ایده‌های طراحی مسکونی مبتنی‌بر اهداف اکولوژیکی با بالاترین میزان دریافت انرژی خورشیدی
۹۷	Pugnale معمار	۲۰۰۷	GA	-			*				طراحی سقف مستقل از پلان با ارائه نقاط کنترلی مبتنی‌بر متغیرهای خواسته‌شده
۳۹	Doulgerakis معمار	۲۰۰۷	GP	مسکونی					*		طراحی جانمایی به‌صورت چندضلعی با در نظر گرفتن ارتباطات عمودی
۱۲۳	Von Mammen مهندس کامپیوتر	۲۰۰۸	PSO	-		*					فرم‌یابی سه‌بعدی با هدف دستیابی به ملاحظات معمارانه
۱۱۴	Skavara معمار	۲۰۰۹	CA+ ANN+ GA	-			*				طراحی پوستهٔ خارجی به‌منظور دستیابی به بالاترین میزان نور

ادامه جدول۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجهٔ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۱۳۰	Wong مهندس کامپیوتر	۲۰۰۹	EvoArch	مسکونی					*		جانمایی نُه عدد فضای معماری باتوجه‌به محدودیت‌های طرح
۶۵	Inoue & Takagi طراح	۲۰۰۹	GA	-						*	طراحی پلان با اعمال مرزبندی بین فضاها
۴۸	Gaspar-Cunha مهندس ساخت	۲۰۱۰	MOEA	-			*				ارائه راه‌حل برای طراحی سقف مبتنی‌بر روش‌های تصمیم‌گیری
۴۷	Gagne مهندس کامپیوتر	۲۰۱۰	micro-GA	-			*				طراحی پوستهٔ خارجی با بالاترین بازدهی در دریافت نور روز
۸۵	Merrell مهندس کامپیوتر	۲۰۱۰	Bayesian Network	مسکونی					*		بهینه‌سازی طراحی داخلی فضا با در نظر گرفتن برنامهٔ فیزیکی
۱۱۸	Tuhus-Dubrow معمار	۲۰۱۰	GA	مسکونی				*			دستیابی به فرم بهینه با رویکرد بهینه‌سازی انرژی
۱۲۷	Wen مهندس کامپیوتر	۲۰۱۰	Fractal	-	*						ارائه کانسپت‌های حجمی با در نظر گرفتن ملاحظات زیبایی
۲۵	Caldas معمار	۲۰۱۱	GA	مسکونی				*			فرم‌یابی با رویکرد بیهنه‌سازی انرژی با ایده گرفتن از خانه‌های اسلامی
۱۰۲	Rakha معمار	۲۰۱۱	GA	-			*				ارائه فرم‌های متنوع هندسی برای سقف‌های منحنی و شبکه‌ای
۱۲۰	Turrin مهندس کامپیوتر	۲۰۱۱	GA (ParaGen)				*				طراحی پوسته با ترکیب روش‌های تکاملی و مدل‌سازی پارامتریک
۷۳	Li معمار	۲۰۱۲	GA	موزه				*			تلاش برای بهینه‌سازی فرم مبتنی‌بر روش‌های تکاملی
۱۰۷	Rodrigues مکانیک/معمار	۲۰۱۳	EP (EPSAP)	مسکونی						*	طراحی پلان با در نظرگرفتن ارتباطات عمودی
۷۷	Lin معمار	۲۰۱۴	MOGA	چند عملکرده		*					ارائه ابزاری برای دستیابی سریع به حجم بهینه
۶۷	Jin مهندس مکانیک	۲۰۱۴	GA	-				*			طراحی پوسته با محاسبهٔ بار حرارتی
۳۷	Dincer معمار	۲۰۱۴	CA	مسکونی				*			ارائه فرم معمارانه مبتنی‌بر مشارکت کاربر باتوجه‌به برنامه و زمینه
۱۶	Araghi معمار	۲۰۱۵	CA	مسکونی فشرده				*			طراحی سه‌بعدی فرم با در نظر گرفتن دسترسی‌ها، نور روز و ملاحظات معماری
۱۲۱	Ugurlu معمار	۲۰۱۵	NSGA-II + DE	رستوران					*		طراحی فضای داخلی با در نظر گرفتن ملاحظات معماری، اقتصادی، عملکردی و سازه‌ای

ادامه جدول۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجهٔ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۱۳۳	Yi معمار	۲۰۱۵	GA	مسکونی بلندمرتبه				*			دستیابی به فرم بهینه از منظر دریافت نور روز
۴۱	Ekici معمار	۲۰۱۶	NSGA-II, DE (jDE)	مسکونی بلندمرتبه				*			دستیابی به کانسپت حجمی بهینه
۶۱	Herr معمار	۲۰۱۶	CA	-		*					طراحی ماشینی با بالاترین میزان تطابق با خواسته‌های معماری
۷۰	Konis معمار	۲۰۱۶	MOGA	-				*			ارائه ابزاری برای شبیه‌سازی انرژی بنا
۳۳	Cubukcuoglu معمار	۲۰۱۶	MOGA jDEMO	رستوران					*		طراحی فضای داخلی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه
۳۸	Dino معمار	۲۰۱۶	GA EASE	کتابخانه					*		طراحی جانمایی در سه بعد
۳۶	De Almeida مهندس کامپیوتر	۲۰۱۶	GA	مسکونی					*		جانمایی فضایی باتوجه‌به محدودیت‌های ابعادی و مکانی
۱۰۳	Rian معمار	۲۰۱۶	Fractal	-			*				ارائه روشی برای طراحی سقف موج‌دار با در نظر گرفتن پایداری سازه
۱۰۵	Song معمار	۲۰۱۶	IRRGA	مسکونی				*			دستیابی به فرم بهینه با در نظر گرفتن هندسه، سازه و هزینه
۱۳۵	Zaremba مهندس کامپیوتر	۲۰۱۶	GA	-			*				طراحی سقف منحنی با کمترین انحراف و بالاترین پایداری
۱۳۶	Zhang معمار/ مهندس کامپیوتر	۲۰۱۶	MOGA	مسکونی				*			ارائه روشی برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌یابی فرم با بالاترین دریافت انرژی خورشیدی
۲۷	Chatzikonstantinou معمار	۲۰۱۷	Auto-associative NN	اداری			*				ارائه روشی برای ارزیابی میزان کارایی نما
۶۶	Karaman معمار	۲۰۱۷	NSGA-II ,jE_ DEMO	درمانی			*				طراحی پوسته با بالاترین میزان دریافت نور و پایین‌ترین هزینهٔ ساخت
۵۶	Guo معمار	۲۰۱۷	GA	مسکونی						*	طراحی خودکار پلان با در نظر گرفتن ارتباطات عمودی
۱۸	As معمار	۲۰۱۸	DNN, GAN	مسکونی						*	طراحی پلان با بازترکیب هندسهٔ پل
۱۴	Agirbas معمار	۲۰۱۹	Swarm	-			*				ارایه روشی تعاملی برای دستیابی به ایدهٔ نما با استفاده از طبیعت

ادامه جدول۴. مجموع مطالعات انجام‌شده در حوزۀ معماری و هوش مصنوعی (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳)

منبع	نویسنده، تخصص	سال انتشار	نوع الگوریتم	کاربری	موضوع فرایند طراحی						نتیجۀ پژوهش
					کانسپت و ایده	فرم‌یابی	طراحی سقف و نما	حجم بنا	طراحی جانمایی	طراحی پلان	
۴۳	Fang معمار	۲۰۱۹	MOGA	اداری				*			دستیابی به فرم معمارانه در ترکیب با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی و طراحی پارامتریک
۲۶	Chaillou معمار	۲۰۱۹	GAN	مسکونی						*	طراحی پلان با یادگیری از پلان‌های باروک
۱۱۲	Si معمار	۲۰۱۹	NSGA-II, MOPSO + ANN	توریستی				*			دستیابی به فرم بهینه با اهداف بهینه‌سازی انرژی و ساخت
۹۱	Nisztuk مهندس کامپیوتر	۲۰۱۹	GA (ELIs)	مسکونی						*	تولید خودکار پلان و بهینه‌یابی
۵۸	Hu مهندس کامپیوتر	۲۰۲۰	DNN Graph2Plan	مسکونی						*	تولید خودکار پلان
۱۳۷	Zheng معمار	۲۰۲۰	GAN	مسکونی						*	تولید پلان با استفاده از تصویرها از مرزبندی پلان
۵۱	Ghannad & Lee مهندسی ساخت	۲۰۲۲	CoGAN	مسکونی					*		طراحی پلان‌های مدولار
۱۳۱	Yan مهندس ساخت	۲۰۲۲	BESO	-		*					دستیابی به فرم بهینه با امکان دخالت کاربر حین طراحی
۱۲	Aalaei معمار	۲۰۲۳	GAN	مسکونی						*	دستیابی به مدلی برای طراحی اولیۀ پلان
۵۲	Gra مهندس کامپیوتر	۲۰۲۳	graph	مسکونی						*	دستیابی به پلانی باکیفیت ازلحاظ هندسی و مفهومی

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

پی‌نوشت

1. Generative design
2. State-of-the-art
3. AI Branches
4. Sub-categories
5. Machine learning
6. Deep learning
7. Neural network
8. Evolutionary algorithm
9. Natural processing language
10. AI - based generative architectural design

11. Computational architectural design

۱۲. برخی از پژوهشگران سعی می‌کنند به بازتعریف واژهٔ خلاقیت بپردازند تا ازطریقِ آن بتوانند با آغوشی باز به استقبال هوش مصنوعی بروند. برای مطالعه بیشتر رجوع شود به: (Gero & Maher, 1993).

13. Rule based
14. Script – prompt
15. Automation

۱۶. ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با بهینه‌سازی تکاملی است که باعث بهبود یافتن الگوریتم‌های تکاملی از جهات مختلف می‌شود (Surrogate Model).

17. Layout design - space design
18. Floor plan design
19. Cellular Automata
20. Architectural form
21. IEEE – ACM
22. Partial swarm intelligence

۲۳. مسائل غامض یا سرکش، به مسائلی که منحصربه‌فرد هستند و فرمول خاصی برای حل عمومی آن‌ها وجود ندارد، اطلاق می‌شود. تمام مسائل طراحی ازاین‌دست می‌باشند و با به‌کارگیری فرایندی خطی و گام‌به‌گام به نتیجه نمی‌رسند.(Rittel & Webber, 1973)

24. Fuzzy logic
25. Fractal
26. Morphology
27. L-system
28. Local minimum
29. Geometry
30. Topology
31. Automated design intelligence

فهرست منابع

- آصفی، مازیار و ایمانی، الناز (۱۳۹۶). بررسی تحلیلی تأثیر کاربرد نرم‌افزارهای دیجیتال بر ارتقاء خلاقیت در آموزش طراحی معماری. *هویت شهر*، دوره ۱۱ (۴): ۹۲-۷۹.
- باباخانی، رضا؛ شاهچراغی، آزاده و ذبیحی، حسین (۱۴۰۲). فرایند یادگیری ماشین در اعمال روابط فضایی پلان‌های مسکونی مبتنی‌بر نمونه و ماتریس همجواری. *مرمت و معماری ایران*، (۳۴): ۴۸-۳۰.
- باستانی، مهیار و محمودی، امیرسعید (۱۳۹۷). روش‌های خلق ایده و کانسپت در فرایند طراحی معماری. *هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*، دوره ۲۳ (۱): ۱۸-۵.
- رهبر، مرتضی (۱۳۹۷). *الگوریتم طراحی مولد جانمایی فضایی معماری، (با استفاده از هایبرید هوش مصنوعی سی گَن و مدل‌سازی عامل‌بنیان)* رساله دکتری، مهندسی معماری. دانشکدهٔ هنر و معماری، تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
- غریب‌پور، افرا (۱۳۹۳). مقایسه تحلیلی ترسیم با دست و رایانه در فرایند طراحی معماری. *هنرهای زیبا*، دوره ۱۹ (۱): ۱۴-۵.
- فاضل، علیرضا و مستغنی، علیرضا (۱۴۰۰). نسبت فرایند طراحی در معماری و علوم رایانه. *اندیش‌نامه معماری*، دوره اول (۱): ۶۰-۴۷.
- کارکن بیرق، حبیب (۱۳۸۸). نگرشی انتقادی به مسئله هوش مصنوعی. *مجله ذهن*، (۳۷): ۸۴-۵۹.
- طهماسبی، محمدرضا (۱۳۸۵). رهیافت‌های بنیادین فلسفی در هوش مصنوعی. *حکمت و فلسفه*، (۲): ۴۷-۲۵.
- مطلبی، قاسم؛ رضاخانی، ژیلا و آهنگر عزیز، بابک (۱۳۹۹). طراحی به‌مثابهٔ حل مسئله؛ مدلی مبتنی‌بر سوابق طراحی. *معماری و شهرسازی ایران*، دوره ۱۱ (۲): ۳۳-۲۱.
- مظفر، فرهنگ و خاک‌زند، مهدی (۱۳۸۲). به‌کارگیری تکنولوژی در فرایند طراحی معماری. *علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت*، دوره نوزدهم (۶): ۷۲-۵۳.

- Aalaei, M.; Saadi, M.; Rahbar, M. & Ekhlassi, A. (2023). Architectural layout generation using a graph-constrained conditional Generative Adversarial Network (GAN). *Automation in Construction*, 155.
- Abioye, S. O.; Oyedele, L. O.; Akanbi, L.; Ajayi, A.; Delgado, J. M. D.; Bilal, M.; Akinade, O.O. & Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, *44*, 103299.
- Agirbas, A. (2019). Façade form-finding with swarm intelligence. *Automation in Construction*, *99*, 140- 151.
- Anzalone, P. & Clarke, C. (2003). Architectural applications of complex adaptive systems. In *Connecting: Crossroads of Digital Discourse. Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture,* Ball State University, Indianapolis, 324- 335.
- Araghi, S. K. & Stouffs, R. (2015). Exploring cellular automata for high density residential building form generation. *Automation in construction*, *49*, 152162-.
- Archer, B. (1995), The Nature of Research, Co-design, *interdisciplinary journal of design*, pp 6- 13.
- As, I.; Pal, S. & Basu, P. (2018). Artificial intelligence in architecture: generating conceptual design via deep learning. International Journal of Architectural Computering, 16 (4) 306–327.
- Attia S., Gratia E., De Herde A., and Hensen J. L. (2012), Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2–15.
- Auerswald, P. E. (2017). . Oxford Isaacson University Press.
- Baduge, S. K.; Thilakarathna, S.; Perera, J. S.; Arashpour, M.; Sharafi, P.; Teodosio, B.; Shringi, A. & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141, 104440.
- Bölek, B.; Tutal, O. & Özbaşaran, H. (2023). A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 4 (1), 91- 104.
- Broadbent, G., (1973), , John Wiley & Sons Ltd.
- Cadogan, J. V. (1998). *Constraint based decision support for conceptual design* (Doctoral dissertation, CARDIFF).
- Caldas, L. G. & Norford, L. K. (2011). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in construction*, 11 (2), 173- 184.
- Chaillou, S. (2019). "*AI + Architecture: Towards a New Approach*." PhD thesis, Harvard University, USA.
- Chatzikonstantinou, I. & Sariyildiz, I. S. (2017). Addressing design preferences via auto-associative connectionist models: Application in sustainable architectural Façade design. *Automation in construction*, *83*, 108- 120.
- Coates, P.; Healy, N.; Lamb, C. & Voon, W. (1996). The use of Cellular Automata to explore bottom up architectonic rules. *Eurographics UK Chapter 14th Annual Conference*, UK.

- Colakoğlu B. & Yazar T. (2007), an innovative design education approach: computational design teaching for architecture. *Metu JFA,* 24 (2), 159- 168.
- Corea, F. & Corea, F. (2019). AI knowledge map: How to classify AI technologies. *An introduction to data: Everything you need to know about AI, big data and data science*, 2529-.
- Cross, N. (1999), Design Research: A Disciplined Conversation, Design Issues, Volume 15, Number 2, pp.5- 10
- Cruz, C.; Karakiewicz, J. & Kirley, M. (2016). Towards the implementation of a composite cellular automata model for the exploration of design space. In *Association for Computer-Aided Architectural*
- *Design Research in Asia (CAADRIA) annual conference 2016, 187196-*. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Cubukcuoglu, C.; Chatzikonstantinou, I.; Ekici, B.; Sariyildiz, S. & Tasgetiren, M. F. (2016). Multi-objective optimization through differential evolution for restaurant design. *Algorithms,* 9 (3), 51.
- Cudzik, J. & Radziszewski, K. (2018). Artificial Intelligence Aided Architectural Design. *ai for design and built environment*, 1, 77- 84.
- Cvetkovic, D. & Parmee, I. C. (1999). Genetic algorithm-based multi-objective optimisation and conceptual engineering design. In *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, 1, 29- 36. IEEE.
- De Almeida, A.; Taborda, B.; Santos, F.; Kwiecinski, K. & Eloy, S. (2016). A genetic algorithm application for automatic layout design of modular residential homes. In *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC),* 002774- 002778. IEEE.
- Dinçer, A. E.; Çağdaş, G. & Tong, H. (2014). A computational model for mass housing design as a decision-support tool. *Procedia Environmental Sciences*, 22, 270- 279.
- Dino, I. G. (2016). An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration. *Automation in construction*, 69, 131- 150.
- Doulgerakis, A. (2007). "*Genetic Programming + Unfolding Embryology in Automated Layout Planning*." PhD Thesis, UCL (University College London).
- Dutta, K. & Sarthak, S. (2011). Architectural space planning using evolutionary computing approaches: a review. *Artificial Intelligence Review*, 36, 311- 321.
- Ekici, B.; Chatzikonstantinou, I.; Sariyildiz, S.; Tasgetiren, M. F. & Pan, Q. K. (2016). A multi-objective self-adaptive differential evolution alghorithm for conceptual high-rise building design. *In 2016 IEEE congress Evolutionary Computation (CEC),* 2272- 2279. IEEE.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimization methods applied to sustainable building design. Renewable and sustainable energy reviews, 22, 230- 245.
- Fang, Y. & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, 191, 7- 18.
- Fernberg, P. & Chamberlain, B. (2023). Artificial Intelligence in Landscape Architecture: A Literature Review. *Landscape Journal*, 42 (1), 13- 35.
- Frazer, J. (1995). . Architectural Association Publications.

- Funes, P. & Pollack, J. B. (1999). Computer evolution of buildable objects for evolutionary design by computers. *Evolutionary design by computers*, 387- 403.
- Gagne, J. M. & Andersen, M. (2010). Multi-objective facade optimization for daylighting design using a genetic algorithm. *Proceedings of SimBuild 20104-th National Conference of IBPSA-USA*.
- Gaspar-Cunha, A.; Loyens, D. & Hattum, F. v. (2011). Aesthetic design using multi-objective evolutionary algorithms. *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Brazil, 374–388.
- Gero, J. S. & Kazakov, V. (2000). Adaptive enlargement of state spaces in evolutionary designing. *AI EDAM*, 14 (1), 31- 38.
- Gero, J. S. & Schnier, T. (1995). Evolving representations of design cases and their use in creative design. *Preprints Computational Models of Creative Design*, 343- 368.
- Ghannad, P. & Yong-Cheol Lee, Y. CH. (2022). Automated modular housing design using a module configuration algorithm and a coupled generative adversarial network (CoGAN). *Automation in Construction*, 139.
- Gra, S.; Strug, B.; Paszyska, A.; Grabska, E. & Palacz, W. (2023). Semantic-driven Graph Transformations in Floor Plan Design. *Computer-Aided Design*, 158.
- Graham, I. J.; Case, K. & Wood, R. L. (2001). Genetic algorithms in computer-aided design. *Journal of Materials Processing Technology*, 117 (1), 216- 221.
- Grant, M. J. & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health information & libraries journal*, 26 (2), 91- 108.
- Grierson, D. E. & Khajehpour, S. (2002). Method for conceptual design applied to office buildings. *Journal of computing in civil engineering*, 16 (2), 83- 103.
- Guo, Z. & Li, B. (2017). Evolutionary approach for spatial architecture layout design enhanced by an agent-based topology finding system. *Frontiers of Architectural Research*, 6 (1), 53- 62.
- 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.
- Hegazy, M. & Saleh, A. (2023). Evolution of AI role in architectural design: between parametric exploration and machine hallucination. *MSA engineering journal*, 2 (2), 262- 288.
- Hensel, M.; Menges, A. & Weinstock, M. (2004). . Wiley-Academy Chichester.
- Herr, C. M. & Kvan, T. (2007). Adapting cellular automata to support the architectural design process. *Automation in Construction*, 16 (1), 61- 69.
- Herr, C. M. & Ford, R. C. (2016). Cellular automata in architectural design: From generic systems to specific design tools. *Automation in Construction*, 72, 3945-.
- Homayouni, H. (2000). A survey of computational approaches to space layout planning (1965-2000). *Department of Architecture and Urban Planning University of Washington*, 1- 18.
- Hu, R.; Huang, Z.; Tang, Y.; Van Kaick, O.; Zhang, H. & Huang, H. (2020). Graph2Plan: learning floorplan generation from layout graphs. *ACM Transactions on Graphics*, 39.
- Humppi H.; Österlund T. (2016). Algorithm-aided BIM. *Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, 601- 609.

- Inoue, M. & Takagi, H. (2009). EMO-based architectural room floor planning. *2009 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, USA.
- Jackson, H. (2002). Toward a symbiotic coevolutionary approach to architecture. In *Creative evolutionary systems, 299- 313,* Morgan Kaufmann.
- Jin, J. T. & Jeong, J. W. (2014). Optimization of a free-form building shape to minimize external thermal load using genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 85, 473482-.
- Jones, Christopher (1984), John Wiley & Sons Ltd
- Karaman, S.; Ekici, B.; Cubukcuoglu, C.; Koyunbaba, B.K. & Kahraman, I. (2017). Design of rectangular façade modules through computational intelligence. *in 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1021–1028.
- Konis, K.; Gamas, A. & Kensek, K. (2016). Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy*, 125, 161- 179.
- Kowaltowski, D, Bianchi, G., & Paiva, V. (2010). Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education. *International Journal of Technology & Design Education*, 20(4), 453–476
- Krawczyk, R. J. (2002). Architectural interpretation of cellular automata. *in Proceedings of the Generative Art Conference*, 71–78.
- Li, L. (2012). The optimization of architectural shape based on Genetic Algorithm. *Frontiers of architectural research*, 1, 392–399.
- Li Ch., Zhang T., Du x., Zhang Y & Xie H., 2024, Generative AI for Architectural Design: A Literature Review, Arxiv, available on https://arxiv.org/html/2404.01335v1#S1 , access date 5/ 3/ 2024
- Licklider J. C.,) 1960(. Man-computer symbiosis. *IRE transactions on human factors in electronics*, 1, 4- 11.
- Lin, L. & Gen, M. (2009). Auto-tuning strategy for evolutionary algorithms: balancing between exploration and exploitation. *Soft Computing*, 13, 157- 168.
- Lin, E. & Gerber, D. (2014). Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early-stage design. *Automation in Construction*, 38, 59- 73.
- Liu, X.; Liu, H. & Duan, H. (2007). Particle swarm optimization based on dynamic niche technology with applications to conceptual design. *Advances in Engineering Software*, 38 (10), 668- 676.
- Liu, Y.C.; Chakrabarti, A.; Bligh, T. (2003). Towards an ideal approach for concept generation. *Design Studies*, 24 (4), 341- 355.
- Logan, B. & Smithers, T. (1993). Creativity and design as exploration. *Modeling creativity and knowledge-based creative design*, 139- 176.
- Maher, M. L. & Poon, J. (1996). Modelling design exploration as co-evolution. *The Special Issues of Microcomputers in Civil Engineering on Evolutionary Systems in Design*, 2- 16.
- Malkawi, A.M; Srinivasan, R.S.; Yi, Y.K. & Choudhary, R. (2005). Decision support and design evolution: integrating genetic algorithms, CFD and visualization. *Automation in Construction*, 14 (1) 33–44.
- Martelaro N.; Kuniavsky M. & Akiona N.)2021(. . Autodesk University publication. US.

- McKnight, M. (2017) Generative Design: What it is? How is it Being Used? Why it's a Game Changer! *DesTech Conference Proceeding*. Australia.
- Merrell, P.; Schkufza, E. & Koltun, V. (2010). Computer-generated residential building layouts. In *ACM SIGGRAPH Asia 2010 papers,* 1- 12.
- Michalek, J.; Choudhary, R. & Papalambros, P. (2002). Architectural layout design optimization. *Engineering optimization*, 34 (5), 461- 484.
- Miles, J. C.; Sisk, G. & Moore, C. J. (2001). The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. *Computers & Structures*, 79 (17), 1583- 1592.
- Momade M. H.; Durdyev S.; Dave E. & Syuhaida I. (2021). Systematic Review of Application of Artificial Intelligence Tools in Architectural, Engineering and Construction. F*rontiers in Engineering and Built Environment*, 1 (2), 203- 216.
- Mueller, C. T. & Ochsendorf, J. (2015). Combining structural performance and designer preferences in evolutionary design space exploration. *Automation in Construction*, 52, 70- 82.
- Nagy, D. Lau, D. Locke, J. Stoddart, J. Villagi,L. Wang, R. Dale, Z. Benjamin, D. (2017) Project Discover: An Application of Generative Design for Architectural Space Planning, Simaud, New York, USA.
- Nisztuk, M. & Myszkowski, P. (2019). Tool for evolutionary aided architectural design. Hybrid Evolutionary Algorithm applied to Multi-Objective Automated Floor Plan Generation. *Design - generative systems*, 1, 61- 71.
- Oxman, R. (2017). Thinking difference: theories and models of parametric design thinking. *Design studies*, 1- 36.
- Packham, I. S. J. (2003). "*An interactive visualization system for engineering design using evolutionary computing*." PhD thesis, University of Plymouth.
- Park, K.W. & Grierson, D.E. (1999). Pareto-optimal conceptual design of the structural layout of buildings using a multicriteria genetic algorithm. *Computer. Aided Civil Infrastructure. Eng*, 14 (3) 163–170.
- Pena, M. L. C.; 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, 1- 30.
- P´erez R.I. (2017). "*Blurring the Boundaries Between Real and Artificial in Architecture and Urban Design Through the Use of Artificial Intelligence*." PhD Thesis, Universidade da Coru˜na, Spain.
- Pugnale, A. & Sassone, M. (2007). Morphogenesis and structural optimization of shell structures with the aid of a genetic algorithm. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 48 (3), 161- 166
- Queiroz N.; Vaz C. (2015). Designing a Building envelope using parametric and algorithmic processes. *Proceedings of the 19th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics,* 797- 801.
- Rafiq, M.Y.; Bugmann, G. & Easterbrook, D.J. (1999). Building concept generation using genetic algorithms integrated with neural networks. *in: Proc., 6th Workshop of the European Group of the Structural Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 165–174.

- Rafiq, M. Y.; Mathews, J. D. & Bullock, G. N. (2003). Conceptual building design—Evolutionary approach. *Journal of computing in civil engineering*, 17(3), 150- 158
- Rafiq, M.Y.; Beck, M.; Packham, I. & Denhan, S. (2005). Evolutionary Computation and Visualization as Decision Support tools for Conceptual Building Design. *Innovation in Civil and Structural Engineering Computing*, 49–74.
- Rakha, T. & Nassar, K. (2011). Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. *Renewable energy*, *36*(9), 2348- 2356.
- Rian I. & Asayama, S. (2016). Computational Design of a nature-inspired architectural structure using the concepts of self-similar and random fractals. *Automation in Construction*, 66, 43- 58.
- Rich, E. & Knight, K. (1991). McGraw-Hill.
- Rittel, H. W. J. & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2), 155- 169.
- Rockwell, A. (2017). The History of Artificial Intelligence. *https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2017/history-artificial-intelligence/*. access dat 21/ 3/ 2022.
- Rodrigues, E.; Gaspar, A. R. & Gomes, Á. (2013). An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique. *Automation in Construction*, 35, 482- 498.
- Rodrigues, E. (2014). "*Automated Floor Plan Design: Generation, Simulation, and Optimization.*" PhD thesis, University of Coimbra.
- Rosenman, M. & Gero, J. (1999). Evolving designs by generating useful complex gene structures. *Evolutionary design by computers*, 345- 364.
- Russel P. & Norvig, S. (2002). . Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, USA
- Saravanan, Sh. (2023). AI-enabled Conceptual Design, *https://www.linkedin.com/pulse/ai-enabled-conceptual-design-sharma-saravanan/*.access date: 2024/ 03/ 03.
- Si, B.; Wang, J.; Yao, X.; Shi, X.; Jin, X. & Zhou, X. (2019). Multi-objective optimization design of a complex building based on an artificial neural network and performance evaluation of algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 40, 93- 109.
- Sisk, G. M.; Miles, J. C. & Moore, C. J. (2003). Designer centered development of GA-based DSS for conceptual design of buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(3), 159- 166.
- Skavara, M. M. E. (2009). "*Learning emergence: adaptive cellular automata façade trained by artificial neural networks*." PhD Thesis, UCL (University College London).
- Song, H.; Ghaboussi, J. & Kwon, T.-H. (2016). Architectural design of apartment buildings using the Implicit Redundant Representation Genetic Algorithm. *Automation in Construction*, 72, 166- 173.
- Terzidis, K. (2004). Algorithmic design: a paradigm shift in architecture. *22nd eCAADe Conference Proceedings, Architecture in the Network Society*, Denmark, 201- 207.
- Terzidis, K. (2006). . Routledge.
- Tuhus-Dubrow, D. & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and environment*, 45(7),1574- 1581.

- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433–460.
- Turrin, M.; Von Buelow, P. & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656- 675.
- Ugurlu, C.; Chatzikonstantinou, I.; Sariyildiz, S. & Tasgetiren, M. F. (2015). Evolutionary computation for architectural design of restaurant layouts. *In 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC),* 2279- 2286. IEEE.
- Von Buelow, P. (2002). Using Evolutionary Algorithms to Aid Designer of Architectural Structures. *In Creative evolutionary systems, 315- 3366.* Morgan Kaufmann.
- Von Mammen, S. & Jacob, C. (2008). Swarm-driven idea models–from insect nests to modern architecture. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 113, 117- 126.
- Von Neumann, J. (2017). The general and logical theory of automata. *In Systems research for behavioral science,* 97- 107. Routledge.
- Wang, W.; Rivard, H. & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20 (4), 363- 378.
- Weber, R. E.; Mueller, C. & Reinhart, C. (2022). Automated floorplan generation in architectural design: A review of methods and applications. *Automation in Construction*, 140, 104385.
- Wen, W.; Hong, L. & Xueqiang, M. (2010, August). Application of fractals in architectural shape design. In *2010 IEEE 2nd Symposium on Web Society,* 185- 190. IEEE.
- Westermann, P. & Evins, R. (2019). Surrogate modelling for sustainable building design–A review. *Energy and Buildings*, 198, 170- 186.
- Wex Definitions Team. (2022). Algorithm. Legal Information Institute publication. US.
- Wong, S. S. & Chan, K. C. (2009). EvoArch: An evolutionary algorithm for architectural layout design. *Computer-Aided Design*, 41 (9), 649- 667.
- Yan, X.; Bao, D.; Zhou, Y.; Xie, Y. & Cui, T. (2022). Detail control strategies for topology optimization in architectural design and development. *Frontiers of Architectural Research*, 11 (2), 340- 356.
- Yeh, I. C. (2006). Architectural layout optimization using annealed neural network. *Automation in construction*, 15 (4), 531- 539.
- Yi, Y.K. & Kim, H. (2015). Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA) for tall apartment's solar right. Sol. Energy, 113, 236–250.
- Yigitcanlar, T.; Desouza, K. C.; Butler, L. & Roozkhosh, F. (2020). Contributions and risks of artificial intelligence (AI) in building smarter cities: Insights from a systematic review of the literature. *Energies*, 13 (6), 1473.
- Zaremba, K. (2016). Application of the genetic algorithm for a geometry rationalization of a load-bearing structure for free-form roof. *Procedia Eng*, 161, 1722–1730.
- Zhang, L.; Zhang, L. & Wang, Y. (2016). Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China. *Solar Energy*, 132, 38- 50.
- Zheng, H.; Ao, K. & Wei, Ren Y. (2020). apartment floor plans generation via generative adversarial networks. *Anthropocene, (CAADRIA)*, 2, 599- 608.

Received: 2023/10/08
Accepted: 2024/08/28

Application of Algorithms in the Design of Generative Architecture Based on Artificial Intelligence

Amena Sadat Fattahi Masoum* Hero Farkish Mohammad Taji*****

Abstract

Before the emergence of the concept of generative design, artificial intelligence did not have a significant presence in the design process, especially in the early stages when the architect was faced with a vague and hazy image, and it mostly accompanied him in completing his initial ideas in the form of two- and three-dimensional software. However, in recent years, with the expansion of this concept, the presence of artificial intelligence in the design process has been accompanied by changes. Today, algorithms in this new guise try to make the ambiguous path of the design process clear and transparent for the architect by providing all possible answers to solve architectural problems with greater speed and accuracy than humans, and by their presence from the beginning of the process, they help him in the formation of various ideas. Since many studies have used various algorithms in various architectural design topics, the present study aims to obtain a comprehensive overview of the research that has used algorithms in the generative design process and, thereby, to identify their application in various topics of this process. The focus of this study is on research that has used this method in the initial stages of the process. The selection of this collection was library-based. First, all research related to the keywords architecture and artificial intelligence in the period from 1995 to 2023 was extracted from reliable databases. Based on the purpose of the article, a total of 73 studies were selected and, considering the topics raised in previous studies, were analyzed in six categories including idea and concept, form finding, roof and facade design, building volume, layout and plan, segmentation, and with the approach of examining the latest situation and using content analysis. The results of this paper indicate that evolutionary algorithms have been most widely used in generative design and have been used independently to find the most optimal idea, concept, and spatial representation. In recent decades, with the advancement of emerging algorithms such as deep learning, researchers have become more interested in using them in generative design, and their main application has been in optimizing volume and plan concepts. Also, combinations of these algorithms with evolutionary algorithms have yielded desirable results in the production of architectural products.

Keywords: Design process, generative design, artificial intelligence, evolutionary algorithms, deep learning algorithms. Application of algorithms in the design of generative architecture based on artificial intelligence

* Department of Architecture, Ma.C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran. *a.s.fattahi.m@gmail.com*

** Department of Architecture, Ma.C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran (Corresponding author).

*** Department of Mining, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran