ISSN: 2008-5079 / EISSN: 2538-2365
DOI: 10.22034/AAUD.2024.355338.2698

تحلیل مروری فرآیند معماری محاسباتی عملکردی (PCA) با تأکید بر عوامل عملکردی و کالبدی*

محمدصادق طاهر طلوع دل[۱]- امید حیدری‌پور[۲]**

۱. دانشیار گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.
۲. دانشجوی دکترای معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تاریخ اصلاحات: ۱۴۰۲/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

چکیده

معماری محاسباتی عملکردی، رویکردی هوشمند به فرآیند طراحی بر مبنای عملکرد است که دارای آشفتگی‌های مفهومی زیادی در بین برخی دانشجویان، طراحان و پژوهشگران است. همچنین، این مفهوم، دارای عوامل مختلفی بسته به موضوع طراحی است؛ که نیاز به بررسی، اولویت‌سنجی و تحلیل دارد. هدف این مطالعه، تحلیل مروری معماری محاسباتی عملکردی بر مبنای روش‌های محاسبات تکاملی و ازدحام و تبیین عوامل عملکردی و کالبدی آن است. روش تحقیق این پژوهش با رویکردی کمی- کیفی و جامع‌نگر، تحلیل محتوای اسنادی بر مبنای ادبیات موضوعی معماری محاسباتی عملکردی است. جامعه آماری این تحقیق، پژوهش‌های انجام‌شده از حدود ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ میلادی و نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند و با ساختار گلوله برفی است. تحلیل داده‌ها از طریق بررسی توصیفی و آزمون‌های همبستگی و شانون بر روی موضوعات و عوامل، انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که پژوهش‌ها در حوزه معماری محاسباتی عملکردی در سه موضوع پوسته، فرم و پیکربندی ساختمان انجام شده که در این میان، سایه‌اندازی، ابعاد پنجره، جانمایی پنجره و نسبت پنجره به دیوار، از مهم‌ترین عوامل فرم‌یابی پوسته ساختمان و طراحی نما، فرم کلی، ارتفاع طبقه و تعداد ساختمان‌ها از مهم‌ترین عوامل فرم‌یابی طراحی مولد فرم ساختمان و موقعیت فضایی، ماتریس مجاورت و شبکه‌ای از مهم‌ترین عوامل فرم‌یابی طراحی مولد پیکربندی ساختمان می‌باشند. بر اساس یافته‌ها، نتیجه‌گیری می‌شود که معماری محاسباتی عملکردی، به‌عنوان یک رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد، اشتراک سه مفهوم طراحی مولد، طراحی الگوریتمیک و طراحی پارامتریک، با تمرکز بر ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد است. همچنین، بر اساس یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که عوامل فرم‌یابی، دارای درجه اهمیت‌های متنوعی بر اساس موضوعات سه‌گانه هستند؛ که در این بین، موقعیت فضا و ماتریس مجاورت در موضوع پیکربندی، سایه‌اندازی در موضوع پوسته و شکل کلی بنا در موضوع فرم به‌عنوان عوامل کلیدی فرم‌یابی تبیین می‌شوند.

واژگان کلیدی: معماری محاسباتی عملکردی، طراحی مبتنی بر عملکرد، بهینه‌سازی محاسباتی، هوش ازدحام، عوامل کالبدی و عملکردی.

* مقاله حاضر، برگرفته از رساله دکتری نویسنده دوم است که با عنوان «مدل طراحی مولد پیکربندی فضایی مسکن با رویکرد بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان» به راهنمایی نویسنده اول در دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در حال انجام می‌باشد.

** E-mail: ambiiid@yahoo.com

۱. مقدمه

فرآیند طراحی معماری را می‌توان به‌عنوان یک مسئله پیچیده و تعریف‌نشده طبقه‌بندی کرد، که در بسیاری از جنبه‌ها، مسیر مشخصی برای راه‌حل‌ها و معیارهای روشنی برای تحلیل و ارزیابی پاسخ‌های نهایی ندارد (Hassan et al. 2022)؛ زیرا شامل پارامترهایی است که به‌راحتی نمی‌توان آن‌ها را اندازه‌گیری کرد (Du et al. 2020; Wei et al. 2014). یکی از مهم‌ترین دلایل پیچیدگی طراحی معماری، این است که اهداف متعددی بر عملکرد کلی هدف طراحی‌شده تأثیرگذار هستند (Shi and Yang 2013). در بسیاری از موارد این اهداف با یکدیگر تعارض دارند. علاوه بر این، هر طراحی، یک امر مبتنی بر مشکل، اهداف، برنامه‌ی ساخت‌وساز، محدودیت‌ها، انتظارات مشتری و اثرات جانبی ناشی از محیط ساخته‌شده‌ی اطراف است. بنابراین فرآیند طراحی، یک مشکل چندوجهی (Magnier and Haghighat 2010) و در قالبی تکرارشونده بوده (Cobb et al. 2003) که نیازمند آگاهی فزاینده برای رسیدن به نتایج موردنظر است (Ekici et al. 2019). همین امر، باعث شده است که توجه به استفاده از سیستم‌های محاسباتی رایانه‌ای در طراحی، بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد (Du et al. 2020)؛ زیرا در این سیستم‌ها، طراحی، از ابتدای فرآیند، قابل اصلاح و بازنگری تکرارپذیر است (Sonta et al. 2021). با تحولات فنی و در دسترس قرار گرفتن سخت‌افزار و نرم‌افزار، استفاده از رایانه‌ها در طراحی معماری، و به‌خصوص در محاسبات پیچیده طراحی (Barbieri and Muzzupappa 2022)، چه در مراکز تحقیقاتی و چه در صنعت بیش‌تر شده است و این روند ادامه دارد. در حال حاضر، استفاده از رایانه در طراحی پارامتریک (Wu et al. 2022)، طراحی مولد (Gan 2022) و الگوریتمیک (Bakhshi et al. 2022) به‌طور فزاینده‌ای در فرآیند طراحی معماری و چندرشته‌ای توسعه می‌یابد.

یکی از رویکردهای استفاده از رایانه در طراحی، رویکرد طراحی مولد[1] است که در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی، توسط میچل (Mitchell 1975) معرفی شد. این پژوهش، سیستم‌های طراحی مولد را به‌عنوان ابزاری معرفی کرد که قادر به تولید راه‌حل‌های بالقوه برای یک مشکل خاص هستند. در دو دهه بعد، ادبیات موضوعی، به‌ندرت به طراحی مولد پرداخته است. در آغاز قرن بیست و یکم، فیشر و هر (Fischer and Herr 2001)، طراحی مولد را به‌عنوان یک رویکرد طراحی تعریف کردند که در طی فرآیند طراحی، طراح با مواد و محصولات به روشی مستقیم ارتباط برقرار نمی‌کند؛ بلکه ارتباط از طریق یک سیستم مولد است. ازنظر کالداس (Caldas 2008)، این سیستم، مبتنی بر تکامل است و فضای طراحی را برای راه‌حل‌هایی مطابق با الزامات عملکردی، جستجو می‌کنند. طراحی مولد تحت ساختارهای متنوعی به‌کار گرفته می‌شود. یکی از ساختارهای هوشمند آن، که امروزه بسیار مورد توجه طراحان قرار می‌گیرد، رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد[2] است (Ekici et al. 2019)؛ به‌طوری‌که، این رویکرد، به یک روش ضروری برای تحقق اهداف تبدیل‌شده، که می‌تواند عملکردهای ساختمان را بر مبنای متغیرهای طراحی پیش‌بینی کند (Chegari et al. 2021). رویکرد طراحی مبتنی بر عملکرد، گزینه‌های طراحی با عملکرد بهتر را به‌وسیله ایجاد تغییر در عوامل طراحی و مشاهده نتایج، بررسی می‌کند (Wei et al. 2014). کولارویچ (Kolarevic 2003) به اهمیت طراحی مبتنی بر عملکرد به‌عنوان یک اصل طراحی راهنمایی کننده، اشاره کرده و روش‌های متنوع آن را تقسیم‌بندی کرده است. در میان روش‌های متعدد ممکن، این پژوهش بر یک چارچوب خاص طراحی مبتنی بر عملکرد، تحت عنوان «معماری محاسباتی عملکردی[3]» تمرکز دارد.

معماری محاسباتی عملکردی، به دلیل ترکیب دو مبحث طراحی مولد معماری و محاسبات بهینه‌سازی، دارای آشفتگی‌های مفهومی زیادی در بین برخی دانشجویان، طراحان و پژوهشگران است (Du et al. 2020) و این ابهام در پژوهش‌های داخلی، بیش‌تر مشهود است. همچنین، معماری محاسباتی عملکردی، دارای عوامل مختلف و متنوعی، بسته به موضوع طراحی است؛ که نیاز به سازمان‌دهی و اولویت‌سنجی دارند (Ekici et al. 2019). بنابراین، فقدان یک بررسی جامع در حوزه مفهوم معماری محاسباتی عملکردی، موضوعات طراحی مرتبط با آن و عوامل عملکردی و کالبدی آن، به‌خصوص در پژوهش‌های داخلی احساس می‌شود. بر اساس آن‌چه گفته شد، هدف این مطالعه، تحلیل مروری معماری محاسباتی عملکردی ساختمان و بررسی جامع‌نگر عوامل کالبدی و عملکردی آن است. بنابراین، سؤال اصلی این پژوهش، این موضوع است که ساختار معماری محاسباتی عملکردی چگونه است و بر مبنای چه موضوعات و چه عوامل کالبدی و عملکردی تعریف می‌شود؟ همچنین این سؤال مطرح می‌شود که هرکدام از عوامل این مفهوم در کدام موضوع طراحی استفاده می‌شود و دارای چه اهمیتی در آن موضوع هستند؟

۲. پیشینه تحقیق

مفهوم معماری محاسباتی عملکردی، اولین بار توسط ساریییلدیز (Sariyildiz 2012)، ارائه شد؛ اما پیشینه آن به سه مفهوم طراحی پارامتریک، طراحی الگوریتمیک و طراحی مولد برمی‌گردد. این مفاهیم دارای اشتراکات و افتراقاتی زیادی هستند. مفهوم طراحی مولد را می‌توان نزدیک‌ترین مفهوم به معماری محاسباتی عملکردی دانست. فرهنگ لغت کمبریج کلمه مولد[4] را به‌عنوان «ظرفیت تولید یا ایجاد چیزی» تعریف می‌کند. برخی از نویسندگان، طراحی مولد، را به‌عنوان یک فرآیند

طراحی با استفاده از تکنیک‌های تکاملی به‌منظور تولید راه‌حل معرفی می‌کنند (Fischer and Herr 2001;) (Frazer et al. 2002; Zhang and Xu 2018)؛ درحالی‌که دیگران، طراحی مولد را به فرایندهای تکاملی محدود نمی‌دانند؛ بلکه این مفهوم را، یک رویکرد طراحی مبتنی بر فرآیندهای الگوریتمیک یا مبتنی بر قاعده که راه‌حل‌های متعدد، متنوع و احتمالاً پیچیده‌ای را تولید می‌کند، در نظر می‌گیرند (Bernal et al. 2015; Humppi and Österlund 2016). علاوه بر این، چندین نویسنده رویکردهایی مانند تولید الگوریتم[۵]، اتوماتای سلولی[۶]، روش‌های تکاملی[۷]، سیستم‌های ال[۸]، دستورزبان‌های شکل[۹]، خودسازمان‌دهی[۱۰]، مدل‌های مبتنی بر عامل[۱۱] و سیستم‌های ازدحام[۱۲]، را به‌عنوان بخشی از رویکرد طراحی مولد در نظر می‌گیرند (Abdelmohsen 2013).

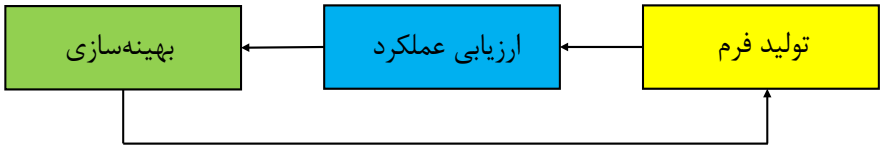
اما در سمتی دیگر، مفهوم طراحی پارامتریک قرار دارد که در بسیاری از موارد، به‌اشتباه به‌جای طراحی مولد به کار می‌رود. فرهنگ لغت آکسفورد، پارامتر[۱۳] را به‌عنوان «یک عامل عددی یا عامل قابل‌اندازه‌گیری» معرفی می‌کند که مجموعه‌ای از سیستم را تعریف می‌کند یا شرایط و محدودیت‌های عملکرد آن را تعیین می‌کند و دامنه یک فرآیند یا فعالیت خاص را تعریف می‌کند و کلمه پارامتریک[۱۴]، به‌عنوان «مربوط به پارامتر» یا «پارامترهای مربوط به آن» معرفی می‌شود (Caetano et al. 2020). بر اساس ادبیات موضوعی، طراحی پارامتریک به یک فرآیند طراحی مبتنی بر تفکر الگوریتمیک تعریف می‌شود (Jabi 2013; Jabi et al. 2017) که از پارامترها و قوانین برای تعریف کردن شرایط طراحی استفاده می‌کند (Marin et al. 2015; Yu and Gero 2015).

همچنین این مفهوم به پارادایم مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) مربوط می‌شود (Gerber and Pantazis 2016; Oxman 2017) که وابستگی‌ها را بین عناصر مختلف طراحی ایجاد می‌کند. به‌عبارت دیگر، طراحی پارامتریک، روشی است که طرحی را به‌صورت نمادین بر اساس استفاده از پارامترها توصیف می‌کند (Zboinska 2015). به‌عنوان مثال، به‌جای طراحی دیوارها با استفاده از موقعیت‌ها، طول‌ها، ارتفاع و ضخامت‌های دقیق، این خصوصیات با پارامترهای نمادین جایگزین می‌شوند که دارای دامنه‌های خاص هستند (Janssen and Stouffs 2015). از نمونه‌های معماری طراحی پارامتریک، مرکز ورزش المپیک هنگ ژو[۱۵]، توسط گروه معماران ان بی بی جی[۱۶] و پروژه راه‌آهن قطر توسط استودیو یو ان[۱۷] هستند؛ که در هر دو مورد، استودیوهای طراحی، برنامه‌های پارامتریک را توسعه دادند که به آن‌ها امکان می‌داد با تغییر در پارامترهای طراحی، ساختمان‌های متنوعی را ایجاد کنند (Caetano et al. 2020).

اصطلاح دیگر، طراحی الگوریتمیک است که در ادبیات موضوعی با طراحی پارامتریک و طراحی مولد همپوشانی زیادی دارد (Bukhari 2011) و باعث ایجاد ناسازگاری در تعریف طراحی الگوریتمیک می‌شود. طراحی الگوریتمیک، همان‌طور که از عنوان آن برمی‌آید، یک فرآیند طراحی مبتنی بر الگوریتم‌ها است (Zboinska 2015). طبق دیکشنری کمبریج، الگوریتم، مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها یا قوانین ریاضی است که به محاسبه پاسخ یک مسئله کمک می‌کند. بنابراین، تشخیص طراحی الگوریتمیک، از طراحی مولد دشوار می‌شود (Bukhari 2011). پژوهش کائتانو و همکاران (Caetano et al. 2020)، طراحی الگوریتمیک را یک الگوی طراحی در نظر می‌گیرد که از الگوریتم‌ها برای تولید مدل استفاده می‌کند و به‌نوعی آن را مولد نیز می‌دانند. طبق این تعریف، طراحی الگوریتمیک، زیرمجموعه‌ای از طراحی مولد است، که در آن توسعه الگوریتمیک با تولید کم‌تر نتایج جدید بر روی طراحی پیش‌بینی‌شده تمرکز می‌کند (Caetano et al. 2020).

با در نظر گرفتن این دو دیدگاه، اگر طراحی مولد، از اصطلاحات دیگر مانند طراحی پارامتریک، متفاوت دانسته شود، می‌توان آن را به‌عنوان یک الگوی طراحی تعریف کرد که از توصیفات الگوریتمیک استفاده می‌کند که مستقل‌تر از طراحی پارامتریک عمل می‌کند. در رویکردهای طراحی مولد، پس از شروع فرآیند تولید، سیستم، دستورالعمل‌های رمزگذاری‌شده را اجرا می‌کند تا زمانی که معیار توقف برآورده شود. درنتیجه، روش‌های مبتنی بر طراحی مولد می‌توانند حتی از توصیف‌های الگوریتمیک ساده، خروجی‌های پیچیده‌ای تولید کنند. در بسیاری از موارد، ارتباط الگوریتم با خروجی تولیدشده دشوار است؛ بنابراین پیش‌بینی نتیجه صرفاً با خواندن مسیر الگوریتم دشوار است (Caetano et al. 2020). سیستم‌های طراحی مولد مبتنی بر عملکرد (PGDS) نمونه‌های خوبی از کاربرد طراحی مولد هستند. در این سیستم‌ها، طراح یک هدف عملکردی و یک الگوریتم جستجو تعیین می‌کند و الگوریتم راه‌حل‌های طراحی را پیدا می‌کند که به بهترین وجه هدف موردنظر را بهینه کنند. معماری محاسباتی عملکردی نیز به‌عنوان یکی از رویکردهای مبتنی بر عملکرد، توسط ساریبیلدیز (Sariyildiz 2012)، در دانشگاه دلف هلند برای تقویت فرآیند طراحی ارائه شد. هدف اصلی معماری محاسباتی عملکردی، یافتن بهترین هندسه‌ای است که در قالب اتوماسیون، اهداف مرتبط با عملکردهای مختلف را در مرحله‌ی طراحی مفهومی محقق می‌کنند. چارچوب معماری محاسباتی عملکردی (PCA) متشکل از سه مرحله شامل تولید فرم[۱۸]، ارزیابی عملکرد[۱۹]، و بهینه‌سازی[۲۰] است (Ekici et al. 2019) (شکل ۱).

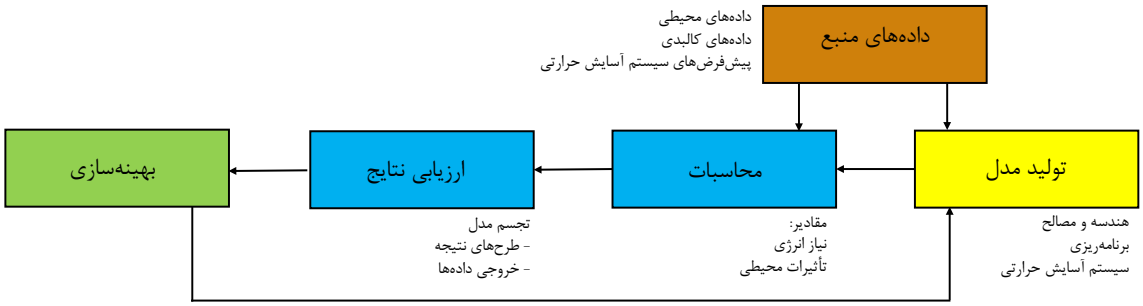
شکل ۱: چارچوب چرخه معماری محاسباتی عملکردی (PCA)



(Sariyildiz 2012)

همچنین کیس و ازالای (Kiss and Szalay 2020) ساختاری مشابه تحت عنوان چارچوب ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment; LCA) در پنج بخش ارائه می‌دهد. هدف اصلی پژوهش کیس و ازالای (Kiss and Szalay 2020) ایجاد چارچوبی برای بهینه‌سازی خودکار چرخه زندگی در یک طرح است (شکل ۲). در این مدل، بخش ارزیابی در قالب دو بخش محاسبات و ارزیابی نتایج معرفی شده است. همچنین، بخشی نیز با عنوان داده‌های منبع به‌عنوان فرآیند پیش از تولید معرفی شده است.

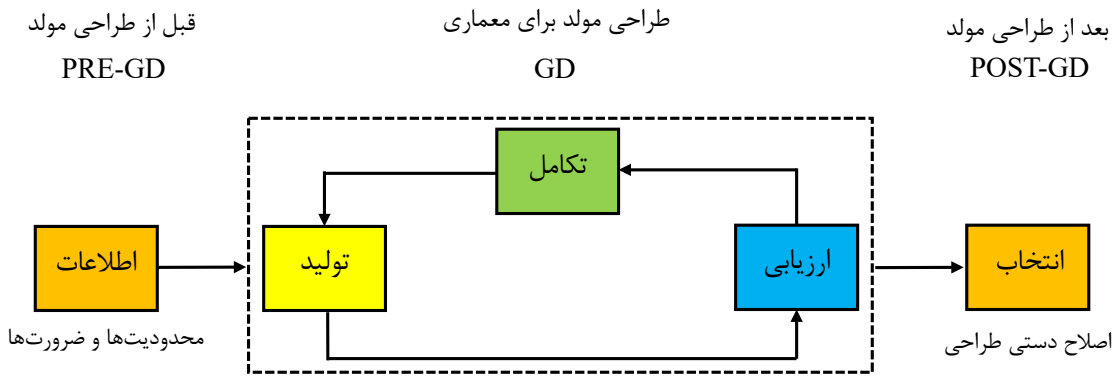
شکل ۲: چارچوب ارزیابی چرخه حیات (LCA) ساختمان



(Kiss and Szalay 2020)

گزارش دانشگاه اتودسک[۲۱] در سال ۲۰۱۷ (Nagy et al. 2018) تحت عنوان طراحی مولد در یک نگاه کلان‌تر، به یک اکوسیستم بزرگ‌تر متعلق است که با دو فرآیند قبل و بعد از طراحی مولد[۲۲] تکمیل می‌شود و از طریق استفاده از الگوریتم‌های جستجوی فرا خلاقانه با فرآیند طراحی ادغام می‌شود (شکل ۳).

شکل ۳: طراحی مولد برای معماری بر اساس گزارش دانشگاه اتودسک



(Nagy et al. 2018)

همان‌طور که دیده می‌شود، در هر سه تعریف انجام‌شده، سه بخش اصلی معماری محاسباتی عملکردی، یعنی تولید فرم، ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی به‌طور واضح دیده می‌شود. بنابراین، مسئله اصلی این پژوهش باید در این سه بخش معرفی شود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۱- تولید فرم

تولید فرم، یک فرآیند پیش‌رونده است که توسط مؤلفه‌هایی برای کشف هندسه‌ی بهینه یک ساختار که در یک معادله ثابت تعریف می‌شود (Adriaenssens et al. 2014). فرآیند تولید فرم، با یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند طراحی مفهومی ارتباط دارد؛ زیرا این مرحله، شامل تصمیمات درباره تعیین مقدار و شکل فرم کلی طراحی است. بنابراین نتایج تولید فرم، ورودی‌های کلیه مراحل بعدی شامل فرآیند طراحی، ساختمان‌سازی و چرخه‌ی حیاتی ساختمان را تأمین می‌کند. در بخش تولید فرم چارچوب معماری محاسباتی عملکردی، پس از جمع‌آوری داده‌ها، نیاز به فرآیندی است که بر مبنای عوامل معماری و تعاریف انجام‌شده، بتواند فضای طراحی گسترده‌ای از راه‌حل‌های ممکن را توصیف کند (Nagy et al. 2017). این فرآیند، در قالب دو ساختار طراحی پارامتریک و طراحی الگوریتمیک معرفی می‌شود (Kiss and Szalay 2020). مورتی (Moretti 1971)، معماری پارامتریک را به‌عنوان مطالعه «روابط بین ابعاد» یک طرح بر اساس پارامترها تعریف می‌کند.

کالای (Kalay 1989)، تعریف مورتی (Moretti 1971) در مورد فرآیند مولد تولید فرم را، با در نظر گرفتن مدل‌سازی پارامتریک به‌عنوان نمایش محاسباتی روابط هندسی تعریف می‌کند که در این فرآیند، با تغییر پارامترهای تولید، «فرم به‌طور خودکار، بر روی صفحه‌نمایش به‌روز و مجسم می‌شود». همچنین ترزیدیس (Terzidis 2006)، فرآیند تولید فرم را در قالب طراحی الگوریتمیک، روشی مبتنی بر توصیف برنامه‌های رایانه‌ای تعریف کرد که از «منطق مبتنی بر قاعده ذاتی برنامه‌های معماری، گونه شناسی، کدنویسی ساختمان و دستور زبان فضا» به دست می‌آید. بنابراین، فرآیند تولید فرم در معماری محاسباتی عملکردی، به طراحان این امکان را می‌دهد تا پیچیدگی محاسباتی و استفاده خلاقانه از رایانه (Bakhshi et al. 2022) را در گردش کار طراحی قرار دهند. بنابراین این بخش فرآیند معماری محاسباتی عملکردی را می‌توان الگوریتمی مولد بر اساس مجموعه‌ای از پارامترها و محدودیت‌ها تعریف کرد.

۲-۲- ارزیابی عملکرد

هوبکا و ادر (Hubka and Eder 1987) تأکید داشتند که طراحی به‌طور سنتی با استفاده از شهود، تجربه و قضاوت انجام می‌شد. این امر نشان‌دهنده‌ی نیاز به اندازه‌گیری و سنجش عددی ظرفیت طراحی برای برطرف کردن نیازهای مختلف و تقویت جستجوی جایگزین‌های طراحی از طریق ارزش‌های عملکرد قابل‌اندازه‌گیری چندرشته‌ای به‌عنوان معیار راهنماست. با توجه به تعداد مؤلفه‌های معماری، جایگزین‌های طراحی بسیاری در فضای جستجو وجود دارد (Gürsel Dino 2012). به همین دلیل یافتن راهکارهای طراحی عملی و مطلوب در طول مرحله ارزیابی عملکرد امر پیچیده‌ای است. بنابراین، یک فرآیند بهبود و ارتقاء کیفیت موردنیاز است که بازخورد مداوم از اقدامات و شرایط عملکرد عملیاتی برای پیش‌بینی صحت عملکرد در حین طراحی برای طراحان ارائه دهد (Chegari et al. 2021). با پیشرفت‌های اخیر در فناوری دیجیتال، پیش‌بینی‌ها و سنجش‌های عددی جوانب عملکرد را می‌توان در فرآیند طراحی معماری قرار داد تا بررسی شود که طراحی تا چه حدی با ملزومات همخوانی دارد (Ekici et al. 2019). به همین منظور، برای تقویت فرآیند ارزیابی، تکنیک‌های بهینه‌سازی محاسباتی به طرز اثبات‌شده‌ای مؤثر هستند. درواقع با توجه به‌اندازه فضای راهکار، ارزیابی عملکرد منظم توسط طراح برای هر راهکار طراحی مطلوب عمدتاً به دلیل محدودیت‌های زمانی و غیره ناممکن است (Sonta et al. 2021). علاوه بر این، یک جستجوی منظم برای فضای راهکار با هدف انتخاب زیرمجموعه‌ای از راهکارها زمانی که تنها مبتنی بر تجربه‌ی طراح باشد چالش‌برانگیز است (Chegari et al. 2021).

۲-۳- بهینه‌سازی

در این بخش، به‌منظور بهینه‌سازی طرح‌های تولیدشده، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. ویژگی مشترک همه این الگوریتم‌ها، الهام گرفتن از سیستم‌های بیولوژیکی و مولکولی برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی است (Ekici et al. 2019). ازجمله قابلیت‌های این الگوریتم‌ها، توانایی جستجوی مؤثر فضاهای بسیار بزرگ، توانایی گریز از نقاط بهینه محلی، جستجوهای قابل‌توجه در زمان محدود، هزینه محاسباتی بسیار کم و ریاضیات آسان در عین پیچیدگی مسئله است (Michalewicz and Fogel 2013). در این ادبیات موضوعی، تنها به روش‌های بهینه‌سازی خاص پرداخته می‌شود. توجه این بررسی روی محاسبات ازدحام و تکاملی است. دو دلیل برای این انتخاب وجود دارد. اول از همه، روش‌های جستجوی مستقیم، نیازمند زمان زیاد محاسبه برای پرداختن به مؤلفه‌های مختلف در مشکل بهینه‌سازی است (Huang and Niu 2016; Machairas et al. 2014). دوم این‌که در روش‌های فرا ابتکاری می‌توان راهکارهای تقریباً بهینه[۲۳] با مؤلفه‌های طراحی متعدد در زمان قابل‌قبول ارائه دهد (Michalewicz and Fogel 2013). هوش ازدحام[۲۴] (SI) و محاسبات تکاملی[۲۵] (ES) دو روش بهینه‌سازی قدرتمند در روش‌های فرا ابتکاری هستند. هوش ازدحام از سیستم‌های هوش چندکاربره که از رفتار ازدحام اجتماعی موجودات زنده الهام می‌گیرند، استفاده می‌کند و بر اساس آن داده‌ها را شبیه‌سازی می‌کند (Blum and Li 2008) و محاسبات تکاملی از فرآیندهایی که از تکامل زیست‌شناختی نظریه‌ی داروین نشئت می‌گیرند، استفاده می‌کند (Mitchell and

Taylor 1999). بنابراین در روش تحقیق این مطالعه، در یک مطالعه پهنانگر، تنها پژوهش‌هایی با رویکرد هوش ازدحام و محاسبات تکاملی مدنظر قرارگرفته‌اند.

۳. روش تحقیق

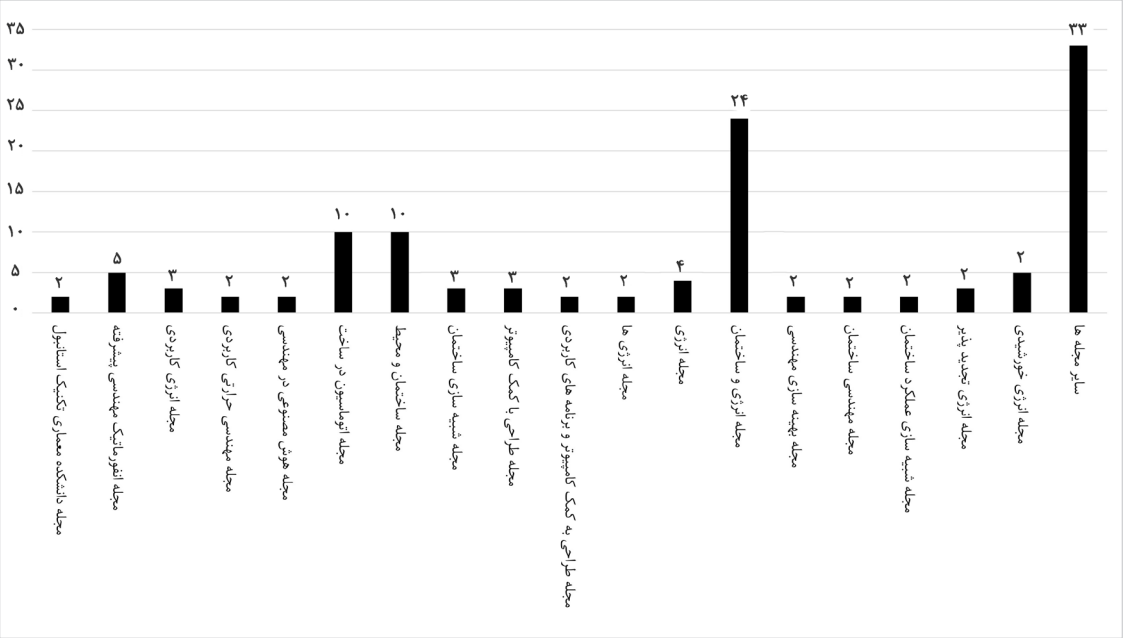
روش تحقیق این پژوهش رویکردی کمی- کیفی و جامع‌نگر را بر مبنای ادبیات موضوعی در معماری محاسباتی عملکردی را دنبال می‌کند. با توجه به هدف پژوهش، که تحلیلی جامع‌نگر بر مبنای پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه معماری محاسباتی عملکردی و ارزش‌گذاری مؤلفه‌ها و اهداف مرتبط با آن است. روش این پژوهش تحلیل محتوای اسنادی با جامعه آماری پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه معماری محاسباتی عملکردی با تأکید بر محاسبات تکاملی و ازدحام در تحقیقات از حدود ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ میلادی است. نمونه‌برداری به‌صورت هدفمند و با ساختار گلوله برفی بوده است. بر این اساس که با یافتن هر مقاله متناسب با موضوع مطالب برداشت‌شده است و بر اساس منابع آن مقاله، مقاله‌های دیگر جستجو شده و مقدار نمونه بر اساس اشباع نظری در هر حوزه بوده است؛ یعنی نمونه‌برداری تا حدی ادامه پیدا کرده که با اضافه شدن نمونه‌ها، داده‌های جدیدی به پژوهش اضافه نشده است.

به‌طورکلی، بهینه‌سازی طراحی معماری، تنها از طریق تغییرات هندسی در مراحل اولیه طراحی امکان‌پذیر است. این امر به‌وضوح، بهینه‌سازی در طراحی معماری را از بهینه‌سازی در مهندسی متمایز می‌کند. از این‌رو، طرح معماری، اکثراً به‌عنوان مجموعه‌ای از مرزهای خاص که در آن‌ها جستجوی راهکارهای مهندسی خوب انجام می‌شود استفاده می‌گردد. بنابراین در بررسی ادبیات موضوعی، تنها پژوهش‌هایی در نظر گرفته شده است که شامل تغییرات هندسی معماری باشند و به بهینه‌سازی مهندسی مطلق بسنده نکرده‌اند.

شکل ۴: فراوانی کلیدواژه‌ها (سمت راست) و فراوانی پایگاه‌های داده (سمت چپ) پژوهش‌های مورد بررسی

مقالات متعددی در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های موضوعی از طریق در نظر گرفتن چارچوب معماری محاسباتی عملکردی و محاسبات تکاملی و ازدحام بررسی شدند. برای شناسایی پژوهش‌های مرتبط از واژگان کلیدی مانند "طراحی ساختمان"، "طراحی معماری"، "الگوریتم تکاملی"، "محاسبه‌ی تکاملی"، "هوش ازدحام"، و "بهینه‌سازی ازدحام" استفاده شد (شکل ۴ و ۶). در این جستجو از پایگاه‌های داده‌ی ساینس دایرکت[۲۶]، اسکوپوس[۲۷] و تامسون رویترز[۲۸] استفاده شد (شکل ۴). در کل، ۱۱۹ پژوهش مورد بررسی قرار گرفته که همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تمامی پژوهش‌های مورد بررسی، در مجلات نمایه‌شده در پایگاه اسکوپوس حضور دارند. همچنین ۹۹ پژوهش از ۱۱۹ پژوهش در مجلاتی هستند که در پایگاه تامسون رویترز، نمایه شده‌اند. همچنین پژوهش‌ها بر اساس کلیدواژه‌های جستجو نیز تقسیم‌بندی شده‌اند که در شکل قابل‌مشاهده است (شکل ۴).

شکل ۵: فراوانی مجلات مورد بررسی قرارگرفته در پیشینه پژوهش



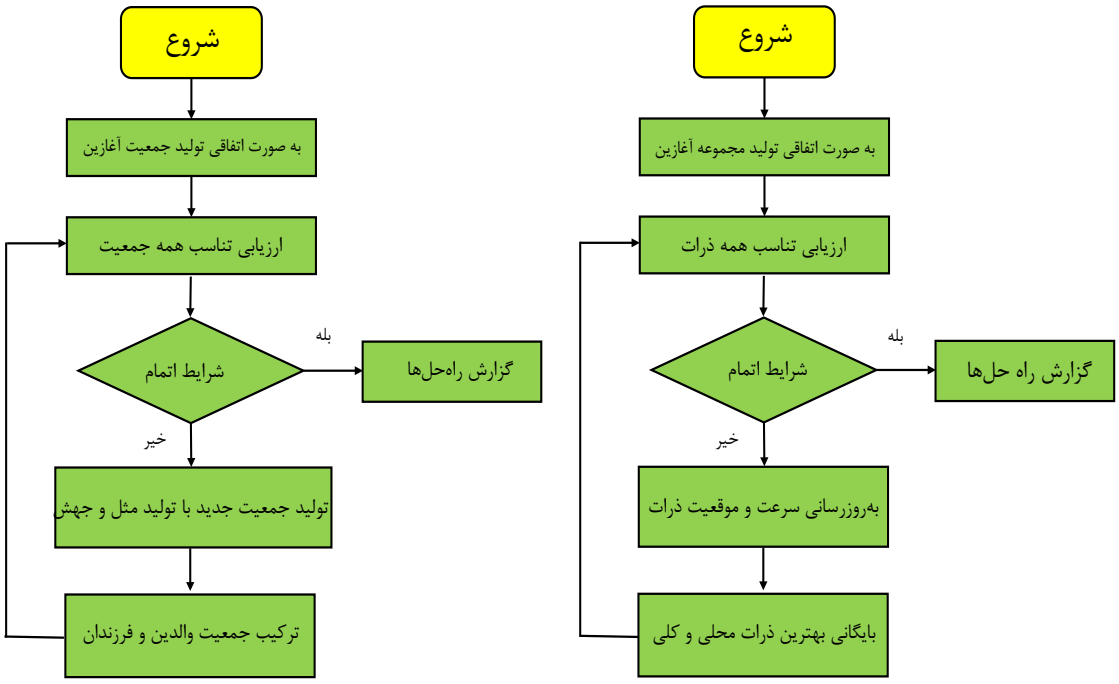
برای بررسی عمیق این زمینه محدودیت زمانی وجود نداشت. تاریخ اتمام نهایی برای پژوهش‌های منتشرشده ابتدای ژانویه ۲۰۲۱ میلادی است. این جستجوی گسترده به مجموعه‌ای از مقالات مرتبط منتهی شد که شامل معیارهای زیر باشند:

- هر سه مرحله‌ی معماری محاسباتی عملکردی را در برمی‌گیرند.
- به‌طور واضح به موضوع فرم‌یابی معماری در طراحی‌های معماری اجرایی و پژوهشی می‌پردازند.
- شامل فرآیندهای بهینه‌سازی مبتنی بر محاسبات تکاملی و ازدحام است (شکل ۶).
- باید به‌صورت مقالات مجله‌ای چاپ‌شده‌اند؛ چون اکثر مقالات کنفرانسی فاقد اطلاعات اساسی هستند.
- ممکن است هر معیار عملکردی را در نظر بگیرند؛ هیچ انتخابی بر اساس معیارهای عملکرد خاص نبوده است.

بررسی اولیه زیرمجموعه انتخاب‌شده به شناسایی معیار دیگری که برای مطالعه مقالات انتخابی در نظر گرفته شده، منتهی شد. بر اساس این معیار، پژوهش‌هایی مدنظر قرار گرفت که طبقه‌بندی آن در قالب موضوعات معماری شامل پیکربندی، پوسته و فرم ساختمان امکان‌پذیر باشد.

این تقسیم‌بندی بر اساس تحلیل محتوای اسنادی به‌دست آمده، و به‌منظور اطمینان از روایی، در اختیار ده متخصص انرژی و معماری قرارگرفته و مورد تأیید قرارگرفته است. در نهایت، نتایج پایانی، در ۳۹ مجله معتبر بین‌المللی به دست آمد (شکل ۵). بیش‌ترین مقالات در سه مجله انرژی و ساختمان[۲۹]، ساختمان و محیط[۳۰] و اتوماسیون در ساخت[۳۱] قرار دارند که حدود ۴۰ درصد مقالات را شامل می‌شوند؛ این موضوع اعتبار نتایج بررسی ادبیات موضوعی این پژوهش را نشان می‌دهد. درنهایت نتایج مورد آزمون‌های همبستگی قرارگرفته است. در آزمون‌های همبستگی، ضریب معناداری در برخی موارد بالاتر از ۰.۰۵ گزارش شده که بر اساس نظر متخصصین آمار تا سال ۲۰۱۹ میلادی باعث عدم معناداری مقدار ارزش آزمون می‌شد؛ اما بر اساس نظر آمرهین مقدار ضریب معناداری الزاماً نشان از معنادار بودن یا نبودن داده‌ها نیست و تنها یک گزارش است که به این امر کمک می‌کند (Amrhein et al. 2019).

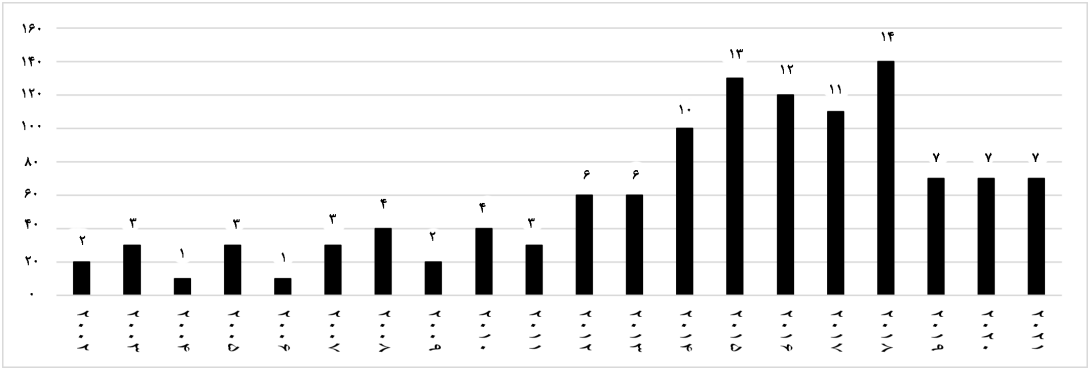
شکل ۶: فرآیندهای هوش ازدحام (SI) و محاسبات تکاملی (ES)



(Ekici et al. 2019)

بر این اساس تنها به گزارش این ضریب پرداخته‌شده است و به‌عنوان یک متغیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور انجام آزمون همبستگی، همه داده‌ها، کدگذاری شده و در قالب ماتریس قرارگرفته است. به‌منظور اطمینان از صحت مراحل کار پژوهشی و روایی نتایج، داده‌ها و نتایج در اختیار ده متخصص آمار قرارگرفته و مورد تأیید قرارگرفته است.

شکل ۷: خط زمانی پژوهش‌های موردبررسی قرارگرفته در پیشینه پژوهش



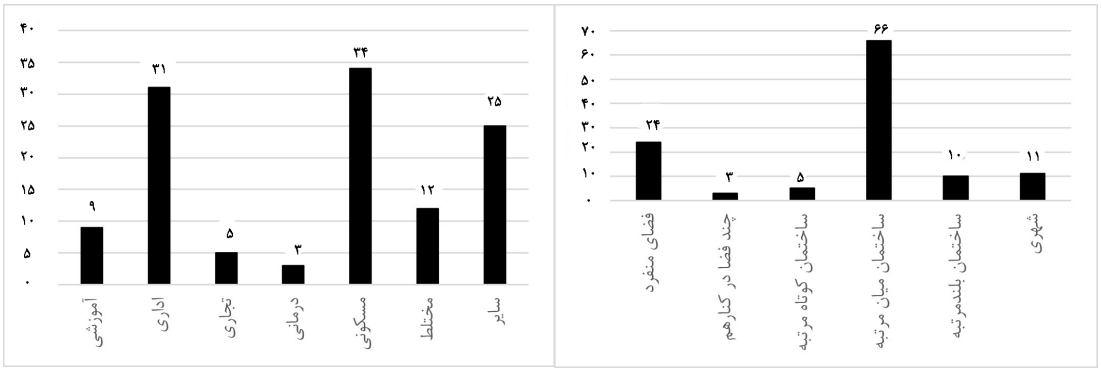
در این پژوهش، متغیرهای معماری و فرم‌یابی[۳۲] در ارتباط با موضوعات پژوهش، مورد تحلیل محتوا قرار می‌گیرند. همچنین بهینه‌سازی در قالب سه موضوع پیکربندی ساختمان[۳۳]، فرم ساختمان[۳۴] و پوسته ساختمان[۳۵] دسته‌بندی شده است. دلیل این بررسی، استفاده آن‌ها در نگارش الگوریتم طراحی مولد است. متغیرها و پارامترهای تعداد ۱۱۹ پژوهش در حوزه بهینه‌سازی به‌دست آمده است. بررسی بر اساس دو آمار توصیفی و تحلیلی ارائه می‌گردد. آمارهای توصیفی بر مبنای همه ۱۱۹ پژوهش مورد بررسی ارائه گردیده است. در این خوشه‌بندی، عوامل یافتن فرم، ۱۷ متغیر شامل نسبت پنجره به دیوار، موقعیت پنجره، ابعاد پنجره، ماتریس شبکه‌ای، موقعیت فضا، ابعاد فضا، سایه‌اندازی، سازه سقف‌ها، فرم سقف‌ها، جهت‌گیری، نورگیری، ارتفاع طبقه، طرح نما، طرح سقف، فرم ساختمان، تعداد ساختمان‌ها و ماتریس مجاورت و موضوعات شامل سه موضوع اصلی فرم، پوسته و پیکربندی ساختمان و سال انتشار پژوهش از سال ۲۰۰۲ میلادی تا ۲۰۲۱ میلادی به‌دست آمده‌اند (شکل ۷).

۴. یافته‌های تحقیق

بر اساس یافته‌ها، ۱۱۹ پژوهش، مورد بررسی و تحلیل محتوای اسنادی قرار گرفته و به‌صورت کیفی تقسیم‌بندی شده‌اند. یافته‌ها، به‌منظور بررسی روایی، در اختیار ده متخصص انرژی و معماری قرارگرفته و تأیید شده‌اند. بر این اساس، پژوهش‌ها در سه موضوع اصلی شامل فرم، پوسته و پیکربندی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این بین، ۳۱ پژوهش در حوزه پیکربندی ساختمان، ۳۸ پژوهش در حوزه شکل و فرم ساختمان و ۷۰ پژوهش در حوزه پوسته ساختمان قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که برخی از پژوهش‌ها، دو موضوع را به‌طور هم‌زمان مورد هدف قرار داده‌اند. بر اساس یافته‌ها، بخش زیادی از پژوهش‌ها حوزه پوسته ساختمان را مورد هدف قرار داده‌اند درصورتی‌که به نظر می‌رسد پیکربندی فضایی، بسیار کم موردتوجه بوده است. این موضوع را می‌توان به دلیل سختی نگارش الگوریتم در موضوع پیکربندی و فرآیند آسان نگارش الگوریتم طراحی مولد پوسته ساختمان دانست.

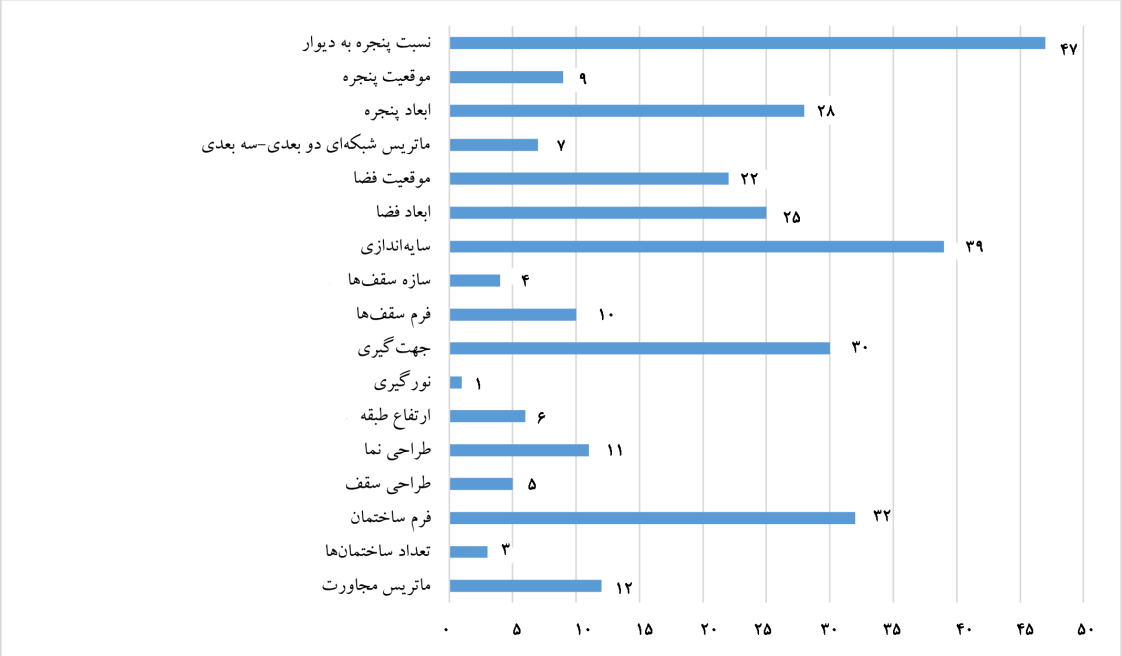
همچنین، بررسی بر روی مقیاس‌ها و کاربری‌های هدف در پژوهش‌های مختلف انجام پذیرفته است. در بررسی مقیاس‌های هدف پژوهش‌ها، بیش‌ترین تعداد، مرتبط با ساختمان میان مرتبه است. در بین پژوهش‌ها، ۶۶ مورد، در مقیاس ساختمان میان‌مرتبه بررسی خود را انجام داده‌اند. ۲۴ مورد به بررسی یک فضای منفرد (به‌طور مثال، یک اتاق) و ۱۰ مورد نیز به ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته‌اند (شکل ۸). همچنین ۱۱ مورد در مقیاس شهری انجام شده‌اند. همچنین بررسی بر روی کاربری‌های هدف پژوهش‌ها، انجام شده است. در بررسی فراوانی کاربری‌های مختلف در پژوهش‌های مورد بررسی، بخش اداری و مسکونی با به ترتیب ۳۱ و ۳۴ مورد، بیش‌ترین پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند؛ که بنا به سهم این دو کاربری در ساخت‌وساز، طبیعی به نظر می‌رسد (شکل ۸).

شکل ۸: فراوانی مقیاس‌های مختلف بررسی‌شده (سمت راست) و فراوانی کاربری‌های مختلف بررسی‌شده (سمت چپ) در پژوهش‌های مورد بررسی



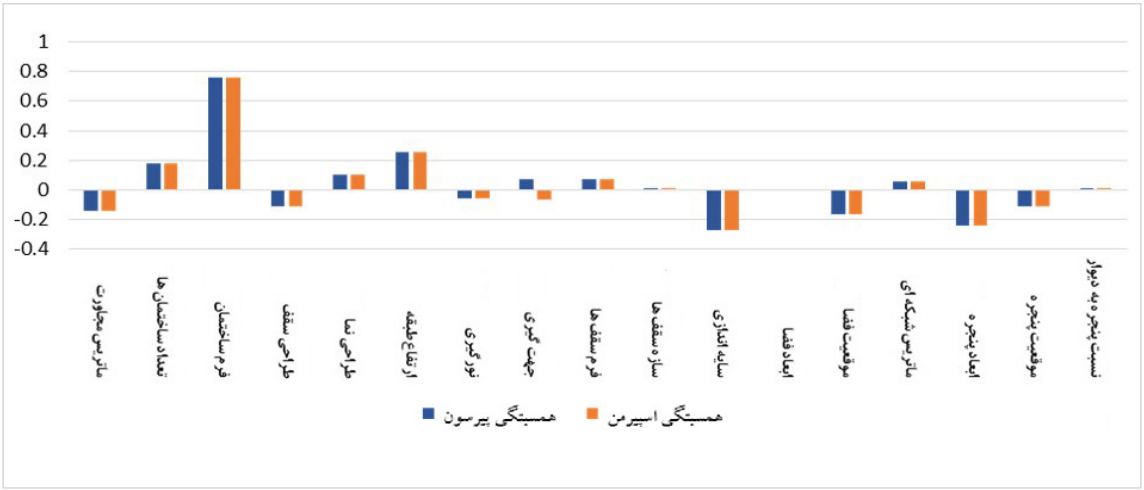
اما پس از بررسی موضوعات کلی بهینه‌سازی، پژوهش‌های منتخب، بر مبنای عوامل فرم‌یابی، از طریق تحلیل محتوا، موردبررسی قرارگرفته‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود در بین ۱۱۹ پژوهش مورد بررسی، ۱۷ عامل فرم‌یابی مستخرج شده‌اند و آمار توصیفی و تحلیلی آن ارائه می‌گردد (شکل ۹). فرآیند استخراج به‌صورت کیفی انجام شده است و یافته‌ها، به‌منظور بررسی روایی، در اختیار ده متخصص انرژی و معماری قرارگرفته و تأیید شده‌اند. بر اساس شکل، بیش‌ترین فراوانی مربوط به نسبت پنجره به دیوار و سایه‌اندازی است. این موضوع به این دلیل است، که این دو عامل، در هر سه موضوع فرم، پوسته و پیکربندی به‌عنوان متغیر در پژوهش‌های مختلف، انتخاب می‌شده‌اند (شکل ۹). کم‌ترین فراوانی مربوط به نورگیری و تعداد ساختمان‌ها است که به ترتیب ۱ و ۳ بار تکرار شده است. اما برای بررسی دقیق‌تر، داده‌های پژوهش‌های مورد بررسی در قالب فایل اکسل به‌صورت فراوانی کدگذاری شده‌اند و سپس مورد آزمون‌های همبستگی و آنتروپی شانون قرارگرفته‌اند. کدگذاری به‌صورت صفر و یک بوده است.

شکل ۹: فراوانی استفاده از هر یک از عوامل یافتن فرم در پژوهش‌های انجام‌شده



در ابتدا، آزمون همبستگی عوامل فرم‌یابی با موضوعات سه‌گانه مورد بررسی قرارگرفته است. این موضوع می‌تواند ارتباط هر عامل با هر موضوع را نشان دهد. آزمون همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع فرم ساختمان آزمون شده است (شکل ۱۰). همبستگی‌های بالا مربوط به ارتفاع طبقه، طراحی نما و فرم ساختمان است. بالاترین همبستگی مربوط به فرم ساختمان است که طبیعی به نظر می‌رسد.

شکل ۱۰: همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع فرم ساختمان

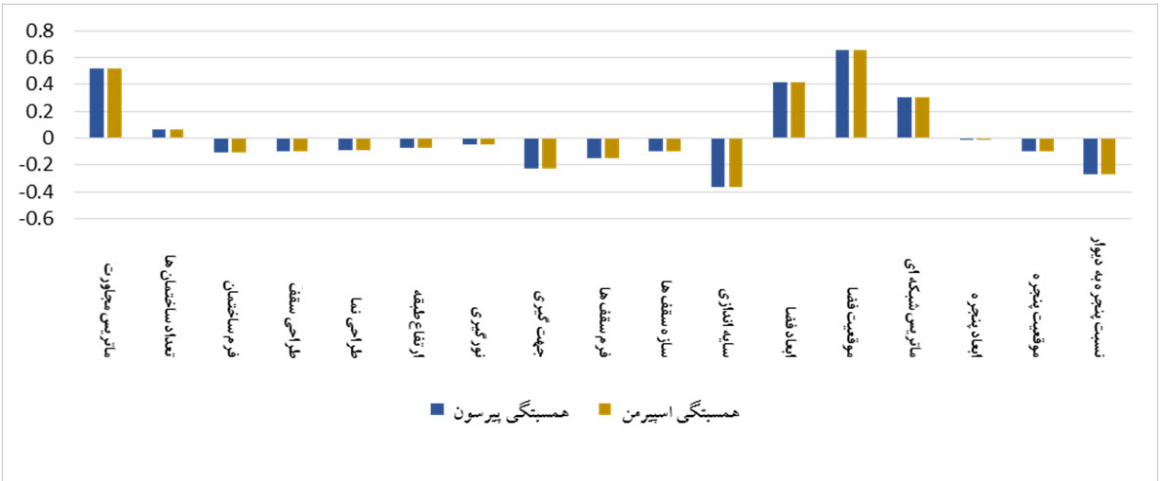


در ادامه بررسی، آزمون همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع پوسته ساختمان ارزیابی شده است (شکل ۱۱). در این بخش همبستگی‌های بالا مربوط به سایه‌اندازی، ابعاد پنجره، جانمایی پنجره و نسبت پنجره به دیوار است. بیش‌ترین همبستگی منفی نیز، مربوط به فرم ساختمان است. این موضوع نشان می‌دهد، در پژوهش‌هایی که پوسته مورد بررسی بوده است، فرم ساختمان ارزیابی نشده است. همچنین همبستگی منفی با ماتریس مجاورت، ماتریس شبکه‌ای و موقعیت فضا نیز دیده می‌شود. متغیرهای ارتفاع طبقه، طراحی نما و تعداد ساختمان‌ها را می‌توان از دیگر عوامل نگارش الگوریتم طراحی مولد فرم ساختمان دانست.

شکل ۱۱: همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع پوسته ساختمان

همچنین همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع پیکربندی ساختمان به‌عنوان موضوع این پژوهش، مورد آزمون قرارگرفته است (شکل ۱۲). در این بخش همبستگی‌های بالا مربوط به ماتریس مجاورت، موقعیت فضایی، ابعاد فضا و ماتریس شبکه‌ای است. بر این اساس این چهار متغیر را می‌توان از مهم‌ترین عوامل تشکیل‌دهنده الگوریتم طراحی مولد پیکربندی ساختمان است. بیش‌ترین همبستگی منفی، مربوط به متغیر سایه‌اندازی، جهت‌گیری و فرم و سازه سقف است. این موضوع نشان می‌دهد در پژوهش‌های پیکربندی، این متغیرها مورد استفاده قرار نمی‌گرفته‌اند.

شکل ۱۲: همبستگی پیرسون و اسپیرمن عوامل یافتن فرم با موضوع پیکربندی ساختمان



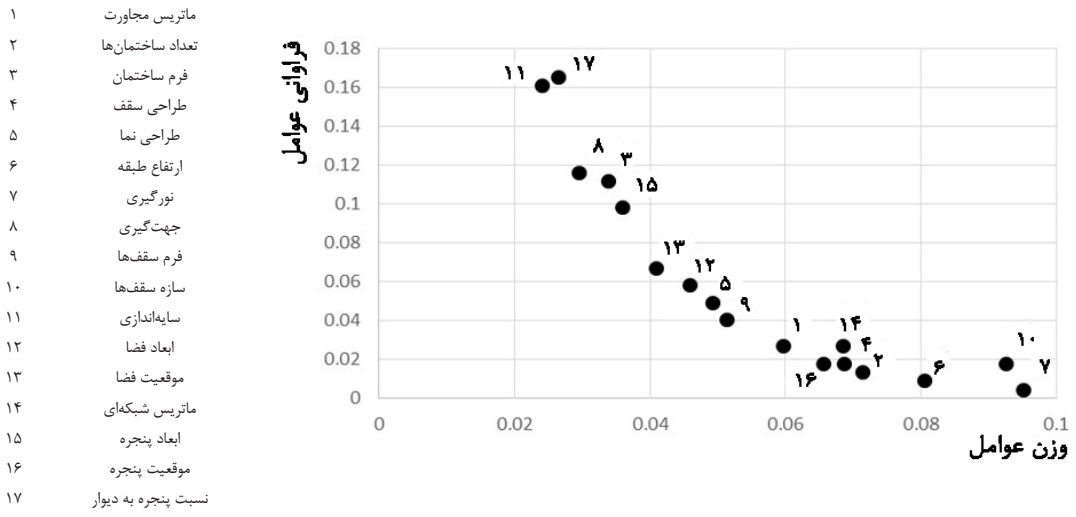
در ادامه به‌منظور اولویت‌سنجی بین عوامل فرم‌یابی و یافتن درجه اهمیت هرکدام، از روش آنتروپی شانون روی داده‌های پژوهش‌های منتخب از بین ۱۱۹ پژوهش، استفاده شده است (جدول ۱). این آزمون، سه متغیر وزن، فراوانی هر یک از عوامل فرم‌یابی را تبیین می‌کند. همان‌طور که در جدول قابل مشاهده است در بین ۱۷ عامل مطرح‌شده، نورگیری و سازه سقف به ترتیب با وزن نرمال شده ۰.۰۹۵ و ۰.۰۹۲ دارای بیش‌ترین وزن و سایه‌اندازی و نسبت پنجره به دیوار به ترتیب با وزن نرمال شده ۰.۰۲۴ و ۰.۰۲۶ دارای کم‌ترین می‌باشند.

جدول ۱: مقادیر فراوانی و وزن عوامل در آزمون آنتروپی شانون

	نسبت پنجره به دیوار	موقعیت پنجره	ابعاد پنجره	ماتریس شبکه‌ای	موقعیت فضا	ابعاد فضا	سایه‌اندازی	سازه سقف‌ها	فرم سقف‌ها	جهت‌گیری	نورگیری	ارتفاع طبقه	طراحی نما	طراحی سقف	فرم ساختمان	تعداد ساختمان‌ها	ماتریس مجاورت
کد در شکل	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
وزن عوامل	۰.۰۲۶	۰.۰۶۵	۰.۰۳۶	۰.۰۶۸	۰.۰۴۰	۰.۰۴۵	۰.۰۲۴	۰.۰۹۲	۰.۰۵۱	۰.۰۲۹	۰.۰۹۵	۰.۰۸۰	۰.۰۴۹	۰.۰۶۸	۰.۰۳۳	۰.۰۷۱	۰.۰۵۹
فراوانی عوامل	۰.۱۶۵	۰.۰۱۷	۰.۰۹۸	۰.۰۲۶	۰.۰۶۶	۰.۰۵۸	۰.۱۶۰	۰.۰۱۷	۰.۰۴۰	۰.۱۱۶	۰.۰۰۴	۰.۰۰۸	۰.۰۴۹	۰.۰۱۷	۰.۱۱۱	۰.۰۱۳	۰.۰۲۶

به‌منظور بررسی دقیق‌تر نتایج آزمون آنتروپی شانون، نمودار مختصات وزن- فراوانی مورد بررسی قرارگرفته است. بر اساس نتایج، شکل آنتروپی شانون بر مبنای دو محور وزن و فراوانی نرمال‌شده ترسیم شده است (شکل ۱۳). بر اساس شکل می‌توان تشخیص داد که سازه سقف، نورگیری و ارتفاع طبقه کم‌تر موردبررسی قرار گرفته و از درجه اهمیت بیش‌تری جهت بررسی برخوردار هستند. همچنین به نظر می‌رسد، نسبت پنجره به دیوار، سایه‌اندازی و جهت‌گیری از درجه اهمیت کم‌تری برخوردار هستند و بیش‌تر مورد توجه بوده‌اند.

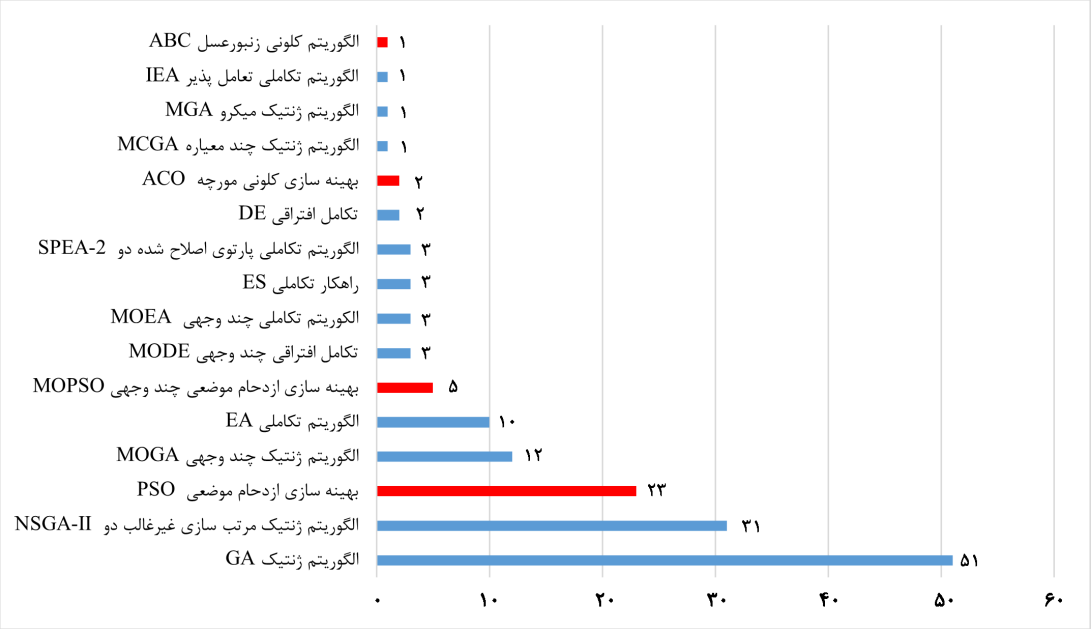
شکل ۱۳: مختصات آنتروپی شانون بر مبنای محور وزن و فراوانی نرمال‌شده



۱	ماتریس مجاورت
۲	تعداد ساختمان‌ها
۳	فرم ساختمان
۴	طراحی سقف
۵	طراحی نما
۶	ارتفاع طبقه
۷	نورگیری
۸	جهت‌گیری
۹	فرم سقف‌ها
۱۰	سازه سقف‌ها
۱۱	سایه‌اندازی
۱۲	ابعاد فضا
۱۳	موقعیت فضا
۱۴	ماتریس شبکه‌ای
۱۵	ابعاد پنجره
۱۶	موقعیت پنجره
۱۷	نسبت پنجره به دیوار

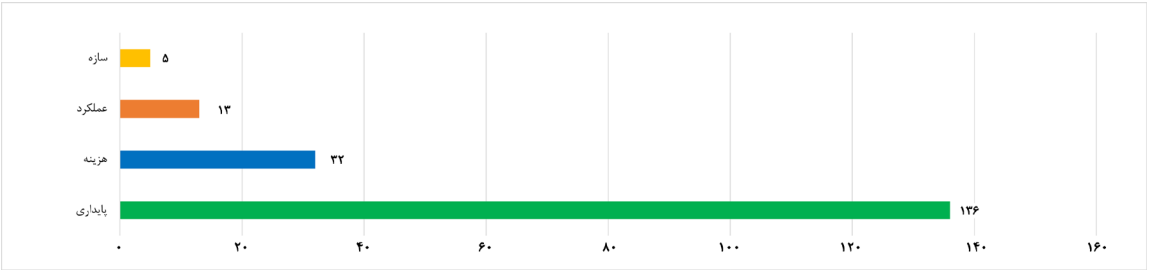
همچنین، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورداستفاده در پژوهش‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۴). در این بین ۱۱۹ پژوهش، ۵۱ مورد از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و بعد از آن الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب دو با ۳۱ مورداستفاده، بیش‌ترین میزان را به خود اختصاص داده است. لازم به ذکر است که در ۳۳ پژوهش، از دو الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است. در نمودار، رنگ آبی، مربوط به محاسبات تکاملی و رنگ قرمز مربوط به محاسبات ازدحام است.

شکل ۱۴: فراوانی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در پژوهش‌های موردبررسی



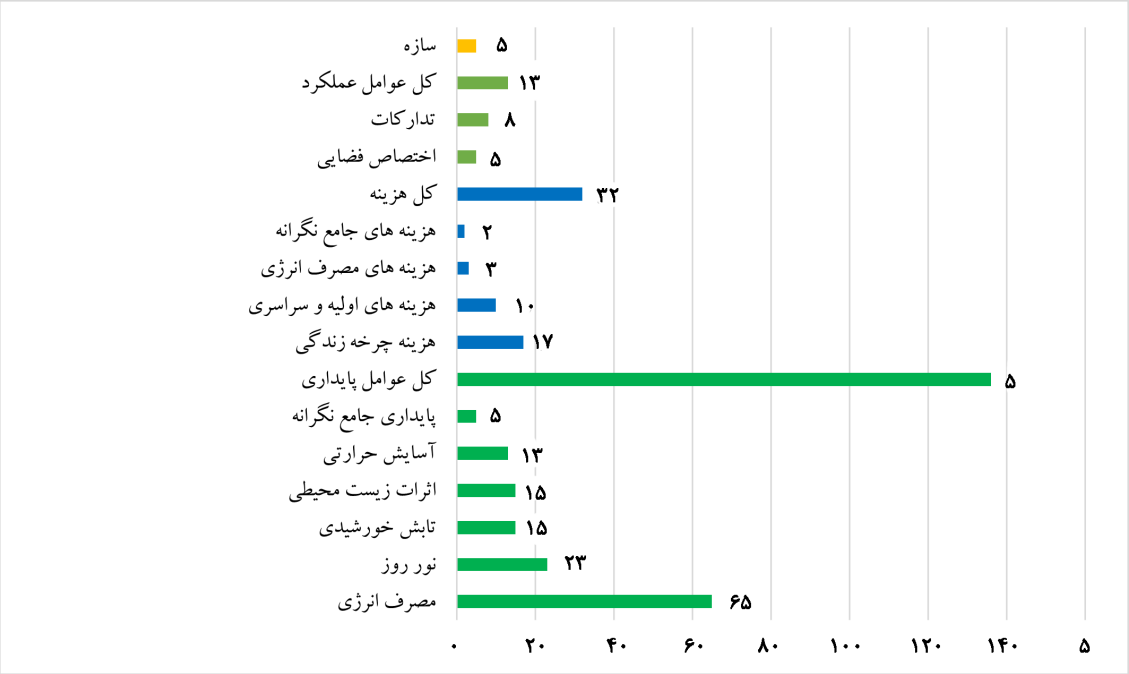
در ادامه، اهداف عملکردی در پژوهش‌های معماری محاسباتی عملکردی، مورد تحلیل محتوا قرار می‌گیرد. یافته‌ها نشان می‌دهد که مبحث پایداری، بیش‌تر از سایر اهداف، موردتوجه بوده است و سازه کم‌تر از سایر موضوعات، مورد بهینه‌سازی قرارگرفته است. ۷۳ درصد موضوعات به مبحث پایداری تعلق دارد که این موضوع به دلیل توجه پژوهشگران معاصر به این مبحث است. موضوع سازه با ۵ مورد و حدود ۳ درصد، کم‌ترین هدف عملکردی بهینه‌سازی بوده است (شکل ۱۵).

شکل ۱۵: اهداف عملکردی معماری محاسباتی عملکردی (PCA) در پژوهش‌های موردبررسی



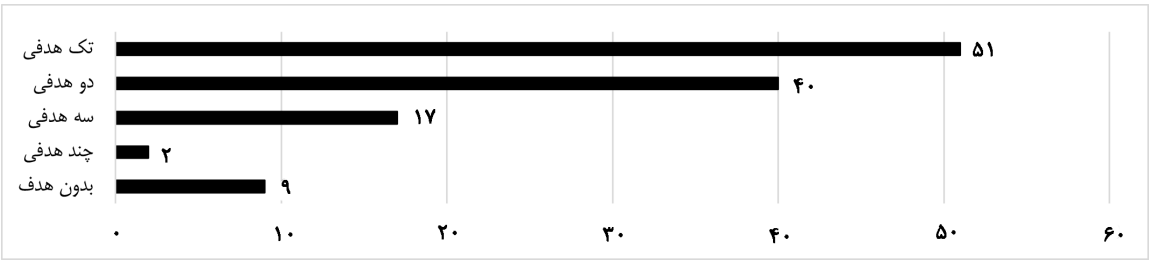
همچنین در ادامه، زیرمجموعه‌های هرکدام از موضوعات، مورد بررسی توصیفی و تحلیلی قرار می‌گیرد (شکل ۱۶). همان‌طور که دیده می‌شود، مصرف انرژی با ۶۵ مورد پژوهش، بیش‌ترین توجه را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری‌که حدود ۵۰ درصد موارد مرتبط با پایداری به این موضوع اختصاص می‌یابد. این مسئله، اهمیت موضوع انرژی را در سال‌های اخیر، نشان می‌دهد. کم‌ترین موارد توجه به هزینه‌های جامع‌نگرانه و هزینه‌های مصرف انرژی هر یک با دو مورد مربوط می‌شود. شکل فراوانی جزءنگر هر یک از اهداف عملکردی در ادامه ارائه شده است.

شکل ۱۶: فراوانی اهداف عملکردی و عوامل آن‌ها به‌اختصار در پژوهش‌های بررسی‌شده



پس از مصرف انرژی با اختلاف زیادی، نور روز، هزینه‌های چرخه زندگی، تابش خورشیدی و اثرات محیطی به ترتیب با ۲۳، ۱۷، ۱۵ و ۱۵ مورد دارای بیش‌ترین مقدار توجه می‌باشند. این اختلاف، میزان اهمیت موضوع مصرف انرژی را در بین پژوهشگران اذعان می‌دارد. همچنین، کم‌ترین فراوانی اهداف عملکردی، مرتبط با هزینه‌های جامع‌نگرانه با دو مورد و هزینه‌های مصرف انرژی با ۳ مورد است. نکته قالب توجه، تناقض بین فراوانی دو موضوع مصرف انرژی و هزینه مصرف انرژی است. همان‌طور که گفته شد، در مبحث هزینه، هزینه چرخه زندگی با ۱۷ مورد، بیش‌تر موردتوجه بوده است. پس‌از آن، هزینه‌های سراسری و اولیه، با ۱۰ مورد، بیش‌ترین فراوانی را دارند.

شکل ۱۷: فراوانی حالات اهداف عملکردی پژوهش‌ها



برخی از این اهداف در پژوهش‌ها به‌صورت مشترک مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. به‌طور مثال، مصرف انرژی و نور روز در خیلی از پژوهش‌ها در کنار هم به‌عنوان اهداف عملکردی موردتوجه بوده‌اند. به همین منظور، پژوهش‌ها بر اساس تعداد اهداف عملکردی بهینه‌سازی تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۱۷). ۵۱ پژوهش، تنها یک هدف را مورد بررسی قرار داده‌اند و ۴۰ پژوهش، دو هدف را به‌صورت مشترک بهینه‌سازی کرده‌اند.

جدول ۲: ماتریس دوبعدی فراوانی مشترکات اهداف عملکردی در پژوهش‌های موردبررسی

	سازه	تدارکات	اختصاص فضایی	هزینه‌های جامع نگرانه	هزینه‌های مصرف انرژی	هزینه‌های اولیه و سراسری	هزینه چرخه زندگی	پایداری جامع نگرانه	آسایش حرارتی	اثرات زیست‌محیطی	تابش خورشیدی	نور روز	مصرف انرژی
مصرف انرژی	۱				۱	۸	۶		۷	۲	۲	۱۵	۲۱
نور روز	۲					۱			۳			۴	۱۵
تابش خورشیدی													۲
اثرات زیست‌محیطی						۲	۷		۱	۳			۲
آسایش حرارتی							۱			۱		۳	۷
پایداری جامع نگرانه													
هزینه چرخه زندگی									۱	۷			۶
هزینه‌های اولیه و سراسری						۳				۲		۱	۸
هزینه‌های مصرف انرژی													۱
هزینه‌های جامع‌نگرانه													
اختصاص فضایی													
تدارکات		۱											
سازه												۲	۱

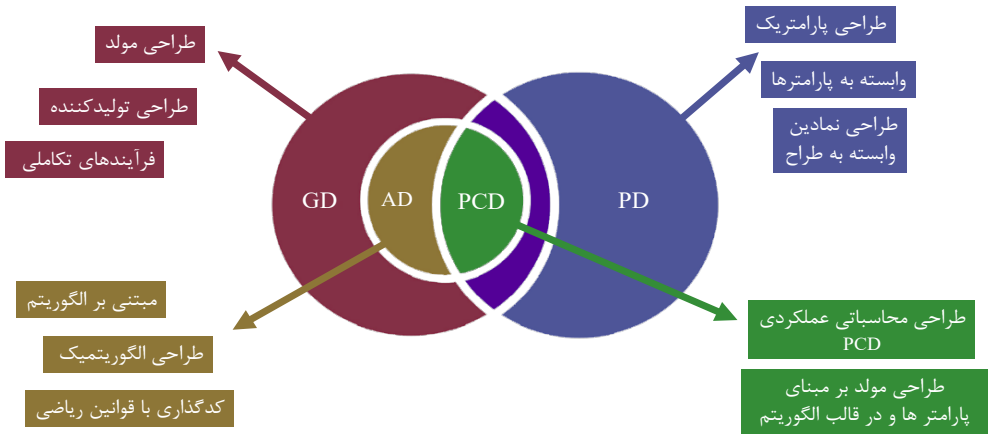
بر این اساس و به‌منظور شناخت اهداف مشترکی در پژوهش‌ها مورد استفاده قرارگرفته‌اند، ماتریسی دوبعدی ارائه شده است که در جدول قابل‌مشاهده است (جدول ۲). همان‌طور که در ماتریس دوبعدی دیده می‌شود، بیش‌تر اشتراک استفاده از اهداف عملکردی مرتبط با مصرف انرژی و نور روز با ۱۵ مورد پژوهش است. پس‌از آن، مصرف انرژی با هزینه‌های اولیه و سراسری در هشت مورد اشتراک دارند. همچنین مصرف انرژی با موضوعات هزینه چرخه زندگی و مصرف انرژی نیز در شش مورد به‌صورت مشترک در پژوهش‌ها مورد بهینه‌سازی قرارگرفته‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش یک تحلیل مروری از معماری محاسباتی عملکردی با استفاده از محاسبات تکاملی و ازدحام ارائه می‌کند. این موضوع موردبحث معماران و مهندسان در طول چند دهه‌ی اخیر بوده است. بر اساس شواهد ارائه‌شده در یافته‌ها، به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که توجه به موضوع معماری محاسباتی عملکردی در بین پژوهشگران معماری به‌صورت تصاعدی رو به افزایش است. این موضوع، به‌خصوص در مباحثی از معماری که محاسبات پیچیده‌ای دارد؛ همچون انرژی حرارتی، روشنایی و هزینه‌ها بسیار موردتوجه است.

یافته‌های حاصل از مطالعه اسنادی نشان می‌دهد، که معماری محاسباتی عملکردی، به دلیل ترکیب دو مبحث طراحی مولد معماری و محاسبات بهینه‌سازی، دارای ابهامات مفهومی زیادی است. این ابهامات، در پژوهش‌های داخلی، که تعداد بسیار کمی هم هستند، بسیار بیش‌تر است. بر این اساس، در این پژوهش، نموداری مفهومی برای طراحی الگوریتمیک، طراحی مولد و طراحی پارامتریک ارائه شده است (شکل ۱۸) که آشفتگی اصطلاحات را از بین می‌برد. نمودار مفهومی پیشنهادی در نظر می‌گیرند که طراحی مولد، نیاز به استفاده صریح از الگوریتمی دارد که یک طرح تولید می‌کند. علاوه بر این، اگر الگوریتم، ویژگی ردیابی را برآورده کند؛ یعنی یک رابطه قابل‌شناسایی بین الگوریتم و طرح تولیدشده باشد، پس طراحی الگوریتمیک نیز در نظر گرفته می‌شود. سرانجام، اگر طراحی به مجموعه‌ای از پارامترها وابسته باشد، طراحی پارامتریک است.

شکل ۱۸: بررسی تطبیقی چهار مفهوم طراحی مولد (GD)، طراحی الگوریتمیک (AD)، طراحی پارامتریک (PD) و معماری محاسباتی عملکردی (PCD) که دارای همپوشانی‌های زیادی هستند.



اگرچه می‌توان هر اصطلاح را به‌صورت مجزا تعریف کرد، اما در بین مفاهیم، همپوشانی زیادی وجود دارد؛ که همین امر، دلیل اصلی استفاده ناسازگار آن‌هاست. نمودار ترسیم‌شده (شکل ۱۸)، این همپوشانی را به‌خوبی نشان می‌دهد. بر اساس شکل، طراحی الگوریتمیک، زیرمجموعه طراحی مولد است و دارای تلاقی غیر خالی با طراحی پارامتریک است. علاوه بر این، طراحی پارامتریک نسبت به اصطلاحات دیگر متعامد است. به‌عنوان مثال، یک رویکرد طراحی الگوریتمیک که از الگوریتم‌هایی دارای پارامتر، استفاده می‌کند، نیز یک نمونه طراحی پارامتریک است؛ به‌طور مثال، می‌توان به یک الگوریتم که بر اساس مجموعه‌ای از پارامترها، مانند ابعاد کلی آن و اندازه و توزیع عناصر مختلف نما، یک نما ایجاد می‌کند، اشاره کرد. اما معماری محاسباتی عملکردی، به‌عنوان یک رویکرد از این مفاهیم، بر مبنای طراحی مبتنی بر عملکرد شکل می‌گیرد. در واقع مرز اصلی این مفهوم با سه مفهوم دیگر، تمرکز بر ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد است.

همچنین یافته‌های به‌دست‌آمده از دو آزمون همبستگی و شانون، به‌منظور اولویت‌سنجی، مورد بررسی تطبیقی قرارگرفته‌اند (جدول ۳). بر اساس یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که موضوع پوسته ساختمان، نسبت به دو موضوع دیگر، در سال‌های اخیر، بیش‌تر موردتوجه پژوهشگران بوده است. دلیل این امر، تأثیر زیاد پوسته ساختمان بر مباحث پایداری و انرژی و ساده بودن الگوریتم‌های طراحی مولد پوسته است. عوامل مرتبط با پنجره، همچون ابعاد و موقعیت و نسبت پنجره به دیوار در این موضوع به‌طور خاص، مورد توجه است. دو موضوع دیگر، یعنی فرم و پیکربندی ساختمان نیز، از موضوعات پرکاربرد معماری در پژوهش‌ها به شمار می‌روند. در موضوع پیکربندی، عوامل مرتبط به جانمایی فضاها به‌عنوان متغیرهای اصلی، بیش‌تر از سایر متغیرها مورد توجه بوده‌اند و در موضوع فرم ساختمان، مباحث ظاهری موردتوجه قرارگرفته‌اند.

جدول ۳: اولویت‌سنجی عوامل فرم‌یابی نسبت به موضوع معماری محاسباتی عملکردی

موضوع طراحی	فرم ساختمان					پوسته ساختمان						پیکربندی ساختمان			
عوامل کالبدی به ترتیب اولویت	فرم کلی	ارتفاع طبقات	تعداد ساختمان‌ها	طرح نما	فرم سقف	سایه‌اندازی	نسبت پنجره به دیوار	جهت‌گیری	ابعاد پنجره	طرح سقف	موقعیت پنجره	موقعیت فضا	ماتریس مجاورت	ابعاد فضا	ماتریس شبکه‌ای
همبستگی	۰.۷۵	۰.۲۵	۰.۱۸	۰.۱۰	۰.۰۸	۰.۴۵	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۱۹	۰.۱۸	۰.۱۸	۰.۶۵	۰.۵۰	۰.۴۰	۰.۳۰
وزن شانون	۰.۰۳۳	۰.۰۸۰	۰.۰۷۱	۰.۰۴۹	۰.۰۵۱	۰.۰۲۴	۰.۰۲۶	۰.۰۲۹	۰.۰۳۶	۰.۰۶۸	۰.۰۶۵	۰.۰۴۰	۰.۰۵۹	۰.۰۴۵	۰.۰۶۸

بر این اساس و بر مبنای یافته‌ها، می‌توان متغیرهای اصلی معماری سه موضوع بهینه‌سازی، شامل فرم، پوسته و پیکربندی ساختمان را جهت نگارش الگوریتم مولد تبیین کرد. بر اساس یافته‌ها، ارتفاع طبقه، طراحی نما و تعداد ساختمان‌ها را می‌توان از عوامل نگارش الگوریتم طراحی مولد فرم ساختمان دانست. در بخش پوسته ساختمان، سایه‌اندازی، ابعاد پنجره، جانمایی پنجره و نسبت پنجره به دیوار، مهم‌ترین متغیرهای معماری طراحی مولد است. در مبحث پیکربندی، همبستگی‌های بالا با موضوع مربوط به ماتریس مجاورت و ارتباط، موقعیت فضایی، ابعاد فضا و

ماتریس شبکه‌ای است. موقعیت فضایی، ماتریس مجاورت و شبکه‌ای از مهم‌ترین عوامل تشکیل‌دهنده الگوریتم طراحی مولد پیکربندی ساختمان است.

تشکر و قدردانی

این مقاله هیچ حامی مالی و معنوی نداشته است.

تعارض منافع

این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافعی است.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که کلیه اصول اخلاقی انتشار اثر علمی را براساس اصول اخلاقی COPE رعایت کرده‌اند و در صورت احراز هر یک از موارد تخطی از اصول اخلاقی، حتی پس از انتشار مقاله، حق حذف مقاله و پیگیری مورد را به مجله می‌دهند.

درصد مشارکت

نویسندگان اعلام می‌دارند به‌طور مستقیم در مراحل انجام پژوهش و نگارش مقاله مشارکت فعال داشته‌اند.

پی‌نوشت

1. Generative Design (GD)
2. Performance-based Design (PBD)
3. Performative Computational Architecture (PCA)
4. Generative
5. Algorithmic Generation
6. Cellular Automata
7. Evolutionary Methods
8. L-Systems
9. Shape Grammars
10. Selforganization
11. Agent-Based Models
12. Swarm Systems
13. Parameter
14. Parametric
15. Hangzhou
16. NBBJ Architects
17. UNStudio
18. Form Generation

19. Performance Evaluation
20. Optimization
21. Autodesk
22. Pre-GD & Post-GD
23. Near-Optimal
24. Swarm Intelligence; SI
25. Evolutionary Computation; ES
26. Science Direct
27. Scopus
28. Thomson Reuters
29. Energy and Building
30. Building and Environment
31. Automation in Construction
32. Form Finding Parameters
33. Building Layout
34. Building Shape
35. Building Skin

فهرست منابع

- Abdelmohsen, Sherif M. 2013. November. Reconfiguring architectural space using generative design and digital fabrication: a Project based course. In *Proceedings of the 17th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*. https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2013-0074
- Adriaessens, Sigrid, Philippe Block, Diederik Veenendaal, and Chris Williams, eds., 2014. *Shell structures for architecture: form finding and optimization*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315849270
- Amrhein, Valentin, Sander Greenland, and Blakeley B. McShane. 2019. Statistical significance gives bias a free pass. *European journal of clinical investigation* 49(12): e13176. https://doi.org/10.1111/eci.13176
- Bakhshi, Sajjad, Mohammad Reza Chenaghlou, Farzad Pour Rahimian, David J. Edwards, and Nashwan Dawood. 2022. Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction. *Automation in Construction* 133: 104015. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104015
- Barbieri, Loris, and Maurizio Muzzupappa. 2022. Performance-driven engineering design approaches based on generative design and topology optimization tools: a comparative study. *Applied Sciences* 12(4): 2106. https://doi.org/10.3390/app12042106
- Bernal, Marcelo, John R. Haymaker, and Charles Eastman. 2015. On the role of computational support for designers in action. *Design Studies* 41: 163-182. https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.001
- Blum, Christian, and Xiaodong Li. 2008. Swarm intelligence in optimization. In *Swarm intelligence: introduction and applications* (pp. 43-85). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74089-6_2
- Bukhari, Fakhri A. 2011. *A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design (HEAD) system for generating and evolving building design models* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology). https://eprints.qut.edu.au/50964/
- Caetano, Inês, Luís Santos, and António Leitão. 2020. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research* 9(2): 287-300. https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008
- Caldas, Luisa. 2008. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics* 22(1): 59-70. https://doi.org/10.1016/j.aei.2007.08.012
- Chegari, Badr, Mohamed Tabaa, Emmanuel Simeu, Fouad Moutaouakkil, and Hicham Medromi. 2021. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort by combining artificial neural networks and metaheuristic algorithms. *Energy and Buildings* 239: 110839. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110839
- Cobb, Paul, Jere Confrey, Andrea DiSessa, Richard Lehrer, and Leona Schauble. 2003. Design experiments in educational research. *Educational researcher* 32(1): 9-13. https://doi.org/10.3102/0013189X032001009
- Du, Tiantian, Michela Turrin, Sabine Jansen, Andy van den Dobbelsteen, and Jian Fang. 2020. Gaps and requirements for automatic generation of space layouts with optimised energy performance. *Automation in Construction* 116: p.103132. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103132
- Ekici, Berk, Cemre Cubukcuoglu, Michela Turrin, and I. Sevil Sariyildiz. 2019. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. *Building and environment* 147: 356-371. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.023
- Fischer, Thomas, and Christiane M. Herr. 2001, December. Teaching generative design. In *Proceedings of the 4th Conference on Generative Art* (pp. 147-160). Milan: Politechnico di Milano University. https://papers.cumincad.org/data/works/att/ga0129.content.pdf
- Frazer, John, Julia Frazer, Xiyu Liu, Ming Tang, and Patrick Janssen. 2002. Generative and evolutionary techniques for building envelope design. In *Generative Art 2002, 5th International Conference GA2002* (pp. 3-1). Generative Design Lab. https://eprints.qut.edu.au/10565/
- Gan, Vincent JL. 2022. BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings. *Automation in Construction* 134: 104062. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104062
- Gerber, David, and Evangelos Pantazis. 2016. Design Exploring Complexity in Architectural Shells. *Aulikki Herneoja Toni Österlund Piia Markkanen Oulu School of Architecture University of Oulu*: 455. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2016.1.455
- Gürsel Dino, İpek. 2012. Creative design exploration by parametric generative systems in architecture. https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2012.1.12
- Hassan, Sally R., Naglaa A. Megahed, Osama M. Abo Eleinen, and Asmaa M. Hassan. 2022. Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy and Buildings* 267: 112144. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112144

- Huang, Yu, and Jian-lei Niu. 2016. Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. *Energy and Buildings* 117: 387-398. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.025
- Hubka, Vladimir, and W. Ernst Eder. 1987. A scientific approach to engineering design. *Design studies* 8(3): 123-137. https://doi.org/10.1016/0142-694X(87)90035-4
- Humppi, Harri, and Toni Österlund. 2016. Algorithm-aided BIM. In *Complexity & simplicity–Proceedings of the 34th eCAADe conference* (pp. 601-609). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2016.2.601
- Jabi, Wassim, Shwe Soe, Peter Theobald, Robert Aish, and Simon Lannon. 2017. Enhancing parametric design through non-manifold topology. *Design Studies* 52: 96-114. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.04.003
- Jabi, Wassim. 2013. *Parametric design for architecture*. Hachette UK. https://doi.org/10.1260/1478-0771.11.4.465
- Janssen, Patrick, and Rudi Stouffs. 2015, May. Types of parametric modelling. In *Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)* (pp. 157-166). https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2015.157
- Kalay, Yehuda E. 1989. *Modeling objects and environments*. John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.52842/conf.caadria.1997.187
- Kiss, Benedek, and Zsuzsa Szalay. 2020. Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. *Automation in Construction* 111: 103044. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103044
- Kolarevic, Branko. 2003. September. Computing the performative in architecture. In *Proceedings of the 21th eCAADe Conference: Digital Design. Graz, Austria* (pp. 17-20). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2003.457
- Machairas, Vasileios, Aris Tsangrassoulis, and Kleo Axarli. 2014. Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 31: 101-112. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.036
- Magnier, Laurent, and Fariborz Haghighat. 2010. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment* 45(3): 739-746. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016
- Marin, Philippe, Yann Blanchi, and Marian Janda. 2015, September. Cost analysis and data based design for supporting programmatic phase. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 613-618). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.1.613
- Michalewicz, Zbigniew, and David B. Fogel. 2013. *How to solve it: modern heuristics*. Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07807-5
- Mitchell, Melanie, and Charles E. Taylor. 1999. Evolutionary computation: an overview. *Annual Review of Ecology and Systematics* 30(1): 593-616. https://melaniemitchell.me/PapersContent/ARES1999.pdf
- Mitchell, William J. 1975. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. *Environment and planning b: planning and design* 2(2): 127-150. https://doi.org/10.1068/b020127
- Moretti, Luigi. 1971. Ricerca matematica in architettura e urbanistica. *Moebius IV*, *1*, pp.30-53.
- Nagy, Danil, Damon Lau, John Locke, Jim Stoddart, Lorenzo Villaggi, Ray Wang, Dale Zhao, and David Benjamin. 2017. May. Project discover: An application of generative design for architectural space planning. In *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design* (pp. 1-8). https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.007
- Nagy, Danil, Lorenzo Villaggi, and David Benjamin. 2018. June. Generative urban design: integrating financial and energy goals for automated neighborhood layout. In *Proceedings of the Symposium for Architecture and Urban Design Design, Delft, the Netherlands* (pp. 265-274).
- Oxman, Rivka. 2017. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design studies* 52: 4-39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001
- Sarıyıldız, Sevil. 2012, November. Performative computational design. In *ICONARCH International Congress of Architecture and Planning; 2012: ICONARCH I-ARCHITECTURE AND TECHNOLOGY*. Konya Technical University Faculty of Architecture and Design. https://research.tudelft.nl/en/publications/performative-computational-design
- Shi, Xing, and Wenjie Yang. 2013. Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects. *Automation in Construction* 32: 125-135. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015
- Sonta, Andrew, Thomas R. Dougherty, and Rishee K. Jain. 2021. Data-driven optimization of building layouts for energy efficiency. *Energy and Buildings* 238: 110815. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110815
- Terzidis, Kostas. 2006. *Algorithmic architecture*. Routledge. https://www.academia.edu/6994087/Algorithmic_Architecture
- Wei, Shen, Rory Jones, and Pieter De Wilde. 2014. Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. *Energy and Buildings* 70: 36-44. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.001
- Wu, Shihai, Nan Zhang, Xiaowei Luo, and Wei-Zhen Lu. 2022. Multi-objective optimization in floor tile planning: Coupling BIM and parametric design. *Automation in Construction* 140: 104384. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104384

- Yu, Wei, Baizhan Li, Hongyuan Jia, Ming Zhang, and Di Wang. 2015. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings* 88: 135-143. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.063
- Zboinska, Malgorzata A. 2015. Hybrid CAD/E platform supporting exploratory architectural design. *Computer-Aided Design* 59: 64-84. https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.08.029
- Zhang, P. E. N. G. Y. U., and W. E. I. G. U. O. Xu. 2018. Quasicrystal structure inspired spatial tessellation in generative design. In *Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference* (pp. 143-152). https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2018.1.143

نحوه ارجاع به این مقاله

طاهر طلوع دل، محمدصادق، و امید حیدری‌پور. ۱۴۰۲. تحلیل مروری فرآیند معماری محاسباتی عملکردی (PCA) با تأکید بر عوامل عملکردی و کالبدی. *نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر* ۱۶(۴۵): ۱۷-۳۷.

DOI: 10.22034/AAUD.2024.355338.2698

URL: https://www.armanshahrjournal.com/article_188239.html

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Armanshahr Architecture & Urban Development Journal. This is an open- access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License.

http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/