

## بررسی سازمان یافته عوامل فرمیابی طراحی مولد پیکره‌بندی ساختمان موثر بر عملکرد انرژی

جاوید احمدی\*، یوسف اسدی خانقاه\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۶/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱/۷

### چکیده

کاهش مصرف انرژی همراه با برقراری آسایش ساکنان همیشه یکی از مهمترین مسائل طراحان و معماران ساختمان بوده است. طراحی مولد روشی برای ایجاد خودکار تعداد زیادی طرح از طریق یک چارچوب الگوریتمی تکراری و در عین حال رعایت معیارها و محدودیت‌های تعریف شده توسط کاربر می‌باشد، پیکره‌بندی فضایی می‌تواند عملکرد انرژی ساختمان را شامل نیازهای گرمایش، سرمایش، روشنایی و تهویه به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد. از این رو در این پژوهش سعی داریم مهمترین عوامل پیکره بندی ساختمان موثر بر مصرف انرژی ساختمان را با مطالعه پژوهش‌های انجام شده بر روی طراحی مولد پیکره‌بندی بیابیم. پژوهش مروری حاضر با رویکرد مختلط کمی-کیفی و به روش تطبیقی-تحلیلی با شناسایی مطالعات گوناگون در حوزه طراحی مولد پیکره بندی ساختمان، به بررسی و آزمون و تحلیل آنها پرداخته است. در این پژوهش از دو گروه بررسی آزمون فراتحلیل و بررسی آمارهای توصیفی بر روی عوامل فرمیابی طراحی مولد استفاده شده است. ۲۶ مقاله با شرط استفاده از عوامل کالبدی پیکره بندی فضایی و شبیه‌سازی عملکرد انرژی حداقل در یکی از وجوه انتخاب و با نرم افزار سی ام ای (CMA) مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین بررسی آمار توصیفی بر روی ۱۳ پژوهش شاخص انتخابی از بین پژوهش‌ها انجام شده است. ۱۲ عامل کالبدی موثر بر مصرف انرژی نسبت میزان اثر آنها بر مصرف انرژی ساختمان مشخص شده است. بررسی جزنگر، عوامل کالبدی، نشان می‌دهد، که به ترتیب، ماتریس مجاورت با اندازه اثر ۳۸ در حالت ثابت و تصادفی، جهت‌گیری ساختمان با اندازه اثر ۱۸ و ۲۸ در حالت ثابت و تصادفی، موقعیت طبقه با اندازه اثر ۲۳ در حالت ثابت و تصادفی و جهت‌گیری پنجره با اندازه اثر ۲۱ و ۱۹ از مهمترین عوامل هستند و فراوانی عوامل فرمیابی، نشان می‌دهد که ابعاد و موقعیت فضاها، از مهمترین عوامل هستند. ماتریس مجاورت، ابعاد فضاها، موقعیت فضاها و جهت‌گیری، به عنوان مهمترین عوامل فرمیابی در فرآیند بهینه‌سازی پیکره‌بندی فضایی بر اساس عملکرد انرژی، باید مورد تأکید قرار گیرند. همچنین به طور کلی عوامل فرمیابی، دارای دارای اندازه اثر یکسانی و نزدیک به هم بر عملکرد انرژی هستند و این نشان از اهمیت عوامل فرمیابی پیکره‌بندی بر عملکرد انرژی ساختمان است.

### واژگان کلیدی

طراحی مولد، پیکره بندی ساختمان، عملکرد انرژی، مرور سازمان یافته، عوامل فرمیابی

## مقدمه

به طور کلی، طراحی مولد، تعریف یک الگوریتم طراحی برای تولید و ارزیابی مجموعه ای از پاسخ‌ها بر مبنای یک سری ویژگی‌ها و محدودیت‌های مورد نظر طراح است (Caetano et al., 2020)، در واقع، در این ساختار، هدف اصلی کمک به متخصصان طراحی ساختمان است که مجموعه بزرگ‌تری از راه‌حل‌ها را کشف کنند (Ahmadi et al., 2023). ویژگی‌های ساختمان بخش‌های مهمی در تعیین عملکرد انرژی یک ساختمان هستند که شامل طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها و فعالیت‌های مرتبط با ساختمان و ساخت‌وساز است (Chen et al., 2020). در این بررسی، عمدتاً بر روی محبوب‌ترین موارد از جمله شکل ساختمان، جهت‌گیری ساختمان، عایق کاری دیوار ساختمان، شیشه پنجره، نسبت پنجره به دیوار (WWR) مواد عایق و ضخامت عایق بهینه تمرکز شده است. شکل ساختمان از جمله مباحثی است که در پژوهش‌ها در قالب‌های مختلف به عنوان عامل مؤثر بر عملکرد انرژی، مورد توجه بوده است. متغیرهای مختلفی همچون ضریب شکل (SF)، ضریب فشردگی (CF) و فشردگی نسبی (RC)، اغلب برای پرداختن به تأثیر شکل ساختمان بر مصرف انرژی ساختمان در پژوهش‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضریب شکل به عنوان نسبت سطح ساختمان به مساحت طبقه شرطی شده تعریف می‌شود (Pacheco et al., 2012).

بسیاری از مطالعات مدل‌سازی عددی برای شناسایی اشکال بهینه ساختمان با دیدگاه‌های مختلف انجام شده است. به عنوان مثال، وانگ و همکاران (Wang et al., 2006)، یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه را در مدل بهینه‌سازی با دو توابع هدف، یعنی هزینه چرخه عمر و اثرات زیست‌محیطی چرخه عمر اعمال کرد. آنها نشان دادند که پنج ضلعی منظم، بهترین گزینه برای کمترین هزینه چرخه عمر اما با بیشترین تأثیر زیست‌محیطی چرخه عمر است. آدامسکی (Adamski et al., 2007) سعی کرد با بررسی چندین شکل از طریق برنامه‌های عددی، مسئله انرژی را بهینه کند تا بهترین شکل را شناسایی کند؛ تا هم هزینه ساخت و هم مصرف انرژی را به حداقل برساند. آنها همچنین اشکال ساختمان شامل پلان مربع، دایره و بیضی مقایسه کردند و دریافتند که ساختمان‌های روی پایه بیضی بهتر از دو مورد دیگر هستند. با این حال، هنوز فاقد تحقیقات کافی برای تأیید نتایج بهینه‌سازی و تأیید امکان‌سنجی در پروژه‌های واقعی است.

موریسی و همکاران (Morrissey et al., 2011)، موضوع جهت‌گیری را برای مصرف انرژی ساختمان‌ها، بررسی کردند و جهت‌گیری جنوبی را به طور کلی برای ساختمان‌های واقع در نیمکره شمالی توصیه می‌کنند. زیرا این جهت‌گیری می‌تواند گرما و تابش خورشید را به حداکثر برساند. اکثر راهنماهای طراحی پیشنهاد می‌کنند که طولانی‌ترین بخش‌های دیوار باید رو به جنوب باشد (Morrissey et al., 2011). برای بهترین عملکرد پنل‌های خورشیدی غیرفعال، لیتلر (Littlefair, 2001)، پیشنهاد کرد که بهترین جهت‌گیری ساختمان‌ها ۲۰ تا ۳۰ درجه به سمت جنوب است. گوپتا و رالگاونکار (Gupta & Ralegaonkar, 2004)، مدلی را برای محاسبات مربوطه توسعه دادند. آنها ساختمان را از صفر درجه به ۱۸۰ درجه چرخانده و با مقادیر شکل متفاوت اعمال کردند و تابش خورشیدی دریافتی را تخمین زدند. از این روش می‌توان برای یافتن زاویه جهت‌گیری بهینه برای دریافت حداقل تابش خورشیدی در تابستان و حداکثر تابش خورشیدی در زمستان استفاده کرد. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که جهت‌گیری بهینه عموماً زمانی است که طولانی‌ترین بخش‌های دیوار به سمت شمال و جنوب جهت‌گیری شده باشند؛ یعنی ساختمان کشیدگی شرقی-غربی داشته باشد.

اکثر مطالعات قبلی بر این باور بودند که شکل ساختمان مهمترین عامل در تعیین جهت‌گیری بهینه ساختمان است. با این حال، راه‌حل‌های بهینه ممکن است تحت شرایط مختلف متفاوت باشد. به عنوان مثال، آکسوی و اینالی (Aksoy & Inalli, 2006)، رابطه بین جهت‌گیری بهینه ساختمان و شکل ساختمان را با سه مقدار ضریب شکل (۰/۵، ۱ و ۲) بررسی کردند. با توجه به تحلیل‌های عددی، ساختمان با شکل مربع (ضریب شکل = ۱) نسبت به دو ساختمان دیگر بدون هیچ عایق، مزایای بیشتری دارد. برای ساختمان‌های مستطیلی با مقادیر ضریب شکل ۲ و ۰/۵، راه‌حل‌های بهینه این است که زوایای آزیموت ساختمان‌ها باید به ترتیب صفر درجه و ۸۰ درجه باشد. فلوریدس و همکاران (Florides et al., 2002)، کارآمدترین جهت‌گیری‌های انرژی یک ساختمان مربع را از نظر به حداقل رساندن تقاضای گرمایش ارزیابی کردند. جهت ساختمان بهینه آن است که ساختمان رو به چهار جهت اصلی باشد. در حالی که برای یک ساختمان مستطیلی، بهترین جهت این است که کوچکترین بخش دیوار ساختمان باید به سمت شرق و کشیدگی ساختمان شرقی-غربی باشد؛ تا حداقل نیاز گرمایشی حاصل شود.

برخی از مطالعات بر روی سایر عوامل تعیین‌کننده جهت‌گیری ساختمان متمرکز شده‌اند. اندازه ساختمان پیشنهاد شد که در طراحی خورشیدی غیرفعال یک ساختمان مسکونی در نظر گرفته شود (Morrissey et al., 2011). موریسی (Morrissey et al., 2011)، دریافت که یک ساختمان کوچک نسبت به تغییرات جهت‌گیری حساسیت کمتری دارد. به عبارت دیگر، استانداردهای طراحی بالاتر برای آن ساختمان‌های کوچکتر در جهت‌های مختلف آسان‌تر اعمال می‌شوند و هزینه‌های مرتبط نیز نسبتاً پایین‌تر است. آباندا و بایرز (Abanda & Byers, 2016)،

پیشنهاد کردند که چرخه عمر ساختمان در ارزیابی اثرات جهت‌گیری برای آن ساختمان‌های کوچک در نظر گرفته شود. بر اساس شبیه سازی‌های آنها، مقرون به صرفه‌ترین جهت‌گیری +۱۸ درجه از سطح پایه است که می‌تواند به صرفه‌جویی سالانه ۸۷۸ پوندی انرژی در طول عمر ۳۰ ساله کمک کند. جداره‌های ساختمان، تأثیر بسزایی بر عملکرد انرژی ساختمان دارد که شامل دیوار، سقف، پنجره و کف ساختمان می‌شود. به طور کلی عملکرد دیوار، به دلیل مساحت زیادش به عنوان مهمترین عامل در بین جداره‌ها شناخته شده است (Chen et al., 2020). با این حال، در این ارتباط، تأثیر دیوار داخلی و دیوار بیرونی در مطالعات قبلی کمی بحث‌برانگیز بوده است. برخی از مطالعات بر این باور بودند که عایق کاری دیوار داخلی بهتر از عایق دیوار بیرونی عمل می‌کند (Tsilingiris, 2006)؛ در حالی که گزینه‌های مختلفی نیز موجود است که در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد (Kossecka & Kosny, 2002). طبق اکثر متون، تأثیر نوع عملکرد انرژی دیوارها، تا حد زیادی با نوع ساختمان، وضعیت آب و هوا، جهت ساختمان، مشخصات عایق حرارتی و وضعیت گرمایش یا سرمایش تعیین می‌شود (Tsilingiris, 2006; Ibrahim et al., 2012).

شیشه را می‌توان یکی از مهمترین بخش‌های جداره‌ها دانست. شیشه می‌تواند با لایه‌های تک، دو یا سه لایه اعمال شود (Zhang et al., 2016). پنجره‌ها و درهای شیشه‌ای عملکرد بسیار مهمی در ورود نور طبیعی، انرژی تابش خورشیدی، انتقال حرارتی و تهویه طبیعی دارند. با این حال، در مناطق گرمسیری، آنها منابع اصلی افزایش گرمای نامطلوب هستند که به ۸۷ درصد می‌رسد (McGee, 2013). یک مطالعه عددی (Gaterell et al., 2005)، نشان داد که شیشه‌های دوجداره می‌تواند گزینه خوبی برای ساختمان‌های مسکونی برای انتشار گرمایش جهانی باشد. مشخص است که وقتی پنجره بزرگتر می‌شود؛ بدون توجه به موقعیت پنجره، بار حرارتی افزایش می‌یابد (Kim et al., 2016). بنابراین، شیشه می‌تواند راه حل بهینه‌یایی تعادل بین گرمای بیش از حد خورشید و نور مفید روز باشد. چندین مطالعه عددی و تجربی برای تجزیه و تحلیل ترکیبات مختلف نسبت پنجره به دیوار (WWR) و انتقال حرارتی انجام شده است. نسبت پنجره به دیوار (WWR) یکی از عوامل مهم در بررسی عملکرد انرژی ساختمان است که بسیار مورد توجه بوده است. نسبت پنجره به دیوار (WWR) بهینه، بین ۱۰-۲۵٪ با انواع مختلف شیشه و همچنین سطوح مختلف انتقال حرارت متغیر است (Bouchlaghem, 2000; Lee et al., 2013).

عایق‌ها هم یکی از مهمترین مباحث در بررسی عملکرد انرژی جداره‌های ساختمان می‌باشد. عایق‌ها در دیوارها، سقف، کف و در بخش کدر و شفاف کاربرد دارند (Chen et al., 2020). عایق بندی کف در مقایسه با عایق دیوار، سقف و پنجره، اهمیت کمتری دارند؛ زیرا انتقال حرارت بین هوای بالای طبقه همکف و هوای زیر طبقه همکف چندان قابل توجه نیست (Cheng et al., 2015; Cabeza et al., 2010). به طور کلی عملکرد عایق دیوار، به دلیل مساحت زیادش به عنوان مهمترین عایق شناخته می‌شود (Chen et al., 2020). عملکرد عایق، عمدتاً بسته به ضخامت و هدایت حرارتی مواد اعمال شده در نظر گرفته می‌شود (Ucar A, Balo, 2010).

سایه‌اندازی، یکی از مهمترین استراتژی‌های عملکرد انرژی جداره‌ها به ویژه در مناطق گرمسیری است که در طول سال تأثیرات متنوعی دارد (Stouter, 2008). سایه انداختن ساختمان‌ها و فضاهای بیرونی به تعدیل دما کمک می‌کند، شرایط راحتی را بهبود می‌بخشد و باعث صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. سایه بان خارجی با جلوگیری از حداکثر ۹۰٪ از افزایش گرمای موثرترین مانع در برابر خورشید هستند (Lechner, 2014; McGee, 2013). اکثر دستگاه‌های سایه‌بان از باله‌های عمودی و یا افقی یا هر دو با هم تشکیل شده‌اند. برآمدگی‌های سایه‌بان‌ها، تنوع زیادی دارند و بهترین انتخاب برای نمای جنوبی به ویژه در مناطق گرمسیری است.

برنامه‌ریزی پیکربندی یک مرحله چالش‌برانگیز از طراحی معماری است که نیاز به بهینه‌سازی در چندین معیار متناقض دارد. به همین دلیل بررسی‌ها از سال‌ها پیش روی برنامه‌ریزی و طراحی پیکربندی شروع شد. بررسی‌های روی طراحی پیکربندی، از حدود دهه ۲۰۱۰ میلادی، با توجه به عملکردهای مختلف مورد توجه قرار گرفت. یکی از عملکردهایی که با توجه به مباحث پایداری، بسیار مورد توجه قرار گرفته است، عملکرد انرژی در ساختمان می‌باشد (Rodrigues et al., 2013).

در پژوهش موسی و استیمر (Musau & Steemers, 2008) مقایسه پنج پیکربندی فضایی برای یک ساختمان اداری در انگلستان در سال ۲۰۰۸ میلادی انجام شد و منجر به بزرگترین تفاوت ۵۷٪ در نیاز گرمایشی برای اوج زمستان و ۶۷٪ در نیاز روشنایی شد. برای اوج تابستان همین پیکربندی‌ها در پژوهش موسی و استیمر (Musau & Steemers, 2009) مقایسه شد؛ که در آن حالت باز شدن پنجره‌ها و درهای داخلی نیز علاوه بر پیکربندی فضایی تغییر کرد و منجر به بیشترین اختلاف ۶۵ درصدی در حجم هوای تهویه طبیعی از طریق دریچه‌ها شد. در اوج زمستان سه طرح در (de Souza & Alsaadani, 2012) شبیه‌سازی و مقایسه شد که منجر به بزرگترین تفاوت ۵۲٪ در نیاز گرمایشی برای یک سال و ۲۴٪ در نیاز سرمایشی شد. دو چیدمان اداری در سوئد در (Poirazis et al., 2008) شبیه‌سازی و مقایسه شدند که در آن نسبت پنجره به دیوار (WWR) نیز علاوه بر چیدمان فضا تغییر کرد و منجر به بیشترین تفاوت ۱۴ درصدی در نیاز گرمایشی و ۵۷ درصدی در

نیاز سرمایه‌شده. تلاش‌های گزارش شده برای طراحی مولد پیکربندی با رویکرد عملکرد انرژی نیز از حدود دهه ۲۰۱۰ آغاز شد. به طور مثال، پیکربندی‌های مختلفی برای یک ساختمان کتابخانه در ترکیه در (Dino & Ucoluk, 2017) شبیه‌سازی و مقایسه شد که در آن نسبت پنجره به دیوار نیز علاوه بر پیکربندی فضا تغییر کرد و منجر به بیشترین تفاوت ۱۹ درصدی در نیاز گرمایی و ۲۰ درصدی در نیاز سرمایشی و ۱۰ درصد در نیاز روشنایی شده‌اند. چندین طرح برای یک ساختمان اداری در کره جنوبی در (Yi, 2016) شبیه‌سازی و مقایسه شد که در آن نسبت پنجره به دیوار نیز علاوه بر پیکربندی فضایی تغییر کرد و منجر به بیشترین تفاوت ۸ درصدی در مصرف انرژی سالانه و ۱۵ درصدی در میانگین رای پیش بینی شده (PMV) شد. و همچنین در پژوهش (Ahmadi & et al, 2023) چندین طرح مسکونی بررسی شد و مشخص شد با بهینه‌سازی پیکره بندی ساختمان می‌توان تا ۴۰ درصد نور روز و ۳۰ درصد عملکرد انرژی را بهینه کرد. و در پژوهش (Samuelson et all. 2016) شبیه‌سازی پارامتریک کل انرژی ساختمان و برای شناسایی پارامترهای تاثیرگذار بر مصرف انرژی تحلیل حساسیت انجام شده است که در نتیجه آن نسبت پنجره به دیوار، نوع شیشه، جهت ساختمان، شکل و عایق دیواری بیشترین اثر بر مصرف انرژی دارند.

پیکربندی‌های مختلفی برای یک ساختمان مسکونی در پرتغال در (Rodrigues et al., 2014) شبیه‌سازی و مقایسه شد، که در آن جهت گیری پنجره و اندازه سایه نیز علاوه بر پیکربندی فضایی تغییر کرد و منجر به بزرگترین تفاوت در عدم آسایش حرارتی ۳۳ درصد برای ساختمان‌های مستطیلی شکل با یک طبقه و ۲۹ درصد برای ساختمان‌های مستطیلی شکل دو طبقه شد، در میان پیشینه‌های تحلیل شده، طرح فضا به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه مشابهی را می‌توان از بررسی اکیسی و همکاری‌ها که یک بررسی جامع نگار کرده‌اند، گرفت (Ekici et al., 2019)، که نشان دهنده تسلط اهداف مرتبط با انرژی در طراحی بهینه‌سازی ساختمان است. این مطالعه مقالات مربوط به معماری محاسباتی اجرایی شامل تولید فرم، ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی را با کلیدواژه‌های «طراحی ساختمان»، «طراحی معماری»، «الگوریتم تکاملی»، «محاسبات تکاملی»، «هوش ازدحام» و «بهینه‌سازی ازدحام» بررسی کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد که نسبت پنجره به دیوار، سایه زنی، جهت گیری، ابعاد پنجره و شکل ساختمان، متداول‌ترین متغیرهای طراحی در طول بهینه‌سازی، در میان تمام پارامترهای فرمیابی هستند. ما هم در این پژوهش سعی می‌کنیم با بررسی مطالعات صورت گرفته بر طراحی مولد پیکره بندی با هدف بهبود عملکرد انرژی، عوامل پیکره بندی موثر بر مصرف انرژی و میزان و تفاوت تاثیر هر کدام از این عوامل بر مصرف انرژی ساختمان را بیابیم.

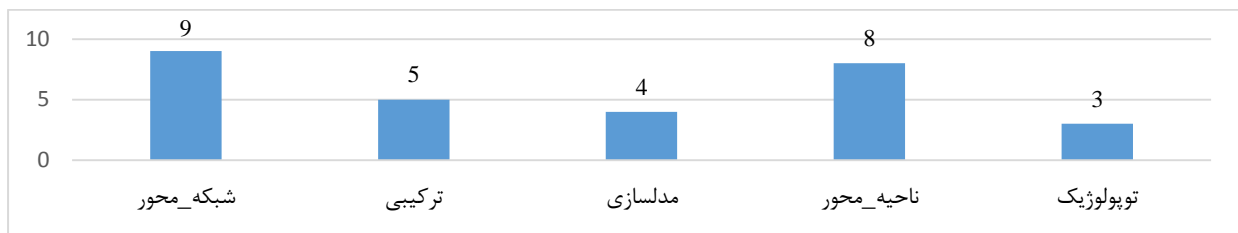
## روش شناسی

پژوهش مروری حاضر با رویکرد مختلط کمی-کیفی و از لحاظ روش تطبیقی-تحلیلی بوده است. در ابتدا، ۲۶ پژوهش در حوزه طراحی مولد پیکربندی با رویکرد بهینه‌سازی عملکرد انرژی انتخاب و استخراج شده است. در مرحله اول، بررسی آمار توصیفی بر روی ۲۶ پژوهش در حوزه طراحی مولد پیکربندی با رویکرد بهینه‌سازی عملکرد انرژی مد نظر قرار می‌گیرد. در ادامه، به منظور بررسی سازمان یافته متغیرهای اصلی پژوهش، آزمون فراتحلیل در نرم‌افزار سی‌ام‌ای (CMA)، بر روی ۲۶ پژوهش در حوزه طراحی مولد پیکربندی با رویکرد بهینه‌سازی عملکرد انرژی انجام شده است.

نمونه برداری پژوهش‌ها به صورت گلوله برفی انجام شده است. شروط انتخاب این ۲۶ پژوهش، استفاده از عوامل کالبدی پیکربندی فضایی و شبیه‌سازی عملکرد انرژی حداقل در یکی از وجوه بوده است. فراوانی نمونه‌های این پژوهش‌ها بر اساس عوامل به ۶۱ مورد می‌رسد. در بررسی‌ها، فرم، روش ساخت پیکربندی، متغیرهای طراحی پیکربندی و اهداف عملکرد انرژی مورد توجه قرار گرفته است به طور کلی، در آزمون فراتحلیل دو بررسی روی داده‌ها شامل تمایل داده‌ها به سمت میانگین و بررسی پراکندگی‌ها و عبور از میانگین انجام می‌شود. همچنین، بررسی در سه بخش، تحلیل کلی، تحلیل اثر اهداف عملکردی و تحلیل عوامل کالبدی مورد استفاده در شبیه‌سازی است.

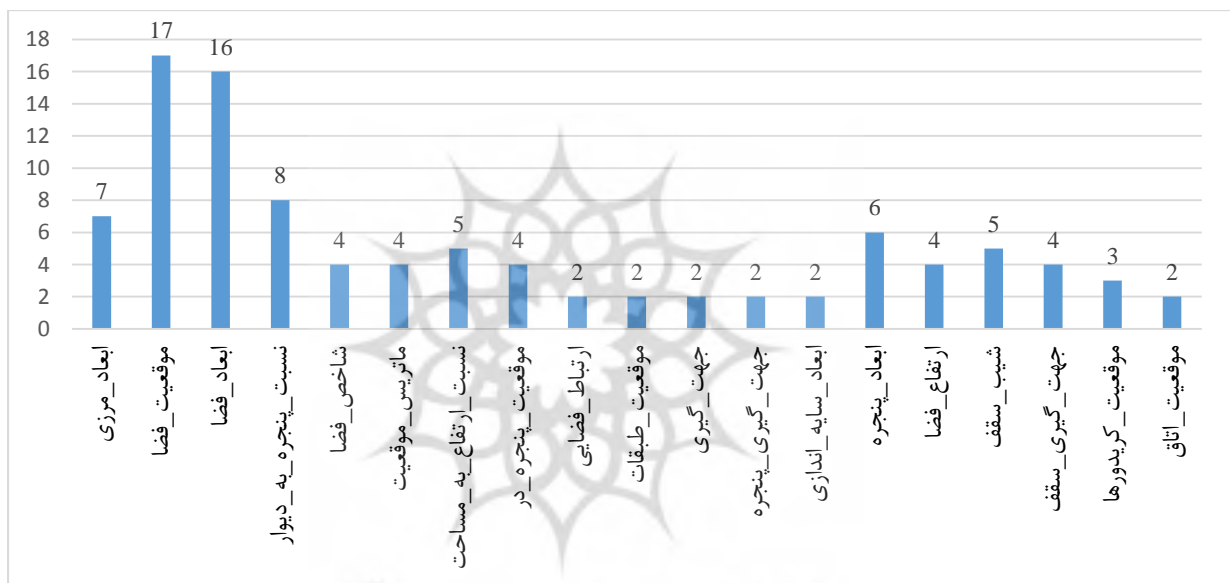
## یافته‌ها

بر اساس یافته‌های پژوهش، تقسیم بندی بر مبنای عوامل فرمیابی، اهداف عملکرد انرژی، فرم و فرآیند ساخت پیکربندی، نوع فرآیند تحلیل و نتایج پژوهش‌ها انجام شده است. به طور کلی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در عوامل فرمیابی، تنوع و پیچیدگی بالایی وجود دارد. به همین منظور، لازم است بررسی‌ها در وجوه مختلفی مد نظر قرار بگیرد.



نمودار ۱: فراوانی روش‌های ساخت پیکربندی در بین پژوهش‌های مورد بررسی

در این بررسی، بر مبنای نتایج، غالب فرم‌های پیکربندی مستطیل بوده است. این امر، با توجه به فرم متداول قطعات زمین، منطقی به نظر می‌رسد. اما به طور کلی در بین ۲۶ پژوهش، ۶ مورد تمرکز بر فرمی به غیر از مستطیل داشته‌اند. همچنین، در بین ۲۶ پژوهش، بیشترین تعداد طبقات یک طبقه بوده است. همچنین بررسی بر روی روش‌های ساخت پیکربندی انجام شده است. در این بررسی، بیشترین روش‌های مورد استفاده، شبکه محور و ناحیه محور بوده است. همچنین، فراوانی عوامل فرمیابی طراحی مولد پیکربندی مورد بررسی قرار گرفته است.



نمودار ۲: فراوانی عوامل فرمیابی طراحی مولد پیکربندی در بین پژوهش‌های مورد بررسی

در این بین، بیشترین فراوانی مربوط به دو عامل موقعیت فضا و ابعاد فضا با فراوانی‌های ۱۷ و ۱۶ بوده است. همچنین، براساس بررسی‌ها، به طور میانگین در پژوهش‌ها، ۲۵/۲۸ درصد بهبود در نیاز گرمایشی و ۱۵/۱۴ درصد بهبود در نیاز سرمایشی دیده می‌شود. همچنین در ادامه به نتایج آزمون فراتحلیل پرداخته می‌شود. براساس ۲۶ پژوهش، که براساس عوامل، به ۶۱ پژوهش می‌رسد، اندازه اثر کل با سطح اطمینان ۹۹ درصد، در حالت ثابت ۱۸/۳۱۶ و در حالت تصادفی ۱۸/۳۸۲ به دست آمده است. مقدار پی (p-value)، نزدیک به صفر گزارش شده و آزمون معنادار است.

جدول ۱: نتایج کلی اندازه اثر آزمون سی ام ای (CMA)

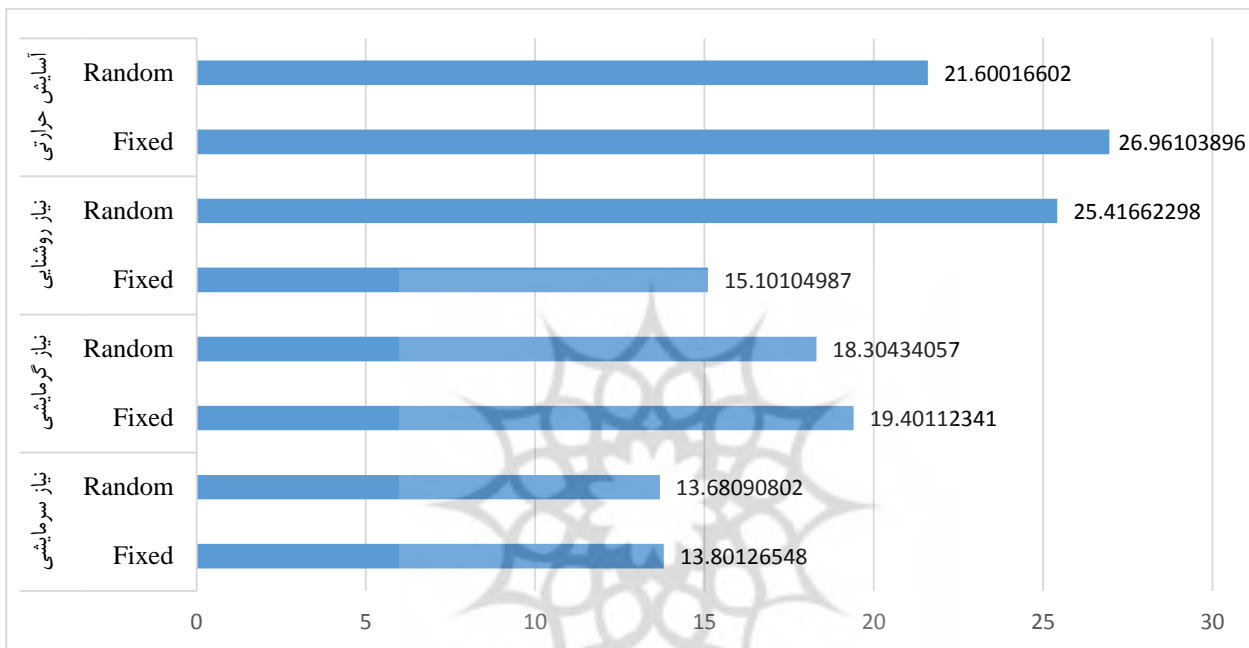
| Model  | Point Estimate | Standard Error | Variance    | Lower Limit | Upper Limit | Z-Value     | P-Value |
|--------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| Fixed  | 18.31592051    | 2.37E-03       | 5.62E-06    | 18.31127589 | 18.32056512 | 7729.062856 | 0       |
| Random | 18.38195168    | 1.563699754    | 2.445156922 | 15.31715648 | 21.44674688 | 11.75542276 | 0       |

همچنین نتایج پراکندگی‌ها و عبور از میانگین کلی، به شرح زیر به دست آمده است. در این آزمون، میزان آماره آی اسکوار (I-squared)، ۱۰۰ به دست آمده است. بنابراین واریانس آزمون حقیقی است. میزان آماره تاو (Tau)، که مقدار انحراف بین داده‌ها است، ۱۲/۲۱۳ به دست آمده است.

جدول ۲: نتایج پراکنده‌گی‌ها و عبور از میانگین کلی آزمون سی ام ای (CMA)

| Model | Q-Value    | df (Q) | P-Value | I-squared | Tau Squared | Standard Error | Variance | Tau    |
|-------|------------|--------|---------|-----------|-------------|----------------|----------|--------|
| Fixed | 25337474.2 | 60     | 0       | 100       | 149.153     | 45.928         | 2109.358 | 12.213 |

همچنین براساس ۲۶ پژوهش حقیقی و ۶۱ پژوهش براساس زیرگروه‌ها، آزمون با گروه نیاز سرمایشی، نیاز گرمایشی، نیاز روشنایی و آسایش حرارتی، انجام شده است. براساس یافته‌ها، اندازه اثر نیاز سرمایشی در حالت ثابت ۱۳/۸۰۱ و در حالت تصادفی ۱۳/۶۸۰، اندازه اثر نیاز گرمایشی در حالت ثابت ۱۹/۴۰۱ و در حالت تصادفی ۱۸/۳۰۴، اندازه اثر نیاز روشنایی در حالت ثابت ۱۵/۱۰۱ و در حالت تصادفی ۲۵/۴۱۶ و اندازه اثر آسایش حرارتی در حالت ثابت ۲۶/۹۶۱ و در حالت تصادفی ۲۱/۶۰ به دست آمده است.



نمودار ۳: نتایج اندازه اثر اهداف عملکردی آزمون سی ام ای (CMA)

مقدار پی (p-value)، در همه موارد، نزدیک به صفر گزارش شده و آزمون معنادار است. بنابراین نتایج با سطح اطمینان ۹۹ درصد به دست آمده است. اندازه اثر در حالت ثابت، در آسایش حرارتی و در حالت تصادفی در نیاز روشنایی، بیشترین میزان است. این موضوع نشان می‌دهد، شبیه‌سازی براساس عوامل کالبدی مورد استفاده در ۲۶ پژوهش حاضر، بیشترین تأثیر را روی نیاز روشنایی و آسایش حرارتی دارند.

جدول ۳: نتایج اندازه اثر اهداف عملکردی آزمون سی ام ای (CMA)

|              | Model  | Point Estimate | Standard Error | Variance    | Lower Limit | Upper Limit | Z-Value     | p-Value  |
|--------------|--------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| نیاز سرمایشی | Fixed  | 13.80126548    | 4.03E-03       | 1.63E-05    | 13.79335964 | 13.80917132 | 3421.520242 | 0        |
|              | Random | 13.68090802    | 1.466545129    | 2.150754614 | 10.80653239 | 16.55528365 | 9.328664869 | 0        |
| نیاز گرمایشی | Fixed  | 19.40112341    | 3.87E-03       | 1.50E-05    | 19.39353787 | 19.40870895 | 5012.895557 | 0        |
|              | Random | 18.30434057    | 3.333982862    | 11.11544172 | 11.76985423 | 24.8388269  | 5.490232351 | 4.01E-08 |
| نیاز روشنایی | Fixed  | 15.10104987    | 7.25E-03       | 5.25E-05    | 15.08684947 | 15.11525027 | 2084.27314  | 0        |
|              | Random | 25.41662298    | 4.393172095    | 19.29996106 | 16.8061639  | 34.02708207 | 5.785483116 | 7.23E-09 |
| آسایش حرارتی | Fixed  | 26.96103896    | 5.70E-03       | 3.25E-05    | 26.94987103 | 26.97220689 | 4731.643135 | 0        |
|              | Random | 21.60016602    | 3.153708898    | 9.945879813 | 15.41901016 | 27.78132187 | 6.849131203 | 7.43E-12 |
| کل           | Fixed  | 18.31592051    | 2.37E-03       | 5.62E-06    | 18.31127589 | 18.32056512 | 7729.062856 | 0        |
|              | Random | 16.25451699    | 1.189065058    | 1.413875712 | 13.92399231 | 18.58504168 | 13.66999803 | 0        |

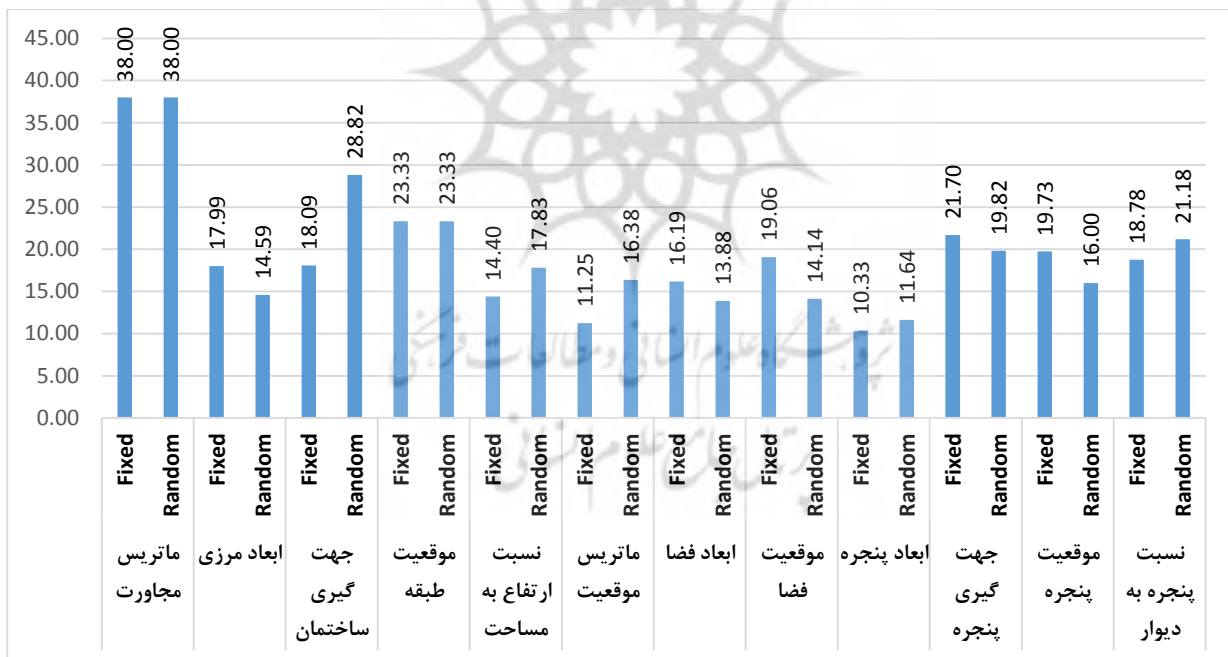
در ادامه، براساس ۲۶ پژوهش حقیقی و ۶۱ نمونه براساس زیرگروه‌ها، آزمون با گروه متغیرهای تعدیل، انجام شده است. متغیرهای تعدیل در این آزمون، عوامل کالبدی در شبیه‌سازی انرژی است. نتایج این آزمون می‌تواند اولویت بندی عوامل کالبدی مورد استفاده در پژوهش را تعیین کند. یافته‌ها در جدول شامل عوامل؛ ضرایب تأثیر، خطاهای استاندارد، واریانس، میزان حداقل و حداکثر، پی ویو و زد ویو قابل مشاهده است.

جدول ۴: نتایج اندازه اثر عوامل کالبدی در آزمون سی ام ای (CMA)

| Group By                | Model  | Point Estimate | Standard Error | Variance   | Lower Limit | Upper Limit | Z-Value  | p-Value  |
|-------------------------|--------|----------------|----------------|------------|-------------|-------------|----------|----------|
| ماتریس مجاورت           | Fixed  | 38             | 7.07E-03       | 0.00005    | 37.98614    | 38.013859   | 5374.011 | 0        |
|                         | Random | 38             | 14             | 196        | 10.56050    | 65.439495   | 2.71428  | 6.64E-03 |
| ماتریس مجاورت-کل        | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.320565   | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 17.86409       | 1.192593949    | 1.42228032 | 15.52665    | 20.201534   | 14.9791  | 0        |
| ابعاد مرزی              | Fixed  | 17.99315       | 3.21E-03       | 1.03E-05   | 17.98686    | 17.99944217 | 5607.545 | 0        |
|                         | Random | 14.59052       | 1.882078181    | 3.54221828 | 10.90172    | 18.27933092 | 7.752348 | 9.10E-15 |
| ابعاد مرزی-کل           | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 16.66406       | 1.507282717    | 2.27190118 | 13.70984    | 19.61828175 | 11.05569 | 0        |
| جهت‌گیری ساختمان        | Fixed  | 18.08868       | 3.42E-03       | 1.17E-05   | 18.08198    | 18.09537656 | 5295.382 | 0        |
|                         | Random | 28.82341       | 2.750141848    | 7.56328018 | 23.43323    | 34.21359248 | 10.48070 | 0        |
| جهت‌گیری ساختمان-کل     | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 19.46444       | 1.635050129    | 2.67338892 | 16.25980    | 22.66908125 | 11.90449 | 0        |
| موقعیت طبقه             | Fixed  | 23.33333       | 4.08E-03       | 1.67E-05   | 23.32533    | 23.34133485 | 5715.476 | 0        |
|                         | Random | 23.33333       | 2.498888642    | 6.24444444 | 18.43560    | 28.23106507 | 9.337484 | 0.00E+00 |
| موقعیت طبقه-کل          | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 19.80585       | 1.494435842    | 2.23333848 | 16.87681    | 22.73489861 | 13.25306 | 0        |
| نسبت ارتفاع به مساحت    | Fixed  | 14.3994        | 1.03E-02       | 1.06E-04   | 14.37930    | 14.41963283 | 1399.788 | 0        |
|                         | Random | 17.83322       | 1.705053939    | 2.90720893 | 14.49138    | 21.17507326 | 10.45904 | 0.00E+00 |
| نسبت ارتفاع به مساحت-کل | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 18.15967       | 1.232011857    | 1.51785321 | 15.74497    | 20.57437399 | 14.73985 | 0        |
| ماتریس موقعیت           | Fixed  | 11.24802       | 5.92E-03       | 3.51E-05   | 11.23642    | 11.25963278 | 1899.718 | 0        |
|                         | Random | 16.38440       | 1.256999759    | 1.58004839 | 13.92073    | 18.84807944 | 13.03453 | 0.00E+00 |
| ماتریس موقعیت-کل        | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 17.18595       | 1.039777002    | 1.08113621 | 15.14802    | 19.2238805  | 16.52850 | 0        |
| ابعاد فضا               | Fixed  | 16.18940       | 2.89E-03       | 8.38E-06   | 16.18373    | 16.19507749 | 5594.136 | 0        |
|                         | Random | 13.87948       | 2.014199981    | 4.05700156 | 9.931728    | 17.82724695 | 6.890819 | 5.55E-12 |
| ابعاد فضا-کل            | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 19.17176       | 1.528775075    | 2.33715323 | 16.17541    | 22.16810532 | 12.54060 | 0        |
| موقعیت فضا              | Fixed  | 19.06386       | 2.85E-03       | 8.15E-06   | 19.05827    | 19.06946385 | 6679.159 | 0        |
|                         | Random | 14.13948       | 2.168152018    | 4.70088317 | 9.889986    | 18.38898599 | 6.521445 | 6.96E-11 |
| موقعیت فضا-کل           | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 20.02609       | 1.497164344    | 2.24150107 | 17.09171    | 22.96048715 | 13.37601 | 0        |
| ابعاد پنجره             | Fixed  | 10.33348       | 6.36E-03       | 4.04E-05   | 10.32101    | 10.34594849 | 1624.764 | 0        |
|                         | Random | 11.63584       | 0.794977248    | 0.63198882 | 10.07772    | 13.19397538 | 14.63670 | 0.00E+00 |

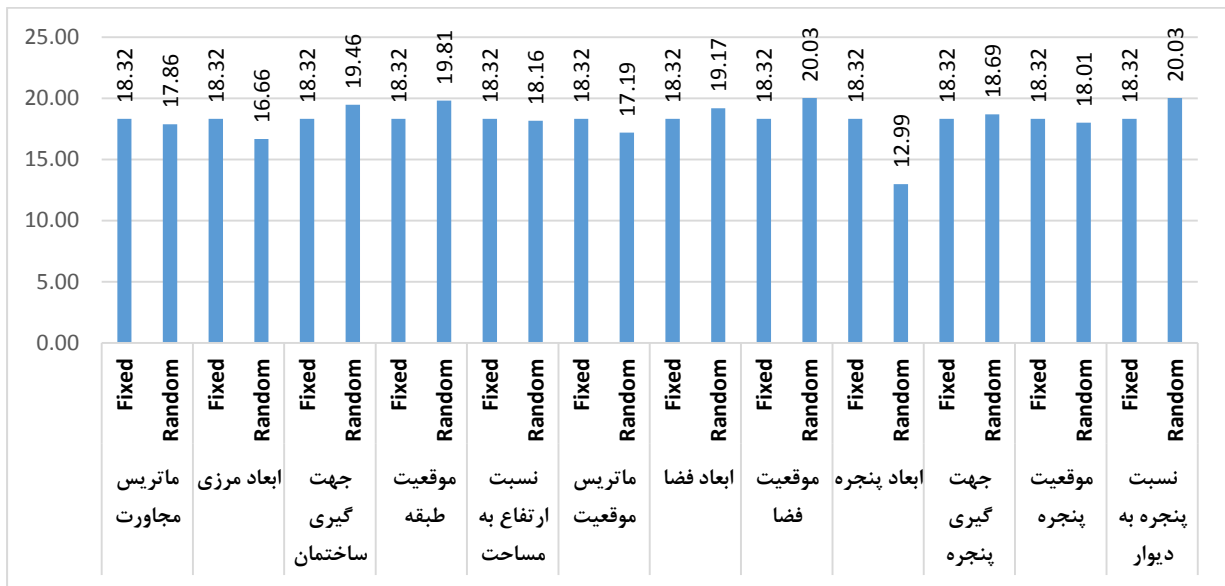
| Group By                | Model  | Point Estimate | Standard Error | Variance   | Lower Limit | Upper Limit | Z-Value  | p-Value  |
|-------------------------|--------|----------------|----------------|------------|-------------|-------------|----------|----------|
| ابعاد پنجره- کل         | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 12.98502       | 0.726901505    | 0.52838579 | 11.56032    | 14.40972887 | 17.86353 | 0        |
| جهت گیری پنجره          | Fixed  | 21.69986       | 4.27E-03       | 1.83E-05   | 21.69148    | 21.70824124 | 5076.330 | 0        |
|                         | Random | 19.81818       | 2.574947351    | 6.63035385 | 14.77138    | 24.86498929 | 7.696539 | 1.40E-14 |
| جهت گیری پنجره- کل      | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 18.68839       | 1.534675018    | 2.35522741 | 15.68049    | 21.6963063  | 12.17743 | 0        |
| موقعیت پنجره            | Fixed  | 19.73419       | 4.03E-03       | 1.62E-05   | 19.72630    | 19.74208825 | 4901.873 | 0        |
|                         | Random | 16.00005       | 2.890951212    | 8.35759890 | 10.33389    | 21.66621721 | 5.534530 | 3.12E-08 |
| موقعیت پنجره- کل        | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 18.00793       | 1.60711509     | 2.58281891 | 14.85804    | 21.15782451 | 11.20513 | 0        |
| نسبت پنجره به دیوار     | Fixed  | 18.78352       | 2.98E-03       | 8.88E-06   | 18.77768    | 18.78936547 | 6305.006 | 0        |
|                         | Random | 21.17745       | 1.482067821    | 2.19652502 | 18.27265    | 24.08225177 | 14.28912 | 0.00E+00 |
| نسبت پنجره به دیوار- کل | Fixed  | 18.31592       | 2.37E-03       | 5.62E-06   | 18.31127    | 18.32056512 | 7729.062 | 0        |
|                         | Random | 20.03168       | 1.37353483     | 1.88659793 | 17.33960    | 22.72376532 | 14.58403 | 0        |

همانطور که در جدول دیده می شود برای هر عامل، دو آماره جز و کل به دست آمده است. همچنین برای هر عامل، دو قالب ثابت و تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار پی (p-value)، در همه موارد، نزدیک به صفر گزارش شده و بر این اساس، آزمون معنادار است.



نمودار ۴: نتایج اندازه اثر عوامل کالبدی در حالت جز آزمون سی ام ای (CMA)

بنابراین نتایج با سطح اطمینان ۹۹ درصد به دست آمده و قابل استناد است. براساس یافته ها، اندازه اثر ماتریس مجاورت در حالت جز، در حالت ثابت و در حالت تصادفی ۳۸، به دست آمده است و بیشترین میزان در بین عوامل کالبدی است. بررسی جزنگر، عوامل کالبدی، نشان می دهد، که به ترتیب، ماتریس مجاورت، جهت گیری ساختمان، موقعیت طبقه و جهت گیری پنجره از مهمترین عوامل هستند. پس از ماتریس مجاورت که میزان آن در حالت جز و در دو حالت ثابت و تصادفی، به میزان زیادی از دیگر عوامل بیشتر است، در حالت تصادفی، جهت گیری ساختمان، دارای بیشترین میزان و در حالت ثابت، جهت گیری پنجره، دارای بیشترین میزان است.



نمودار ۵: نتایج اندازه اثر عوامل کالبدی در حالت کل آزمون سی ام ای (CMA)

بررسی کل نگر عوامل کالبدی، نشان می‌دهد، که عوامل دارای اندازه اثر یکسانی هستند. اما با اختلاف بسیار کمی، به ترتیب، نسبت پنجره به دیوار و موقعیت فضا، موقعیت طبقه و جهت‌گیری ساختمان از مهمترین عوامل در حالت تصادفی هستند. در حالت ثابت نیز اندازه اثر همه یکسان است. به منظور بررسی بهتر، در جدول زیر، مجموعه ۱۳ پژوهش شاخص از بین ۲۶ پژوهش ذکر شده، در حوزه طراحی پیکربندی با رویکرد عملکرد انرژی استخراج شده است؛ که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵: پژوهش‌های حوزه پیکربندی و مباحث مرتبط به آن

| منبع                    | فرم             | ساخت پیکربندی | متغیرهای طراحی   | هدف‌های عملکرد انرژی  | فرآیند تحلیلی                       | نتایج   |
|-------------------------|-----------------|---------------|--|---|-------------------------------------|---|
| Yi, 2016                | مستطیل یک طبقه  | شبکه‌محور     | ابعاد مرزی<br>موقعیت فضا<br>ابعاد فضا<br>نسبت پنجره به دیوار                           | نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی سالانه<br>آسایش حرارتی<br>سطح نور روز داخلی<br>سطح سایه اندازی | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | ۷.۷٪ نیاز گرمایشی<br>۷.۷٪ نیاز سرمایشی<br>۱۳٪ آسایش حرارتی<br>۱۱٪ سطح روشنایی<br>۲٪ سطح سایه اندازی |
| Boonstra et al., 2018   | مستطیل چند طبقه | ترکیبی        | ابعاد فضاها<br>موقعیت فضاها  | نیاز گرمایشی<br>نیاز سرمایشی  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | ۱۰٪ نیاز گرمایشی<br>۱۰٪ نیاز سرمایشی  |
| Souza & Alsaadani, 2012 | چندضلعی یک طبقه | مدلسازی       |  | نیاز گرمایشی<br>نیاز سرمایشی  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی               | ۵۲٪ نیاز گرمایشی<br>۲۴٪ نیاز سرمایشی  |
| Schwartz et al., 2017   | مستطیل چند طبقه | ناحیه‌محور    | ابعاد فضاها<br>موقعیت فضاها<br>نسبت پنجره به دیوار                                     | مصرف سالانه گرمایش و سرمایش منطقه ای  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | -   |
| Dino & Ucoluk, 2017     | منحنی چند طبقه  | شبکه‌محور     | شاخص فضا<br>ماتریس موقعیت<br>موقعیت فضا<br>نسبت پنجره به دیوار<br>نسبت ارتفاع به مساحت | جمع نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی<br>متریک نور روز پویا                                      | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | ۱۹٪ نیاز گرمایشی<br>۲۰٪ نیاز سرمایشی<br>۱۰٪ نیاز روشنایی<br>۲۷٪ نیاز روشنایی                        |

| نتایج   | فرآیند تحلیلی                       | هدف‌های عملکرد انرژی                                   | متغیرهای طراحی  | ساخت پیکربندی | فرم                | منبع                         |
|---|-------------------------------------|--|---|---------------|--------------------|------------------------------|
| ۳۳٪ یک طبقه<br>۲۹٪ دو طبقه<br>آسایش حرارتی  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | عدم آسایش حرارتی                                       | ابعاد فضاها<br>موقعیت فضاها<br>موقعیت پنجره و در<br>ارتباط فضایی<br>موقعیت طبقات<br>موقعیت فضا<br>ابعاد مرزی<br>جهت‌گیری پنجره<br>ابعاد سایه اندازی | ناحیه‌محور    | مستطیل<br>چند طبقه | Rodrigues et al., 2014       |
| ۵۷٪ نیاز گرمایشی<br>۱۱٪ نیاز سرمایشی<br>۴۳٪ نیاز روشنایی (زمستان)<br>۶۷٪ نیاز روشنایی (تابستان) | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی               | نیاز گرمایشی<br>نیاز سرمایشی<br>نیاز روشنایی           |   | مدلسازی       | مستطیل<br>یک طبقه  | Musau & Steemers, 2008       |
| -   | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | هزینه گرمایش سالانه<br>هزینه روشنایی سالانه            | ابعاد مرزی<br>موقعیت فضا<br>ابعاد فضا<br>موقعیت پنجره<br>ابعاد پنجره  | ناحیه‌محور    | مستطیل<br>یک طبقه  | Bausys & Pankrasovaite, 2005 |
| -   | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | هزینه گرمایش، سرمایش و روشنایی سالانه                  | موقعیت فضا<br>ابعاد فضا<br>موقعیت پنجره<br>ابعاد پنجره<br>ارتباط فضایی  | توپولوژیک     | یک طبقه            | Michalek et al., 2002        |
| -   | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | شدت مصرف انرژی   | ابعاد فضا<br>ارتفاع فضا<br>شیب سقف<br>جهت‌گیری سقف<br>ابعاد پنجره   | -             | مستطیل<br>چند طبقه | Caldas, 2008                 |
| ۸.۳٪ نیاز گرمایشی<br>۸.۳٪ نیاز سرمایشی  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | نیاز انرژی گرمایشی<br>نیاز انرژی سرمایشی               | موقعیت فضا<br>ابعاد فضا<br>موقعیت کریدرها   | ناحیه‌محور    | مستطیل<br>چند طبقه | Sleiman et al., 2017         |
| -   | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | روشنایی نور روز  | موقعیت اتاق‌ها  | شبکه‌محور     | مستطیل<br>یک طبقه  | Su & Yan, 2015               |
| ۲۳٪ نیاز گرمایشی<br>۲۵٪ نیاز سرمایشی<br>۱۱٪ نیاز روشنایی  | مدل‌سازی<br>شبیه‌سازی<br>بهینه‌سازی | جمع نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی<br>متریک نور روز پویا | شاخص فضا<br>ماتریس موقعیت<br>موقعیت فضا<br>نسبت پنجره به دیوار<br>نسبت ارتفاع به مساحت  | شبکه<br>محور  | منحنی<br>چند طبقه  | Dino, 2017                   |

با توجه به بررسی‌ها، به نظر می‌رسد که بهینه‌سازی عملکرد انرژی برای موضوعات طراحی مختلف مورد مطالعه و اعمال قرار گرفته است؛ در حالی که به ندرت در طراحی پیکربندی فضایی اعمال می‌شود. بر اساس بررسی ما، تمام وظایف طراحی که بهینه‌سازی عملکرد انرژی برای آنها اعمال شده است در تغییرات پارامتری نشان داده شده است. با این حال، نشان دادن پیکربندی فضایی در تغییرات پارامتری دشوار است. به یک روش تولید سیستماتیک نیاز دارد، و توسعه آن با در نظر گرفتن عملکرد مورد نیاز توسط یک پیکربندی فضایی مانند عدم همپوشانی (دو فضا نمی‌تواند یک منطقه را به اشتراک بگذارند)، بدون سرریز (فضاها نمی‌توانند از مرز طرح خارج شوند)، و ارتباطات و مجاورت‌های فضایی آسان نیست.

## بحث

هدف این پژوهش شناخت عوامل موثر در طراحی مولد پیکره بندی ساختمان با هدف بهبود عملکرد انرژی است، در چند دهه گذشته، چندین بررسی مشابه توسط نویسندگان دیگر منتشر شده است. برخی از آنها رویکردی مشابه با این بررسی دارند، اما سازوکار توصیفی را مد نظر قرار داده‌اند. برخی از آنها بر طبقه بندی و عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی تمرکز داشتند. همه آنها شامل اطلاعات مرتبط و دیدگاه‌های مختلف است. در یک مطالعه در سال ۱۹۸۰، رادفورد و گرو (Radford & Gero, 1980)، روش‌های شبیه سازی، تولید و بهینه‌سازی را برای حمایت از تصمیمات طراحی معماری مورد بحث قرار دادند؛ که در مقایسه با پژوهش حاضر، تمرکز کمتری بر عوامل فرمیابی داشته است.

همچنین تولوپاکی و تئودوسیو (Touloupaki & Theodosiou, 2017)، بررسی در مورد استفاده ترکیبی از مدل‌سازی پارامتریک، شبیه‌سازی عملکرد و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه کردند. بر اساس چندین مثال، بررسی آنها نکات ارزشمندی را در مورد پتانسیل‌ها و محدودیت‌های موجود در حال حاضر ارائه می‌دهد. با این حال، در مقایسه با پژوهش حاضر، شامل تجزیه و تحلیل سیستماتیک روندها، و همچنین متغیرها و اهداف طراحی استفاده شده نمی‌شود. ساموئل سان و همکاران با شبیه‌سازی پارامتریک یک ساختمان و تحلیل حساسیت به بررسی مهمترین عوامل موثر بر مصرف انرژی پرداخته‌اند (Samuelson et al., 2016) که در مقایسه با پژوهش حاضر از جامعیت کمتری برخوردار است. ماچیراس و همکاران (Machairas et al., 2014) نیز، الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی ساختمان را با در نظر گرفتن ابزارها، اهداف و ارزیابی‌های عملکرد بررسی کردند. در مطالعه دیگری، نگوین، ریتز و ریگو (Nguyen et al., 2014)، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را برای تجزیه و تحلیل عملکرد ساختمان بر اساس بحث چالش‌های اصلی مرور کردند. همچنین در مقایسه با پژوهش حاضر، برخی پژوهش‌ها، تنها به عوامل فرمیابی خاص پرداخته‌اند.

در مورد پوشش ساختمان، هوانگ و نیو (Huang, J.L. Niu, 2016)، مطالعات متعددی را برای مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی رایج بررسی کردند. هنگامی که تمرکز بر حوزه‌های عملکرد خاص است، موضوعاتی مانند برنامه‌ریزی فضایی کارآمد، بهره‌وری انرژی، نور روز و غیره ممکن است نمونه‌های مرتبطی را تشکیل دهند. به طور خاص، در مورد پیکربندی چیدمان، دوتا و سارتاک (Dutta & Sarthak, 2011)، کاربردهای محاسبات تکاملی را برای برنامه‌ریزی فضای معماری مقایسه کردند؛ اما برخلاف پژوهش حاضر، بررسی بر روی عوامل فرمیابی انجام نشده است. برای طراحی ساختمان پایدار، اوین (Evins, 2013)، کاربرد بهینه‌سازی محاسباتی را با در نظر گرفتن شاخه‌های مختلف تحقیقاتی بررسی کرد. ناین و همکاران در مورد انتخاب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی و و چالش‌های آن و ابزارهای مورد استفاده آن بررسی می‌کند (Nguyen, Reiter, Rigo, 2014). در مطالعه دیگری، آتیا و همکاران (Attia et al., 2013)، چالش‌ها و فرصت‌های بالقوه را برای ادغام ابزارهای بهینه‌سازی در ساختمان‌های با انرژی خالص صفر (NZEBs) بررسی کردند. همچنین شی و همکاران (Shi et al., 2017)، تولید و بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی را به منظور بحث در مورد کاربردهای خود در طراحی شهری مبتنی بر انرژی در مقیاس ناحیه بررسی کردند. کوی، گنگ، ژو و هان (Cui et al., 2017)، کاربردهای بهینه‌سازی چند هدفه را برای زمینه‌های حفاظت از محیط زیست (مانند بهینه‌سازی برای صرفه جویی در انرژی و انتشار و کاهش هزینه‌ها) بررسی کردند.

بر اساس نظرسنجی کاربران و بررسی ادبیات، تیان، ژانگ، جین، ژو، سی و شی (Tian et al., 2017)، بر کاربرد شبیه‌سازی انرژی ساختمان و بهینه‌سازی برای طرح‌های ساختمان غیرفعال تمرکز کردند. خیری (Kheiri, 2018)، پتانسیل‌های روش‌های بهینه‌سازی مختلف را برای شکل‌دهی به هندسه‌ها و پوشش‌های ساختمان‌های معماری کارآمد نشان داد. شی، تیان، چن، سی و جین (Shi et al., 2016)، با تجزیه و تحلیل چندین روش بهینه‌سازی، از جمله انواع الگوریتم‌ها، اهداف و متغیرهای طراحی و موتورهای شبیه‌سازی انرژی، بر عملکرد انرژی تمرکز کردند. همچنین پژوهش اکیسی و همکاران (Ekici et al., 2019)، بررسی سیستماتیکی را بر روی پژوهش‌های طراحی محاسباتی عملکردی انجام داده است. در مقایسه با پژوهش‌های ارائه شده، این پژوهش از یک بررسی سازمان یافته با تمرکز بر روش فراتحلیل، استفاده کرده است.

## نتیجه گیری

بر مبنای یافته‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عوامل فرمیابی طراحی مولد پیکربندی، دارای تنوع زیادی هستند که به واسطه روش ساخت پیکربندی تعریف می‌شود. در این بین، بر مبنای فروانی عوامل، ابعاد و موقعیت فضاها، دارای بیشترین اهمیت هستند. همچنین بر مبنای آزمون فراتحلیل انجام شده، ماتریس مجاورت، به عنوان مهمترین عامل کالبدی در فرآیند بهینه‌سازی عملکرد انرژی، باید مورد تأکید قرار گیرد. به همین منظور برای نگارش الگوریتم طراحی مولد پیکربندی، لازم است مجاورت فضاها از طریق روش دلفی، مورد پیمایش متخصصین یا پیمایش ساکنین قرار بگیرد. همچنین جهت‌گیری از مهمترین عامل‌ها است. برای بررسی بهتر جهت‌گیری لازم است تعداد گام‌های زاویه‌های جهت‌گیری در الگوریتم به طوری تعریف شود تا بتوان دقت اثر آن مورد بررسی قرار داد، نسبت پنجره به دیوار و موقعیت فضا، موقعیت طبقه و جهت‌گیری ساختمان از مهمترین عوامل هستند. همچنین سایر متغیرهای مورد استفاده در پژوهش‌ها، دارای اندازه اثر همسان و زیادی هستند. بر این اساس نتیجه‌گیری می‌شود که نمی‌توان بین آن‌ها اولویت بندی مشخصی را انجام داد و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های طراحی مولد پیکربندی، همه عوامل فرمیابی در قالب الگوریتم مورد بهینه‌سازی قرار بگیرد. همچنین بر مبنای یافته‌ها، می‌توان اذعان داشت که عوامل فرمیابی پیکربندی، تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ساختمان دارد و می‌تواند به طور میانگین از ۱۵ تا ۲۵ درصد تغییر در مصرف انرژی ایجاد کند. بر اساس مجموعه یافته‌ها، می‌توان اذعان داشت که در نگارش الگوریتم طراحی مولد پیکربندی چهار عامل فرمیابی شامل ماتریس مجاورت، ابعاد فضاها، موقعیت فضاها و جهت‌گیری فضاها باید مورد تمرکز قرار گیرند.

## منابع

- Abanda, F., & Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, 97, 517-527.
- Adamski, M. (2007). Optimization of the form of a building on an oval base. *Building and environment*, 42(4), 1632-1643.
- Ahmadi, J., Maddahi, S. M., & Mirzaei, R. (2023). Generative Design of Housing Spatial Layout Based on Rectangular Spaces. *Advances in Civil Engineering*, 2023(1), 1142371.
- Ahmadi, J., Maddahi, S. M., & Mirzaei, R. (2023). Optimization of Residential Spatial Configuration based on Energy Performance, Daylight Brightness, and Thermal Comfort through Pareto Evolutionary Algorithm, Case Study: Mashhad City Climate. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 14(3), 228-239.
- Aksoy, U. T., & Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and environment*, 41(12), 1742-1754.
- Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., & Carlucci, S. (2013). Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings*, 60, 110-124.
- Baušys, R., & Pankrašovaite, I. (2005). Optimization of architectural layout by the improved genetic algorithm. *Journal of Civil Engineering and Management*, 11(1), 13-21.
- Boonstra, S., van der Blom, K., Hofmeyer, H., Emmerich, M. T., van Schijndel, J., & de Wilde, P. (2018). Toolbox for super-structured and super-structure free multi-disciplinary building spatial design optimisation. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 86-100.
- Bouchlaghem, N. (2000). Optimising the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction*, 10(1), 101-112.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I., Pérez, G., & Fernández, I. (2010). Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and buildings*, 42(5), 630-636.
- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300.

- Caldas, L. (2008). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: An evolution-based generative design system. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 59-70.
- Chen, Y., Deng, Z., & Hong, T. (2020). Automatic and rapid calibration of urban building energy models by learning from energy performance database. *Applied Energy*, 277, 115584.
- Cheng, W., Xie, B., Zhang, R., Xu, Z., & Xia, Y. (2015). Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system. *Applied Energy*, 144, 10-18.
- Cui, Y., Geng, Z., Zhu, Q., & Han, Y. (2017). Multi-objective optimization methods and application in energy saving. *Energy*, 125, 681-704.
- De Souza, C. B., & Alsaadani, S. (2012). Thermal zoning in speculative office buildings: discussing the connections between space layout and inside temperature control. Paper presented at *the Proceedings of the First Building Simulation and Optimization Conference*, Loughborough, UK.
- Dino, İ. G. (2017). An Experimental Pedagogy of Concept Development in the Introductory Architectural Design Studio. *Online Journal of Art and Design*, 5(1).
- Dino, I. G., & Üçoluk, G. (2017). Multiobjective design optimization of building space layout, energy, and daylighting performance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(5), 04017025.
- E. Touloupaki, T. Theodosiou, (2017), Performance Simulation Integrated in Parametric 3D Modeling as a Method for Early Stage Design Optimization—A Review, *Energies*, 10(5) 637.
- Ekici, B., Cubukcuoglu, C., Turrin, M., & Sariyildiz, I. S. (2019). Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. *Building and environment*, 147, 356-371.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230-245.
- Florides, G. A., Tassou, S. A., Kalogirou, S. A., & Wrobel, L. (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, 73(3-4), 299-328.
- Gaterell, M., & McEvoy, M. (2005). The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and buildings*, 37(9), 982-995.
- Gupta, R., & Ralegaonkar, R. (2004). Estimation of beam radiation for optimal orientation and shape decision of buildings in India. *Architectural Journal of Institution of Engineers India*, 85, 27-32.
- Huang, Y., & Niu, J. L. (2016). Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. *Energy and Buildings*, 117, 387-398.
- Ibrahim, M., Ghaddar, N., & Ghali, K. (2012). Optimal location and thickness of insulation layers for minimizing building energy consumption. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(6), 384-398.
- K. Dutta, S. Sarthak, (2011), Architectural space planning using evolutionary computing approaches: A review, *Artificial Intelligence Review*, 36(4) 311-321.
- Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 897-920.
- Kim, K. H., & Haberl, J. S. (2016). Development of a home energy audit methodology for determining energy and cost efficient measures using an easy-to-use simulation: Test results from single-family houses in Texas, USA. Paper presented at *the Building Simulation*.
- Kossecka, E., & Kosny, J. (2002). Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy and buildings*, 34(4), 321-331.
- Lechner, T., Nowak, T., & Klinger, R. (2014). In situ assessment of the timber floor structure of the Skansen Lejonet fortification, Sweden. *Construction and Building Materials*, 58, 85-93.
- Lee, J.-W., Jung, H.-J., Park, J.-Y., Lee, J., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable Energy*, 50, 522-531.

- Littlefair, P. (2001). Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. *Solar Energy*, 70(3), 177-185.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 101-112.
- McGee, R. (2013). Aid Transparency and Accountability: 'Build It and They'll Come'? 1. *Development Policy Review*, 31, s107-s124.
- Michalek, J., & Papalambros, P. (2002). Interactive design optimization of architectural layouts. *Engineering optimization*, 34(5), 485-501.
- Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568-577.
- Musau, F., & Steemers, K. (2008). Space planning and energy efficiency in office buildings: the role of spatial and temporal diversity. *Architectural Science Review*, 51(2), 133-145.
- Musau, F., & Steemers, K. (2009). Space planning, ventilation and energy efficiency in offices. *International Journal of Ventilation*, 8(1), 9-22.
- Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied energy*, 113, 1043-1058.
- Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied energy*, 113, 1043-1058.
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573.
- Poirazis, H., Blomsterberg, Å., & Wall, M. (2008). Energy simulations for glazed office buildings in Sweden. *Energy and buildings*, 40(7), 1161-1170.
- Radford, A. D., & Gero, J. S. (1980). On optimization in computer aided architectural design. *Building and Environment*, 15(2), 73-80.
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. *Computer-aided design*, 45(5), 887-897.
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014). Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and buildings*, 81, 170-181.
- Samuelson, H., Claussnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y., & Romo-Castillo, A. (2016). Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. *Building and Environment*, 101, 19-31.
- Schwartz, Y., Raslan, R., Korolija, I., & Mumovic, D. (2017, August). Integrated building performance optimisation: coupling parametric thermal simulation optimization and generative spatial design programming. *In Building Simulation, 2017 (Vol. 15, pp. 1222-1229)*. IBPSA.
- Shi, X., Tian, Z., Chen, W., Si, B., & Jin, X. (2016). A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 872-884.
- Shi, Z., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2017). A review of simulation-based urban form generation and optimization for energy-driven urban design. *Building and Environment*, 121, 119-129.
- Sleiman, H. A., Hempel, S., Traversari, R., & Bruinenberg, S. (2017). An assisted workflow for the early design of nearly zero emission healthcare buildings. *Energies*, 10(7), 993.
- Stouter, P. (2008). *Shaping buildings for the humid tropics: Cultures, climate and materials*. Ed. Greenhomebuilding, ASLA, Oregon, Ashland.
- Su, Z., & Yan, W. (2015). A fast genetic algorithm for solving architectural design optimization problems. *Ai Edam*, 29(4), 457-469.
- Tian, Z., Zhang, X., Jin, X., Zhou, X., Si, B., & Shi, X. (2018). Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, 158, 1306-1316.

- Tsilingiris, P. (2006). Wall heat loss from intermittently conditioned spaces—The dynamic influence of structural and operational parameters. *Energy and buildings*, 38(8), 1022-1031.
- Ucar, A., & Balo, F. (2010). Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy*, 35(1), 88-94.
- Wang, S., & Xu, X. (2006). Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. *International journal of thermal sciences*, 45(4), 419-432.
- Yi, H. (2016). User-driven automation for optimal thermal-zone layout during space programming phases. *Architectural Science Review*, 59(4), 279-306.
- Zhang, W., Lu, L., Peng, J., & Song, A. (2016). Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong. *Energy and buildings*, 128, 511-518.



## Organized investigation of the factors of formative design of building configuration effective on energy performance

Javid Ahmadi\*, Ph.D., Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

Yosef Asadi Khanegah, Ph.D. Candidate, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 2024/8/24

Accepted: 2025/3/27

### Extended abstract

**Introduction:** Reducing energy consumption while maintaining occupant comfort has always been one of the most important issues for building designers and architects. Generative design is a method for automatically generating a large number of designs through an iterative algorithmic framework while adhering to user-defined criteria and constraints. Spatial configuration can significantly affect a building's energy performance, including heating, cooling, lighting, and ventilation needs. Therefore, in this study, we try to find the most important building configuration factors that affect building energy consumption by studying research conducted on generative design of configuration.

**Methodology:** The present review study, with a mixed quantitative-qualitative approach and a comparative-analytical method, has identified various studies in the field of generative design of building configuration and has investigated, tested, and analyzed them. In this study, two groups of meta-analysis and descriptive statistics on the form-finding factors of generative design have been used. 26 articles were selected with the condition of using physical factors of spatial configuration and simulating energy performance in at least one aspect and analyzed with CMA software. Also, descriptive statistics were conducted on 13 selected index studies from among the studies.

**Results:** 12 physical factors affecting energy consumption and their effect on building energy consumption were determined. A detailed study of physical factors shows that, respectively, the proximity matrix with an effect size of 38 in the fixed and random state, the building orientation with an effect size of 18 and 28 in the fixed and random state, the floor position with an effect size of 23 in the fixed and random state, and the window orientation with an effect size of 21 and 19 are the most important factors. And the frequency of form-finding factors shows that the dimensions and position of spaces are the most important factors.

**Discussion:** The proximity matrix, the dimensions of spaces, the position of spaces, and the orientation, as the most important form-finding factors in the process of optimizing spatial configuration based on energy performance, should be emphasized. Also, in general, form-finding factors have the same and close effect sizes on energy performance, which indicates the importance of configuration form-finding factors on building energy performance.

**Keywords:** generative design, building configuration, energy performance, organized review, form factors.

\* Corresponding Author's E-mail: Ahmadijavid69@yahoo.com