

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۰۱

احسان عرب انواری^۱، ریما فیاض^۲

شبه‌سازی پارامتریک کارایی ساختمان در مراحل اولیه طراحی: ساختمان مسکونی میان مرتبه در اقلیم گرم و خشک^۳

چکیده

بحران نفت دهه هفتاد میلادی سرآغاز حرکتی بود با هدف کاهش مصرف انرژی که در بخش ساختمان تحولاتی را در مراحل طراحی و ساخت در پی داشت. در این زمینه بهینه‌سازی کارایی سامانه‌های ساختمان در مراحل اولیه طراحی روشی است که می‌تواند منجر به بازدهی بالا در ساختمان شود در حالی که هزینه اندکی به همراه خواهد داشت. معمار در هنگام طراحی یک ساختمان انرژی‌کارا نیازمند شناسایی عوامل و شاخص‌های مؤثر است تا با تعیین آنها بتواند به هدف خود در صرفه‌جویی انرژی در ساختمان دست یابد. بنابراین اولین قدم تعیین این عوامل و مؤلفه‌ها است و قدم بعدی تعیین توابع هدف برای بهینه‌یابی. لذا برای شناسایی مؤلفه‌ها و اهداف، از مرور ادبیات و برای پیاده‌سازی روند بهینه‌یابی از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شد. به این منظور یک ساختمان مسکونی به عنوان نمونه موردی که در اقلیم گرم و خشک تهران قرار دارد بررسی شد. طی این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، ۱۲ مؤلفه با سه تابع هدف شدت مصرف انرژی، آسایش محیط داخل و روشنایی نور روز بهینه‌یابی شدند. در کنار تعیین حالات بهینه مؤلفه‌ها، با تحلیل حساسیت مشخص شد که مصالح دیوار خارجی مؤثرترین مؤلفه در شدت مصرف انرژی و آسایش محیط داخل و نوع شیشه پنجره مؤثرترین عامل در روشنایی نور روز است.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی انرژی، شبه‌سازی پارامتریک، طراحی اولیه، الگوریتم بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت.

^۱ کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: ehsan.anvary@gmail.com

^۲ دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، استان تهران، شهر تهران

E-mail: fayaz@art.ac.ir

^۳ این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد احسان عرب انواری با عنوان «بررسی پارامتریک شبه‌سازی انرژی در مراحل اولیه طراحی برای ساختمان‌های مسکونی با ارتفاع متوسط در اقلیم گرم و خشک ایران» است که با راهنمایی دکتر ریما فیاض در دانشگاه هنر انجام شده است.

مقدمه

بحران نفت دهه هفتاد میلادی هشداری به جامعه صنعتی بود که رفع همه نیازهای خود را بر پایه انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی بنا نهاده بود و گمان می‌کرد این شیوه زیست اثری بر محیط طبیعی ندارد. پس از این بحران بخش‌های مختلف در کشورهای صنعتی درصدد اصلاح این نگرش برآمدند. هم‌اکنون بخش ساختمان یکی از مصرف‌کننده‌های اصلی انرژی محسوب می‌شود و توجه به کارایی سامانه‌ها و یکپارچگی آن با محیط اطراف تأثیر قابل توجهی بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و مصرف انرژی به همراه دارد. در روند طراحی ساختمان، در مراحل اولیه طراحی با وجود مجهولات بسیاری که پیش روی معمار قرار دارد، هزینه تغییرات هم بسیار اندک است و هرچه مراحل طراحی پیش می‌رود معلومات معمار و هزینه تغییرات احتمالی نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل ارائه راهکارهایی جهت بهینه شدن طرح از نظر انرژی در مراحل اولیه طراحی باعث کمینه شدن هزینه تغییرات احتمالی می‌شود. برای افزایش کارایی یک طرح معماری، معمار نیاز دارد در مرحله‌ای که آزادانه مدل‌های مفهومی را شکل می‌دهد، گزینه‌ها و شاخص‌هایی در اختیارش قرار بگیرد، به نحوی که بدون محدودیت در خلاقیت و تفکر معمارانه به کارایی قابل قبولی نیز دست یابد. اینکه چه مؤلفه‌هایی و به چه اندازه بر کارایی انرژی، آسایش افراد و نور روز ساختمان اثرگذار هستند، از جمله مهم‌ترین سؤال‌ها به شما می‌روند. بعد از شناسایی مؤلفه‌ها باید مشخص شود که این مؤلفه‌ها با کدام اهداف بهینه می‌شوند. شبیه‌سازی کلیه حالات که با ترکیب مؤلفه‌های مختلف ایجاد می‌شود، معمولاً بسیار زمان‌بر است. بنابراین به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین جواب‌ها در کمترین زمان و با کمترین تعداد گزینه‌های بررسی‌شده باید از روش‌ها و الگوریتم‌های هوشمند به‌منظور جست‌وجوی بهینه فضای مسئله بهره برد. مهم‌تر از پاسخ‌های نهایی که از بهینه‌سازی‌ها به دست می‌آید، چگونگی شکل‌گیری یک مدل پارامتریک و ملاحظات آن است که در این میان باید در نظر گرفت.

این پژوهش سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: شناسایی مؤلفه‌های معماری مؤثر بر کارایی انرژی ساختمان مسکونی، دستیابی به روندی علمی و بهینه برای شکل‌گیری مدل پارامتریک و طراحی یک واحد مسکونی انرژی کارا در شهر تهران که به‌طور هم‌زمان کمترین شدت مصرف انرژی، بیشترین آسایش محیط داخلی و بهره‌مندی از نور روز را داشته باشد. با استفاده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک و شبیه‌سازی توابع هدف، جواب‌های بهینه به دست می‌آیند. نقطه تمایز این پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه، وارد کردن متغیر وضعیت مکانی فضاهای مسکونی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بهینه‌سازی است. با استفاده از داده‌های منتج از شبیه‌سازی‌ها، مؤثرترین مؤلفه‌ها بر اهداف بهینه‌شده با تحلیل حساسیت استخراج شدند. تحلیل حساسیت خود یک مفهوم محاسباتی است که این پژوهش یکی از روش‌های محاسباتی ساده آن (Samuelson et al., 2016) را استفاده کرد.

بدین وسیله معمار ضمن اینکه می‌تواند از روندی مشخص برای ایجاد یک الگوریتم بهینه‌سازی واحد مسکونی بهره ببرد، در صورتی که نیاز به بهینه‌سازی نداشته باشد می‌تواند تنها مؤلفه‌ای که تأثیر بیشتری بر اهداف اصلی کارایی ساختمان دارد را به صورت بهینه مورد استفاده قرار دهد.

پیشینه نظری

این پژوهش در نظر دارد بنیان نظری خود را نه بر کل فرآیند طراحی معماری بلکه تنها بر مرحله طراحی اولیه استوار سازد و به منظور مشخص شدن محدوده این مرحله در فرآیند طراحی معماری، تعریفی را که

«دستورالعمل ۲۳»^۱ ارائه می‌دهد مدنظر قرار می‌دهد. فرآیند طراحی ساختمان «دستورالعمل ۲۳» که توسط آژانس بین‌المللی انرژی^۲ تهیه شده است، مراحل طراحی را به چهار قسمت تقسیم کرده است: پیش‌طراحی، طراحی، ساخت‌وساز، بهره‌برداری (Löhnert et al., 2003, 35). مرحله طراحی خود به سه بخش طراحی شماتیک، توسعه طراحی و طراحی فنی تقسیم می‌شود. به مجموع مراحل پیش‌طراحی و طراحی شماتیک، مراحل اولیه فرایند طراحی گفته می‌شود. در مراحل اولیه طراحی تصمیمات متعددی برای رسیدن به اهداف طراحی ساختمان همچون کارایی انرژی، هزینه‌ها، اثرات زیست‌محیطی، آسایش حرارتی و غیره اتخاذ می‌گردد (Negendahl & Nielsen, 2015, 2). مطالعات بهینه‌سازی اغلب در مرحله طراحی اولیه اجرا می‌شوند، جایی که اکثر تصمیمات طراحی هنوز شکل نگرفته است، (Miles et al., 2001, 1) اما اغلب در این مرحله گزینه‌های مختلف طراحی و تأثیر آنها بر عملکرد ساختمان به‌طور کامل مورد بررسی قرار نمی‌گیرند (Fang, 2017, 29).

بهینه‌سازی فرآیند و روشی علمی برای طراحی و تصمیم‌گیری است که امکان کنکاش میان تعداد زیادی از گزینه‌های طراحی را به‌صورت بهینه امکان‌پذیر می‌کند و باید تا حد امکان عملکردی و مؤثر باشد (Merriam-Webster, 2017). رایت پیشگام در زمینه پژوهش بهینه‌سازی ساختمان در سال ۱۹۸۶ از روش «جست‌وجوی مستقیم» در بهینه‌سازی سامانه تهویه مطبوع استفاده کرد (Wright, 1986).

مطالعات بهینه‌سازی پوسته ساختمان اغلب بر انتخاب انواع پیکربندی اجزای ساختمان و مصالح ساختمانی متمرکز هستند و برخی مطالعات متغیرهایی مانند نسبت پنجره به دیوار، جهت‌گیری و پوسته دوجداره را در انواع فضاهای مسکونی، آموزشی، اداری و غیره مورد توجه قرار می‌دهند (Zomorodian & Tahsildoost, 2017؛ حافظی و همکاران، ۱۳۹۵؛ مهدوی نژاد و همکاران، ۱۳۹۵؛ یوسفی و همکاران، ۱۳۹۶ و سخندان سرخابی و خان‌محمدی، ۱۳۹۴). بیشترین موضوعات مورد پژوهش، کارایی انرژی، آسایش حرارتی و اثرات زیست‌محیطی هستند. در سال‌های گذشته بسیاری از پژوهشگران بر حوزه بهینه‌سازی نما تمرکز کرده‌اند (Fan & Xia, 2017؛ Baglivo et al., 2014؛ Gossard et al., 2013؛ Bichiou & Krarti, 2011؛ Ascione et al., 2015؛ Schwartz et al., 2016). بهینه‌سازی هندسه ساختمان از دیگر مسائل مورد توجه در این حوزه است که تأثیرات قابل‌توجهی بر انرژی و نور روز می‌گذارد. متغیرهای اصلی در این زمینه عبارت‌اند از طراحی پنجره، سایبان، بام، نما، شکل ساختمان و غیره (Tuhus-Dubrow & Krarti, 2010؛ Futrell et al., 2015؛ Caruso & Kämpf, 2015؛ Ercan & Elias-Ozkan, 2015).

در مسائل طراحی ساختمان، طراحان معمولاً با چندین هدف متضاد مواجه می‌شوند که نیاز به بهینه‌شدن دارند، همچون بیشینه آسایش حرارتی در مقابل کمینه مصرف انرژی. دو روش مرسوم برای حل مسائل بهینه‌یابی وجود دارد. اولین روش مدل جمع وزنی است. اهداف با یک عامل وزنی مرتبط قاعده‌مند می‌شوند سپس کل تابع هدف از طریق یک معادله که شامل اهداف مختلف و فاکتورهای وزن یافته مربوط به آنها است به دست می‌آید. مشکل این روش، فرآیند تبدیل شدن اهداف به یک تابع هدف است. روش دوم بهینه‌سازی پارتو^۳ است که به دنبال یک جبهه مصالحه‌گر بین اهداف است. جبهه پارتو بر اساس مفهوم غلبه کردن^۴ تعریف می‌شود (Evins, 2013, 3). معنای پارتو بهینه این است که هیچ راه‌حل ممکن دیگری نیست که بتواند یک هدف را بدون بدتر شدن دیگری بهبود ببخشد و بتواند در این جبهه قرار گیرد. مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مغلوب نشده را مرز پارتو^۵ نام‌گذاری کرده‌اند که با یک منحنی نشان داده می‌شود (Machairas et al., 2014, 2).

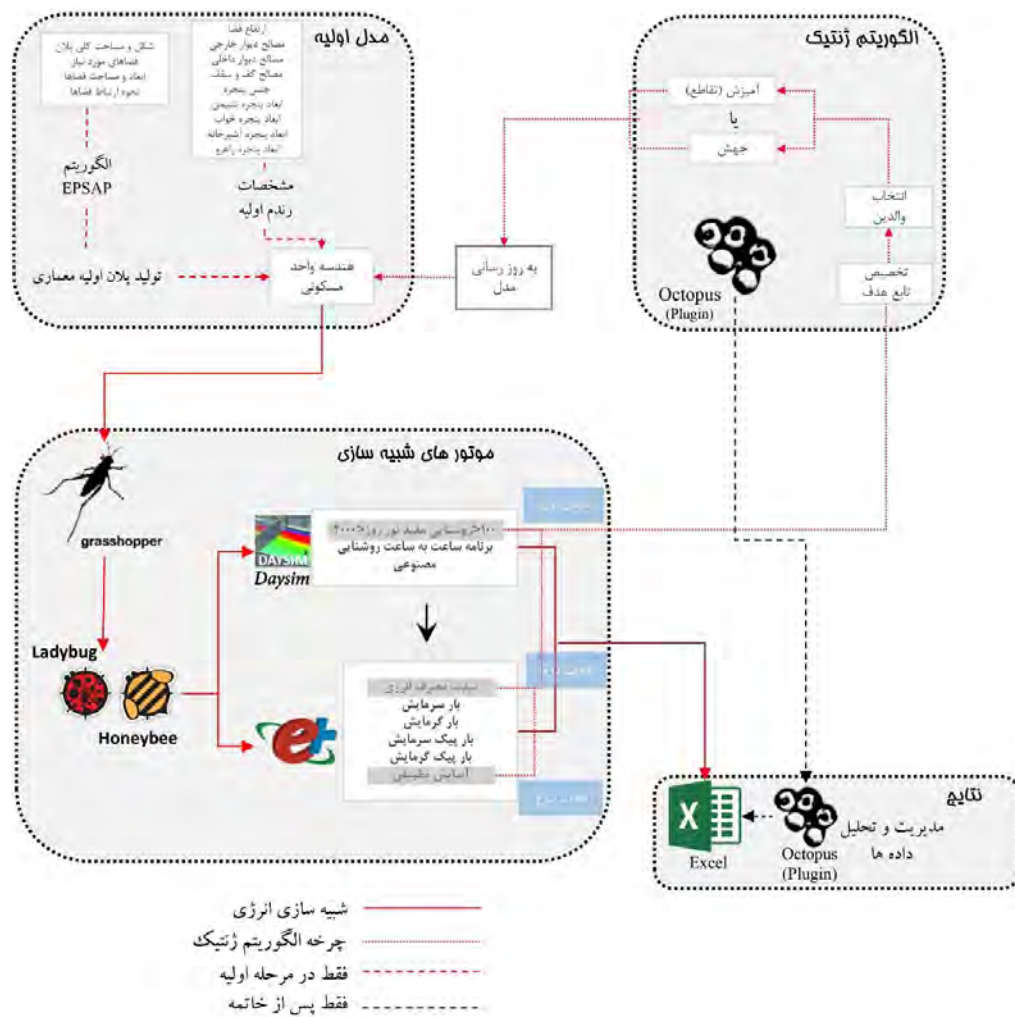
در مطالعه‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر، انواع مختلفی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ایجاد شده‌اند و انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی متناسب با مسائل از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعاتی که توسط

اوینس (Evins, 2013) و ماچایراس و همکاران (Machairas et al., 2014) در این زمینه انجام پذیرفته است، نشان می‌دهد الگوریتم‌های تصادفی جمعیت محور مثل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم‌های ترکیبی در بهینه‌سازی کارایی ساختمان بیشترین تکرار را داشته‌اند. در این پژوهش‌ها الگوریتمی به عنوان الگوریتم برتر شناخته می‌شود که با بررسی تعداد کمتری از گزینه‌ها جواب بهینه‌تری را ارائه نماید.

مطالعات بسیاری برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ابتکاری در مسائل بهینه‌سازی ساختمان انجام شده است. نتیجه پژوهش توهوس-دوبرو و کرارتی (Tuhus-Dubrow and Krarti, 2010, 3) نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری نسبت به الگوریتم‌های شبیه‌سازی ازدحام ذرات و جست‌وجوی پیوسته ۶ دارد، چنانچه تنها با اختلاف ۰/۵ درصدی در نتیجه نهایی، تعداد حالاتی که این الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه بررسی کرده کمتر از ۵۰٪ تعداد حالاتی است که دو الگوریتم دیگر بررسی کرده‌اند. نتیجه پژوهش مروی اوینز (Evins, 2013, 12) نشان می‌دهد که ۳۸٪ منابع بر بهینه‌سازی پوسته ساختمان، ۲۱٪ بر سامانه‌های تهویه مطبوع، ۱۶٪ بر تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر پژوهش‌ها بر راهبردهای کنترل‌کننده و سامانه‌های روشنایی متمرکز بوده‌اند؛ ۵۳٪ مطالعات از بهینه‌سازی تک‌هدفه، ۸٪ از روش جمع وزنی و ۳۹٪ از روش پارتو در بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کرده‌اند. در این میان الگوریتم ژنتیک به‌عنوان رایج‌ترین روش بهینه‌سازی در اکثر مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است و پس از آن روش‌های جست‌وجوی مستقیم، تبرید شبیه‌سازی شده و ازدحام ذرات پرطرفدار بوده‌اند. رایج‌ترین هدف بهینه‌سازی با تمرکز ۶۰ درصد مطالعات، مصرف انرژی بوده است و سایر اهداف شامل هزینه، آسایش، کارایی نور روز، تولید کربن دی‌اکسید و غیره بوده‌اند.

روش‌شناسی

چارچوب طراحی پارامتریک در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد ساختمان چهار رکن اصلی دارد: مدل‌سازی انرژی، مدل‌سازی نور روز، شاخص‌های کارایی ساختمان و بهینه‌سازی. چهار رکن نام‌برده باید با یکدیگر یکپارچه شده، سپس با استفاده از ابزارهای مناسب وارد فرآیند طراحی شوند تا بتوانند به‌صورت خودکار گزینه‌های طراحی را با تغییر در مؤلفه‌ها تولید کنند و پس از شبیه‌سازی کارایی‌های لازم ساختمان، آنها را بهینه‌سازی نمایند. این پژوهش از نسخه ۵ نرم‌افزار راینو، ۰/۹ پلاگین گرس‌هاپر به‌عنوان بستر تولید مدل پارامتریک و الگوریتم‌نویسی، نسخه‌های ۰/۶۴ افزونه لیدی باگ^۲ و ۰/۶۱ هانی بی^۱، رابط‌های موتورهای شبیه‌ساز انرژی پلاس و دیسیم برای شبیه‌سازی انرژی و نور روز و ۰/۳/۶ اوکتاپوس^۳، رابط گرافیکی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک از نوع SPEA2 در گرس‌هاپر استفاده کرد. شکل ۱ نحوه یکپارچه شدن این رکن‌ها را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. اگر کلیه حالات ممکن ترکیب مؤلفه‌های تعریف شده بررسی می‌شود، باید نزدیک به یک میلیارد و نهصد میلیون شبیه‌سازی صورت می‌پذیرفت؛ درحالی‌که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک تنها با شبیه‌سازی ۱۵۰۰ حالت بدون تکرار جواب‌های بهینه به دست آمد. رسیدن به جواب‌های صحیح با بررسی این میزان اندک فضای نمونه از طریق تنظیمات الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود که باید مطالعات و دقت نظر بیشتری برای آن صورت پذیرد.



شکل ۱. روند کلی پژوهش

فرآیند طراحی پارامتریک و مدل شبیه‌سازی

طراحی پارامتریک در معماری به فرآیند مدل‌سازی هندسه و اطلاعات ساختمان با استفاده از عوامل و توابع اشاره دارد. این گونه از طراحی انعطاف‌پذیری برنامه‌نویسی را دارد، اما رابط کاربری گرافیکی و کدنویسی بصری آن را نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی سنتی به مراتب کاربرپسندتر می‌کند. مزیت طراحی پارامتریک نسبت به روش طراحی سنتی توانایی تولید سریع گزینه‌های طراحی است. مؤلفه‌های مورد نظر این پژوهش هم هندسه واحد مسکونی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و هم ویژگی‌های غیر هندسه‌ای نظیر مصالح و رنگ دیوار را. مراحل ایجاد مدل پارامتریک بدین صورت است که ابتدا پلان‌های مختلف وارد الگوریتم شده، به زون‌های حرارتی تبدیل می‌شوند و به هر زون اطلاعاتی نظیر میزان تولید انرژی تجهیزات و برنامه حضور افراد داده می‌شود. در ادامه برخی ویژگی‌های هندسی مانند سطح پنجره و ارتفاع اتاق و غیرهندسی مانند جنس دیوار خارجی، سقف، کف، نوع و تعداد شیشه پنجره و رنگ سطح نهایی کف، دیوار و سقف به عنوان متغیر، مدل پارامتریک را شکل می‌دهند.

– تولید هندسه اولیه ساختمان مسکونی

در بیشتر مقالات بهینه‌سازی مدل هندسی اولیه‌ای که مؤلفه‌های متغیر بر روی آن اعمال می‌شود، در نظر گرفتن یک مکعب مستطیل به عنوان حجم اولیه و تغییر مؤلفه‌هایی مثل ابعاد کف، ارتفاع و سایر متغیرهای هندسی بر روی آن است. در این پژوهش به عنوان یک گام روبه جلو زون بندی، تغییر ابعاد و جهت گیری زون‌ها، به بیانی دیگر پلان بندی فضا نیز به عنوان یک متغیر به فرآیند بهینه‌سازی وارد شد. از میان پژوهش‌های مختلفی که در زمینه حوزه تولید خودکار پلان‌های ساختمانی انجام شده بود، (Rodrigues et al., 2014؛ al., 2014؛ Granadeiro et al., 2013؛ Ahmed et al., 2014؛ Chen et al., 2017؛ Merrell et al., 2010؛ Dogan et al., 2015)، پژوهشی که در سال ۲۰۱۴ توسط رودریگز و همکاران (Rodrigues et al., 2014) در دانشگاه کویمبرا ۱۰ در کشور پرتغال انجام شده بود، به دلیل توجه بیشتر به احتیاجات معماری و تنوع گزینه‌های تولید شده انتخاب گردید. به علت پیچیدگی‌های بازنویسی کد تولید پلان تصمیم گرفته شد با ارسال اطلاعات بومی برای این پژوهشگر، تولید پلان‌های مختلف توسط وی انجام پذیرد. برای تولید پلان‌های ساختمانی مورد نظر پژوهش، ابعاد و ویژگی‌های عملکردی فضاها، درب‌ها و پنجره‌ها و الزامات هم‌نشینی فضاها، مسکونی و برخی مشخصات ابعادی دیگر از کتاب معیارهای ابعادی و ملاحظات طراحی فضاها، واحد مسکونی شهری (قاسم‌زاده، ۱۳۹۱) استخراج و برای وی ارسال شد. با توجه به آمار منتشر شده توسط مرکز آمار ایران مساحت بیشتر واحدهای مسکونی در شهر تهران بین ۷۰ تا ۸۵ مترمربع است و مساحت ۷۵ مترمربع به عنوان عددی میانه برای مساحت واحد مسکونی انتخاب گردید. پس از استخراج داده‌ها از کتاب قاسم‌زاده و تطبیق با ورودی‌های مورد نیاز تولید پلان ساختمانی توسط الگوریتم مقاله رودریگز با نام «برنامه‌ریزی تکاملی برای مسئله توزیع فضاها» (EPSAP^۱)، اطلاعات برای پژوهشگر پرتغالی ارسال و از وی خواسته شد ۱۰۰ پلان با زون بندی‌های متنوع تولید کند. وی که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا^{۱۲} این الگوریتم را نوشته بود، پلان‌های معماری با خروجی DXF تولید کرد که این پلان‌ها به عنوان گزینه‌های پلان بندی به الگوریتم این پژوهش وارد شدند.

– زون‌های حرارتی

پس از شکل‌گیری هندسه اولیه باید حجم هندسی برای شناسایی توسط موتورهای شبیه‌ساز انرژی و نور به زون‌های حرارتی تبدیل شود. ابتدا فضاها، هندسی مثل اتاق خواب، راهرو و غیره به زون حرارتی تبدیل می‌شوند. در این مرحله طبق جدول ۱ زون‌های دارای گرمایش و سرمایش و صرفاً گرمایش جدا می‌شوند.

جدول ۱. تفکیک فضاهای کنترل شده و کنترل نشده در ساختمان

گرمایش و سرمایش	صرفاً گرمایش
اتاق‌های خواب، راهرو، هال ورودی، نشیمن، آشپزخانه	سرویس‌های بهداشتی، حمام‌ها

پس از تبدیل حجم‌ها به زون حرارتی باید نوع هم‌نشینی^{۱۳} آنها تعیین گردد. از آنجاکه در بیشتر مواقع در اتاق خواب‌ها به راهرو باز است و زمانی که نشیمن و آشپزخانه کنار هم قرار می‌گیرند از آشپزخانه اوپن استفاده می‌شود، فرض بر این شد که در این دو حالت فضاها با یکدیگر تبادل بی‌واسطه نور و انرژی دارند. فرض دیگر شبیه‌سازی این است که واحد مورد بررسی در طبقه میانی یک آپارتمان در بافت شهری قرار گرفته است. در نتیجه از طریق سقف و کف انتقال حرارت صورت نمی‌گیرد. ساختمان‌های اطراف، با ارتفاع‌های مختلف، و طبقات زیرین و رویی نیز به منظور سایه‌اندازی در مدل پارامتریک تولید می‌شوند.

- جهت‌گیری ساختمان

جهت‌گیری ساختمان به‌عنوان اولین مؤلفه‌ای که حین فرآیند شکل‌گیری پلان در الگوریتم اعمال می‌شود، به‌عنوان متغیری ثابت و بر اساس جهت‌گیری سنتی شهر تهران با در نظر گرفتن تابش و جهت وزش باد مطلوب ۱۵ درجه جنوب شرقی فرض شده است.

- ابعاد پنجره‌ها

توزیع نور روز در فضای داخل به ابعاد و محل پنجره‌ها وابسته است. برای ساده‌سازی مدل پارامتریک می‌توان بدون در نظر گرفتن کیفیت توزیع نور روز، پنجره‌ها را در وسط دیوار در نظر گرفت و تنها با نسبت مساحت پنجره به مساحت جداری که روی آن قرار گرفته‌اند، تغییر ابعاد را اعمال کرد. با بررسی مقالات متعددی در مورد ابعاد پنجره با اقلیم‌های مشابه تهران (Wang et al., 2005؛ Liu et al., 2015؛ Ascione et al.; Konis et al., 2016؛ Azari et al. 2016؛ Youssef et al., 2016؛ Wang et al., 2006؛ Hester et al., 2017؛ Hygh et al. 2012؛ Attia et al. 2012؛ Samuelson et al. 2016) و نیاز به کمینه کردن زمان بهینه‌سازی، برای این پژوهش بازه ۱۵ تا ۷۵ درصد به‌صورت گسسته با تغییر ۱۰ واحدی در نظر گرفته شد. برای دقت بیشتر در فضای نشیمن از مقاله فیاض (۱۳۹۱، ۱۴)، حداقل درصد پنجره ۱۵ درصد مساحت کف در نظر گرفته شد. برای سرویس بهداشتی و حمام نیز به‌طور ثابت مساحت باز شو به ترتیب ۰/۱ و ۰/۱۵ مترمربع (قاسم‌زاده، ۱۳۹۱، ۷۳) اعمال می‌شود.

- ابعاد و جهت‌گیری سایبان‌ها

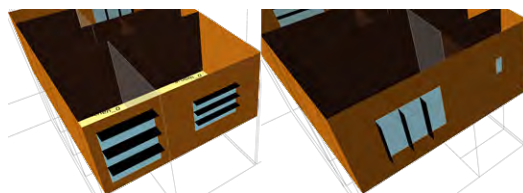
ابعاد سایبان نیز به‌صورت ثابت فرض شده است. زوایای سایبان به منظور استخراج عمق آن، از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان استخراج شده است (جدول ۲).

جدول ۲. زاویه و جهت‌گیری سایبان برای شهر تهران

جهت پنجره		شمال		شرق		جنوب		غرب	
زاویه سایبان		عمودی	افقی	عمودی	افقی	زاویه سایبان	افقی	عمودی	افقی
تهران - مهرآباد		-	۶۵ غ	۷۰	-	تهران - مهرآباد	-	۶۵ غ	۷۰

منبع: مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

با الگوریتم‌نویسی در گرس‌هاپر ضمن ایجاد پنجره‌های مختلف، سایبان‌ها بر مبنای اعداد جدول ۲ تولید می‌شوند. به دلیل امکان تولید پنجره‌هایی در ابعاد بزرگ و سایبان‌هایی با عمق بیش از ۱ متر به‌منظور رعایت ملاحظات اجرایی، سایبان‌های افقی و عمودی روی سطح پنجره توزیع می‌شوند (شکل ۲). بدین‌صورت که عمق به‌دست‌آمده تقسیم بر سه شده و با اندازه‌های مساوی روی سطح پنجره قرار می‌گیرند.



شکل ۲. نحوه توزیع سایبان روی پنجره

مشخصات اجرایی عناصر ساختمانی

به منظور دستیابی به مصالح مرسوم علاوه بر پایش بازار ساخت و ساز، از سه کتاب منتشر شده توسط مرکز تحقیقات مسکن در زمینه مصالح رایج در دیوارهای خارجی (ریاضی، ۱۳۸۹)، دیوارهای داخل (ریاضی، ۱۳۹۴) و پنجره‌های ساختمانی (ریاضی و ماجدی، ۱۳۸۸) کمک گرفته شد. برای دیوار خارجی در چهار دسته‌بندی مصالح هسته اصلی، آجری، بلوک سفالی، لیکا و هبلکس و چهار دسته‌بندی در میزان عایق حرارتی، ۰، ۵، ۸ و ۱۰ سانتی متر^۴، مجموعاً ۱۶ حالت مختلف برای دیوار داخلی در سه دسته متداول آجری، بلوک سیمانی و گچ برگ، مجموعاً سه حالت مختلف، مصالح کف با سه سازه مختلف، دال بتنی، عرشه فولادی و تیرچه بلوک^۵، با دو ضخامت عایق مختلف، ۰ و ۱۰ سانتی متر، مجموعاً ۶ حالت مختلف و پنجره در سه دسته‌بندی با تعداد جدار شیشه‌ای متفاوت و با دو نوع گاز پرکننده، آرگون و هوا، مجموعاً ۹ حالت مختلف، مطابق جدول ۳ و جدول ۴ به کار گرفته شده است.

جدول ۳. مشخصات دیوار خارجی، دیوار داخلی، کف طبقات و پنجره‌ها

مؤلفه طراحی	شناسه	توضیح	ضخامت کلی (متر)	ضریب انتقال حرارت (W/m ² K)	زمان تأخیر (ساعت)
دیوار خارجی، نمای بیرونی از سنگ و نازک کاری گچ از داخل	Ewall-1	دولایه آجر ۲۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۳	۱/۹۰۸	۴/۵۶
	Ewall-2	یک لایه آجر ۱۰ سانتی متری با ۵ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۴۵	۰/۵۳۷	۶/۸۹
	Ewall-3	یک لایه آجر ۱۰ سانتی متری با ۸ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۷۵	۰/۳۶۴	۷/۳۴
	Ewall-4	یک لایه آجر ۱۰ سانتی متری با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹۵	۰/۳	۷/۶۵
	Ewall-5	یک لایه با بلوک سفالی ۲۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۳۱	۱/۸۶	۸/۱۶
	Ewall-6	یک لایه با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری با ۵ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۴۵	۰/۵۳۶	۱۰/۳۱
	Ewall-7	یک لایه با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری با ۸ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۷۵	۰/۳۶۴	۱۰/۶۹
	Ewall-8	یک لایه با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹۵	۰/۳	۱۰/۹۷
	Ewall-9	یک لایه بلوک لیکا ۲۰ سانتی متر بدون عایق	۰/۲۹	۰/۷۹	۷/۷۸
	Ewall-10	یک لایه بلوک لیکا ۱۰ سانتی متری با ۵ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۴	۰/۴۴۸	۱۰/۰۸
	Ewall-11	یک لایه بلوک لیکا ۱۰ سانتی متری با ۸ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۷	۰/۳۲۱	۱۰/۵۴
	Ewall-12	یک لایه بلوک لیکا ۱۰ سانتی متری با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹	۰/۲۷	۱۰/۸۶
	Ewall-13	یک لایه هبلکس ۲۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۲۹	۰/۵۲	۵/۷۵
	Ewall-14	یک لایه هبلکس ۱۰ سانتی متری با ۵ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹	۰/۳۸۹	۷/۸۸
	Ewall-15	یک لایه هبلکس ۱۰ سانتی متری با ۸ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۷	۰/۲۹	۸/۴۶
	Ewall-16	یک لایه هبلکس ۱۰ سانتی متری با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹	۰/۲۴۷	۸/۸۳
دیوار داخلی با نازک کاری گچ	Iwall-01	آجری ۱۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۱۸۵	۱/۹۸	
	Iwall-02	بلوک سیمانی ۱۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۱۸	۱/۱۴	
	Iwall-03	گچ برگ ۱۰ سانتی متری بدون عایق	۰/۱۲	۲/۵	
کف با پوشش سرامیک	Floor-01	بتن مسلح بدون عایق	۰/۲۴	۵/۹۶	
	Floor-02	بتن مسلح با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۳۴	۰/۳۲	
	Floor-03	عرشه فولادی بدون عایق	۰/۱۹	۶/۶۱	
	Floor-04	عرشه فولادی با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۲۹	۰/۳۲	
	Floor-05	تیرچه بلوک پلی استایرن بدون عایق حرارتی	۰/۳۹	۰/۹۸	
	Floor-06	تیرچه بلوک پلی استایرن با ۱۰ سانتی متر عایق حرارتی	۰/۴۹	۰/۲۵	

مشخصات مربوط به مشخصات حرارتی و فیزیکی پنجره‌ها از نرم افزار Window طبق جدول ۴ استخراج شده است.

جدول ۴. مشخصات استخراج شده از نرم‌افزار Window برای انواع پنجره

نوع پنجره	شماره	نوع شیشه و گاز	ضریب انتقال حرارت (W/m ² K)	SHGC*(۱-۰)	VT** (۱-۰)	نوع قاب	ضریب انتقال حرارت قاب (W/m ² K)
یک جدار شیشه	Win-1	۴ میلی‌متر شیشه بدون پوشش	۵/۸۸	۰/۸۶۷	۰/۹	۶/۵ سانتی‌متر UPVC	۱/۸
شیشه دوجداره - هوا - پوشش low-E	Win-2	۴-۱۳-۶ میلی‌متر پوشش کم گسیل با گاز هوا	۱/۶۳۶	۰/۲۷۷	۰/۶۳۸		
شیشه دوجداره - هوا - بدون پوشش	Win-3	۴-۱۳-۶ میلی‌متر بدون پوشش با گاز هوا	۲/۶۹۹	۰/۷۶۳	۰/۸۱۰		
شیشه دوجداره - آرگون - پوشش low-E	Win-4	۴-۱۳-۶ میلی‌متر پوشش کم گسیل با گاز آرگون	۱/۳۳۸	۰/۲۷۲	۰/۶۳۸		
شیشه دوجداره - آرگون - بدون پوشش	Win-5	۴-۱۳-۶ میلی‌متر بدون پوشش با گاز آرگون	۲/۵۴	۰/۷۶۴	۰/۸۱۰		
شیشه سه جداره - هوا - پوشش low-E	Win-6	۴-۱۳-۶-۱۳-۴ میلی‌متر پوشش کم گسیل با گاز هوا	۱/۲۴۰	۰/۶۰۰	۰/۷۱۱		
شیشه سه جداره - هوا - بدون پوشش	Win-7	۴-۱۳-۶-۱۳-۴ میلی‌متر بدون پوشش با گاز هوا	۱/۷۶۳	۰/۶۸۴	۰/۷۳۸		
شیشه سه جداره - آرگون - پوشش low-E	Win-8	۴-۱۳-۶-۱۳-۴ میلی‌متر پوشش کم گسیل با گاز آرگون	۱/۰۲۴	۰/۶۸۷	۰/۷۱۱		
شیشه سه جداره - آرگون - بدون پوشش	Win-9	۴-۱۳-۶-۱۳-۴ میلی‌متر پوشش کم گسیل با گاز آرگون	۱/۶۲۳	۰/۶۸۵	۰/۷۳۸		

* Solar Heat Gain Coefficient

** Visible Transmittance

جزئیات تأسیسات مکانیکی ساختمان مسکونی

از آنجا که رویکرد این پژوهش مدل‌سازی دقیق سامانه‌های مکانیکی نیست، استفاده از مدل‌های پیش‌فرض تعریف‌شده در پلاگین هانی بی در دستور کار قرار گرفت. از میان این سامانه‌ها، سامانه فن کویل + سامانه تهویه مطبوع که نزدیک‌ترین گزینه به سامانه‌های رایج کشور و منطبق با اقلیم تهران بود، انتخاب شد. سایر مشخصات این سامانه بر اساس وضع موجود سامانه‌ها در ساختمان‌های ایران استخراج شده است (جدول ۵).

جدول ۵. مشخصات دقیق سامانه گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع

میزان	عنوان	
۹۰٪	بهره‌وری کلی فن‌ها	مشخصات بخش تهویه مطبوع (هوا رسانی)
۹۰٪	بهره‌وری موتور فن	
اعمال شود	متغیر بودن حجم هوای هر فضا	
Sensible	گونه استفاده از باز یافت گرما	
۵۰٪	اثربخشی باز یافت	
۳	COP چیلر	مشخصات بخش سرمایش (چیلر)
۹۰٪	بهره‌وری پمپ موتور چیلر	
۵۰٪	بازدهی بویلر	مشخصات بخش گرمایش (بویلر)
۹۰٪	بهره‌وری پمپ موتور بویلر	

آستانه‌های دمای هوای داخل در فصل سرد و گرم بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ۲۱ و ۲۸ درجه و نرخ تهویه برای فضاهای مختلف برابر $0.00254 \text{ m}^3/\text{s.m}^2$ و برای آشپزخانه $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$ در نظر گرفته شد.

– گرمای تولیدشده توسط افراد و تجهیزات

داده‌های مربوط به میزان سوخت‌وساز فعالیت‌های انسان را در کتاب راهنمای مبانی مهندسی سامانه‌های گرمایش، خنک‌کننده و تهویه مطبوع (ASHRAE, 2013) می‌توان یافت. در جدول ۶ میزان متابولیسم و تولید انرژی تجهیزات آورده شده است، اطلاعات درباره مشخصات تجهیزات از کتاب راهنمای مدل‌سازی ساختمان مسکونی (Hendron & Engebrecht, 2010) استخراج شده است.

جدول ۶. میزان متابولیسم، نوع و میزان بار تجهیزات در فضاهای مختلف واحد مسکونی

نام زون	نوع فعالیت	میزان متابولیسم (W/m ² .person)	نوع تجهیزات	بار تجهیزات (W)
آشپزخانه	خوردن و پخت‌وپز	۲۰۷	یخچال‌فریزر، گاز و فر، ماشین ظرفشویی	۱۳۵
اتاق خواب	خوابیدن	۷۲	متنوع	۶۵
نشیمن	نشستن	۱۰۸	تلویزیون و پخش‌کننده	۷۷٫۳
راهرو	راه رفتن	۲۰۷	متنوع	۰
هال ورودی	راه رفتن	۲۰۷	متنوع	۰
سرویس بهداشتی	نشستن	۱۰۸	متنوع	۰
حمام	حمام کردن	۱۲۶	متنوع	۰

منبع: ASHRAE, 2013; Hendron & Engebrecht, 2010

گرمای تولیدشده توسط نرخ سوخت‌وساز بسته به سطح اشغال هر زون متفاوت است. به بیان دیگر، نرخ سوخت‌وساز به تعداد افراد در هر فضا برای هر ساعت سال بستگی دارد (جدول ۷). اعداد نشان‌دهنده نسبت حضور افراد در فضاها است که در این نمونه یک زوج که هر دو مشغول به کار هستند در نظر گرفته شده است (زمانی که هر دو در یک فضا باشند عدد ۱ یا ۱۰۰ درصد اشغال فضا لحاظ می‌شود). برای زون‌های مختلف فضای مسکونی در هیچ استاندارد عدد ارائه نشده است، ولی در این پژوهش به دلیل اهمیت زون‌ها و نیاز به تمایز در مشخصات حرارتی آنها لازم دیده شد که برای هر فضا برنامه حضور افراد به صورت متفاوت ارائه گردد. از جمله پژوهش‌هایی که این در این زمینه انجام شده است، پایان‌نامه کارشناسی ارشد بورناس و هاو (Bournas & Haav, 2016, 36) است که با کمک اطلاعات حاصل آن، تجربیات شخصی و برخی مفروضات، برنامه اختصاصی برای این پژوهش نگاشته شد. بدیهی است که به‌منظور تقویت اعتبار برنامه حضور افراد، نیاز به پژوهشی میدانی از یک جامعه هدف معتبر است که از حوصله این پژوهش خارج است.

جدول ۷. برنامه زمان‌بندی حضور افراد برای روزهای هفته و پایان هفته

ساعات روز	روزهای هفته - میزان حضور افراد							آخر هفته و تعطیلات - میزان حضور افراد						
	نشیمن	آشپزخانه	خواب	هال	راهرو	سرویس بهداشتی	حمام	نشیمن	آشپزخانه	خواب	هال	راهرو	سرویس بهداشتی	حمام
۰۷:۰۰-۰۸:۰۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰۸:۰۰-۰۹:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰۹:۰۰-۱۰:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰:۰۰-۱۱:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱:۰۰-۱۲:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲:۰۰-۱۳:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳:۰۰-۱۴:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴:۰۰-۱۵:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵:۰۰-۱۶:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶:۰۰-۱۷:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷:۰۰-۱۸:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸:۰۰-۱۹:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۹:۰۰-۲۰:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۰:۰۰-۲۱:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۱:۰۰-۲۲:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۲:۰۰-۲۳:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۳:۰۰-۲۴:۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

- تنظیمات مورد استفاده برای شبیه‌سازی آسایش هوای داخل

برای سنجش آسایش محیط داخل ساختمان نیاز است سامانه‌های مکانیکی خاموش شوند و میزان آسایش افراد در شرایطی که تنها سامانه‌های غیرفعال به کار گرفته شده‌اند سنجیده شود. در این حالت برای موتور شبیه‌ساز انرژی جریان تهویه طبیعی در محیط داخل تعریف شده است (جدول ۸).

جدول ۸. مشخصات تهویه طبیعی برای شبیه‌سازی شرایط آسایش هوای داخل

مقادیر پیش فرض	متغیر
تهویه طبیعی از پنجره‌ها ^{۱۶}	نوع تهویه طبیعی
۲۴	حداقل دمای داخل برای جریان یافتن تهویه طبیعی
۲۸	حداکثر دمای خارج برای جریان یافتن تهویه طبیعی
اعمال شود	امکان تهویه عبوری ^{۱۷}

- شبیه‌سازی نور روز

شبیه‌سازی نور روز سالانه با موتور ریدینس انجام می‌پذیرد. جزئیات نازک‌کاری اجزای مختلف، دیوارها، سقف و کف، که از مصالح مرسوم بازار انتخاب شده در مدل‌سازی پارامتریک (جدول ۹) به کار گرفته شده است. اطلاعات مربوط به مصالح برای موتور شبیه‌ساز ریدینس از سایت رینهارت (Reinhart, 2010) استخراج شده است. در شبیه‌سازی سایبان نیز در نظر گرفته شد که به عنوان جسم مات برای موتور ریدینس تعریف شد تا تأثیر بازتابندگی آنها نیز در شدت روشنایی فضای داخل لحاظ گردد.

جدول ۹. جزئیات نازک کاری برای دیوارها، سقف و کف

نام	بازتاب	زبری	آبی	سبز	قرمز	نام سطح استفاده شده
طرح چوب	۰/۱	۰/۰۸	۰/۱۹۵	۰/۴۱۵	۰/۶۴۰	دیوار، کف
صفحه سیمانی	.	.	۰/۲۶۰	۰/۲۵۱	۰/۲۳۴	دیوار، سقف
گچ سفید	.	.	۰/۶۳۳	۰/۷۰۶	۰/۷۲۶	دیوار، سقف
طرح آجر	.	.	۰/۰۹۷	۰/۱۵۵	۰/۳۶۴	دیوار، کف، سقف
گرانیت مشکی	.	.	۰/۱۰۳	۰/۰۹۸	۰/۱۰۱	کف،
خاکستری (بتن)	.	.	۰/۱۴۵	۰/۱۹۴	۰/۲۴۴	کف، سقف
رنگ شامپاینی	۰/۴	۱	۰/۵۸۰	۰/۶۴۱	۰/۷۰۰	دیوار، سقف

منبع: Reinhart, 2010

شبکه تحلیل ریدینس در ارتفاع ۷۵ سانتی متری زمین قرار گرفته و ابعاد داخلی شبکه‌ها ۱ متر در نظر گرفته شده است. انتخاب عدد یک متر با علم به این نکته بوده است که هرچه ابعاد شبکه‌ها کمتر باشد دقت محاسبه افزایش می‌یابد ولی زمان شبیه‌سازی هم به مراتب بیشتر می‌شود. با توجه به برخی از پژوهش‌ها (Bournas & Haav, 2016, 111)، ابعاد ۱ متر هم دقت نسبی در تحلیل نور روز دریافتی را ارائه می‌نماید و هم زمان کمتری را برای شبیه‌سازی به خود اختصاص می‌دهد.

- حسگر نور روز و حضور افراد

برنامه ساعت به ساعت یک حسگر در فضا از خروجی‌هایی است که نرم‌افزار دیسیم به ما ارائه می‌کند و بیان‌کننده مقدار نور روز نسبت به حد تعیین شده برای آن است. در این پژوهش حداقل میزان روشنایی طبق اطلاعاتی که انجمن روشنایی ایران (سابا، ۱۳۹۱) ارائه کرده ۲۰۰ لوکس در نظر گرفته شد. نکته‌ای که در اغلب پژوهش‌ها به آن توجه نشده این است که بعد از به دست آوردن برنامه زمان‌بندی اصلاح شده نور مصنوعی با نور روز آن را با برنامه حضور افراد در فضا تلفیق نمی‌کنند و مستقیماً این برنامه زمان‌بندی را به فرآیند تحلیل انرژی وارد می‌کنند. از تلفیق برنامه حضور افراد با برنامه حسگر نور روز به برنامه زمان‌بندی استفاده از روشنایی مصنوعی دست پیدا می‌کنیم. اعمال این حسگرها باعث کاهش بار روشنایی مصنوعی تا ۷۰ درصد در نمونه‌های مورد بررسی این پژوهش شده است.

- بهینه‌یابی

در این پژوهش با توجه به مقالات مروری در زمینه الگوریتم‌ها و روش‌های بهینه‌سازی ساختمان (Evins, 2013, 12, Machairas et al., 2014, 106) و برنامه‌های موجود بهینه‌سازی برای پلاگین گرس‌هاپر، از الگوریتم ژنتیک، پرکاربردترین و کاراترین الگوریتم در بهینه‌سازی ساختمان، برای ارزیابی گزینه‌های طراحی بر پایه الگوریتم تکاملی پارتو تقویت شده^{۱۸} (Zitzler et al., 2001)، افزونه اوکتاپوس در گرس‌هاپر، استفاده شده است.

در هر مرحله از بهینه‌سازی تعدادی از راه‌حل‌ها درون فرآیند نگهداشته می‌شوند، درحالی‌که بقیه حذف می‌گردند. مواردی که نگهداشته می‌شوند، آنهایی هستند که الگوریتم بهینه‌سازی را همگرا خواهند کرد. آمیزش یک عملگر است که به همگرایی کمک می‌کند. نرخ آمیزش بالا می‌تواند الگوریتم ژنتیک را به عرصه «بهینه محلی» سوق دهد که قابل قبول نیست. جهش می‌تواند از این مشکل جلوگیری کند، اما نرخ

زیاد جهش (بیش از ۰/۷) نیز غیر قابل قبول است چراکه به الگوریتم ژنتیک دیگر اجازه همگرا شدن به سمت مجموعه راه‌حل‌های بهینه را نمی‌دهد. با توجه به پژوهش‌های مرتبط، بهترین عملکرد را ترکیبی از نخبگان قوی (بیش از ۰/۷) و نرخ جهش زیاد (حدود ۰/۵) به وجود می‌آورد و بدترین عملکرد با ترکیب نخبگی بالا و نرخ جهش پایین حاصل می‌شود.

جدول ۱۰ تنظیمات استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک در این پژوهش را نشان می‌دهد. اندازه جمعیت، تعداد راه‌حل‌های استفاده شده در جمعیت اولیه را نشان می‌دهد. الگوریتم با تولید راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌شود تا زمانی که به این عدد برسد. احتمال جهش، درصد ژن‌هایی را که توسط جهش متأثر می‌شوند نشان می‌دهد و این عدد باید با اندازه جمعیت مرتبط باشد.

ذکر این نکته ضروری است که در نرم‌افزار گرس‌هاپر تنها افزونه اوکتاپوس که بهینه‌سازی چندهدفه را انجام می‌دهد متغیرهای الگوریتم ژنتیک را دریافت می‌کند و افزونه گالاپاگوس ۱۹ که بهینه‌سازی تک‌هدفه با الگوریتم ژنتیک را انجام می‌دهد، قادر به دریافت این تنظیمات نیست و از مجموعه‌ای از پیش‌فرض‌ها بهره می‌برد که ممکن است در مسائل مختلف باعث ایجاد مشکلاتی در رسیدن به پاسخ بهینه شود.

جدول ۱۰. تنظیمات اولیه استفاده شده برای الگوریتم ژنتیک

نخبگی	نرخ جهش	نرخ آمیزش	اندازه جمعیت	احتمال جهش
۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۷۰	۱۰۰	۰/۰۱

جدول ۱۱. خلاصه‌ای از مؤلفه‌های استفاده شده در پژوهش

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	بازه	میزان افزایش
۱	نوع پلان‌بندی	گسسته	۱۰۰ مورد	۱ واحد
۲	ارتفاع مفید طبقه	گسسته	۴-۲٫۶ متر	۰٫۲ متر
۳	جهت‌گیری ساختمان (جهت شمال)	ثابت	۱۵ درجه شمال غربی	-
۴	نسبت مساحت پنجره به جدار نشیمن	گسسته	از ۱۵ درصد مساحت کف تا ۷۵ درصد مساحت جدار	۱۰ واحد
۵	نسبت پنجره به جدار اتاق خواب و آشپزخانه	گسسته	۱۵-۷۵٪	۱۰ واحد
۶	سطح پنجره سرویس بهداشتی	ثابت	۰٫۱ مترمربع	-
۷	سطح پنجره حمام	ثابت	۰٫۱۵ مترمربع	-
۸	مصالح دیوار خارجی	گسسته	۱۶ مورد	طبق جدول ۳
۹	مصالح دیوار داخلی	گسسته	۳ مورد	
۱۰	مصالح کف	گسسته	۶ مورد	
۱۱	مصالح پنجره	گسسته	۹ مورد	طبق جدول ۴
۱۲	نازک‌کاری دیوارها	گسسته	۵ مورد	طبق جدول ۱۰
۱۳	نازک‌کاری کف‌ها	گسسته	۴ مورد	
۱۴	نازک‌کاری سقف	گسسته	۵ مورد	
۱۵	سایبان پنجره‌های شمالی	ثابت	زاویه سایبان عمودی غربی برابر ۶۵ درجه	-
۱۶	سایبان پنجره‌های جنوبی	ثابت	زاویه سایبان افقی برابر ۶۰ درجه	-

- مشخصات توابع هدف شبیه‌سازی

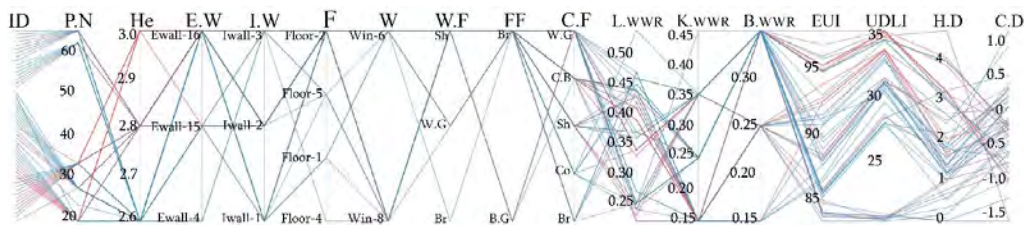
خروجی شبیه‌سازی نور روز، روشنایی مفید نور روز در بازه بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس است. هدف، بیشینه کردن روشنایی مفید نور روز است. روشنایی مفید نور روز به دلیل دو حد بالا و پایین روشنایی که دارد بر سایر معیارهای ارزیابی نور روز ارجحیت دارد. هدف از بهینه‌سازی انرژی، کمینه‌سازی شدت مصرف انرژی است. شدت مصرف انرژی از مجموع بارهای گرمایش، سرمایش، روشنایی، تجهیزات، پمپ‌ها و فن‌ها، در بازه سالانه تقسیم بر مساحت ساختمان به دست می‌آید. در انتها برای سنجش آسایش افراد و میزان تأثیر راهکارهای غیرفعال در آسایش محیط داخل، معیار آسایش تطبیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارجحیت آسایش تطبیقی بر PMV در این پژوهش علاوه بر مباحث نظری، سریع‌تر بودن روند محاسباتی آن است. در مقایسه با سایر توابع هدف بررسی سالانه این تابع به زمان بسیار زیادی (هر تحلیل سالانه حدود ۳۰ دقیقه) نیاز دارد، بدین منظور این تابع هدف در دو بازه زمانی سردترین و گرم‌ترین هفته سال بجای دوره سالانه، به منظور کمینه‌سازی شبیه‌سازی شده است.

یافته‌ها

در بهینه‌سازی چندهدفه از افزونه اوکتاپوس بهره گرفته شده است. درباره این افزونه و الگوریتم ژنتیک چندهدفه، از نوع الگوریتم تکاملی پارتو تقویت‌شده در بخش‌های پیشین توضیحاتی داده شده است. در مجموع برای این بهینه‌سازی ۲۳۰۰ شبیه‌سازی در ۲۱ نسل انجام گرفت، البته در بهینه‌سازی چندهدفه با اوکتاپوس امکان انتخاب مؤلفه تکراری وجود دارد که یکی از مشکلات این افزونه است. برای مثال از ۲۳۰۰ شبیه‌سازی حدود ۸۰۰ شبیه‌سازی تکراری انجام شده، در نتیجه برای تحلیل داده‌ها حدود ۱۵۰۰ شبیه‌سازی باقی می‌ماند که با استفاده از افزونه دیگری به نام اوکتاپوس واضح‌گرا ۲۰ می‌توان این نقیصه را در مطالعات آتی رفع کرد. در ادامه به بررسی جواب‌هایی که در جبهه پارتو این بهینه‌سازی ظاهر شده‌اند، پرداخته می‌شود.

گزینه‌های جبهه پارتو در بهینه‌سازی چندهدفه

در مجموع ۵۱ گزینه در جبهه پارتو نهایی قرار گرفته است. مبنای تحلیل گزینه‌های برتر فراوانی گزینه‌ها در این جبهه است و باید توجه داشت که در این گزینه‌ها همزمان سه تابع هدف در بهینه‌ترین حالت قرار دارند و صرفاً کمترین مصرف انرژی را ارائه نمی‌دهند. شکل ۳ وضعیت خطی ۵۱ گزینه جبهه پارتو را نمایش می‌دهد. این نمودار خطی که می‌توان کل یا بخشی از گزینه‌های شبیه‌سازی شده را روی آن نشان داد به میزان زیادی می‌تواند به کمک طراح بیاید. بدین صورت که با اعمال محدودیت روی هر کدام از عوامل، راه‌حلی به طراح ارائه می‌شود که می‌تواند از بین آنها گزینه مورد نظر را انتخاب کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بالای جدول در ابتدا مؤلفه‌هایی که مورد بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند آورده شده و در انتها توابع هدف. توسعه کار با این نمودار در قالب یک الگوریتم در گرس‌هاپر یا نرم‌افزاری جداگانه می‌تواند جزء مطالعاتی آتی دسته‌بندی شود.



شکل ۳. وضعیت خطی ۵۱ گزینه جبهه پارتو

EUI= شدت مصرف انرژی، UDLI= میزان مفید نور روز، D.C= آسایش تطبیقی در سردترین هفته سال، D.H= آسایش تطبیقی در گرم‌ترین هفته سال، P.N= شماره پلان، He= ارتفاع اتاق، E.W= مصالح دیوار خارجی، I.W= مصالح دیوار داخلی، F= مصالح کف، W= جنس شیشه پنجره، W.F= نازک‌کاری دیوار، L.WWR= درصد پنجره به دیوار نشیمن، K.WWR= درصد پنجره به دیوار آشپزخانه، B.WWR= درصد پنجره به دیوار اتاق خواب، F.F= کف سازی، C.F= نازک‌کاری سقف، W.G= گچ سفید، C.B= صفحه سیمانی، Wo= طرح چوب، Co= خاکستری (بتن)، Br= طرح آجر، B.G= گرانیت مشکی، Sh= رنگ شامپاینی

شکل ۴ فراوانی مؤلفه‌های مختلف را در جبهه پارتو نشان می‌دهد. در تحلیل جبهه پارتو دو رویکرد وجود دارد، یک رویکرد صرفاً بهینه‌ترین گزینه برای گزینه‌های طراحی را به عنوان جواب معرفی می‌کند و رویکرد دیگر گزینه‌های پرتکرار را به عنوان جواب نهایی معرفی می‌نماید. به دلیل عدم قطعیت موجود در جواب‌هایی که توسط الگوریتم‌های تکاملی عرضه می‌شود، این پژوهش رویکرد دوم را در تحلیل و ارائه گزینه‌های برتر برگزیده است. بر همین اساس در جدول ۱۲ گزینه برتر که حاصل پرتکرارترین گزینه‌ها در جبهه پارتو بوده، ارائه شده است.

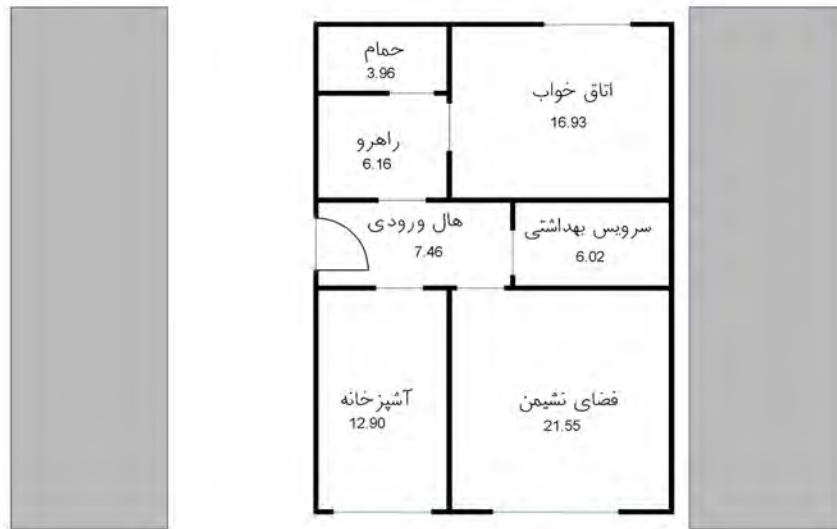
در جبهه پارتو هیچ پلانی حتی به صورت نسبی نیز بیشتر تکرار نشده است. پلان شکل ۵ با ۱۲ مرتبه، پلان شکل ۶ با ۱۲ مرتبه و پلان شکل ۷ با ۱۰ مرتبه تکرار، پرتکرارترین پلان‌ها در جبهه پارتو بودند. ذکر این نکته ضروری است که پلان و زون‌بندی فضایی از مواردی است که معمار سعی می‌کند بسته به تفکر خود و نیازهای پروژه آن را طراحی کند. بدین منظور الزاماً پرتکرارترین پلان به عنوان پلان برتر انتخاب نمی‌شود و معمار می‌تواند از میان چند گزینه مناسب طرح مورد نظر خود را انتخاب کند. شکل ۸ با نشان دادن فراوانی جهت‌گیری فضاها در جبهه پارتو، جنوبی بودن نشیمن و آشپزخانه و شمالی بودن آشپزخانه در کنار غیر نورگیر بودن همه جبهه‌ها یا بخشی از فضاها را مشخص می‌کند. از میان فضاها اصلی تنها آشپزخانه هم در شمال و هم در جنوب پلان، با تکرار بیشتر در جنوب قرار گرفته است. نکته قابل ذکر برای این فضا این است که متوسط درصد پنجره به دیوار آشپزخانه شمالی ۳۵ درصد و برای آشپزخانه جنوبی ۲۱ درصد است که نشان می‌دهد با جابه‌جایی فضا، به منظور تأمین اهداف، سایر مؤلفه‌های فضایی نیز باید تغییر نمایند.



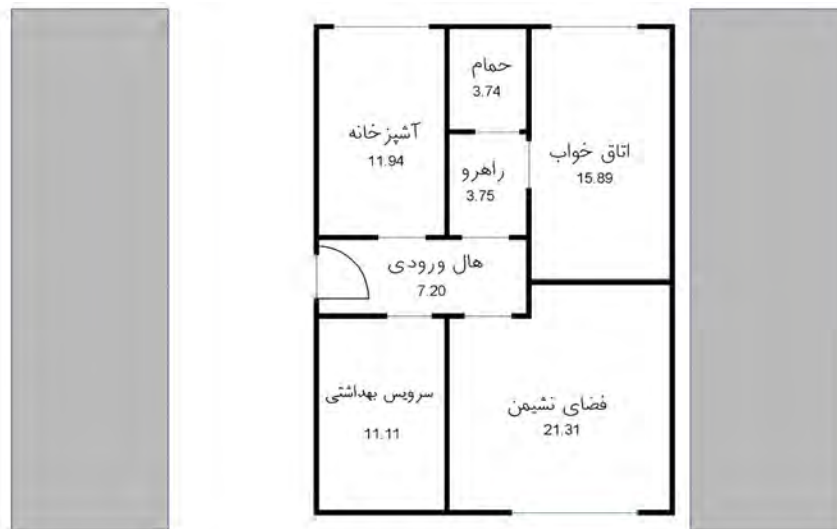
شکل ۴. نمودار فراوانی مؤلفه‌ها در جبهه پارتو (رجوع به توضیحات شکل ۳)

جدول ۱۲. گزینه‌های برتر جبهه پارتو

نام مؤلفه	ارتفاع طبقه (متر)	جنس دیوار خارجی	جنس دیوار داخلی	جنس کف	نازک‌کاری سقف	کف سازی	نازک‌کاری دیوار	نوع پنجره	درصد پنجره آشپزخانه (درصد)	درصد پنجره نشیمن (درصد)	دصد پنجره اتاق خواب (درصد)	اوپن به نشیمن؟
گزینه بهینه	۲/۶	هیلکس ۱۰ سانتی متر با ۱۰ سانتی متر عایق	گچبرگ ۱۰ سانتی متر	دال بتنی با ۱۰ سانتی متر عایق	گچ	طرح آجر	رنگ شامپانی	سه جداره با پوشش low-E	۱۵	۴۹-۴۰	۳۵	بله



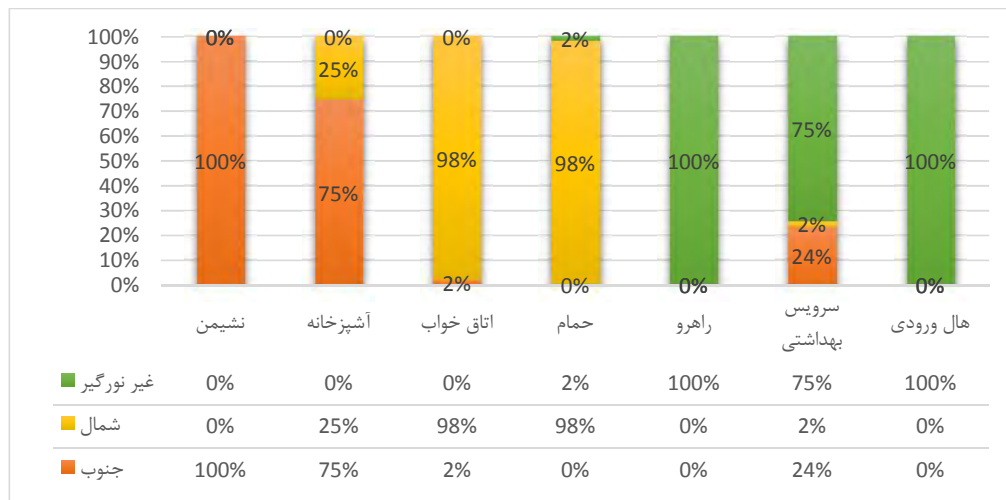
شکل ۵. پلان شماره یک جبهه پارتو



شکل ۶. پلان شماره دو جبهه پارتو



شکل ۷. پلان شماره سه جبهه پارتو



شکل ۸. نمودار فراوانی جهت گیری فضاها در جبهه پارتو

در دو بخش پیش رو با دو روش مختلف، تحلیل حساسیت برای توابع هدف انجام می‌شود.

تحلیل حساسیت

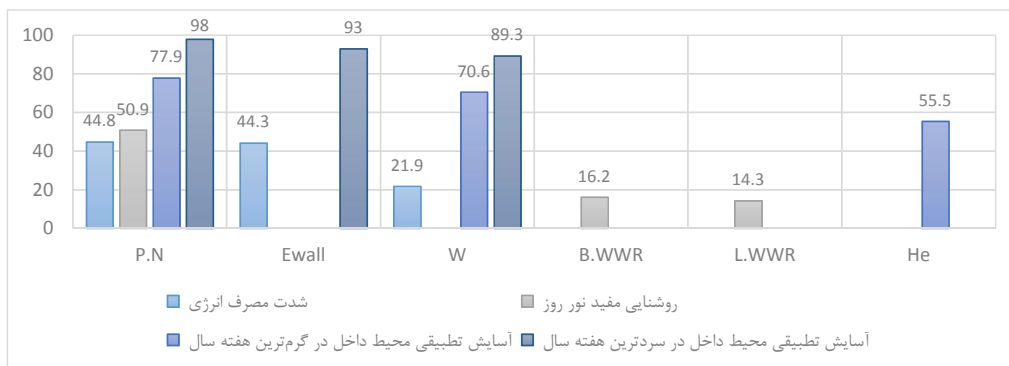
تحلیل حساسیت برای هر مؤلفه بر اساس رابطه ۱ (Samuelson et al. 2016) محاسبه می‌شود. تحلیل حساسیت یک روش برای اتخاذ تصمیم با ایجاد یک نظام اولویت‌بندی برای مؤلفه‌های طراحی است.

$$\bar{x}_{worst} = \text{متوسط مقدار تابع هدف کل حالات طراحی برای بدترین حالت مؤلفه موردنظر}$$

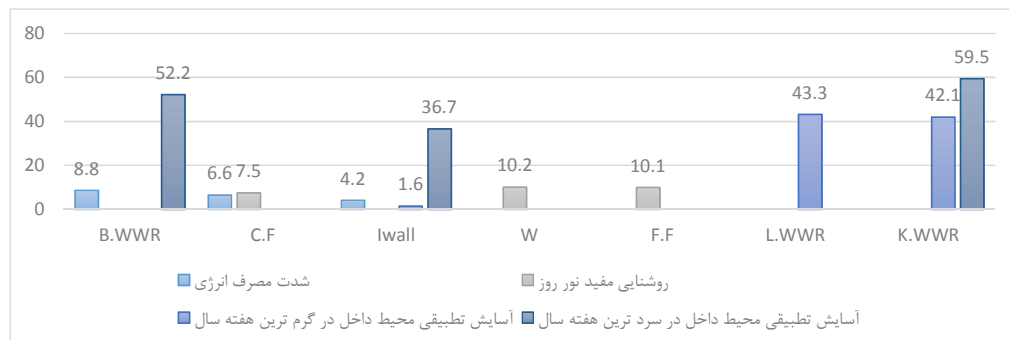
$$\bar{x}_{best} = \text{متوسط مقدار تابع هدف کل حالات طراحی برای بهترین حالت مؤلفه موردنظر}$$

نتایج تحلیل حساسیت برای توابع هدف به‌طور خلاصه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مؤثرترین مؤلفه‌ها در تابع هدف شدت مصرف انرژی، پلان‌بندی (با شاخص ۴۸/۸٪) و مصالح دیوار

خارجی (با شاخص ۳/۴۴)؛ در روشنایی مفید نور روز پلان‌بندی (با شاخص ۹/۵۰)، درصد پنجره به دیوار اتاق خواب (با شاخص ۲/۱۶) و نشیمن (با شاخص ۳/۱۴)؛ در آسایش تطبیقی محیط داخل در گرم‌ترین هفته سال پلان‌بندی (با شاخص ۹/۷۷)، جنس پنجره (با شاخص ۶/۷۰) و ارتفاع مفید (با شاخص ۵/۵۵) و در آسایش تطبیقی محیط داخل در سردترین هفته سال پلان‌بندی (با شاخص ۹۸/۹)، مصالح دیوار خارجی (با شاخص ۹۳/۹) و جنس پنجره (با شاخص ۳/۸۹) هستند. کم‌اثرترین مؤلفه برای شدت مصرف انرژی و آسایش تطبیقی محیط داخل در سردترین و گرم‌ترین هفته سال دیوار داخلی (به ترتیب با شاخص‌های ۲/۴، ۶/۱ و ۷/۳۶) و در روشنایی مفید نور روز سطح نهایی سقف (با شاخص ۵/۷) بوده است.



شکل ۹. نمودار نتایج تحلیل حساسیت برای سه تابع هدف مختلف که بیشترین اثر را دارند (به توضیحات شکل ۳ مراجعه شود)



شکل ۱۰. نمودار نتایج تحلیل حساسیت برای سه تابع هدف مختلف که کمترین اثر را دارند (به توضیحات شکل ۳ مراجعه شود)

نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های اصلی میان معماری و بهینه‌سازی کارایی انرژی ساختمان، پیچیدگی و عدم درک معمار از چگونگی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی در فرآیند طراحی معماری است. در این پژوهش سعی بر این بود که در جهت فهم بهتر فرآیند بهینه‌سازی کارایی ساختمان در ابتدای طراحی و نحوه استفاده از نتایج آن به معمار یاری رسانده شود و ارتباط وی با این حوزه طراحی بهبود یابد.

در مورد اعتبار بررسی حدود ۰/۰۸ درصد کل حالات ممکن و مزیت الگوریتم ژنتیک به سایر الگوریتم‌ها توجه به این مطلب مهم می‌نماید که در انتهای فرآیند بهینه‌سازی هیچ تضمینی وجود ندارد

که بهترین جواب ممکن به دست بیاید. الگوریتم‌های تکاملی سعی دارند در کمترین زمان بهترین جواب ممکن را ارائه دهند که این مهم با عدم قطعیتی که در تصمیم‌گیری‌های مراحل اولیه فرایند طراحی وجود دارد نیز تطابق دارد. در مورد نتایج هم باید به مجموعه گزینه‌های بهینه ظاهر شده در منحنی پارتو توجه و از این مجموعه جواب، نتایجی را استخراج کرد. باید توجه داشت که صرف اتکا به بهترین جوابی که الگوریتم ارائه می‌دهد و جاهت تعمیم‌پذیری ندارد. در این پژوهش نیز نتیجه‌گیری‌ها بر اساس تعداد تکرار گزینه‌های ظاهر شده در منحنی پارتو بوده است.

بنابراین می‌توان برای یک واحد مسکونی ۷۵ متری در شهر تهران گزینه‌های زیر را برای دستیابی به طراحی انرژی‌کارا ارائه نمود:

- در پلان‌بندی قرارگیری نشیمن و آشپزخانه در کنار هم در جبهه جنوبی، طراحی آشپزخانه به صورت اوپن و قرارگیری اتاق‌خواب در بخش شمالی واحد باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش استفاده از گرمای تولید شده توسط افراد و تجهیزات می‌شود که آسایش غیرفعال محیط داخل را در فصل سرد افزایش می‌دهد.
- قرارگیری سرویس بهداشتی و حمام در جبهه غیرنورگیر و در میانه پلان واحد مسکونی هم باعث می‌شود فضاهای اصلی از نور طبیعی بهره ببرند و هم به دلیل استفاده غیرمستمر، در مواقع عدم استفاده از این فضاها، اتلاف حرارت از طریق جدار به فضای خارج وجود نداشته باشد.
- عدم استفاده از ترکیب‌بندی دیوار خارجی با زمان تأخیر زیاد در این پژوهش بیش از ۹ ساعت.
- استفاده از عایق حرارتی ۱۰ سانتی‌متری برای دیوار خارجی، گزینه‌ای بهینه از نظر صرفه‌جویی انرژی و آسایش حرارتی برای واحد مسکونی.
- دیوار داخلی اثرگذاری بسیار کمی بر آسایش محیط داخل و شدت مصرف انرژی داشته و مصالح آن اهمیت چندانی ندارد.
- نیاز به مصالح با ظرفیت حرارتی زیاد برای کف و سقف باعث افزایش آسایش حرارتی افراد در فضاهای اصلی واحد مسکونی می‌شود.
- استفاده از دال بتنی به عنوان سازه کف و سقف به دلیل ظرفیت حرارتی بالای بتن.
- ترجیح استفاده از شیشه‌های سه جداره برای پنجره با استفاده از پوشش کم‌گسیل.
- نسبت مساحت پنجره به دیوار برای اتاق‌خواب (جبهه شمالی) ۳۵ درصد، آشپزخانه (جبهه جنوبی) ۱۵ درصد و بازه ۴۰ تا ۴۵ درصد برای نشیمن (جبهه جنوبی)، مقادیری است که به واسطه آن در اکثر توابع در حالات بهینه تکرار شده‌اند.
- توجه به گونه‌های بهینه پلان‌بندی، مصالح دیوار خارج و نوع پنجره می‌تواند، بیش از سایر مؤلفه‌های معماری، طراح را به طرحی پایدار و انرژی‌کارا نزدیک کند.

تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از دکتر انگنیو رودریگز^{۲۱} تشکر ویژه‌ای داشته باشند که به طور کامل در این پروژه با ما همکاری کردند و طبق مشخصات ارسالی برای ایشان، پلان‌های مسکونی را با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده توسط خودشان در اختیار نگارندگان قرار دادند.

1. Task 23
2. International Energy Agency (IEA)
3. Pareto
4. Dominate
5. Pareto frontier
6. sequential search (SS)
7. Ladybug
8. Honeybee
9. Octopus
10. Coimbra
11. Evolutionary Program for Space Allocation Problem
12. Java
13. Intersect
۱۴. ضخامت عایق با در نظر گرفتن عدم آسیب اقتصادی قابل توجه به مساحت مفید واحد مسکونی و توجه به این نکته که ضخامت عایق حرارتی بیش از مقدار معینی تأثیری در انتقال حرارت آن ندارد، انتخاب شد.
۱۵. ضخامت‌های در نظر گرفته شده برای بخش سازه‌ای کف، برای یک دهانه متعارف محاسبه شده است.
16. Window Natural Ventilation
17. Cross Ventilation
18. SPEA2
19. Galapagos
20. Octopus.e (explicit)
21. Eugénio Rodrigues

فهرست منابع

- حافظی، محمدرضا، زمردیان، زهرا سادات، و تحصیلدوست، محمد (۱۳۹۵). فرایند دستیابی به نمای دوپوسته دارای بهره‌وری مناسب انرژی، نمونه موردی یک ساختمان اداری در تهران. *مطالعات معماری ایران*، ۱۰، ۱۰۱-۱۲۲.
- ریاضی، جمشید (۱۳۸۹). ویژگی‌های کارکردی دیوارهای خارجی ساختمان‌های متعارف (قابلیت‌های عملکردی، رفتاری، ساختاری). تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- ریاضی، جمشید (۱۳۹۴). ویژگی‌های کارکردی دیوارهای داخلی ساختمان‌های متعارف (قابلیت‌های عملکردی، رفتاری، ساختاری). تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- ریاضی، جمشید، و ماجدی، محمد حسین (۱۳۸۸). ویژگی‌های کارکردی در و پنجره ساختمان‌های متعارف (قابلیت‌های عملکردی، رفتاری، ساختاری). تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- سخندان سرخابی، زهرا، و خان‌محمدی، محمد علی (۱۳۹۴). بهینه کردن کارکرد انرژی دیوارهای بدون بازشو در جبهه‌های آفتابگیر. *هویت شهر*، ۹(۲۳)، ۷۳-۸۹.
- فیاض، ریما (۱۳۹۲). سطح بهینه پنجره ساختمان‌های مسکونی در اردبیل و تهران. *نامه معماری و شهرسازی*، ۵(۱۰)، ۱۰۵-۱۱۹.
- قاسم‌زاده، مسعود (۱۳۹۱). *معیارهای ابعادی و ملاحظات طراحی فضاها برای واحد مسکونی شهری*. تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۹). *مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان*. تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- مهدوی‌نژاد، محمدجواد، طاهباز، منصوره، و دولت‌آبادی، مهناز (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تناسبات و نحوه استفاده از رف نور

- در معماری کلاس‌های آموزشی. هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۲۱(۲)، ۸۱-۹۲.
- یوسفی، ملیکا، مداحی، سیدمهدی، و سهیلی‌فرد، مهدی (۱۳۹۶). بهینه‌سازی جداره خارجی ساختمان در راستای افزایش آسایش حرارتی ساکنان با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک. اولین همایش بین‌المللی عمران، معماری و شهر سبز پایدار.
- Ahmed, S., Weber, M., Liwicki, M., Langenhan, C., Dengel, A., & Petzold, F. (2014). Automatic analysis and sketch-based retrieval of architectural floor plans. *Pattern Recognition Letters*, 35, 91-100.
- Ascione, F., Bianco, N., Stasio, C. D., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). Artificial neural networks to predict energy performance and retrofit scenarios for any member of a building category: A novel approach. *Energy*, 118, 999-1017.
- Attia, S., Gratia, E., Herde, A. D., & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2-15.
- ASHRAE, FUNIP (2013). *ASHRAE handbook: fundamentals (IP Edition)*. USA: Ashrae.
- Azari, R., Garshasbi, S., Amini, P., Rashed-Ali, H., & Mohammadi, Y. (2016). Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. *Energy and Buildings*, 126, 524-34.
- Baglivo, C., Maria Congedo, P., & Fazio, A. (2014). Multi-criteria optimization analysis of external walls according to ITACA protocol for zero energy buildings in the mediterranean climate. *Building and environment*, 82, 467-80.
- Bichiou, Y., & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 43, 3373-82.
- Bournas, I., & Haav, L. (2016). *Multi-objective Optimization of Fenestration Design in Residential spaces*. Malmö: The Case of MKB Greenhouse, Sweden.
- Caruso, G., & Kämpf, J. H. (2015). Building shape optimisation to reduce air-conditioning needs using constrained evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 118, 186-196.
- Chen, X., Hongxing, Y., & Weilong, Z. (2017). Simulation-based approach to optimize passively designed buildings: A case study on a typical architectural form in hot and humid climates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1712-1725.
- Dogan, T., Saratsis, E., & Reinhart, C. (2015). The optimization potential of floor-plan typologies in early design energy modeling. *14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015.
- Ercan, B., & Elias-Ozkan, S. T. (2015). Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. *Design Studies*, 38, 33-53.
- Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230-45.
- Fan, Y., & Xiaohua, X. (2017). A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance. *Applied Energy*, 189, 327-335.
- Fang, Y. (2017). *Optimization of Daylighting and Energy Performance Using Parametric Design, Simulation Modeling, and Genetic Algorithms*. North Carolina State University.
- Futrell, B. J., Ozelkan, E. C., & Brentrup, D. (2015). Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. *Building and environment*, 92, 591-602.

- Gossard, D., Lartigue, B., & Thellier, F. (2013). Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. *Energy and Buildings*, 67, 253–260.
- Granadeiro, V., Duarte, J. P., Correia, J. R., & Lea, V. M. S. (2013). Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation. *Automation in construction*, 32, 196–209.
- Hendron, R., & Engebrecht, C. (2010). Building America house simulation protocols, *National Renewable Energy Laboratory Golden (EERE)*. Washington, DC: Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Hester, J., Gregory, J., & Kirchain, R. (2017). Sequential early-design guidance for residential single-family buildings using a probabilistic metamodel of energy consumption. *Energy and Buildings*, 134, 202–11.
- Hygh, J. S., DeCarolis, J. F., Hill, D. B., & Ranjithan, S. R. (2012). Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. *Building and environment*, 57, 165–75.
- Konis, K., Gamas, A., & Kensek, K. (2016). Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. *Solar Energy*, 125, 161–79.
- Liu, S., Meng, X., & Tam, C. (2015). Building information modeling based building design optimization for sustainability. *Energy and Buildings*, 105, 139–53.
- Löhnert, G., Dalkowski, A., & Sutter, W. (2003). *Integrated Design Process: a guideline for sustainable and solar-optimised building design*. Berlin: IEA International Energy Agency.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 101–12.
- Merrell, P., Schkufza, E., & Koltun, V. (2010). Computer-generated residential building layouts. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(6), 181.
- Merriam-Webster (2017). *Merriam-Webster online dictionary*.
- Miles, J. C., Sisk, G. M., & Moore, C. J. (2001). The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. *Computers & Structures*, 79, 1583–92.
- Negendahl, K., & Nielsen, T. R. (2015). Building energy optimization in the early design stages: A simplified method. *Energy and Buildings*, 105, 88–99.
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014). Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure. *Applied Energy*, 132, 200–215.
- 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., & Mumovic, D. (2016). Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. *Energy*, 97, 58–68.
- Tuhus-Dubrow, D., & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and environment*, 45, 1574–81.
- Wang, W., Rivard, H., and Zmeureanu, R. (2005). An object-oriented framework for simulation-

- based green building design optimization with genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 19, 5–23.
- Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 363–378.
 - Wright, Jonathan A (1986). *The optimised design of HVAC systems*. Doctoral dissertation, Loughborough University, JA Wright.
 - Youssef, A., Ali, M. Z., Zhiqiang, J., & Reffat, R. M. (2016). Genetic algorithm based optimization for photovoltaics integrated building envelope. *Energy and Buildings*, 127, 627–36.
 - Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK-report*, 103.
 - Zomorodian, Z. S., & Tahsildoost, M. (2017). Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. *Energy and Buildings*, 134, 80–93.
 - http://saba.org.ir/saba_content/media/image/2012/07/4118_orig.pdf
 - http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_picker/index.shtml.