



تاثیر میزان جدار نورگذر بر فرم و جهت بهینه ساختمان انرژی کارا، مطالعه موردی: بناهای مسکونی کوتاه مرتبه حاشیه شهر اهواز

زینب مشهور^{1*}

1- مربی، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷، zmashhoor@tvu.ac.ir

چکیده

مصرف انرژی ساختمان مقوله‌ای چند وجهی است و تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد. پوسته خارجی ساختمان به عنوان رابطی میان فضای داخل و خارج نقش مهمی در ایجاد آسایش حرارتی و محافظت ساکنین از شرایط نامطلوب محیطی ایفا می‌کند. میزان اتلاف حرارتی از طریق پوسته خارجی با مصرف انرژی رابطه مستقیم دارد و هم‌چنین میزان دریافت انرژی تابشی خورشید، مصرف انرژی را تحت تاثیر قرار خواهد داد. لذا طراحی صحیح پوسته خارجی و ایجاد تعادل در دریافت و اتلاف انرژی بر اساس شرایط اقلیمی به عنوان راهکاری غیرفعال نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ساختمان دارد. پژوهش حاضر تلاش دارد به دنبال یافتن حد تعادل میان اتلاف حرارتی و دریافت انرژی خورشیدی و با هدف بهینه‌یابی شکلی ساختمان، تاثیر میزان بازشو بر فرم و جهت بهینه ساختمان‌های کوتاه مرتبه شهر اهواز را بررسی نماید. این پژوهش به روش کمی و مقایسه‌ای و با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی و بر پایه بهینه‌یابی انجام شده‌است. مدل پایه ساختمانی به ابعاد 10 در 10 مترمربع است. نسبت بازشو به سطح دیوار (wwr) به عنوان متغیر مستقل اولیه و طول ضلع جنوبی و زاویه چرخش به عنوان متغیرهای مستقل ثانویه و مصرف انرژی تابع هدف پژوهش است. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که برای $wwr < 30\%$ کشیدگی ساختمان در جهت شرقی-غربی نتیجه مطلوب‌تری دارد. در حالات $wwr \geq 30\%$ با افزایش دریافت تابش خورشیدی کشیدگی شمالی-جنوبی نتیجه بهتری خواهد داشت. تناسبات بهینه وابسته به میزان بازشو متفاوت است اما زاویه چرخش بهینه در همه حالات 0 درجه است.

کلیدواژگان: مصرف انرژی، شکل ساختمان، پوسته خارجی، بهینه سازی

Effect of the amount of translucent layer on optimal geometry and direction of energy-efficient buildings: A case study of low-rise residential buildings in suburban Ahvaz, Iran

Zeinab Mashhoor^{1*}

1- Instructor, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* P.O.B. 1435763811 Tehran, Iran, zmashhoor@tvu.ac.ir

Received: 13 November 2024 Accepted: 02 July 2025

Abstract

Building energy consumption is a multi-faceted issue affected by various factors. The building envelope of the building as an interface between the inside and outside is important in creating thermal comfort and protecting residents from adverse environmental conditions. The amount of heat loss through the building envelope is directly related to energy consumption, which is, in turn, affected by solar radiation received. Therefore, proper design of envelope and balance in receiving and losing energy based on climatic conditions as a passive solution can considerably reduce energy consumption. This study seeks to find balance between heat loss and solar energy intake in buildings and investigates the effect of window area on optimal form and direction of low-rise buildings in Ahvaz. The research design is quantitative and comparative using optimization and energy simulation software. The basic model is a building with dimensions of 10 x 10 and an area of 100 m². The window-to-wall ratio (wwr) is the primary independent variable, the length of the southern side and the rotation angle are the secondary independent variables, and energy consumption is objective function. The results indicate that for $wwr < 30\%$, building stretching in the east-west direction is desired. For $wwr \geq 30\%$,

north-south elongation is more favorable as solar radiation reception increases. The optimal proportions vary depending on the window size, but optimal rotation angle is always 0 degrees.

Keywords: energy consumption, building shape, building envelope, optimization

1- مقدمه

ایران با پهنه‌های اقلیمی بسیار متنوع و شرایط آب و هوایی متفاوتی از شمال تا جنوب روبروست. معماری غنی ایران در طول زمان با برقراری ارتباط مناسب میان بوم و زمینه و پاسخ‌های معماری همسو با طبیعت، شرایط مناسب زیست در هر منطقه را فراهم نموده است. با رشد تکنولوژی، معماری خود را از بستر بوم جدا نموده و با وابستگی بیش از حد به تجهیزات مکانیکی، به دنبال پاسخگویی به نیازهای کاربران بوده است. جدایی معماری از زیست بوم و تکیه بیش از حد بر تکنولوژی، افزایش مصرف انرژی را در پی داشته است. در سال‌های اخیر رشد مصرف انرژی در جهان، سالانه 1-2 درصد و در ایران، 5-8 درصد بوده است. به بیان دیگر، رشد مصرف انرژی در ایران 5 برابر متوسط رشد مصرف در جهان است [1]. بخش اعظم انرژی مصرفی در کشور ما از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود و ماحصل آن افزایش آلودگی‌های زیست محیطی است. علاوه بر این در سال‌های اخیر پیشی گرفتن مصرف از تولید، ناترازی در تامین انرژی مورد نیاز ساختمان و صنایع را نیز به همراه داشته است که نتیجه آن قطع مکرر حامل‌های انرژی و عدم تامین نیاز کاربران است. لذا بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها می‌تواند بخشی از مشکل ناترازی انرژی را مرتفع نماید.

عوامل ریشه‌ای عملکرد انرژی ساختمان را می‌توان به سه دسته اصلی عوامل طراحی، عوامل ناشی از مرحله ساخت و عوامل ناشی از مرحله بهره‌برداری دسته‌بندی کرد [2]. عملکرد انرژی ساختمان به میزان قابل توجهی تحت تاثیر مراحل اولیه طراحی و شکل‌گیری ساختمان قرار دارد و تصمیمات اتخاذ شده در مرحله کانسبت نسبت به مراحل بعدی طراحی تاثیر قابل توجه‌تری دارد [3]. مرحله اولیه طراحی جایی است که بیشتر تصمیمات طراحی ساختمان گرفته می‌شود و بیش‌ترین پتانسیل برای دستیابی به طرح‌های ساختمانی با کارایی بالا وجود دارد. بنابراین، بررسی گسترده امکانات طراحی و ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد ساختمان در مراحل اولیه طراحی اهمیت قابل توجهی دارد. یکی از مهم‌ترین تصمیمات طراحی که در مراحل اولیه طراحی گرفته می‌شود، شکل یا هندسه ساختمان است [4].

پوسته ساختمان اولین عنصر پیوند دهنده انسان با شکل ساختمان است. پوسته متشکل از اجزای مختلفی است که تا حد قابل توجهی عملکرد انرژی ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد [5]. در مرحله طراحی، شناخت رفتار حرارتی پوسته ساختمان و تصمیم‌گیری منطبق با آن می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را حاصل نماید. پوسته ساختمان به عنوان واسطه اصلی بین فضای داخل و خارج، نقش قابل توجهی در تعدیل شرایط آب و هوایی و تامین آسایش ساکنین و در نتیجه کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی دارد [6-7]. پوسته خارجی از جدار نورگذر، جدار غیر نورگذر تشکیل می‌شود و بر اساس میزان هدایت حرارتی و دریافت تابشی، بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا با توجه به مشخصات پوسته، متغیرهای مختلفی در تعیین بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان تاثیرگذار هستند.

در دهه‌های مختلف شبیه‌سازهای رایانه‌ای کمک شایانی به پژوهشگران در حوزه مهندسی و طراحی داشته‌اند تا طراحان و پژوهشگران بتوانند رفتار ساختمان را تا حد قابل توجهی تجزیه و تحلیل کنند [8]. با بهره‌گیری از فرآیند بهینه‌سازی در این نرم‌افزارها می‌توان به حداقل یا حداکثر مقدار یک تابع با انتخاب بهینه مقدار متغیرها دست یافت [4]. هدف از پژوهش حاضر یافتن رابطه میزان بازشوهای جبهه جنوبی و شمالی با تناسب هندسی و زاویه چرخش بهینه ساختمان در جهت کمینه کردن مصرف انرژی ساختمان‌های کوتاه مرتبه (یک طبقه) در اقلیم بسیار گرم شهر اهواز با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی است. بدین منظور نسبت بازشو به سطح دیوار (wwr)¹ به عنوان متغیر مستقل اولیه و نسبت طول به عرض ساختمان و زاویه چرخش به عنوان متغیرهای مستقل ثانویه و مصرف انرژی به عنوان تابع هدف پژوهش تعریف شده است. مدل پایه ساختمانی به ابعاد 10 در 10 و مساحت 100 مترمربع است. این مدل در 10 حالت با % 0, 10, 20, ... 90 wwr (در جهت شمال و جنوب) تکثیر شده است و در نهایت متغیرهای پژوهش روی 10 مدل پایه مورد ارزیابی قرار گرفته و فرآیند بهینه‌سازی انجام شده است.

1-1- مروری بر پیشینه پژوهش

با اهمیت یافتن بحث انرژی از سال 1970 میلادی، پژوهش‌های زیادی در زمینه راهکارهای کاهش مصرف انرژی صورت گرفته است. شکل ساختمان یکی از راهکارهای پسیو در کاهش مصرف انرژی است که همواره مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است. پوسته خارجی به عنوان اولین مواجهه کاربر با شکل ساختمان در انتقال حرارت نقش به‌سزایی دارد [5]. مطالعات اولیه در خصوص تاثیر پوسته ساختمان نشان می‌دهد علاوه بر جنس و مشخصات حرارتی پنجره و دیوار، پیکربندی‌های هندسی ساختمان (نظیر نسبت طول به عرض ساختمان، نسبت سطح پنجره به کف، نسبت سطح پنجره به دیوار و ...) می‌تواند بر بار حرارتی ساختمان تأثیر بگذارد. علاوه بر این جهت ساختمان نیز با تعیین میزان قرارگیری در معرض تابش خورشیدی نقش بسزایی در مصرف انرژی ساختمان دارد [9].

تحقیقات انجام شده در زمینه تاثیر پوسته خارجی بر کاهش مصرف انرژی را می‌توان در سه دسته قرار داد. برخی از این تحقیقات با تمرکز بر جزئیات اجرایی ساختمان (نظیر جنس جدار، نوع عایق حرارتی، جنس پنجره، ابعاد بازشو و ...) به بررسی تاثیر آنها بر کاهش مصرف انرژی پرداخته‌اند [6، 10-14]. برخی دیگر کلیات فرم نظیر شکل هندسی، نسبت طول به عرض ساختمان، نسبت سطح پنجره به کف و دیوار، زاویه چرخش ساختمان، نحوه کاربرد سایه اندازها و ... را دست‌مایه پژوهش قرار داده‌اند [8، 15، 16]. دسته‌های دیگر از پژوهش‌ها نیز به بررسی ترکیبی از عوامل کلی پوسته خارجی و جزئیات

¹. Window to wall ratio (wwr).

رابطه بین سرعت و دقت را مهم‌ترین مسئله در زمینه فراگیر شدن روش‌های بهینه‌سازی می‌داند [5].

فنگ فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه را در ابتدای طراحی پیشنهاد می‌کند و به بررسی متغیرهای مختلف (نظیر عمق ساختمان، محل راس بام شیب‌دار، طول، عرض، موقعیت و جهت نورگیرهای سقفی، عرض پنجره‌ها در شمال و جنوب و طول لوور) در سه اقلیم سرد، گرم و مختلط می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد طول و عرض نورگیر مهم‌ترین متغیر برای همه مکان‌هاست و سایر متغیرها در اقلیم‌های مختلف نتایج متفاوتی دارند [4].

پرمرو و لسکووار به بررسی تاثیر نسبت مساحت پنجره به دیوار در جبهه جنوبی بر مصرف انرژی در ساختمان‌های پیش ساخته چوبی پرداخته‌اند. این پژوهش برای ساختمان‌های سبک وزن انجام شده و تاثیر ظرفیت حرارتی مصالح ساختمانی مختلف نظیر آجر و بتن و ... در نظر گرفته نشده است [9]. بررسی‌ها نشان می‌دهد مصرف انرژی ساختمان مقوله‌ای چند وجهی است و به شدت متأثر از شرایط اقلیمی و ویژگی‌های هندسی ساختمان است. علاوه بر این عملکرد انرژی ساختمان‌های بلند مرتبه، میان مرتبه و کوتاه مرتبه در شرایط مشابه اقلیمی و کالبدی، می‌تواند متفاوت باشد. لذا تحلیل عملکرد اقلیمی ساختمان‌ها نیازمند پژوهش‌های دسته‌بندی شده و مجزاست. در این پژوهش با تاکید بر جنبه‌های پسیو، پوسته خارجی ساختمان‌های کوتاه مرتبه (یک طبقه) در اقلیم بسیار گرم شهر اهواز، فارغ از جزئیات جداره‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی زاویه چرخش و نسبت‌های مطلوب هندسه ساختمان برای میزان بازشوی متفاوت استخراج شده است. این مقاله به دنبال پاسخ دادن به پرسش‌های زیر است:

- در یک ساختمان با مساحت مشخص، با افزایش مساحت سطح نور گذر (با فرض وجود بازشو در جبهه جنوب و شمال)، تناسب طول و عرض برای رسیدن به کمینه مصرف انرژی چه تغییراتی خواهد داشت؟
- زاویه چرخش بهینه ساختمان در مقدارهای مختلف سطح نورگذر چه مقدار خواهد بود؟

2- روش تحقیق

این پژوهش به روش کمی و مقایسه‌ای، مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی و با بهره‌گیری از فرآیند بهینه‌سازی یک تابعی در محیط راینو- گرسه‌پار و با استفاده از رابط کاربری هانی‌بی و لیدی باگ لگاسی و موتور انرژی پلاس انجام شده و در انتها از نرم افزار اکسل برای پردازش نهایی و تحلیل دقیق تر خروجی‌ها استفاده شده است. پلاگین گرسه‌پار به عنوان افزونه نرم افزار راینو به منظور تولید فرم پارامتریک و سه بعدی استفاده می‌شود و هم‌چنین بستری است برای استفاده از پلاگین هانی‌بی. هانی‌بی یک رابط کاربری برای موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس، اپن استودیو و ریدینس است و جهت انجام محاسبات شبیه‌سازی انرژی و نور روز استفاده می‌شود. شکل 1 دیاگرام روند پژوهش را نشان می‌دهد. مدل پایه ساختمانی مسکونی (یک طبقه و از چهار جهت باز و فاقد همسایگی) به ابعاد 10 در 10 و ارتفاع 3.5 متر است. این مدل به صورت پارامتریک در گرسه‌پار شبیه‌سازی شده و سپس متغیرهای پژوهش روی آن اعمال شده است.

اجرای پرداخته‌اند [17-21]. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر جنس جدار ثابت در نظر گرفته شده و فقط تاثیر کلیات فرم (نسبت بازشو به دیوار، نسبت طول و عرض ساختمان و زاویه چرخش) بر مصرف انرژی موضوع پژوهش است لذا در ادامه تحقیقات ترکیبی و تحقیقاتی که به حوزه کلیات پرداخته است معرفی می‌گردد.

در کتاب اقلیم و معماری عوامل متعدد موثر بر مصرف انرژی ساختمان معرفی و نحوه تاثیر آن‌ها بیان شده است. یکی از عوامل مطرح شده در این منبع تاثیر فرم (میزان فشردگی و کشیدگی ساختمان) بر مصرف انرژی است. در این زمینه به مطالعه نسبت طول به عرض ساختمان در اقلیم‌های مختلف پرداخته و نسبت‌های مطلوب در اقلیم‌های چهارگانه را پیشنهاد داده است (نسبت‌های 1:1.1 برای اقلیم سرد، 1:1.6 برای اقلیم معتدل، 1:1.3 برای اقلیم گرم و خشک، 1:1.7 برای اقلیم گرم و مرطوب). علاوه بر این زوایای چرخش مطلوب در این اقلیم‌ها نیز معرفی شده است [17]. یکی از ضعف‌های این شیوه در نظر نگرفتن تاثیر هم‌زمان سایر عوامل به ویژه میزان سطوح بازشو در مصرف انرژی است.

پاچکو و همکاران با مروری بر معیارهای طراحی ساختمان انرژی کارا، بیان می‌کنند: جهت‌گیری ساختمان، شکل و نسبت بین سطح خارجی و حجم ساختمان بیشترین تاثیر را در میزان مصرف انرژی نهایی ساختمان دارند [22]. کسمایی و ورمقانی در پژوهشی هفت شاخص اصلی مؤثر بر کاهش مصرف انرژی شامل فرم ساختمان، فرم و نسبت سطح بازشو، زاویه چرخش، عمق سایبان، نوع و ضخامت عایق حرارتی و جنس شیشه جدار خارجی را در حالت‌های مختلف برای ساختمان‌های بلند مرتبه منطقه 22 تهران مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تاثیر نسبت سطوح بازشو، جنس شیشه و عمق سایبان در کاهش مصرف انرژی بیشتر از فرم و زاویه چرخش است [20]. غیابی و حسین پور حجار نیز رابطه مصرف انرژی و نسبت بازشو را در ساختمان‌های بلند مرتبه اداری شهر تهران بررسی نموده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد رابطه مستقیمی بین نسبت بازشو و مصرف انرژی سالانه مدل پژوهش وجود دارد به طوری که با کاهش 20 درصدی نسبت بازشو، مصرف انرژی سالانه در مدل پایه پژوهش 17 درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این میزان تاثیرگذاری نسبت بازشو در جهات مختلف ساختمان متفاوت است [23].

سلیمی گرگری و همکاران با تاکید بر تاثیر پارامترهای پوسته بنا بر عملکرد انرژی و آسایش حرارتی ساختمان، پارامترهای تاثیرگذار در پوسته ساختمان بر رفتار حرارتی داخلی بنا را استخراج و دسته‌بندی نموده و به گونه‌شناسی ساختمان‌های مسکونی منطقه 15 تهران پرداخته‌اند [16].

نجفی و همکاران به بررسی هندسه ساختمان در کنار ابعاد بازشوها برای ساختمان اداری در اقلیم گرم و خشک (قم) پرداخته‌اند و به نسبت بهینه 1:1.11 رسیده‌اند [8]. خیری با مروری بر روش‌های بهینه‌سازی، به نقش و اهمیت پیکره هندسی و پوسته ساختمان در مصرف انرژی پرداخته است و با توجه به تقاضای بالای بهره‌وری انرژی ساختمان به اهمیت استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انرژی برای رسیدن به پاسخ‌های مناسب می‌پردازد و

تعریف شده است. جزئیات متغیرهای پژوهش در بخش‌های بعدی به تفصیل بیان شده است.

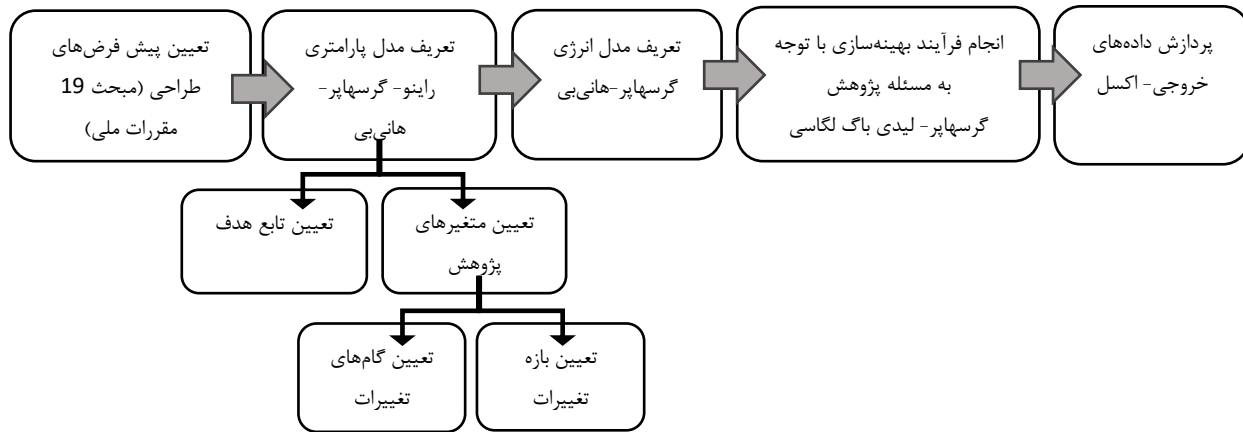
2-1- متغیرهای پژوهش

از بنیادی‌ترین موارد کنترل غیرفعال در ساختمان، توجه به پوسته و انتقال حرارت از آن است [7]. پوسته ساختمان به عنوان واسطه اصلی بین فضای داخل و خارج، نقش قابل توجهی در تعدیل شرایط آب و هوایی و تامین آسایش ساکنین و در نتیجه کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی دارد [6-7]. شکل ساختمان تعیین کننده میزان سطوح در تماس با هوای خارج بوده و میزان سطوح در جهات مختلف جغرافیایی تاثیر به سزایی در مصرف انرژی ساختمان دارد که از آن تحت عنوان فشردگی ساختمان یاد می‌شود [17]. انتقال حرارت از سطوح به سه روش همرفت، تابش و هدایت اتفاق می‌افتد. بخش زیادی از انتقال حرارت از طریق جداره‌های خارجی ساختمان به روش هدایت اتفاق می‌افتد و تابع جنس جداره و اختلاف دمای محیط داخل و خارج است [24]. حرارت منتقل شده به سمت سردتر جداره از طریق تشعشع به محیط اطراف منتقل می‌شود. تابش خورشیدی¹ نیز عامل دیگری است که با گذر از جداره‌های شفاف سبب گرم شدن محیط داخلی می‌گردد. این عامل با توجه به فصول سال و اقلیم مورد نظر گاهی مطلوب و گاهی نامطلوب است [7]. میزان دریافت تابش خورشیدی بازشوها، تابع جنس و مساحت بازشو و میزان در معرض بودن تابش خورشیدی است.

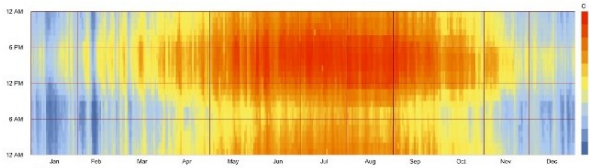
جداره‌های خارجی ساختمان ترکیبی از دو نوع نورگذر و غیرنورگذر است. با توجه به هدایت حرارتی جداره‌ها، میزان تابش عبوری از پنجره‌ها، عناصر سایه‌انداز، عبور نور مرئی و ... مصرف انرژی سرمایشی، گرمایشی و روشنایی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [5]. در جداره‌های غیرنورگذر هدایت و در جداره‌های نورگذر هدایت و تابش خورشیدی بیشترین عامل در انتقال حرارت هستند. برای کاهش انتقال حرارت از این جداره‌ها، با فرض ثابت بودن جنس جداره با استفاده از راهکارهای معمارانه می‌توان سطوح در تماس با خارج ساختمان و همچنین دمای سطح بیرونی جدار را کاهش داد. در شکل 2 عوامل موثر بر انتقال حرارت از جداره‌های نورگذر و غیرنورگذر معرفی شده و بر این اساس پارامترهای پژوهش تدوین شده است. در پژوهش جنس جدار و اقلیم ثابت در نظر گرفته شده است. جنس جدار با توجه به ضوابط اجباری تعیین شده در مبحث 19 مقررات ملی تعریف شده است.

با توجه به این که افزایش سطوح خارجی می‌تواند سبب افزایش انتقال حرارت گردد، لذا جهت یافتن شرایط بهینه هندسه ساختمان، تناسب طول و عرض ساختمان به عنوان متغیر مرتبط با جداره‌های غیرنورگذر و wwr به عنوان متغیر جداره‌های نورگذر تعریف شده است. عامل دیگری که مصرف انرژی ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد، میزان قرارگیری در معرض تابش خورشیدی است. دریافت تابش خورشیدی در برخی فصول مطلوب و در برخی فصول نامطلوب است. لذا با هدف ایجاد تعادل در میزان جذب تابش خورشیدی میان فصول گرم و سرد، متغیر جهت ساختمان (زاویه چرخش نسبت به شمال)

¹ تابش طول موج کوتاه با عبور از شیشه و جذب شدن در جرم حرارتی (کف، دیوار و ...) داخل ساختمان، سبب گرم شدن این اجزا و تابش گرما به محیط داخل می‌گردد.



شکل 1 دیاگرام روند پژوهش

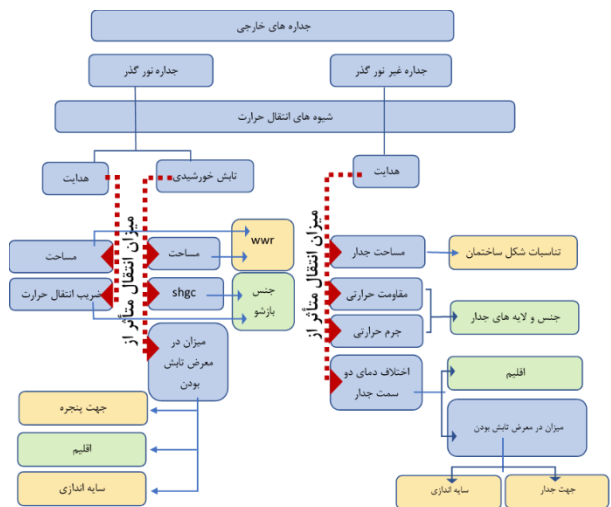


شکل 4 وضعیت دما سالانه، شهر اهواز

3-2- معرفی مشخصات مدل پایه

مدل پایه ساختمانی مسکونی (یک طبقه و از چهار جهت باز و فاقد همسایگی) به ابعاد 10 در 10 و ارتفاع 3.5 متر به صورت پارمتریک در گرسهپار شبیه‌سازی شده است (شکل 5). پس از تعریف مدل پارمتریک متغیرهای پژوهش روی مدل پایه اعمال شده است. با توجه به اینکه مساحت مدل پایه 100 متر مربع است، بازه مساحت‌های قابل قبول در مدل‌های ثانویه 99.95 الی 100.05 مترمربع تعیین شده است. متغیرهای پژوهش شامل دو گروه متغیر مستقل اولیه و متغیر مستقل ثانویه به شرح زیر است:

متغیر مستقل اولیه: متغیر اول درصد مساحت پنجره به دیوار (wwt) در دو ضلع جنوبی و شمالی است (اضلاع غربی و شرقی فاقد پنجره در نظر گرفته شده است). این متغیر در 10 حالت (از 0 تا 90 درصد) و با گام تغییرات 10 درصدی تعریف شده است. با توجه به مسئله پژوهش (تاثیر میزان باز شو در فرم بهینه) هر 10 حالت به صورت مجزا بررسی شده و متغیرهای ثانویه روی هر حالت اعمال و محاسبات انجام شده است. خروجی هر 10 حالت در نرم افزار اکسل بررسی شده و در نهایت با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

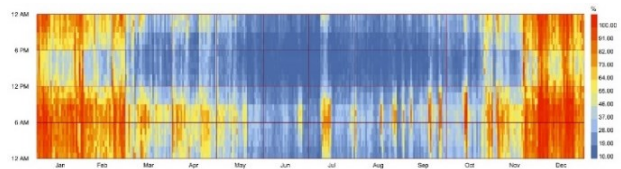


شکل 2 عوامل موثر بر انتقال حرارت از جداره‌های نورگذر و غیر نورگذر

3-3- گامهای شبیه سازی

3-3-1- معرفی اقلیم پروژه

اهواز در عرض و طول جغرافیایی 31 و 48 درجه واقع بوده و ارتفاع آن از سطح دریا 12.19 متر است. شکل‌های 3 و 4 وضعیت دما و رطوبت اهواز در طول سال را نشان می‌دهند. این شهر از نظر اقلیمی بسیار گرم بوده و رطوبت متوسطی دارد. درجه انرژی سالانه آن زیاد و از نوع نیاز غالب سرمایشی است [25].

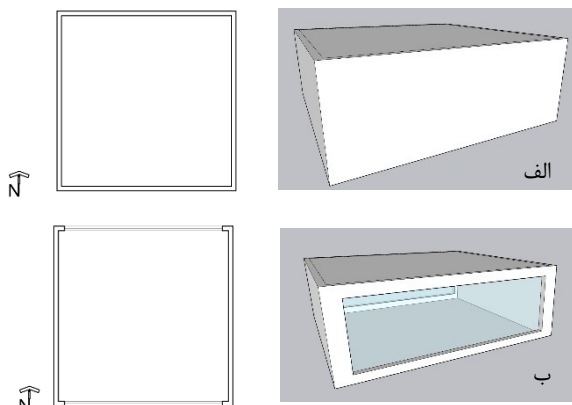


شکل 3 وضعیت رطوبت سالانه، شهر اهواز

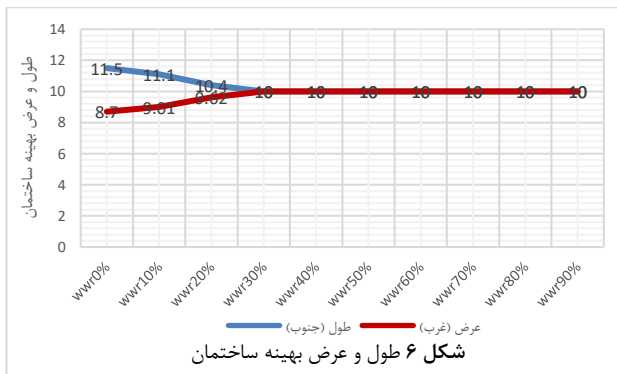
جدول 1 متغیرهای پژوهش

تعداد حالات	گام های تغییرات	بازه تغییرات	متغیرها
10	10 درصد	0 الی 90 درصد	نسبت پنجره به دیوار جنبه شمالی و جنوبی
51	0.1 متر	2- الی 3+ متر	تغییر طول ساختمان (جنبه جنوبی)
13	5 درجه	30 درجه شرقی الی 30 درجه غربی	زاویه چرخش
6630			تعداد حالات ممکن

گرفت و با محدودتر کردن آن، تناسبات 1.3:1 به عنوان بازه مطلوب متغیر طول ضلع جنوب در نظر گرفته شد. سپس محدوده تعریف شده مجدداً مورد صحت سنجی قرار گرفت. با توجه به نتایج استخراج شده در شکل 6 زمانی که $wwr \geq 30\%$ است، کمترین مصرف انرژی در فرم پایه اتفاق افتاده و در نتیجه محدوده متغیرهای تعریف شده برای این حالات مناسب نیست. لذا کاهش طول ضلع جنوبی نسبت به مدل پایه نیز به متغیرهای پژوهش اضافه شده است. زاویه پرخش در بازه 30 درجه غربی الی 30 درجه شرقی تعیین شد. جدول 1 بازه و گام‌های تغییرات متغیرهای پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس متغیرهای تعیین شده 6630 حالت وجود دارد و با توجه به اهداف تحقیق و محدود بودن تعداد حالات، همه آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل 5 الف) پلان و پرسپکتیو مدل پایه، ب) محل استقرار بازشو در مدل پایه (بازشوها در جبهه شمال و جنوب با بازه تغییرات wwr از 10٪ تا 90٪)



شکل 6 طول و عرض بهینه ساختمان

3-3- مدل سازی انرژی

برای انجام فرآیند شبیه سازی نیاز است پس از تعریف هندسه مدل، مشخصات مدل شامل فایل های آب و هوایی، کاربری، مصالح و سیستم تاسیسات تعریف شود. داده های آب و هوایی شهر اهواز از سایت کلاپمت وان بیلدینگ⁵ دریافت

متغیر مستقل ثانویه: این دسته شامل دو متغیر کلی به شرح زیر است. طول ضلع جنوب (وابسته به ویژگی های هندسی فرم) به عنوان متغیر اول در نظر گرفته شده و با استفاده از آن نسبت طول ضلع جنوب به ضلع غربی ساختمان در فرم های بهینه بررسی شده است. زاویه پرخش ساختمان به عنوان متغیر دوم تعیین شده است. این متغیر نحوه قرارگیری فرم در معرض تابش خورشیدی و میزان دریافت تابش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بازه تغییرات این دو متغیر ابتدا بر اساس اقلیم پژوهش و بر مبنای مطالعات کمسایمی تعیین گردید و سپس با بررسی های موردی، بازه نهایی تعیین شد. در تعریف متغیرهای پژوهش، به طور پیش فرض با توجه به نامطلوب بودن اضلاع غربی و شرقی، افزایش طول ساختمان پایه در جهت ضلع جنوبی در نظر گرفته شد. در اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب، نسبت طول ضلع جنوبی به

جدول 2 مشخصات مدل انرژی

برنامه حضور افراد	طبق جدول پ 5-1 پیوست 5 میحت 19
تعداد افراد	0.028 به ازای هر متر مربع
نرخ فعالیت	95 وات
چگالی توان روشنایی	9.36 وات بر متر مربع
گرمای آزاد شده از تجهیزات روشنایی	0.5
توان تجهیزات خانگی	4 وات بر متر مربع
گرمای آزاد شده از تجهیزات روشنایی	0.5
نفوذ ناخواسته هوا	0.0002 متر مربع بر ثانیه به ازای هر متر مربع نما
تهویه مکانیکی	0.0075 متر مکعب بر ثانیه به ازای هر نفر
تهویه طبیعی	خاموش
تهویه مطبوع	روشن
بازدهی تهویه مطبوع ¹	گرمایش: 0.8 و سرمایش: 1.8
دمای تنظیم سیستم گرمایی	20
دمای تنظیم سیستم سرمایی	28
مقاومت حرارتی دیوار	0.5
مقاومت حرارتی سقف	0.7
مقاومت کف روی خاک	طبق جزئیات پروژه
ضریب انتقال حرارت سطحی ²	3.1
ضریب عبور نور مرئی ³	0.74
ضریب بهره گرمایی خورشیدی ⁴	0.7
جزئیات جداره های نورگذر	جزئیات جداره های غیر نورگذر

ضلع غربی در فرم مطلوب به ترتیب 1.3 و 1.7 است [17]. با توجه به اینکه شهر اهواز از نظر اقلیمی گرم و نیمه خشک یا نیمه مرطوب محسوب می‌شود لذا میانگین این دو نسبت یعنی ضریب 1.5، برای تغییرات ضلع جنوبی مدل پارامتریک در نظر گرفته شد. بازه تعریف شده روی فرم پایه، مورد ارزیابی قرار

⁴. Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

⁵. Climate.OneBuilding.Org.

¹. (cop).

². U Factor (Thermal Transmittance).

³. Visible Transmittance (VT).

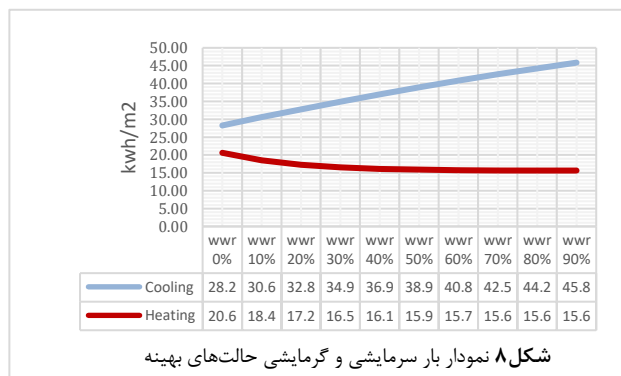
منبع اولیه بار گرمایشی و سرمایشی به ترتیب گاز و برق است. با توجه به این که هزینه اولیه تولید برق نسبت به گاز بالاتر است، باید ارزش اولیه انرژی در محاسبات وارد گردد. در این راستا بر اساس آنچه در مبحث 19 مقررات ملی بیان شده است، برای بار گرمایشی ضریب 1 و برای بار سرمایشی ضریب 3.33 لحاظ شده است [25]. در ادامه تحلیل نتایج بر اساس انرژی اولیه¹ انجام شده است.

در شکل 10 انرژی اولیه در دو حالت مینیمم و ماکزیمم (بر اساس متغیرهای پژوهش زاویه چرخش و طول ضلع جنوبی) برای هر مقدار WWR نشان داده شده است. با افزایش WWR مصرف انرژی افزایش می‌یابد و اختلاف حد بالا و پایین مصرف انرژی روند افزایشی دارد.

وقتی WWR در کمترین حالت قرار دارد، افزایش مصرف انرژی فرم نامطلوب نسبت به حالت بهینه، حدود 10 درصد خواهد بود اما وقتی WWR به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد این افزایش به حدود 30 درصد خواهد رسید. این امر نشان می‌دهد با افزایش سطوح نورگذر، حساسیت پارامترهای پژوهش (طول ضلع جنوب و زاویه چرخش) در طراحی بهینه بیشتر خواهد شد (شکل 11).

در ادامه ابتدا مشخصات فرم و زاویه چرخش حالت بهینه در هر WWR بررسی شده است. سپس جهت تعمیم نتایج، برای هر WWR ده درصد بهینه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

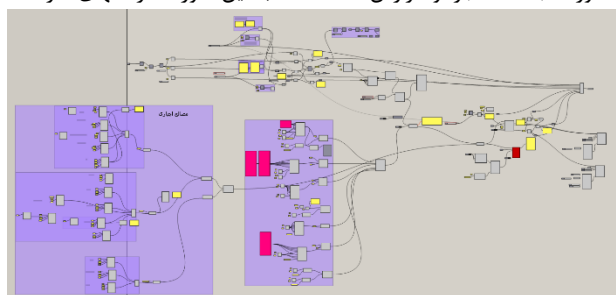
شکل 12 مشخصات فرم بهینه (طول ضلع جنوبی و غربی، نسبت ضلع جنوب به غرب و زاویه چرخش) در هر WWR را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در همه مقادیر WWR، ساختمانی که چرخش ندارد وضعیت مطلوب‌تری خواهد داشت. وقتی $0 \leq WWR < 30\%$ در حالت بهینه، طول ضلع جنوبی بیشتر از ضلع غربی است (کشیدگی شرقی غربی). زمانی که WWR به 30 درصد می‌رسد فرم بهینه فاقد کشیدگی است و طول ضلع جنوب و غرب برابر خواهد شد. با افزایش WWR (بیشتر از 30 درصد) در حالت بهینه طول ضلع غربی بیشتر از ضلع جنوبی خواهد بود (کشیدگی شمالی جنوبی).



شکل 8 نمودار بار سرمایشی و گرمایشی حالت‌های بهینه

شده است. استانداردهای لازم فضای مسکونی بر حسب گروه ساختمانی مورد نظر بر مبنای مبحث 19 مقررات ملی ساختمان ویرایش 1399 و استاندارد اشری 2019 استخراج شده است. مصالح مدل از نوع مصالح رایج در منطقه و با در نظر گرفتن ضوابط اجباری مبحث 19 تعیین شده است. مشخصات مدل انرژی از افزونه هانی‌بی ایجاد شده است (جدول 2 و شکل 7).

پس از در نظر گرفتن تمامی مفروضات و تکمیل الگوریتم، محاسبات به صورت مرحله‌ای و با استفاده از لیدی باگ لگاسی و کامپوننت لیدی باگ فلالی در محیط گرسه‌پایر انجام شده و برای هر یک از حالات WWR، متغیرهای ثانویه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نکته حائز اهمیت این است که مراحل تغییر اندازه ضلع جنوبی و زاویه چرخش ساختمان برای هر کدام از 10 حالت WWR به صورت جداگانه اجرا و گزارش شده است. به این صورت در انتهای کار 10



شکل 7 الگوریتم مدل معماری و انرژی در محیط گرسه‌پایر

فایل اکسل به عنوان خروجی (داده‌های عددی) به دست می‌آید که هر کدام به یک WWR اختصاص دارد. پس از آن بهترین گزینه برای هر WWR انتخاب و در قالب جداول و نمودارها با هم مقایسه شده‌اند.

4- تجزیه و تحلیل و نتایج یافته‌ها

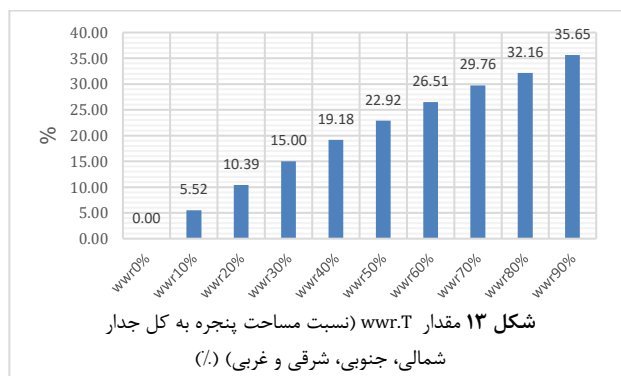
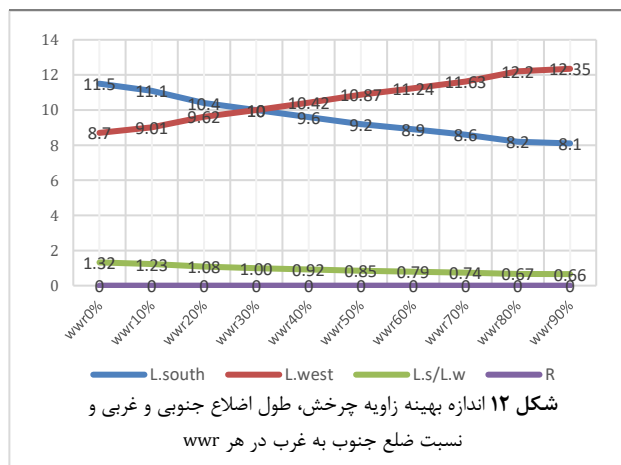
به دلیل عدم بررسی فاکتور نور روز، مصرف انرژی در حیطه روشنایی در همه نمونه‌ها یکسان بوده و از محاسبات حذف شده است و فقط گرمایش و سرمایش ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل 8 روند تغییر بار گرمایشی و سرمایشی حالات بهینه را نشان می‌دهد. با افزایش WWR بار گرمایشی کاهش و بار سرمایشی افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد با افزایش سطوح پنجره، گرمای تابشی دریافت شده از طریق جداره‌های شفاف در فصول گرم سبب افزایش بار سرمایشی ساختمان شده و بالعکس در فصول سرد بار گرمایی ساختمان را کاهش داده است. لذا تاثیر این روند در فصول گرم منفی و در فصول سرد مثبت خواهد بود. تغییرات شیب نمودار بار سرمایشی و گرمایشی به صورت کاهشی است. در شکل 9 روند این تغییرات به صورت عددی نشان داده شده است. روند افزایش بار سرمایشی در هر بازه WWR متوالی، با شیب کاهشی تقریباً یکنواخت اتفاق افتاده و اختلاف تغییرات در محدوده 1.6 الی 2.34 kWh/m^2 است. روند کاهش بار گرمایشی در هر بازه WWR متوالی با شیب کاهشی متغیر رخ داده و با افزایش WWR کاهش بار گرمایشی با شیب کندتر انجام شده و اختلاف تغییرات در بازه 0.01 الی 2.14 kWh/m^2 است. به ویژه در WWRهای بالاتر از 40 درصد این کاهش بسیار ناچیز است. مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد به طور میانگین تاثیر افزایش WWR بر افزایش بار سرمایشی بیش از کاهش بار گرمایشی است.

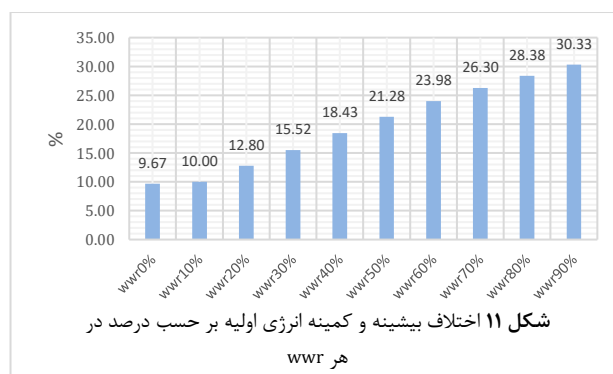
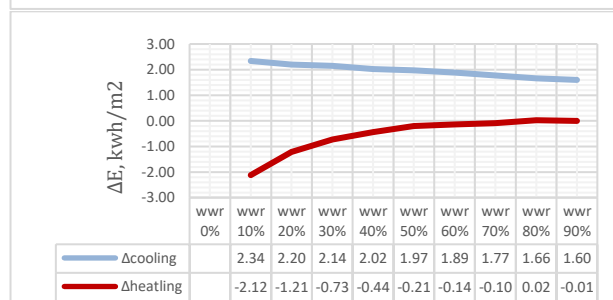
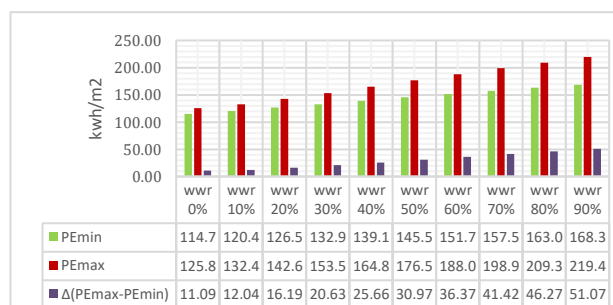
¹. Primary Energy.

جدول 3 درصد نسبت بازشو به کل دیوارهای خارجی در حالت‌های بهینه (wwr.T)

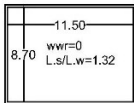
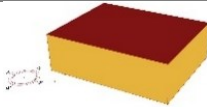
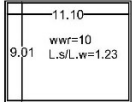
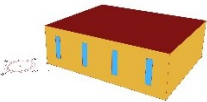
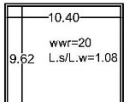
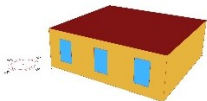
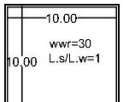
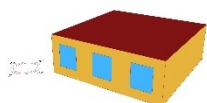
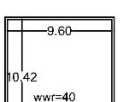

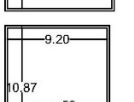

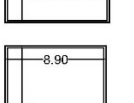
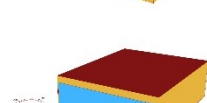
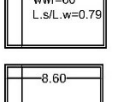

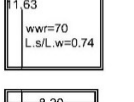
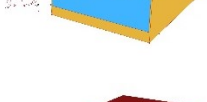
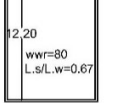
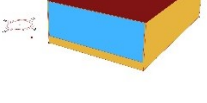
wwr	0 %	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
مساحت پنجره	0.0	7.77	14.56	21	26.88	32.2	37.38	42.14	45.92	51.03
مساحت دیوار	141.40	140.77	140.14	140	140.14	140.49	140.98	141.61	142.80	143.15
wwr.T	0.0	5.52	10.39	15	19.18	22.92	26.51	29.76	32.16	35.65



با توجه به اینکه مقدار wwr نسبت به سطح دیوار جنوبی و شمالی در نظر گرفته شده است و مساحت این جدارها در حالت‌های مختلف متغیر ثانویه اول (طول ضلع جنوبی)، متفاوت است، برای مقایسه بهتر معیاری به نام $wwr.T$ (طول ضلع جنوبی) در این معیار مساحت پنجره در هر مدل محاسبه شده و بر مساحت کل دیوارهای خارجی (اضلاع غربی، شرقی، شمالی، جنوبی) تقسیم شده و درصد نسبت بازشو به کل دیوارهای خارجی حساب شده است (جدول 3). در این حالت می‌توان میزان بازشو در حالت‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. شکل 13 بهینه حالت $wwr.T$ را نشان می‌دهد. به عنوان مثال زمانی که $wwr=90\%$ باشد کمینه حالت مصرف انرژی زمانی رخ می‌دهد که $wwr.T$ برابر با 35.65% باشد.



جدول 4 مشخصات فرم بهینه در هر wwr

پلان	تصویر	wwr (%)	نسبت طول ضلع جنوب به طول ضلع غرب ¹	زاویه چرخش	wwr (%)
		0.0	1.32	0	0%
		5.52	1.23	0	10%
		10.39	1.08	0	20%
		15	1	0	30%
		19.18	0.92	0	40%
		22.92	0.85	0	50%
		26.51	0.79	0	60%
		29.76	0.74	0	70%
		32.16	0.67	0	80%
		35.65	0.66	0	90%

مشخصات فرم بهینه در هر wwr در جدول 4 ارائه شده است. برای بررسی ده درصد بهینه، اختلاف انرژی اولیه بیشینه و کمینه در هر wwr محاسبه شده و 10 درصد این میزان به مقدار کمینه اضافه شده و رنج انرژی اولیه مصرفی 10 درصد بهینه محاسبه شده است. زمانی که $0 \leq wwr < 80\%$ زاویه چرخش

¹. L.s/L.w.

در این تحقیق، تاثیر هم‌زمان مقدار جدار نورگذر، زاویه چرخش و تناسب هندسی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد میان کشیدگی ساختمان و wwr در شمال و جنوب رابطه معناداری وجود دارد. مقدار جداره‌های نورگذر، میزان دریافت تابشی و اتلاف حرارتی ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با افزایش سطوح نورگذر دریافت تابشی نیز افزایش یافته و سبب افزایش بار سرمایشی و کاهش بار گرمایشی خواهد شد. اما تاثیر آن بر افزایش بار سرمایشی بیشتر از کاهش بار گرمایشی است. لذا هندسه بهینه ساختمان متأثر از مقدار جدار نورگذر تعیین می‌گردد. در حالتی که فرم فاقد بازو است بهترین نسبت طول به عرض ساختمان 1:1.32 است. با افزودن جداره‌های نورگذر به جبهه شمالی و جنوبی؛ برای رسیدن به حالت بهینه؛ طول ضلع جنوب روند کاهشی و ضلع غربی روند افزایشی دارد. زمانی که wwr به 30 درصد می‌رسد، در حالت بهینه، طول اضلاع جنوبی و غربی مساوی و ساختمان فاقد کشیدگی است. با افزایش مقدار wwr در فرم بهینه طول ضلع غربی از ضلع جنوبی بیشتر شده و در مقادیر بالاتر جدار نورگذر، کشیدگی شمالی - جنوبی، نتیجه مطلوب‌تری داشته است.

زاویه چرخش بهینه به طور کلی متأثر از سطوح نور گذر بوده و در مقادیر $0 \leq wwr \leq 70\%$ ده درصد نتایج بهینه در زوایای 10 درجه شرقی تا 10 درجه غربی حاصل شده و در بهینه‌ترین حالات زاویه چرخش صفر است. در wwr بالاتر از 70 درصد زاویه چرخش بهینه تا 15 درجه افزایش یافته است. در هر حالتی از طول ضلع جنوبی و هر مقدار معین از $wwr \geq 20\%$ در یک زاویه مشخص همواره چرخش به سمت شرق نتیجه مطلوب‌تری از نظر مصرف انرژی داشته و مصرف انرژی از کم به زیاد به ترتیب در زوایای زیر اتفاق افتاده است: صفر، 5 درجه شرقی، 5 درجه غربی، 10 درجه شرقی، 10 درجه غربی، 15 درجه شرقی، 15 درجه غربی، 20 درجه شرقی، 20 درجه غربی، 25 درجه شرقی، 25 درجه غربی، 30 درجه شرقی، 30 درجه غربی.

ساختمان در 10 درصد حالت بهینه بین 10 درجه شرقی تا 10 درجه غربی خواهد بود. زمانی که $wwr=80\%$ ، زاویه چرخش ساختمان در 10 درصد حالت بهینه بین 10 درجه غربی تا 15 درجه شرقی و زمانی که زمانی که $wwr=90\%$ ، این مقدار بین 15 درجه شرقی تا 15 درجه غربی خواهد بود. در همه مقادیر wwr ساختمان بدون چرخش بهینه‌ترین حالت را داراست. برای طول ضلع جنوبی با توجه به میزان wwr اعداد مختلفی حاصل می‌شود. ولی در هر صورت با افزایش wwr از صفر تا نود درصد، طول بهینه ضلع جنوب حالت کاهشی دارد. این نتیجه در مورد حد بالا و پایین 10 درصد بهینه نیز صادق است (جدول 5).

در هر یک از تناسب‌های انتخابی، ساختمان فاقد چرخش مصرف انرژی پایین‌تری خواهد داشت. لذا چرخش در هر یک به سمت غرب یا شرق در هر صورت مصرف انرژی را ولو به صورت جزئی افزایش خواهد داد. در ساختمان‌های دارای جداره نورگذر با مقدار $wwr \geq 20\%$ ، در یک زاویه چرخش یکسان در هر صورت چرخش به سمت شرق مصرف انرژی کمتری نسبت به غرب دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در هر حالتی از طول ضلع جنوبی (از 8 الی 13 متر) و در همه حالات $wwr \geq 20\%$ تغییرات مصرف انرژی از کم به زیاد به ترتیب در زوایای 0، -5، 5، -10، +10، -15، +15، -20، +20، -25، +25، -30، +30 اتفاق خواهد افتاد¹. در ساختمان با مقادیر $0 \leq wwr \leq 10\%$ ، تا زاویه 15 درجه چرخش به سمت غرب مصرف انرژی کمتری در پی خواهد داشت. اما در زوایای 20، 25 و 30 درجه با چرخش به سمت شرق مصرف انرژی کمتر خواهد شد. به طور کلی در یک طول معین ضلع جنوبی، تغییرات مصرف انرژی از کم به زیاد به ترتیب در زوایای 0، +5، -5، +10، -10، +15، -15، -20، +20، -25، +25، -30، +30 اتفاق خواهد افتاد.

جدول 5 ده درصد حالت‌های بهینه

	wwr	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	
ده درصد بهینه	بازه تغییرات انرژی اولیه	114.74	120.4	126.5	132.9	139.19	145.55	151.71	157.5	163.06	168.37	
	بازه تغییرات انرژی اولیه	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
	زاویه چرخش	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-15	-15
	زاویه چرخش بهینه	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
	زاویه چرخش بهینه	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+10	+15
	بازه تغییرات طول ضلع جنوب	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	بازه تغییرات طول ضلع جنوب	10.2	9.7	9.1	8.6	8.1	8	8	8	8	8	8
	بازه تغییرات طول ضلع جنوب	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	بازه تغییرات طول ضلع جنوب	13	12.5	12	11.7	11.4	11	10.7	10.5	10.2	10	10
	بازه تغییرات طول ضلع جنوب	11.5	11.1	10.4	10	9.6	9.2	8.9	8.6	8.2	8.1	8.1

5- جمع بندی و نتیجه گیری

¹ - زاویه منفی به معنای چرخش ساختمان به سمت شرق و زاویه مثبت به معنای چرخش ساختمان به غرب است.

- [17] M. Kasmai, *Climate and Architecture*. Esfahan: Khak publications, 2007. (in Persian)
- [18] M. Madahi and F. Tavaniaee, "Optimization of thermal performance of external walls of residential building in cold and dry climate by utilizing the energy simulation software (A case study: Mashhad, Iran)," *Energy Engineering and Management*, Vol. 9, No. 3, pp. 108-121, 2019. (in Persian)
- [19] A. Khatibi, M. Shahbazi, and Z. Torabi, "Analyzing the thermal behavior of facades in order to determine the optimal performance of energy consumption (Case study: An office building in Tehran)," *Renewable and New Energy*, Vol. 9, No. 2, pp. 121-129, 2022. (in Persian)
- [20] H. Varmaghni and A. Kasmai, "Factors affecting the reduction of energy consumption in buildings: A case study of high-rise buildings in district 22 of Tehran," *Iranian Journal of Energy*, Vol. 24, No. 1, pp. 67-100, 2021. (in Persian)
- [21] I. Balilan Asl, S. Nourivand, D. Sattarzadeh, and M. Asefi, "Simulation-based design in experimental researches of building performance: A case study of an office building in Tabriz," *Armanshahr*, Vol. 14, No. 36, pp. 113-131, 2021. (in Persian)
- [22] R. Pacheco, J. Ordóñez, and G. Martínez, "Energy efficient design of building: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 16, p. 3559-3573, 2012.
- [23] M. M. Ghiabi and A. Hossein Pour Hajjar, "The relation of energy consumption and opening ratio in high rise buildings," *Sustainable Architecture and Urban Design*, Vol. 2, No. 1, pp. 57-70, 2014. (in Persian)
- [24] Z. Ghiabaklou, *Fundamentals of Building Physics 2*. Tehran: Amirkabir University of Technology Branch, 2016. (in Persian)
- [25] *National Building Legislations: The Nineteenth Topic, Energy Consumption Saving*, 4 ed. Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center, 2023. (in Persian)
- [1] Z. Hesami, "Effectiveness of the implementation of the resolution of the reform of the energy consumption pattern and resources in buildings (Case study: Tehran municipality buildings)," *Urban Economy*, Vol. 19, No. 1, pp. 48-52, 2020. (in Persian)
- [2] P. Wilde, "The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation," *Automation in Construction*, No. 41, pp. 40-49, 2014.
- [3] W. J. Suh, C. S. Park and D. W. Kim, "Heuristic vs. meta-heuristic optimization for energy performance of a post office building," in *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, Australia, 2010.
- [4] Y. Fang and S. Cho, "Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance," *Solar Energy*, No. 191, pp. 7-18, 2019.
- [5] F. Kheiri, "A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 92, pp. 897-920, 2018.
- [6] SH. Mohammad, "Evaluating the thermal performance of wall construction materials, Case study: Residential buildings of Tehran," *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, Vol. 18, No. 1, pp. 69-78, 2013. (in Persian)
- [7] SH. Heidari, *Thermal Adaptation in Architecture First Step of Energy Saving*. Tehran: University of Tehran Press, 2019. (in Persian)
- [8] G. S. Najafi, Y. Gorji Mahlabani, and P. Pilechiha, "Sensitivity analysis and optimization of building geometry with energy-daylight efficiency approach," *Sustainable Architecture and Urban Design*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-58, 2023. (in Persian)
- [9] V. Z. Leskovar and M. Premrov, "An approach in architectural design of energy-efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented facade," *Energy and Buildings*, No. 43, pp. 3410-3418, 2011.
- [10] K. Momeni and M. Tanoorsaz, "Comparison of the influence of exterior walls on the thermal comfort of dwellers and selection of optimal materials in hot and semi- arid climates (case study: Dezful)," *Architecture in Hot and Dry Climate*, Vol. 11, No. 1, pp. 211-227, 2023. (in Persian)
- [11] M. Mahdavinia and I. Khayat, "An analytic study of the effect of envelope insulation on annual energy consumption in tall office buildings of Tehran metropolitan city," *Architecture and Urban Planning*, Vol. 10, No. 20, pp. 147-160, 2018. (in Persian)
- [12] A. A. Ahadi, "The Assessment of role of orientation, Type of materials and facade construction details on the energy consumption of residential buildings in Tehran," *Hoviat Shahr*, Vol. 16, No. 4, pp. 81-92, 2022. (in Persian)
- [13] J. Shaeri, R. Vakilinazhad, M. Yaghoubi, and M. Aliabadi, "The effect of materials on energy consumption, carbon production and thermal comfort in office building in hot and humid, hot and dry and cold, Iran," *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 6-33, 2020. (in Persian)
- [14] M. Pakdel and B. Alemi, "A solution to improve the thermal efficiency of the exterior shell of a building using natural non-woven composite materials," *Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 110-121, 2023. (in Persian)
- [15] E. Heydari, J. Mahdinejad, and P. Doulabi, "Strategic principles of designing the form of a residential building in Bushehr based on reducing energy consumption," *Karafan Quarterly Scientific Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 345-361, 2022. (in Persian)
- [16] R. Salimi Gargari, S. M. Mofidi, and H. Sanaieian, "Reviewing the design parameters of the building -envelope in order to reduce energy consumption (case study: contemporary residential buildings in district 15)," *Iranian Islamic City Studies*, Vol. 14, No. 51, pp. 113-131, 2024. (in Persian)