



## Typology of general form and relative compactness of residential buildings in Tehran from the perspective of climatic performance and optimization of energy consumption

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Analytic Study

#### Authors

Leila Mokhtari

Shahab Kariminia\*

Mansoureh kianersi

#### How to cite this article

Mokhtari L, Kariminia Sh, Kianersi M. Typology of general form and relative compactness of residential buildings in Tehran from the perspective of climatic performance and optimization of energy consumption. *Naqshejahan*. 2022 Jan 10; 11(4):60-78.

<https://doi.org/10.1001.1.23224991.1400.11.4.5.4>

1. PhD Student, Department of Architecture, Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Architecture, Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Architecture, Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

#### \*Correspondence

**Address:** Department of Architecture, Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

**Email:** sh.kariminia@par.iaun.ac.ir

**Phone:** +98 913 318 1471

#### Article History

Received: 01 Oct 2021

Accepted: 13 Dec 2021

ePublished: 10 Jan 2022

### ABSTRACT

**Aims:** This study investigates the amount of heating load, cooling load, daylight and ventilation in different types of construction in Tehran and based on the objective function, calculates the optimal building type by considering the general form and RC(relative compactness) and Introduces the basis of WWR(window to wall ratio), states of window to wall distribution and orientation.

**Materials & Methods:** At first, different types of building types in Tehran were extracted. The types were arranged in a modular method and were classified after calculating the RC. Then the types were modeled and simulated using software to calculate heating load, cooling load, daylight and ventilation in different modes. For each type, 60 analysis were performed and by writing the objective function, the types were compared and the optimal types was introduced.

**Findings:** The types with a RC=0.95, WWR=10% and West 270, had the lowest heating and cooling load. Although it has a minimum energy load, it doesn't have maximum daylight and ventilation. For this purpose, after equalizing the unit and writing the target function, a building types with a RC=0.54, WWR=40% and Uniform 180 with the lowest energy consumption and the highest amount of daylight and ventilation was selected as the optimal form.

**Conclusion:** Although the building types with high RC has the least load of heating and cooling, but considering other variables, these types is not optimal in climatic performance. Therefore, the weight coefficient of variables in the objective function is very important for deciding on the energy consumption of building types.

**Keywords:** Typology, Relative compactness, Energy efficiency, heating and cooling load, daylight, ventilation

### CITATION LINKS

- [1] Analysis of Performance of Three ... [2] Conceptual approach in Persian ... [3] Data mining and content analysis of the jury citations of the Pritzker Architecture ... [4] The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. [5] The embodied CO<sub>2</sub>e of sustainable energy technologies used in buildings: A review article. [6] Trombe walls: A review of opportunities ... [7] Optimization of a free-form building ... [8] Energy efficient design ... [9] Role of renewable ... [10] Assessment of design parameter ... [11] Packing solar cells ... [12] The impact of Iwan as a traditional ... [13] Case studies in trajectory optimization ... [14] Designery Approach to Energy ... [15] Balancing energy efficiency ... [16] Dilemma of green and pseudo green ... [17] Simulation of climate change ... [18] Linking BIM and Design ... [19] Zero energy buildings and sustainable development ... [20] An ENVI-met Simulation Study on Influence ... [21] Multi-objective optimization of daylight ... [22] Defining Sustainability Characteristics ... [23] Contemporary architecture of Iran. [24] Investigating the effect of energy intensity and urbanization ... [25] The effect of geometry factors fenestration ... [26] Design an optimum Pattern ... [27] The core of climate change mitigation. [28] Designing a native pattern in arid climate ... [29] Global Energy Architecture ... [30] Potential of solar energy ... [31] A Review on Energy and Renewable ... [32] The effect of general form and relative ... [33] Usage of Indigenous Architectural ... [34] Effects of windward and leeward ... [35] Linking BIM and Design of Experiments ... [36] Seasonal differences of subjective thermal ... [37] A New Method of Optimizing Single ... [38] Improving the suitability of selected ... [39] Solution of a well-field design problem ... [40] Multifidelity response surface approximations ... [41] Design of low energy office buildings. [42] Multi-objective optimization ... [43] Investigating the influence of light ... [44] Optimizing building form for energy ... [45] Building morphology, transparency ... [46] How building geometry impacts ... [47] Technology of Modern Windcatchers ... [48] Natural ventilation performance of ancient ... [49] Impacts of urban morphology on reducing ... [50] Efficient Shading Device as an Important ... [51] Folded double-skin façade ... [52] A dynamic vertical shading ... [53] Thermal comfort prediction ... [54] Evaluating the different boundary ... [55] Learning Traditional Architecture for Future Energy ... [56] Window geometry impact on a room's wind comfort. [57] A novel design-based optimization ... [58] Prioritizing for Healthy Urban Planning: Interaction of Modern Chemistry and Green Material-based Computation. [59] Comparison of Thermal Comfort Range of Finn Garden and Historical ... [60] Modelling radiation fluxes in simple and complex ...

## گونه‌شناسی فرم کلی و تراکم نسبی ساختمان‌های مسکونی تهران از منظر عملکرد اقلیمی و بهینه‌سازی مصرف انرژی

لیلا مختاری<sup>۱</sup>، شهاب کریمی نیا<sup>۲</sup>، منصوره کیان ارثی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
- ۲- استادیار گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. (نویسنده مسئول)
- ۳- استادیار گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

### چکیده

**اهداف:** این پژوهش میزان بار گرمایش، سرمایش، نوروز حداکثری و تهویه مطبوع را در گونه‌های مختلف ساختمانی تهران بررسی و بر مبنای تابع هدف بهینه‌ترین گونه ساختمانی را با در نظر گرفتن فرم کلی و تراکم نسبی محاسبه نموده و بر اساس نسبت پنجره به دیوار، نحوه توزیع پنجره به دیوار و جهت‌گیری معرفی می‌کند.

**ابزار و روش‌ها:** ابتدا با بررسی منابع مختلف انواع گونه‌های ساختمان تهران استخراج گردید. گونه‌ها به روش مدولار چیدمان شده و پس از محاسبه تراکم نسبی دسته‌بندی شدند. سپس گونه‌ها با نرم‌افزار انرژی برای محاسبه بار گرمایش، سرمایش، نوروز حداکثری و تهویه در حالات مختلف مدل‌سازی و شبیه‌سازی شدند. برای هر گونه ۶۰ آنالیز صورت گرفت و در انتها با نوشتن تابع هدف گونه‌ها مقایسه و گونه بهینه معرفی گردید.

**یافته‌ها:** در گونه با تراکم نسبی ۰.۹۵ و  $WWR = 10\%$  و West 270، کمترین بار گرمایش و سرمایش بدست آمد. این گونه اگرچه دارای بار انرژی حداقل می‌باشد، اما دارای نوروز و تهویه حداکثر نمی‌باشد. بدین منظور پس از یکسان‌سازی واحد و نوشتن تابع هدف گونه ساختمانی با تراکم نسبی ۰.۵۴ و  $WWR = 40\%$  و Uniform 180 کمترین بار مصرفی انرژی و بالاترین مقدار نوروز و تهویه به عنوان فرم بهینه انتخاب شد.

**نتیجه‌گیری:** در نتایج اولیه پژوهش اگرچه گونه ساختمانی با تراکم نسبی بالا کمترین بار گرمایش و سرمایش داراست اما با در نظر گرفتن سایر متغیرها این گونه از منظر عملکرد اقلیمی حالت بهینه نمی‌باشد. از این رو میزان اهمیت متغیرها و ضریب وزنی آن‌ها در تابع هدف برای تصمیم‌گیری در مورد میزان مصرف انرژی گونه‌های ساختمانی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** گونه‌شناسی، تراکم نسبی، بهره‌وری انرژی، بار گرمایش و سرمایش، نور روز حداکثری، تهویه

### مقدمه

در عصر حاضر توسعه فناوری و صنعتی منجر به نیاز بی‌سابقه‌ای برای سوخت‌های فسیلی شده است [۳-۱]. از سویی، با توجه به جمعیت رو به رشد در سراسر جهان، مصرف منابع انرژی به طور چشمگیری افزایش یافته است [۵-۴]. بنابراین شناسایی منابع جدید انرژی می‌تواند در پیشرفت اقتصادی و محیط زیستی تاثیرگذار باشند [۷-۶]. گرم شدن زمین و تغییرات آب و هوایی یکی دیگر از دلایل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌باشد تا اثر نامطلوب انتشار دی‌اکسیدکربن بوسیله سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد [۸]. انرژی خورشیدی یکی از انرژی‌های ارزشمند است که در چند دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است [۹-۱۰]. بعد از اواخر قرن بیست، بسیاری از کشورها در جستجوی راه‌هایی جهت جایگزین نمودن انرژی خورشیدی به جای انرژی‌های تجدیدناپذیر بوده‌اند [۱۲-۱۱]. بهینه‌سازی انرژی نیز راهی برای کاهش مصرف انرژی می‌باشد [۱۴-۱۳] که برای استفاده از انرژی بهینه و کارآمد در بخش ساختمان می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۱۶-۱۵]. در نتیجه، معماری انرژی بهینه و کارآمد به عنوان پاسخی برای به حداقل رساندن تاثیر منفی محیط زیستی ساختمان‌ها مطرح شده است [۱۷-۱۸]. یکی از جنبه‌های معماری با انرژی بهینه میزان از دست دادن انرژی حرارتی و بدست آوردن آن است [۲۰-۱۹].

در کشور پهناور ایران با مناطق اقلیمی متفاوت، معماری سنتی ایران شیوه‌های مناسب جهت فراهم نمودن شرایط آسایش انسان ارائه نموده است [۲۱]. امروزه با استفاده از مصالح و تکنولوژی جدید که از نظر اقتصادی پرهزینه و از لحاظ محیط زیست آلوده کننده می‌باشد، طرح‌ها به گونه‌ای است که ساختمان‌ها در طی تابستان بسیار گرم و در زمستان بسیار سرد و از لحاظ آسایش ناراحت کننده است [۲۳-۲۲]. در کشوری مانند ایران با منابع غنی از ذخایر سوخت‌های فسیلی، مصرف انرژی در بالاترین رده در جهان قرار دارد. ایران به عنوان کشوری در حال توسعه، در مسیر افزایش ساخت و ساز و

نسبت پنجره به دیوار و نحوه توزیع پنجره در دیوار و جهت-گیری بنا دارد تا نور روز حداکثری و میزان بار گرمایش و سرمایش با توجه به تهویه مطبوع بنا بدست آید [۳۷]. معماری با انرژی بهینه استراتژی‌های بهینه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را از طریق بهینه‌سازی در جهت‌گیری، فرم، فشردگی، نسبت بازشو به دیوار نشان می‌دهد [۳۸]. فرم ساختمان تاثیر بسزایی در افزایش یا کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن دارد [۳۹]. از این رو در این تحقیق فرم ساختمان مورد توجه بوده و مورد واکاوی قرار خواهد گرفت. معیارهای متعددی برای ارزیابی هندسه فرم ساختمان و ارتباط آن با بهینه‌سازی انرژی وجود دارد. مرسوم‌ترین استانداردهای ساختمان وابسته به انرژی، هندسه فشردگی و تراکم ساختمان را مهم‌ترین شاخص عملکرد حرارتی ساختمان و بهینه‌سازی انرژی می‌دانند که با استفاده از شاخص‌های عددی توصیف می‌شوند [۴۰]. این شاخص‌ها در ارتباط بین حجم فرم ساخته شده و مساحت سطح آن می‌باشد. فشردگی ساختمان به طور مستقیم بر مصرف منابع انرژی تأثیر می‌گذارد. ساختمان‌هایی با مساحت کمتری از پوسته خارجی و همان میزان محیط گرم شده، تلفات انرژی کمتری را تجربه می‌کنند [۴۱-۴۲]. به منظور کاهش تلفات حرارتی ساختمان‌ها، همواره بهتر است که نسبت سطح جانبی به حجم بنا به حداقل ممکن رسانده شود. در تلفیق واحدهای مسکونی نیز هرچه واحدها به صورت فشرده تر با یکدیگر تلفیق شوند، نسبت سطح جانبی به حجم کل ساختمان کمتر و در نتیجه اتلاف حرارت نیز کمتر خواهد شد [۴۳]. کیوی و ملوکی در رابطه با بهینه‌سازی فرم ساختمان برای عملکرد انرژی بر اساس رابطه هندسی سلسله مراتبی برای کنترل ساخت فرم بین نقاط هندسی روش جدیدی بر مبنای الگوریتم ژنتیک را معرفی کرده‌اند تا به کاربر اجازه دهد، هندسه ساختمان را بدون اینکه به فرم ساده محدود شود، بهینه‌سازی کند که در این حالت فرم در سه بعد دچار تغییر شکل شده و تعداد متغیرهای هندسه برای بهینه‌سازی افزایش می‌یابد [۴۴]. اما این پژوهش به دلیل اینکه حجم کلی ساختمان را به صورت یک پوسته در نظر می‌گیرد و به وجود

افزایش مصرف انرژی می‌باشد [۲۴]. مصرف انرژی در ساختمان‌ها نیز به واسطه افزایش بار انرژی ساختمان به علت استفاده از سیستم‌های نوین گرمایش، سرمایش، تهویه و نور پردازی بیشتر شده است [۲۵]. محدودیت منابع انرژی و رشد چشمگیر مصرف آن‌ها در ایران در مقایسه با متوسط جهانی، ضرورت بهره‌وری مصرف انرژی را در این کشور دو چندان کرده است [۲۶]. طبق سند توافقنامه فرانسه کاپ ۲۱ که اجلاس جهانی آب و هوا و متعهدین کنوانسیون تغییر اقلیم می‌باشد، مصرف انرژی در ایران ۵ برابر متعارف است و ۰.۱ باید شود تا به استاندارد جهانی نزدیک گردد [۲۷]. با ادامه روند موجود در مصرف انرژی در کشور، در چشم انداز ۱۴۰۴، ایران از صادر کننده خالص انرژی به یک کشور واردکننده انرژی مبدل خواهد شد [۲۸]. اگرچه برای اعمال مقررات ملی ساختمان برای به حداقل رساندن استفاده از سوخت‌های فسیلی نهادهایی وجود دارد، ولی با توجه به اعلام دفتر مقررات ملی ساختمان ایران در سال ۲۰۱۲، مصرف انرژی در بخش ساختمان بیش از یک سوم مصرف سوخت در کشور می‌باشد [۲۹-۳۰] و بر اساس آخرین آمار منتشر شده در ترازنامه انرژی کشور، ساختمان‌ها مشترکان پر مصرف انرژی هستند [۳۱]. با توجه به میزان اتلاف انرژی در بخش ساختمان و مسکن کاهش مصرف انرژی در این بخش ساده‌تر و با سرمایه‌گذاری کم‌تری نسبت به بخش‌های دیگر می‌باشد. طراحی اصولی ساختمان‌ها با توجه به شرایط اقلیمی آن منطقه و استفاده صحیح از انرژی خورشیدی می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد [۳۲]. طراحی اقلیمی روشی برای کاهش همه جانبه انرژی یک ساختمان می‌باشد [۳۴]. هدف از اجرای طراحی اقلیمی کاهش بارگرمایش و سرمایش با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای ایجاد آسایش در ساختمان‌هاست [۳۵]. اکثر ساختمان‌های کشور فاقد ضوابط فنی شناخته شده برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی هستند و با وجود مصرف انرژی بالا، شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌ها محقق نشده است [۳۶]. میزان سطح زیر تابش بنا ارتباط مستقیم با عواملی مانند فرم بنا، تراکم نسبی، میزان

است. در این پژوهش فرم و تراکم نسبی ساختمان متغیرهای مستقل، نسبت پنجره به دیوار، میزان توزیع پنجره به دیوار و جهت گیری متغیرهای مستقل فرعی، بار گرمایش، سرمایش، نور روز حداکثری و تهویه متغیر وابسته و مکان پژوهش، داده های آب و هوایی و تعداد مکعب‌های استفاده شده برای چیدمان بنا، داده های آب و هوایی، اختلاف دمای داخل و خارج، تعداد افراد مصالح و ضریب انتقال و عایق حرارتی متغیرهای ثابت خواهند بود. متغیرها به علت کمی بودن تحت عملیات آماری قرار می‌گیرند و در نهایت گونه بهینه ساختمان‌های مسکونی تهران بر مبنای تراکم نسبی از منظر عملکرد اقلیمی و بهره‌وری مصرف انرژی مشخص می‌گردد. در این راستا در ابتدا مطالعه ابعاد مختلف فرم ساختمان و گونه‌شناسی ساختمان‌های مسکونی تهران انجام شده و بر مبنای آن نمونه‌ها به روش حبه‌ای مدل‌سازی شدند. در ادامه تراکم نسبی گونه‌ها محاسبه و دسته‌بندی گونه‌ها بر مبنای آن انجام شد. چگونگی دریافت و از دست دادن انرژی و میزان نور روز حداکثری و تهویه مطبوع بر اساس سطح خارجی و حجم بنا و مهمترین متغیرهای هدایت کننده آن مشخص شدند. برای آنالیز گونه‌ها نرم افزار مناسب انتخاب و شبیه‌سازی در آن انجام شد. پس از تحلیل ابتدایی دستاوردها یکبار میزان بار گرمایش و سرمایش مورد مقایسه قرار گرفتند و یکبار میزان بار گرمایش و سرمایش و نور روز حداکثری و تهویه مقایسه شدند. برای این منظور یکسان سازی واحد صورت گرفت و تابع هدف برای بهینه سازی نتایج نوشته شد و حالت‌های بهینه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند.

گونه‌شناسی مسکن از دیدگاه‌های متعددی قابل بررسی است. یکی از رایج‌ترین زمینه‌های مطالعات گونه‌شناسی پرداختن به شکل‌های کلی واحد مسکونی است. هدف از این مطالعات آگاهی یافتن نسبت به گوناگونی‌های ممکن در شکل عمومی واحد مسکونی است. در طرح تفصیلی تهران سال ۱۳۹۱، پهنه مسکونی که موضوع پژوهش حاضر می‌باشد، دربردارنده اصلی ترین کاربری در تهران می‌باشد. در شمارش میدانی این طرح تفصیلی (جدول ۱)، از بین ۹۹۷ کاربری مسکونی، تراکم

طبقات اهمیت نمی‌دهد و در نهایت حجم تبدیل به یک فرم نامتعارف می‌شود و از سویی امکان وجود فضای خالی در حجم ساختمان و تاثیر آن را نادیده می‌گیرد، مورد استفاده تحقیق حاضر قرار نمی‌گیرد. مطالعات پس‌نلنر و مهدوی در رابطه با فشردگی هندسه و تراکم ساختمان به اینجا رسیده است که تراکم نسبی تاثیرگذارترین مفهوم فرم بنا روی کارایی انرژی است [۴۵]. بر این مبنای کارایی انرژی بر اساس تراکم نسبی فرم بنا قابل تفسیر خواهد بود. اگر چه استفاده از هندسه فشرده در ۳ مورد می‌تواند مورد انتقاد قرار بگیرد:

۱- فشردگی، مورفولوژی خاص از یک شکل بنا را در بر نمی‌گیرد. حتی می‌تواند عملکرد حرارتی را تحت تاثیر قرار دهد. مانند خود سایه اندازی

۲- فشردگی، مقدار و میزان توزیع اجزا محصور شفاف را اندازه نمی‌گیرد. بنابر این افزایش و کاهش تابش مربوطه، برای آن حساب نمی‌شود.

۳- تغییر جهت یک ساختمان، فشردگی آن را تغییر نمی‌دهد. پس برای رفع این موارد در این پژوهش باید تنوع شفافیت، مورفولوژی و جهت‌گیری ساختمان در کنار فشردگی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. پژوهش حاضر در جستجوی گونه‌شناسی و بهینه‌سازی تراکم نسبی فرم ساختمان‌های مسکونی شهر تهران با رویکرد بهره‌وری در مصرف انرژی می‌باشد. بررسی مولفه‌های موثر در کاهش بار گرمایش و سرمایش ساختمان و بهره‌گیری حداکثری از نور خورشید و تهویه مناسب، تعیین مناسب‌ترین سطح نورگذر و میزان توزیع نسبت پنجره به دیوار و جهت‌گیری بنا و یافتن رابطه بین آن‌ها هدف اصلی پژوهش می‌باشد. مطالعه حاضر با تمرکز بر تراکم نسبی ساختمان و ارتباط بین چگونگی کاهش سطح جانبی، به دنبال بهینه‌سازی فرم کلی ساختمان با توجه به متغیرهای پژوهش در تهران می‌باشد که نوآوری خاص این پژوهش است.

## مواد و روش‌ها

نوع مطالعه توصیفی و تحلیلی است و بر اساس ماهیت پژوهش از تحلیل کمی و متغیرهای قابل سنجش استفاده شده

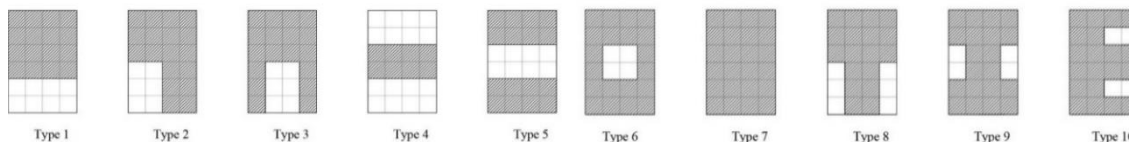
متوسط که ساختمان‌های ۳ تا ۵ می‌باشد با ۴۰۳ عدد بیشترین تعداد را به خود اختصاص داده است [۳۲].

جدول ۱: پهنه‌های استفاده از اراضی در نقشه‌های طرح تفصیلی ۱:۲۰۰۰ شهر تهران (وسعت به هکتار) [۳۲]

| پهنه‌های کلان | پهنه‌های اصلی | تعداد | وسعت  | پهنه‌ها               | ضوابط کلی ساخت و ساز               | تعداد | وسعت  |
|---------------|---------------|-------|-------|-----------------------|------------------------------------|-------|-------|
| سکونت         | مسکونی عام    | ۷۱۰   | ۱۹۶۸۵ | مسکونی با تراکم کم    | تا ۳ طبقه با حداکثر تراکم ۱۸۰ درصد | ۲۳۲   | ۵۵۳۵  |
|               |               |       |       | مسکونی با تراکم متوسط | تا ۵ طبقه با حداکثر تراکم ۳۰۰ درصد | ۴۰۳   | ۱۳۰۲۲ |
|               |               |       |       | مسکونی با تراکم زیاد  | تا ۶ طبقه با حداکثر تراکم ۳۶۰ درصد | ۷۵    | ۱۱۲۹  |

مرکزی، توپر، L، U، T، E، I و H دسته بندی شده‌اند (شکل ۱).

مطابق مطالعات انجام شده، ۱۰ طرح مسکن در تهران به رسمیت شناخته شده و بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است [۳۲-۳۳]. این گونه‌ها به حالت خطی، دو طرفه، حیاط



شکل ۱: گونه‌های انتخاب شده از بلوک‌های مرسوم شهر تهران [۳۲]

گورتکین و پس‌نلر و مهدوی تراکم نسبی بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\text{تراکم نسبی مکعب} = 6 \times V^{2/3} \times A^{-1} \quad (1)$$

که در آن حجم بنا و  $V$  و سطح بنا می‌باشد [۴۶-۴۲]. در این تحقیق تعداد طبقات به طور میانگین ۴ طبقه برای ساختمان متعارف مسکونی در تهران در نظر گرفته و برای مدلسازی از روش مدل حبه‌ای استفاده شده است. در این روش که نمونه‌ای از یک روش مدولار به شمار می‌آید، قطعاتی با اندازه مشخص مانند حبه در کنار هم قرار می‌گیرند که همخوانی و هماهنگی این حبه‌ها اهمیت دارد. از آنجا که ساختمان متعارف مسکونی در تهران ۴ طبقه انتخاب شده است، به روش مدل حبه‌ای و مدولار ارتفاع به ۴ حبه تقسیم و به تناسب آن طول و عرض نیز ۴ حبه انتخاب می‌شوند که در مجموع ۶۴ حبه وجود خواهد داشت. با توجه به اینکه

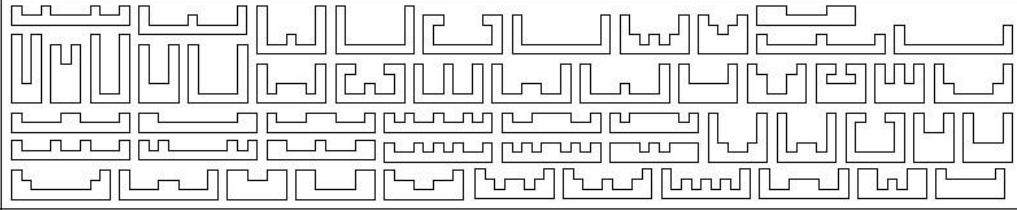
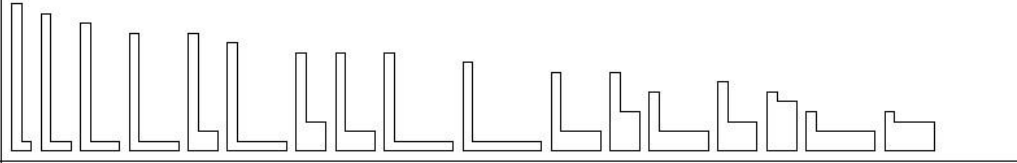
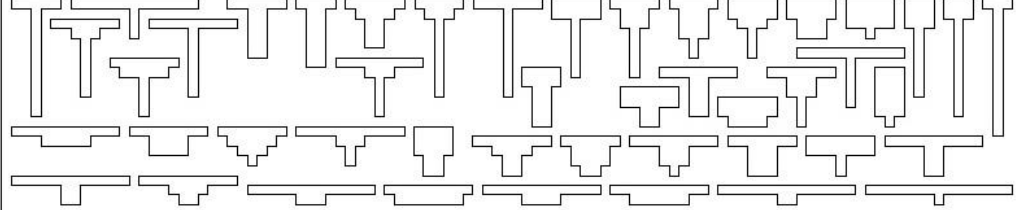
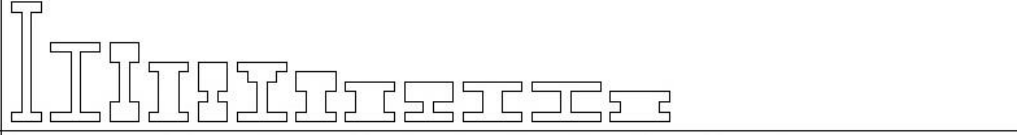
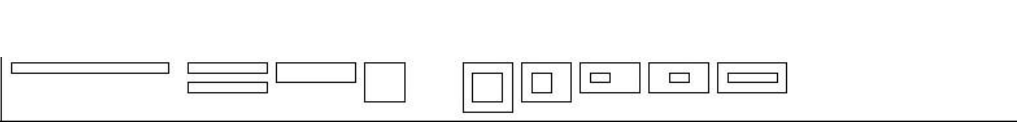
معیارهای متعددی برای ارزیابی هندسه فرم ساختمان و ارتباط آن با بهینه‌سازی انرژی وجود دارد. مرسوم‌ترین استانداردهای ساختمان وابسته به انرژی، هندسه فشردگی و تراکم ساختمان را مهم‌ترین شاخص عملکرد حرارتی ساختمان و بهینه‌سازی انرژی می‌دانند که با استفاده از شاخص‌های عددی توصیف می‌شوند [۴۰]. در این پژوهش دستیابی به تراکم نسبی متناظر با موضوع کار و دستیابی به فرم مبتنی بر آن برای ساختمان‌های مسکونی متعارف در نمونه مورد مطالعه شهر تهران مد نظر است.

تراکم نسبی کره طبق فرض بیشترین مقدار یعنی یک می‌باشد [۴۵]. اما از آنجایی که اکثر ساختمان‌ها چند وجهی متعامد هستند، از نزدیکترین شکل به کره از نظر فشردگی یعنی مکعب به عنوان فرم کلی استفاده می‌شود. بر اساس مطالعه مهدوی و

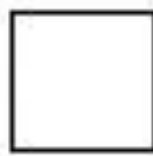
و شبیه سازی این ۱۶ مربع در حالات مختلف چیدمانی با توجه به ۱۰ گونه ساختمانی تهران مطابق جدول ۲ کنار هم قرار گرفته اند.

متغیر ارتفاع ثابت فرض می شود، در حالت پلان ۱۶ مکعب به عنوان احجام پایه مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت پلان برای بدست آوردن تیپولوژی های تحقیق برای مدلسازی

جدول ۲: انواع حالات چیدمان گونه ها (۱۳۸ پلان)

| گونه ها                                   | حالات مختلف چیدمان گونه ها   |
|---|--|
| حالت U                                    |    |
| حالت L                                    |    |
| حالت T                                    |   |
| حالت I, H                                 |  |
| خطی،<br>دوطرفه،<br>حیاط<br>مرکزی،<br>توپر |  |

حجم گونه  $4 \times 4 \times 4 = 64 \text{ m}^3$   
 مساحت سطوح جانبی گونه  $2 \times (ab+ac+bc) =$   
 $2 \times (16+16+16) = 96 \text{ m}^2$   
 تراکم نسبی گونه  $6 \cdot V^{0.66} \cdot A^{-1} = 6 \times 64^{0.66} \times 96^{-1} = 0.95$



در ادامه تراکم نسبی گونه ها توسط معادله (۱) محاسبه و در جدول ۳ دسته بندی شده اند. برای نمونه محاسبه حجم و سطح جانبی و تراکم نسبی گونه زیر طبق روش زیر محاسبه می گردد:



|        |   |  |  |         |   |  |  |
|--------|---|--|--|---------|---|--|--|
| Type 4 | Volume:<br>64m <sup>3</sup><br>Area: 120m <sup>2</sup><br>Rc:0.76 |  |  | Type 10 | Volume:<br>64m <sup>3</sup><br>Area: 168m <sup>2</sup><br>Rc:0.54 |  |  |
| Type 5 | Volume:<br>64m <sup>3</sup><br>Area: 128m <sup>2</sup><br>Rc:0.71 |  |  | Type 11 | Volume:<br>64m <sup>3</sup><br>Area: 176m <sup>2</sup><br>Rc:0.52 |  |  |
| Type 6 | Volume:<br>64m <sup>3</sup><br>Area: 136m <sup>2</sup><br>Rc:0.67 |  |  |         |   |  |  |

گرفته می‌شود و سپس این ۱۰ درصد در ۵ حالت مانند شکل ۲ برای جهات مختلف توزیع می‌شود. برای مثال زمانی که اولویت جبهه شمال باشد، سه جبهه ۱۵ درصد از این ۱۰ درصد و جبهه شمال ۵۵ درصد این ۱۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهند. پس از مشخص شدن اولویت برای یک جبهه، ساختمان در ۴ مرحله می‌چرخد. این چرخش با اعداد ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه مشخص شده که این چرخش در جهت عقربه‌های ساعت صورت می‌پذیرد. این چرخش به این دلیل صورت می‌پذیرد که فرم و سطح جداره در جبهه‌های مختلف یکسان نیست و برای بررسی همه جانبه موضوع فرم‌ها در همه جهات و شکل‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در جدول ۵ اولویت جهت‌گیری برای جهات جغرافیایی بیان شده است.

از آنجایی که فشردگی، مقدار و میزان توزیع اجزا محصور شفاف را اندازه نمی‌گیرد، بنابراین افزایش و کاهش تابش مربوطه، برای آن حساب نمی‌شود و از طرفی تغییر جهت یک ساختمان، فشردگی آن را تغییر نمی‌دهد [۴۵]. پس برای رفع این موارد در پژوهش تنوع شفافیت و میزان توزیع اجزا محصور شفاف و جهت‌گیری ساختمان در کنار فشردگی آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به پوسته‌های شفاف متنوع، نسبت پنجره به دیوار واحد ساختمانی تغییر پیدا می‌کند. نسبت‌های پنجره انتخاب شده برای این پژوهش ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد می‌باشد. تغییر ابعاد پنجره در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، بدین معنا ابتدا برای کل پوسته خارجی نسبت مساحت پنجره به دیوار ۱۰ درصد در نظر

جدول ۵: نحوه توزیع پنجره‌ها برای هر کدام از دسته بندی های سه گانه توزیع پنجره کلی (۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد)

| الویت جهت گیری | شمال | شرق | جنوب | غرب |
|----------------|------|-----|------|-----|
| یکسان          | ۲۵٪  | ۲۵٪ | ۲۵٪  | ۲۵٪ |
| شمال           | ۵۵٪  | ۱۵٪ | ۱۵٪  | ۱۵٪ |
| شرق            | ۱۵٪  | ۵۵٪ | ۱۵٪  | ۱۵٪ |
| جنوب           | ۱۵٪  | ۱۵٪ | ۵۵٪  | ۱۵٪ |
| غرب            | ۱۵٪  | ۱۵٪ | ۱۵٪  | ۵۵٪ |

شبیه‌سازی و محاسبه شود. به منظور بررسی تاثیر تراکم نسبی پلان بر مصرف انرژی ساختمان از شبیه‌سازی انرژی توسط نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است. موتور شبیه‌ساز این نرم‌افزار، انرژی پلاس می‌باشد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی

بدین صورت با ۳ درصد نسبت پنجره به دیوار و ۵ حالت نحوه توزیع پنجره‌ها در زوایای متفاوت، ۱۵ حالت برای هر یک از اشکال هندسی در نظر گرفته شده است. با احتساب ۴ زاویه جهت‌گیری مجموعاً ۶۰ حالت برای هر شکل می‌بایست



شامل میانگین دما، حداکثر دما، حداقل دما، میانگین رطوبت، بارش، دید، فشار سطح دریا، سرعت باد، حداکثر سرعت باد و... استخراج شده و میانگین آن‌ها به صورت سالانه وارد نرم‌افزار شده است. سیستم سرمایش و گرمایش ساختمان در تمام سال فعال در نظر گرفته شده تا بر اساس دمای آسایش در صورت نیاز وارد مدار شوند. ضریب عملکرد سیستم سرمایش و گرمایش یک در نظر گرفته شده است. دمای آسایش برای فصول گرم و سرد و سایر مشخصات سیستم مطابق جدول ۶ می‌باشد.

ساختمان در جنبه‌های مختلف مانند فیزیک و مصالح ساختمان، معماری ساختمان، سیستم‌های گرمایش و سرمایش، سیستم روشنایی، نور روز حداکثری، تهویه و غیره کاربرد داشته و قابلیت مدل‌سازی همه جانبه ساختمان را دارد. قابلیت‌های این نرم‌افزار با اهداف این پژوهش مطابقت داشته و به همین علت به عنوان نرم‌افزار شبیه‌ساز این پژوهش انتخاب شده است.

در این مرحله داده‌های داده‌های آب و هواشناسی شهر تهران از سایت سازمان هواشناسی برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵

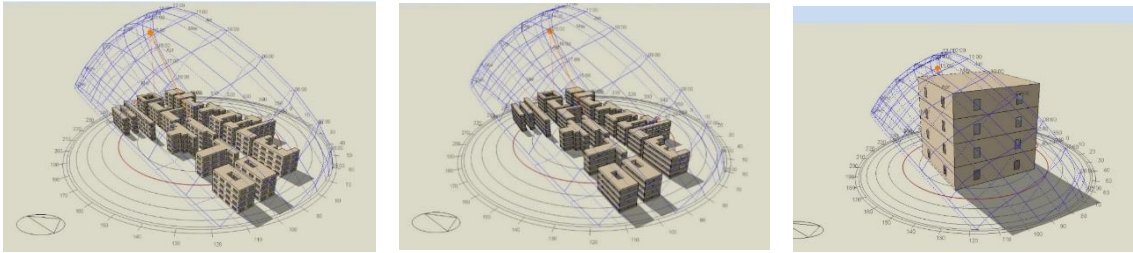
جدول ۶: دمای آسایش و مشخصات سیستم تهویه مطبوع

|                   |                                   | Heating Setpoint Temperatures (°C) | Heating set back (°C) | Cooling Setpoint Temperatures (°C) | Cooling set back (°C) |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| دمای آسایش        |                                   | 22.0                               | 12.0                  | 24.0                               | 28.0                  |
| سیستم تهویه مطبوع | fuel                              | Electricity from grid              |                       | Electricity from grid              |                       |
|                   | Max/min supply air temperature    | 35.0                               |                       | 12.0                               |                       |
|                   | Max/min supply air humidity ratio | 0.016                              |                       | 0.008                              |                       |

روز کمتر از ۵۰۰ لوکس نیازمند نور مصنوعی بوده و بالای ۲۰۰۰ لوکس سبب ایجاد عدم آسایش بصری (خیرگی) و حرارتی خواهد شد.

پلان‌های مورد بررسی در این پژوهش ۱۱ پلان با تراکم نسبی - های متفاوت می‌باشد. تمامی این پلان‌ها با شرایط یکسان شبیه‌سازی شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند. مبنای این مقایسه در ابتدا برای بار گرمایش و سرمایش ساختمان خواهد بود. در هر قسمت حالت‌های بهینه هر تراکم نسبی استخراج و با هم مقایسه شده تا بهینه‌ترین حالت ساختمان مشخص گردد.

در این پژوهش برای تمامی ساختمان‌ها تهویه طبیعی واقعی در نظر گرفته شده است. این تهویه بر اساس شرایط دمایی عمل خواهد کرد. به این صورت که هیچ‌گاه دمای داخل نباید کمتر از ۲۲ درجه باشد و مطابق استاندارد اشری، درجه حرارت دمای آسایش برای سیستم سرمایش ۲۴ درجه و برای سیستم گرمایش ۲۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است و همچنین حداقل و حداکثر اختلاف دمای داخل و خارج باید ۰/۱ و ۱۰ درجه باشد. تعداد افراد و روشنایی مصنوعی و نفوذ ناخواسته هوا برای این ساختمان صفر در نظر گرفته شده است. همچنین در این پژوهش کمیت نور روز در فضا را که وابستگی زیادی به کیفیت نور روز دارد، محاسبه می‌شود. معمولاً فضایی که از کمیت نور مناسبی برخوردار باشد، کیفیت خوبی نیز دارد. روشنایی نور روز در محدوده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس برای بهره‌گیری حداکثری از نور روز و کاهش استفاده از نور مصنوعی و به طبع آن کاهش مصرف انرژی انتخاب گردید. طبق مطالعات مرداویج و استانداردهای جهانی مانند IESNA و مبحث سیزده مقررات ملی ساختمان مقدار نور



شکل ۲: نمونه‌ای از گونه مورد مطالعه مدل شده در نرم افزار دیزاین بیلدر (راست) و نمونه‌ای از میزان نسبت پنجره به دیوار، سمت چپ: ۲۵٪ سمت راست: ۴۰٪

**Min** + (انرژی مصرفی ساختمان (بار سرمایش))  
**Max** (نور) + (انرژی مصرفی ساختمان (بار گرمایش))  
 + (تهویه) **Max** (روز)

برای یکسان کردن حداقل و حداکثر تابع کافی است تا عدد **max** منفی شود تا به **min** تبدیل شود. مانند میزان بازدهی و تلفات یک کارخانه که منفی یکدیگر هستند. در این حالت تابع نهایی (رابطه ۲) به صورت زیر می‌باشد:

(معادله ۲)  $a1f1 + a2f2 - a3f3 - a4f4$ : تابع هدف

که در این تابع  $a1 + a2 + a3 + a4 = 1$  می‌باشد. در این مرحله از تحقیق برای مشخص کردن مقادیر ضرایب وزنی از پرسشنامه خبرگان استفاده می‌شود. با استفاده از اطلاعات بدست آمده پرسشنامه، وزن هر معیار نسبت به هدف پژوهش تعیین گردید. جدول ۷ ماتریس مقایسه زوجی معیارها نسبت به هدف و ضرایب وزنی آن‌ها را نشان می‌دهد.

برای رسیدن به اهداف پژوهش که انتخاب گونه و فرم مناسب بر مبنای مصرف انرژی کم و نور روز و تهویه بالا می‌باشد، باید بتوان متغیرها را یکسان سازی واحد کرده و به حالت تابع هدف تعریف نمود. برای این منظور عدد بیشینه هر متغیر را انتخاب و سایر اعداد همان متغیر را بر عدد بیشینه‌اش تقسیم گردید، که برای هر متغیر بازه‌ای بین صفر تا یک ایجاد می‌شود که به صورت عدد فاقد واحد می‌باشد. اگر این عدد به ۱۰۰ ضرب شود، به صورت درصدی قابل بیان خواهد بود. در این مرحله هدف پژوهش به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$f1 = \text{Min}$  (انرژی مصرفی ساختمان (بار سرمایش))

$f2 = \text{Min}$  (انرژی مصرفی ساختمان (بار گرمایش))

$f3 = \text{Max}$  (نور روز) و  $f4 = \text{Max}$  (تهویه)

برای نوشتن تابع هدف با توجه به اهداف پژوهش کافی است تا جمع جبری سه هدف بالا با مشخص کردن ضریب وزنی اشان انجام شود. مقادیر ضریب وزنی به ترتیب  $a1, a2, a3$  نامگذاری می‌شوند.

جدول ۷: ماتریس مقایسه زوجی معیارها

| ضریب وزنی معیار نسبت به هدف | تهویه طبیعی | نور روز حداکثری | انرژی مصرفی |            | معیارهای مقایسه |             |
|-----------------------------|-------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-------------|
|                             |             |                 | بار گرمایش  | بار سرمایش |                 |             |
| ۰.۴۶                        | ۳.۳۳        | ۳               | ۲.۵۰        | ۱          | بار سرمایش      | انرژی مصرفی |
| ۰.۲۷                        | ۲.۶۶        | ۲.۸۳            | ۱           | ۰.۴۰       | بار گرمایش      |             |
| ۰.۱۷                        | ۲.۶۶        | ۱               | ۰.۳۵        | ۰.۳۳       | نور روز حداکثری |             |
| ۰.۱۰                        | ۱           | ۰.۳۷            | ۰.۳۷        | ۰.۳۰       | تهویه طبیعی     |             |

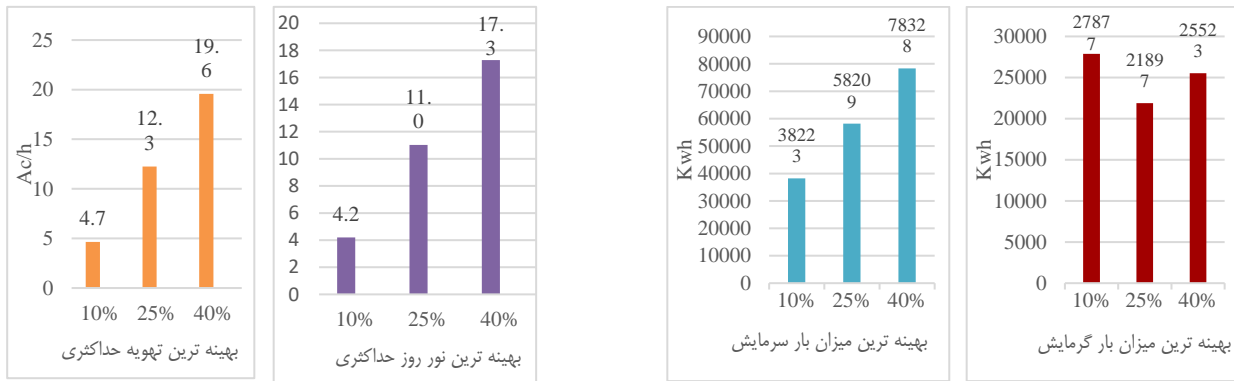
## یافته‌ها

نسبی بالاتر میزان بار گرمایش و سرمایش کمتر خواهد بود. در این راستا نتایج حاصل از شبیه‌سازی گونه‌های ساختمانی صحت این مطلب را تایید می‌کند که بالاترین تراکم نسبی یعنی ۰.۹۵ کمترین میزان مصرف انرژی را دارا می‌باشد. اما با توجه به هدف پژوهش که انتخاب گونه ساختمانی بر مبنای بار گرمایش و سرمایش حداقل و نور روز و تهویه حداکثر می‌باشد، انتخاب فرم بهینه ساختمان با روش مقایسه‌ای به تنهایی پاسخگو نیست. چرا که مقادیر حاصل شده برای هر کدام از متغیرها با دیگری دارای ارتباط معنادار مشخصی نمی‌باشد و قابل تحلیل نیست. ساختمانی که در حالت ۱۰ درصد نسبت پنجره به دیوار دارای بار انرژی حداقل می‌باشد، دارای نور روز و تهویه حداکثر نمی‌باشد.

پس از شبیه‌سازی و انجام محاسبات ۶۶۰ حالت از گونه‌های ساختمانی، نتایج حالت‌های بهینه در نسبت‌های مختلف پنجره به دیوار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مبنای این مقایسه در ابتدا برای بار گرمایش و سرمایش ساختمان (میزان مصرف انرژی) می‌باشد. در تمام حالت‌ها مطابق با جدول ۸ گونه با نسبت تراکم نسبی ۰.۹۵ با بیشترین تراکم نسبی و با ۱۰ درصد نسبت پنجره به دیوار و همچنین در حالت West(270)، دارای کمترین نیاز گرمایش و سرمایش می‌باشد. همانطور که در مطالعات پیشین مطرح شد هرچه نسبت سطح جانبی به حجم کل ساختمان کمتر باشد، اتلاف حرارت و میزان مصرف انرژی نیز کمتر خواهد بود [۴۶-۴۲]. به عبارتی هر چه تراکم

جدول ۸: بهینه ترین حالت‌های هر درصد

| تهویه<br>ac/h | ضرب نور<br>روز | بار سرمایش<br>kWh | بار گرمایش<br>kWh | حالت بهینه           | درصد پنجره به دیوار |
|---------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| -             | -              | -                 | ۲۷۸۷۷             | West(270) RC=0.95/   | ۱۰٪                 |
| -             | -              | ۳۸۲۲۳             | -                 | RC=0.95/East(270)    |                     |
| -             | ۴.۲            | -                 | -                 | RC=0.54/Uniform(180) |                     |
| ۴.۶۵          | -              | -                 | -                 | RC=0.54/Uniform(90)  |                     |
| -             | -              | -                 | ۲۱۸۷۹             | RC=0.95/East(90)     | ۲۵٪                 |
| -             | -              | ۵۸۲۰۹             | -                 | RC=0.95/East(270)    |                     |
| -             | ۱۱.۰۲          | -                 | -                 | RC=0.54/Uniform(90)  |                     |
| ۱۲.۲۵         | -              | -                 | -                 | RC=0.54/Uniform(90)  |                     |
| -             | -              | -                 | ۲۵۵۲۳             | RC=0.95/East(90)     | ۴۰٪                 |
| -             | -              | ۷۸۲۳۸             | -                 | RC=0.95/East(270)    |                     |
| -             | ۱۷.۲۸          | -                 | -                 | RC=0.54/Uniform(90)  |                     |
| ۱۹.۵۸         | -              | -                 | -                 | RC=0.52/Uniform(90)  |                     |



شکل ۳: مقایسه بهینه‌ترین حالت‌های بار گرمایش و سرمایش (راست)، تهویه و نور روز برای درصد‌های مختلف (چپ)

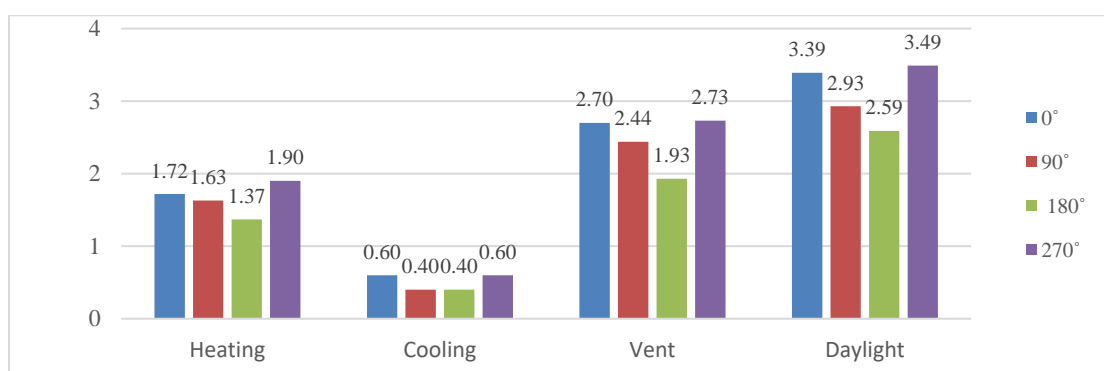
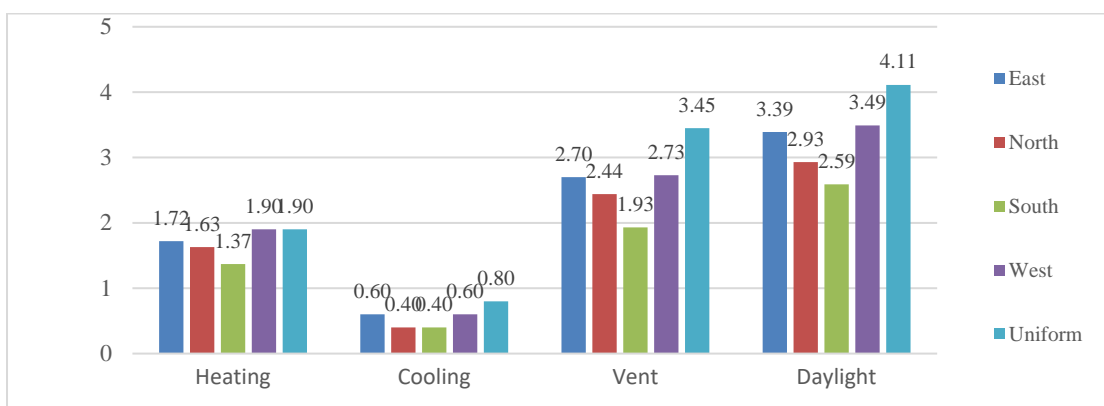
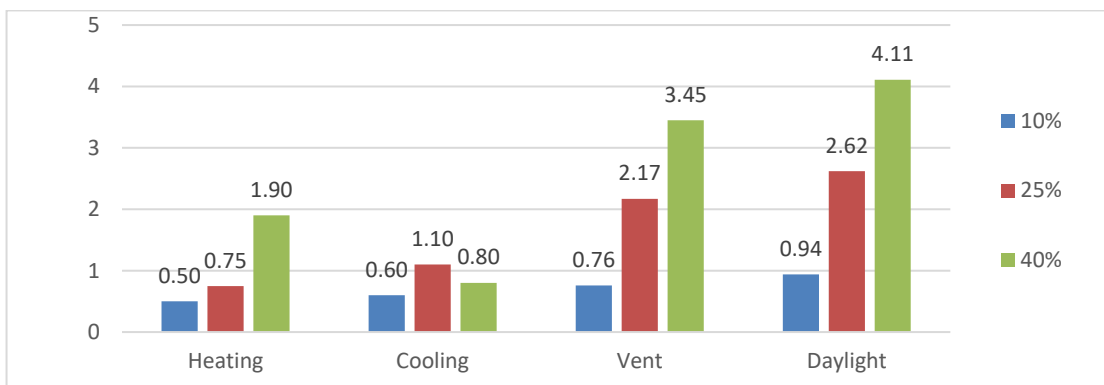
۹ مشخص شده و در شکل ۴ با هم مقایسه شده‌اند. مراحل بهینه‌سازی در ابتدا به حالت کلی برای سه درصد نسبت پنجره به دیوار و سپس برای ۵ حالت نحوه توزیع پنجره در دیوار و در انتها برای چهار جهت جهت‌گیری به تفکیک مشخص شده است.

از اینرو همانطور که در قسمت مواد و روش‌ها عنوان شد، متغیرها به حالت per unit در آمدند و ضریب وزنی هر کدام از این متغیرها به کمک پرسشنامه خبرگان بدست آمده و تابع هدف بر مبنای آن نوشته شد. میزان ضریب وزنی حالت‌های بهینه بار گرمایش، بار سرمایش، ضریب نور روز و تهویه برای هر سه نسبت پنجره به دیوار که توسط تابع هدف در جدول

جدول ۹: مشخصات فرم‌های بهینه ساختمانی برای تراکم نسبی متفاوت

| تابع هدف | ضریب نور روز (pu) | تهویه (pu) | بار سرمایش (pu) | بار گرمایش (pu) | ضریب نور روز | تهویه ac/h | بار سرمایش kwh | بار گرمایش kwh | ساختمان                | WW R    |                           |          |
|----------|-------------------|------------|-----------------|-----------------|--------------|------------|----------------|----------------|------------------------|---------|---------------------------|----------|
| 0.174    | 0.94              | 0.76       | 0.6             | 0.5             | 3.9          | 3.51       | 54417.29       | 39332.70       | Rc= 0.54/ North 180    | 10%     | درصد پنجره به دیوار       |          |
| 0.063    | 2.62              | 2.17       | 1.1             | 0.75            | 11.01        | 10.07      | 104474.45      | 58102.97       | Rc= 0.54/ Uniform 0    | 25%     |                           |          |
| -0.165   | 4.11              | 3.45       | 0.8             | 1.90            | 17.27        | 16.06      | 73083.5758     | 147796.58      | Rc= 0.54/ Uniform 180  | 40%     |                           |          |
| -0.091   | 3.39              | 2.70       | 0.6             | 1.72            | 14.24        | 12.54      | 58060.2494     | 133738.85      | Rc= 0.63/ 90/ 40%      | East    | نحوه توزیع پنجره در دیوار |          |
| -0.100   | 2.93              | 2.44       | 0.4             | 1.63            | 12.32        | 11.32      | 40411.5952     | 126630.70      | Rc= 0.95/ 180/ 40%     | North   |                           |          |
| -0.083   | 2.59              | 1.93       | 0.4             | 1.37            | 10.88        | 8.97       | 35821.9943     | 106713.94      | Rc= 0.81/ 0/ 40%       | South   |                           |          |
| -0.092   | 3.49              | 2.73       | 0.6             | 1.90            | 14.67        | 12.69      | 52154.2825     | 147626.86      | Rc= 0.63/ 270/ 40%     | West    |                           |          |
| -0.165   | 4.11              | 3.45       | 0.8             | 1.90            | 17.27        | 16.06      | 73083.5758     | 147796.58      | Rc= 0.54/ 180/ 40%     | Uniform |                           |          |
| -0.164   | 4.11              | 3.45       | 0.8             | 1.90            | 17.26        | 16.06      | 73083.5758     | 147796.58      | Rc= 0.54/ Uniform/ 40% | 0       |                           | جهت‌گیری |
| -0.091   | 3.39              | 2.70       | 0.6             | 1.72            | 14.24        | 12.54      | 58060.2494     | 133738.85      | Rc= 0.63/ East/ 40%    | 90      |                           |          |

|        |      |      |     |      |       |       |            |           |                        |     |
|--------|------|------|-----|------|-------|-------|------------|-----------|------------------------|-----|
| -0.165 | 4.11 | 3.45 | 0.8 | 1.90 | 17.27 | 16.06 | 73083.5758 | 147796.58 | Rc= 0.54/<br>Uniform   | 180 |
| -0.092 | 3.49 | 2.73 | 0.6 | 1.90 | 14.67 | 12.69 | 52154.2825 | 147626.86 | Rc= 0.63/<br>West/ 40% | 270 |



شکل ۴: مقایسه بهینه‌ترین حالت‌های بار گرمایش، سرمایش، تهویه و نور روز در حالت یکسان‌سازی برای درصدهای مختلف (بالا)، حالت‌های مختلف جهت‌گیری (وسط)، نحوه توزیع پنجره به دیوار (پایین)

## بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش ۱۱ گونه ساختمانی با تراکم نسبی متفاوت در دیزاین بیلدر شبیه سازی گردید و نتایج به صورت نمودارها به حالت مقایسه‌ای در چند مرحله قرار داده شد. به منظور بررسی نتایج بدست آمده ناشی از میزان بار گرمایش، سرمایش و نور روز حداکثری و تهویه مطبوع و قابل مقایسه شدن متغیرها و بهینه سازی آن‌ها تابع هدف نوشته شد. در ادامه فرم‌های بهینه در ۴ حالت جهت گیری و ۳ حالت درصد پنجره به دیوار و ۵ نوع حالت توزیع پنجره در جهات مختلف، برای تراکم نسبی متفاوت محاسبه گردید.

تمامی حالات فرم‌های ساختمانی در تمامی ۳ حالت نسبت پنجره به دیوار و ۵ حالت توزیع پنجره در دیوار و ۴ حالت جهت گیری در حالت یکسان سازی واحد و با توجه به ضریب وزنی و تابع هدف مشخص شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد فرم ساختمانی با تراکم نسبی ۰.۵۴ و در حالت Uniform 180 و  $wwr=40\%$  پاسخ تابع هدف می‌باشد که این فرم بر مبنای ضرایب وزنی مشخص شده دارای کمترین بار مصرفی انرژی و بالاترین مقدار نور روز و بالاترین مقدار تهویه می‌باشد و به عنوان فرم بهینه برای تراکم نسبی متفاوت انتخاب می‌شود.

بر اساس مطالعه حاضر، اعتبار شاخص‌های هندسه ساختمان مانند تراکم نسبی RC نباید به تنهایی مورد ارزیابی قرار بگیرد. ارتباط بین مقادیر این شاخص‌ها و بارهای گرمایش و سرمایش شبیه سازی شده ساختمان‌ها با اشکال مختلف، جهت گیری، درصد نسبت پنجره به دیوار و نحوه توزیع پنجره به دیوار قابل توجه می‌باشد. استفاده از چنین شاخص‌هایی در استانداردهای انرژی (برای ارزیابی بار گرمایش و سرمایش) ممکن است موجه باشد اما با این حال، این شاخص‌ها هندسه یک ساختمان را تا حدی که برای ارزیابی سایر شرایط آسایش نیاز می‌باشد، نشان نمی‌دهند. بر اساس نتایج، می‌توان ارتباط معنادار بین متغیرهای میزان بارگرمایش و سرمایش و میزان نور حداکثری و تهویه بالا را به صورت مجزا مد نظر قرار داد. اما با توجه به

نتیجه کلی و معرفی فرم ساختمانی بهینه علی‌رغم داشتن نور روز و تهویه بالا این گونه ساختمانی تراکم نسبی پایینی دارد که مطابق مطالعات پیشین انتظار می‌رفت برای میزان بارگرمایش و سرمایش، تراکم نسبی بالا می‌بود. چرا که عنوان شده بود هرچه فشردگی و تراکم نسبی ساختمان بیشتر باشد، مصرف انرژی کمتر خواهد بود [۴۶-۴۲]. این نتیجه در بخش اول مطالعه حاضر که صرفاً بررسی بار گرمایش و سرمایش بود، محقق شد اما با در نظر گرفتن سایر شرایط آسایش مانند نور روز و تهویه در بخش دوم و نوشتن تابع هدف با توجه به ضرایب وزنی و یکسان سازی واحد برای قابل مقایسه شدن متغیرها مشاهده شد که فرم بهینه ساختمانی تراکم نسبی پایین دارد. در نتیجه می‌توان گفت که در نظر گرفتن انواع متغیرها برای ایجاد آسایش و منطبق شدن شبیه سازی و طراحی با عملکرد و میزان اهمیت متغیرها و ضریب وزنی آن‌ها برای تصمیم گیری در مورد تراکم نسبی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. فراتر از پتانسیل کدها و استانداردهای مربوطه، شاخص‌های عددی قابل اعتماد هندسه را می‌توان به عنوان یک بعد طراحی "فضای طراحی-عملکرد"، که تعریف شده با ابعاد طراحی و عملکرد چندگانه است، پذیرفت [۴۵]. پژوهش به خوبی دستاوردهای مشابه در پژوهش‌های قبلی را تایید می‌کند. [۶۰-۴۷] متغیرهای طراحی می‌توانند ویژگی‌های مختلف هندسی (حجم، شکل، فشردگی) و معنایی (انتقال حرارتی محوطه ساختمان، جرم حرارتی، بارهای داخلی) طراحی را به تصویر بکشند. به همین ترتیب، هر بعد عملکرد، مقادیر یک شاخص عملکرد خاص را در خود جای می‌دهد (به عنوان مثال، مصرف انرژی، تهویه، سطوح روشنایی). فضای طراحی-عملکرد می‌تواند زمینه موثری برای ارزیابی و سنجش مقایسه-ای عملکرد طرح‌های ساختمانی را در مراحل اولیه فرآیند طراحی فراهم کند. در مورد طراحی یک ساختمان جدید، به طور کلی، طراحان عملکردهایی را بر اساس قاعده کلی مد نظر قرار می‌دهند که باید برای دستیابی به فرم بهینه، عملکردهای مختلف مانند بار گرمایش، سرمایش، نور روز و ... را با توجه به اقتضای پروژه اولویت بندی کرده و سپس

**منابع مالی:** این مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری لیلا مختاری با عنوان "بهینه‌سازی تراکم نسبی فرم کلی ساختمانهای متعارف مسکونی در تهران با هدف بهره‌وری در مصرف انرژی ۱۳۸۰-۱۳۹۵" به راهنمایی دکتر شهاب کریمی نیا و مشاوره دکتر منصوره کیان ارثی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کنند. در این راستا بهینه‌سازی فرم ساختمان باید ابزار استاندارد طراحان در مراحل اولیه پروژه معماری باشد. پیشنهاد پژوهش‌های آتی در این حوزه، نشان دهنده جایگاه دستاوردهای پژوهش در بهره‌وری و مصرف هوشمندانه انرژی است. عوامل متعددی وجود دارد که می‌تواند نتایج نشان داده شده در این پژوهش را تحت تاثیر قرار دهد. این پژوهش با روش مدل حبه‌ای و برای فرم‌های متعارف مسکونی تهران انجام شده است، پژوهش‌های آتی می‌تواند برای مدلسازی ساختمان از روش‌های دیگر بهره‌گیرد و از فرم‌های نامتعارف ساخت و ساز و برای اقلیم‌های متنوع و در طبقات مختلف و حتی در مقیاس بناهای بلند مرتبه استفاده کند. این پژوهش سعی در درک تاثیر جهت‌گیری ساختمان بر میزان مصرف انرژی و نور روز و تهویه داشته است. بر این اساس از در نظر گرفتن همجواری و سایت مشخص برای ساختمان اجتناب کرده بود. پژوهش‌های آتی می‌تواند ساختمان را در سایت مشخص و با در نظر گرفتن همجواری‌ها در نظر گیرد. همچنین در این پژوهش چون تاثیر تراکم نسبی ساختمان بر مصرف انرژی و نور روز و تهویه مد نظر بوده است، از قرار دادن سایه‌بان برای ساختمان خودداری نموده است. پژوهش‌های آتی می‌تواند با در نظر گرفتن سایه‌بان به دو صورت ثابت و متغیر برای ساختمان انجام شود.

**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**سهام نویسندگان:** نویسنده اول، پژوهشگر اصلی، برداشت میدانی، تدوین محتوا با سهم (۴۵٪)، نویسنده دوم، پژوهشگر اصلی، ایده اصلی مقاله، کنترل نتایج، مدیریت نتایج با سهم ۳۵٪، نویسنده سوم، پژوهشگر کمکی، مدیریت نتایج و کنترل داده‌ها با سهم ۲۰٪.

- 9- Panwar N.L, Kaushik S.C, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(3):1513-1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
- 10- Ghanbaran A, Hosseinpour M A. Assessment of design parameter influence on energy efficiency in educational buildings in Tehran's climate. *Naqshejahan-Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2016 Nov 10;6(3):51-62. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1395.6.3.3.5>
- 11- Dür M, Nowak N. Packing solar cells on a roof. *Optimization and Engineering*. 2009; 10(3): 397-408. <https://doi.org/10.1007/s11081-008-9055-1>
- 12- Eskandari H, Saedvandi M, Mahdavinejad M. The impact of Iwan as a traditional shading device on the building energy consumption. *Buildings*. 2018 Jan;8(1):3. <https://doi.org/10.3390/buildings8010003>
- 13- Vanderbei R.J. Case studies in trajectory optimization: Trains, planes, and other pastimes. *Optimization and Engineering*. 2001 Jun;2(2):215-243. <https://doi.org/10.1023/A:1013145328012>
- 14- Mahdavinejad M. Designerly Approach to Energy Efficiency in High-Performance Architecture Theory. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2020 Sep 10;10(2):75-83. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1399.10.2.7.5>
- 15- Quaglia C.P, Yu N, Thrall A.P, Paolucci, S. Balancing energy efficiency and structural performance through multi-objective shape optimization: Case study of a rapidly deployable origami-inspired shelter. *Energy and Buildings*. 2014;82:733-745. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.063>
- 16- Mahdavinejad M, Zia A, Larki AN, Ghanavati S, Elmi N. Dilemma of green and pseudo green architecture based on LEED norms in case of developing countries. *International journal of sustainable built environment*. 2014 Dec 1;3(2):235-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2014.06.003>
- 1- Hojati A, Saedvandi M, De Anjelis E. Analysis of Performance of Three Wind-catchers for Ventilation of Contemporary Houses in Isfahan Hot and Arid Climate. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2021 Dec 10;11(3):16-32. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.3.7.4>
- 2- Pourjafar M, Akbarian R, Ansari M, Pourmand H. Conceptual approach in Persian architecture. *Soffeh*. 2008;16(3-4):90-105. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.1683870.1386.16.3.6.7>
- 3- Mahdavinejad M, Hosseini SA. Data mining and content analysis of the jury citations of the Pritzker Architecture prize (1977–2017). *Journal of Architecture and Urbanism*. 2019; 43(1):71-90. <https://doi.org/10.3846/jau.2019.5209>
- 4- Bazazzadeh H, Pilechiha P, Nadolny A, Mahdavinejad M, Hashemi safaei S. The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland. *Energies*. 2021;14(14),4084; <https://doi.org/10.3390/en14144084>
- 5- Finnegan S, Jones C, Sharples S. The embodied CO<sub>2e</sub> of sustainable energy technologies used in buildings: A review article. *Energy and Buildings*. 2018;181:50-61. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.037>
- 6- Saadatian O, Sopian K, Lim C.H, Asim N, Sulaiman M.Y. Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(8):6340-6351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.032>
- 7- Jeong-Tak J, Jae-Weon J. Optimization of a free-form building shape to minimize external thermal load using genetic algorithm. *Energy and Buildings*. 2014;85:473-482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.080>
- 8- Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G. Energy efficient design of building: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012;16:3559-3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>



- factors fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy and Buildings*. 2013; 57: 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- 26- Faiazi F, Noorani M, Ghaedi A, Mahdavinejad M. Design an optimum Pattern of Orientation in Residential Complex by Analyzing the Level of Energy Consumption (Case Study: Maskan Mehr Complexes, Tehran, Iran). *International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Procedia Engineering*. 2011; 21: 1179-1187. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2128>
- 27- Mi Z, Guan D, Liu Z, Liu J, Viguié V, Fromer N, Wang Y. Cities: The core of climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Jan 10;207:582-9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.034>
- 28- Avazalipour Haqiqatparast Sh, Taghizadeh Y, Zbihi H. Designing a native pattern in arid climate to reduce energy consumption in housing sector (Case study: Yazd). *Environmental Science and Technology*. 2019; 21(3): 227-236. Available from: <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=532440>
- 29- Anonymous. Global Energy Architecture Performance Index. The Ministry of Industries' and Mines'. 2017; [Persian] Available from: <https://mimt.gov.ir/s/mfaKGs>
- 30- Shahsavari, A., Yazdi, F.T. & Yazdi, H.T. Potential of solar energy in Iran for carbon dioxide mitigation. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2019; 16: 507-524. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1779-7>
- 31- Solaymani S. A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran. *Sustainability*. 2021; 13(13):7328. <https://doi.org/10.3390/su13137328>
- 32- Mokhtari L, Mahdavinejad M, Kariminia SH, Kianersi M. The effect of general form and relative compactness of Tehran residential buildings on pollution resulted from heating in winter season. *Mohit Shenasi*. 2019; 45(2): 253-268. [Persian] <https://doi.org/10.22059/jes.2019.267837.1007760>
- 33- Mahdavinejad M. Bemanian M. Hajian M. Pilechiha P. Usage of Indigenous
- 17- Roshan G.R, Orosa J.A, Nasrabadi T. Simulation of climate change impact on energy consumption in buildings, case study of Iran. *Energy Policy*. 2012; 49: 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.020>
- 18- Schlueter A, Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance. *Automation in Construction*. 2018; 86:33-43. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.021>
- 19- Li D.H, Yang L, Lam J.C. Zero energy buildings and sustainable development implications—A review. *Energy*. 2013; 54; 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.070>
- 20- Mahdavinejad M, Salehnejad H, Moradi N. An ENVI-met Simulation Study on Influence of Urban Vegetation Congestion on Pollution Dispersion. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2018 Jan 1;15(2):187-94. <https://doi.org/10.3233/ajw-180031>
- 21- Ziaee N, Vakilinezhad R. Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran. *Energy and Buildings*. 2022; 254. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111590>
- 22- Attarian K, SafarAli Najar B. Defining Sustainability Characteristics for Residential Buildings in Hot and Humid Climate (Case Study: Traditional Houses of Ahwaz). *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2018 Dec 10;8(3):161-170. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1397.8.3.3.9>
- 23- Diba D. Contemporary architecture of Iran. *Architectural Design*. 2012; 82(3):70-9. <https://doi.org/10.1002/ad.1406>
- 24- Fotros M, Ferdosi M, Mehrpeima H. Investigating the effect of energy intensity and urbanization on environmental degradation in Iran (Collective Analysis). *Mohit Shenasi*. 2012; 37(60): 13-22. [Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10258620.1390.37.60.2.6>
- 25- Susorva I, Tabibzadeh M, Rahman A, Clack L.H, Elnimeiri M. The effect of geometry

- 2001;2(4):453-468.  
<https://doi.org/10.1023/A:1016046606831>
- 41- Gratia E, De Herde A. Design of low energy office buildings. *Energy and Buildings*. 2003;35(5):473-491.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00160-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00160-3)
- 42- Talaei M, Mahdavejad M, Azari R, Prieto A, Sangin H. Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. *Journal of Building Engineering*. 2020 Mar 1;42:102832.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102832>
- 43- Moazzeni MH, Ghiabaklou Z. Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. *Buildings*. 2016 Sep;6(3):26.  
<https://doi.org/10.3390/buildings6030026>
- 44- Kyu Yi Y, Malkawi, A.M. Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation. *Automation in Construction*. 2009;18:825-833.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.03.006>
- 45- Pessenlehner W, Mahdavi A. Building morphology, transperence, and energy performance. *Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands*. 2003; 1025-1030.  
[www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03\\_1025\\_1032.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_1025_1032.pdf)
- 46- Araji M T. Surface-to-volume ratio: How building geometry impacts solar energy production and heat gain through envelopes. *Sustainable Built Environment Conference*. 2019; 012034. doi:10.1088/1755-1315/323/1/012034
- 47- Zafarmandi S, Mahdavejad M. Technology of Modern Windcatchers: A Review. *Int. J. Architect. Eng. Urban Plan*. 2021 Jul; 31(3):1-11.  
<https://doi.org/10.22068/ijaup.31.3.549>
- 48- Mahdavejad M, Javanroodi K. Natural ventilation performance of ancient wind catchers, an experimental and analytical study—case studies: one-sided, two-sided and four-sided wind catchers. *International journal of energy technology and policy*, 2014
- Architectural Patterns for Manufacturing Industrial Housing, Case: Renovation Project of Odlajan of Tehran, Iran. *Advanced Materials Research*. 2012; 548: 875-879.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.548.875>
- 34- Hadianpour M, Mahdavejad M, Bemanian M, Haghshenas M, Kordjamshidi M. Effects of windward and leeward wind directions on outdoor thermal and wind sensation in Tehran. *Building and Environment*. 2019 Mar 1;150:164-180.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.053>
- 35- Schlueter A, Geyer P. Linking BIM and Design of Experiments to balance architectural and technical design factors for energy performance. *Automation in Construction*. 2018; 86:33-43.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.021>
- 36- Hadianpour M, Mahdavejad M, Bemanian M, Nasrollahi F. Seasonal differences of subjective thermal sensation and neutral temperature in an outdoor shaded space in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 2018 May 1; 39: 751-64.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.003>
- 37- Mirhashemi, S., Shapourian, S., Ghiabaklou, Z. A New Method of Optimizing Single Glazed Windows. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memory Va Shahrsazi*. 2010;2(43):43-48. [Persian]  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.22286020.1389.2.43.4.5>
- 38- Haghshenas M, Hadianpour M, Matzarakis A, Mahdavejad M, Ansari M. Improving the suitability of selected thermal indices for predicting outdoor thermal sensation in Tehran. *Sustainable Cities and Society*. 2021 Jul 27:103205.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103205>
- 39- Fowler K.R, Kelley C.T, Miller C.T, Kees C.E, Darwin R.W, Reese J.P, Reed M.S. Solution of a well-field design problem with implicit filtering. *Optimization and Engineering*. 2004;5(2):207-234.  
<https://doi.org/10.1023/B:OPTE.0000033375.33183.e7>
- 40- Madsen J.I, Langthjem M. Multifidelity response surface approximations for the optimum design of diffuser flows. *Optimization and Engineering*.

- 55- Bolouhari S, Barbera L, Etesam I. Learning Traditional Architecture for Future Energy-Efficient Architecture in the Country; Case Study: Yazd City. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 2020 Sep 10;10(2):85-93. [Persian]  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1399.10.2.3.1>
- 56- Fallahtafti R, Mahdavejad M. Window geometry impact on a room's wind comfort. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021 Mar 24;28(9):2381-2410.  
<https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0075>
- 57- Javanroodi K, Nik VM, Mahdavejad M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 49:101597.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597>
- 58- Rasoolzadeh M, Moshari M. Prioritizing for Healthy Urban Planning: Interaction of Modern Chemistry and Green Material-based Computation. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2021 May 10;11(1):94-105. [Persian]  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.1.7.0>
- 59- Fatahi K, Nasrollahi N, Ansarimanesh M, Khodakarami J, Omranipour A. Comparison of Thermal Comfort Range of Finn Garden and Historical texture of Kashan. *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2021 May 10;11(1):53-63. [Persian]  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.1.4.7>
- 60- Matzarakis A, Rutz F, Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International journal of biometeorology*. 2010 Mar 1;54(2):131-9.  
<https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Jan 1;10(1):36-60.  
<https://doi.org/10.1504/IJETP.2014.065036>
- 49- Javanroodi K, Mahdavejad M, Nik VM. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*. 2018; 231: 714-46.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.116>
- 50- Bazazzadeh H, Świt-Jankowska B, Fazeli N, Nadolny A, Safar Ali Najar B, Hashemi Safaei S, Mahdavejad M. Efficient Shading Device as an Important Part of Daylightophil Architecture; a Designerly Framework of High-Performance Architecture for an Office Building in Tehran. *Energies*. 2021 December 8;14(24), 8272.  
<https://doi.org/10.3390/en14248272>
- 51- Ahmadi J, Mahdavejad M, Asadi S. Folded double-skin façade (DSF): in-depth evaluation of fold influence on the thermal and flow performance in naturally ventilated channels. *International Journal of Sustainable Energy*. 2021 Jun 16:1-30.  
<https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1941019>
- 52- Valitabar M, Mohammadjavad M, Henry S, Peiman P. A dynamic vertical shading optimisation to improve view, visual comfort and operational energy. *Open House International*. 2021 Jul 9;46(3):401-415.  
<https://doi.org/10.1108/OHI-02-2021-0031>
- 53- Eslamirad N, Kolbadinejad SM, Mahdavejad M, Mehranrad M. Thermal comfort prediction by applying supervised machine learning in green sidewalks of Tehran. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2020 Apr 28; 9(4):361-374.  
<https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2019-0028>
- 54- Ahmadi J, Mahdavejad M, Larsen OK, Zhang C, Zarkesh A, Asadi S. Evaluating the different boundary conditions to simulate airflow and heat transfer in Double-Skin Facade. *Building Simulation*. 2021 Sep 16:1-17. Tsinghua University Press.  
<https://doi.org/10.1007/s12273-021-0824-5>