

## ■ Understanding the Concurrent Effect of the Building Facade Glazing Percentage and Orientation on Energy Consumption of Schools in Iran Humid Temperate Climate

**Reza Amiri Fard, PhD (corresponding author)**

Faculty of Architecture and Urban Studies, Art University of Isfahan

**Mahmoud Reza Saghafi, PhD**

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Design, Art University of Isfahan

**Mansoureh Tahbaz, PhD**

Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University

Orientation and the building facade glazing percentage are two parameters necessary to be considered during the early stages of architectural design in order to determine the location of the building on site and control the balance between the transparent and opaque parts of its envelope. The aim of this research is to specify the optimum values of orientation and glazing percentage of building facade and finding the effect of deviating the variables from the optimum values on the total building energy consumption. The cases of this research are the schools constructed based on the current standards and specifications of Iran's Organization for Renovating and Developing Schools in humid temperate climate. Due to interrelation between these two parameters, their impacts are studied concurrently. Research questions are: 1-What is the optimum orientation angle and facade glazing percentage of school buildings in designated climate, in terms of the lowest energy consumption? 2-What is the sensitivity factor of these variables in different situations on total energy consumption of the building? 3-What is the differences of changes due to deviation from the optimum values, for each parameter? In this research the Latin Hyper-cube method is used for sampling the input values; and Designbuilder program with Energy Plus simulation engine is used for modeling and analysis. According to the results of this study south-facing buildings have the optimum orientation with whatever glazing percentage. However, the optimum glazing percentage depends on the building orientation and would differ from 40 to 55 percent. This study shows that increasing the glazing percentage of school buildings up until 40 percent for east-oriented buildings has the most significant sensitive effect on building energy consumption, whereas increasing it more than this value didn't show a considerable effect.

**Keywords:** Glazing, Orientation, Building Energy, Humid Temperate Climate, School Architecture.

# بررسی تأثیر هم‌زمان درصد سطوح شفاف نما و جهت‌گیری بنا بر میزان مصرف انرژی مدارس در اقلیم معتدل و مرطوب ایران<sup>۱</sup>

رضا امیری فرد<sup>۲</sup>

محمود رضا ثقفی<sup>۳</sup>

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی،  
دانشگاه هنر اصفهان

منصوره طاهباز<sup>۴</sup>

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی،  
دانشگاه شهید بهشتی

دریافت: ۱۲ تیر ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۶ فروردین ۱۳۹۹

(صفحه ۶۵-۴۹)

کلیدواژگان: سطح بازشو، جهت‌گیری بنا، انرژی ساختمان، اقلیم معتدل و مرطوب، معماری مدارس.

## چکیده

جهت‌گیری و میزان سطوح شفاف بنا دو متغیری هستند که به آن‌ها در مراحل اولیه طراحی معماری به مثابه قرارگیری در سایت و تعادل بین سطوح کدر و شفاف پرداخته می‌شود. هدف در این تحقیق تعیین جهت‌گیری بهینه و درصد مناسب سطوح شفاف ساختمان، همچنین اندازه‌گیری تفاوت شرایط بهینه بر میزان مصرف انرژی نهایی است. نمونه موردی این تحقیق بناهای آموزشی (مدارس) ساخته‌شده با استانداردها و مشخصات ساخت فعلی سازمان نوسازی مدارس در اقلیم معتدل و مرطوب ایران (شهر رشت) است. با توجه به تأثیر متقابل متغیرهای ذکرشده در این تحقیق، تأثیر آن‌ها به صورت هم‌زمان و پیوسته بررسی می‌شود. در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی Design Builder V4 استفاده می‌گردد که دارای موتور شبیه‌ساز انرژی پلاس است. بر مبنای نتایج این مطالعه، به صورت کلی جهت‌گیری بهینه بنا سمت جنوب است، در صورتی که درصد بهینه سطوح شفاف بنا بسته به جهت‌گیری آن می‌تواند بین ۴۰ تا ۵۵٪ متغیر باشد. افزایش

مقدار سطوح شفاف در جهت شرق یا تغییر جهت‌گیری بنا در شرایطی که میزان سطوح شفاف بنا بیشتر از ۴۰٪ است، بیشترین حساسیت تأثیر را روی میزان مصرف انرژی بنا دارد.

## مقدمه

مهم‌ترین تصمیمات طراح که بر میزان مصرف نهایی انرژی بنا تأثیر می‌گذارند، در مراحل اولیه طراحی گرفته می‌شوند. در بسیاری موارد کارایی نهایی ساختمان به شدت متکی بر کالبد معماری و تصمیمات اولیه طراح است.<sup>۵</sup> جهت‌گیری و میزان سطوح شفاف بنا دو متغیری هستند که به آن‌ها تحت عناوین قرارگیری در سایت و تعادل بین سطوح کدر و شفاف و نسبت پنجره به دیوار<sup>۶</sup> یا به مساحت اتاق در مراحل اولیه طراحی بنا پرداخته می‌شود. از طرف دیگر، این دو در مقایسه با سایر متغیرهای ساختمانی تا مراحل پایانی طراحی کمتر تغییر می‌کنند.<sup>۷</sup> بنابراین شناخت این دو متغیر و دانستن میزان تأثیر و حساسیت<sup>۸</sup> تغییرات آن‌ها به طراح معماری کمک زیادی برای کاهش

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری نگارنده اول است با عنوان *ارزیابی انرژی‌کارایی از طریق تحلیل حساسیت متغیرهای ساختمانی که به راهنمایی نگارندگان دوم و سوم در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اصفهان در اسفندماه ۱۳۹۷ دفاع شده است.*

۲. نویسنده مسئول، دکتری معماری اسلامی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان،

ramirifard@gmail.com

3. saghafi@au.ac.ir

4. tahbaz-m@sbu.ac.ir

5. S.P. Bambardekar & Ute Poerschke, "The Architect as performer of Energy Simulation in the Performance Based Design. Building Simulation", p. 1307.

6. Win-to-Wall

7. M. Donn, et al,

"Simulation in the Service of Design – Asking the Right Questions", p. 1314.

بیشتر مصرف انرژی خواهد کرد. از سوی دیگر، این دو متغیر ممکن است دارای اثر متقابل بر یکدیگر باشند، که میزان حساسیت تأثیر آن‌ها را بر میزان مصرف انرژی بنا تغییر دهد.

با تغییر هر یک از متغیرهای طراحی میزان مصرف انرژی نهایی تغییر می‌کند. در این پژوهش منظور از حساسیت نسبت میزان تغییر مصرف انرژی نهایی یک متغیر به ازای تغییر آن متغیر است، که این اهمیت آن را نشان می‌دهد.

در این پژوهش با تأکید بر اهمیت تصمیمات معماری در مراحل اولیه ناظر بر مقدار مصرف انرژی سالیانه بنا، تأثیر هم‌زمان درصد سطوح شفاف نما و جهت‌گیری بنا بر میزان مصرف انرژی برای نمونه پایه مدارس بررسی می‌شود. در این خصوص، پس از مرور مطالعات انجام‌شده در این زمینه و تعریف نمونه‌های پایه، نتایج کمی شبیه‌سازی‌ها بر مبنای داده‌های ورودی تصادفی به صورت دیاگرام عرضه می‌شود. در پایان تحلیل نتایج به‌دست‌آمده به گزاره‌های کاربردی قابل‌استفاده در مراحل اولیه طراحی معماری تبدیل و به صورت نتایج مطالعه بیان می‌شود.

## ۱. پیشینه تحقیق

جهت‌گیری: جهت‌گیری ساختمان یکی از اولین متغیرهای مورد توجه در طراحی معماری است. موربسی و همکاران در مطالعه‌ای در مورد ساختمان‌های مسکونی در اقلیم معتدل نشان دادند که جهت‌گیری یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر مصرف انرژی است<sup>۸</sup>. در واقع با جهت‌گیری مناسب می‌توان، با افزایش استفاده از نور روز، انرژی الکتریکی مورد نیاز برای روشنایی را کاهش داد، همچنین میزان دریافت انرژی گرمایشی خورشید را کنترل کرد. بنابراین جهت‌گیری بر میزان بار سرمایش و گرمایش بنا نیز تأثیر می‌گذارد و می‌دانیم که گرمایش و روشنایی دو مصرف‌کننده عمده انرژی در ساختمان‌ها هستند<sup>۹</sup>. بنابراین می‌توان گفت بخش عمده مصرف انرژی ساختمان به جهت‌گیری ساختمان بستگی دارد.<sup>۱۱</sup> تحقیقات اولیه در باب جهت‌گیری و یافتن جهت بهینه از سوی اولگی انجام پذیرفت. او، بر مبنای محاسبه مقدار انرژی دریافتی در سطوح مختلف عمودی ساختمان، جهت بهینه برای اقلیم معتدل و مرطوب با ۴۰٪ سطح پنجره در جنوب را به صورت ساختمانی با کشیدگی شرقی غربی و با انحراف

## پرسش‌های تحقیق

۱. مقدار زاویه بهینه جهت‌گیری و درصد سطوح شفاف (در اقلیم مشخص‌شده) برای حداقل میزان مصرف انرژی کلی بنا چه مقدار است؟

۲. میزان حساسیت تأثیر متغیرهای ذکرشده بر میزان مصرف انرژی کلی بنا چه مقدار است؟

۳. میزان طیف تغییر نسبت به وضعیت بهینه برای هر یک از متغیرها چگونه است؟

8. sensitivity

9. J. Morrissey, et al, "Affordable Passive Solar Design in a Temperate Climate: An Experiment in Residential Building Orientation"; p. 568.

10. M. Mardookhy, et al, "A Study of Energy Efficiency in Residential Buildings in Knoxville, Tennessee"; p. 243.

۱۱. نک:

V. Garcia-Hansen, et al, "Passive Solar Systems for Heating, Daylighting and Ventilation for Rooms without an Equator-facing Façade".

یافتن جهت بهینه به روش‌های مختلف انجام شده است، اما، با توجه به تفاوت مشخصات نمونه از جمله سطح شفاف، برای جهت بهینه پاسخ‌های متعددی داده شده است. از طرف دیگر، عملاً در طراحی با توجه به سایر محدودیت‌های معماری همواره نمی‌توان ساختمان را در جهت بهینه طراحی کرد. بنابراین علاوه بر تعیین جهت بهینه، لازم است به این موضوع پرداخت که تفاوت جهت‌گیری ساختمان با جهت‌گیری بهینه «چه مقدار» بر مصرف نهایی انرژی ساختمان تأثیر خواهد گذاشت؟

**درصد سطوح شفاف:** پوسته ساختمان بخصوص پنجره‌ها یا سطوح شفاف از جنبه‌های مختلف تأثیر بسزایی در عملکرد حرارتی بنا دارند، که در تحقیقات مختلف به آن‌ها پرداخته شده است؛ جنبه‌هایی مثل اتلاف حرارتی، میزان نفوذ هوا و مشخصات اجزا، میزان دریافت روشنایی و سطح بهینه سطوح شفاف برای کنترل میزان تابش و روشنایی؛ در این میان مورد آخر با توجه به تأثیر مستقیم و کاربردی آن برای طراحی معماری مورد توجه است.

بنا بر مطالعه‌ای ۲۰ تا ۴۰٪ تلفات انرژی بنا از طریق پنجره‌ها است.<sup>۲۰</sup> در این مقاله درصد سطوح شفاف نسبت میان مساحت خالص سطوح شیشه‌ای و شفاف ساختمان در قالب پنجره به سطوح کدر پوسته‌های عمودی ساختمان یعنی نما یا دیوارها تعریف می‌گردد. اولین مطالعات در این باره به دهه ۹۰ باز می‌گردد. جانسون و همکاران نشان داده‌اند که برای اقلیم‌ها و جهات مختلف می‌توان مقدار بهینه درصد سطوح شفاف را یافت و بر این مبنا می‌توان مصرف انرژی را به صورت قابل توجهی حتی تا ۵۰٪ پایین آورد.<sup>۲۱</sup> اگرچه این مطالعات تنها ناظر بر مقدار مصرف انرژی برای روشنایی بوده است، ولی در مطالعات دیگری در سال‌های بعد تأثیر آن بر مصرف کلی بنا نیز بررسی شد.<sup>۲۲</sup> البته در مطالعات جدیدتر نشان داده شد که تأثیر و حساسیت سطح پنجره بر میزان مصرف انرژی کلی در ساختمان‌های انرژی کارا کمتر است.<sup>۲۳</sup> اما کماکان تأثیر آن در

۱۷٫۵ درجه به سمت جنوب شرقی (۱۶۲٫۵ درجه) پیشنهاد کرده است.<sup>۱۲</sup> در مطالعات اخیر در این باب روش‌های مختلف برای یافتن میزان تأثیر جهت‌گیری و یافتن جهت بهینه ساختمان در اقلیم‌های مختلف برای کاستن میزان مصرف توصیه شده است، با این هدف که با انتخاب جهت درست می‌توان بیشترین مقدار انرژی تابشی را برای کاهش بار گرمایش و روشنایی به دست آورد؛ اما نمی‌توان تأثیر آن را بر میزان بار سرمایش بنا نادیده گرفت. در بعضی تحقیقات نیز برای یافتن جهت بهینه، مقدار انرژی مورد نیاز برای روشنایی نیز به مقدار مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش افزوده شده است.<sup>۱۳</sup> منظور از جهت بهینه، در اینجا، جهتی است که در فصول سرد بیشترین دریافت انرژی تابشی خورشید و در فصول گرم کمترین مقدار دریافت را برای کاهش بار گرمایش داشته باشد.<sup>۱۴</sup> از نظر روش، گاهی از روش‌های محاسباتی ریاضی استفاده شده است.<sup>۱۵</sup> در بسیاری از تحقیقات از بار حرارتی و برودتی محاسبه شده در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز برای یافتن میزان مصرف در زوایای مختلف و یافتن جهت بهینه استفاده شده است. به طور مثال زو و همکاران از نرم‌افزار انرژی پلاس برای محاسبه جهت بهینه در چند شهر مختلف در چین استفاده کردند.<sup>۱۶</sup> نصرالهی از دیزاین بیلدر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده کرد.<sup>۱۷</sup> آباندا و بایرس با استفاده از نرم‌افزارهای BIM و محاسبه انرژی برای جهت‌های مختلف، زاویه ۱۸۰ درجه از شمال را برای جهت بهینه برای اقلیم مورد مطالعه در بریتانیا پیشنهاد کردند، که روش جدیدتری بوده و محاسبات مالی و اجرایی را هم می‌تواند در بر بگیرد.<sup>۱۸</sup> این جهت بهینه در مطالعه نصرالهی ۱۷۰ درجه برای حداقل انرژی نهایی و علی‌رغم حداکثر بار روشنایی پیشنهاد شده است.<sup>۱۹</sup> به‌هرحال این پاسخ‌ها از اولین مطالعات جهت بهینه از سوی اولگی تاکنون با در نظر گرفتن اقلیم‌های مختلف و در روش‌های مختلف در بعضی مواقع تا جنوب شرق یا جنوب غرب متغیر است. به صورت کلی می‌توان گفت با وجود اینکه مطالعات زیادی برای

۱۲. مرتضی کسمایی، اقلیم و معماری، ص ۱۲۷.  
۱۳. نک:

F. Nasrollahi, "Economic and Ecologic Method of Energy Efficiency in Office Buildings".

۱۴. علی‌اکبر عظمتی و حسین حسینی، «بررسی تأثیر جهت‌گیری ساختمان‌های آموزشی بر بارهای حرارتی و برودتی در اقلیم‌های مختلف»، ص ۱۴۹.

15. E. Al-Fahmawee, "Analyzing the Impact of Floor Height and Building Orientation on Atria Daylighting Levels", p. 75.  
16. X. Xu, et al, "Energy Consumption Simulation of the Prototypical Building for Optimizing the Orientation of the Building Model in the Simulated Environment", p. 4.

17. Nasrollahi, ibid, p. 2683.

18. F.H. Abanda & L. Byers, "An Investigation of the Impact of Building Orientation on Energy Consumption in a Domestic Building Using Emerging BIM (Building Information Modelling)", p. 517.

19. Nasrollahi, ibid, p. 2685.

20. J.W. Lee, et al, "Optimization of Building Window System in Asian Regions by Analyzing Solar Heat Gain and Daylighting Elements", p. 524.

بار سرمایش و گرمایش بنا قابل توجه است.<sup>۲۴</sup>

در مطالعه‌ای بر پنج شهر ترکیه با اقلیم‌های متفاوت مشخص شد که مقدار بهینه سطوح شفاف در اقلیم‌های مختلف بین ۲۵ تا ۹۰٪ مساحت جداره عمودی است.<sup>۲۵</sup> در این مطالعات که برای بناهای مسکونی متوسط مقیاس انجام پذیرفت، متغیرهای دیگری مانند عایق حرارتی به صورت مستقل نیز بررسی شد؛ البته تنها برای محاسبه میزان بار حرارتی. در پژوهش دیگری که باز در ترکیه با در نظر گرفتن هر دو عامل انجام پذیرفت، نشان داده شد که بهترین عملکرد حرارتی فارغ از اقلیم خاص، با مقدار کمتر درصد سطوح پنجره و عایق بالاتر به دست خواهد آمد، که البته، با توجه به در نظر گرفتن بار روشنایی در این مطالعه، دور از انتظار نیست.<sup>۲۶</sup>

برای بررسی تأثیر این متغیر در تحقیقات از روش‌های مختلف نیز استفاده شد. به طور مثال در مطالعه‌ای تأثیر جهت و ابعاد پنجره روی بار روشنایی و میزان مصرف کلی انرژی در نمونه ساختمان اداری در شهر مونترال به روش پارامتریک انجام گرفت.<sup>۲۷</sup> از روش‌های شبیه‌سازی انرژی هم در مطالعات مختلف استفاده شده است.<sup>۲۸</sup> قیسی و تینکر از این روش برای به دست آوردن مساحت بهینه پنجره، با توجه به جهت‌گیری و ابعاد اتاق، در نمونه ساختمان ده‌طبقه اداری در دو اقلیم استفاده کردند.<sup>۲۹</sup> لی و همکاران در مطالعه جامعی مشخصات کلی بهینه برای سطوح شفاف بنا را، با در نظر گرفتن جهات مختلف و مشخصات فیزیکی پنجره، در اقلیم ۵ شهر آسیایی به دست آوردند و بهترین مشخصات پنجره و جهت را برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهرهای مختلف به صورت راهنما پیشنهاد کردند.<sup>۳۰</sup>

در تحقیقات دیگری ساسورو و همکاران تأثیر مشخصات هندسی پوسته ساختمان، شامل سطوح شفاف، را بر مصرف انرژی در شش اقلیم ایالات متحده برای ساختمان‌های اداری بررسی کردند. در این تحقیقات نشان داده شد که تأثیر درصد

سطوح شفاف در اقلیم‌های سرد و گرم بیشتر از اقلیم‌های معتدل و حداکثر میزان صرفه‌جویی با درصد سطوح شفاف ۱۴٪ است. میزان درصد پیشنهادی برای اقلیم‌های گرم بین ۵۰ تا ۸۰٪ و برای اقلیم‌های سرد ۲۰ تا ۶۰٪ است. در این تحقیق که به روش شبیه‌سازی انجام شده است، پارامترهای دیگری همچون عمق فضا و جهت پنجره را بر میزان مصرف انرژی مؤثر دانسته شده است.<sup>۳۱</sup> مشاهده می‌شود که در این مطالعات در اقلیم‌های مختلف مقدار درصدهای متفاوتی برای رسیدن به شرایط بهینه پیشنهاد شده است؛ البته، همانند جهت‌گیری، مقدار حساسیت تأثیر این متغیر در صورت تفاوت با شرایط بهینه بیشتر مورد نظر است.

نتایج مطالعه جابر و اجیب برای یافتن جهت‌گیری مناسب و درصد سطوح شفاف با ضخامت عایق بهینه در اقلیم مدیترانه‌ای نشان داد که بهینه بودن این متغیرها تا ۲۷٫۵۶٪ مصرف انرژی ساختمان را کاهش می‌دهد.<sup>۳۲</sup> می‌توان گفت تأثیر موارد اشاره‌شده وابسته به عملکرد جداره ساختمان در مقابل تابش است و به گونه‌ای با یکدیگر مرتبط و بر هم اثرگذار هستند؛ اما نکته دیگر در این مطالعات این است که تأثیر این عوامل عموماً به صورت مجزا و مستقل بررسی شده است؛ حال آنکه نتایج حاصل از بررسی تأثیر هم‌زمان آن‌ها می‌تواند تصمیمات طراحی را کارا تر کند. ضمناً از طرف دیگر، مطالعات انجام‌شده در حوزه ساختمان‌های مسکونی یا اداری بوده و به ساختمان‌های آموزشی خصوصاً با توجه به تفاوت آن‌ها در ملزومات روشنایی کمتر پرداخته شده است.

## ۲. روش اجرای پژوهش

هدف در این تحقیق تعیین جهت‌گیری و درصد سطوح شفاف بهینه ساختمان و اندازه‌گیری تأثیر تفاوت از شرایط بهینه بر میزان مصرف انرژی نهایی است. نمونه موردی این تحقیق بناهای آموزشی (مدارس) ساخته‌شده از سوی سازمان نوسازی

21. F. Goia, "Search for the Optimal Window-to-wall Ratio in Office Buildings in Different European Climates and the Implications on Total Energy Saving Potential", p. 468.

۲۲. نک:

A. Stegou-Sagia, et al, "The Impact of Glazing on Energy Consumption and Comfort"; E. Vartiainen, et al, "Daylight Optimization of Multifunctional Solar Facades".

23. M-L. Persson, et al, "Influence of Window Size on the Energy Balance of Low Energy Houses", p. 185.

24. V.Ž. Leskovar & M. Premrov, "An Approach in Architectural Design of Energy-efficient Timber Buildings with a Focus on the Optimal Glazing Size in the South-oriented Façade", p. 3410.

25. M.N. Inanici & F.N. Demirbilek, "Thermal Performance Optimization of Building Aspect Ratio and South Window Size in Five Cities Having Different Climatic Characteristics of Turkey", p. 50.

26. D.B. Özkan & C. Onan, "Optimization of Insulation Thickness for Different Glazing Areas in Buildings for Various Climatic Regions in Turkey", p. 1340.



دارای اقلیم معتدل و مرطوب حاشیه دریای کاسپین است. مطابق آخرین تقسیم‌بندی به روش کوپن<sup>۳۷</sup>، منطقه جلگه‌ای گیلان، که این شهر در آن واقع شده است، دارای مشخصه CSb است که به معنی اقلیم معتدل با تابستان گرم و مرطوب است.<sup>۳۸</sup> اطلاعات تفصیلی اقلیمی رشت برای استفاده در نرم‌افزار شبیه‌ساز از متئونورم استخراج گردید<sup>۳۹</sup> و با آمار ۲۵ ساله سازمان هواشناسی کشور مطابقت داده شد. بر طبق این آمار کمترین متوسط حداقل دما در دی‌ماه ۲/۴ درجه سانتی‌گراد و بیشترین متوسط حداکثر دما در مردادماه با ۳۰/۳ درجه است.<sup>۴۰</sup>

بر اساس تحلیل دیاگرام سایکرومتریک مطابق با استاندارد آسایش اشری در این اقلیم از مجموع ۲۷۲۷ ساعت کاری مدارس در ۹ ماه از سال ۱۲/۸٪ از زمان‌ها در شرایط آسایش قرارداریم، و در ۱۵/۴٪ مواقع فقط از طریق دریافت مستقیم تابش و در ۱۴٪ مواقع با جلوگیری از تابش مستقیم می‌توان شرایط آسایش را در فضای مستقیم داخلی فراهم کرد.<sup>۴۱</sup>

### ۳. شبیه‌سازی

پژوهش‌های شبیه‌سازی به دو صورت می‌تواند انجام شود. گاه یک مدل را به تعداد زیاد شبیه‌سازی می‌کنند یا تعداد زیادی مدل را با تعداد کم شبیه‌سازی می‌کنند و بعد به تحلیل نتایج می‌پردازند. در این پژوهش از روش اول استفاده گردید؛ به این معنی که برای اجرای پژوهش از نمونه‌های ساخته‌شده نمونه‌ای با در نظر گرفتن همه مشخصات نمونه‌های واقعی تدوین شد که به آن مدل پایه می‌گوییم. سپس متناسب با اهداف تحقیق، شبیه‌سازی‌ها روی این مدل پایه انجام گرفت. به این صورت که در مرحله اول مدل پایه با استفاده از فراوانی نمونه‌های ساخته‌شده موجود انتخاب گردید.

با بررسی مشخصات معماری تیپ‌های مصوب، مشترکات زیر مشاهده می‌شود. از این مشخصات مشترک در تعیین مدل پایه استفاده شد:

مدارس با استانداردها و مشخصات ساخت فعلی در اقلیم معتدل و مرطوب ایران (شهر رشت) است. با توجه به تأثیر متقابل متغیرهای ذکرشده، در این تحقیق تأثیر آن‌ها به صورت هم‌زمان و پیوسته بررسی می‌شود. نتیجه تحقیق به صورت مجموعه‌ای از نتایج مصرف انرژی برآوردشده با سازمان‌دهی‌های مختلف خواهد بود، که در تصمیمات مراحل اولیه طراحی معماری می‌تواند استفاده شود. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی، بر مبنای مدل‌سازی رایانه‌ای عملکرد و رفتار ساختمان‌های نمونه، استفاده می‌شود. هدف در این تحقیق میزان حساسیت تأثیر متغیرهای ساختمانی اشاره‌شده و یافتن میزان طیف تغییر مصرف نسبت به وضعیت بهینه برای استفاده در تصمیمات مراحل اولیه طراحی معماری پیگیری می‌شود. می‌توان گفت که در مراحل طراحی معماری، درک تأثیر نسبی تغییرات روی گزینه‌ها حتی اهمیت بیشتری نسبت به دقت شبیه‌سازی و مقدار نهایی مصرف دارد.<sup>۳۳</sup> از طرف دیگر، یافتن روند کلی و طیف تغییرات این تحقیق نیاز به تحلیل رفتار بنا برای تعداد نسبتاً زیاد متغیرهای ورودی دارد که با استفاده از روش‌های متعارف تحلیل عملکرد ساختمان امکان‌پذیر نیست.

در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده می‌گردد<sup>۳۴</sup> که دارای موتور شبیه‌ساز انرژی پلاس<sup>۳۵</sup> است. در مورد اعتبار نرم‌افزار یادشده و موتور شبیه‌ساز آن مطالعات بسیاری انجام شده است. در مقاله سال ۲۰۰۸ اسکین و همکاران مقایسه‌ای بین بارهای گرمایش و سرمایش برآوردشده با نرم‌افزار انرژی پلاس و میزان حقیقی مصرف در بازه‌های زمانی یک‌روزه و سه‌هفته‌ای انجام داد. در مورد بارهای گرمایش به میزان ۳٪ و در مورد بارهای سرمایشی اختلاف ۵٪ گزارش شده است، که بیانگر اعتبار قابل‌قبول این نرم‌افزار است.<sup>۳۶</sup>

شهر رشت در عرض جغرافیایی ۳۷/۱ درجه و طول ۴۹/۳ درجه شرقی ۸/۶ متر پایین‌تر از سطح دریا واقع شده است و

27. A. Tzempelikos, et al, "Simulation of Façade and Envelope Design Options for a New Institutional Building", p. 1088.

28. V. Motuziene & E.S. Juodis, "Simulation Based Complex Energy Assessment of Office Building Fenestration", p. 345.

29. E. Ghisi & J.A. Tinker, "An Ideal Window Area Concept for Energy Efficient Integration of Daylight and Artificial Light in Buildings", p. 53.

30. Lee, et al, *ibid*, p. 529.

31. I. Susorova, et al, "The Effect of Geometry Factors on Fenestration Energy Performance and Energy Savings in Office Buildings", p. 7.

32. S. Jaber & S. Ajib, "Optimum, Technical and Energy Efficiency Design of Residential Building in Mediterranean Region", p. 1830.

33. A.G. Marsh, "Generative and Performative Design: A Challenging New Role for Modern Architects", p. 2.

۳۴. نک:

A. Tindale, & S. Potter, *Design Builder (Version v4)*.

35. energy plus

- بناها به صورت کشیدگی شرقی غربی طراحی شده‌اند.

- کلاس‌ها و سایر فضاها در ضلع شمال و جنوب راهرویی با عرض ۴ متر سازمان‌دهی شده‌اند که در بعضی تیپ‌ها این عرض اضافه شده است.

- فاصله آکس ستون‌ها در جهت طولی بنا ۳۶۰ سانتی‌متر است.

- ارتفاع طبقات در همه تیپ‌ها ۳ متر در نظر گرفته شده است.

- عرض کلاس‌ها ۵۸۰ تا ۶۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

ت ۱. پلان‌های طبقه همکف و اول مدل پایه؛ مأخذ: نقشه‌های سازمان نوسازی مدارس استان گیلان.

- در بناهای دو و سه طبقه راه‌پله‌های بنا یا در طرفین راهرو و یا در مرکز بنا در جداره شمالی راهرو قرار گرفته است.

- با توجه به ابعاد ۷۲۰×۶۰۰ سانتی‌متر کلاس‌ها، این اندازه را می‌توان سلول افزایشی بنا در تیپ‌های مختلف در نظر گرفت.

- ابعاد پنجره به صورت عرض ۱۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متر و برای هر کلاس دو پنجره در نظر گرفته شده است.

بر مبنای گونه‌شناسی، برای مطالعه حاضر ساختمان

مدارسی که به صورت مکرر ساخته شده و نسبت فراوانی آن‌ها مدل پایه در نظر گرفته شدند. مدل پایه منتخب شامل مدل پایه

۱۲ کلاسه دوطبقه است که به طور کلی به صورت شرقی غربی گسترش یافته و کلاس‌ها و سایر فضاها در طرفین راهروی

مرکزی سازمان‌دهی شده‌اند. این مدل بر مبنای مشخصات ساخت و ویژگی‌های بستر طرح در نرم‌افزار مدل‌سازی می‌شوند.

مشخصات ساخت بر اساس جزئیات اجرایی سازمان نوسازی مدارس و تعداد استفاده‌کنندگان و برنامه کاری و نقاط تنظیم

گرمایش و سرمایش بر مبنای متوسط پیمایش انجام شده در مدارس منتخب در مدل‌سازی در نظر گرفته شد (ت ۱ و ۲).

شبیه‌سازی اولیه مدل پایه بر مبنای وضع موجود با گرمایش سیستم حرارت مرکزی شوفاژ با بویلرگازی و سرمایش برقی

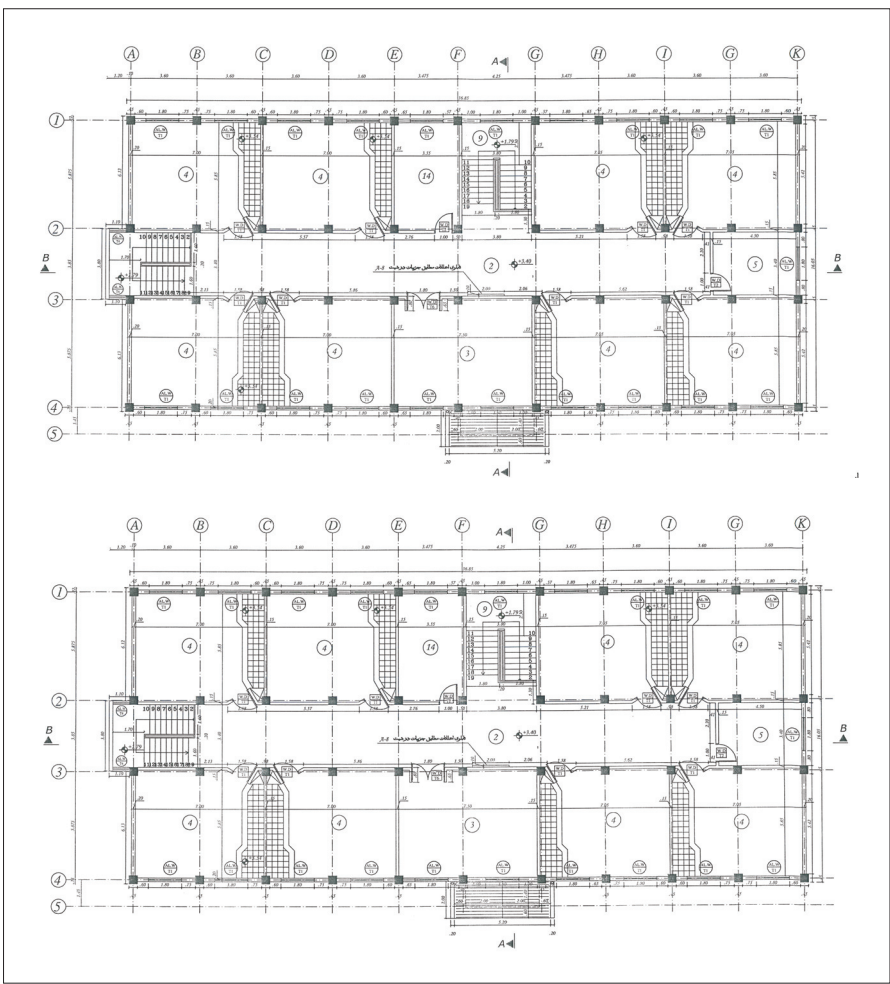
به صورت کولرهای اسپلیت و مطابق با برنامه کاری مدارس انجام پذیرفت. خروجی شبیه‌سازی به صورت مصرف سالیانه، به

تفکیک مصرف سوخت، تنظیم گردید. با دریافت میزان واقعی مصرف نمونه ذکر شده در فیش‌های مصرف برق و گاز در چهار سال گذشته، از این اطلاعات برای کالیبریشن<sup>۴۲</sup> یا اعتبارسنجی

اطلاعات نرم‌افزار شبیه‌ساز استفاده شد.

اعتبارسنجی شبیه‌سازی: در این مطالعه از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای استفاده شده است. در پژوهش‌هایی که از روش‌های

نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی استفاده می‌کنند، زمانی خروجی آن‌ها مفید خواهد بود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی دقت نسبی لازم را داشته باشند. اعتبار نتایج حاصل



گرمایش‌های غیربرقی استفاده می‌شود، بنابراین از روی میزان مصرف گاز ساختمان در فصول گرم و تفاضل آن از متوسط میزان مصرف در ماه‌های گرم، که برای مصارف دیگری مثل آب گرم یا احتمالاً پخت‌وپز در واحد سرایداری بوده است (هر چند نسبتاً ناچیز)، درواقع میزان سهم مصرف واقعی گرمایش بناها محاسبه و با خروجی‌های محاسبه‌شده نرم‌افزار مقایسه شد. با توجه به اینکه سرمایه‌های در فصول گرم در این اقلیم به صورت برقی است، از روی تفاضل متوسط مصرف برق در فصول سرد و گرم می‌توان به میزان مصرف برق ناشی از سرمایه‌های دست‌یافت و با خروجی‌های تخمینی نرم‌افزار مقایسه کرد. به این ترتیب و با این روش مدل‌سازی انجام‌شده با اطلاعات ورودی برای تنظیم مدل‌های شبیه‌سازی اصلاح و معتبرسازی<sup>۳۴</sup> شد.

طبعاً در واقعیت عوامل مختلفی در هر بنا ممکن است روی مقدار مصرف انرژی ساختمان تأثیر بگذارد، درنتیجه انطباق نتایج نرم‌افزار بر واقعیت دشوار می‌شود. بنابراین با انتخاب نمونه‌های موردی واقعی در شرایط مختلف کالبدی، مثل جهت‌گیری یا بافت اطراف، مقدار مصرف انرژی آن‌ها با نمونه شبیه‌سازی‌شده مقایسه می‌گردد. به این منظور در

از شبیه‌سازی به دو عامل بستگی دارد: اول، اعتبار نرم‌افزار و انجام درست محاسبات توسط برنامه شبیه‌ساز و اطمینان از درستی عملکرد آن و دوم، اعتبار ورودی و جزئیات تعریف‌شده در نرم‌افزار توسط کاربر و انطباق آن بر شرایط واقعی<sup>۳۳</sup>. طبیعتاً خطا در مدل‌سازی یا تعریف غیردقیق اطلاعات ورودی مدل و یا منطبق نبودن مدل بر شرایط واقعی نمونه‌ای پایه، هر یک می‌تواند نتایج غیرواقعی ایجاد و اعتبار شبیه‌سازی را خدشه‌دار کند. در این پژوهش برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی از روش اعتبارسنجی تجربی استفاده می‌گردد، تا از مشابهت رفتار مدل با نمونه‌های پایه واقعی اطمینان حاصل گردد. به این صورت که پس از مرحله مدل‌سازی و ورود دقیق اطلاعات ورودی متناسب با شرایط واقعی، نمونه‌های پایه نتایج شبیه‌سازی را، از نظر میزان مصرف انرژی گرمایش و سرمایش، با میزان مصرف واقعی ساختمان‌های انتخاب‌شده مقایسه و تغییرات متناسب در مدل‌سازی برای انطباق نتایج شبیه‌سازی با نمودارهای مصرف انجام می‌شود.

برای این منظور از قبوض سالانه مصرف گاز و برق میزان مصرف انرژی نمونه‌های پایه استخراج می‌شود. با توجه به اینکه در مدارس ایران عمدتاً برای گرمایش در فصول غیر گرم سال از

36. N. Eskin & H. Turkmen, "Analysis of Annual Heating and Cooling Energy Requirements for Office Buildings in Different Climates in Turkey", p. 771.  
37. Koppen

نک: ۳۸.

F. Rubel & M. Kottek, "Observed and Projected Climate Shifts 1901-2100 Depicted by World Maps of the Köppen-geiger Climate Classification".

نک: ۳۹.

S. Kunz, *Meteonorm (Version 6)*.

۴۰. نک: سازمان هواشناسی کشور، *اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک رشت*.  
نک: ۴۱.

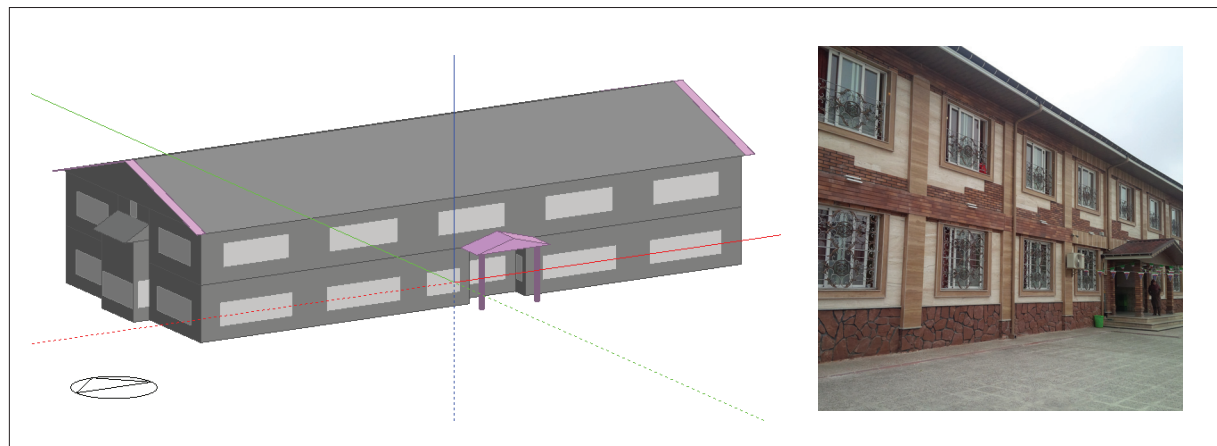
R. Liggett & M. Milne, *Climate Consultant (Version 6.0)*.

42. Calibration

43. S.P. Bambardekar & Ute Poerschke, *ibid*, p. 1309.

44. validate

ت ۲. مدل پایه مدل‌سازی‌شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر و مدرسه شهید نجات‌الهی، یکی از مدارس پیمایش‌شده برای مشخصات ساخت و کاربری؛ طرح و ترسیم: نگارندگان.





ت ۳ (بالا). نمودار نتایج شبیه‌سازی نمونه پایه پس از اعتبارسنجی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر. ت ۴ (پایین). نمودار میزان مصرف برق سالیانه و متوسط چهارساله آن برحسب کیلووات ساعت (مدرسه شماره ۱)؛ مأخذ: همان.

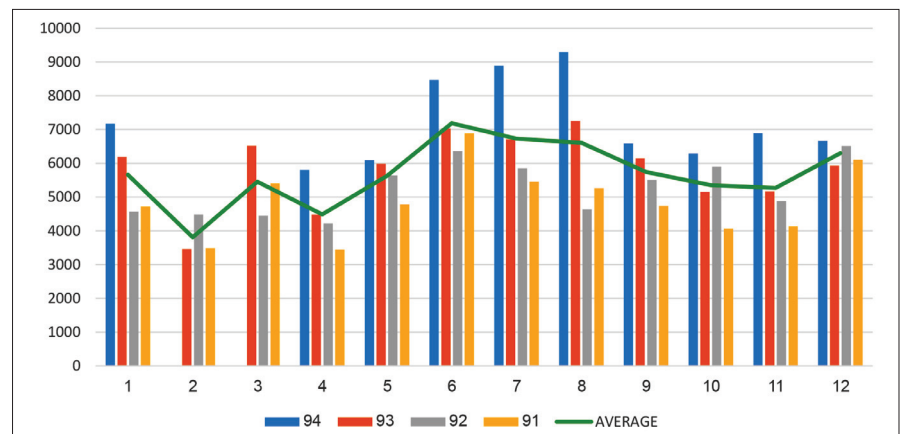
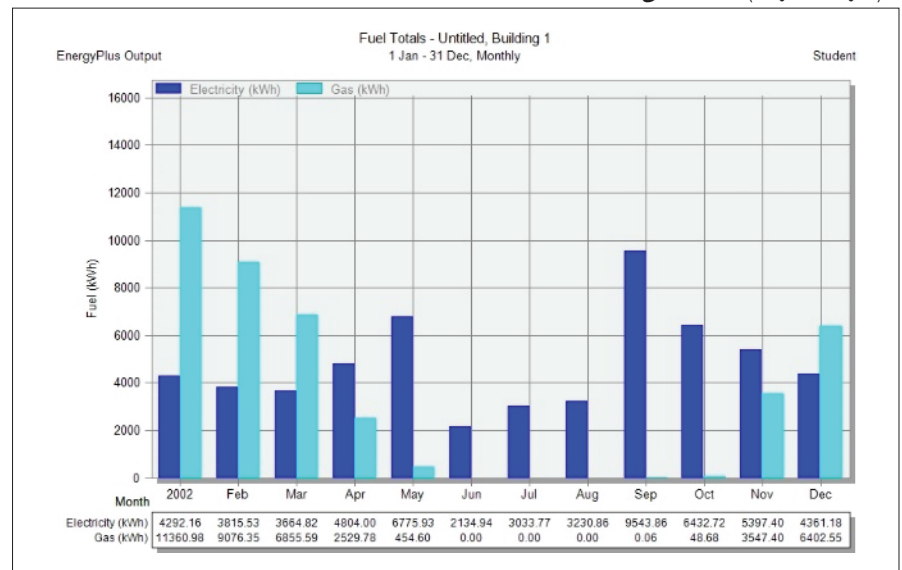
انتخاب نمونه پایه چهار مورد واقعی در نظر گرفته شد. در بازدید میدانی اطلاعات این ۴ مدرسه منتخب مثل مشخصات فیزیکی ساخت، مصالح، مشخصات کاربری<sup>۴۵</sup> (مثل تعداد دانش آموزان و ساعت کار و غیره)، و همچنین مشخصات و شماره اشتراک قبوض مصرف برق و گاز برای استخراج اطلاعات مورد نیاز از سامانه‌های عرضه قبض دریافت شد. نمونه‌ها در شرایط مختلف کالبدی، مثل جهت‌گیری یا بافت اطراف، مقدار مصرف انرژی

واقعی آن‌ها با نمونه شبیه‌سازی شده مقایسه و با تنظیم و اصلاح ورودی‌های مدل‌سازی، عمدتاً مربوط به پارامترهای کاربری، نتایج شبیه‌سازی معتبر شد (ت ۳).

نمونه شماره ۱ در بافت متراکم مسکونی، شماره ۲ در حاشیه شهر و در فضای باز کنار شالیزار، نمونه شماره ۳ در مرکز بافت مسکن مهر رشت در میان بلوک‌های آپارتمانی، و نمونه شماره ۴ هم در بافت مسکونی متراکم شهری رشت قرار دارد. لازم به ذکر است که به‌جز نمونه شماره ۱ که، به دلیل موقعیت سایت آن، شمالی جنوبی ساخته شده، جهت‌گیری بقیه نمونه‌ها در این تیپ شرقی غربی است.

همان‌طور که گفته شد، برای اعتبارسنجی باید نتایج مدل پایه با شرایط واقعی مقایسه شود. در «جدول ۱» مقدار مصرف برق چهارساله مدرسه شماره ۱ (شهید کامران نجات‌الهی) و متوسط آن بر حسب کیلووات ساعت مشخص گردیده و در نمودار «ت ۴» به صورت ستونی مقدار ۴ساله و نمودار خطی مقدار متوسط نشان داده شده است. در نمودار مذکور در مقدار مصرف در سال ۹۴ یک جهش نسبت به سال‌های قبل دیده می‌شود که علت آن نصب کولرهای گازی جدید برای بخش‌های اداری و کارگاه در سال ۹۴ بود.

در «جدول ۲» و نمودار «ت ۵» هم میزان مصرف گاز مصرفی این مدرسه برای دوره چهارساله بر حسب متر مکعب آورده شده است. برای تسهیل مقایسه با شبیه‌سازی و محاسبات مجموع انرژی مصرفی لازم است میزان مصرف انرژی برای گرمایش را نیز بر مبنای واحد کیلووات ساعت در نظر بگیریم. ارزش حرارتی<sup>۴۶</sup> یک متر مکعب گاز طبیعی معادل ۸۲۰۰ کیلوکالری یا ۹۵۳۷ وات ساعت است که، با توجه به راندمان متوسط ۲۷ درصدی نیروگاه‌های حرارتی گازی کشور («ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۲»، ۱۳۹۴)، برای تبدیل متر مکعب گاز طبیعی به کیلووات ساعت از ضریب ۳٫۵ با عنوان ارزش سوختی هر مترمکعب گاز طبیعی استفاده شد.



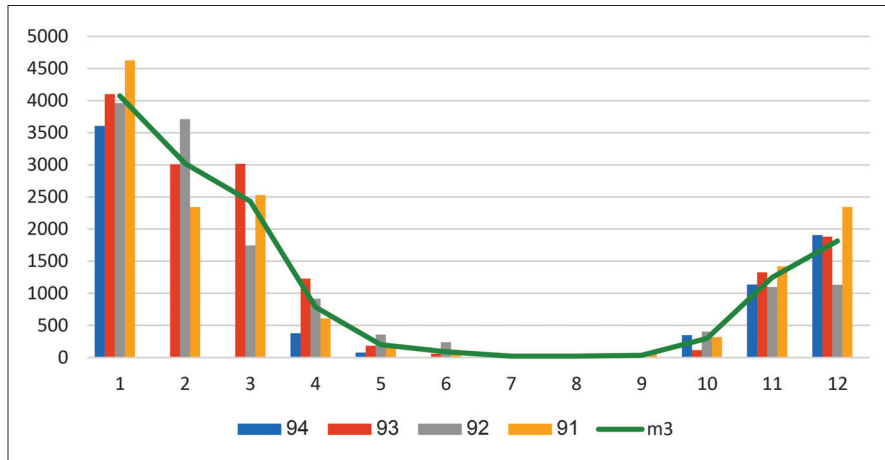
حالت ایدئال تعیین می‌شود. مصرف انرژی ایدئال برای این ساختمان برای اقلیم شماره ۳ یعنی معتدل و بارانی مطابق تعریف استاندارد مقدار ۶۴ است. بنابراین رده مصرف انرژی نمونه‌های موردی C است، که در رده ساختمان‌های کارآمد طبقه‌بندی می‌شود (به نظر می‌رسد که تکیه بیشتر این ساختمان تنها بر گرمایش است، که با توجه به برنامه کاربری ساختمان در طول سال و عدم استفاده از سیستم تهویه مطبوع یکپارچه برای

مجموع مصرف گاز و برق سالانه به تفکیک ماه‌های سال با نمونه شبیه‌سازی شده مربوطه مقایسه شد. تفاوت مصرف انرژی شبیه‌سازی شده و واقعیت مصرف متوسط در نمونه‌های موردی بین ۸ تا ۱۷٪ بود که با توجه به تفاوت شیوه راه‌اندازی سیستم‌ها در نمونه‌ها و تفاوت تا ۲۵ درصدی مصرف هر کدام از نمونه‌های موردی در سال‌های مختلف قابل قبول به نظر می‌رسد.

#### ۴. برچسب انرژی ساختمان

با توجه به اینکه اطلاعات قبوض انرژی هر یک از نمونه‌های موردی در بیش از سه سال در دسترس است، می‌توان ساختمان‌های مزبور را از نظر این استاندارد بررسی کرد، که طبق استاندارد ISIRI 14254 1st Edition برای ساختمان‌های اداری (غیرمسکونی) تعریف شده است. مقدار مصرف نهایی حاصل جمع مصرف برق و گاز به نسبت مساحت مفید بنا در دوره کامل سالانه برای هر نمونه موردی در «جدول ۳» آورده شده است. رده مصرف انرژی ساختمان بر اساس نسبت انرژی (R) در این استاندارد از حاصل‌قسمت شاخص مصرف انرژی ساختمان در وضعیت موجود به مصرف انرژی ساختمان

45. operative  
46. heat of combustion



ت ۵ (بالا). نمودار میزان مصرف گاز سالیانه و متوسط چهارساله آن برحسب متر مکعب و کیلووات ساعت؛ مأخذ: همان. جدول ۱ (میان). مصرف برق سالیانه مدرسه شماره ۹ برحسب کیلووات ساعت در ماه‌های سال میلادی؛ مأخذ: اسناد و مدارک شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان، ۲۰۱۶.

جدول ۲ (پایین). میزان مصرف گاز سالیانه و متوسط چهارساله آن برحسب متر مکعب و کیلووات ساعت؛ مأخذ: اسناد و مدارک شرکت ملی گاز ایران، ۲۰۱۶.

مصرف برق	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۹۴	۷۱۷۲	N/A	N/A	۵۸۰۲	۶۰۹۵	۸۴۷۵	۸۸۹۱	۹۲۹۴	۶۵۸۹	۶۲۹۱	۶۸۹۳	۶۶۵۷
۹۳	۶۱۹۱	۳۴۶۶	۶۵۲۲	۴۴۸۰	۵۹۸۷	۷۰۳۱	۶۷۱۱	۷۲۴۸	۶۱۴۵	۵۱۵۵	۵۱۶۷	۵۹۳۲
۹۲	۴۵۷۱	۴۴۷۹	۴۴۴۸	۴۲۱۹	۵۶۴۲	۶۳۵۷	۵۸۵۵	۴۶۳۸	۵۵۰۹	۵۹۰۱	۴۸۸۳	۶۵۱۲
۹۱	۴۷۱۶	۳۴۸۷	۵۴۰۲	۳۴۵۱	۴۷۸۶	۶۸۸۵	۵۴۵۶	۵۲۶۵	۴۷۴۱	۴۰۶۵	۴۱۳۱	۶۱۰۸
متوسط	۵۶۶۲٫۵	۳۸۱۰٫۷	۵۴۵۷٫۳	۴۴۸۸	۵۶۳۷٫۵	۷۱۸۷	۶۷۲۸٫۳	۶۶۱۱٫۳	۵۷۴۶	۵۳۵۳	۵۲۶۸٫۵	۶۳۰۲٫۲

مصرف گاز (m <sup>3</sup> )	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۹۴	۳۶۰۵	N/A	N/A	۳۸۰	۷۶	۳	۱	۳	۲۹	۲۹	۱۱۳۵	۱۹۰۷
۹۳	۴۱۰۱	۳۰۰۸	۳۰۱۶	۱۲۳۱	۱۸۳	۶۲	۲۹	۱	۳۴	۱۱۶	۱۳۲۸	۱۸۸۰
۹۲	۳۹۶۳	۳۷۱۱	۱۷۴۷	۹۱۸	۳۵۹	۲۴۰	۲۳	۴۲	۱۸	۴۰۳	۱۰۹۸	۱۱۳۱
۹۱	۴۶۲۵	۲۳۴۲	۲۵۲۸	۶۱۳	۱۷۵	۵۸	۳۵	۴۲	۵۳	۳۱۸	۱۴۱۹	۲۳۴۵
متوسط (m <sup>3</sup> )	۴۰۷۳٫۵	۳۰۲۰٫۳	۲۴۳۰٫۳	۷۸۵٫۵	۱۹۸٫۲	۹۰٫۷۵	۲۲	۲۲	۳۳٫۵	۲۹۶٫۷	۱۲۴۵	۱۸۱۵٫۷
متوسط (kWh)	۱۴۲۵۷٫۲	۱۰۵۷۱٫۱	۸۵۰۶٫۱	۲۷۴۹٫۲	۶۹۳٫۸	۳۱۷۶	۷۷	۷۷	۱۱۷٫۲	۱۰۳۸٫۶	۴۳۵۷٫۵	۶۳۵۵٫۱

سطح پوشش تصادفی بهتری نسبت به نمونه‌سازی تصادفی عادی دارد و با تعداد کمتری نمونه می‌توان به سطح پوشش یکنواخت‌تری رسید (ت ۶). این روش برای تحلیل‌هایی که در آن‌ها تعداد مؤلفه‌های تأثیرگذار در هر مرحله کم است، بسیار مناسب است. و مهم‌ترین مزیت آن تعداد کمتر محاسبات و اجرای شبیه‌سازی به نسبت سایر روش‌هاست<sup>۴۹</sup>. به طور مثال برای یک شبیه‌سازی هشت‌متغیره به فقط ۳۶۰ شبیه‌سازی در چهار مرحله نیاز است. در صورتی که برای همین تعداد متغیر در روش واریانس به ۶۰۸ اجرای شبیه‌سازی نیاز است.<sup>۵۰</sup> از مزایای دیگر روش مذکور این است که، در مقایسه با سایر روش‌ها، در این روش تحلیل نتایج ضرایب حساسیت را می‌توان به صورت دیاگرام‌های کیفی نمایش داد.<sup>۵۱</sup> از این دیاگرام‌ها می‌توان به منظور ارزیابی آلترناتیوهای طراحی و یا ایجاد تغییرات مفید استفاده کرد.

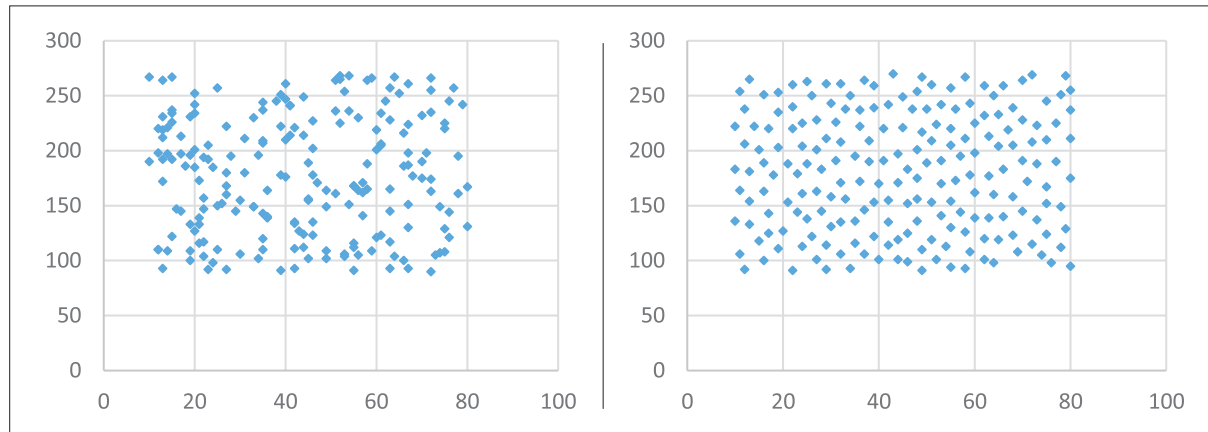
این نمونه‌های ورودی در محدوده‌های تعیین شده توسط نرم‌افزار سیم‌لب ساخته و به صورت ورودی به شبیه‌ساز داده و خروجی‌ها به صورت مقدار مصرف نهایی ساختمان به صورت مجموع این معنی که مقدار مصرف نهایی ساختمان به صورت مجموع گرمایش، سرمایش، و روشنایی سالیانه شبیه‌سازی شده استخراج و در نمودارهای سه‌بعدی سطحی درج گردید.

سرمایش و تأمین هوای تازه در این بناها باشد). بنابراین با توجه به موقعیت ساختمان‌های نمونه موردی در استاندارد برچسب انرژی می‌توان، با تغییرات مناسب و مفید، مقدار مصرف انرژی را بیشتر کاهش داد و به رده B رساند.

## ۵. روش تحلیل

برای تحلیل و سنجش تغییرات خروجی از روش تحلیل حساسیت یکپارچه<sup>۴۷</sup> استفاده گردید، به این معنی که به جای تغییر یک پارامتر و بررسی تأثیر آن بر میزان مصرف نهایی، در هر بار اجرای شبیه‌سازی دو مؤلفه مورد بررسی به صورت تصادفی تغییر می‌کند و خروجی مربوطه ثبت می‌شود و نمونه‌سازی دومؤلفه‌ای برای دو متغیر جهت‌گیری با رنج متغیر (۹۰-۲۷۰ درجه از شمال) و درصد سطوح شفاف با رنج متغیر (۱۰-۸۰٪) بر مبنای نظام نمونه‌سازی هاپیر کیوب<sup>۴۸</sup> انجام پذیرفت. این نظام

برچسب انرژی	R رده مصرف انرژی ساختمان	مصرف انرژی سالانه در هر مترمربع (kWh/m <sup>2</sup> /year)	مجموع مصرف انرژی سالانه kWh
C	۲,۳۹	۱۵۲,۴	۱۱۷۲۶۰ مدرسه شماره ۱
C	۲,۱۱	۱۳۵,۳	۱۰۳۵۱۱ مدرسه شماره ۲
C	۲,۲۲	۱۴۲,۲	۱۰۸۴۴۲ مدرسه شماره ۳
C	۲,۱۹	۱۴۰,۴	۱۰۷۴۱۱ مدرسه شماره ۳



47. Global Sensitivity Analysis

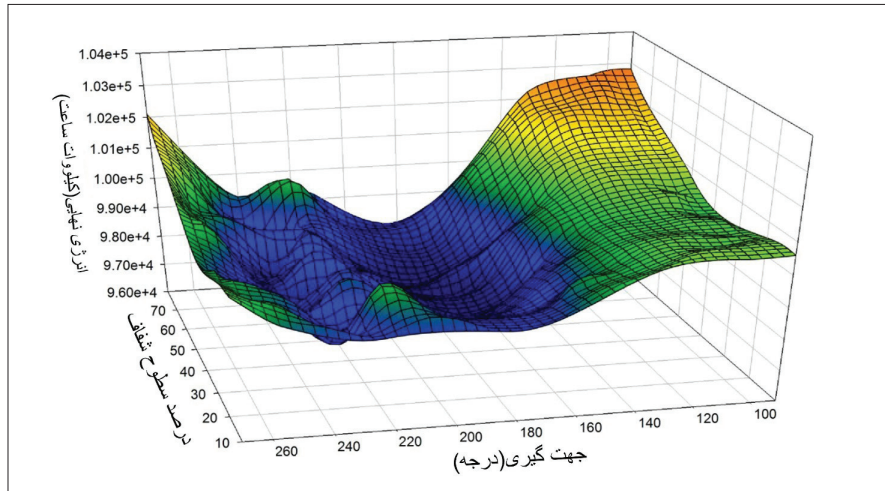
48. Latin Hyper-cube

مربع لاتین مربعی است که با تقسیم اضلاعش به یک شبکه تبدیل شده است. هر جایگاه در این شبکه دارای دو مؤلفه عمودی و افقی است. بنابراین با انتخاب تعدادی از این جایگاه‌ها به صورت تصادفی در واقع تعدادی متغیر دو مؤلفه‌ای تصادفی خواهیم داشت. حال برای پوشش بیشتر و همگن جایگاه‌ها به صورت تصادفی شرطی گذاشته می‌شود. به این صورت که برای انتخاب هر جایگاه (متغیر دو مؤلفه‌ای) باید با انتخاب‌های قبلی کنترل شود که در یک ردیف یا یک ستون نباشد. این مفهوم با افزایش تعداد ابعاد به سه بعد (مکعب) و بیشتر هم قابل توسعه است.

جدول ۳ (بالا). میزان انرژی نهایی برق و گاز سالانه برای محاسبه رده‌بندی برچسب انرژی؛ مأخذ: استاندارد برچسب انرژی، ساختمان‌های غیرمسکونی ISIRI 14254 1st edition. Retrieved 2018,

ت ۶ (پایین). نمودار تفاوت نظام نمونه‌سازی دو مؤلفه‌ای به روش هاپیر کیوب در سمت راست و روش تصادفی عادی در سمت چپ در رنج‌های در نظر گرفته‌شده؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

مشابه است. یعنی می‌توان گفت که تغییرات مصرف انرژی نهایی، فارغ از میزان سطوح شفاف بنا، تقریباً از یک مدل پیروی می‌کند و روند تغییرات آن‌ها مشابه یکدیگر است. نمودارهای «ت ۸» این میزان تغییرات را در شرایطی که میزان سطوح شفاف در محدوده کم یعنی بین ۱۰ تا ۲۴٪ (که معمولاً در طراحی کلاس‌ها غیرمعمول است) و ۲۴ تا ۳۸٪ نشان می‌دهد.



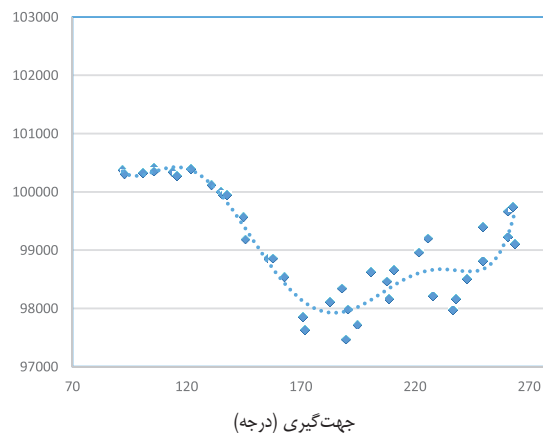
## ۶. یافته‌های پژوهش

در این بخش یافته‌های حاصل از این مطالعه و نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای ساختمانی ذکر شده آورده می‌شود. تعداد نمونه برای رنج‌های ذکر شده و بر مبنای نظام هایپرکیوب توسط نرم‌افزار، حداقل ۱۸۶ نمونه تعیین شد که در این مطالعه ۲۰۰ نمونه دو مؤلفه‌ای شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی برای آنالیز تحلیل حساسیت یکپارچه در نمودار «ت ۷» آورده شده است.

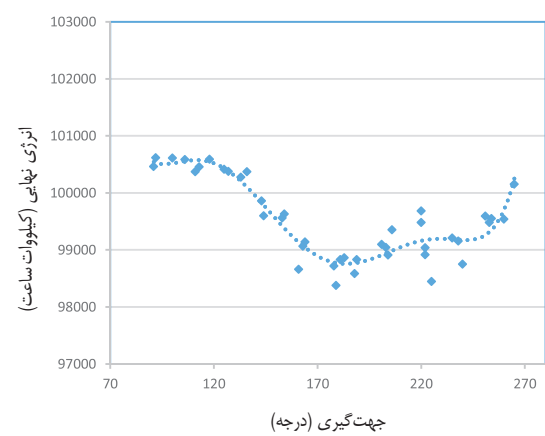
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصرف انرژی و نرخ تغییرات آن در شرایط مختلف تفاوت قابل‌توجهی دارد. پس برای درک این تغییرات و تحلیل حساسیت آن، هر کدام از رنج‌های دو متغیر را به پنج محدوده تقسیم می‌کنیم و با ترسیم نمودار اسکترپلات<sup>۵۲</sup> هر محدوده به تحلیل رفتار مدل ناشی از تغییرات متغیرها می‌پردازیم (ت ۸).

به این معنی که با هر میزان سطوح شفاف، تغییرات جهت‌گیری بنا چه تغییری روی میزان مصرف انرژی ایجاد خواهد کرد؟ اولین نکته قابل‌توجه این است که علی‌رغم تفاوت مقدار مصرف انرژی نهایی، ظاهر نمودارها در هر پنج محدوده

تغییرات مصرف انرژی در جهت‌گیری‌های مختلف با ۲۴ تا ۳۸ درصد سطوح شفاف



تغییرات مصرف انرژی در جهت‌گیری‌های مختلف با ۱۰ تا ۲۴ درصد سطوح شفاف



ت ۷ (بالا). نمودار نتایج شبیه‌سازی برای تحلیل حساسیت یکپارچه دو مؤلفه‌ای؛ طرح و ترسیم: نگارندگان.  
ت ۸ (پایین). نمودار تغییرات مصرف انرژی در جهت‌گیری‌های مختلف بنا با سطوح مختلف از ۱۰ تا ۳۸٪؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

نمودار دوم ۲۰٪ مصرف قابل تغییر به ازای هر ۱۰ درجه تغییرات به سمت جهت بهینه است. بنابراین حساسیت جهت گیری وقتی مقدار درصد سطوح شفاف بین ۲۴ تا ۲۸٪ است (متداول ترین نسبت) بالاتر است.

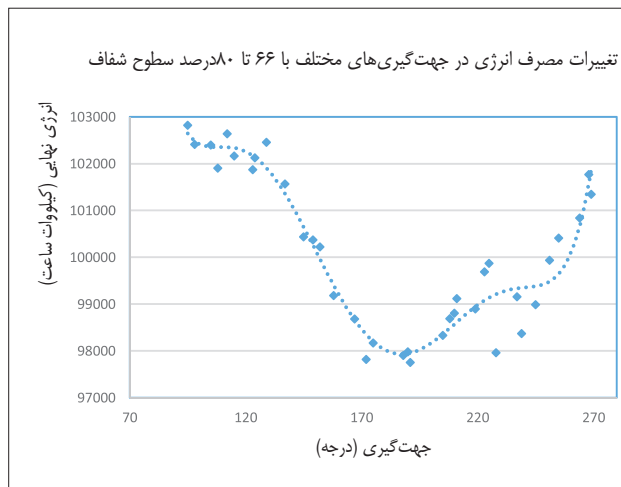
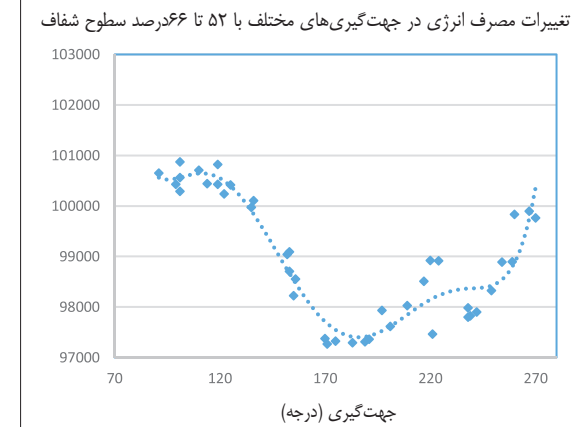
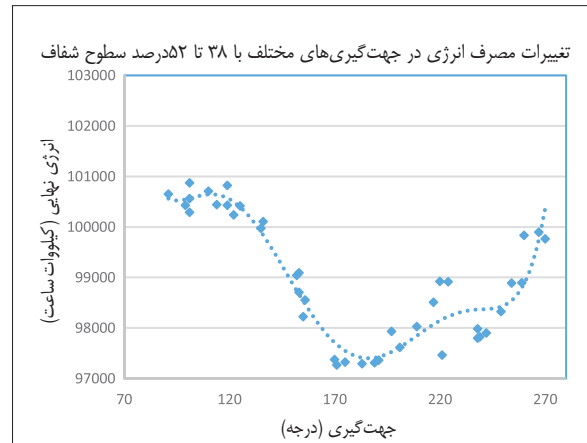
مقدار بهینه مصرف انرژی در محدوده جهت گیری ۱۷۰ تا ۱۹۰ درجه است که برای همه نمودارها تقریباً به همین صورت و قابل انتظار هم هست. ضمناً تغییرات مصرف انرژی در محدوده ۱۶۰-۲۰۰ درجه، که محدوده بهینه است، زیاد نیست. بنابراین تغییر جهت گیری در این محدوده حساسیت زیادی ندارد.

در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه نیز به تدریج بر مقدار مصرف انرژی افزوده می شود، اما این افزایش به اندازه تغییرات در غرب نیست. مقدار حساسیت تغییرات در این محدوده در حدود ۰.۴٪ مصرف قابل تغییر در هر ده درجه در هر دو جهت است.

مقدار مصرف در محدوده ۲۵۰ تا ۲۷۰ درجه کمتر از مقدار مصرف در ساختمان با جهت گیری ۹۰ تا ۱۲۰ است، اما برخلاف جهت گیری شرقی که تغییر جهت گیری حساسیت چندانی ندارد. مقدار مصرف در ساختمان در این محدوده به شدت به تغییر جهت گیری حساس است (ت ۹).

نکته دیگر اینکه، مقدار حداکثر مصرف انرژی در همه نمودارها، در شرایط جهت گیری ۹۰ تا ۱۲۰ یعنی جهت گیری شرقی است که به صورت قابل توجهی از جهت گیری غربی یعنی محدوده ۲۵۰ تا ۲۷۰ درجه بالاتر است.

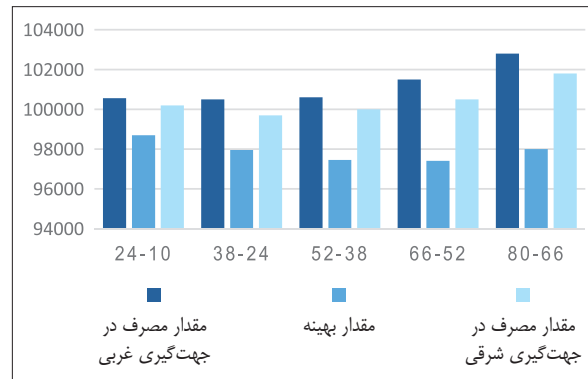
در محدوده ۹۰ تا ۱۲۰ مقدار تغییرات ناچیز است. یعنی تغییر جهت گیری تأثیر چندانی در میزان مصرف انرژی نخواهد داشت، اما از محدوده ۱۲۰ تا ۱۶۰ شیب تغییرات یا به بیان دیگر حساسیت پارامتر جهت گیری بسیار بالا است. این حساسیت در این محدوده در نمودار اول حدود ۱۵٪ مصرف قابل تغییر و در



ت ۹. نمودار تغییرات مصرف انرژی در جهت گیری های مختلف بنا با سطوح مختلف از ۳۸ تا ۸۰٪؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

میزان گرمایش و سرمایش و روشنایی در این محدوده به تعادل رسیده است و تغییر مقدار پنجره کمک چندانی برای کاهش مصرف انرژی نمی‌کند؛ اما بعد از ۵۰٪، افزایش مساحت پنجره باعث افزایش قابل توجه مصرف انرژی خواهد شد. به طوری که به ازای هر ۱۰٪ افزایش مساحت، ۱۵٪ مصرف قابل تغییر به میزان مصرف بهینه در این شرایط خواهد افزود که مقدار قابل توجهی است.

در جهت گیری ۱۲۶ تا ۱۶۲، یا به بیان دیگر جهت گیری جنوب شرقی، الگوی افزایش الگوی منظمی نیست. در این محدوده کمیته مصرف انرژی ۴۰٪ مساحت پنجره است.



۵۰. نک:

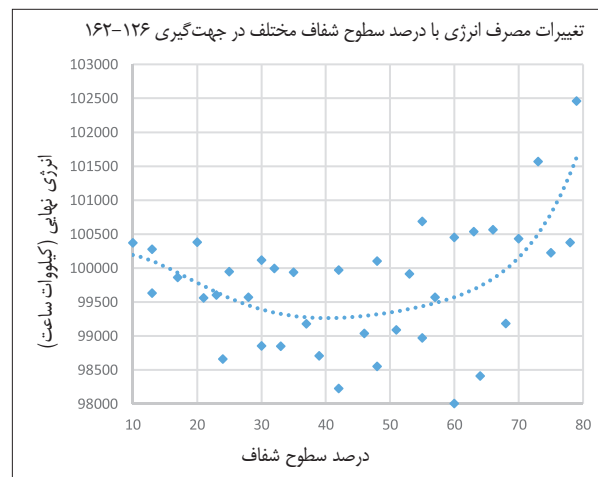
SIMLAB-V2.2, Simulation Environment for Uncertainty and Sensitivity Analysis: the Joint Research Center of the European Commission.

51. Tian, ibid, p. 413.

52. Scatter Plot

ت ۱۰ (بالا). نمودار میزان مصرف بهینه و حداقل و حداکثر مصرف انرژی در ۵ گروه درصد سطوح شفاف؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

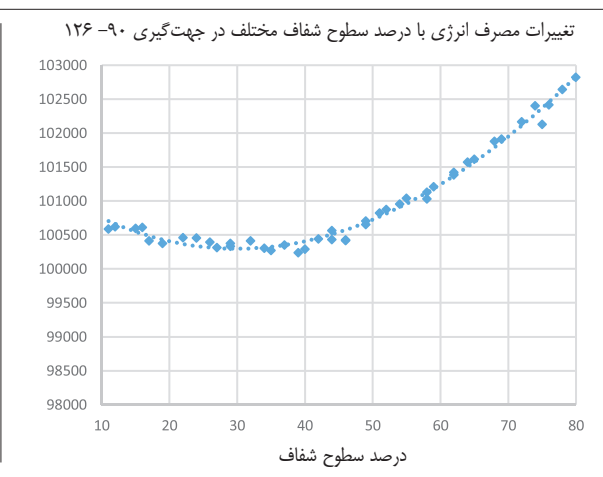
ت ۱۱ (پایین). نمودار تغییرات مصرف انرژی با تغییرات درصد سطوح شفاف در جهت‌گیری شرق و جنوب شرقی؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.



همان‌طور که اشاره شد، رفتار تغییرات مصرف انرژی در جهت‌گیری‌های مختلف فارغ از میزان سطوح شفاف تقریباً یکسان است، اما میزان حساسیت آن‌ها متفاوت است. به طور مثال، کمترین مقدار مصرف در محدوده ۳۸٪ است، اما بیشترین حساسیت تغییر جهت‌گیری در محدوده سطح پنجره در محدوده ۶۶ تا ۸۰٪ است (ت ۱۰).

برای تحلیل دقیق‌تر میزان تأثیر مقدار سطح پنجره در میزان مصرف انرژی، جهت‌گیری‌های مختلف ساختمان در ۵ گروه طبقه‌بندی گردید و نمودارهای اسکتر پلات مربوطه و روند کلی آن ترسیم شد. این نمودارها نشان داد که روند تغییرات مصرف انرژی با افزایش سطح پنجره در جهت‌گیری‌های مختلف یکسان نیست (ت ۱۱).

در محدوده جهت‌گیری ۹۰-۱۲۶ یعنی جهت‌گیری شرقی، تغییرات مقدار مصرف بر مبنای تغییرات سطح شفاف از الگوی منظمی پیروی می‌کند و نشان‌دهنده این است که مقدار مصرف انرژی در این جهت بستگی زیادی به مساحت پنجره دارد. همان‌طور که در نمودار «ت ۱۱» مشاهده می‌شود، با افزایش مساحت پنجره مقدار مصرف هم افزایش می‌یابد، اما این روند از ۱۰٪ تا ۵۰٪ تقریباً ثابت است و احتمالاً به این معنی است که



خواهد شد (ت ۱۲).

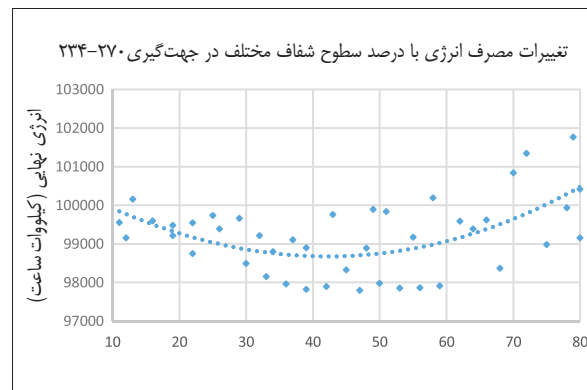
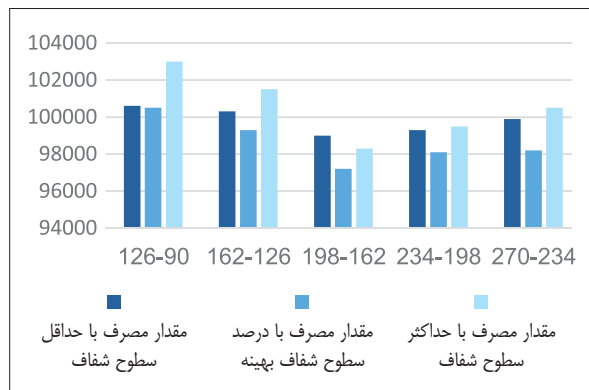
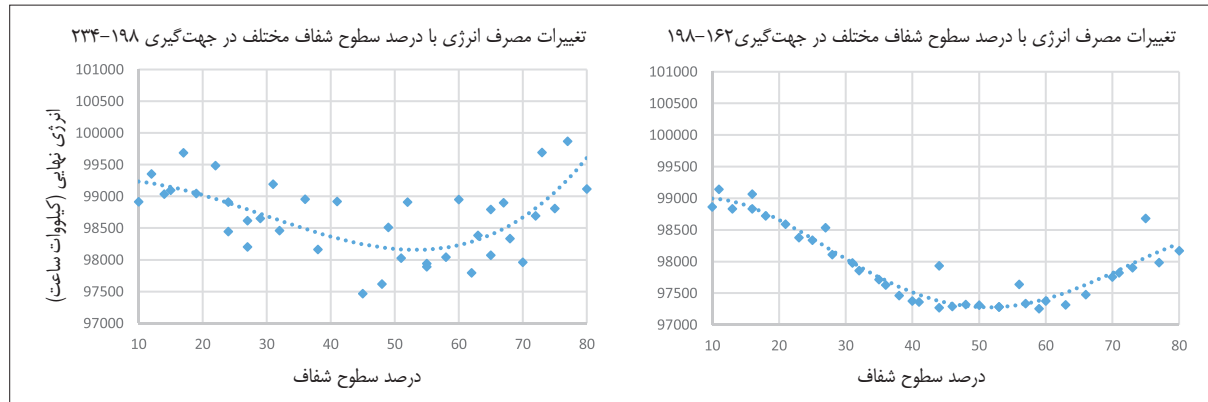
در جهت‌گیری جنوب غربی (۱۹۸-۲۳۴) کمینه مقدار مصرف مجدداً در حدود ۵۰-۵۵٪ است. در این جهت‌گیری، افزایش درصد مساحت هر چند تقریباً نامحسوس است اما نسبتاً حساسیت بیشتری نسبت به کاهش آن دارد.

جهت غرب آخرین گروه پنج‌گانه جهت‌گیری است. به صورت کلی با وجود عدم قطعیت<sup>۵۳</sup> بالای نمودار اما با استفاده از منحنی روند نمودار درمی‌یابیم که درصد بهینه در این جهت‌گیری حدود ۴۵٪ است، که کاهش یا افزایش این درصد با حساسیت یکسان باعث افزایش مصرف نهایی بنا خواهد شد (ت ۱۳).

در نمودار «ت ۱۴» مشخص است که همان‌گونه که

افزایش یا کاهش این مقدار با حساسیت کمتر از ۸٪ مصرف قابل‌تغییر به ازای هر ۱۰٪ تغییر مساحت، تأثیر زیادی روی میزان مصرف نهایی بنا نخواهد داشت.

مهم‌ترین جهت مورد بحث گروه ۱۶۲-۱۹۸ یا جهت جنوبی است. دیدیم که این جهت‌گیری همواره کمترین مقدار مصرف را دارد و کمترین مقدار مصرف در ۵۰٪ اتفاق می‌افتد. به این معنی که اگر جهت‌گیری جنوبی طراحی شده برای بنا جنوبی باشد، محتمل‌ترین درصد برای کمینه مصرف انرژی ۵۰٪ است. نکته مهم دیگر اینکه افزایش و کاهش مساحت پنجره در این جهت‌گیری تقریباً با یک میزان حساسیت حدود ۱۰٪ مصرف قابل‌تغییر به ازای هر ۱۰٪ تغییر مساحت سبب افزایش مصرف



### 53. uncertainty

ت ۱۲ (بالا). نمودار تغییرات مصرف انرژی با تغییرات درصد سطوح شفاف در جهت‌گیری جنوب و جنوب غربی؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۳ (پایین، راست). نمودار تغییرات مصرف انرژی با تغییرات درصد سطوح شفاف در جهت‌گیری غرب؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۴ (پایین، چپ). نمودار میزان مصرف بهینه و حداقل و حداکثر مصرف انرژی در ۵ گروه جهت‌گیری؛ تدوین و ترسیم: نگارندگان.

به صورت کلی در این اقلیم و برای این کاربری مطابق آنچه در مرور ادبیات نیز مشاهده شد، همواره جهت‌گیری بهینه بنا سمت جنوب است. در صورتی که درصد بهینه سطوح شفاف بستگی به جهت‌گیری بنا می‌تواند بین ۴۰ تا ۵۵٪ متغیر باشد. افزایش مقدار سطوح شفاف بیش از ۴۰٪ در جهت‌گیری شرقی بیشترین حساسیت تأثیر را روی میزان مصرف انرژی بنا دارد. درحالی‌که افزایش این مقدار تا ۴۰٪ در این جهت‌گیری تغییر چندانی روی مصرف انرژی نخواهد گذاشت.

تغییر جهت‌گیری در محدوده شرقی تأثیر چندانی در میزان مصرف انرژی نخواهد داشت، در صورتی که تغییر جهت‌گیری بنا در محدوده‌های جهت‌گیری‌های غرب با هر میزان سطوح شفاف بیشترین حساسیت را در تغییر مصرف انرژی دارد. تغییر جهت‌گیری در محدوده جنوب شرقی نیز حساسیت بالایی دارد و این حساسیت هرچه درصد سطوح شفاف بیشتر باشد، بالاتر است.

اختلاف میان حداقل و حداکثر مصرف انرژی در رنج‌های داده‌شده به میزان ۵٫۷ درصد حداقل مصرف در این رنج‌ها است. به بیان دیگر فقط با دو عامل جهت‌گیری و مقدار سطح پنجره می‌توان تا ۶٪ بر مصرف کلی بنا اثر گذاشت.

IRIMO. (2016)

عظمتی، علی‌اکبر و حسین حسینی. «بررسی تأثیر جهت‌گیری ساختمان‌های آموزشی بر بارهای حرارتی و برودتی در اقلیم‌های مختلف»، در علوم و تکنولوژی محیط زیست، ش ۲ (تابستان ۱۳۹۲)، ص ۱۴۷-۱۵۷.

کسمایی، مرتضی. اقلیم و معماری، تهران: چاپ اسکان سرا، ۱۳۷۸.

نقشه‌های سازمان نوسازی مدارس استان گیلان.

Abanda, F.H. & L. Byers. "An Investigation of the Impact of Building Orientation on Energy Consumption in

انتظار می‌رفت، کمترین مقدار مصرف بهینه انرژی مربوط به جهت‌گیری جنوبی است و بیشترین مقدار مصرف بهینه مربوط به جهت‌گیری غربی است؛ اما حساسیت تغییر میزان درصد سطوح شفاف بستگی به جهت‌گیری بنا متفاوت است و برای تغییر آن در طراحی حتی الامکان باید به جهت‌گیری بنا توجه کرد.

## ۷. نتیجه‌گیری

به صورت کلی اینکه در طراحی معماری جهت‌گیری بنا، مطابق با جهت‌گیری بهینه هر اقلیم و درصد سطوح شفاف بنا، بهینه باشد همواره امکان‌پذیر نیست. بنابراین هدف طراح این خواهد بود که با ترفندهای دیگری این افزایش مصرف را جبران کند. با استفاده از نتایج این تحقیق و آگاهی از مقدار حساسیت پارامترهای مختلف تصمیم‌های طراحانه معمار در باب جهت‌گیری و نسبت سطوح شفاف و کدر بنا در مراحل اولیه طراحی بنا می‌تواند به تصمیمات درست‌تر در جهت کاهش مصرف انرژی نهایی بنا بیانجامد. برای مشاهده تأثیر کمی تغییرات احتمالی روی آلترناتیوهای اولیه طراحی از نتایج و نمودارهای این تحقیق می‌توان استفاده کرد.

## منابع و مأخذ

استاندارد برچسب انرژی. ساختمان‌های غیرمسکونی ISIRI 14254 1st edition. Retrieved 2018  
انرژی برق، ۱۳۹۵: /www.saba.org.ir/fa/masrafeEnergy/sakhteman/standards/isiri

اسناد و مدارک شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان، ۲۰۱۶.

اسناد و مدارک شرکت ملی گاز ایران، ۲۰۱۶.

سازمان هواشناسی کشور، اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک رشت:

a Domestic Building Using Emerging BIM (Building Information Modelling)", in *Energy*, 97 (2016), 517-527. doi:



<http://dx.doi.org/10.1016/j.Energy.2015.12.135>

Al-Fahmawee, E. "Analyzing the Impact of Floor Height and Building Orientation on Atria Daylighting Levels", in *Appl Sci "Natural Sci Series"*, 11(1) (2013), pp. 75-88.

Bambardekar, S.P. & Ute Poerschke. "The Architect as performer of Energy Simulation in the Performance Based Design. Building Simulation", in *Paper Presented at the Eleventh International IBPSA Conference*, Sydney, Australia, 2009.

Donn, M. & S. Selkowitz & B. Bordass. "Simulation in the Service of Design – Asking the Right Questions", in *Building Simulation Paper Presented at the Eleventh International IBPSA Conference*, Sydney, Australia, 2010.

Eskin, N. & H. Turkmen. "Analysis of Annual Heating and Cooling Energy Requirements for Office Buildings in Different Climates in Turkey", in *Energy and Buildings*, 40 (2008), pp. 763-773.

Garcia-Hansen, V. & A. Esteves & A. Pattini. "Passive Solar Systems for Heating, Daylighting and Ventilation for Rooms without an Equator-facing Façade", in *Renewable Energy*, 26(1) (2002), pp. 91-111. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00089-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00089-1)

Ghisi, E. & J.A. Tinker. "An Ideal Window Area Concept for Energy Efficient Integration of Daylight and Artificial Light in Buildings", in *Building and Environment*, 40(1) (2005), pp. 51-61. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.004>

Goia, F. "Search for the Optimal Window-to-wall Ratio in Office Buildings in Different European Climates and the Implications on Total Energy Saving Potential", in *Solar Energy*, 132 (2016), pp. 467-492. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>

Inanici, M.N. & F.N. Demirebilek. "Thermal Performance Optimization of Building Aspect Ratio and South Window Size in Five Cities Having Different Climatic Characteristics of Turkey", in *Building and Environment*, 35(1) (2000), pp. 41-52. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00002-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00002-1)

Jaber, S. & S. Ajib. "Optimum, Technical and Energy Efficiency Design of Residential Building in Mediterranean

Region", in *Energy and Buildings*, 43(8) (2011), pp. 1829-1834. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.024>  
Kunz, S. *Meteonorm (Version 6)*, Bern Switzerland, 2015.

Lee, J.W. & H.J. Jung & J.Y. Park & J.B. Lee & Y. Yoon. "Optimization of Building Window System in Asian Regions by Analyzing Solar Heat Gain and Daylighting Elements", in *Renewable Energy*, 50 (2013), pp. 522-531. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>

Leskovar, V.Ž. & M. Premrov. "An Approach in Architectural Design of Energy-efficient Timber Buildings with a Focus on the Optimal Glazing Size in the South-oriented Façade", in *Energy and Buildings*, 43(12) (2011), pp. 3410-3418. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.003>

Liggett, R. & M. Milne. *Climate Consultant (Version 6.0)*, 2017.

Mardookhy, M. & R. Sawhney & S. Ji & X. Zhu & W. Zhou. "A Study of Energy Efficiency in Residential Buildings in Knoxville, Tennessee", in *Journal of Cleaner Production*, 85 (2014), pp. 241-249. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.025>

Marsh, A.G. "Generative and Performative Design: A Challenging New Role for Modern Architects", in *Paper Presented at the Oxford Conference*, Oxford, UK, 2008.

Morrissey, J. & T. Moore & R.E. Horne. "Affordable Passive Solar Design in a Temperate Climate: An Experiment in Residential Building Orientation", in *Renewable Energy*, 36(2) (2011), pp. 568-577. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013>

Motuziene, V. & E.S. Juodis. "Simulation Based Complex Energy Assessment of Office Building Fenestration", in *Civil Engineering and Management*, 16(3) (2010), pp. 345-351.

Nasrollahi, F. "Economic and Ecologic Method of Energy Efficiency in Office Buildings", in *Paper Presented at the World Sustainable Building Conference*, Helsinki, Finland, 2011.

Özkan, D.B. & C. Onan. "Optimization of Insulation Thickness for Different Glazing Areas in Buildings for Various Climatic Regions in Turkey", in *Applied Energy*, 88(4) (2011), pp. 1331-1342. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apEnergy.2010.10.025>



- Persson, M-L. & A. Roos & M. Wall. "Influence of Window Size on the Energy Balance of Low Energy Houses", in *Energy and Buildings*, 38(3) (2006), pp. 181-188. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.006>
- Rubel, F. & M. Kottek. "Observed and Projected Climate Shifts 1901-2100 Depicted by World Maps of the Köppen-geiger Climate Classification", in *Meteorol*, 19(1) (2010), pp. 135-141. doi: 10.1127/0941-2948/2010/0430
- SIMLAB-V2.2. *Simulation Environment for Uncertainty and Sensitivity Analysis: the Joint Research Center of the European Commission*, 2011.
- Stegou-Sagia, A., & K. Antonopoulos & C. Angelopoulou & G. Kotsiovelos. "The Impact of Glazing on Energy Consumption and Comfort", in *Energy Convers Manage*, 48(11) (2007), pp. 44-52. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.005>
- Susorova, I. & M. Tabibzadeh & A. Rahman & H.L. Clack & M. Elnimeiri. "The Effect of Geometry Factors on Fenestration Energy Performance and Energy Savings in Office Buildings", in *Energy and Buildings*, 57 (2013), pp. 6-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- Tian, W. "A Review of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Analysis", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(1) (2013), pp. 411-419.
- Tindale, A. & S. Potter. *Design Builder (Version v4)*, London, UK: DesignBuilder, Software Ltd, 2015. Retrieved from <http://www.Designbuilder.co.uk/>
- Tzempelikos, A. & A.K. Athienitis & P. Karava. "Simulation of Façade and Envelope Design Options for a New Institutional Building", in *Solar Energy*, 81(9) (2007), pp. 1088-1103. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.006>
- Vartiainen, E. & K. Peippo & P. Lund. "Daylight Optimization of Multifunctional Solar Facades", in *Solar Energy*, 68(3) (2000), pp. 223-235. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00072-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00072-9)
- Xu, X. & D. Yuan & H. Sha & Y. Ji & P. Xu. "Energy Consumption Simulation of the Prototypical Building for Optimizing the Orientation of the Building Model in the Simulated Environment", in *Paper Presented at the The International Building Performance Simulation Association (ASim2012 Proceedings)*, Shanghai, China, 2012.