

Comparative Analysis of Building Energy Consumption in Various Cities in Iran Under the Influence of Climate Change

Paria Saadatjoo^{1✉}, Ali Alizadeh², Saeed Jahanbakhsh Asl³, Ali Mohammad Khorshiddoust⁴, Behrouz Sari Sarraf⁵

1. Corresponding author, Department of Architecture, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: paria.saadatjoo@tabrizu.ac.ir
2. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: ali.alzd.1962@gmail.com
3. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: s_Jahan@tabrizu.ac.ir
4. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: khorshid@tabrizu.ac.ir
5. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: sarisarraf@tabrizu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 15 April 2023 Revised: 6 May 2023 Accepted: 8 May 2024 Published: 21 June 2025 Keywords: Climate change Cooling Energy consumption Heating Residential building	This article investigates the impact of climate change on energy consumption in residential buildings across various Iranian cities over the next 70 years. To achieve this, climatic data for Tehran, Tabriz, Isfahan, Mashhad, and Kermanshah were generated using Meteonorm 8 software based on existing ten-year climatic data. Following the identification of prevalent residential building types in Iran, a representative sample was selected, and energy simulations were conducted using Design Builder 7.0.0.096 software for the years 2030, 2060, and 2090 in the aforementioned cities. The results indicated a projected increase in cooling energy demand across all cities in the coming years. Tehran exhibited the most significant changes in annual heating energy, with a projected decrease of 37% in 2060 and 66.64% in 2090 compared to 2030. Tabriz experienced the largest annual increase in cooling energy, with a rise of 37.53% in the first three decades and 75.43% in the subsequent three decades. Overall, projected annual cooling energy changes ranged from 21.36% to 37.53% by 2060 and 44.14% to 75.43% by 2090 across these cities. Tabriz had the highest annual energy consumption, while Kermanshah had the lowest. Additionally, Tabriz exhibited the highest heating energy consumption, whereas Tehran had the highest cooling energy demand annually. Regarding carbon dioxide emissions, Tehran recorded the highest levels during 2030, 2060, and 2090, with Isfahan showing the most substantial increase in emissions over the seventy-year period. Statistical analyses revealed a significant relationship between temperature changes and time across all cities. However, no significant relationship was found between time and energy consumption or carbon dioxide emissions in these cities. In conclusion, this study highlights the anticipated changes in energy consumption and carbon dioxide emissions in residential buildings across Iranian cities due to climate change.

Cite this article: Saadatjoo, P., Alizadeh, A., & Jahanbakhsh Asl, S. (2025). Comparative Analysis of Building Energy Consumption in Various Cities in Iran under the Influence of Climate Change. *Journal of Geography and Planning*, 28 (90), 21-37. <http://doi.org/10.22034/gp.2024.61175.3250> DOI: <http://doi.org/10.22034/gp.2024.61175.3250>



Introduction

Climate change and the Earth's rising temperatures pose significant challenges for the future, leading to increased energy consumption, particularly in the building sector. Countries prioritize predicting and mitigating building energy use to combat climate change, with buildings in Europe consuming over 40% of energy resources and producing 36% of greenhouse gases (Maduta et al., 2022). Long-term programs aim to reduce emissions and energy consumption by 2050, emphasizing changes in energy patterns (D'Agostino et al., 2021). A key initiative is revising the "Building Energy Performance Manual" to boost building resilience by enhancing efficiency and reducing fossil fuel dependence (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2013).

Heating, cooling, and ventilation systems contribute significantly to building energy consumption, affected directly by climate change and global warming. Evaluating building energy performance under changing climates is crucial, considering lifespan and conditions. Recent decades saw reduced heating demand but increased cooling needs, especially in tropical regions, hinting at higher future energy consumption trends.

To counter this, proposed solutions include improving building shell performance, upgrading HVAC systems, implementing smart technologies, and using renewable energy. The building shell's role is critical in energy efficiency and climate resilience (Morewood, 2023).

This research aims to study climate changes in Iranian cities over 70 years and their impact on building energy consumption. By examining prevalent construction types, a sample building's energy performance across Tabriz, Tehran, Isfahan, Kermanshah, and Mashhad will be compared. This research will quantify climatic variations, energy consumption changes, and environmental impacts over seven decades.

Materials and Methods

Researchers employ various tools for forecasting future climate data, with Meteonorm software emerging as a widely utilized and dependable platform. Developed by Intersolar Europe, Meteonorm employs statistical downscaling techniques and integrates scenarios like RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 to project future weather patterns. Unlike earlier versions based on the HadCM3 model, Meteonorm's latest iteration utilizes sophisticated algorithms to downscale weather data statistically.

The software generates detailed forecasts, including hourly parameters like temperature, humidity, precipitation, wind speed, solar radiation, and more, for any location worldwide up to the year 2090 under predefined scenarios.

In a recent study focusing on five Iranian cities—Tehran, Tabriz, Mashhad, Kermanshah, and Isfahan—researchers extracted current hourly epw files from reputable databases. They used Meteonorm 8 to generate weather data for the years 2030, 2060, and 2090 based on the RCP8.5 scenario. This approach enables a comparative analysis of climate changes over the next seven decades.

The research methodology involves simulating climate scenarios and analyzing resultant data to assess climate change impacts on these cities. By comparing weather data across different timeframes and cities, the study aims to offer insights into projected climatic shifts and their implications for urban environments in Iran.

This research is significant for climate change adaptation and urban resilience planning, providing detailed climate projections using advanced modeling tools like Meteonorm. The findings will inform policymakers and urban planners about potential future climate trends, enabling proactive measures to enhance cities' resilience to climate change.

Results

The research conducted assesses the thermal behavior and energy consumption of buildings in response to climate change across five Iranian cities—Tehran, Tabriz, Mashhad, Kermanshah, and Isfahan—over the years 2030, 2060, and 2090. The study focused on annual energy consumption, heating and cooling energy usage, carbon dioxide emissions, and monthly energy consumption patterns.

Key findings indicate a general increase in annual energy consumption over time due to climate changes, with Isfahan experiencing the most significant rise in energy consumption by 17.59% in 2090 compared to 2030. Conversely, heating energy demands decreased as temperatures rose, notably in Tehran and Isfahan. Annual cooling energy requirements increased with rising temperatures, particularly in Tabriz.

Tabriz emerged with the highest annual energy consumption and the lowest cooling energy demands, while Tehran recorded the highest cooling energy usage. Carbon dioxide emissions showed a notable increase in Isfahan over time, highlighting significant environmental impacts.

Monthly energy consumption trends varied across cities and seasons, with Mashhad and Tabriz showing decreased consumption during winter months, while Tehran and Isfahan exhibited increasing trends in certain months. Kermanshah displayed unique consumption patterns with less defined trends.

Statistical analyses revealed a significant relationship between temperature and the passage of time across all cities. However, no significant relationships were found between year and energy consumption or carbon dioxide emissions, suggesting complex interactions between these factors.

Overall, the study underscores the influence of climate change on building energy dynamics and environmental considerations in urban contexts. The findings emphasize the importance of sustainable urban planning and mitigation strategies to address changing climatic conditions and reduce environmental impacts associated with building energy consumption.

Conclusion

The research investigated the thermal performance and energy consumption of a residential building in five cities in Iran over 70 years, using climate data forecasts for 2030, 2060, and 2090. The findings showed increasing annual energy consumption in most cities due to climate changes, with Isfahan experiencing the most significant increase. Heating energy decreased in all cities except Kermanshah, while cooling energy needs were projected to rise substantially. Tabriz had the highest total energy consumption and heating energy, while Tehran had the highest cooling energy demand. Tehran also had the highest carbon dioxide emissions, with Isfahan showing the most significant increase over time. Statistical analyses revealed a significant relationship between temperature changes and time across all cities but no significant relationship between time and energy consumption or carbon dioxide emissions. These findings align with previous research indicating reduced heating needs and increased cooling demands due to climate change. The study's limitations included sample size and city coverage, suggesting future research should refine building classifications and expand the number of cities studied. Further research could focus on comparing energy-saving strategies tailored to each city, such as building shell improvements and green technologies, to guide architects and designers in developing resilient buildings capable of mitigating climate change impacts.

مقایسه مصرف انرژی ساختمان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در شهرهای مختلف ایران

پریا سعادتجو^۱، علی علیزاده^۲، سعید جهانبخش اصل^۳، علی محمد خورشیددوست^۴، بهروز ساری صراف^۵

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: paria.saadatjoo@tabrizu.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ali.alzd1962@gmail.com
۳. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: S_Jahan@tabrizu.ac.ir
۴. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Khorshid@tabrizu.ac.ir
۵. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: sarisarraf@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱ کلیدواژه‌ها: تغییرات اقلیمی، ساختمان مسکونی، سرمایش، گرمایش، مصرف انرژی	تغییرات اقلیمی چالش‌های مهمی برای مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی در سراسر جهان ایجاد می‌کنند. هدف این مقاله بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی طی هفتاد سال آینده در شهرهای مختلف ایران می‌باشد. در این راستا، داده‌های اقلیمی شهرهای تهران، تبریز، اصفهان، مشهد و کرمانشاه با استفاده از نرم‌افزار 8 Meteonorm برای هفتاد سال آینده بر اساس داده‌های اقلیمی ده ساله موجود تولید شد. پس از شناسایی تیپ غالب ساختمان‌های مسکونی در ایران، یک نمونه انتخاب و شبیه‌سازی‌های انرژی با استفاده از نرم‌افزار Design Builder 7.0.0.096 برای پنج شهر مذکور در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ انجام شد. نتایج نشان داد که طی سال‌های آینده، انرژی سرمایشی موردنیاز ساختمان در تمامی شهرها افزایش خواهد یافت. از میان پنج شهر مطالعه‌شده، بیشترین تغییرات انرژی گرمایشی سالانه در شهر تهران مشاهده گردید. در این شهر مقدار انرژی گرمایشی در سال ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ به ترتیب به میزان ۳۷ درصد و ۶۶/۶۴ درصد کاهش خواهد یافت. بیشترین افزایش انرژی سرمایشی سالانه در شهر تبریز مشاهده گردید؛ به‌طوری‌که در طی سه دهه اول، انرژی سرمایشی سالانه به میزان ۳۷/۵۳ درصد و در سه دهه دوم به میزان ۷۵/۴۳ درصد افزایش خواهد یافت. در مجموع مقدار تغییرات انرژی سرمایشی سالانه در این پنج شهر تا سال ۲۰۶۰ در بازه ۳۷/۵۳-۲۱/۳۶ درصد و تا سال ۲۰۹۰ در بازه ۷۵/۴۳-۴۴/۱۴ درصد خواهد بود. بیشترین انرژی مصرفی سالانه در شهر تبریز، کمترین آن در شهر کرمانشاه، بالاترین مقادیر انرژی گرمایشی مصرفی متعلق به شهر تبریز و بالاترین انرژی سرمایشی سالانه مربوط به شهر تهران می‌باشد. همچنین بالاترین مقادیر گاز دی‌اکسیدکربن منتشر شده در طی سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ مربوط به شهر تهران و بیشترین افزایش انتشار این گاز در طی هفتاد سال آینده مربوط به شهر اصفهان می‌باشد.

استناد: سعادتجو، پریا؛ علیزاده، علی؛ و جهانبخش اصل، سعید؛ خورشیددوست، علی‌محمد؛ ساری صراف، بهروز (۱۴۰۴). مقایسه مصرف انرژی ساختمان تحت تاثیر

تغییرات اقلیمی در شهرهای مختلف ایران، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۸ (۹۰)، ۳۷-۲۱.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.61175.3250>



مقدمه

تغییرات اقلیمی و افزایش دمای زمین یکی از اصلی‌ترین مسائلی است که کره زمین را با مشکلات عدیده‌ای در سال‌های آینده مواجه خواهد کرد. این تغییرات و تبعات ناشی از آن منجر به افزایش مصرف انرژی در زمینه‌های گوناگون از جمله بخش ساختمان خواهند شد. از این‌رو پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان‌ها و تلاش در راستای کاهش آن در مواجهه با تغییرات اقلیمی، جزء مهم‌ترین سیاست‌های کشورهای به حساب می‌آید (Economidou et al., 2020). در بسیاری از کشورهای اروپایی ساختمان‌ها بیش از ۴۰ درصد منابع انرژی را مصرف کرده و بیش از ۳۶ درصد گاز گلخانه‌ای را تولید می‌کنند (Maduta et al., 2022). در این راستا برنامه‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی تا سال ۲۰۵۰ طراحی شده‌است. دستیابی به بسیاری از این اهداف مستلزم ایجاد تغییرات اساسی در زمینه میزان و الگوی مصرف انرژی در بخش ساختمان می‌باشد. یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در این زمینه بازنگری "دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان" در راستای ارتقا تاب‌آوری ساختمان در برابر تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۵۰ می‌باشد. تمرکز اصلی این دستورالعمل بر ارتقا انرژی کارآمدی ساختمان‌ها و کاهش وابستگی آن‌ها به سوخت‌های فسیلی می‌باشد (D'Agostino et al., 2021). بخش قابل‌ملاحظه‌ای از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها توسط سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه به منظور تامین آسایش حرارتی کاربران مصرف می‌شود (ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, 2013)؛ تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین تاثیر مستقیمی بر کارایی سیستم‌های HVAC، میزان انرژی موردنیاز و همچنین کارایی این سیستم‌ها در تعدیل و برقراری شرایط آسایش حرارتی داخل ساختمان دارند. از این رو با در نظر گرفتن عمر مفید و دوره بهره‌برداری از ساختمان، لازم است تا ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان و همچنین شرایط آسایش حرارتی داخل آن‌ها با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی انجام گیرد (Yixing Chen et al., 2023). تغییرات اقلیمی و افزایش دمای کره زمین باعث کاهش انرژی گرمایشی ساختمان‌ها در دهه‌های گذشته شده‌است. از سویی دیگر، این تغییرات منجر به افزایش بار سرمایشی ساختمان در تمامی مناطق به ویژه مناطق گرمسیر شده‌است (Wang et al., 2021). از این رو پیش‌بینی می‌شود با ادامه این روند و تغییرات دمایی طی سال‌های آتی، مصرف انرژی در بسیاری از حوزه‌ها و به ویژه بخش ساختمان افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد (Bardhan et al., 2020). به منظور کاهش مصرف انرژی ساختمان و ارتقا تاب‌آوری آن در مواجهه با تغییرات اقلیمی راهکارهای متعددی از قبیل بهبود عملکرد پوسته بنا، ارتقا سامانه HVAC، استفاده از سیستم‌های هوشمند و بهره‌مندی از سامانه‌های ایستای انرژی وجود دارد که از این میان پوسته ساختمان به عنوان مرز واسطه فضای داخلی و خارجی نقش قابل‌ملاحظه‌ای در مصرف انرژی و میزان تاب‌آوری آن در مواجهه با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (Morewood, 2023).

هدف این تحقیق بررسی تغییرات اقلیمی در شهرهای مختلف ایران طی ۷۰ سال آینده و مقایسه تغییرات مصرف انرژی ساختمان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در این شهرها می‌باشد. بر این اساس پس از مطالعه عمیق پیشینه پژوهش، داده‌های آب و هوایی سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ برای پنج شهر تبریز، تهران، اصفهان، کرمانشاه و مشهد تولید می‌شوند. این شهرها بدین دلیل که جز شهرهای بزرگ و مهم در ایران می‌باشند انتخاب شدند؛ از سویی دیگر تفاوت‌های آب و هوایی میان آن‌ها انجام مقایسه میزان تاثیرگذاری تغییرات اقلیمی در اقلیم‌های مختلف ایران را امکانپذیر می‌نماید. در ادامه پس از بررسی تیپ غالب و الگوی ساخت متداول ساختمان‌های مسکونی، یک نمونه انتخاب شده و عملکرد انرژی آن طی سال‌های آینده در پنج شهر مذکور مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از مطالعات و شبیه‌سازی‌ها، تغییرات اقلیمی در پنج شهر مختلف کشور و همچنین میزان تغییرات مصرف انرژی و تاثیرات زیست‌محیطی این ساختمان در طی هفتاد سال آینده را نشان می‌دهد.

پیشینه پژوهش

موضوع تغییرات اقلیمی و تاثیر آن بر مصرف انرژی در بخش ساختمان موضوعی است که در طی سال‌های گذشته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه انجام شده‌است. بسیاری از پژوهشگران با پیش‌بینی داده‌های

آب و هوایی آینده با مدل‌های مختلف و شبیه‌سازی ساختمان‌ها و شهرها بر اساس آن‌ها به بررسی عملکرد حرارتی، مصرف انرژی و آسایش کاربران در محیط‌های داخل و خارج ساختمان پرداخته‌اند. ونگ و همکاران با استفاده از دو مدل اقلیمی متفاوت، میزان مصرف انرژی ساختمان در پنج شهر مختلف آمریکا را بررسی نموده و پیش‌بینی کرده‌اند که مصرف انرژی در این شهرها طی سال‌های آینده افزایش خواهد یافت (Wang et al., 2017). تروپ و همکاران در پژوهش خود در سال ۲۰۱۹ ثابت نمودند که طی سال‌های آینده، مصرف انرژی سرمایشی در شهرهای آمریکا افزایش و مصرف انرژی گرمایشی کاهش خواهد یافت (Troup et al., 2019). نتایج مشابه این پژوهش، در تحقیق انجام‌گرفته برای انگلستان توسط چو و لورمور به دست آمده‌است (Chow & Levermore, 2010). پژوهش‌های متعددی تاثیر تغییرات اقلیمی در مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم‌های مختلف در کشورهای چین (Yau & Hasbi, 2017) و اروپای جنوبی (Cellura et al., 2018) را مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش انجام‌گرفته توسط براردی و جعفرپور ۱۶ مدل ساختمانی مختلف در کانادا بر اساس داده‌های اقلیمی آینده شبیه‌سازی شده و میزان مصرف انرژی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار OpenStudio 2.8.0 محاسبه شد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، نیاز سرمایشی ساختمان‌ها در آینده به میزان ۱۲۶ درصد افزایش و نیاز گرمایشی آن‌ها به اندازه ۳۳ درصد کاهش خواهد یافت (Jafarpur & Berardi, 2021). لی و همکاران در سال ۲۰۲۱ تاثیر تغییرات آب و هوایی بر عملکرد انرژی یک ساختمان مسکونی در هنگ کنگ را ارزیابی کردند. در این پژوهش شبیه‌سازی‌های انرژی بر اساس داده‌های آب و هوایی قدیمی و داده‌های پیش‌بینی‌شده برای آینده انجام گرفت. نتایج نشان داد که مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده با استفاده از داده‌های TMY آینده به‌طور معنی‌داری بیشتر از مصرف انرژی با استفاده از داده‌های تاریخی TMY می‌باشد (Li et al., 2021). لارسن و همکاران با پیش‌بینی تغییرات اقلیمی میان‌مدت و بلندمدت آرژانتین مبتنی بر سناریو A2 در مدل آب و هوایی HadCM3، رفتار حرارتی و مصرف انرژی یک مدل ساختمانی را در چهار شهر مختلف ارزیابی کردند. به منظور شبیه‌سازی رفتار حرارتی و مصرف انرژی در این پژوهش از نرم‌افزار EnergyPlus استفاده شد. نتایج نشان داد که بار سرمایشی این ساختمان در سال ۲۰۸۰ به میزان ۷۹-۳۶ درصد افزایش و بار حرارتی آن به میزان ۵۹ درصد کاهش خواهد یافت (Larsen et al., 2018). یوان و همکاران در پژوهش اخیر خود تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در چهار شهر ژاپن را بررسی کردند. در این پژوهش از داده‌های آب و هوایی فعلی و آینده با فرمت TMY استفاده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد بار سرمایشی سالانه تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در ساختمان‌های مسکونی شهرهای توکیو، توپوهاشی، اوساکا و ناگویا به ترتیب به میزان ۱۲ درصد، ۹ درصد، ۸ درصد و ۷ درصد افزایش می‌یابد. این در حالیست که بار گرمایشی سالانه در این شهرها به ترتیب به میزان ۸ درصد، ۹ درصد، ۶ درصد و ۵ درصد کاهش می‌یابد (Yuan et al., 2024). دینو و آگول با استفاده از نرم‌افزارهای WeatherShift و EnergyPlus تاثیر تغییرات اقلیمی بر رفتار حرارتی ساختمان در چهار شهر مختلف ترکیه پرداختند. نتایج این پژوهش ثابت کرد ساختمان‌هایی با تهویه طبیعی، در معرض خطر بیشتری از گرمای بیش از اندازه قرار دارند (Dino & Meral Akgül, 2019). آندرو و همکاران (۲۰۱۸)، بر مبنای سناریوهای متفاوت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در اواسط و اواخر قرن ۲۱، میزان مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در شهر والنسیا را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که انرژی موردنیاز برای گرمایش در آینده به دلیل تغییرات اقلیمی کاهش و انرژی لازم برای سرمایش افزایش خواهد یافت (Andreu et al., 2018). لی و همکاران در پژوهش اخیر خود تاثیر تغییرات اقلیمی بر میزان انرژی سرمایشی در ساختمان‌های اداری را بررسی کردند. در این راستا با استفاده از داده‌های آب و هوایی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰، مصرف انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه شد. سپس بهینه‌سازی چند متغیره با استفاده از jEPlus و EA و با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) انجام شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی چندمتغیره، انرژی سرمایشی ساختمان را به میزان ۱۶٫۸ درصد-۱۰٫۶ درصد کاهش داد که این راهکار می‌تواند به تعدیل مصرف انرژی ساختمان در مواجهه با تغییرات اقلیمی کمک کند (J. Li et al., 2024). پژوهش انجام‌گرفته

^۱ Overheating

توسط رودریگوس و فردیناند در سال ۲۰۲۳ بر روی ۱۶ شهر مدیترانه‌ای ثابت نمود که میزان انرژی سرمایشی ساختمان در آینده بسته به موقعیت ساختمان متفاوت خواهد بود (Rodrigues et al., 2023). اتیا و گوین با انجام تحقیقات بر روی یک ساختمان صفرانرژی ثابت کردند که میزان گرمای بیش از حد و خارج از حوزه آسایش در ساختمان تا اواخر قرن ۲۱ در حدود ۴۳/۵ درصد خواهد بود (Attia & Gobin, 2020). مدلسازی حرارتی چندین ساختمان مسکونی در ایتالیا با استفاده از نرم‌افزار Termolog EpiX 11 در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نشان داد که با گذشت زمان و افزایش دمای داخلی ساختمان، نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده و به تبع آن مصرف انرژی سرمایشی در آینده افزایش خواهد یافت (Baglivo et al., 2022). لارسن و همکاران (۲۰۱۹)، در تحقیق خود بر روی ساختمان‌های کشور آرژانتین ثابت کردند که طی سال‌های آینده نیاز به انرژی سرمایشی به شدت افزایش و نیاز به انرژی گرمایشی به طور قابل‌ملاحظه کاهش می‌یابد (Flores Larsen et al., 2019). ژو و همکاران در پژوهش خود در سال ۲۰۲۱ ثابت نمودند ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم کشور چین طی سال‌های آینده به انرژی سرمایشی بیشتر و ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد به انرژی کمتری نیاز خواهند داشت (Zou et al., 2021). عباسی‌زاده و همکاران تاثیر جهت‌گیری بنا، مواد تغییر فاز دهنده، مساحت بازشوها، زاویه سایبان و استفاده از پشت‌بام سبز در چهار اقلیم مختلف در ایران در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۳۵ را بررسی نموده و ثابت کردند که نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی، به ترتیب تا سال ۲۰۳۵، ۱۵-۱۹/۸ درصد کاهش و ۲۱/۲۳-۱۱/۲۶ درصد افزایش خواهد یافت (Abbasizade et al., 2021).

اگرچه طی سال‌های اخیر تحقیقات متعدد بین‌المللی تاثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین بر مصرف انرژی ساختمان را بررسی کرده‌اند، اما تعداد مطالعات انجام‌شده در ایران بسیار محدود است. محدود تحقیقات انجام‌شده در این حوزه عموماً تغییرات اقلیمی در کوتاه‌مدت (۲۰ سال) را مورد بررسی قرار داده‌اند. بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته در این حوزه بر روی یک شهر متمرکز شده و تاکنون پژوهشی که به بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی ساختمان در شهرهای مختلف ایران (با اقلیم متفاوت) بپردازد انجام نشده‌است. این پژوهش با پیش‌بینی و تولید داده‌های آب و هوایی برای ۷۰ سال آینده، به بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد حرارتی و مصرف انرژی ساختمان در پنج شهر ایران (تهران، تبریز، مشهد، کرمانشاه و اصفهان) می‌پردازد و میزان تاب‌آوری یک مدل مبنا در مواجهه با تغییرات اقلیمی در شهرهای مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد.

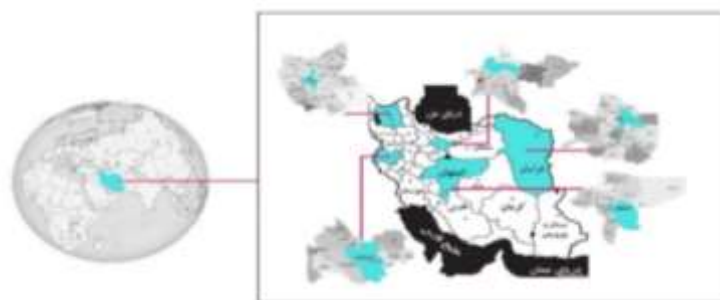
روش پژوهش

این پژوهش تاثیر تغییرات اقلیمی بر مصرف انرژی یک ساختمان مسکونی در پنج شهر مختلف ایران با اقلیم‌های متفاوت را مورد بررسی قرار می‌دهد. در گام اول پژوهش، با بررسی تیپ غالب ساختمان‌های مسکونی ایران بر اساس مساحت، جهت‌گیری، جزئیات اجرایی و مصالح به کاررفته در ساختمان، یک بنا به عنوان نمونه پایلوت انتخاب شد. در گام بعدی پس از انتخاب سناریو و نرم‌افزار مناسب، داده‌های آب و هوایی آینده تولید شد. سپس پس از انتخاب نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی، شبیه‌سازی‌ها بر مبنای داده‌های آب و هوایی کنونی و داده‌های پیش‌بینی‌شده برای آینده توسط نرم‌افزار انجام شد. در گام بعدی تحلیل و مقایسه خروجی‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها، به منظور بررسی عملکرد و میزان تاثیرپذیری مدل ساختمانی از تغییرات اقلیمی در پنج شهر مختلف ایران انجام گردید.

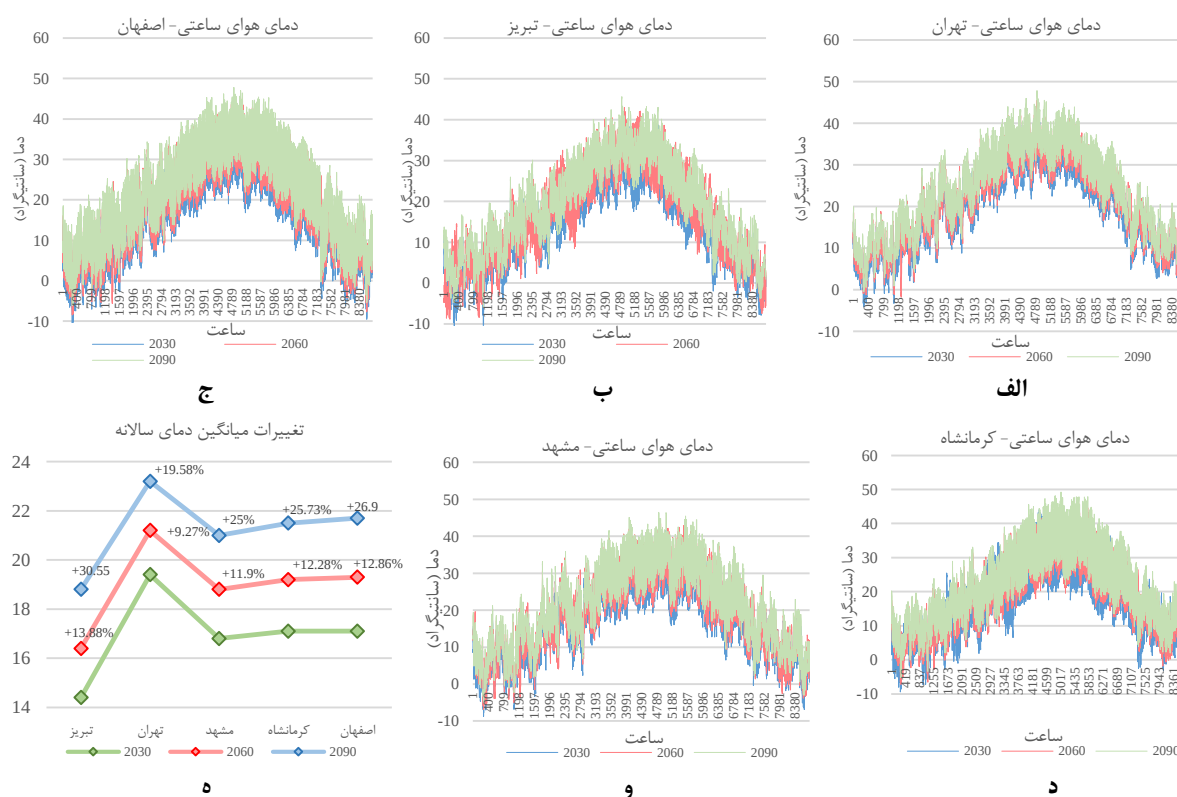
۱. تولید داده‌های آب و هوایی آینده

در حال حاضر ابزارهای مختلفی برای پیش‌بینی و تولید داده‌های آب و هوایی آینده وجود دارد که توسط محققین مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ابزارهای پرکاربرد و معتبر در این زمینه، نرم‌افزار MeteorNorm است که عملکرد آن مبتنی بر کاهش مقیاس آماری می‌باشد. نسخه‌های قدیمی این نرم‌افزار مبتنی بر مدل HadCM3 می‌باشند، اما در نسخه جدید این نرم‌افزار از سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 استفاده می‌شود. این نرم‌افزار که توسط Intersolar Europe توسعه یافته‌است، از الگوریتم‌های کامپیوتری به منظور کاهش مقیاس آماری استفاده می‌کند. تولیدکننده‌های داده در این نرم‌افزار مبتنی بر تجزیه و

تحلیل آماری داده‌های آب‌وهوایی موجود برای تولید و پیش‌بینی سری‌های آب‌وهوایی آینده می‌باشند. در این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته امکان پیش‌بینی داده‌های آب‌وهوایی ساعتی (شامل اطلاعات ساعتی از قبیل دما، رطوبت، بارش، سرعت و جهت باد، تابش خورشیدی و...) برای هر موقعیت تعریف‌شده در جهان تا سال ۲۰۹۰ و با استفاده از سناریوهای مذکور به طور کامل وجود دارد. در این پژوهش، ابتدا فایل epw ساعتی کنونی از پایگاه‌های معتبر استخراج گردید و با استفاده از نرم-افزار Meteororm 8 داده‌های آب‌وهوایی برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ مبتنی بر سناریو RCP8.5 تولید شد. با مقایسه این داده‌ها می‌توان میزان تغییرات آب‌وهوایی در پنج شهر تهران، تبریز، مشهد، کرمانشاه و اصفهان طی هفت دهه آینده را با یکدیگر مقایسه نمود (نمودار ۱). شکل ۱ موقعیت شهرهای انتخاب‌شده بر روی نقشه ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت ایران بر روی کره جغرافیایی، موقعیت شهرهای انتخابی بر روی نقشه ایران.



نمودار ۱. الف-و) میانگین دمای ساعتی در شهرهای تهران، تبریز، اصفهان، کرمانشاه و مشهد. ه) درصد تغییرات میانگین دمای سالیانه در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ در شهرهای مورد مطالعه.

جدول ۱. داده‌های آب‌وهوایی پنج شهر مورد مطالعه برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ مستخرج از نرم‌افزار Meteonorm.

	مینیمم دما (سانتیگراد)			ماکزیمم دما (سانتیگراد)			رطوبت نسبی (درصد)			دما (سانتیگراد)		
	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰
تهران	-۰٫۴	-۱٫۷	-۴٫۱	۴۷٫۸	۴۵٫۵	۴۳	۳۷٫۰۵	۳۷/۰۱	۳۶/۹۴	۲۳/۲۲	۲۱/۱	۱۹/۳۴
تبریز	-۵٫۹	-۸٫۸	-۱۱٫۳	۴۵٫۶	۴۲٫۹	۴۰٫۲	۴۹٫۸۱	۵۰/۶۹	۵۰/۰۴	۱۸/۸۲	۱۶/۳۷	۱۴/۳۴
اصفهان	-۶٫۱	-۸٫۴	-۱۰٫۶	۴۷٫۸	۴۵٫۲	۴۲٫۹	۳۵٫۵۱	۳۵/۷۵	۳۵/۹۴	۲۱/۷۱	۱۹/۲۸	۱۷/۱۳
کرمانشاه	-۵٫۲	-۷٫۲	-۹٫۴	۴۹٫۲	۴۶٫۹	۴۴٫۵	۴۱٫۵۶	۴۱/۸۰	۴۱/۸۵	۲۱/۴۹	۱۹/۲۱	۱۷/۰۴
مشهد	-۴٫۹	-۶٫۸	-۸٫۷	۴۶٫۵	۴۳٫۹	۴۱٫۶	۴۵٫۷۶	۴۵/۶۴	۴۶/۰۴	۲۱/۰۴	۱۸/۷۹	۱۶/۷۸

جدول ۲. تغییرات دمایی و رطوبت نسبی در سال‌های مختلف.

	تغییرات مینیمم دما (درصد)			تغییرات ماکزیمم دما (درصد)			تغییرات رطوبت نسبی (درصد)			تغییرات دما (درصد)		
	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰	۲۰۶۰	۲۰۳۰	۲۰۹۰
تهران	۹۰/۲۴	۵۸/۵۳	۰	۱۱/۱۶	۵/۸۱	۰	۰/۲۹	درصد	۰/۱۸	۰	۲۰/۰۶	۹٫۱
	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد
تبریز	۴۷/۷۸	۲۲/۱۲	۰	۱۳/۴۳	۶/۷۱	۰	-۰/۴۵	درصد	۰/۱۲	۰	۳۱/۲۴	۱۴٫۱۵
	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد
اصفهان	۴۲/۴۵	۲۰/۷۵	۰	۱۱/۴۲	۵/۳۶	۰	-۱/۱۹	درصد	-۰/۰۵	۰	۲۶/۷۳	۱۲٫۵۵
	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد
کرمانشاه	۴۴/۶۸	۲۳/۴۰	۰	۱۰/۵۶	۵/۳۹	۰	-۰/۶۹	درصد	-۰/۱۱	۰	۲۶/۱۱	۱۲٫۷۳
	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد
مشهد	۴۳/۶۷	۲۱/۸۳	۰	۱۱/۷۷	۵/۵۲	۰	۰/۲۶	درصد	۰/۰۸	۰	۲۵/۳۸	۱۱٫۹۷
	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد

بررسی داده‌های آب‌وهوایی مستخرج از نرم‌افزار متونورم برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نشان داد که با گذشت زمان متوسط دمای سالیانه در تمامی شهرها افزایش می‌یابد. با این حال میزان این تغییرات در شهرهای مختلف با یکدیگر تفاوت دارد؛ به طوریکه از میان پنج شهر مورد بررسی میزان تغییرات دمایی در شهر تبریز نسبت به سایر شهرها بیشتر است. پیش‌بینی می‌شود که میانگین دمای سالیانه در شهر تبریز در سال ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ به ترتیب به میزان ۱۴/۱۵٪ و ۳۱/۲۴٪ افزایش یابد. پس از شهر تبریز، شهر اصفهان با افزایش دما به میزان ۱۲/۵۵٪ و ۲۶/۷۳٪ در رده دوم تغییرات دمایی قرار می‌گیرد. میزان تغییرات و افزایش دما طی هفتاد سال آینده در شهر تهران در مقایسه با چهار شهر دیگر نسبتاً کمتر خواهد بود. بررسی ماکزیمم دمای سالیانه حاکی از آنست که این کمیت در سال ۲۰۶۰ به میزان ۲-۲/۵ درجه و در سال ۲۰۹۰ در حدود ۴-۵ درجه نسبت به سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. از میان پنج شهر مورد مطالعه، بیشترین تغییرات ماکزیمم دمای سالیانه مربوط به شهر تبریز می‌باشد. با بررسی مینیمم دمای سالانه می‌توان نتیجه گرفت که این کمیت نیز به میزان ۲-۳ درجه در سال ۲۰۶۰ و به مقدار ۴-۵ درجه در سال ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. بر اساس نتایج عددی می‌توان اذعان نمود که میزان تغییرات مینیمم مقدار دما در شهر تهران در مقایسه با چهار شهر دیگر بیشتر است. بررسی خروجی‌های عددی نشان‌دهنده کاهش مقدار رطوبت نسبی هوا در سال‌های ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ می‌باشد که این کاهش به دلیل افزایش دمای هوا با گذشت زمان می‌باشد.

۲. مدل‌های شبیه‌سازی شده

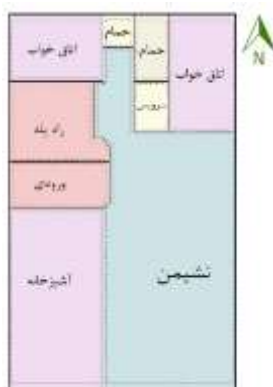
مدل مورد مطالعه در این پژوهش یک واحد مسکونی با متراژ ۱۳۳ متر مربع می‌باشد که در طبقه میانی یک آپارتمان پنج طبقه واقع شده است. انتخاب این مدل بر اساس مطالعات میدانی و بررسی‌های انجام گرفته و بررسی تیپ غالب ساختمان‌های مسکونی معاصر می‌باشد. در این مرحله در حدود ۲۰ پلان ساختمان مسکونی در هر شهر جمع‌آوری و بررسی شد (مجموعاً ۱۰۰ پلان). در مرحله بررسی نمونه‌های موجود و جمع‌آوری اطلاعات، تمامی مشخصات ساختمان از جمله متراژ، جهت‌گیری، جانمایی فضاها، جزئیات دیوارها و مصالح مدنظر قرار گرفت و بر اساس اطلاعات به دست آمده، یک تیپ پلان به عنوان نمونه متداول به عنوان نمونه مورد مطالعه تعریف شد. این مدل در مجموع از ۹ زون حرارتی تشکیل یافته است که در این میان، واحدهای شرقی، غربی و فوقانی و تحتانی به عنوان واحدهای مسکونی و زون حرارتی کنترل شده تعریف شده‌اند (تصویر ۲). تعداد افراد ساکن در این ساختمان ۵ نفر می‌باشد که پوشش متداول تابستانی با ضریب ۵/۰ و پوشش زمستانی با ضریب ۱/۰ برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات و تنظیمات تعریف شده برای این ساختمان در جداول ۳ ارائه شده است. با توجه به تاکید مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان به استفاده از عایق‌بندی حرارتی و بازشوهای دوجداره، در تعریف مدل مبنا این اصول در نظر گرفته شده است. جزئیات تمامی اجزای ساختمان برای این مدل در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی رفتار حرارتی و مصرف انرژی با استفاده از نرم‌افزار نرم‌افزار Design Builder 7.0.0.096 انجام شده است. موتور حل این نرم‌افزار موتور EnergyPlus می‌باشد که توسط بخش انرژی آمریکا در سال ۲۰۱۱ توسعه یافته و به عنوان یکی از معتبرترین نرم‌افزارهای مدلسازی انرژی شناخته شده است. اعتبار نرم‌افزار انرژی پلاس که موتور شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر است، بر اساس استانداردهای BESTEST و اشری ۱۴ تایید شده است (Zomorodian & Tahsildoost, 2016).

جدول ۳. تنظیمات شبیه‌سازی مدل در محیط نرم‌افزار.

تنظیمات	مقادیر
آب گرم مصرفی	۰,۷۲ (l/m ² – day)
نقطه تنظیم گرمایش	۲۱ °C
نقطه تنظیم سرمایش	۲۵ °C
کاهش موقت گرمایش	۱۲ °C
کاهش موقت سرمایش	۲۸ °C
نقطه تنظیم رطوبت‌زنی	۱۰ درصد
نقطه تنظیم رطوبت‌زنی	۹۰ درصد
حجم هوای تازه	۱۰ (l/s – person)
روشنایی مطلوب	۱۵۰ Lux
HVAC	فن کویل چهارلوله + چیلر هوای سرد

جدول ۴. جزئیات اجزای مختلف ساختمانی در مدل شبیه‌سازی شده.

عنصر	لایه‌ها (از خارج به داخل)	ضخامت (mm)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	گرمای ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	ضریب هدایت حرارتی λ ($\frac{W}{m \cdot K}$)	ضخامت کل (mm)	ضریب انتقال حرارتی U ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)
کف (سقف) DET 1	سرامیک	۲۰	۱۷۰۰	۸۵۰	۰/۸	۴۲۰	۱/۳۹
	ملات ماسه سیمان	۲۰	۱۸۶۰	۸۴۰	۰/۷۲		
	بتن پوک	۵۰	۵۰۰	۸۴۰	۰/۱۷		
	دال بتنی	۳۰۰	۲۳۰۰	۱۰۰۰	۲/۳		
	گچ و خاک	۳۰	۱۲۰۰	۸۴۰	۰/۴۲		
دیوار داخلی DET2	ملات گچ و خاک (آستر و رویه)	۳۰	۱۲۰۰	۸۴۰	۰/۴۲	۱۶۰	۱/۸۴
	آجر	۱۰۰	۱۹۲۰	۸۴۰	۰/۷۲		
	ملات گچ و خاک (آستر و رویه)	۳۰	۱۲۰۰	۸۴۰	۰/۴۲		
دیوار خارجی همراه عایق DET3	نمای آجری	۳۰	۱۷۰۰	۸۰۰	۰/۸۴	۲۴۰	۰/۳۷
	ملات ماسه سیمان	۳۰	۱۸۰۰	۱۰۰۰	۱		
	پلی‌استایرن منبسط‌شده	۵۰	۳۵	۱۴۰۰	۰/۰۳		
	بلوک بتنی AAC	۱۰۰	۲۸۰۰	۸۹۶	۰/۱۱		
	گچ و خاک (آستر و رویه)	۳۰	۱۲۰۰	۸۴۰	۰/۴۲		
شیشه دوجداره DET4	شیشه	۳	-	-	۰/۹	۱۹	۲/۷
	هوا	۱۳	-	-	-		
	شیشه	۳	-	-	۰/۹		



شکل ۲. پلان ساختمان مورد مطالعه. این پلان متشکل از ۹ زون حرارتی می‌باشد؛ تمامی فضاها به غیر از ورودی و راه‌پله زون حرارتی کنترل شده می‌باشند.

نتایج

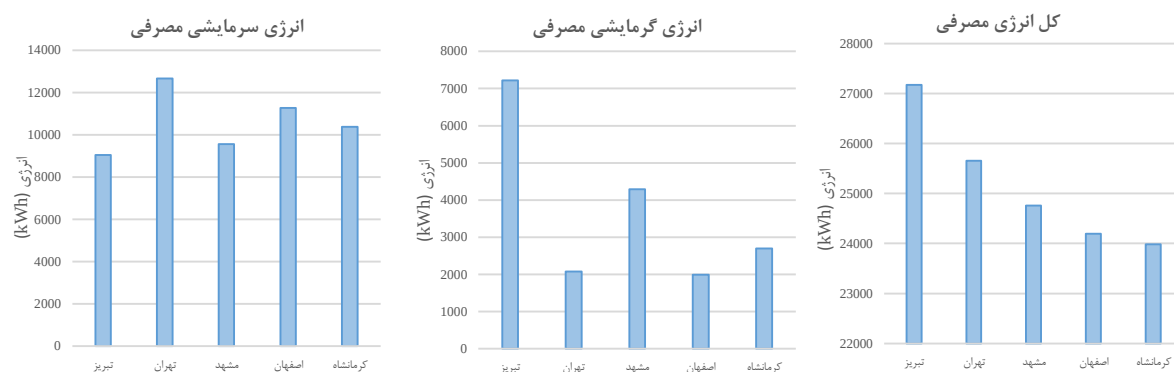
به منظور ارزیابی رفتار حرارتی ساختمان و مصرف انرژی آن تحت تاثیر تغییرات اقلیمی، در گام اول تحلیل نتایج، میزان کل انرژی مصرفی سالانه، میزان انرژی سرمایشی و گرمایشی سالانه و مقدار دی‌اکسیدکربن انتشاریافته در هر شهر و به تفکیک سه سال ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ گزارش شد. مقایسه مجموع انرژی مصرفی سالانه در تمامی شهرها به غیر از تبریز نشان داد که با گذشت زمان و تغییرات اقلیمی ناشی از آن، مصرف انرژی افزایش می‌یابد. از میان پنج شهر مورد مطالعه، بیشترین تغییرات مصرف انرژی سالانه مربوط به شهر اصفهان می‌باشد که مصرف انرژی در سال ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ به میزان

۷/۸۶ درصد و ۱۷/۵۹ درصد افزایش یافته‌است. میزان تغییرات مصرف انرژی در سال ۲۰۶۰ نسبت به ۲۰۳۰ در بازه ۳-۷۸ درصد الی ۷/۸۶ درصد و در سال ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ در بازه ۵۹-۱۷ درصد-۱/۴۷ درصد می‌باشد (نمودار ۲ الف). مقایسه انرژی گرمایشی سالانه حاکی از آنست که با گذشت زمان و افزایش دمای کره زمین، مقدار این انرژی نیز کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که از میان پنج شهر مورد مطالعه، رفتار حرارتی در شهر کرمانشاه کمی متفاوت بوده و انرژی گرمایشی در سال ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۶۰ اندکی افزایش یافته‌است. بیشترین تغییرات انرژی گرمایشی سالانه در شهر تهران مشاهده می‌شود که مقدار انرژی گرمایشی در سال ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ به ترتیب به میزان ۳۷ درصد و ۶۶/۶۴ درصد کاهش یافته‌است. تغییرات مقادیر انرژی گرمایشی مصرفی در سال ۲۰۶۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ در بازه ۳۹/۳۸-۱۵/۷۷ و تغییرات آن در سال ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ در بازه ۶۶/۶۴-۳۰ تغییر کرده‌است (نمودار ۲ ب). نمودار انرژی سرمایشی سالانه در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نشان می‌دهد که با گذشت زمان و افزایش دمای زمین، مقدار این کمیت رو به افزایش است. از میان شهرهای بررسی‌شده، بیشترین تغییرات این کمیت در شهر تبریز مشاهده گردید؛ به‌طوری‌که در طی سه دهه اول، انرژی سرمایشی سالانه به میزان ۳۷/۵۳ درصد و در سه دهه دوم به میزان ۷۵/۴۳ درصد افزایش خواهد یافت. بررسی‌ها نشان داد که تا سال ۲۰۶۰ مقدار تغییرات انرژی سرمایشی سالانه در بازه ۳۷/۵۳-۲۱/۳۶ درصد و تا سال ۲۰۹۰ دامنه این تغییرات در بازه ۷۵/۴۳-۴۴/۱۴ درصد خواهد بود (نمودار ۲ ج).



نمودار ۲. الف) کل انرژی مصرفی، ب) انرژی سرمایشی و ج) گرمایشی سالانه در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰.

به منظور مقایسه بهتر، مجموع انرژی‌های مصرفی و انرژی سرمایشی و گرمایشی در طی سال‌های مورد مطالعه در هر پنج شهر محاسبه و در نمودارهای ۳ الف-ج نمایش داده‌شد. بررسی مجموع انرژی‌های مصرفی، انرژی سرمایشی و گرمایشی در بازه‌های زمانی مطالعه‌شده نشان می‌دهد که بیشترین انرژی مصرفی سالانه مربوط به شهر تبریز و کمترین مقدار آن مربوط به شهر کرمانشاه می‌باشد (نمودار ۳ الف). بر اساس نمودار ۳ ب می‌توان گفت که مجموع انرژی گرمایشی مصرفی در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ در شهر تبریز با اختلافی قابل ملاحظه در ردیف اول قرار دارد. در میان شهرهای مورد مطالعه، شهرهای تهران و اصفهان کمترین انرژی گرمایشی (۲۰۰۰ کیلو وات ساعت) را مصرف می‌کنند. نتایج نشان داد که اختلاف مجموع انرژی گرمایشی در شهر تبریز با دو شهر تهران و اصفهان در حدود ۵۰۰۰ کیلووات ساعت می‌باشد که مقداری چشمگیر است (نمودار ۳ ب). همچنین بر اساس این نمودارها می‌توان گفت که بیشترین انرژی سرمایشی سالانه در تهران (۱۲۶۷۰ کیلو وات ساعت) و کمترین مقدار آن در شهر تبریز می‌باشد (نمودار ۳ ج).



نمودار ۳. مجموع انرژی‌های مصرفی در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰: (الف) کل انرژی مصرفی، (ب) انرژی گرمایشی مصرفی و (ج) انرژی سرمایشی مصرفی.

به منظور بررسی تأثیرات زیست‌محیطی ساختمان انتخاب‌شده در شهرهای مختلف میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با گذشت زمان، میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در شهر اصفهان افزایش قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت؛ به‌طوری‌که این مقدار در سال ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ نسبت به سال ۲۰۳۰ به ترتیب به میزان ۱۵/۴۰ درصد و ۳۱/۹۷ درصد افزایش خواهد یافت. این در حالیست که اختلاف میزان گاز منتشرشده در سال‌های مورد مطالعه در شهر تبریز کمترین مقدار را دارد (نمودار ۴الف). بررسی مجموع گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده در سه سال نشان می‌دهد که شهر تهران با انتشار ۱۲۳۶۷ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن، بیشترین تأثیرات منفی و شهر مشهد با ۱۰۸۹۴ کیلوگرم، کمترین تأثیرات مخرب زیست‌محیطی را در مقایسه با دیگر شهرها دارد (نمودار ۴ب).



نمودار ۴. مقایسه میزان گاز دی‌اکسیدکربن منتشرشده در پنج شهر: (الف) انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰؛ (ب) مجموع گاز دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰.

برای ارزیابی دقیق‌تر رفتار مدل انتخابی طی سال‌های آینده، مجموع انرژی مصرفی به تفکیک ماه و سال در هر شهر گزارش شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با گذشت زمان، میزان انرژی مصرفی ماهانه در شهرهای مشهد و تبریز در طی ماه‌های ۱۱-۳ (دسامبر-آوریل) روندی کاهشی خواهد داشت. این روند در شهرهای تهران و اصفهان در طول ماه‌های ۲-۱۲ (ژانویه، مارس) مشهود است. بررسی نمودار ۵ نشان می‌دهد که در دو شهر تبریز و مشهد، میزان تغییرات انرژی مصرفی ماهانه با گذشت زمان در طول ماه‌های ۱۰-۴ روندی افزایشی دارد. این در حالیست که در دو شهر تهران و اصفهان روند افزایشی مصرف انرژی

در طول زمان در طی ماه‌های ۱۱-۳ مشهود است. در این میان میزان تغییرات مصرف انرژی در شهر کرمانشاه روندی متفاوت با سایر شهرها داشته و مثل دیگر شهرهای مورد مطالعه در بسیاری از ماه‌های سال (۳، ۱، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) روند افزایشی یا کاهشی مشخصی ندارد.



نمودار ۵. مجموع انرژی مصرفی به تفکیک ماه و سال در شهرهای: (الف) کرمانشاه، (ب) مشهد، (ج) تبریز، (د) تهران، و (و) اصفهان.

به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج و ارزیابی ارتباط بین متغیرها از آزمون‌های آماری واریانس یک‌راهه استفاده شد. در این پژوهش متغیرهای وابسته (دما، مصرف انرژی و مقدار گاز منتشرشده) متغیرهایی پیوسته بوده و متغیر مستقل (سال) دسته‌ای می‌باشد. با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ثابت شد که داده‌ها دارای توزیع نورمال می‌باشند. از این‌رو از آزمون واریانس یک‌راهه که آزمون پارامتری می‌باشد استفاده گردید. در گام اول، ارتباط میان مصرف انرژی و سال بررسی شد و با تحلیل نتایج حاصل از سطح معنی‌داری مشخص گردید که در هیچ‌یک از شهرهای مورد مطالعه میان این دو متغیر (سال و مصرف انرژی) ارتباط معناداری وجود ندارد. در تمامی آزمون‌های انجام‌شده برای پنج شهر مورد مطالعه مقادیر معناداری بالای ۰/۰۵ می‌باشد که نشان از عدم معناداری ارتباط بین متغیرها دارد (جدول ۵). با استفاده از تحلیل واریانس یک‌راهه ارتباط میان متغیر سال و میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در شهرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که سطح معنی‌داری در هر پنج شهر مقادیر بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد و بر این اساس می‌توان ادعا نمود که ارتباط معناداری میان مقدار گاز انتشاریافته و سال وجود ندارد (جدول ۶). در گام سوم تحلیل‌های واریانس ارتباط میان افزایش دما و سال مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های

معناداری میان دما و گذشت زمان وجود دارد (جدول ۷).
 Sig، در هر پنج شهر مورد مطالعه ارتباط

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس یکراهه برای بررسی ارتباط سال و مصرف انرژی.

تبریز															
اصفهان			کرمانشاه			مشهد			تبریز			تهران			
انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	
معیار			معیار			معیار			معیار			معیار			
۲۰۳۰	۱۷۳/۲۹	۰/۷۲	۰/۴۹	۲۰۵/۶۲	۰/۲۷	۰/۷۵	۱۸۹/۶۸	۰/۱۰	۰/۹۰	۳۱۲/۸۴	۰/۲۷	۰/۹۷	۲۲۷/۴۳	۰/۲۷	۰/۷۶
۲۰۶۰	۲۲۲/۰۸			۲۴۸/۶۳			۲۰۲/۲۵			۲۹۴/۹۳			۲۷۴/۷۴		
۲۰۹۰	۲۶۳/۸۱			۲۶۳/۹۵			۲۶۴/۸۱			۲۸۴/۵۲			۳۳۸/۶۶		

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس یکراهه برای بررسی ارتباط سال و تولید گاز دی اکسید کربن.

شماره پرسشنامه	تهران			تبریز			مشهد			کرمانشاه			اصفهان		
	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig
	معیار			معیار			معیار			معیار			معیار		
۲۰۳۰	۱۸۷/۹۶	-/۴۸	۰/۶۲	۱۳۸/۵۵	-/۱۵	۰/۸۵	۱۲۷/۶۱	-/۵۷	۰/۵۷	۱۶۴/۲۶	-/۳۵	۰/۷۰	۱۴۵/۸۵	۱/۸۷	۰/۱۷
۲۰۶۰	۲۱۸/۶۹			۱۷۶/۲۹			۱۷۰/۷۲			۱۹۸/۴۶			۱۵۰/۵۶		
۲۰۹۰	۲۵۵/۸۳			۲۲۲/۴۳			۲۱۵/۱۴			۲۱۴/۵۳			۲۰۱/۴۱		

جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس یکراهه برای بررسی ارتباط سال و دمای هوا.

توزیع آماری داده‌های پرسشنامه سنجش تاب‌آوری در دانشجویان															
تهران			تبریز			مشهد			کرمانشاه			اصفهان			
انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	انحراف	F	Sig	
معیار			معیار			معیار			معیار			معیار			
۲۰۳۰	۱۱/۶۳	۳۳۳/۵۶	.	۱۱/۴۹	۳۲۶/۲۳	.	۱۰/۶۳	۳۳۴/۰۳	.	۱۱/۰۵	۳۴۵/۷۴	.	۱۰/۵۰	۲۹۷/۴۹	.
۲۰۶۰	۱۱/۸۵			۱۱/۵۷			۱۱/۰۵			۱۱/۵۷			۱۰/۵۰		
۲۰۹۰	۱۱/۷۴			۱۱/۴۸			۱۱/۰۴			۱۱/۲۱			۱۰/۶۲		

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش عملکرد حرارتی و مصرف انرژی یک ساختمانی مسکونی دوخوابه در پنج شهر مختلف ایران طی ۷۰ سال آینده را مورد بررسی و مقایسه قرار داد. بدین منظور با پیش‌بینی و تولید داده‌های اقلیمی، عملکرد حرارتی و مصرف این ساختمان طی سال‌های آینده (۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰) محاسبه شد. نتایج نشان داد که مجموع انرژی مصرفی سالانه در تمامی شهرها (به جز تبریز) با گذشت زمان و تغییرات اقلیمی ناشی از آن، افزایش می‌یابد. با گذشت زمان، بیشترین تغییرات در مصرف انرژی سالانه در شهر اصفهان مشاهده شد. در تمامی شهرهای مورد مطالعه (به جز کرمانشاه) با گذشت زمان و تغییرات اقلیمی، انرژی گرمایشی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها مشاهده گردید طی هفتاد سال آینده، انرژی گرمایشی مورد نیاز ساختمان افزایش خواهد یافت. از میان پنج شهر مطالعه‌شده، بیشترین تغییرات انرژی گرمایشی سالانه در شهر تهران

(۶۶/۶۴ درصد) و بیشترین افزایش انرژی سرمایشی سالانه در شهر تبریز (۷۵/۴۳ درصد) مشاهده گردید. بررسی‌ها نشان داد که تا سال ۲۰۶۰ مقدار تغییرات انرژی سرمایشی سالانه در بازه ۳۷/۵۳-۲۱/۳۶ درصد و تا سال ۲۰۹۰ دامنه این تغییرات در بازه ۷۵/۴۳-۴۴/۱۴ درصد خواهد بود. نتایج عددی به دست آمده برای مجموع انرژی‌های مصرفی، انرژی سرمایشی و گرمایشی در طی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰) نشان داد که بیشترین انرژی مصرفی سالانه در شهر تبریز و کمترین آن در شهر کرمانشاه می‌باشد. از سویی دیگر مشاهده گردید بالاترین مقادیر انرژی گرمایشی مصرفی متعلق به شهر تبریز و بالاترین انرژی سرمایشی سالانه مربوط به شهر تهران می‌باشد. بررسی تاثیرات زیست‌محیطی و مقادیر گاز دی‌اکسیدکربن انتشار یافته حاکی از آنست که بالاترین مقادیر گازهای منتشرشده در طی سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ مربوط به شهر تهران و بیشترین تغییرات مربوط به انتشار این گاز در طی هفتاد سال آینده مربوط به شهر اصفهان می‌باشد. از سویی دیگر انجام آنالیزهای آماری و تحلیل‌های واریانس یک‌راهه نشان داد که هیچ ارتباط معناداری میان گذشت زمان و مصرف انرژی و انتشار گاز دی‌اکسید کربن در این پنج شهر وجود ندارد؛ با این وجود تغییرات دمایی و گذشت زمان در تمامی شهرها دارای ارتباطی معنادار می‌باشند. نتایج این پژوهش با یافته‌های تحقیقات انجام گرفته توسط تروب (۲۰۱۹)، چو و لورمور (۲۰۱۰)، براردی و جعفرپور (۲۰۲۱)، لارسن و همکاران (۲۰۱۹)، آندرو و همکاران (۲۰۱۸)، باگلیوو و همکاران (۲۰۲۲) که ثابت کردند انرژی مورد نیاز گرمایشی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده کاهش و انرژی مورد نیاز سرمایشی افزایش خواهد یافت همسو می‌باشد. نتایج این پژوهش مغایر با دستاوردهای تحقیق انجام گرفته توسط ژو و همکاران (۲۰۲۱) است که مدعیست ساختمان‌های واقع در اقلیم سرد، با توجه به افزایش دما در آینده، میزان مصرف انرژی پایین‌تری خواهند داشت. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به تعداد نمونه‌ها و تعداد شهرهای مورد مطالعه اشاره نمود. می‌توان با گونه‌شناسی ساختمان‌های مسکونی هر شهر به طور دقیق و جمع‌آوری اطلاعات لازم در زمینه جزئیات اجرایی آن‌ها، نمونه مورد مطالعه را دقیق‌تر تعریف نمود. همچنین توسعه محدوده مورد مطالعه و افزایش تعداد شهرهای مورد پژوهش از جمله مواردی است که لازم است در پژوهش‌های آتی مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. از دیگر زمینه‌های پژوهشی پیشنهادی در این زمینه می‌توان به ارزیابی پتانسیل و مقایسه میزان کارایی راهکارهای مختلف کاهش مصرف انرژی در هر شهر پرداخت. با بررسی راهکارهای انرژی کارآمدی از جمله ارتقا پوسته، استفاده از عایق‌بندی حرارتی، استفاده از سایبان، مصالح تغییر فاز دهنده، نما و بام سبز در ساختمان، می‌توان تاثیر هر یک از این راهکارها در عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی در حال حاضر و طی دهه‌های آتی در شهرهای مختلف را بررسی نمود و کارآمدترین راهکارها در راستای ارتقا عملکرد ساختمان طی سال‌های آتی برای هر شهر را به طور مجزا پیشنهاد داد. نتایج این پژوهش با مقایسه عملکرد حرارتی، مصرف انرژی و همچنین تاثیرات مخرب زیست‌محیطی یک مدل مبنا در شهرهای مختلف می‌تواند راهنمای معماران و طراحان در طراحی ساختمان‌های تاب‌آور در مواجهه با تغییرات اقلیمی باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش کد اخلاق را به شماره از کمیته اخلاق دانشکده/دانشگاه دریافت کرده است. نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: استاد مشاور پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده دوم: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهادی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده چهارم: استاد راهنمای پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده پنجم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

عباسی‌زاده، ف.، عباسپور، م.، سلطانی، م.، و حاج ملاکانی، ع. (۲۰۲۱). تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر مصرف انرژی در ساختمان‌ها. *مجله علوم و فناوری محیط زیست*. <https://doi.org/10.22034/jest.2021.55451.5166>.

References

- Abbasizade, F., Abbaspour, M., Soltanieh, M., & Haj Mulla kani, A. (2021). Climate change and its impact on energy consumption in buildings. *Journal of Environmental Science and Technology* (Accepted Manuscript). <https://doi.org/10.22034/jest.2021.55451.5166>.
(In Persian)
- Andreu, V., Aparicio, C., Martínez Ibernón, A., & Vivancos, J.-L. (2018). Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy*, 165, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.015>
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, A. (2013). Thermal environmental conditions for human occupancy.
- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. *Energies*, 13 (20), <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- Baglivo, C., Congedo, P. M., Murrone, G., & Lezzi, D. (2022). Long-term predictive energy analysis of a high-performance building in a mediterranean climate under climate change. *Energy*, 238, 121641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121641>
- Bardhan, R., Debnath, R., Gama, J., & Vijay, U. (2020). REST framework: A modelling approach towards cooling energy stress mitigation plans for future cities in warming Global South. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102315>
- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., & Tumminia, G. (2018). Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe. *Energy for Sustainable Development*, 45, 46–65. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.001>
- Chen, Yixing, Ren, Z., Peng, Z., Yang, J., Chen, Z., & Deng, Z. (2023). Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption. *Journal of Building Engineering*, 78, 107646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107646>
- Chen, Yuehao, Li, M., Xiong, M., Cao, J., & Li, J. (2018). Future Climate Change on Energy Consumption of Office Buildings in Different Climate Zones of China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27, 45–53. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54599234>
- Chow, D. H. C., & Levermore, G. (2010). The effects of future climate change on heating and cooling demands in office buildings in the UK. *Building Services Engineering Research and Technology*, 31, 307–323. <https://doi.org/10.1177/0143624410371284>
- D'Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2021). Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS) development in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100680. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100680>
- Dino, I. G., & Meral Akgül, C. (2019). Impact of climate change on the existing residential building stock in Turkey: An analysis on energy use, greenhouse gas emissions and occupant comfort. *Renewable Energy*, 141, 828–846. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.150>

- Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>
- Flores Larsen, S., Filippín, C., & Barea, G. (2018). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Flores Larsen, S., Filippín, C., & Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184, 216–229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Jafarpur, P., & Berardi, U. (2021). Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints. *Journal of Building Engineering*, 42, 102725. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102725>
- Li, H., Ren, H., & Wu, M. (2021). The impact of climate change on energy performance of a residential building in Hong Kong using typical meteorological year datasets. *Energy and Buildings*, 238, 110957.
- Li, J., Zhai, Z., Li, H., Ding, Y., & Chen, S. (2024). Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions. *Journal of Cleaner Production*, 442, 140967. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>
- Li, M., Cao, J., Xiong, M., Li, J., Feng, X., & Meng, F. (2018). Different responses of cooling energy consumption in office buildings to climatic change in major climate zones of China. *Energy and Buildings*, 173, 38–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.037>
- Maduta, C., Melica, G., D'Agostino, D., & Bertoldi, P. (2022). Towards a decarbonised building stock by 2050: The meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 44, 101009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101009>
- Meng, F., Li, M., Cao, J., Li, J., Xiong, M., Feng, X., & Ren, G. (2018). The effects of climate change on heating energy consumption of office buildings in different climate zones in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 133. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2206-6>
- Morewood, J. (2023). Building energy performance monitoring through the lens of data quality: A review. *Energy and Buildings*, 279, 112701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112701>
- Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., & Gaspar, A. R. (2023). Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran. *Journal of Building Engineering*, 74, 106919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106919>
- Troup, L., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Simulating future energy consumption in office buildings using an ensemble of morphed climate data. *Applied Energy*, 255, 113821. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113821>
- Wang, C., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E., & Shacat, J. (2021). Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>
- Wang, L., Liu, X., & Brown, H. (2017). Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. *Energy and Buildings*, 157, 218–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.007>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2017). A Comprehensive Case Study of Climate Change Impacts on the Cooling Load in an Air-Conditioned Office Building in Malaysia. *Energy Procedia*, 143, 295–300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.687>

- Yuan, J., Jiao, Z., Xiao, X., Emura, K., & Farnham, C. (2024). Impact of future climate change on energy consumption in residential buildings: A case study for representative cities in Japan. *Energy Reports*, 11, 1675–1692. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.042>
- Zomorodian, Z. S., & Tahsildoost, M. (2016). Validation of Energy Simulation Programs: An Empirical and Comparative Approach. *NECjournals*, 18(4), 0. <http://necjournals.ir/article-1-803-en.html>
- Zou, Y., Xiang, K., Zhan, Q., & Li, Z. (2021). A simulation-based method to predict the life cycle energy performance of residential buildings in different climate zones of China. *Building and Environment*, 193, 107663. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107663>