Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

Sustainable and Climate-Responsive Design in Mountainous Regions Using EPW Data and Climate Consultant Software (Case Study: Sanandaj City)

Ehsan Soureh[1], Esmail Jalili[2], Mohammad Sadegh Zangeneh[3], Akram Keramat[4]✉, Abbas Maroofnezhad[5]

1. Phd Student of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ehsan.soureh@gmail.com
2. Phd Student of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: esmail.jalili77@gmail.com
3. Phd Student in Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: mohammadsadegh.zangeneh@yahoo.com
4. Assistant Professor, Corresponding Author, Assistant Professor, Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran. E-mail: Akram.keramat@iau.ac.ir
5. Abbas Maroofnezhad' Department of Geography and Urban Planning, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran. E-mail: abbas.maroofnezhad@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 21 October 2023
Revised: 10 January 2024
Accepted: 14 January 2024
Published: 24 November 2024

Keywords:
Sustainable Design,
Mountainous Climate,
Sanandaj,
Climate-Responsive Architecture,
Thermal Comfirt.

ABSTRACT

This research was conducted with the aim of investigating and analyzing the climatic factors affecting architectural design in mountainous regions, focusing on the city of Sanandaj. In this study, standard EnergyPlus Weather (EPW) climate data were utilized over a 14-year period (2009 to 2023). The research methodology was based on the parametric analysis of hourly climate data in accordance with ASHRAE Standard 55 and the utilization of the Predicted Mean Vote (PMV) model for thermal comfort assessment. Meteorological parameters (air temperature, soil temperature, dew point temperature, humidity, wind speed and direction, and solar radiation) were analyzed using Climate Consultant software, and the results were presented in the form of bar, line, and scatter plots. The results indicated that the climate of Sanandaj, with its hot summers and cold winters, necessitates specific strategies in architectural design. The cold months of the year (January, February, November, and December) require heating systems, while the hot months (July and August) require cooling systems. Additionally, the months of March, April, and October, with the highest wind speeds, have the potential for natural ventilation. Based on the research findings, strategies such as the use of high thermal mass materials, passive solar systems, proper insulation, night ventilation, and adjustable shading devices are proposed. These strategies can help optimize energy consumption and provide thermal comfort for residents in the mountainous climate of Sanandaj.

Cite this article: Soureh, E., Jalili, E., Zangeneh, M.D., Keramat. A. & Maroofnezhad, A. (2026). Sustainable and Climate-Responsive Design in Mountainous Regions Using EPW Data and Climate Consultant Software (Case Study: Sanandaj City). *Journal of Geography and Planning*, 30(97), 29-48. http//doi.org/10.22034/gp.2025.66299.3376

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2025.66299.3376

Introduction

Climate change is defined as long-term shifts in aspects of weather elements, caused by human activities or natural variability. Climate change has become a global concern (Chairuniza et al., 2020). In recent decades, climate change and socio-economic transformations have revealed a complex set of challenges (Serra & De Rossi, 2024). These changes have resonated deeply across various sectors, particularly within urban development and construction (Safi et al., 2024). These factors continue to impact human lives, threaten human existence, and significantly affect the livelihoods of many people worldwide (Chairuniza et al., 2020). The daunting challenge of unprecedented growth, coupled with issues related to climate change, land-use change patterns, floods, heat, carbon emissions, and increasing energy demand, is increasingly influencing policy-making agendas worldwide (Khisro et al., 2024; Rayan et al., 2021). These challenges and dynamics have long been weakening mountainous regions. Population decline, aging phenomena, economic marginalization, and territorial neglect, coupled with environmental issues, have rendered highlands vulnerable (Serra & De Rossi, 2024).

Designers are interested in aspects of climate that affect human comfort and building utilization. These aspects include average and variations in temperature, day-night temperature differences, humidity, atmospheric conditions, incoming and outgoing radiation, rainfall and its distribution, air mass movements, and specific features such as winds, thunderstorms, dust storms, and hurricanes (Kaihoul & Sriti, 2018). The results of this research can serve as a valuable reference for architectural engineers, urban planners, and building policy-makers to design and implement buildings with high energy efficiency and optimal thermal comfort.

Materials and Methods

The climatic data used in this research were extracted from the EnergyPlus Weather (EPW[1]) standard dataset, published by the United States Department of Energy (DOE[2]). This dataset was developed to accurately simulate the energy performance of buildings and heating, cooling, and air conditioning systems. The EPW data used in this study pertain to the city of Sanandaj and cover a 14-year period from 2009 to 2023. These data were prepared with hourly resolution for each year and calibrated by climatology experts to match actual monthly data. The selected data in this research are of the Typical Meteorological Year (TMY[3]) type, which complies with the international standard ISO[4] 2005 and is the result of a joint collaboration between the United States National Climatic Data Center (NCDC[5]) and Sandia National Laboratories.

PMV[6] model is a tool for assessing the level of thermal satisfaction of individuals in a specific environment. This model is calculated based on individuals' past thermal experiences and a combination of the physical conditions of the environment. In residential environments, individuals often employ adaptive behaviors, such as adjusting their clothing according to the season, which allows them to feel comfortable within wider temperature ranges compared to environments with centralized HVAC[7] systems. In fact, in residential environments, due to higher airflows and flexibility in clothing changes, the thermal comfort range is broader (Fanger, 1970).

Results and Discussion

In the present era, given the limitations of energy resources and climate change, the design of buildings that are environmentally compatible and minimize energy consumption is of paramount importance. Mountainous climates, due to their unique weather conditions, require specific approaches to building design. In this research, various strategies for designing sustainable buildings in these climates have been examined. Accordingly, a set of climate-responsive design strategies is proposed as follows: For climate-compatible design in hot and dry regions, the use of passive solar heating with the majority of glass surfaces oriented towards the south to maximize winter sunlight and the design of shading devices for summer are of high importance. The use of high-performance double-glazed windows in the west, north, and east directions and transparent glass in the south contributes to maximum solar absorption. Shelter methods, such as earth shelters or the use of usable basements and earth tubes, are effective in reducing heat load. Additionally, ceiling fans and air movement inside the building on hot days can create a sense of coolness and reduce the need for air conditioning. Flat and light-colored roofs, along with the use of high thermal mass structures and small shaded openings that open for

1. EnergyPlus Weather
2. Department of Energy
3. Typical Meteorological Year
4. International Organization for Standardization
5. National Climatic Data Center
6. Predicted Mean Vote
7. Heating, Ventilation and Air Conditioning

nighttime ventilation, are among the effective strategies in climate-responsive design. Adjustable shading devices and the use of enclosed and shaded courtyards with water features to create wind-protected microclimates play a significant role in reducing the need for air conditioning. Reducing internal comfort temperatures at night, adjusting floor plans based on solar orientation, and using high thermal mass concrete slabs also contribute to optimizing energy consumption. Proper insulation, the use of light-colored materials and cool roofs with high emissivity, natural ventilation or whole-house fans for nighttime "cool" storage, and methods such as evaporative cooling in hot and dry climates are key strategies in reducing energy consumption and optimizing building performance in these climates.

Conclusion

Analysis of temperature graphs revealed that the cold months of the year, particularly January, February, November, and December, require heating systems, while in warm months such as July and August, cooling systems are essential to maintain thermal comfort. However, in some months, such as June and September, temperature conditions are within the comfort range, and there is no need for active heating and cooling systems. Solar radiation data indicate the importance of solar incidence angle and day length in the intensity of direct and diffuse radiation. These results showed that in the middle months of the year, Sanandaj city receives the most solar radiation, due to the higher solar incidence angle and reduced effects of absorption and scattering in the atmosphere. This information can assist in the design of passive solar systems and determine the best building orientation for maximum utilization of solar radiation in different seasons.

Wind data analysis also showed that March, April, and October have the highest wind speeds, enabling the use of natural ventilation in these months. Additionally, the results from wind roses indicated a suitable distribution of wind directions for the use of natural ventilation systems in the warm months of the year. This can help reduce energy consumption in cooling systems. To optimize energy consumption and reduce reliance on active cooling and heating systems, the use of high thermal mass materials and design methods such as night ventilation and adjustable shading devices are recommended. Also, the use of earth shelters and vegetation to reduce the effects of heat in warm seasons and maintain the internal temperature of buildings within the thermal comfort range will be effective. Based on the data analysis, the design of sustainable buildings in the Sanandaj climate can include the use of passive solar systems, light-colored roofs and proper insulation, natural ventilation, and adjustable shading devices. The use of high thermal mass materials and appropriate open space design, including courtyards and water features, can also help reduce energy consumption. Also, attention to architectural details such as double-glazed windows and floor plans based on solar orientation can help optimize building performance in this climate.

Keywords: Sustainable Design, Mountainous Climate, Sanandaj, Climate-Responsive Architecture, Thermal Comfirt.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۸۰۷۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۵۳۴
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

طراحی پایدار و همساز با اقلیم در مناطق کوهستانی با استفاده از داده‌های EPW و نرم افزار Climate Consultant (مطالعه موردی: شهر سنندج)

احسان سوره[۱]، اسماعیل جلیلی[۲]، محمدصادق زنگنه[۳]، اکرم کرامت[۴]✉، عباس معروف‌نژاد[۵]

۱. دانشجوی دکتری گروه آب‌وهواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ehsan.soureh@gmail.com
۲. دانشجوی دکتری، گروه اقلیم شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: esmail.jalili77@gmail.com
۳. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: mohammadsadegh.zangeneh@yahoo.com
۴. نویسنده مسئول، استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده مهندسی ساخت و فناوری های صنعتی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. رایانامه: Akram.keramat@iau.ac.ir
۵. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران. رایانامه: abbas.maroofnezhad@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

کلیدواژه‌ها:
طراحی پایدار،
اقلیم کوهستانی،
سنندج،
معماری همساز با اقلیم،
آسایش حرارتی.

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل عوامل اقلیمی مؤثر بر طراحی معماری در مناطق کوهستانی با تمرکز بر شهر سنندج انجام شده است. در این مطالعه، از داده‌های اقلیمی استاندارد انرژی (EPW) طی بازه زمانی ۱۴ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳) استفاده گردید. روش‌شناسی پژوهش بر پایه تحلیل پارامتریک داده‌های اقلیمی ساعتی مطابق با ا استاندارد ۵۵ انجمن مهندسان تأسیسات سرمایشی، گرمایشی و تهویه مطبوع آمریکا (ASHRAE) و بهره‌گیری از مدل PMV برای ارزیابی آسایش حرارتی استوار بود. پارامترهای هواشناسی (دمای هوا، دمای خاک، دمای نقطه شبنم، رطوبت، سرعت و جهت باد و تابش خورشیدی) با استفاده از نرم‌افزار مشاور اقلیمی تحلیل و نتایج به صورت نمودارهای میله‌ای، خطی و پراکنش ترسیم گردید. نتایج نشان داد که اقلیم سنندج با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد، نیازمند راهکارهای مشخص در طراحی معماری است. ماه‌های سرد سال (ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر) نیاز به سیستم‌های گرمایشی دارند، درحالی‌که ماه‌های گرم (جولای و آگوست) نیازمند سیستم‌های سرمایشی هستند. همچنین، ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر با بیشترین سرعت باد، پتانسیل استفاده از تهویه طبیعی را دارند. براساس یافته‌های پژوهش، راهکارهایی چون استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا، سیستم‌های غیرفعال خورشیدی، عایق‌بندی مناسب، تهویه شبانه و سایه‌بان‌های قابل تنظیم پیشنهاد می‌شود. این راهکارها می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و تأمین آسایش حرارتی ساکنان در اقلیم کوهستانی سنندج کمک کنند.

استناد: سوره، احسان؛ جلیلی، اسماعیل؛ زنگنه، محمدصادق؛ کرامت، اکرم و معروف‌نژاد، عباس (۱۴۰۵). طراحی پایدار و همساز با اقلیم در مناطق کوهستانی با استفاده از داده‌های EPW و نرم افزار Climate Consultant (مطالعه موردی: شهر سنندج). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۷)، ۲۹-۴۸.
http//doi.org/10.22034/gp.2025.66299.3376

ناشر: دانشگاه تبریز.
© نویسندگان.

مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان تغییرات در طول زمان در جنبه‌های عنصر آب و هوا، به دلیل فعالیت‌های انسانی یا آسیب‌پذیری طبیعی تعریف شده است. این تغییرات اقلیمی به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است (Chairuniza et al., 2020). در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و دگرگونی‌های اجتماعی–اقتصادی، مجموعه‌ای از چالش‌های پیچیده را آشکار کرده‌اند (Serra & De Rossi, 2024). این تغییرات عمیقاً در بخش‌های مختلف طنین انداز شده، به ویژه در بخش توسعه شهری و ساخت‌وسازها (Safi et al., 2024). این عوامل همچنان بر زندگی انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، زندگی انسان‌ها را تهدید کرده و تا حد زیادی بر زندگی بسیاری از مردم در سراسر جهان تأثیرگذار است (Chairuniza et al., 2020). چالش دلهره‌آور رشد بی‌سابقه با توجه به مسائل مربوط به تغییرات اقلیمی، الگوهای تغییر کاربری زمین، سیل، گرما، انتشار کربن و افزایش تقاضای انرژی، به طور فزآینده‌ای بر برنامه سیاست‌گذاری در سراسر جهان تاثیر دارد (Khisro et al., 2024; Rayan et al., 2021). این چالش‌ها و پویایی‌ها مدت‌هاست مناطق کوهستانی را تضعیف کرده است. کاهش جمعیت، پدیده پیری، حاشیه‌نشینی اقتصادی و بی‌توجهی به قلمرو همراه با مسائل زیست محیطی ارتفاعات را آسیب‌پذیر کرده است (Serra & De Rossi, 2024).

معماری شهری، برنامه‌ریزی و منظر را برای شکل دادن به شهرهای کاربردی و پایدار یکپارچه می‌کند. بنابراین معماری پاسخگو به اقلیم، برنامه‌ریزی شهری و طراحی ساختمان را با اقلیم محلی هماهنگ کرده، مصرف انرژی را کاهش داده و آسایش را بهبود می‌بخشد (Safi et al., 2024). در عصر جدید، ادغام استراتژی‌های غیرفعال و طراحی پاسخگو به اقلیم به عنوان یک عنصر حیاتی در معماری آینده‌نگر ظاهر شده، که شرایط اقلیمی منحصر به فرد مناطق مختلف را در بر می‌گیرد. مصرف انرژی در ساختمان‌ها نشان دهنده پیشرفت ملموس در طراحی معماری و سیاست بین المللی است. به خوبی ثابت شده است که ساختمان‌ها تقریباً ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان را تشکیل می‌دهند (Kaihoul et al., 2024). همچنین ساختمان‌ها مسئول ۱۹٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند و به افزایش دمای جهانی کمک می‌کنند (Omer, 2008). مصرف انرژی یکی از موضوعات مهم در سراسر جهان است. می‌توان آن را در طیف گسترده‌ای از بخش‌ها مانند صنعت، حمل و نقل، مسکونی، تجاری و چندین بخش دیگر ردیابی کرد. براساس دستورالعمل اتحادیه اروپا ساختمان‌های داخل محدوده این اتحادیه ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی را تشکیل می‌دهند. به طور مشابه، داده‌های اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده[1] نشان میدهد که مصرف انرژی ساختمان‌ها ۴۰ درصد و مصرف برق ساختمان‌ها ۷۴ درصد از کل انرژی ایالات متحده است (Vatan Kaptan, 2020).

طراحان به جنبه‌هایی از اقلیم که بر آسایش انسان و استفاده از ساختمان‌ها تأثیر گذار است، علاقه‌مندند. این جنبه‌ها عبارتند از میانگین و تغییرات دما، تفاوت دما بین روز و شب، رطوبت، شرایط جوی، تشعشعات ورودی و خروجی، بارندگی و توزیع آن، حرکات توده هوا و ویژگی‌های خاص مانند بادها، طوفان‌های تندری، طوفان‌های گرد و غبار و طوفان (Kaihoul & Sriti, 2018). با توجه به شرایط حال حاضر، اتخاذ موضعی برای ساختمان‌هایی که هم در مصرف انرژی و هم در عملکرد حرارتی ناکارآمدی از خود نشان می‌دهند، ضروری است. این امر بر پتانسیل طراحی پاسخگو به اقلیم به عنوان یک عنصر حیاتی در عملکرد معماری تاکید کرده که سهم قابل توجهی در افزایش بهره‌وری انرژی و عملکرد حرارتی دارد (Kaihoul et al., 2021; Nguyen & Reiter, 2014). اهمیت طراحی سازگار با اقلیم در تمام مراحل یک پروژه معماری مشهود است. حتی در هنگام انجام مراحل مقاوم‌سازی ساختمان‌ها. هدف اساسی حفظ یک محیط حرارتی داخلی است که با نیازهای آسایش ساکنین هماهنگ باشد (Amraoui et al., 2021; Kaihoul & Sriti, 2018).

چالش اصلی معماران این است که محیطی ایجاد کنند که بر مکانیسم جبران حرارت بدن فشار بی‌اندازه وارد نکند. این وظیفه معماران است که حداکثر استفاده را از وسایل موجود به منظور تولید ساختمانی سالم‌تر و مناسب‌تر برای زندگی ببرند و در عین حال با به حداقل رساندن استفاده از وسایل کمکی مکانیکی برای کنترل آب و هوا، به صرفه‌جویی در هزینه‌ها کمک کنند.

1. US Energy Information Administration

اگر بخواهیم طرح‌های ما کارآمد باشد، باید به شهر، کشورها و اقلیم‌هایی که خانه‌ها در آنها ساخته می‌شوند، توجه کنیم. یک نوع خانه برای کشور مصر مناسب به نظر می‌رسد و دیگری برای اسپانیا و طراحی برای شهر رم قطعا متفاوت خواهد بود. بدیهی است که طراحی خانه‌ها باید با تنوع اقلیم مطابقت داشته باشد. هدف ما به عنوان معمار این است که ایده‌ها و شیوه‌های معتبر مبتنی بر اقلیم، سازگار با محیطزیست را در معماری فعلی که به وضوح به مسائل آب و هوا و آسایش در طراحی ساختمان پاسخ می‌دهد، بگنجانیم (Kaihoul & Sriti, 2018).

اهمیت و ضرورت پژوهش حاضر در پاسخگویی به چالش‌های اقلیمی خاص مناطق کوهستانی، به‌ویژه شهر سنندج، نمود می‌یابد. مناطق کوهستانی زاگرس، با الگوی اقلیمی متمایز خود شامل زمستان‌های سرد و طولانی، نوسانات شدید دمایی روزانه و فصلی و شرایط توپوگرافیک پیچیده، نیازمند رویکردهای طراحی ویژه و منطبق بر اقلیم هستند. شهر سنندج، به‌عنوان مرکز استان کردستان، علاوه بر چالش‌های مشترک مناطق کوهستانی، با فرآیند شهرنشینی سریع و گسترش بافت شهری در دامنه‌ها و دره‌ها مواجه است که این امر، پیچیدگی‌های طراحی معماری را افزایش می‌دهد. مصرف بالای انرژی گرمایشی در این شهر طی ماه‌های سرد سال (حدود ۵ ماه) و نیاز به سیستم‌های سرمایشی در تابستان، ضرورت دستیابی به الگوهای طراحی بهینه و کارآمد از منظر انرژی را آشکار می‌سازد. علاوه بر این، ماهیت در حال تغییر اقلیم منطقه، به‌واسطه پدیده گرمایش جهانی و تغییرات در الگوهای بارش، نیاز به بازنگری در روش‌های طراحی سنتی و توسعه راهکارهای نوآورانه و سازگار با شرایط اقلیمی آینده شهر سنندج را بیش از پیش نمایان می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به عنوان یک مرجع ارزشمند برای مهندسان معمار، طراحان شهری و سیاست‌گذاران حوزه ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار گیرد تا بتوانند ساختمان‌هایی با کارایی انرژی بالا و آسایش حرارتی مطلوب طراحی و اجرا نمایند.

پیشینه پژوهش

۱. مطالعات داخلی

کرمی و شجاعی (۱۴۰۱) در پژوهشی بهترین راهبردهای طراحی معماری همساز با اقلیم در شهر مشهد را بررسی کردند. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل شرایط اقلیمی شهر مشهد و ارائه راهبردهای مناسب برای طراحی معماری همساز با اقلیم در این شهر بوده است. محققان با استفاده از داده‌های اقلیمی استاندارد و نرم‌افزارهای تخصصی، به بررسی عواملی مانند ساعات آفتابی، جهت باد، درجه روزهای گرمایشی و سرمایشی و شاخص آسایش حرارتی جهانی[1] پرداخته‌اند. در این پژوهش از روش مدل‌سازی سه‌بعدی یک منطقه دلخواه در شهر مشهد و تحلیل داده‌های اقلیمی با استفاده از نرم‌افزارهای راینوسروس[2] و مشاور اقلیمی[3] استفاده شده است. همچنین استاندارد ASHRAE 55[4] به عنوان معیار ارزیابی آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شهر مشهد دارای اقلیمی با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است. جهات جنوب و جنوب شرقی به دلیل وزش بادهای ملایم، مکان‌های مناسبی برای قرارگیری ساختمان‌ها هستند. همچنین ماه‌های تیر و دی به ترتیب دارای بیشترین درجه روزهای گرمایشی و سرمایشی هستند. در نهایت ۲۰ راهبرد برای طراحی معماری همساز با اقلیم در شهر مشهد ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از مصالح بومی، ایجاد سایبان و استفاده از سیستم‌های تهویه طبیعی اشاره کرد.

انتظاری و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی استراتژی‌های طراحی در معماری همساز با اقلیم مطالعه موردی: شهر یزد پرداختند. هدف این پژوهش، بررسی شرایط آسایش حرارتی در شهر یزد و ارائه استراتژی‌های طراحی برای معماری همساز با اقلیم در این شهر بوده است. محققان با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت و نرم‌افزار مشاور آب و هوایی، به تحلیل شرایط اقلیمی شهر

1. UTCI
2. Rhinoceros
3. Climate Consultant
4. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

پرداخته‌اند. در این پژوهش، از روش توصیفی–تحلیلی و با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت شهر یزد و نرم‌افزار مشاور آب و هوایی، شرایط آسایش حرارتی در این شهر بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شهر یزد دارای اقلیمی گرم و خشک است. در این شهر، بیشتر ساعات روز شرایط آسایش حرارتی به دلیل دمای بالا و رطوبت کم مناسب نیست. محققان در نهایت ۲۰ استراتژی برای طراحی معماری همساز با اقلیم در شهر یزد ارائه داده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به ایجاد سایبان، استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا و ایجاد تهویه طبیعی اشاره کرد.

ظهوری (۱۳۹۴) پژوهشی را تحت عنوان معماری همساز با اقلیم کوهستانی خیلی سرد مطالعه موردی: خانه‌های تاریخی اردبیل انجام داد. هدف این پژوهش بررسی راهکارهای معماری همساز با اقلیم در خانه‌های تاریخی شهر اردبیل بوده است. محققان با مطالعه خانه‌های تاریخی این شهر، به دنبال شناسایی ویژگی‌های معماری که به سازگاری با اقلیم سرد و کوهستانی کمک کرده است، بوده‌اند. در این تحقیق از روش توصیفی–تحلیلی و با مطالعه میدانی خانه‌های تاریخی شهر اردبیل استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خانه‌های تاریخی اردبیل دارای ویژگی‌های معماری خاصی هستند که به آن‌ها امکان می‌دهد با شرایط اقلیمی سرد و کوهستانی سازگار شوند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به استفاده از مصالح عایق حرارتی، ایجاد فضاهای داخلی گرم و خشک و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی اشاره کرد.

قربانی (۱۳۹۴) در پژوهش خود با عنوان بررسی میزان سازگاری اقلیمی مساکن در شهر سنندج بر اساس معیار ماهانی، به بررسی تأثیر ساختار جمعیتی جوان، نرخ بالای مهاجرت روستاییان و افزایش نیاز به مسکن شهری بر مصرف انرژی پرداخته است. هدف این پژوهش، ارزیابی میزان سازگاری اقلیمی بافت‌های مختلف شهر سنندج و ارائه راهکارهای معماری برای بهره‌گیری بیشتر از انرژی‌های طبیعی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی است. روش تحقیق مبتنی بر محاسبه وضعیت زیست‌اقلیم شهر سنندج با استفاده از معیار ماهانی و تحلیل ۱۴۲ نمونه مسکونی از بافت‌های جدید، قدیم و فرسوده بوده است. داده‌ها از طریق تکمیل پرسشنامه و تحلیل در نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بافت قدیم شهر بیشترین سازگاری را با اقلیم محلی دارد. درحالی‌که بافت جدید از کمترین میزان سازگاری برخوردار است. به طور کلی حدود ۵۰ درصد از مساکن شهر سنندج با شرایط اقلیمی منطقه سازگار هستند، که بر اهمیت طراحی اقلیمی در توسعه شهری تأکید دارد.

سعیدی و طولابی (۱۳۹۳) آسایش حرارتی و معماری همساز با اقلیم شهرستان خرم آباد را مورد ارزیابی قرار دادند. هدف این پژوهش، بررسی شرایط آسایش حرارتی در شهر خرم‌آباد و ارائه راهکارهایی برای طراحی معماری همساز با اقلیم در این شهر بوده است. محققان با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت و شاخص‌های آسایش حرارتی مانند دمای موثر، اولگی، ماهانی و گیونی، به تحلیل شرایط اقلیمی شهر پرداخته‌اند. در این پژوهش از روش توصیفی–تحلیلی و با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت شهر خرم‌آباد، شرایط آسایش حرارتی در این شهر بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شهر خرم‌آباد دارای اقلیمی با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است. در بیشتر ماه‌های سال شرایط آسایش حرارتی در روز مناسب است، اما در شب‌ها به ویژه در فصل زمستان شرایط آسایش حرارتی مطلوب نیست. محققان در پایان جدول مقایسه‌ای برای نمایش آسایش حرارتی در هر یک از شاخص‌ها ارائه داده‌اند.

شمس و خداکرمی (۱۳۸۹) در پژوهش خود با عنوان بررسی معماری سنتی همساز با اقلیم سرد مطالعه موردی: شهر سنندج به بررسی ویژگی‌های معماری سنتی ایران در اقلیم سرد پرداخته‌اند. هدف این تحقیق، شناسایی روش‌های معماری سنتی در ایجاد آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی از طریق بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و طراحی بهینه در ساخت‌وسازهای بومی است. روش تحقیق این مطالعه مبتنی بر بررسی اسنادی و تحلیل نمونه‌های معماری سنتی در شهر سنندج بوده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که معماری سنتی این منطقه با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند جریان هوا، نور و حرارت خورشیدی، نقش مهمی در کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی داشته و از مصالح بومی سازگار با محیط استفاده کرده است. این پژوهش بر اهمیت طراحی معماری پایدار تأکید دارد و نشان می‌دهد که بهره‌گیری از اصول معماری سنتی می‌تواند در کاهش مصرف انرژی و پایداری محیطی مؤثر باشد.

مطالعات پیشین بر روی طراحی معماری همساز با اقلیم در شهرهای مختلف ایران نشان می‌دهد که محققان به طور گسترده به بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر آسایش حرارتی در ساختمان‌ها و ارائه راهکارهای طراحی مناسب پرداخته‌اند. پژوهش‌های انجام شده بر روی شهرهای مشهد، خرم‌آباد، اردبیل و یزد، همگی به اهمیت در نظر گرفتن شرایط اقلیمی خاص هر منطقه در طراحی ساختمان‌ها تأکید دارند. تمام پژوهش‌ها از داده‌های اقلیمی بلندمدت برای تحلیل شرایط اقلیمی و ارائه راهکارهای طراحی استفاده کرده‌اند و نرم‌افزارهای تخصصی مانند مشاور اقلیمی و راینو برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌های اقلیمی به کار رفته‌اند. همچنین در اکثر پژوهش‌ها، استفاده از مصالح بومی، ایجاد سایبان و بهره‌گیری از سیستم‌های تهویه طبیعی به عنوان راهکارهای اصلی برای بهبود آسایش حرارتی پیشنهاد شده است.

۲. مطالعات خارجی

کایهل و همکاران (Kaihoul et al., 2024) در پژوهشی به بررسی عمیقی از طراحی پاسخگو به اقلیم اجرا شده توسط دو معمار پیشگام در پروژه‌های مسکن در جنوب الجزایر پرداختند. این پژوهش با اندازه‌گیری‌های در محل انجام پروژه مسکن توسط محققین صورت گرفته است. نتایج این پژوهش در منطقه جنوبی الجزایر نمونه‌های ملموسی از معماری است که به خوبی با آب و هوای خشن و خشک سازگار است. این مطالعه بر اهمیت طراحی پاسخگو به اقلیم و استراتژی‌های غیرفعال تأکید داشته و بینش های ارزشمندی را در مورد محیط حرارتی داخلی ارائه می‌دهد. در نهایت، این تحقیق آماده الهام بخشیدن به معماران و تصمیم گیرندگان در پروژه‌های مسکن آینده است.

لیو و همکاران (Liu et al., 2023) در پژوهشی اهمیت طراحی پاسخگو به اقلیم را برجسته کردند و مجموعه‌ای از استراتژی های عملی را برای کمک به معماران و برنامه‌ریزان شهری در کاهش اثرات گرمای شدید را ارائه نمودند. مطالعه آنها بر مزایای استراتژی‌ها برای افزایش آسایش حرارتی داخلی و خارجی، کاهش خطرات برای سلامت انسان و تضمین امنیت انرژی تاکید دارد.

در مطالعه ای سودیان و براردی (Soudian & Berardi, 2021) یک نمای سازگار با اقلیم را برای بهبود آسایش حرارتی داخلی برای ساختمان‌ها ایجاد کردند و توضیح مفصلی از طراحی نما و اهداف خاص آن ارائه کردند و معتقد بودند طراحی نمای ساختمان با کارایی بالا می‌تواند پاسخی پویا به بارهای محیطی بیرونی ارائه کند.

تاکور و همکاران (Thakur et al., 2021) در پژوهشی به بررسی یک ماتریس استراتژی پاسخگوی به اقلیم برای طراحی ساختمان‌ها در هند پرداختند. این پژوهش استراتژی‌های مختلف طراحی پاسخگو به اقلیم را که به بهترین وجه برای مناطق مختلف آب و هوایی هند تطبیق داده شده‌اند، پیشنهاد و بحث کرد. مداخلات پاسخگو به اقلیم در طراحی ساختمان پیشنهاد شده در این مطالعه، پتانسیل بهبود محیط‌های ساخته شده را به طور طبیعی داشته و در نتیجه اثرات نامطلوب زیست محیطی را کاهش می‌دهد. استراتژی‌های پیشنهادی نیز از طریق یک بررسی میدانی نمونه که توسط متخصصان ساختمان از مناطق مختلف آب و هوایی هند پاسخ داده شده، اعتبارسنجی شد.

کورتسائو و همکاران (Cortesão et al., 2020) دستورالعمل‌های طراحی بصری را برای طراحی شهری سازگار با اقلیم تدوین کرده و بر اهمیت ترکیب این ملاحظات برای بهبود اقلیمی در فضای باز، کاهش جزایر گرما و پرداختن به اثر تغییرات آب و هوا تأکید کردند. هدف مطالعه آنها افزایش آگاهی دانشجویان معماری منظر در مورد طراحی سازگار با اقلیم و تجهیز آنها به مهارت‌هایی برای ایجاد محیط‌های زندگی راحت و سالم از نظر حرارتی بود.

وطن کاپتان (Vatan Kaptan, 2020) در پژوهشی به بررسی تکنیک‌های غیرفعال مورد استفاده در معماری سنتی و بومی به منظور کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و افزایش آسایش حرارتی و استفاده‌کنندگان در شهر اربیل عراق پرداخت. در این پژوهش نویسنده از رویکرد توصیفی و تفسیری به عنوان روش‌شناسی تحقیق استفاده و نتایج نشان داد به دلیل کمبود برق در

شهر اربیل ساختمان‌های مسکونی دسترسی محدودی به برق داشته، بنابراین آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی برای اربیل حیاتی بوده است.

در پژوهشی نی و همکاران (Nie et al., 2019)، کارایی طراحی پاسخگو به اقلیم در بهبود شرایط حرارتی داخلی خانه‌ها را در خمس فلات تبت را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. این پژوهش بر اهمیت ادغام مکان سکونت و طرح‌های چیدمان با محیط طبیعی و فرهنگ مذهبی، همراه با بهینه‌سازی عملکرد لرزه‌ای‌سازه و فناوری انرژی خورشیدی غیرفعال تأکید داشت.

الشبول و الکوردی (Alshboul & Alkurdi, 2019) در مطالعه‌ای به بررسی راهکارهای ارتقا استراتژی‌های معماری پاسخگو به اقلیم، جهت دسترسی نور خورشید به ساختمان‌ها در مناطق شیبدار در شهر عمان اردن پرداختند. به دلیل مشکلات کمبود سوخت و هزینه‌های بالای آن در شهر عمان این مطالعه صورت گرفت. در این پژوهش نمونه‌های موردی برای کمی‌سازی تابش خورشیدی، عمدتاً از ساختمان‌های مسکونی مدرن ساخته شده در زمین‌های شیب‌دار انتخاب شد و به کمک یک روش تحلیل گرافیکی نفوذ خورشیدی (تابش مستقیم) و محاسبات نظری پژوهش مورد نظر انجام شد. محاسبات تابش خورشیدی براساس اندازه‌گیری تابش کل جهانی و برای دوره گرمایش مورد نیاز در شهر عمان محاسبه شد و راهبردی برای استخراج مقادیر جدید عقب‌نشینی ساختمان‌ها تدوین شد. این امر اولین گام به سوی مجموعه‌ای کامل از مقررات برای اطمینان از دسترسی خورشیدی به ساختمان‌های ساخته شده در زمین‌های شیب‌دار در شهر عمان و سایر مناطق با شیب‌های مشابه خواهد بود.

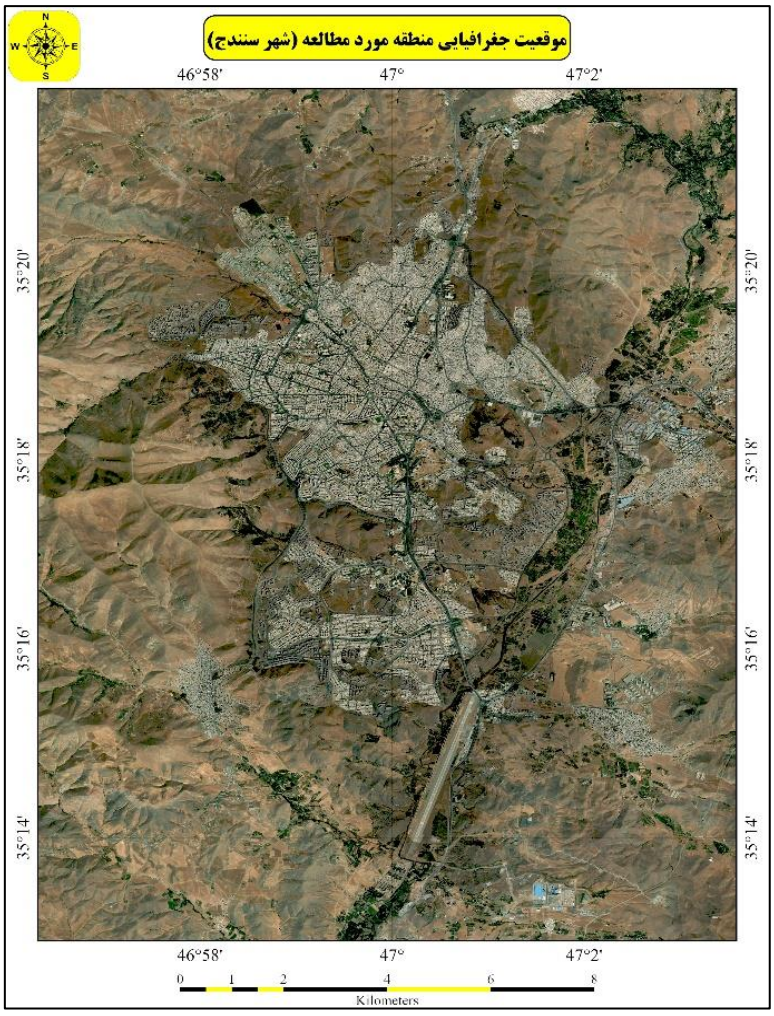
خالد (Khalid) سال ۲۰۱۸ در پژوهشی به مطالعه تطبیقی دستورالعمل‌های اولیه طراحی پاسخگو به اقلیم در محیط‌های مسکونی بر اساس مدل‌های آسایش حرارتی مشاور اقلیم برای پنج منطقه پاکستان پرداخت. هدف این تحقیق دستیابی به آسایش حرارتی در محیط‌های مسکونی در پنج منطقه اقلیمی پاکستان، با تحلیل رفتار دینامیک اقلیم و در نظر گرفتن تمامی امکانات معماری، به روش تعریف شده توسط مشاور اقلیم بود. نرم‌افزار مشاور اقلیم بیست دستورالعمل طراحی (DG[1]) براساس استراتژی‌های طراحی و معیارهای تعریف شده برای هر مدل ارائه می‌دهد. تحلیل تطبیقی این دستورالعمل‌ها به ترسیم شباهت‌ها و تفاوت‌ها در چهار مدل آسایش حرارتی انسانی (HTCM[2]) کمک می‌کند. تنوع دستورالعمل‌های حاصل از این چهار مدل آسایش حرارتی، بهترین ترکیب ممکن از دستورالعمل‌های طراحی را برای پنج منطقه پاکستان ارائه می‌دهد. مدل آسایش تطبیقی ASHRAE، مجموعه‌ای کاملاً متفاوت از دستورالعمل‌ها را پیشنهاد می‌دهد که بیشتر برای ساختمان‌های مسکونی تهویه طبیعی مناسب است. کد کالیفرنیا، ASHRAE 55 و ASHRAE 2005، مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های طراحی با بیشترین شباهت ممکن را پیشنهاد می‌دهند که برای همه انواع ساختمان‌ها مناسب است. پژوهش حاضر، اصول مشابه طراحی منفعل پاسخگو به اقلیم را با استفاده از نرم‌افزار مشاور اقلیم برای پنج منطقه اقلیمی پاکستان ارائه می‌دهد.

دی دیر و براگر (De Dear & Brager) سال ۲۰۰۲ در مطالعه‌ای با عنوان اقلیم، آسایش و تهویه طبیعی یک استاندارد جدید آسایش تطبیقی برای استاندارد ASHRAE 55 را انجام دادند. این پژوهش به بررسی استاندارد جدید آسایش تطبیقی (ACS[3]) در استاندارد ASHRAE 55 می‌پردازد. این استاندارد امکان افزایش دمای داخلی ساختمان‌ها در فصل تابستان و مناطق گرمسیری را فراهم می‌کند، به شرط آنکه ساختمان‌ها به صورت طبیعی تهویه شوند. ACS براساس تحلیل ۲۱۰۰۰ مجموعه داده خام جمع‌آوری شده از مطالعات میدانی در ۱۶۰ ساختمان واقع در چهار قاره و در مناطق اقلیمی مختلف توسعه یافته است. هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک استاندارد آسایش تطبیقی برای ساختمان‌های طبیعی تهویه شده است که به جای استفاده از دمای ثابت، دمای داخلی را براساس شرایط اقلیمی و رفتار ساکنان تنظیم کند. نتایج نشان داد استاندارد ACS می‌تواند به بهبود آسایش حرارتی ساکنان و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های طبیعی تهویه شده کمک کند. استفاده از این استاندارد نیازمند درک عمیق از اصول طراحی اقلیمی و رفتار ساکنان است.

1. Design Guideline
2. Human Thermal Comfort Model
3. Architectural Climate Standards

منطقه مورد مطالعه

سنندج در عرض شمالی ۱۴ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۴۶ درجه از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا بین ۱۴۵۰ تا ۱۵۳۸ متر متغیر است که نشان‌دهنده‌ی قرارگیری آن در منطقه‌ای کوهستانی است. سنندج در بخش جنوبی استان کردستان و در غرب ایران قرار گرفته است. شهر سنندج به صورت طبیعی توسط کوه‌هایی همچون آبیدر، کوچکه رش و توش نوذر که بخشی از سلسله جبال زاگرس هستند، محصور شده است. این کوه‌ها نه تنها شهر را از نظر بصری زیبا کرده‌اند، بلکه بر شکل‌گیری بافت شهری، شبکه معابر و حتی نوع معماری ساختمان‌ها نیز تأثیر گذاشته‌اند. بخش اعظمی از شهر سنندج بر روی تپه‌ها واقع شده است. این پستی و بلندی‌ها باعث شده تا شبکه معابر شهری به صورت پلکانی و با شیب‌های تند شکل بگیرد. رودخانه قشلاق به طول ۹۵ کیلومتر از سه کیلومتری شرق سنندج عبور می‌کند و بر اقلیم منطقه تأثیرگذار است. بافت تاریخی سنندج با خانه‌های قدیمی، کوچه‌های باریک و پیچ در پیچ، و معماری سنتی، نمایانگر تاریخ و فرهنگ غنی این شهر است. به دلیل شیب زیاد زمین، ساختمان‌های سنندج اغلب به صورت پلکانی و تراس‌بندی شده ساخته شده‌اند. در سال‌های اخیر، با توسعه‌ی شهر، بافت جدیدی در اطراف سنندج شکل گرفته است که از نظر معماری و کاربری با بافت قدیمی تفاوت دارد. شکل (۱) نقشه موقعیت شهر سنندج را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان).

روش پژوهش

۱. داده‌های مورد استفاده

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش، از مجموعه داده‌های استاندارد انرژی EPW[1] استخراج شده‌اند که توسط وزارت انرژی ایالات متحده (DOE[2]) منتشر شده است. این مجموعه داده‌ها، به منظور شبیه‌سازی دقیق عملکرد انرژی ساختمان‌ها و سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع توسعه یافته‌اند. داده‌های EPW مورد استفاده در این مطالعه مربوط به شهر سنندج بوده و بازه زمانی ۱۴ ساله از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ را پوشش می‌دهد. این داده‌ها با تفکیک ساعتی برای هر سال تهیه شده‌اند و توسط متخصصان اقلیم‌شناسی کالیبره شده‌اند تا با داده‌های ماهانه واقعی مطابقت داشته باشند. داده‌های انتخاب شده در این پژوهش از نوع (TMY[3]) هستند که مطابق با استاندارد بین‌المللی ISO[4]2005 بوده و حاصل همکاری مشترک مرکز ملی داده‌های اقلیمی ایالات متحده (NCDC[5]) و آزمایشگاه ملی ساندیا می‌باشد. استفاده از داده‌های TMY، امکان تحلیل‌های انرژی سالانه و مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف در شرایط اقلیمی متنوع را فراهم می‌آورد (Crawly & Lawrie, 2019). هدف اصلی از تولید فایل‌های داده‌های اقلیمی با فرمت EPW، ارائه یک نمایش جامع و دقیق از شرایط آب و هوایی یک منطقه خاص در طول سال است. این فایل‌ها با گردآوری و پردازش داده‌های هواشناسی بلندمدت، به ویژه دما، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد، امکان شبیه‌سازی دقیق شرایط محیطی را در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان فراهم می‌آورند. در تولید فایل‌های EPW، معمولاً بر حفظ یکپارچگی و دقت داده‌های اولیه تأکید می‌شود. به همین دلیل تلاش می‌شود تا میانگین‌های درازمدت دما، به ویژه بیشینه و کمینه دما، به شکلی دقیق و بدون ایجاد اختلال در روند تغییرات ماهانه، در این فایل‌ها لحاظ شوند. حفظ این ویژگی به ویژه در شبیه‌سازی‌های بلندمدت و ارزیابی عملکرد سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است (Milne et al., 2007). داده‌های اقلیمی با فرمت EPW به عنوان ورودی اصلی در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان، نظیر نرم‌افزار مشاور اقلیمی به کار می‌روند. جدول (۱) حاوی داده‌های هواشناسی ثبت شده با تفکیک ساعتی می‌باشد. این داده‌ها شامل پارامترهای مختلفی از جمله دمای هوا، دمای خاک، دمای نقطهٔ شبنم، رطوبت، سرعت و جهت باد و تابش خورشیدی هستند. ارائه داده‌ها با این تفکیک زمانی، امکان تحلیل‌های دقیق‌تر اقلیمی و هواشناسی را فراهم می‌آورد.

جدول ۱. داده‌های هواشناسی ثبت شده در بازهٔ زمانی سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳

	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	جولای	ژوئن	می	اپریل	مارس	فوریه	ژانویه	داده‌ها
Wh/sq.m	۲۸۱	۳۰۵	۴۲۸	۵۱۵	۵۴۵	۵۵۵	۵۶۳	۵۲۳	۴۹۳	۴۱۶	۳۸۵	۳۱۵	تابش افقی خورشید (میانگین ساعتی)
Wh/sq.m	۴۶۱	۴۵۶	۶۰۹	۶۵۰	۶۲۰	۶۰۰	۵۹۹	۵۲۸	۵۱۰	۴۷۸	۴۵۹	۴۱۷	تابش مستقیم (میانگین ساعتی)
Wh/sq.m	۹۳	۱۰۰	۹۶	۱۰۶	۱۱۶	۱۲۳	۱۳۰	۱۴۱	۱۴۲	۱۳۰	۱۴۴	۱۳۴	تابش پراکنده (میانگین ساعتی)
Wh/sq.m	۵۷۶	۶۳۳	۸۰۷	۹۳۴	۹۹۸	۱۰۱۸	۱۰۲۸	۱۰۱۱	۹۸۵	۹۰۱	۷۸۲	۶۵۲	تابش افقی خورشید (حداکثر ساعتی)
Wh/sq.m	۹۴۱	۹۲۲	۹۲۴	۹۰۸	۹۱۲	۸۷۶	۸۸۳	۹۲۳	۹۶۵	۹۸۴	۹۸۵	۹۷۲	تابش مستقیم (حداکثر ساعتی)
Wh/sq.m	۲۳۵	۲۸۰	۲۹۶	۲۲۳	۲۹۴	۳۱۱	۳۲۸	۴۳۲	۳۵۴	۳۶۱	۳۵۰	۳۳۰	تابش پراکنده (حداکثر ساعتی)

1. EnergyPlus Weather
2. Department of Energy
3. Typical Meteorological Year
4. International Organization for Standardization
5. National Climatic Data Center

Wh/sq.m	۲۷۱۹	۳۰۹۵	۴۷۴۰	۶۳۰۰	۷۲۴۸	۷۸۳۱	۸۰۸۱	۷۲۶۹	۶۳۸۱	۴۹۰۴	۴۱۰۸	۳۱۲۰	تابش افقی خورشید (میانگین مجموع روزانه)
Wh/sq.m	۴۴۵۳	۴۶۱۵	۶۷۴۴	۷۹۴۲	۸۲۵۰	۸۴۶۱	۸۶۰۰	۷۳۵۱	۶۵۸۷	۵۶۲۲	۴۹۰۹	۴۱۳۰	تابش مستقیم (میانگین مجموع روزانه)
Wh/sq.m	۹۰۴	۱۰۲۲	۱۰۷۱	۱۳۰۰	۱۵۴۵	۱۷۳۵	۱۸۶۶	۱۹۶۱	۱۸۴۴	۱۵۴۲	۱۵۲۹	۱۳۳۶	تابش پراکنده (میانگین مجموع روزانه)
Lux	۳۰۲۵۶	۳۳۲۹۶	۴۵۳۵۰	۵۵۱۵۸	۵۷۸۲۱	۵۸۵۲۳	۵۹۲۲۲	۵۵۶۳۱	۵۲۰۲۵	۴۴۷۹۶	۴۱۷۸۴	۳۴۱۶۱	روشنایی افق جهانی (میانگین ساعتی)
Lux	۴۵۵۹۹	۴۶۰۷۰	۶۱۴۷۴	۶۵۷۵۷	۶۰۴۵۶	۵۶۷۶۵	۵۶۸۴۲	۴۹۷۸۲	۵۰۶۵۰	۴۸۵۷۷	۴۶۹۱۷	۴۳۰۴۷	روشنایی افق مستقیم (میانگین ساعتی)
Degrees C	۲	۷	۱۴	۲۲	۲۷	۲۸	۲۴	۱۷	۱۲	۷	۳	۰	دمای هوا (میانگین ماهانه)
Degrees C	−۱	۰	−۱	۰	۲	۳	۱	۵	۳	۰	−۱	−۲	دمای نقطهٔ شبنم (میانگین ماهانه)
Percent	۷۴	۶۱	۳۵	۲۵	۲۲	۲۳	۲۵	۵۰	۵۷	۶۱	۷۱	۸۰	رطوبت نسبی (میانگین ماهانه)
Degrees	۳۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۸۰	۰	۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۸۰	جهت باد (حالت ماهانه)
m/s	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۲	سرعت باد (میانگین ماهانه)
Degrees C	۶	۹	۱۴	۱۹	۲۲	۲۳	۲۱	۱۷	۱۰	۷	۵	۴	دمای خاک (میانگین ۳ عمق)

(منبع: نگارندگان)

۲. استاندارد ۵۵ انجمن مهندسان تأسیسات سرمایشی، گرمایشی و تهویه مطبوع آمریکا (*ASHRAE*)

استاندارد ۵۵ موسسه آمریکایی مهندسان تأسیسات گرمایی، تهویه مطبوع و برودتی (ASHRAE)، که نخستین بار در سال ۱۹۶۶ منتشر شد، به عنوان یکی از مراجع اصلی در حوزه آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی شناخته می‌شود. این استاندارد طی سالیان متمادی و با توجه به پیشرفت‌های علمی و فناوری، دستخوش تغییرات و به‌روزرسانی‌های متعدد قرار گرفته است. نسخه‌های ۱۹۷۴، ۱۹۸۱ و ۱۹۹۲ از جمله تجدیدنظرهای مهم این استاندارد به شمار می‌روند. در سال ۲۰۰۴، استاندارد ۵۵ به آیین‌نامه ارتقاء یافت و آخرین نسخه آن در سال ۲۰۱۷ همراه با هشت ضمیمه منتشر شد. هدف اصلی استاندارد ۵۵، ارائه معیارهایی برای ارزیابی و فراهم آوردن آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی است. این استاندارد با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های تأثیرگذار بر آسایش انسان، عوامل محیطی و انسانی متعددی را مورد بررسی قرار می‌دهد. دما، تابش حرارتی، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی هستند که به طور مستقیم بر احساس آسایش انسان تأثیر می‌گذارند. نوع فعالیت فیزیکی و نوع پوشاک از جمله عوامل انسانی هستند که در تعیین میزان آسایش حرارتی افراد نقش دارند. با وجود اهمیت استاندارد ۵۵، لازم به ذکر است که این استاندارد صرفاً به ارزیابی آسایش حرارتی می‌پردازد و سایر عوامل مؤثر بر سلامت و آسایش انسان، مانند کیفیت هوا، آکوستیک، روشنایی و آلودگی‌های محیطی را مورد بررسی قرار نمی‌دهد. همچنین، این استاندارد برای ارزیابی شرایط ایمنی، سلامت و فرایندهای حیاتی مناسب نیست. استاندارد ۵۵ عمدتاً برای ارزیابی آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی ساختمان‌ها و تأسیسات استفاده می‌شود. این استاندارد در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع مورد استفاده قرار می‌گیرد تا شرایط آسایشی مطلوب برای ساکنان فراهم شود (Clark & Allen, 1978).

۱. مدل استفاده شده

مدل PMV[1] یا رای میانگین پیش‌بینی شده، ابزاری برای ارزیابی میزان رضایت حرارتی افراد در یک محیط خاص است. این مدل بر اساس تجربه‌های حرارتی گذشته افراد و ترکیبی از شرایط فیزیکی محیط محاسبه می‌شود. در محیط‌های مسکونی، افراد اغلب رفتارهای تطبیقی مانند تنظیم لباس‌های خود مطابق با فصل را به‌کار می‌گیرند که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در محدوده‌های دمایی وسیع‌تری نسبت به محیط‌های دارای سیستم‌های HVAC[2] متمرکز، احساس راحتی کنند. در واقع در محیط‌های مسکونی به دلیل وجود جریان‌های هوایی بالاتر و انعطاف‌پذیری در تغییر لباس، محدوده آسایش حرارتی گسترده‌تر است (Fanger, 1970).

بحث و نتایج

در بخش حاضر، نتایج حاصل از تحلیل داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده در شهر سنندج به صورت تفصیلی ارائه می‌شود. با بهره‌گیری از نمودارهای مختلف، تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای اقلیمی همچون دما، رطوبت، تابش خورشیدی، سرعت باد و پوشش ابر مورد بررسی قرار گرفته است. این تحلیل جامع درک عمیقی از شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه مورد مطالعه فراهم آورده و امکان ارزیابی نیازهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها و تاسیسات را فراهم می‌سازد و می‌تواند به عنوان پایه و اساس برای مطالعات آتی در زمینه طراحی ساختمان‌های پایدار و مدیریت انرژی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با طراحی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها و برنامه‌ریزی‌های شهری مورد استفاده قرار گیرد.

شکل (۲) نمودار میله‌ای توزیع دمای ماهانه شهر سنندج را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. در این نمودار محور عمودی نشان‌دهنده مقادیر دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و محور افقی نمایانگر ماه‌های سال است. نقاط کوچک در بالا و پایین هر میله، به ترتیب حداکثر و حداقل دمای ثبت شده در آن ماه را مشخص می‌نمایند. مستطیل کوچکی که در وسط هر میله قرار دارد، میانگین دمای ماهانه را نشان می‌دهد. علاوه بر این بخش‌های پایینی و بالایی میله‌ها که به رنگ سبز مشخص شده‌اند، به عنوان محدوده‌های طراحی در فصول سرد و گرم سال در نظر گرفته می‌شوند. مستطیل‌های زرد رنگ نیز حداقل و حداکثر دمای روزانه را نمایش می‌دهند؛ به طوری که مستطیل پایینی میانگین دمای شبانه و مستطیل بالایی میانگین دمای روزانه را نشان می‌دهد. دو خط افقی خاکستری رنگ که در وسط نمودار قرار دارند، محدوده آسایش حرارتی را در فصول گرم و سرد سال با در نظر گرفتن رطوبت نسبی ۵۰ درصد مشخص می‌کنند. بر اساس تحلیل این نمودار، در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر، دمای هوا به زیر محدوده آسایش زمستانی کاهش می‌یابد. بنابراین، استفاده از وسایل گرمایشی جهت دستیابی به آسایش حرارتی در این ماه‌ها ضروری است. در مقابل، در ماه‌های ژوئن و سپتامبر، میانگین دمای هوا در محدوده آسایش قرار دارد و نیاز به استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی کاهش می‌یابد. بیشترین دماها در ماه‌های جولای و آگوست رخ می‌دهند. میانگین دمای سالانه شهر سنندج برابر با ۱۴ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که به دلیل قرارگیری شهر سنندج در منطقه‌ای با اقلیم سرد، نیاز به استفاده از وسایل گرمایشی در بیشتر ماه‌های سال احساس می‌شود.

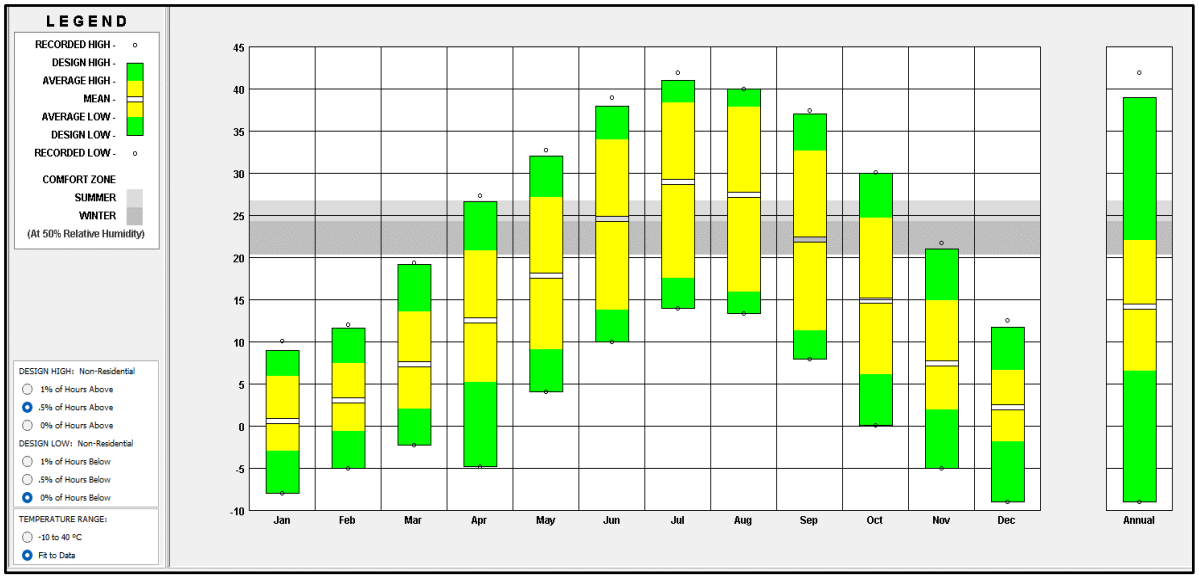
شکل (۳) تغییرات زمانی متغیرهای کلیدی اقلیمی شامل دمای هوا، دمای حباب تر، تابش افقی خورشید، تابش مستقیم و تابش پراکنده را به تصویر می‌کشد. محور عمودی سمت چپ نمودار، مقادیر دما را برحسب درجه سانتی‌گراد و محور عمودی سمت راست، شدت تابش را برحسب وات بر متر مربع نشان می‌دهد. نمودار مذکور نشان می‌دهد که دمای هوا (قرمز پررنگ) و دمای حباب تر (قرمز کم‌رنگ) طی دوره مطالعه نوسانات قابل توجهی داشته‌اند. فاصله بین این دو منحنی، شاخصی از رطوبت نسبی هوا است. افزایش این فاصله، کاهش رطوبت نسبی و در نتیجه خشک‌تر شدن هوا را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های ارائه شده، ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست خشک‌ترین ماه‌های سال بوده‌اند. تابش پراکنده (آبی) که نشان‌دهنده سهم تابش

1. Predicted Mean Vote
2. Heating, Ventilation and Air Conditioning

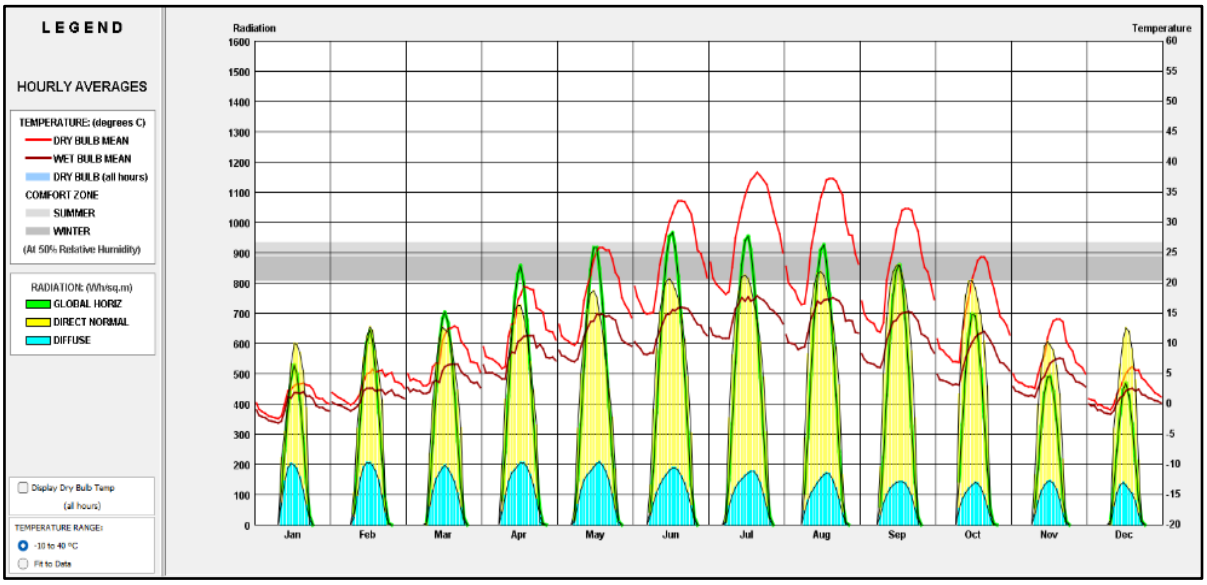
خورشیدی است که پس از پراکندگی در جو به سطح زمین می‌رسد، در ماه‌های پایانی سال به حداقل و در ماه‌های میانی سال به حداکثر مقدار خود رسیده است. این الگو نشان‌دهنده تأثیر زاویه تابش خورشید و طول روز بر شدت تابش پراکنده است. تابش مستقیم (زرد) و تابش افقی (سبز) نیز در ماه‌های میانی سال به بیشترین مقدار خود رسیده‌اند. این امر به دلیل افزایش زاویه تابش خورشید و کاهش اثر جذب و پراکندگی در جو در این ماه‌ها است. به طور کلی، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که ماه‌های می تا اکتبر به لحاظ دمایی در محدوده آسایش قرار داشته‌اند. این دوره زمانی، به دلیل ترکیب مناسب دما و رطوبت، شرایط مطلوبی را برای فعالیت‌های انسانی فراهم می‌آورد.

همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، توزیع تابش مستقیم و افقی بر حسب شدت روشنایی (lux) در طول سال به صورت نموداری نمایش داده شده است. در این نمودار، میله‌های زرد رنگ نشان‌دهنده شدت تابش مستقیم و میله‌های سبز رنگ نشان‌دهنده شدت تابش افقی در ماه‌های مختلف سال می‌باشند. مقادیر عددی شدت روشنایی در محور عمودی نمودار و ماه‌های سال در محور افقی آن درج شده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل این نمودار، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حداقل شدت تابش مستقیم و افقی در ماه‌های ابتدایی سال و حداکثر آن در ماه‌های میانی سال رخ می‌دهد. همچنین، در ماه‌های پایانی سال، مجدداً کاهش قابل توجهی در شدت تابش مشاهده می‌شود.

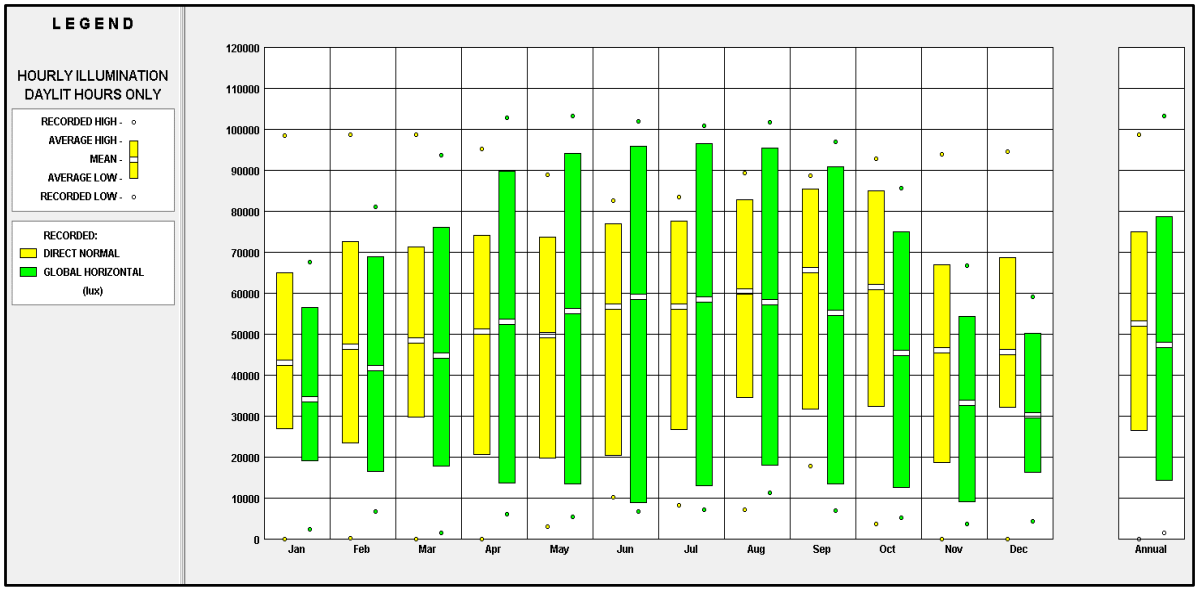
شکل (۵) توزیع پوشش ابر در طول یک دوره زمانی مشخص را به تصویر می‌کشد. این نمودار، میزان ابری بودن آسمان را در بازه‌های زمانی مختلف نشان داده و به تحلیل تغییرات پوشش ابر در طول سال کمک می‌کند. بر اساس داده‌های ارائه شده در این شکل، به طور متوسط در ماه ژانویه حدود ۵۰ درصد از آسمان توسط ابرها پوشیده شده است. این مقدار در ماه سپتامبر به حداقل میزان خود یعنی ۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، ماه فوریه بیشترین میزان پوشش ابر را در طول سال تجربه می‌کند. تحلیل کلی داده‌ها نشان می‌دهد که به طور متوسط در طول سال، ۳۳ درصد از آسمان توسط ابر پوشیده شده است.



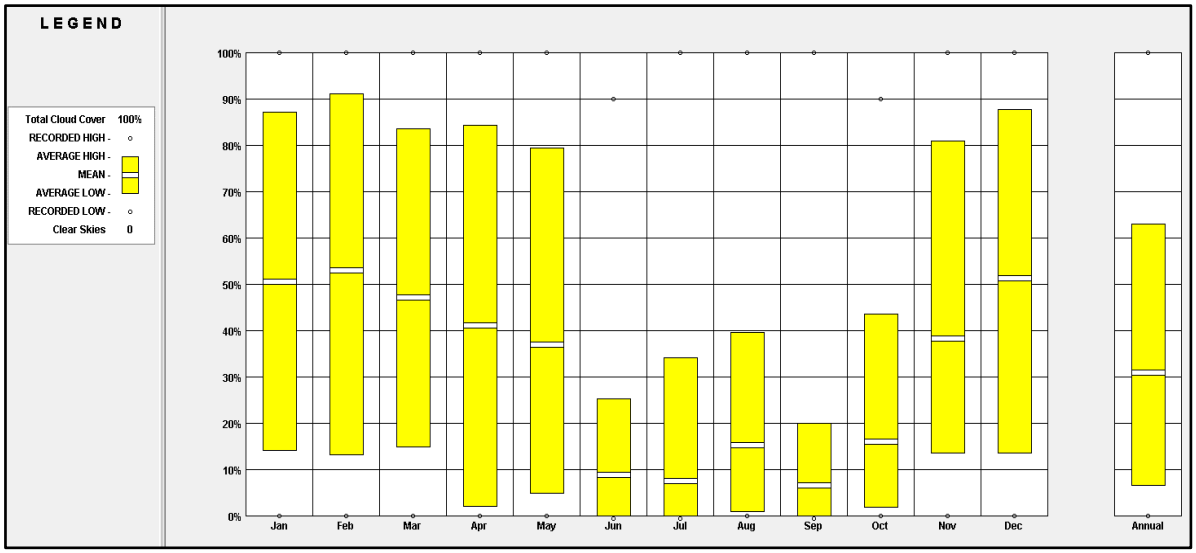
شکل ۲. توزیع دمای ماهانه شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل۳. تغییرات زمانی متغیرهای اقلیمی شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل ٤. توزیع تابش مستقیم و افقی شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل ۵. توزیع پوشش ابر شهر سنندج (منبع: نگارندگان).

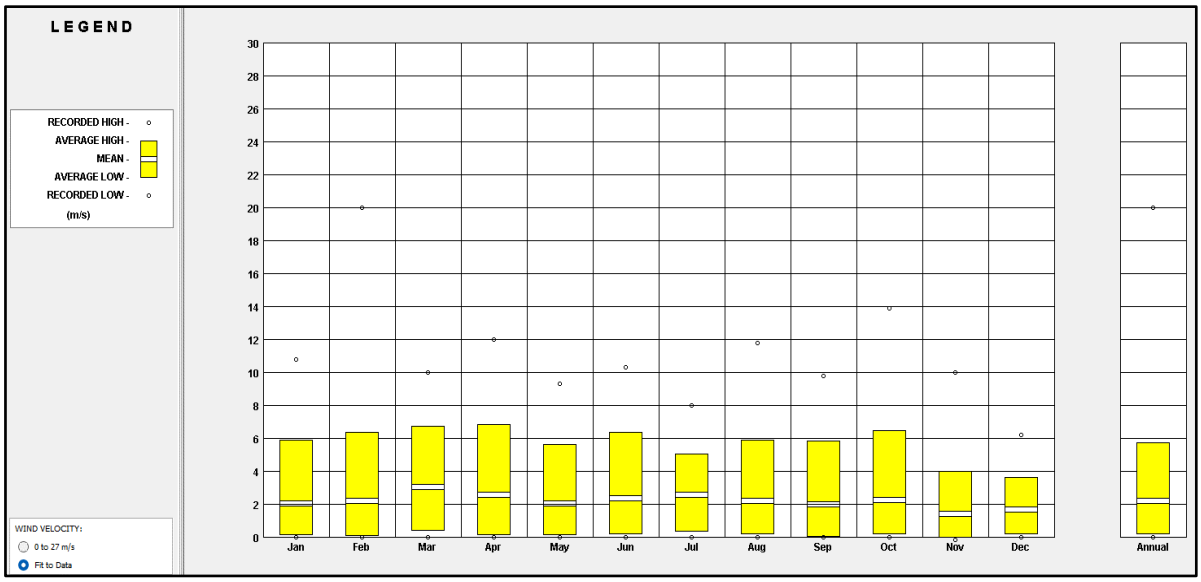
شکل (۶) تغییرات سرعت باد را در شهر سنندج بر حسب متر بر ثانیه نشان می‌دهد. براساس طبقه‌بندی استاندارد سرعت باد، سرعت‌های ۳ تا ۷ متر بر ثانیه به عنوان نسیم ملایم، ۷ تا ۹ متر بر ثانیه به عنوان نسیم متوسط، ۹ تا ۱۲ متر بر ثانیه به عنوان نسیم، ۱۲ تا ۱۴ متر بر ثانیه به عنوان باد، ۱۴ تا ۲۰ متر بر ثانیه به عنوان تندباد ملایم و ۲۰ تا ۲۴ متر بر ثانیه به عنوان تندباد طبقه‌بندی می‌شوند. تحلیل داده‌های ارائه شده در نمودار نشان می‌دهد که ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر به ترتیب دارای بیشترین میزان سرعت باد در شهر سنندج هستند. در مقابل، ماه‌های نوامبر و دسامبر کمترین سرعت باد را در طول سال تجربه می‌کنند.

مطابق داده‌های ارائه شده در شکل (۷)، پروفیل دمایی خاک در سه عمق ۵۰ سانتی‌متر، ۲ متر و ۴ متر در شرایط پوشش گیاهی چمن تازه مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این نمودار، در ماه ژانویه، دمای خاک به ترتیب در اعماق مذکور ۲، ۵ و ۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. با فرارسیدن ماه‌های میانی سال، این دماها به حداکثر خود رسیده و به ترتیب به ۲۶، ۲۲ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از آن است که در ابتدای سال، کاهش دما در اعماق کم‌تر خاک نسبت به اعماق بیشتر مشهود است. این روند با پیشروی فصل به سمت اواسط سال معکوس شده و دمای خاک در اعماق کم‌تر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در مقابل، در اعماق بیشتر، دما با نزدیک شدن به اواسط سال کاهش یافته و از دمای لایه‌های سطحی کمتر می‌شود.

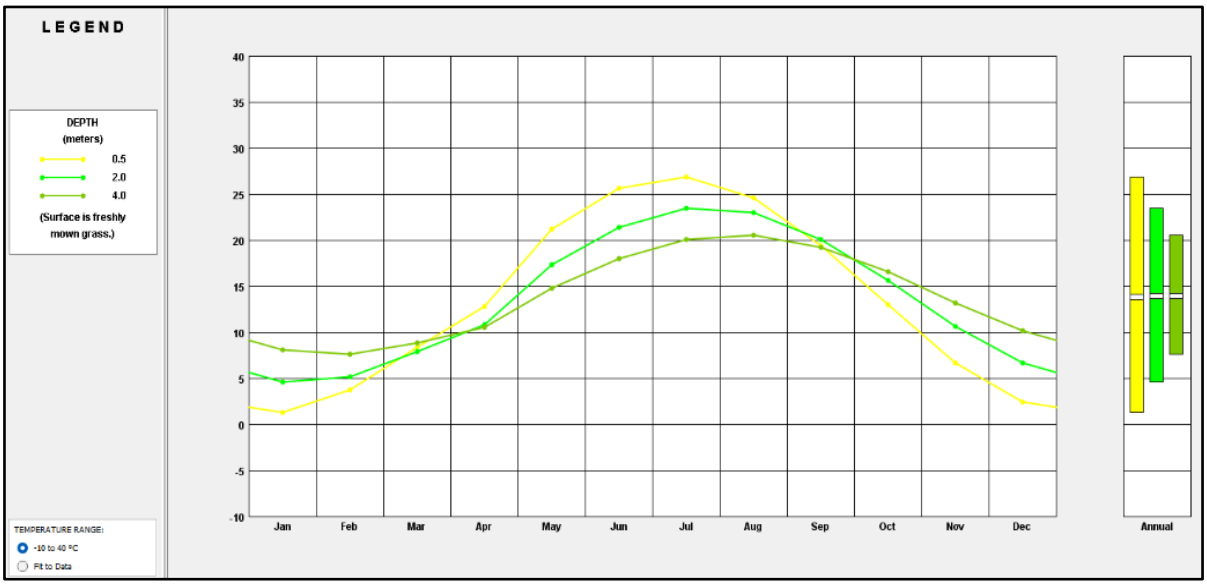
شکل (۸) تغییرات دمای هوا (بر حسب درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی (بر حسب درصد) را به صورت نقطه‌ای در هر ساعت از شبانه‌روز و برای تمامی ماه‌های سال نشان می‌دهد. در این شکل، مناطق آسایش حرارتی برای فصول گرم و سرد نیز مشخص گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای سال، کمترین دمای هوا و بیشترین رطوبت نسبی مشاهده می‌شود. همچنین، در ماه‌های می و اکتبر، بازه زمانی ۱۲ تا ۱۷ بعدازظهر در محدوده آسایش حرارتی قرار می‌گیرد. این تحلیل به منظور تعیین ماه‌ها و ساعات مورد نیاز برای اعمال تغییرات دمایی در جهت دستیابی به شرایط آسایش حرارتی مطلوب، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل (۹) به‌طور جامع تغییرات پویای سایه خورشید را در طول سال به تصویر می‌کشد. محور عمودی نمودار، زوایای ارتفاعی خورشید را نشان می‌دهد و محور افقی آن، زوایای جغرافیایی را مشخص می‌کند. این نمودار، تغییرات فصلی سایه را از ماه دسامبر (پایین‌ترین نقطه نمودار) تا ژوئن (بالاترین نقطه) به صورت ماه به ماه نمایش می‌دهد. محور افقی نیز ساعات مختلف روز را مشخص می‌کند. همانطور که از نمودار برمی‌آید، با نزدیک شدن به ماه ژوئن، زاویه ارتفاع خورشید افزایش می‌یابد که این امر

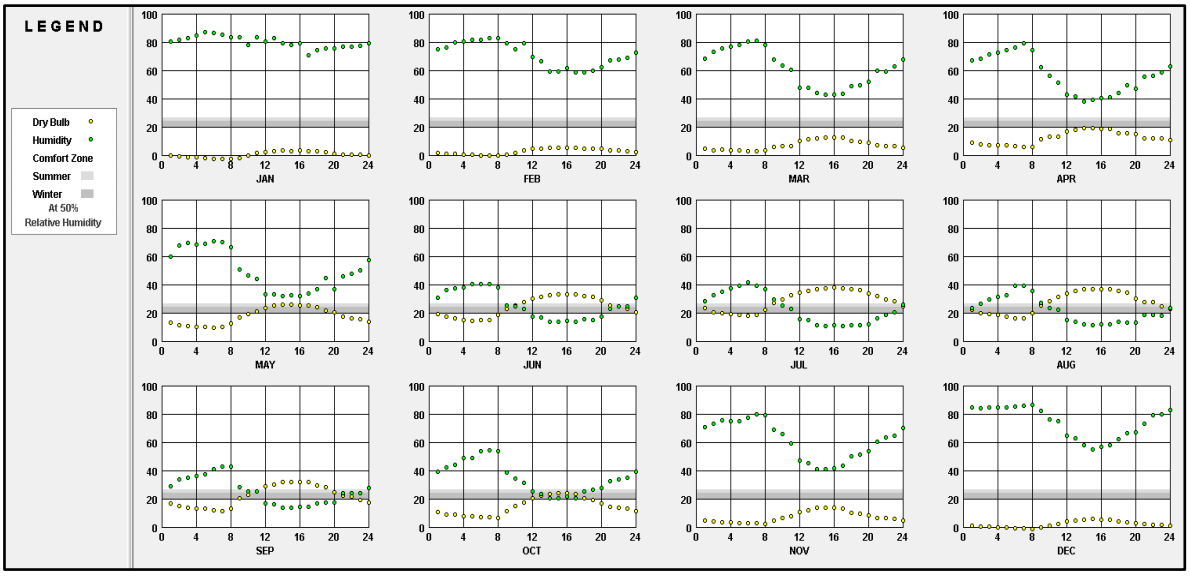
به طور مستقیم با افزایش دمای هوا مرتبط است. بر اساس داده‌های اقلیمی، شهر سنندج به طور متوسط ۱۶۰۶ ساعت در سال را در دمای کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۸۹ ساعت را در دمای بین ۲۰ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد و ۳۰۲ ساعت را در دمای بالاتر از ۲۶ درجه سانتی‌گراد تجربه می‌کند.



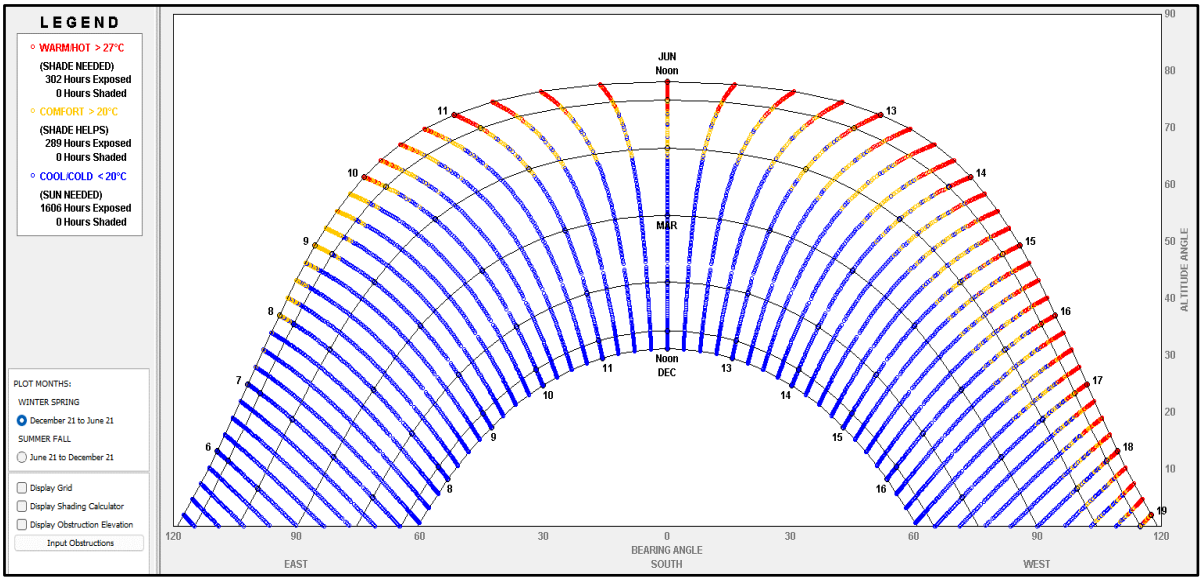
شکل ٦. تغییرات سرعت باد در شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل ۷. پروفیل دمایی خاک شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل ۸. تغییرات دمای هوا و رطوبت نسبی شهر سنندج (منبع: نگارندگان).

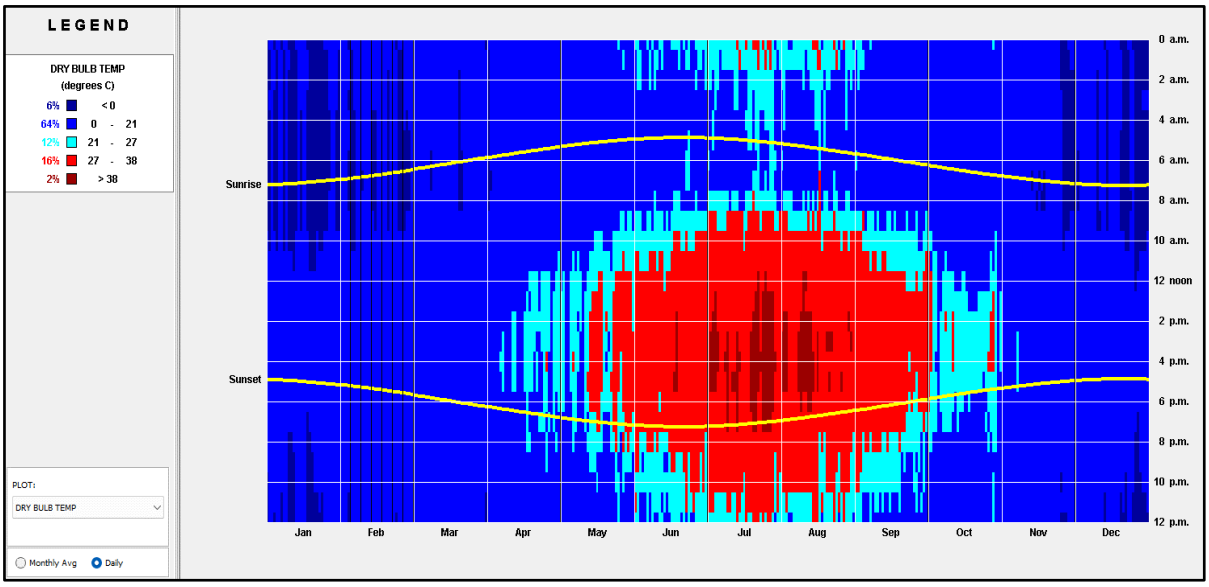


شکل ۹. تغییرات پویای سایه خورشید شهر سنندج (منبع: نگارندگان).

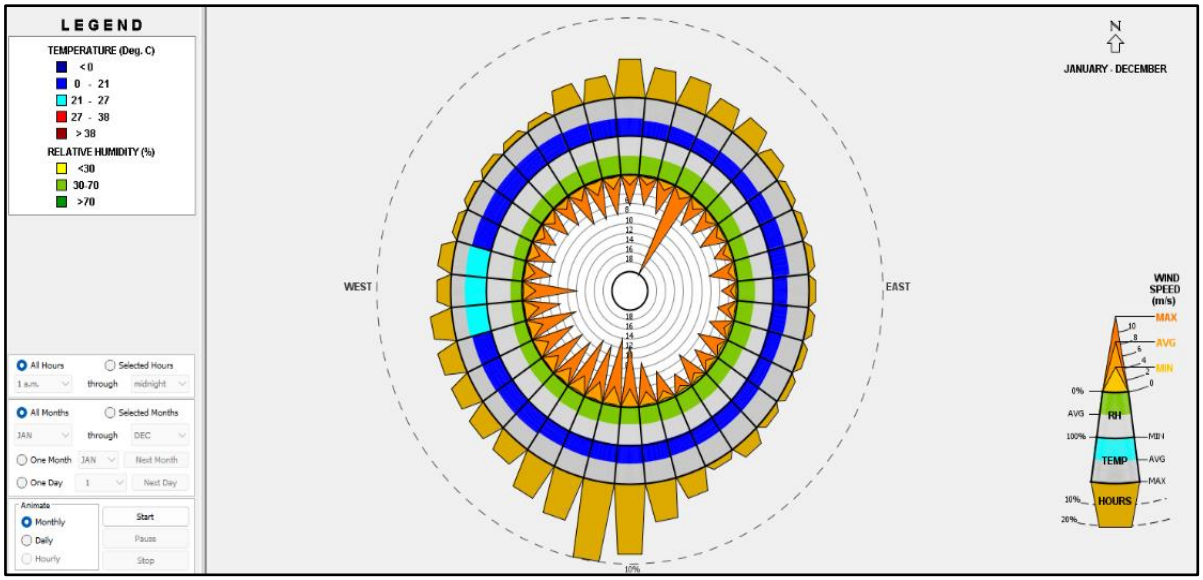
شکل (۱۰) نمودار تغییرات دمای هوا را به صورت روزانه و در طول سال نمایش می‌دهد. محور افقی نمودار نشان‌دهنده زمان (ساعت) و محور عمودی آن بیانگر دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد است. همچنین، در این نمودار، ساعات طلوع و غروب خورشید با رنگ زرد مشخص شده‌اند. این تصویر، تغییرات دمایی روزانه و فصلی را به خوبی نشان داده و امکان تحلیل نیاز به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در طول سال را فراهم می‌آورد. بر اساس تحلیل داده‌های هواشناسی شهر سنندج، توزیع دمای هوا در این شهر به شرح زیر است: ۶ درصد از ساعات سال، دما کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین، ۶۴ درصد از ساعات، دما بین صفر تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد، ۱۲ درصد بین ۲۱ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد، ۱۶ درصد بین ۲۷ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد و تنها ۲ درصد از ساعات، دما بالاتر از ۳۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

شکل (۱۱) یک نمودار ترکیبی سرعت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی شهر سنندج را به نمایش می‌گذارد که پارامترهای هواشناسی مختلفی از جمله جهت باد، سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا را در یک قالب بصری ارائه می‌کند. در این نمودار،

دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد و با استفاده از یک طیف رنگی مشخص شده است. رنگ آبی تیره برای دمای کمتر از صفر درجه، طیف رنگ‌های آبی برای دمای بین صفر تا ۲۰ درجه، آبی فیروزه‌ای برای دمای ۲۰ تا ۲۴ درجه، قرمز روشن برای دمای ۲۴ تا ۳۸ درجه و قرمز تیره برای دمای بالاتر از ۳۸ درجه در نظر گرفته شده است. رطوبت نسبی نیز با استفاده از یک طیف رنگی مشابه نمایش داده شده است. رنگ زرد برای رطوبت نسبی کمتر از ۳۰ درصد، سبز روشن برای رطوبت بین ۳۰ تا ۷۰ درصد و سبز تیره برای رطوبت بالای ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است. سرعت باد به صورت حداقل، متوسط و حداکثر با استفاده از فلش‌های دندانه‌دار درون دایره نشان داده شده است که مقادیر آن‌ها از صفر تا ۲۰ متر بر ثانیه متغیر است. جهت‌های اصلی جغرافیایی (غرب و شرق) در دو طرف نمودار مشخص شده و همچنین توزیع ساعتی جهت باد غالب نیز در آن نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: تغییرات دمای هوا در شهر سنندج (منبع: نگارندگان).



شکل ۱۱. نمودار ترکیبی سرعت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی شهر سنندج (منبع: نگارندگان).

در عصر حاضر، با توجه به محدودیت منابع انرژی و تغییرات اقلیمی، طراحی ساختمان‌هایی که با محیط زیست سازگار باشند و مصرف انرژی آن‌ها به حداقل برسد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اقلیم‌های کوهستانی به دلیل شرایط خاص آب و هوایی خود، نیازمند رویکردهای خاصی در طراحی ساختمان هستند. در این پژوهش، راهکارهای مختلفی برای طراحی ساختمان‌های پایدار در این اقلیم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است با توجه به این امر، مجموعه‌ای از راهکارهای طراحی اقلیمی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود: برای طراحی سازگار با اقلیم گرم و خشک، استفاده از گرمایش غیرفعال خورشیدی با جهت‌دهی بیشتر سطوح شیشه‌ای به سمت جنوب برای بهره‌گیری حداکثری از نور خورشید زمستانی و طراحی سایه‌بان‌هایی برای تابستان، اهمیت بالایی دارد. استفاده از شیشه‌های دو جداره با عملکرد بالا در جهت‌های غربی، شمالی و شرقی و شیشه‌های شفاف در جنوب به حداکثر جذب خورشیدی کمک می‌کند. روش‌های پناهگاهی مانند پناهگاه‌های زمینی یا استفاده از زیرزمین‌های قابل‌استفاده و لوله‌های زمینی در کاهش بار گرمایی موثر هستند. همچنین، پنکه‌های سقفی و حرکت هوا در داخل ساختمان در روزهای گرم می‌تواند حس خنکی ایجاد کرده و نیاز به تهویه مطبوع را کاهش دهد. سقف‌های تخت و رنگ روشن به همراه استفاده از ساختارهای با جرم حرارتی بالا و بازشوهای کوچک سایه‌دار که برای تهویه شبانه باز می‌شوند، از جمله راهکارهای مؤثر در طراحی اقلیمی هستند. سایه‌بان‌های قابل‌تنظیم و استفاده از حیاط‌های محصور و سایه‌دار همراه با آب‌نما برای ایجاد خرداقلیم‌های محافظت‌شده از باد، نقش مهمی در کاهش نیاز به تهویه مطبوع دارند. کاهش دمای آسایش داخلی در شب، تنظیم نقشه طبقات بر اساس جهت‌گیری خورشیدی و استفاده از دال بتنی با جرم حرارتی بالا نیز به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند. عایق‌بندی مناسب، استفاده از مصالح رنگ روشن و سقف‌های خنک با تابش‌پذیری بالا، تهویه طبیعی یا پنکه‌های تمام‌خانه برای ذخیره‌سازی «خنکی» شبانه و روش‌هایی مانند خنک‌کننده تبخیری در اقلیم‌های گرم و خشک، از راهکارهای کلیدی در کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد ساختمان‌ها در این اقلیم هستند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل عوامل اقلیمی موثر بر طراحی معماری در مناطق کوهستانی با تمرکز بر شهر سنندج و ارائه راهکارهای طراحی پایدار و همساز با اقلیم برای این مناطق انجام شد. در این پژوهش، برای تحلیل شرایط اقلیمی شهر سنندج و ارزیابی نیازهای سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها، از داده‌های اقلیمی استاندارد انرژی (EPW) استفاده شد. ابتدا این داده‌ها به صورت ساعتی و برای بازه زمانی ۱۴ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳) جمع‌آوری شدند. داده‌های EPW شامل پارامترهای مختلفی مانند دمای هوا، دمای خاک، دمای نقطهٔ شبنم، رطوبت، سرعت و جهت باد و تابش خورشیدی است. برای نمایش بهتر نتایج، نمودارهای مختلفی از جمله نمودار تغییرات دمایی، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد در طول سال با استفاده از نرم-افزار مشاور اقلیمی تهیه شد. با تحلیل نمودارها و داده‌های آماری، ویژگی‌های اقلیمی شهر سنندج مانند دوره‌های گرم و سرد، شدت تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی مشخص شدند. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های اقلیمی جمع‌آوری‌شده در شهر سنندج، نمایانگر نوسانات قابل توجه پارامترهای هواشناسی از جمله دمای هوا، دمای خاک، دمای نقطهٔ شبنم، رطوبت، سرعت و جهت باد و تابش خورشیدی در طول سال است. این داده‌ها، درک جامعی از شرایط آب و هوایی شهر فراهم کرده و به منظور طراحی ساختمان‌های سازگار با اقلیم و کاهش مصرف انرژی، اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، اقلیم سنندج با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد، نیاز به راهکارهای گرمایشی در فصول سرد و همچنین مدیریت مناسب تابش و سایه‌زنی در فصول گرم دارد.

تحلیل نمودارهای دما نشان داد که ماه‌های سرد سال، به‌ویژه ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر، نیاز به سیستم‌های گرمایشی دارند، در حالی که در ماه‌های گرم مانند جولای و آگوست، سیستم‌های سرمایشی به منظور حفظ آسایش حرارتی ضروری می‌باشند. با این حال، در برخی از ماه‌ها مانند ژوئن و سپتامبر، شرایط دمایی در محدوده آسایش قرار دارد و نیازی به استفاده از سیستم‌های فعال گرمایشی و سرمایشی احساس نمی‌شود. داده‌های تابش خورشیدی نشان‌دهنده اهمیت زاویه تابش خورشید و طول روز در شدت تابش مستقیم و پراکنده هستند. این نتایج نشان داد که در ماه‌های میانی سال، شهر سنندج بیشترین تابش

خورشیدی را دریافت می‌کند، که به دلیل زاویه تابش بیشتر خورشید و کاهش اثرات جذب و پراکندگی در جو است. این اطلاعات می‌تواند به طراحی سیستم‌های غیرفعال خورشیدی و تعیین بهترین جهت‌دهی ساختمان‌ها برای بهره‌برداری حداکثری از تابش خورشیدی در فصول مختلف کمک کند. تحلیل داده‌های باد نیز نشان داد که ماه‌های مارس، آوریل و اکتبر دارای بیشترین سرعت باد هستند که استفاده از تهویه طبیعی در این ماه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین، نتایج حاصل از گلباد نشان‌دهنده توزیع مناسب جهت بادها برای استفاده از سیستم‌های تهویه طبیعی در ماه‌های گرم سال بود. این امر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های سرمایشی کمک کند. به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش وابستگی به سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی فعال، استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا و روش‌های طراحی مانند تهویه شبانه و سایه‌بان‌های قابل تنظیم توصیه می‌شود. همچنین، بهره‌گیری از پناهگاه‌های زمینی و پوشش گیاهی به منظور کاهش اثرات گرما در فصول گرم و حفظ دمای داخلی ساختمان‌ها در محدوده آسایش حرارتی موثر خواهد بود. با توجه به تحلیل داده‌ها، طراحی ساختمان‌های پایدار در اقلیم سنندج می‌تواند شامل استفاده از سیستم‌های غیرفعال خورشیدی، سقف‌های روشن و عایق‌بندی مناسب، تهویه طبیعی و سایه‌بان‌های قابل تنظیم باشد. استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا و طراحی مناسب فضای باز، از جمله حیاط‌ها و آب‌نماها نیز می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند. همچنین، توجه به جزئیات معماری مانند شیشه‌های دو جداره و نقشه طبقات بر اساس جهت‌دهی خورشیدی می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد ساختمان‌ها در این اقلیم کمک کند.

پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی

۱. **توسعه مدل‌های شبیه‌سازی:** با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌توان مدل‌های دقیق‌تری از عملکرد ساختمان‌ها در شرایط اقلیمی مختلف ایجاد کرد و تأثیر تغییرات طراحی را بر مصرف انرژی ارزیابی کرد.

۲. **بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی:** با توجه به تغییرات اقلیمی جهانی، لازم است تأثیر این تغییرات بر شرایط اقلیمی و به تبع آن بر طراحی ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

۳. **ارزیابی اقتصادی طراحی‌های پایدار:** هزینه‌های اولیه و بلندمدت طراحی‌های پایدار را با طراحی‌های سنتی مقایسه کرده و توجیه اقتصادی این روش‌ها را بررسی شود.

٤. **بررسی رضایت کاربران:** با انجام مطالعات میدانی، رضایت کاربران از ساختمان‌های طراحی شده بر اساس اصول پایدار ارزیابی شود.

۵. **توسعه شاخص‌های ارزیابی پایداری:** شاخص‌های جامع‌تری برای ارزیابی پایداری ساختمان‌ها در مناطق کوهستانی توسعه بررسی شود.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

انتظاری، علیرضا؛ میوانه، فاطمه و خزاعی نژاد، فروغ (۱۳۹۹). استراتژی های طراحی در معماری همساز با اقلیم مطالعه موردی: شهر یزد. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، ۲۰(۵۶)، ۲۲۳-۲۴۰.

سعیدی، علی و طولابی نژاد، میثم (۱۳۹۳). آسایش حرارتی و معماری همساز با اقلیم شهرستان خرم آباد. *مجله جغرافیا*، ۱۲ (۴۰)، ۲۲۹-۲۴۹.

شمس، مجید، و خداکرمی، مهناز (۱۳۸۹). بررسی معماری سنتی همساز با اقلیم سرد مطالعه موردی: شهر سنندج. *مجله آمایش محیط*، ۳ (۱۰)، ۹۱-۱۱۴.

ظهوری قره درویشلو، راحله (۱۳۹۴). معماری همساز با اقلیم کوهستانی خیلی سرد مطالعه موردی: خانه های تاریخی اردبیل. *مجله جغرافیا*، ۱۳(۴۷)، ۲۱۱-۲۲۹.

قربانی، احمد (۱۳۹۴). معماری همساز با اقلیم (نمونه موردی: شهر سنندج)، *دومین کنفرانس ملی معماری و منظر شهری پایدار*. مشهد.

کرمی، مختار و شجاعی، مهدی (۱۴۰۱). بررسی بهترین راهبردهای طراحی معماری همساز با اقلیم در شهر مشهد. *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*, ۲۰ (۲)، ۲۲۲-۱۹۵.

Alshboul, A. A., & Alkurdi, N. Y. (2019). Enhancing the Strategies of Climate Responsive Architecture, The Study of Solar Accessibility for Buildings Standing on Sloped Sites. *Modern Applied Science*, 13(1), 69-84.

Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., & Kaihoul, A. (2021, October). Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. In *Building Simulation* (Vol. 14, pp. 1567-1584). Tsinghua University Press.

Chairuniza, C., Hartanti, N. B., & Topan, M. A. (2020). Net-zero energy building application in neo-vernacular architecture concept. *International Journal of Scientific & Technology Research (IJSTR)*, (3).

Clark, G., & Allen, C. (1978). The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. In *Proc. 2nd national passive solar conference (AS/ISES)* (pp. 675-678).

Cortesão, J., Lenzholzer, S., Mülder, J., Klok, L., Jacobs, C., & Kluck, J. (2020). Visual guidelines for climate-responsive urban design. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102245.

Crawley, D., & Lawrie, L. (2019, September). Should we be using just 'typical'weather data in building performance simulation?. In *Building Simulation 2019* (Vol. 16, pp. 4801-4808). IBPSA.

De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and buildings*, 34(6), 549-561.

Fanger, P. O. (1970). Thermal Comfort, Copenhagen, Denmark.

Kaihoul, A., & Sriti, L. (2018). Towards public identity and climate awareness architecture. In *Cities' Identity Through Architecture and Arts* (pp. 129-137). Routledge.

Kaihoul, A., Pitzalis, E., & Sriti, L. (2024). An Exploration of Climate-Responsive Design Strategies Employed by El-Miniawy Brothers in Southern Algeria. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 36(3), 32-54.

Kaihoul, A., Sriti, L., Amraoui, K., Di Turi, S., & Ruggiero, F. (2021). The effect of climate-responsive design on thermal and energy performance: A simulation based study in the hot-dry Algerian South region. *Journal of Building Engineering*, 43, 103023.

Khalid, A. (2018). A comparative study of initial stage climate responsive design guideline in residential settings based on the thermal comfort models of climate consultant for five regions of Pakistan. *European Journal of Sustainable Development*, 7(2), 41-41.

Khisro, S. B., Fatima, B., Khan, M. I., & Orakzai, J. K (2024). Climate-adaptive infrastructure and environmentally sustainable urban growth. *Khyber Journal of Public Policy*, 3(4), 170-193.

Liu, S., Yin, S., Hua, J., & Ren, C. (2023). Climate-responsive architectural and urban design strategies for adapting to extreme hot events. In *Adapting the Built Environment for Climate Change* (pp. 253-272). Woodhead Publishing.

Milne, M., Liggett, R., & Al-Shaali, R. (2007, July). Climate consultant 3.0: A tool for visualizing building energy implications of climates. In *proceedings of the Solar Conference* (Vol. 1, p. 466). American Solar Energy Society; American Institute Of Architects.

Nguyen, A. T., & Reiter, S. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and buildings*, 68, 756-763.

Nie, Q., Zhao, S., Zhang, Q., Liu, P., & Yu, Z. (2019). An investigation on the climate-responsive design strategies of vernacular dwellings in Khams. *Building and Environment*, 161, 106248.

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2265-2300.

Rayan, M., Gruehn, D., & Khayyam, U. (2021). Green infrastructure indicators to plan resilient urban settlements in Pakistan: Local stakeholder's perspective. *Urban climate*, *38*, 100899.

Safi, H. U., Behsoodi, M. M., & Shirzad, W. (2024). Climate-Responsive Urban Design: Innovations and Strategies for Sustainable Buildings and Construction in Afghanistan. *Nangarhar University International Journal of Biosciences*, 269-273.

Serra, F., & De Rossi, A. (2024). Smart Metromountain: urban and mountain interdependence and physical-digital infrastructures as a tool for a new climate-resilient liveability.

Soudian, S., & Berardi, U. (2021). Development of a performance-based design framework for multifunctional climate-responsive façades. *Energy and Buildings*, 231, 110589.

Thakur, N., Parashar, D., Chidambaram, C., & Dharwal, M. (2021). Climate responsive strategy matrix for designing buildings in India. *Nat. Environ. Pollut. Technol*, 20, 1021-1031.

Vatan Kaptan, M. (2020). Climate-responsive design strategy for Erbil city. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 14(1), 90-111.

Walton, G. N. (1983). *Thermal analysis research program reference manual* (p. 21). Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Bureau of Standards.

Yalaz, E. T., & Dişli, G. (2024). Climate-responsive building façade design: Inspirations from historic buildings in semi-cold climate zone. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 69, 103914.