Journal of Cold Climate Architecture and Environment
Spring 2026 Vol 1 Issue 2
ISSN (Online): 3134-0822
https://ccae.ubonab.ac.ir



Research Paper

Simultaneous assessment of energy consumption and thermal comfort of office buildings under future climate change scenarios using machine learning (Tabriz City)

Zahra Rahmany Khorram[1], Sina Allahyari[1*], Aida Maleki[2]

1- M.Sc. Student, Architecture and Energy, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

2-Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

ARTICLEINFO

Received:2025/12/11
Accepted:2026/03/01
PP: 19-31

Scan the QR code below to access and read this article.

Keywords:
Climate change, Machine Learning, energy Consumption, thermal Comfort, Building Resilience

Abstract

With the intensification of climate change, the energy consumption pattern in buildings has undergone changes, especially in cold and dry climates. Tabriz, as one of the cold cities in Iran, will face an increase in cooling energy demand in the coming decades. The present study aimed to simultaneously evaluate the energy consumption and thermal comfort of office buildings under future climate scenarios and identify physical parameters affecting the thermal resilience of the building. In this study, an office building was modeled using DesignBuilder software and future climate data for the horizons of 2050 and 2080 based on the RCP 8.5 scenario and generated through Meteonorm 8 software and applied in simulations. For extensive parametric analysis, more than 10,000 scenarios were generated using the jEPlus tool and the LHS sampling method. Machine learning algorithms were used to reduce the computational load and extract nonlinear relationships between variables. Performance indicators including total annual energy consumption and hours of thermal discomfort were considered. The results showed that the XGBoost algorithm with determination coefficients of 0.998 for energy consumption and 0.995 for thermal discomfort hours provides the highest prediction accuracy. The analysis of the importance of features indicates that the orientation of the building and the thickness of the thermal insulation of the shell (among the variables examined) have the greatest impact.

DOR:

Journal of Cold Climate Architecture and Environment
Spring 2026 Vol 1 Issue 2
ISSN (Online): 3134-0822
https://ccae.ubonab.ac.ir



Extended Abstract

Introduction

In the contemporary era, the climate change crisis and the phenomenon of global warming have confronted the environmental equilibrium of the planet with an unprecedented and multifaceted challenge. These atmospheric shifts not only threaten natural ecosystems but have also instigated fundamental transformations in energy consumption patterns within the architectural framework of human settlements. Scientific estimations and reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate that the rise in mean global temperatures represents a complete metamorphosis of biological patterns and the physical requirements of buildings rather than a mere numerical adjustment. This thermal escalation is projected to generate a significant surge in cooling demand, which will gradually outweigh the decreasing need for winter heating, thereby driving the net energy consumption balance in buildings upward at a concerning rate.

The building sector, as one of the primary consumers of energy resources and a central axis of global greenhouse gas emissions, plays a strategic and pivotal role in decarbonization initiatives and sustainable development frameworks. Due to its geographical positioning within the arid and semi-arid climatic belt, Iran is exposed to the adverse effects of this temperature rise at a rate significantly exceeding global averages. The metropolis of Tabriz, long recognized as a prominent archetype of cold and mountainous regions in Iran, now stands on the threshold of a major climatic transition. In the coming decades, this city will face the paradox of overheating within buildings that were historically designed solely based on strategies for heat retention and protection against extreme cold.

The vital necessity of this research lies in the rigorous and scientific analysis of how physical variables interact with two frequently contradictory components, namely energy efficiency and occupant thermal comfort. By examining this interplay under both pessimistic and realistic future scenarios for the 2050 and 2080 horizons, a clear path is established for extracting resilient design strategies. The ultimate objective of this study is to enhance the quality of life in interior spaces and ensure the ecological sustainability of the urban fabric against forthcoming atmospheric turbulence, ensuring that architecture functions as a dynamic and responsive system rather than a passive shell.

Methodology

By adopting an innovative hybrid approach, this research establishes a cohesive bridge between the domain of building physics simulations and the realm of computational machine learning algorithms. The research process was designed through several sequential and overlapping stages to ensure that the accuracy of the results was maintained at the highest possible level.

In the initial phase, a reference office unit in the city of Tabriz, representing the prevailing construction patterns of this climate, was selected. This model was developed in the advanced DesignBuilder software with highly precise technical details, including the thermal properties of materials, occupancy schedules, lighting systems, and internal loads. The southern facade of this unit was designated as the primary surface for thermal exchange with the environment, while all other surfaces were configured as adiabatic to ensure that the effects of design variables on the main envelope were measured in an isolated and accurate manner.

To account for long term climatic impacts, traditional atmospheric data were replaced with forward looking projections. Utilizing the RCP8.5 scenario, which reflects the continuation of current greenhouse gas emission trends, weather files were generated for the years 2050 and 2080 and applied within the EnergyPlus simulation engine. To overcome the limitations of traditional modeling, which typically examines only a restricted number

فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد
دوره ۱، شماره ۲، بهار ۱۴۰۵
شاپا الکترونیکی: ۰۸۲۲-۳۱۳۴
https://ccae.ubonab.ac.ir

of cases, the Latin Hypercube statistical sampling method was employed. This sophisticated technique allowed for a comprehensive traversal of the design space by generating over 10,000 parametric scenarios.
The input variables within this extensive space encompassed decisive physical parameters such as the orientation of the building relative to geographic north, the thickness and thermal conductivity of envelope insulation, the window to wall ratio (WWR), and the depth of horizontal and vertical shading devices. In the final stage, to extract the complex and nonlinear relationships between these variables and building responses, four premier machine learning algorithms were tested and calibrated: linear regression (as a baseline), Random Forest, Support Vector Regression (SVR), and the powerful Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm. This approach facilitated the creation of a surrogate model capable of predicting building performance in a fraction of a second.

Results and Discussion

Statistical and mathematical analyses derived from data processing revealed that models based on ensemble learning exhibit significantly higher efficiency in analyzing building dynamics due to their tree-based structures and capacity to interpret complex interactions. Among these, the XGBoost algorithm demonstrated absolute superiority in computational precision, achieving a remarkable coefficient of determination (R2) of 0.998 for energy consumption forecasting and 0.995 for predicting discomfort hours. Such results indicate that the developed model can predict nearly all thermal behaviors of the building under diverse scenarios with minimal error. A pivotal component of this research involved feature importance analysis. The results disclosed that building orientation, with a weighting coefficient of approximately 0.5, plays the most critical role in thermal equilibrium. This finding suggests that within the future climate of Tabriz, even high-performance insulation materials cannot compensate for the errors stemming from improper building orientation. Following this, the thickness of the envelope insulation was ranked as the second most significant factor. Findings from Partial Dependence Plots (PDP) further illustrated the intensely nonlinear behavior of the building; specifically, minor adjustments in certain parameters, such as a few degrees of rotation, can trigger sudden and substantial fluctuations in cooling loads.
Furthermore, the investigation of variable interactions via contour plots and 3D response surfaces unveiled a compelling phenomenon characterized as the islanded optimal zone. These zones represent specific points within the design space where a delicate balance is established between energy reduction and occupant comfort. It is noteworthy that across many other regions of the design space, a clear trade-off was observed. For instance, attempts to minimize energy consumption by excessively increasing insulation directly resulted in heat entrapment within the structure, leading to a severe decline in thermal comfort during warm seasons. This discovery underscores the necessity of transitioning from one-dimensional design approaches toward multifaceted, engineered, multi-objective design strategies.

Conclusion

The detailed findings of this research substantiate the unavoidable reality that traditional and stereotypical design patterns in the cold climate of Tabriz will entirely lose their efficacy when confronted with the rigors of climate change across the 2050 and 2080 horizons. A significant escalation in the risk of overheating within office environments is observed, stemming from the synergy between high internal loads and rising ambient temperatures, which poses a substantial threat to occupant health and productivity.
Through the deployment of machine learning computational power, it was demonstrated that the impact of any physical modification on future building performance can be monitored with high precision, bypassing the protracted and costly processes associated with conventional simulations. Perhaps the most pivotal practical and economic contribution of this study is the scientific identification of the Law of Diminishing Returns regarding envelope insulation. The data indicated that increasing the thickness of thermal insulation is beneficial only up to a specific threshold. Beyond this point, no meaningful improvement in thermal comfort is achieved; instead, the

Journal of Cold Climate Architecture and Environment
Spring 2026 Vol 1 Issue 2
ISSN (Online): 3134-0822
https://ccae.ubonab.ac.ir

phenomenon of heat entrapment is exacerbated during summer months, resulting in energy degradation and the imposition of exorbitant, unnecessary costs during the construction phase.

Ultimately, as an operational strategy, a shift in the design paradigm for cold regions is proposed to architects, consulting engineers, and housing policymakers, moving from maximal insulation toward intelligent optimization. It is suggested that focus be directed toward the precise calibration of building orientation and the application of optimal insulation thicknesses. By leveraging the saddle points extracted from this research, the resilience of structures against the climatic crises of the twenty-first century may be ensured. This study serves as a departure point for utilizing big data to cultivate an architecture that is not only aesthetically robust but also fundamentally sustainable in the face of temporal shifts.

فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد
دوره ۱، شماره ۲، بهار ۱۴۰۵
شاپا الکترونیکی: ۰۸۲۲-۳۱۳۴
https://ccae.ubonab.ac.ir
وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه بناب



مقاله پژوهشی

ارزیابی هم‌زمان مصرف انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌های اداری تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده با بهره‌گیری از یادگیری ماشین(شهر تبریز)

زهرا رحمانی خرم[۱]؛ سینا الهیاری[۲]؛ آیدا ملکی[۳*]

۱- گروه معماری و شهرسازی، معماری و انرژی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، معماری و انرژی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.
۳- دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰
شماره صفحات: ۳۱-۱۹

برای مطالعه این مقاله کد زیر را اسکن کنید

واژه‌های کلیدی:
تغییرات اقلیمی، یادگیری ماشین، مصرف انرژی، آسایش حرارتی، تاب‌آوری ساختمان

چکیده

با تشدید تغییرات اقلیمی، الگوی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به‌ویژه در اقلیم‌های سرد و خشک دستخوش تحولات شده است. شهر تبریز به‌عنوان یکی از شهرهای سردسیر ایران، در دهه‌های آتی با افزایش تقاضای انرژی سرمایشی مواجه خواهد بود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هم‌زمان مصرف انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌های اداری تحت سناریوهای اقلیمی آینده و شناسایی پارامترهای کالبدی مؤثر بر تاب‌آوری حرارتی ساختمان انجام شده است. در این تحقیق، یک ساختمان اداری با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder مدل‌سازی و داده‌های اقلیمی آینده افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر اساس سناریوی RCP8.5 و از طریق نرم‌افزار Meteonorm 8 تولید و در شبیه‌سازی‌ها اعمال گردید. به‌منظور تحلیل پارامتریک گسترده، بیش از ۱۰۰۰۰ سناریو با ابزار jEPlus و روش نمونه‌برداری LHS تولید شد. با هدف کاهش بار محاسباتی و استخراج روابط غیرخطی میان متغیرها، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده گردید. شاخص‌های عملکرد شامل مصرف کل انرژی سالانه و ساعات عدم آسایش حرارتی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که الگوریتم XGBoost با ضرایب تعیین ۰/۹۹۸ برای مصرف انرژی و ۰/۹۹۵ برای ساعات عدم آسایش حرارتی بالاترین دقت پیش‌بینی را ارائه می‌دهد. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها بیانگر آن است که جهت‌گیری ساختمان و ضخامت عایق حرارتی پوسته (ازمیان متغیرهای بررسی‌شده) بیشترین تأثیر را دارند.

استناد: رحمانی خرم، زهرا؛ الهیاری، سینا؛ ملکی، آیدا. (۱۴۰۵). ارزیابی هم‌زمان مصرف انرژی و آسایش حرارتی ساختمان‌های اداری تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده با بهره‌گیری از یادگیری ماشین(شهر تبریز). *فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد*، ۱(۲)، صفحات: ۳۱-۱۹

DOI:

* نویسنده مسئول: آیدا ملکی، پست الکترونیکی: a.maleki@tabriziau.ac.ir، تلفن: ۰۴۱۳۵۵۴۱۸۱۲

۱- مقدمه

برآوردها حاکی از آن است که دگرگونی‌های اقلیمی و گرمایش جهانی، ساختار مصرف انرژی را در آینده دستخوش تحولات اساسی کرده و موجب جهش چشمگیری در میزان کل انرژی مصرفی خواهند شد. علت اصلی این پدیده آن است که شتابِ تقاضا برای سیستم‌های سرمایشی، بر روند کاهشیِ نیاز به گرمایش غلبه می‌کند (Bazazzadeh et al., 2021). در اروپا، صنعت ساختمان به دلیل سهم بالایی که در مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG) دارد، به محوری‌ترین بخش برای استراتژی‌های کربن‌زدایی بدل شده است (Chen et al., 2023). داده‌های آماری نشان می‌دهد که ساختمان‌ها بین ۳۹ تا ۴۲ درصد از مصرف نهایی انرژی را به خود اختصاص می‌دهند (El-Gohary & Amasyali, 2016). افزون بر این، این بخش سهم عمده‌ای در انتشار آلاینده‌ها داشته و عامل انتشار حدود ۳۵ تا ۳۹ درصد از دی‌اکسید کربن در سطح اتحادیه اروپا شناخته می‌شود (Crawford, 2022)؛ حتی در برخی نواحی، میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها از میانگین اروپایی نیز فراتر می‌رود (Pérez-Lombard et al., 2008). این حجم عظیم تقاضا برای انرژی ریشه در عوامل متعددی دارد؛ از جمله وجود بافت گسترده‌ای از ساختمان‌های قدیمی که به‌ویژه در مناطق شهری فاقد عایق‌بندی حرارتی استاندارد هستند، و همچنین تقاضای رو به رشدی که علی‌رغم وضع قوانین و مقررات حفاظتی و صرفه‌جویی، همچنان سیر صعودی خود را طی می‌کند (Buckley et al., 2021).

طبق یافته‌های ششمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم(IPCC AR6) ، دمای میانگین کره زمین در تمامی سناریوهای انتشار تا اواسط قرن حاضر به روند صعودی خود ادامه خواهد داد (Scott et al., 2015). بر اساس این گزارش، در سناریوی میانه(SSP2-4.5) ، افزایش دمای جهانی تا پایان قرن ۲۱ به احتمال زیاد بین ۲/۱ تا ۳/۵درجه سانتی‌گراد خواهد بود، در حالی که در صورت تداوم روند فعلی و تحقق سناریوی با انتشار بسیار بالا (SSP5-8.5) ، این افزایش می‌تواند به بازه ۳/۳ تا ۵/۷ درجه سانتی‌گراد برسد(IPCC, 2021) . این نوسانات دمایی مستقیماً به الگوهای جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای وابسته بوده و ضرورت بازنگری در راهبردهای تاب‌آوری محیط ساخته‌شده را دوچندان می‌کند (O’Neill et al., 2017).

تغییرات اقلیمی به‌طور قابل‌توجهی در حال تغییر دادن توازن میان تقاضای انرژی برای گرمایش و سرمایش در ساختمان‌ها است؛ امری که منجر به شکل‌گیری یک روند جهانی به سمت کاهش نیازهای گرمایشی و افزایش چشمگیر نیازهای سرمایشی در مناطق مختلف اقلیمی شده است (Ranson et al., 2014). این الگو بیانگر آن است که اگرچه تأثیر نهایی بر کل مصرف انرژی ممکن است در مناطق مختلف متفاوت باشد، اما تقاضا برای سرمایش در حال تبدیل شدن به یک مؤلفه غالب است (Bazazzadeh et al., 2021). استراتژی‌های انرژی در اتحادیه اروپا بر پایه اصل بهره‌وری بنا شده‌اند (Zgajewski, 2015) و در همین راستا، مقرراتی همچون دستورالعمل بهره‌وری انرژی (EED) و عملکرد انرژی ساختمان‌ها (EPBD) با هدف بهینه‌سازی مصرف در ابنیه و ترویج ساختمان‌های با تراز انرژی نزدیک به صفر (NZEBs) به تصویب رسیده‌اند (D’Agostino et al., 2017). اگرچه این چارچوب‌های قانونی عمدتاً در کشورهای توسعه‌یافته تدوین شده‌اند، اما ضرورت بومی‌سازی مفاد مشابه در اسناد بالادستی ایران، همچون مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، بیش از پیش احساس می‌شود تا راهکارهای سازگار با بافت کالبدی و توانمندی‌های داخلی تدوین گردد.

راهبرد اصلی جهت ارتقای پایداری کالبدی در برابر دگرگونی‌های اقلیمی، بر ترکیب متدهای طراحی غیرفعال، تجهیزات سرمایشی پربازده و مدیریت هوشمند انرژی متکی است (Zhang et al., 2021). در این میان، نکته حائز اهمیت این است که تقلیل مصرف انرژی نباید به قیمت تنزل کیفیت زیست داخلی تمام شود؛ از این رو، تحلیل "ساعات نارضایتی حرارتی" در کنار مؤلفه‌های انرژی مطرح می‌گردد تا توازن میان پایداری زیست‌محیطی و رفاه انسانی تضمین شود. در مقیاس منطقه‌ای، ایران به عنوان بخشی از خاورمیانه در یکی از بحرانی‌ترین کانون‌های تغییر اقلیم (Climate Change Hotspots) قرار دارد. یافته‌های اخیر بر گرمایش شتاب‌یافته در این منطقه تأکید داشته و نشان می‌دهد که نرخ افزایش دما در بخش‌های وسیعی از خاورمیانه و فلات ایران، تا دو برابر میانگین جهانی برآورد شده است. این روند صعودی که در برخی سناریوها افزایشی معادل ۲/۱ تا ۲/۹ درجه سانتی‌گراد را برای اواسط قرن پیش‌بینی می‌کند، لزوماً در پهنه جغرافیایی ایران یکنواخت نبوده و شدت آن در مناطق مرکزی و خشک به مراتب بیشتر از نواحی ساحلی است؛ امری که ضرورت تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمیِ

منطقه‌محور را دوچندان می‌سازد (Malik et al., 2024). با عنایت به این وضعیت بحرانی، کلان‌شهر تبریز به عنوان نمونه‌ای بارز از اقلیم سرد و نیمه‌خشک، با چالش‌های پیچیده‌ای در دهه‌های آتی روبرو خواهد بود. ساختمان‌های اداری این شهر که سنتاً بر پایه حفظ گرما بنا شده‌اند، در مواجهه با تغییرات اقلیمی افق ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، مستعد پدیده بیش‌گرمایش هستند. لذا، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلاء تحقیقاتی، به شبیه‌سازی یک ساختمان اداری در تبریز پرداخته و تأثیر سناریوهای اقلیمی را بر تقاضای انرژی و ساعات نارضایتی ساکنان واکاوی می‌کند تا کارآمدترین پارامترهای کالبدی برای ارتقای تاب‌آوری ساختمان معرفی شوند.

۲- چهارچوب نظری پژوهش

تشدید فشارهای دیپلماتیک و علمی در سطح بین‌المللی پیرامون بحران اقلیم، اهمیت مطالعه پیامدهای آن بر تقاضای انرژی در ابنیه و آسایش حرارتی کاربران را بیش از پیش نمایان کرده است(Delzendeh et al., 2017). این فوریت ریشه در تعاملات پیچیده میان دگرگونی‌های آب‌وهوایی، کالبد شهرها و زیست‌شناسی انسانی دارد (Aggarwal, 2020). از منظر تئوریک، تغییرات جوی با برهم زدن توازن میان مولفه‌های گرمایش و سرمایش، پارادایم مصرف انرژی در ساختمان را از حالت گرمایش‌محور به سمت سرمایش‌محور سوق می‌دهند (Li et al., 2020). این جابه‌جایی بار حرارتی که در ادبیات علمی به عنوان تغییر در تراز درجه-روزهای سرمایش و گرمایش شناخته می‌شود، به‌گونه‌ای است که حتی با تقلیل نیاز گرمایشی، جهش تقاضای سرمایشی تراز نهایی مصرف را مثبت کرده و منجر به افزایش کل انرژی مصرفی می‌گردد (Campagna & Fiorito, 2022).

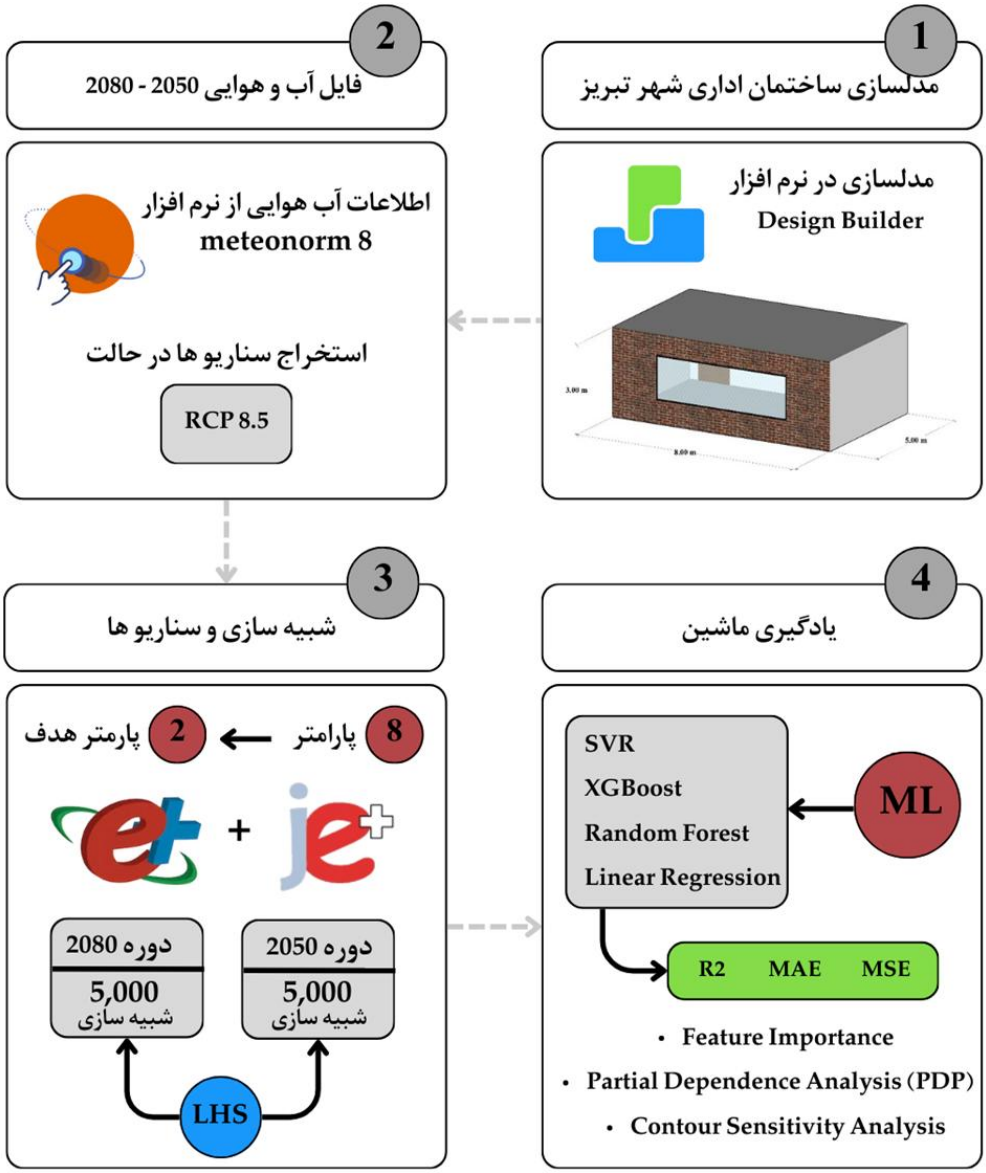
در این پژوهش، چارچوب ارزیابی رفاه ساکنان بر پایه مدل آسایش تطبیقی (Adaptive Comfort Model) استوار است. این نظریه بیان می‌کند که در ساختمان‌های با تهویه طبیعی یا نیمه‌مکانیکی، محدوده آسایش کاربران تابعی از دمای هوای آزاد محیط است. لذا، ساعات نارضایتی حرارتی نه به عنوان یک عدد ثابت، بلکه به عنوان انحراف از بازه دمایی پویا در سناریوهای اقلیمی آینده تعریف می‌شود. ارتقای بازده انرژی در ساختمان‌ها، هم از منظر پایداری اکولوژیک و هم از دیدگاه توجیه اقتصادی، یک اولویت استراتژیک به شمار می‌رود (Das et al., 2024). برای مدل‌سازی این پیچیدگی‌ها، چارچوب نظری حاضر بر پارادایم مدل‌سازی جایگزین (Surrogate Modelling) متکی است. محدودیت روش‌های مدل‌سازی کلاسیک و شبیه‌سازهای سنتی در تحلیل مجموعه‌داده‌های حجیم و متنوع، فضا را برای بهره‌گیری از هوش مصنوعی فراهم کرده است (Zhao & Magoulès, 2012). تئوری یادگیری ماشین (ML) در این تحقیق، به عنوان یک میانجی محاسباتی عمل می‌کند که قادر است روابط غیرخطی میان متغیرهای کالبدی و پاسخ‌های اقلیمی را استخراج نماید (Yao et al., 2022). این فناوری با تکیه بر فرآیندهای یادگیری تکرارشونده، دقت پیش‌بینی را در محیط‌های پویا افزایش می‌دهد (Ortiz-Suarez et al., 2025).

الگوریتم‌های ML با تکیه بر داده‌های گذشته‌نگر تقاضا و پارامترهای اتمسفری، قادر به ترسیم دقیق نیازهای آتی انرژی هستند (Forootan et al., 2022). مبنای روش‌شناختی این مطالعه بر "بهینه‌سازی چندهدفه" استوار است؛ جایی که اهداف متناقضی همچون کاهش مصرف انرژی و حفظ آسایش حرارتی باید به طور هم‌زمان تراز شوند. در همین راستا، مطالعات پیشین (Karimi et al., 2024)ثابت کرده‌اند که استفاده مدل‌های جایگزین مانند XGBoost در کنار الگوریتم‌های تکاملی نظیر NSGA-II، کارآمدترین مسیر برای کاهش بار محاسباتی در تحلیل‌های بلندمدت (افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) است. این چارچوب نظری اجازه می‌دهد تا نقش تعیین‌کننده پارامترهایی نظیر نسبت پنجره به دیوار (WWR) در تقابل میان صرفه‌جویی انرژی و ریسک بیش‌گرمایش داخلی به دقت واکاوی شود.

۳- مواد و روش تحقیق

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع مصرف انرژی و پایداری کالبدی در ساختمان‌های اداری تحت تأثیر تغییرات اقلیمی آتی تدوین شده است. برای دستیابی به این هدف، یک اتاق اداری به عنوان نمونه‌ای نماینده از فضاهای کاری کلان‌شهر تبریز جهت انجام تحلیل‌های دقیق انتخاب و مدل‌سازی گردید. شهر تبریز به دلیل ویژگی‌های اقلیمی خاص و نرخ گرمایش فزاینده، به عنوان کانون مورد مطالعه برگزیده شد.

در گام نخست، پلان معماری و مشخصات فنی این واحد اداری در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (DesignBuilder) ترسیم و پیکربندی شد. به منظور ارتقای دقت محاسبات و تحلیل اثرات بلندمدت گرمایش جهانی، داده‌های اقلیمی مربوط به افق‌های زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ از نرم افزار Meteonorm 8 مبتنی بر سناریوهای RCP8.5 تولید شده و در محیط شبیه‌سازی اعمال گشت. در این تحقیق، به جای اکتفا به روش‌های سنتی، از تلفیق شبیه‌سازی در موتور انرژی‌پلاس (EnergyPlus) و تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین (Machine Learning) بهره گرفته شده است. این رویکرد ترکیبی با هدف واکاوی دقیق تأثیر پارامترهای کالبدی بر سه شاخص کلیدی عملکردی شامل؛ مصرف انرژی سرمایشی، گرمایشی و ساعات نارضایتی ساکنان طراحی شده است. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این پژوهش، امکان تحلیل مجموعه‌داده‌های حجیم حاصل از شبیه‌سازی را با سرعت و دقت بالاتر فراهم آورده و استخراج الگوهای بهینه برای مقابله با پدیده بیش‌گرمایش در دهه‌های آتی را میسر می‌سازد. روند کلی مراحل تحقیق و ارتباط میان ابزارهای محاسباتی در شکل ۱ ارائه شده است.



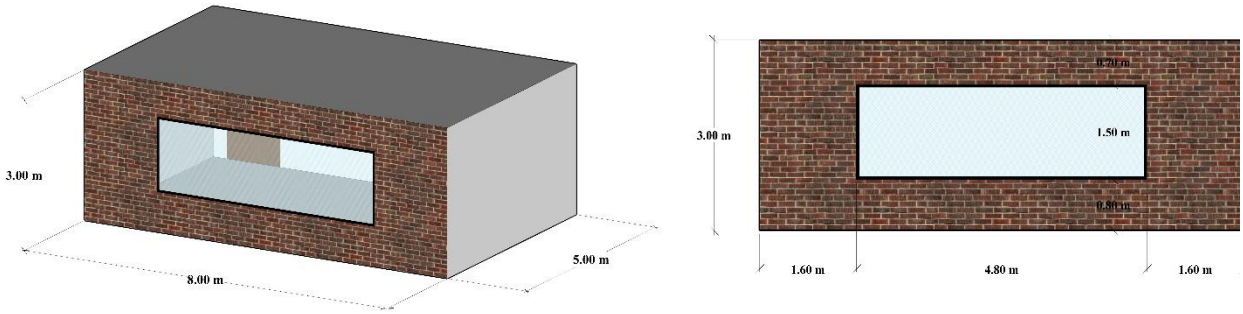
شکل ۱. روند کلی مراحل پژوهش.

۳-۱- شرایط آب و هوایی تبریز

تبریز، واقع در شمال غربی ایران، با اقلیم سرد و خشک و نوسانات حرارتی متمایز شناخته می‌شود؛ به طوری که میانگین دمای سالانه آن حدود ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد است (EnergyPlus. Weather Data Sources., 2019). زمستان‌های این شهر بسیار سخت و سرد بوده و کمترین دما در ژانویه (۲/۸- درجه سانتی‌گراد) ثبت می‌گردد، در حالی که تابستان‌ها با روزهای آفتابی و گرم همراه است (Ahadi , ۲۰۱۴). بر پایه داده‌های هواشناسی، الگوی دمایی منطقه حاکی از دوره گرمایش طولانی (نه ماه) در مقابل تقاضای سرمایشی کوتاه (دو ماه) است که بر ضرورت اولویت‌بخشی به استراتژی‌های طراحی غیرفعال تأکید دارد (Heydari & Movaghari, 2025). فراوانی تابش خورشیدی، که بیشینه آن در ژوئن به ۱۶۶ وات بر متر مربع می‌رسد، در کنار رطوبت نسبی پایین و وزش بادهای جنوب غربی در فصول گرم، ویژگی‌های بارز اتمسفری این کلان‌شهر محسوب می‌شوند . در نهایت، سرعت باد در فصول سرد (تقریباً ۳/۰۹ متر بر ثانیه) شرایط جوی دشواری را در بافت شهری تبریز ایجاد می‌کند که لزوم ملاحظات اقلیمی در طراحی ابنیه را دوچندان می‌سازد.

۳-۲- مدلسازی ساختمان اداری

در پژوهش حاضر، مبنای تحلیل‌های انرژی بر پایه یک الگوی ساختمان اداری مرجع بنا شده است که ویژگی‌های کالبدی آن منطبق بر مطالعات عابدینی و همکاران (Abedini et al., 2025)است. فرآیند مدل‌سازی سه‌بعدی و ارزیابی‌های دینامیک انرژی در محیط نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (DesignBuilder) پیاده‌سازی گردید. واحد نمونه برگزیده جهت شبیه‌سازی، فضایی اداری به ابعاد ۸ متر طول و ۵ متر عرض و ارتفاع ۳ متر است که به عنوان سلول پایه تحقیق در نظر گرفته شد. جهت‌گیری این فضا رو به جنوب بوده و از یک بازشوی دوجداره بهره می‌برد که نسبت پنجره به دیوار در آن برابر با ۴۵ درصد برآورد می‌گردد. مشخصات بصری و جزئیات هندسی این مورد مطالعاتی در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲. نمایش سه‌بعدی مدل هندسی ایجاد شده در DesignBuilder.

۳-۳- چارچوب شبیه‌سازی

مدل‌سازی حرارتی فضای اداری با هدف تحلیل دقیق رفتار ترموفیزیکی پوسته و تبادلات انرژی در شرایط دینامیک انجام شده است. برای ایزوله‌سازی حرارتی زون مورد مطالعه و تمرکز بر عملکرد جدارهای نورگذر، تمامی سطوح مشترک با فضاهای مجاور (سقف، کف و دیوارهای جانبی) با شرایط مرزی آدیاباتیک (ناپیوستگی انتقال حرارت) پیکربندی شدند. در مقابل، جبهه جنوبی به‌عنوان تنها سطح دیاباتیک و فعال از نظر حرارتی لحاظ گردید تا برهم‌کنش‌های تابشی و هدایتی با محیط خارج را به‌طور کامل بازنمایی کند. محاسبات بر پایه الگوریتم‌های موازنه انرژی در سطوح داخلی و خارجی و با در نظر گرفتن اثرات ذخیره حرارتی توده ساختمان صورت گرفته است. مشخصات فنی لایه‌های تشکیل‌دهنده پوسته، شامل ضریب انتقال حرارت کلی (U-value)، ضریب جذب تابشی و ظرفیت گرمایی مصالح، مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی تنظیم شده و جزئیات دقیق متغیرهای ترموفیزیکی هر لایه برای استناد فنی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، پارامترهای مربوط به بارهای داخلی، از جمله نرخ نفوذ هوا و بارهای گرمایی، بر اساس الگوهای عملکردی فضاهای اداری در مدل لحاظ گردیده‌اند.

جدول ۱. مشخصات حرارتی مواد مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی.

بخش	ضخامت (m)	ضریب هدایت حرارتی (W/m-k)	گرمای ویژه (J/kg-K)	چگالی (kg/m3)
دیوار خارجی				
آجر	۰/۲۰	۰/۳۹	۸۴۰	۸۶۶/۶۷
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
عایق حرارتی	{۰/۰۲ ،۰/۰۳، ... ،۰/۱۰}	{۰/۰۳ ،۰/۰۳۱، ... ،۰/۰۴۵}	۱۲۰۰	۳۰
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
دیوار داخلی				
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
آجر	۰/۰۳	۰/۳۹	۸۴۰	۸۶۶/۶۷
عایق حرارتی	{۰/۰۲ ،۰/۰۳، ... ،۰/۱۰}	{۰/۰۳ ،۰/۰۳۱، ... ،۰/۰۴۵}	۱۲۰۰	۳۰
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
کف				
سرامیک	۰/۰۱	۱/۳۰	۸۴۰	۲۳۰۰
بتن	۰/۱۵	۱/۰۶	۱۰۰۰	۲۰۰۰

عایق حرارتی	{۰/۱۰، ... ،۰/۰۳، ۰/۰۲}	{۰/۰۴۵، ... ،۰/۰۳۱، ۰/۰۳}	۱۲۰۰	۳۰
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
بام				
آسفالت	۰/۰۳	۰/۷۰	۱۰۰۰	۲۱۰۰
عایق حرارتی	{۰/۱۰، ... ،۰/۰۳، ۰/۰۲}	{۰/۰۴۵، ... ،۰/۰۳۱، ۰/۰۳}	۱۲۰۰	۳۰
بتن	۰/۲۰	۱/۰۶	۱۰۰۰	۲۰۰۰
اندود گچ	۰/۰۲۵	۰/۷۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰
شیشه پنجره				
شیشه شفاف	۰/۰۰۶	۱/۰۰	۱۰۹۰	۸۰۰
گاز (هوا)	۰/۰۱۲	۰/۰۲۶	۱۰۰۵	۱/۲
شیشه شفاف	۰/۰۰۶	۱/۰۰	۱۰۹۰	۸۰۰

در مرحله نهایی، جهت دستیابی به یک ارزیابی نظام‌مند، فرآیند شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار jEPlus پیاده‌سازی گردید. بهره‌گیری از این ابزار، امکان اجرای تحلیل‌های پارامتریک را از طریق تولید خودکار مجموعه‌ای گسترده از سناریوها و تغییر هم‌زمان متغیرهای محوری فراهم آورد. بازه تغییرات جهت‌گیری ساختمان بین ۰ (شمالی) تا ۱۸۰ درجه (جنوبی) در نظر گرفته شده است. علت انتخاب این بازه، تقارن هندسی ساختمان اداری نمونه است؛ چرا که در ساختمان‌های با پلان متقارن، چرخش ۱۸۰ درجه‌ای تمامی ترکیبات منحصربه‌فرد مواجهه جبهه‌های ساختمان با تابش خورشیدی و الگوهای سایه‌اندازی را پوشش داده و از تولید داده‌های هم‌پوشان جلوگیری می‌کند. پارامترهای معماری اصلی مدل پایه، که مبنای تمامی شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های بعدی را تشکیل می‌دهند، در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات پارامترهای ورودی و محدوده مقادیر.

پارامتر ها (واحد)	محدوده ها	بازه
ضخامت عایق حرارتی (m)	{۰/۱۰، ۰/۰۲}	۰/۰۱
ضریب هدایت حرارتی عایق (W/m.k)	{۰/۰۴۵، ۰/۰۳}	۰/۰۰۱
جهت‌گیری ساختمان (deg)	{۰، ۱۸۰}	۱۰
عمق سایه‌بان افقی (m)	{۰/۲، ۱}	۰/۱۰
عمق سایه‌بان عمودی (m)	{۰/۲، ۱}	۰/۱۰
عرض پنجره (m)	{۱، ۴/۵}	۰/۵۰
ارتفاع پنجره (m)	{۱، ۲}	۰/۲۰
ضخامت شیشه (m)	{۰/۰۰۶، ۰/۰۱۲}	۰/۰۰۲
مجموع سناریوها	۴۲،۵۵۰،۲۷۲	

٤-۳- اهداف بهینه‌سازی

در پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد ساختمان بر پایه دو محور اصلی تقاضای انرژی و رفاه ساکنان تدوین شده است تا فرآیند تحلیل پارامتریک واحد اداری را هدایت کنند. اولویت نخست، تقلیل بارهای سالانه گرمایش و سرمایش است که به عنوان متغیرهای کلیدی در ارتقای بازده انرژی ساختمان تلقی می‌شوند. هدف دوم، به حداقل رساندن مجموع ساعات نارضایتی حرارتی است. با توجه به تضادهای فیزیکی میان کاهش مصرف انرژی و حفظ آسایش، در این مطالعه از قابلیت مدل‌سازی غیرخطی الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده است تا هم‌بستگی و تأثیر متغیرهای طراحی بر هر دو هدف به‌طور هم‌زمان شناسایی شود. این رویکرد اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های زمان‌بر، نقاط توازن (Trade-off) میان بهره‌وری ساختمان و رفاه کاربران در فضای طراحی گسترده شناسایی و تحلیل گردند.

۳-۵- تولید و آماده سازی داده

در این پژوهش، داده‌های مورد استفاده از شبیه‌سازی انرژی یک ساختمان اداری نمونه در نرم‌افزار EnergyPlus استخراج شده‌اند. فرآیند تولید داده شامل دو سطح مجزا است که عبارت هستند از سناریوهای اقلیمی که شامل دو افق زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر اساس سناریوی RCP 8.5 است و نمونه‌های طراحی (Samples) که شامل ۵۰۰۰ ترکیب مختلف از متغیرهای کالبدی (مانند ضخامت عایق، نسبت پنجره و غیره) است که برای هر سناریوی اقلیمی به روش نمونه‌برداری Latin Hypercube Sampling (LHS) تولید شده‌اند. در مجموع، با اجرای ۵۰۰۰ شبیه‌سازی برای هر یک از ۲ سناریوی اقلیمی، مجموعه‌داده‌ای بالغ بر ۱۰،۰۰۰ نمونه (Data points) برای آموزش و ارزیابی الگوریتم‌های یادگیری ماشین ایجاد گردید.
متغیرهای ورودی شامل پارامترهای اصلی طراحی و فیزیکی ساختمان بوده‌اند که اثرگذاری مستقیم بر عملکرد انرژی و آسایش حرارتی دارند. این پارامترها شامل ضخامت عایق حرارتی، ضریب هدایت حرارتی عایق، ابعاد پنجره، عمق سایبان افقی و عمودی، جهت‌گیری ساختمان، و ضخامت شیشه پنجره هستند. متغیر اقلیمی نیز به‌صورت یک متغیر طبقه‌ای برای تفکیک سناریوهای سال ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ در نظر گرفته شد. خروجی‌های شبیه‌سازی شامل مصرف کل انرژی سالانه ساختمان (مجموع گرمایش و سرمایش) و تعداد ساعات نارضایتی حرارتی سالانه بوده‌اند که به‌عنوان شاخص‌های اصلی ارزیابی عملکرد ساختمان انتخاب شدند. در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، متغیر اقلیمی به‌صورت عددی کدگذاری شد تا امکان استفاده از آن در الگوریتم‌های یادگیری ماشین فراهم شود. سپس داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند تا ارزیابی مدل‌ها بر اساس داده‌های دیده‌نشده انجام گیرد. همچنین، به‌منظور جلوگیری از غلبه مقیاس برخی متغیرها بر فرآیند آموزش، نرمال‌سازی داده‌های ورودی با استفاده از روش استانداردسازی انجام شد.

۳-٦- انتخاب الگوریتم های یادگیری ماشین (ML)

با توجه به ماهیت غیرخطی و چندبعدی مسئله و همچنین وجود دو خروجی پیوسته، از رویکرد رگرسیون چندخروجی در چارچوب یادگیری ماشین نظارت‌شده استفاده شد. به‌منظور دستیابی به مقایسه‌ای جامع و قابل اتکا، چهار الگوریتم با سطوح پیچیدگی متفاوت انتخاب شدند. Linear Regression به‌عنوان یک مدل پایه و مرجع در نظر گرفته شد تا امکان ارزیابی میزان بهبود مدل‌های پیشرفته‌تر فراهم گردد. الگوریتم Random Forest به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی و مقاومت نسبی در برابر بیش‌برازش انتخاب شد. الگوریتم Support Vector Regression نیز به‌عنوان یکی از روش‌های متداول و قدرتمند در مسائل رگرسیونی با داده‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفت (Islam et al., 2024). در نهایت، الگوریتم XGBoost به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم و تقویت گرادیانی انتخاب شد. این الگوریتم به دلیل دقت بالا، کارایی محاسباتی مناسب و قابلیت مدیریت روابط غیرخطی پیچیده در مطالعات اخیر حوزه انرژی ساختمان کاربرد گسترده‌ای داشته است (Nguyen et al., 2023). استفاده از ساختار چندخروجی برای تمامی الگوریتم‌ها این امکان را فراهم ساخت تا وابستگی بالقوه میان مصرف انرژی و ساعات نارضایتی حرارتی در فرآیند آموزش مدل لحاظ شود.

۳-۷- آموزش مدل‌ها و معیارهای ارزیابی

مدل‌های منتخب با استفاده از داده‌های آموزشی، آموزش داده شدند و عملکرد آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمون ارزیابی شد. به‌منظور ارزیابی جامع و بی‌طرفانه، از چند شاخص آماری متداول در مطالعات رگرسیونی استفاده گردید. ضریب تعیین (R2) برای سنجش توانایی مدل در توضیح واریانس داده‌ها، خطای قدرمطلق میانگین (MAE) برای ارزیابی میزان خطای متوسط پیش‌بینی و خطای مربعات میانگین (MSE) برای بررسی حساسیت مدل نسبت به خطاهای بزرگ‌تر به کار گرفته شد (Elhabyb et al., 2024). این معیارها به‌صورت جداگانه برای هر یک از خروجی‌ها محاسبه شدند تا عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی مصرف انرژی و آسایش حرارتی به‌طور مستقل قابل بررسی باشد.

٤- بحث و یافته‌های تحقیق

٤-١- ارزیابی کلی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین

در این بخش، کارایی چهار الگوریتم رگرسیون خطی (Linear Regression)، جنگل تصادفی (Random Forest)، ماشین بردار پشتیبان (SVR) و تقویت گرادیان شدید (XGBoost) در پیش‌بینی همزمان مجموع انرژی مصرفی و ساعات عدم آسایش مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی، مدل‌های مبتنی بر یادگیری جمعی (Ensemble Learning) عملکرد به‌مراتب برتری نسبت به مدل‌های کلاسیک نشان دادند. .مطابق با داده‌های خروجی، مدل XGBoost با کسب ضریب تبیین (R2) معادل ۰/۹۹۸ برای بخش انرژی و ۰/۹۹۵ برای ساعات عدم آسایش، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه داده است. پس از آن، مدل Random Forest با نتایجی بسیار نزدیک در رتبه دوم قرار دارد. این در حالی است که مدل‌های SVR و رگرسیون خطی با افت محسوس دقت، به ترتیب در محدوده R2 بین ۰/۶۴ تا ۰/۸۱ عمل کرده‌اند که نشان‌دهنده پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط بین پارامترهای طراحی ساختمان و خروجی‌های انرژی است که جزئیات عددی مربوط به این مقایسه آماری و مقادیر خطای هر مدل به‌تفصیل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه آماری معیارهای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی انرژی و آسایش.

Model	R2 Energy	R2 Discomfort	MAE Energy	MAE Discomfort	MSE Energy	MSE Discomfort
Linear Regression	۰/۶۸۴۲۹۱	۰/۶۷۵۳۱۶	۱۱۱/۰۸۳۰۱۷	۳۷/۸۹۱۹۱۳	۱۹۱۲۱/۸۹۳۴۶۰	۲۲۱۹/۶۰۰۱۰۴
Random Forest	۰/۹۸۴۷۳۱	۰/۹۸۵۲۴۰	۲۲/۹۷۶۱۵۰	۶/۸۷۱۵۲۰	۹۲۴/۸۳۶۹۵۰	۱۰۰/۹۰۰۶۷۳
SVR	۰/۶۴۱۲۶۵	۰/۸۱۷۵۰۸	۱۱۵/۴۵۶۴۷۷	۲۳/۳۹۴۱۴۶	۲۱۷۲۷/۸۹۶۴۵۱	۱۲۴۷/۵۴۷۸۶۸
XGBoost	۰/۹۹۸۰۲۱	۰/۹۹۵۴۲۲	۸/۲۸۸۷۲۷	۴/۰۴۱۰۲۴	۱۱۹/۸۹۲۷۰۱	۳۱/۲۹۵۸۳۸

مشاهده می‌شود که در الگوریتم SVR، دقت پیش‌بینی برای ساعات نارضایتی با R2 برابر با ۰/۶۴ به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مصرف انرژی با R2 برابر با ۰/۸۱ است. این امر را می‌توان به پیچیدگی بالاتر تابع هدف در مصرف انرژی نسبت داد؛ چرا که کل انرژی مصرفی حاصل برهم‌کنش هم‌زمان بارهای گرمایشی و سرمایشی است که گاهی روندهای متضادی نسبت به متغیرهای ورودی دارند. در حالی که ساعات نارضایتی حرارتی توزیع همگراتری داشته و هم‌بستگی قوی‌تری با پارامترهای کالبدی کلیدی نشان می‌دهد، که این موضوع باعث می‌شود نگاشت (Mapping) آن توسط الگوریتم SVR با دقت بالاتری صورت گیرد.

٤-٢- تحلیل دقت مدل بهینه و نتایج حاصل از بهینه‌سازی فراپارامترها

پس از انتخاب مدل XGBoost به عنوان مدل برتر، فرایند تنظیم فراپارامترها با استفاده از روش جستجوی شبکه‌ای (GridSearchCV) انجام شد تا کمترین میزان خطا حاصل شود. نتایج نهایی نشان‌دهنده دقت فوق‌العاده مدل در داده‌های تست است. میانگین خطای مطلق (MAE) برای پیش‌بینی مجموع انرژی مصرفی به عدد ۷/۴۹ کیلووات ساعت رسیده است که با توجه به میانگین مقادیر، خطایی بسیار ناچیز تلقی می‌شود. همچنین در بخش ساعات عدم آسایش، مدل توانسته است با میانگین خطای مطلق ۳/۹۹ ساعت، پیش‌بینی‌های بسیار قابل اعتمادی ارائه دهد. این سطح از دقت که در مقادیر MSE (به ترتیب ۱۰۱/۳۳ و ۳۰/۸۳) نیز مشهود است، تایید می‌کند که مدل توسعه داده شده ابزاری قدرتمند برای جایگزینی با شبیه‌سازی های زمان‌بر دینامیک حرارتی در فازهای اولیه طراحی معماری است. ارزیابی آماری پیش‌بینی‌های مدل XGBoost بر روی داده‌های آزمون، که در جدول ۴ خلاصه شده است، نشان‌دهنده دقت فوق‌العاده و خطای ناچیز این الگوریتم در تخمین هر دو متغیر هدف است.

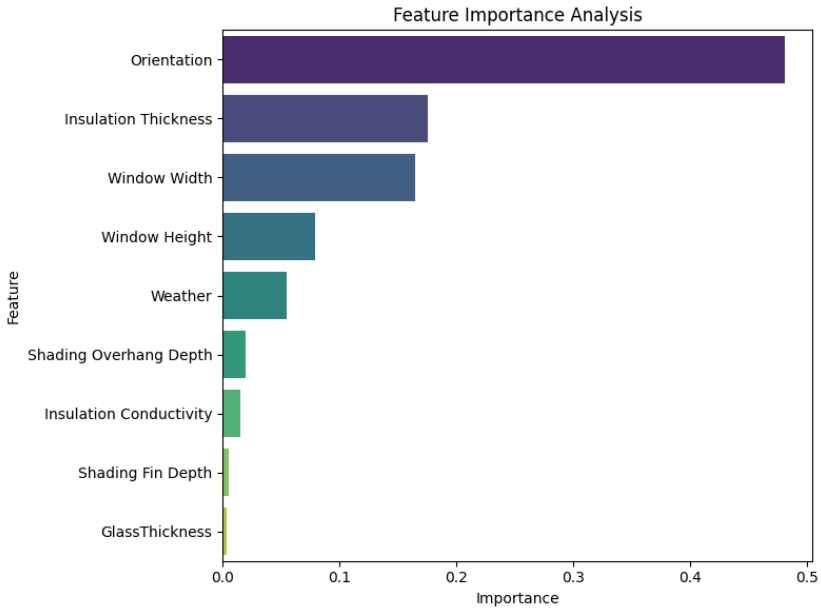
جدول ۴. ارزیابی آماری پیش‌بینی‌های مدلXGBoost .

خروجی‌ها	MSE	MAE	R2

مجموع مصرف انرژی (kWh)	۱۰۱/۳۳۳۹۷۱	۷/۴۹۷۰۳۹	۰/۹۹۸۳۲۷
ساعات عدم آسایش (hr)	۳۰/۸۳۷۱۷۰	۳/۹۹۹۶۷۲	۰/۹۹۵۴۸۹

۳-٤- تحلیل اهمیت ویژگی‌ها (Feature Importance) در عملکرد ساختمان

به‌منظور درک دقیق‌تر رفتار حرارتی و عملکرد انرژی ساختمان تحت سناریوهای اقلیمی آینده در تبریز، تحلیل اهمیت ویژگی‌ها (Feature Importance) بر روی مدل برتر انجام گرفت. نتایج این تحلیل که در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است، رتبه‌بندی پارامترهای کالبدی را بر اساس «امتیاز اهمیت نرمال‌سازی شده» نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌های نمودار، پارامتر جهت‌گیری ساختمان (Orientation) با کسب امتیاز نزدیک به ۰/۵، به عنوان حیاتی‌ترین عامل در تعیین هم‌زمان بار انرژی و آسایش حرارتی شناسایی شد. غلبه معنادار جهت‌گیری نسبت به سایر عوامل (مانند ضخامت عایق و WWR) که در اقلیم‌های سرد کمتر مورد انتظار است، ناشی از تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم و افزایش پتانسیل "بیش‌گرمایش" (Overheating) در افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ است. در ساختمان‌های اداری که با بارهای داخلی قابل‌توجهی روبرو هستند، جهت‌گیری ساختمان تعیین‌کننده اصلی میزان و زمان دریافت تابش خورشیدی است که مستقیماً بر توازن میان بارهای گرمایشی و سرمایشی تاثیر می‌گذارد. پس از جهت‌گیری، ضخامت عایق حرارتی پوسته در رتبه دوم اهمیت قرار دارد که نقش کلیدی در حفظ پایداری حرارتی در فصول سرد ایفا می‌کند. پارامترهای هندسی پنجره (عرض و ارتفاع) در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند، در حالی که کمترین میزان تاثیر مربوط به ضخامت شیشه و عمق سایه‌بان‌های عمودی است. این نتایج بر این امر صِحّه می‌گذارد که در طراحی تاب‌آور ساختمان‌های اداری تبریز برای دهه‌های آینده، استراتژی‌های غیرفعال (Passive) با اولویتِ اصلاح جهت‌گیری و سپس بهبود ویژگی‌های عایق‌بندی پوسته، بیشترین بازدهی را خواهند داشت.



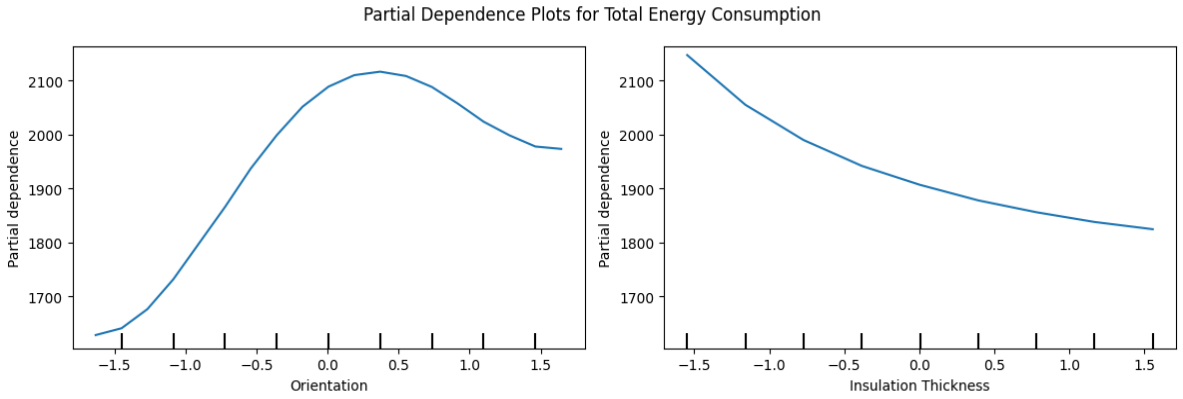
شکل ۳. رتبه‌بندی اهمیت متغیرهای طراحی بر خروجی‌های مدل بر اساس امتیاز اهمیت نرمال‌شده.

٤-٤- تحلیل رفتار غیرخطی و وابستگی جزئی (Partial Dependence Analysis)

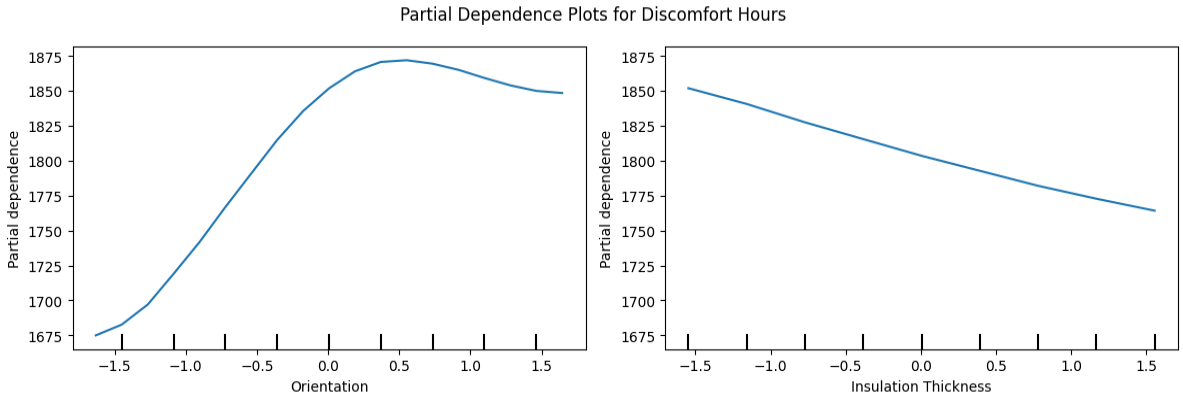
به منظور عبور از تحلیل‌های خطی ساده و درک عمیق‌تر دینامیک ساختمان، از نمودارهای وابستگی جزئی (PDP) برای دو ویژگی تأثیرگذار جهت‌گیری و ضخامت عایق استفاده شد که در شکل ۴ آمده است. این تحلیل نشان می‌دهد که مدل یادگیری ماشین چگونه به تغییرات یک متغیر واکنش نشان می‌دهد، در حالی که اثر سایر متغیرها خنثی شده است. در نمودار مربوط به مصرف انرژی کل (Total Energy)، محور عمودی تغییرات مصرف را در بازه‌ای وسیع (تقریباً از ۱۷۰۰ تا بیش از ۲۱۰۰ کیلووات ساعت) نشان می‌دهد. منحنی حاصل، رفتاری کاملاً غیرخطی دارد؛ به این معنا که انحراف از جهت‌گیری بهینه، منجر

به افزایش ناگهانی و شدید در مصرف انرژی می‌شود. این شیب تند بیانگر آن است که ساختمان در برابر چرخش‌های نادرست بسیار حساس است و جهت‌گیری یک پارامتر با ریسک بالا محسوب می‌شود.

در مقابل، نمودار ساعات عدم آسایش (Discomfort Hours) رفتاری متفاوت را به تصویر می‌کشد. مقادیر پیش‌بینی شده در محور عمودی بین ۱۶۷۵ تا ۱۸۷۵ ساعت نوسان دارند. نکته تحلیلی مهم در نمودار ضخامت عایق (Insulation Thickness) این است که با افزایش ضخامت، نمودار به یک ناحیه مسطح (Plateau) می‌رسد. این پدیده نشان‌دهنده قانون بازده نزولی است؛ به عبارتی، افزایش ضخامت عایق بیش از یک حد مشخص، تأثیر معناداری بر کاهش ساعات عدم آسایش ندارد و صرفاً هزینه‌های ساخت را افزایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

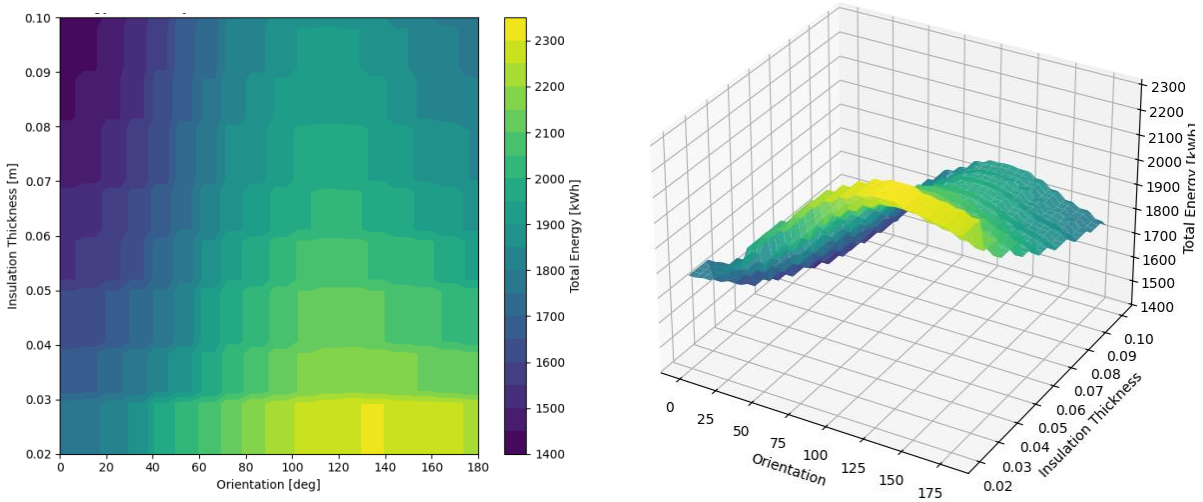
شکل۴. تحلیل وابستگی جزئی پارامترهای کلیدی طراحی ساختمان.

(الف): تحلیل وابستگی جزئی مصرف انرژی کل نسبت به جهت‌گیری ساختمان و ضخامت عایق حرارتی. (ب): تحلیل وابستگی جزئی ساعات عدم آسایش نسبت به جهت‌گیری ساختمان و ضخاکت عایق حرارتی.

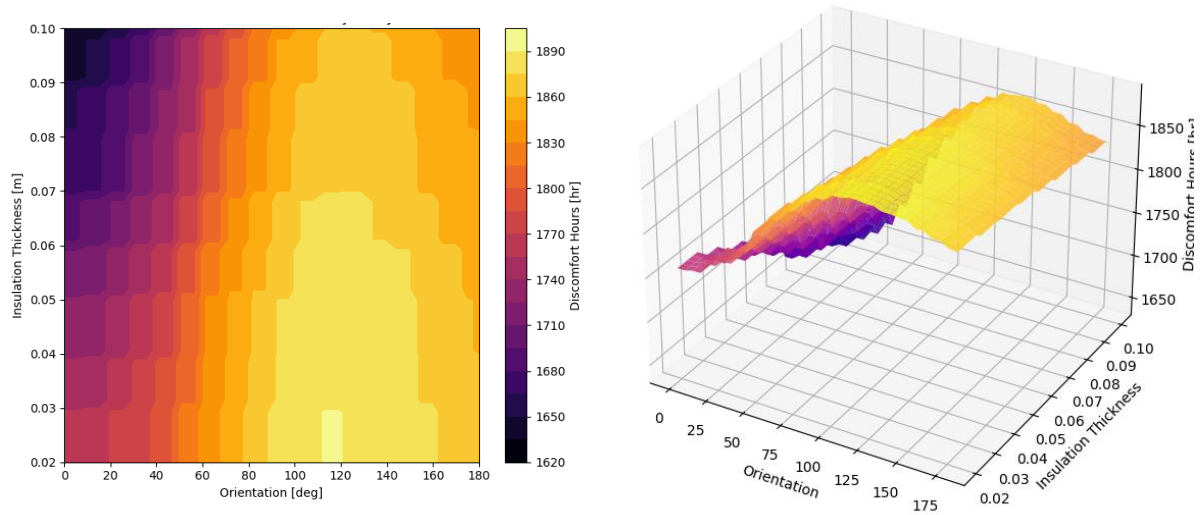
۵-٤- تحلیل حساسیت متقابل و سطوح پاسخ (Contour Sensitivity Analysis)

برای بررسی همزمان اثرات متقابل (Interaction Effects) بین جهت‌گیری و عایق‌کاری، نمودارهای کانتور و سطوح پاسخ سه‌بعدی ترسیم گردیدند که در شکل ۵ آمده است. این تحلیل پیچیدگی فضای طراحی را آشکار می‌سازد. در نمودار کانتور انرژی (با طیف رنگی Viridis)، نواحی تیره رنگ نشان‌دهنده کمینه مصرف انرژی هستند. توزیع رنگ‌ها نشان می‌دهد که یک رابطه خطی ساده وجود ندارد؛ بلکه یک "ناحیه بهینه جزیره‌ای" وجود دارد که در آن ترکیبی خاص از جهت‌گیری (نزدیک به ۰ تا ۲۰ درجه) و ضخامت عایق، مصرف را به حداقل می‌رساند. نمودار سه‌بعدی انرژی نیز تأیید می‌کند که سطح پاسخ دارای دره و قله‌های مشخصی است که حرکت روی آن‌ها نیازمند دقت بالا در طراحی است.

در سوی دیگر، نمودار کانتور عدم آسایش (با طیف رنگی Inferno/Plasma) الگوی متفاوتی را نمایش می‌دهد. عدم انطباق کامل نواحی بهینه در دو نمودار انرژی و آسایش، بیانگر وجود یک تضاد (Trade-off) در اهداف طراحی است. تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که طراح نمی‌تواند صرفاً با بیشینه کردن عایق‌کاری به بهترین نتیجه برسد، بلکه باید نقطه‌ای تعادلی (Saddle Point) را بیابد که در آن، ضمن حفظ مصرف انرژی در سطوح پایین (نواحی سبز و آبی در نمودار اول)، ساعات عدم آسایش نیز در محدوده قابل قبول (نواحی تیره در نمودار دوم) باقی بماند.



(الف)



(ب)

شکل۵. تحلیل اثرات متقابل جهت‌گیری و عایق‌کاری بر انرژی و آسایش.

(الف): کانتور و سطح پاسخ سه‌بعدی مصرف انرژی کل. (ب): کانتور و سطح پاسخ سه‌بعدی ساعات عدم آسایش.

٦-٤- ارزیابی تاب‌آوری اقلیمی و سناریوهای ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ (Future Climate Scenarios)

در این بخش، قابلیت اطمینان طراحی پیشنهادی در برابر تغییرات اقلیمی آینده با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ شهر تبریز مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. برای استخراج سناریوهای بهینه، یک فیلتر سخت‌گیرانه اعمال شد که تنها ۱۰ درصد برتر داده‌ها (Quantile 0.1) را که دارای کمترین مصرف انرژی و کمترین ساعات عدم آسایش بودند، جداسازی کرد. تحلیل مقایسه‌ای بین دو سناریوی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر اساس جدول نهایی (جدول ۵) نتایج قابل تأملی را نشان می‌دهد.

برای حفظ کارایی در آینده، مدل پیشنهاد می‌دهد که عرض پنجره (Window Width) در محدوده میانگین ۳/۰۶ تا ۳/۲۱ متر و ارتفاع آن حدود ۱/۴۶ تا ۱/۵۲ متر باشد. کاهش جزئی در عرض پیشنهادی برای سال ۲۰۸۰ (۳/۰۶متر) نسبت به سال ۲۰۵۰ (۳/۲۱ متر) می‌تواند پاسخی هوشمندانه به گرمایش جهانی باشد تا از ورود حرارت بیش از حد خورشیدی در سال‌های گرم‌تر آینده جلوگیری شود.

میانگین ضخامت عایق بهینه (Insulation Thickness) برای هر دو سناریو بسیار نزدیک و در بازه ۰/۰۸۱ تا ۰/۰۸۳ متر (حدود ۸ سانتی‌متر) برآورد شده است. ثبات این عدد در طول زمان نشان می‌دهد که ضخامت ۸ سانتی‌متر یک استراتژی پایدار (Robust) برای مقابله با تغییرات دمایی در دهه‌های آینده است.

جهت‌گیری بهینه (Orientation) در هر دو سناریو انحراف بسیار کمی دارد (میانگین ۸/۱۵ تا ۸/۲۴ درجه). این امر تأیید می کند که جهت‌گیری جنوبی با اندکی چرخش به سمت شرق یا غرب، همچنان بهترین راهکار برای جذب غیرفعال خورشیدی در زمستان‌های تبریز و دفع حرارت در تابستان‌های آینده خواهد بود.

با اعمال این پارامترها، مدل پیش‌بینی می‌کند که می‌توان مصرف انرژی را در محدوده بهینه ۱۳۸۶ تا ۱۶۵۸ کیلووات ساعت نگه داشت. با این حال، ساعات عدم آسایش (۱۴۹۶ تا ۱۷۰۱ ساعت) حتی در حالت بهینه نیز همچنان قابل توجه است ، که لزوم استفاده از سیستم‌های فعال یا راهکارهای غیرفعال تکمیلی (مانند سایه‌بان‌های متحرک که در داده‌ها بررسی شده‌اند) را برای سال ۲۰۸۰ برجسته می‌کند.

این تحلیل ثابت می‌کند که الگوریتم XGBoost نه تنها وضعیت فعلی را به خوبی مدل‌سازی کرده، بلکه توانسته است راهکارهای طراحی تطبیق‌پذیر (Adaptive Design Solutions) را برای مقابله با گرمایش اقلیمی آینده ارائه دهد.

جدول ۵. مقایسه پارامترهای طراحی بهینه و شاخص‌های عملکردی دو سناریوی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰.

	۲۰۸۰			۲۰۵۰		
پارامتر ها	**Max**	**Mean**	**Min**	**Max**	**Mean**	**Min**
ضخامت عایق حرارتی (m)	۰/۱	۰/۰۸۳۱۵۸	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۸۱۱۹۵	۰/۰۴
ضریب هدایت حرارتی عایق (W/m.k)	۰/۰۴۵	۰/۰۳۶۳۷۹	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۰/۰۳۶۶۲۹	۰/۰۳
جهت‌گیری ساختمان (deg)	۴/۵	۳/۰۳۱۵۸	۱	۴/۵	۳/۲۰۹۱۶۳	۱
عمق سایه‌بان افقی (m)	۲	۱/۴۶۲۱۰۵	۱	۲	۱/۵۱۹۵۲۲	۱
عمق سایه‌بان عمودی (m)	۱	۰/۶۱۸۹۴۷	۰/۲	۱	۰/۶۰۷۹۶۸	۰/۲
عرض پنجره (m)	۱	۰/۵۳۵۷۸۹	۰/۲	۱	۰/۵۴۲۲۱۳	۰/۲
ارتفاع پنجره (m)	۴۰	۸/۱۵۷۸۹۵	۰	۴۰	۸/۲۴۷۰۱۲	۰
ضخامت شیشه (m)	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸۶۸۴	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸۶۲۲	۰/۰۰۶
مجموع مصرف انرژی (kWh)	۱۶۵۸/۷۷	۱۵۸۵/۷۶	۱۴۷۶/۸۴	۱۵۷۶/۶۷	۱۴۹۸/۶۹	۱۳۸۶/۷۹
ساعات عدم آسایش (hr)	۱۶۶۴/۸۳	۱۵۹۹/۹	۱۵۰۳/۸۳	۱۷۰۱/۳۳	۱۶۳۰/۵۵	۱۴۹۶/۵

۵. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف واکاوی تأثیر دگرگونی‌های اقلیمی بر توازن انرژی و آسایش حرارتی در ابنیه اداری کلان‌شهر تبریز، ضرورت بازنگری در راهبردهای طراحی کالبدی را برای افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ تبیین نمود. یافته‌های این مطالعه نشان داد که بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه الگوریتم XGBoost با دستیابی به ضریب تبیین فراتر از ۰/۹۹، جایگزینی کارآمد برای محاسبات زمان‌بر دینامیک حرارتی در مراحل اولیه طراحی است. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها در این پژوهش تأیید کرد که جهت‌گیری ساختمان با ضریب اهمیت ۰,۵، تعیین‌کننده‌ترین مؤلفه در مدیریت بار حرارتی محسوب می‌شود. بر اساس تحلیل‌های پارتو، جهت‌گیری جنوبی با انحراف ۸ درجه، پایدارترین راهکار برای جذب غیرفعال خورشیدی و مقابله با گرمایش

در تابستان‌های آتی است. همچنین، ضخامت عایق‌کاری ۸ سانتی‌متری به‌عنوان راهبردی منعطف شناسایی شد که کارایی کالبدی ساختمان را در هر دو سناریوی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ تضمین می‌کند. با این حال، پیش‌بینی افزایش ساعات نارضایتی حرارتی در افق ۲۰۸۰ نشان می‌دهد که راهکارهای غیرفعال به تنهایی قادر به مهار کامل پیامدهای گرمایش جهانی نخواهند بود. لذا، بر مبنای یافته‌های این مدل، پیشنهاد می‌شود برای حفظ پایداری عملکردی در دهه‌های آتی، استراتژی‌های طراحی از حالت ایستا به سمت جایگزینی سیستم‌های سرمایشی نوین و تلفیق آن‌ها با لایه‌های حفاظتی غیرفعال (نظیر ضخامت عایق مذکور) تغییر یابد. این چارچوب محاسباتی، بستری عملیاتی برای سیاست‌گذاران فراهم می‌سازد تا پاسخ‌های کالبدی بهینه را با دقت بالا پیش‌بینی و در اسناد توسعه شهری لحاظ نمایند.

ملاحظات اخلاقی: در این مطالعه، اصول اخلاقی نگارش علمی شامل اصالت نتایج، امانتداری در ارجاع به منابع و عدم سوءرفتار پژوهشی به‌طور کامل رعایت شده است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

حامی مالی: این پژوهش هیچ‌گونه وابستگی مالی به سازمان یا نهاد خاصی نداشته و کلیه منابع مورد نیاز برای انجام تحقیق توسط نویسندگان تأمین گردیده است.

تعارض منافع: بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Abedini, M. H., Gholami, H., & Sangin, H. (2025). Multi-objective Optimization of Window and Shading Systems for Enhanced Office Building Performance: A Case Study in Qom, Iran. *Journal of Daylighting*, *12*(1), 91–110. https://doi.org/10.15627/jd.2025.6 (In Persian)
2. Aggarwal, S. (2020). *IMPACT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE ON BUILT ENVIRONMENT*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:226653395
3. Ahadi, P. (2014). *Investigating the Climatic Structure of Vernacular Housing in the Cold Regions of Iran (The Case Study of Zanjan, Tabriz and Hamedan)*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131194173 (In Persian)
4. Bazazzadeh, H., Nadolny, A., & Safaei, S. S. H. (2021). Climate Change and Building Energy Consumption: A Review of the Impact of Weather Parameters Influenced by Climate Change on Household Heating and Cooling Demands of Buildings. *European Journal of Sustainable Development*, *10*, 1–12. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236376645
5. Buckley, N., Mills, G., Reinhart, C., & Berzolla, Z. M. (2021). Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union’s Green Deal: Case study of Dublin Ireland. *Energy and Buildings*, *247*, 111115. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111115

6. Campagna, L. M., & Fiorito, F. (2022). On the Impact of Climate Change on Building Energy Consumptions: A Meta-Analysis. *Energies*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:245810846
7. Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P. S. (2023). Green construction for low-carbon cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(3), 1627–1657. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4
8. Crawford, R. H. (2022). Greenhouse Gas Emissions of Global Construction Industries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1218*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:246554859
9. D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2017). Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings. *Energies*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/en10010117
10. Das, H. P., Lin, Y. W., Agwan, U., Spangher, L., Devonport, A., Yang, Y., Drgoåa, J., Chong, A., Schiavon, S., & Spanos, C. J. (2024). Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings. In *Environmental Data Science* (Vol. 3). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/eds.2023.43
11. Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., & Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, 1061–1071. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264
12. El-Gohary, N. M., & Amasyali, K. (2016). *Machine Learning-Based Building Energy Consumption Prediction*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133133231
13. Elhabyb, K., Baina, A., Bellafkih, M., & Deifalla, A. F. (2024). Machine Learning Algorithms for Predicting Energy Consumption in Educational Buildings. *International Journal of Energy Research*, *2024*(1), 6812425. https://doi.org/10.1155/2024/6812425
14. *EnergyPlus. Weather Data Sources.* (2019).
15. Forootan, M. M., Larki, I., Zahedi, R., & Ahmadi, A. (2022). Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review. *Sustainability*, *14*(8), 4832. https://doi.org/10.3390/su14084832
16. Heydari, H., & Movaghari, A. (2025). The change in weather types in two population centers in northwestern Iran (Urmia and Tabriz) around Lake Urmia with the Woś classification approach. *Journal of Water and Climate Change*. https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wcc.2025.356
17. Islam, S. M. A., Hossain, M. R., & Jubair, M. (2024). Intelligent Energy Management: Leveraging an Effective Machine Learning for Predictive Appliance Energy Optimization in Smart Homes. *European Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning*, *3*(1), 18–26. https://doi.org/10.24018/ejai.2024.3.1.37

18. Karimi, A., Mohajerani, M., Alinasab, N., & Akhlaghinezhad, F. (2024). Integrating Machine Learning and Genetic Algorithms to Optimize Building Energy and Thermal Efficiency Under Historical and Future Climate Scenarios. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(21). https://doi.org/10.3390/su16219324
19. Li, Y., Wang, W., Wang, Y., Xin, Y., He, T., & Zhao, G. (2020). A Review of Studies Involving the Effects of Climate Change on the Energy Consumption for Building Heating and Cooling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229723246
20. Malik, A., Stenchikov, G., Mostamandi, S., Parajuli, S., Lelieveld, J., Zittis, G., Ahsan, M. S., Atique, L., & Usman, M. (2024). Accelerated Historical and Future Warming in the Middle East and North Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(22). https://doi.org/10.1029/2024JD041625
21. Nguyen, H. Q., Nguyen, D. D. K., Le, T. D., Mai, A., & Huynh, K. T. (2023). Career path prediction using XGBoost Model and students' academic results. *CTU Journal of Innovation and Sustainable Development*, *15*(ISDS), 62–75. https://doi.org/10.22144/ctujoisd.2023.036
22. Ortiz-Suarez, L. A., Ruiz Vanoye, J. A., & Trejo-Macotela, F. R. (2025). Optimizing Energy Consumption in Smart Buildings by Using Machine Learning Algorithms. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, *16*(1), 258–265. https://doi.org/10.61467/2007.1558.2025.v16i1.1057
23. Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, *40*(3), 394–398. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007
24. Ranson, M. H., Morris, L. L., & Kats-Rubin, A. (2014). *Climate Change and Space Heating Energy Demand: A Review of the Literature*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130020085
25. Scafetta, N. (2024). Impacts and risks of "realistic" global warming projections for the 21st century. *Geoscience Frontiers*, *15*(2), 101774. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101774
26. Scott, D., Hall, C. M., & Gössling, S. (2015). A review of the IPCC Fifth Assessment and implications for tourism sector climate resilience and decarbonization. *Journal of Sustainable Tourism*, 1–23. https://doi.org/10.1080/09669582.2015.1062021
27. Wang, M., Zhou, J., Liang, Y., Yu, H., & Jing, R. (2025). Climate change impacts on city-scale building energy performance based on GIS-informed urban building energy modelling. *Sustainable Cities and Society*, *125*, 106331. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106331
28. Yao, Z., Lum, Y., Johnston, A., Mejia-Mendoza, L. M., Zhou, X., Wen, Y., Aspuru-Guzik, A., Sargent, E. H., & Seh, Z. W. (2022). Machine learning for a sustainable energy future. *Nature Reviews Materials*, *8*(3), 202–215. https://doi.org/10.1038/s41578-022-00490-5

29. Zgajewski, T. (2015). *The Energy Performance of Buildings: Promises Still Unfulfilled. Egmont Paper No. 78, May 2015*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107181895
30. Zhang, C., Kazanci, O. B., Levinson, R., Heiselberg, P., Olesen, B. W., Chiesa, G., Sodagar, B., Ai, Z., Selkowitz, S., Zinzi, M., Mahdavi, A., Teufl, H., Kolokotroni, M., Salvati, A., Bozonnet, E., Chtioui, F., Salagnac, P., Rahif, R., Attia, S., … Zhang, G. (2021). Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment. *Energy and Buildings*, *251*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312
31. Zhao, H., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3586–3592. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049