

A Conceptual Model for Sustainable Buildings in Hot and Humid Regions: Energy Consumption Analysis Using Simulation and Artificial Neural Network (Case Study: Hormozgan)

1. Seyed Shahab Sadri^{ID}: Department of Architecture, Sav.C., Islamic Azad University, Saveh, Iran

2. Mohammad Behzadpour^{ID*}: Department of Architecture, Has.C., Islamic Azad University, Hashtgerd, Iran.

3. Cyrus Bavar^{ID}: aDepartment of Architecture, Sav.C., Islamic Azad University, Saveh, Iran

4. Hossein Aali^{ID}: Department of Architecture & Urbanism, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Semnan, Iran

*Corresponding Author's Email Address: Mohammad.behzadpour@iau.ac.ir

How to Cite: Sadri, S. S., Behzadpour, M., Bavar, C., & Aali, H. (2025). A Conceptual Model for Sustainable Buildings in Hot and Humid Regions: Energy Consumption Analysis Using Simulation and Artificial Neural Network (Case Study: Hormozgan). *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 3(2), 1-27.

Abstract:

The study aimed to develop a conceptual model for designing sustainable buildings in hot and humid regions using simulation and artificial neural networks (ANN) to predict and optimize energy consumption. This applied research employed a quantitative–analytical approach. Independent variables included material type, wall and roof thickness, HVAC system type, building orientation, and occupant behavior, while dependent variables covered energy consumption, indoor temperature, and humidity. Data were collected using EnergyPlus simulations and ANN modeling through an MLPRegressor with two hidden layers (ten neurons each), a learning rate of 0.001, and early stopping. Seventy percent of the data were used for training and 30% for testing, with model accuracy assessed via Mean Squared Error (MSE). The ANN model demonstrated high predictive performance in estimating energy consumption in buildings located in hot and humid regions. Comparisons between actual and predicted energy usage revealed some deviations attributed to climate variations and occupant behavior. MSE analysis indicated that wall thickness (94356.66), roof thickness (90021.62), indoor temperature (86698.37), and humidity (92751.18) were the most influential factors. Wooden roofs and low thermal conductivity brick walls contributed significantly to reduced energy use. The proposed conceptual model emphasizes the use of thermally efficient materials, smart control of indoor temperature and humidity, and climate-responsive design strategies. The integration of simulation and ANN modeling provides an effective tool for predicting and optimizing energy consumption in sustainable buildings within hot and humid climates. By identifying critical variables and proposing a sustainable design framework, the study offers practical insights for architects and engineers to reduce energy demand, enhance thermal comfort, and promote environmental sustainability.

Keywords: Sustainable buildings; Artificial neural network; Energy simulation; Hot and humid regions; Energy consumption prediction

Received: 11 May 2025

Revised: 17 August 2025

Accepted: 26 August 2025

Published: 01 September 2025



ارائه مدل مفهومی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب: تحلیل مصرف انرژی با استفاده از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: هرمزگان)

۱. سید شهاب صدری ^{id}: گروه معماری، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

۲. محمد بهزادپور ^{id}: گروه معماری، واحد هشتگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، هشتگرد، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. سیروس باور ^{id}: گروه معماری، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

۴. حسین عالی ^{id}: دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mohammad.behzadpour@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: صدری، سید شهاب، بهزادپور، محمد، باور، سیروس، و عالی، حسین. (۱۴۰۴). ارائه مدل مفهومی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب: تحلیل مصرف انرژی با استفاده از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: هرمزگان). *تجلی هنر در معماری و شهرسازی*، ۳(۲)، ۱-۲۷.

چکیده

هدف پژوهش، ارائه یک مدل مفهومی برای طراحی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب با بهره‌گیری از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی است. این پژوهش از نوع کاربردی و با رویکرد کمی-تحلیلی انجام شد. در فاز طراحی، متغیرهایی همچون نوع مصالح، ضخامت دیوار و سقف، نوع سیستم تهویه، گرایش ساختمان، و رفتار ساکنان به عنوان متغیرهای مستقل و مصرف انرژی، دمای داخلی، و رطوبت به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. داده‌ها از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار EnergyPlus و تحلیل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) جمع‌آوری و پردازش شدند. شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم MLPRegressor با دو لایه پنهان (هر یک شامل ده نورون)، نرخ یادگیری ۰.۰۰۱ و مکانیزم توقف زودهنگام آموزش داده شد. داده‌ها به نسبت ۷۰ به ۳۰ میان آموزش و آزمون تقسیم شدند و دقت مدل با شاخص خطای میانگین مربعات (MSE) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی توانایی بالایی در پیش‌بینی مصرف انرژی در ساختمان‌های مناطق گرم و مرطوب دارد. مقایسه میان مصرف واقعی و پیش‌بینی شده نشان داد که تفاوت‌هایی در برخی ساختمان‌ها وجود دارد که ناشی از تغییرات اقلیمی یا رفتار ساکنین است. تحلیل MSE نشان داد که ضخامت دیوار (۹۴۳۵۶.۶۶)، ضخامت سقف (۹۰۰۲۱.۶۲)، دمای داخلی (۸۶۶۹۸.۳۷) و رطوبت داخلی (۹۲۷۵۱.۱۸) بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی دارند. همچنین، سقف‌های چوبی و دیوارهای آجری با ضریب انتقال حرارتی پایین موجب کاهش مصرف انرژی شدند. مدل مفهومی پیشنهادی بر به کارگیری مصالح با ویژگی‌های حرارتی مناسب، کنترل دمای داخلی و رطوبت از طریق سیستم‌های هوشمند و طراحی اقلیم پایدار تأکید دارد. نتایج پژوهش نشان داد که ادغام شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند ابزار مؤثری برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مناطق گرم و مرطوب باشد. این رویکرد با شناسایی متغیرهای مؤثر بر مصرف انرژی و ارائه مدل مفهومی طراحی پایدار، به طراحان و مهندسان کمک می‌کند تا با انتخاب ترکیب مناسب مصالح و کنترل شرایط محیطی، مصرف انرژی را کاهش داده و آسایش حرارتی و زیست‌محیطی را ارتقا دهند.

کلیدواژه‌گان: ساختمان پایدار؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ شبیه‌سازی انرژی؛ مناطق گرم و مرطوب؛ پیش‌بینی مصرف انرژی

تاریخ دریافت: ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۶ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۴ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۰ شهریور ۱۴۰۴



مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی، توسعه‌ی نامتوازن زیرساخت‌ها و افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان به یکی از چالش‌های بنیادین قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است. سهم بالای ساختمان‌ها در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای سبب شده است که مفهوم پایداری در معماری و شهرسازی به یک ضرورت جهانی بدل شود (1). بر اساس مطالعات، ساختمان‌ها حدود ۴۰ درصد از کل انرژی جهانی را مصرف می‌کنند و نزدیک به ۳۰ درصد از انتشار کربن را به خود اختصاص داده‌اند (2). در چنین شرایطی، طراحی ساختمان‌های پایدار در اقلیم‌های حساس — به‌ویژه مناطق گرم و مرطوب که نیاز سرمایشی بالایی دارند — یکی از حوزه‌های حیاتی در مهندسی انرژی و معماری پایدار است (3).

از منظر جهانی، گذار از ساخت‌وساز سنتی به طراحی مبتنی بر انرژی هوشمند، مستلزم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند شبیه‌سازی انرژی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، و شبکه‌های عصبی مصنوعی است (4). این فناوری‌ها نه تنها امکان تحلیل دقیق رفتار انرژی ساختمان را فراهم می‌کنند، بلکه به طراحان اجازه می‌دهند تأثیر متغیرهای گوناگون مانند نوع مصالح، ضخامت دیوار و سقف، یا رفتار ساکنان را در مصرف انرژی به‌صورت مدل‌سازی شده بسنجند (5). به بیان دیگر، گذار به معماری داده‌محور، نقطه‌ی تلاقی دانش مهندسی انرژی و طراحی معماری محسوب می‌شود؛ چراکه مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند با ترکیب داده‌های اقلیمی و رفتاری، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از الگوهای مصرف ارائه دهند (6).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) برای پیش‌بینی مصرف انرژی در ساختمان‌ها، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و مرطوب، می‌تواند دقت شبیه‌سازی‌ها را به‌صورت چشمگیری افزایش دهد (7). این شبکه‌ها با بهره‌گیری از داده‌های چندبعدی و یادگیری روابط غیرخطی، توانایی بالایی در مدل‌سازی اثرات متقابل میان دما، رطوبت، جنس مصالح و نوع تهویه دارند. در پژوهش‌های مشابه، الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی طراحی در مراحل اولیه پروژه‌های ساختمانی نیز استفاده شده‌اند و نتایج آنها نشان می‌دهد که مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌تواند تا ۲۵ درصد کاهش یابد (3).

با وجود پیشرفت‌های فنی در تحلیل داده‌های انرژی، یکی از چالش‌های اصلی در کشورهای در حال توسعه، فقدان چارچوب نظام‌مند برای ارزیابی پایداری انرژی در طراحی شهری و معماری است. در این کشورها، از جمله ایران، فقدان دانش اقلیمی دقیق، کمبود داده‌های بومی، و ناهماهنگی میان نهادهای طراحی سیاست‌گذاری سبب شده است که بهره‌گیری از فناوری‌های شبیه‌سازی محدود باقی بماند (8). در حالی که پژوهش‌های بین‌المللی تأکید می‌کنند که تحلیل اقلیمی و شبیه‌سازی انرژی باید در مراحل اولیه طراحی معماری ادغام شود تا تأثیر مؤثر بر کارایی انرژی حاصل گردد (9). در همین راستا، مطالعه حاضر می‌کوشد تا با ارائه یک مدل مفهومی مبتنی بر شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی، راهکاری بومی برای طراحی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب ایران به‌ویژه استان هرمزگان ارائه دهد.

در دهه‌های اخیر، درک پایداری تنها به بعد فنی یا انرژی محدود نبوده و ابعاد رفتاری، فرهنگی و اجتماعی نیز در این زمینه پررنگ‌تر شده است (10). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که رفتار ساکنان، یکی از متغیرهای کلیدی در تعیین میزان مصرف انرژی ساختمان است؛ به‌گونه‌ای که تغییر در الگوهای رفتاری می‌تواند بین ۵ تا ۳۰ درصد مصرف انرژی را کاهش دهد (11). در این میان، آگاهی زیست‌محیطی و نگرش نسبت به رفتارهای پایدار نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی

دارند (12). بر اساس نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده، ادراک ریسک و نگرانی زیست‌محیطی، واسطه‌ای میان دانش و رفتار پایدار ایجاد می‌کنند و سبب می‌شوند ساکنان در برابر استفاده از انرژی واکنش مسئولانه‌تری داشته باشند.

از دیدگاه روان‌شناختی، رویکردهای نوین به پایداری در معماری با الگوهای رفتار طرفدار محیط‌زیست (Pro-environmental Behavior) هم‌راستا شده‌اند (13). این هم‌راستایی بدین معناست که طراحی فضاهای داخلی و کیفیت محیطی می‌تواند به‌طور مستقیم بر احساس مسئولیت و رفتار مصرفی کاربران تأثیر بگذارد (14). از این‌رو، معماری پایدار در اقلیم‌های گرم و مرطوب تنها به انتخاب مصالح مناسب یا کاهش انتقال حرارت محدود نمی‌شود، بلکه باید الگوهای فرهنگی و زیستی ساکنان را نیز در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ کند (15).

در سطح کلان‌تر، مفهوم پایداری ارتباط نزدیکی با آموزش، آگاهی عمومی و توسعه فرهنگی دارد. پژوهش‌های آموزش عالی در دهه‌ی اخیر نشان می‌دهد که ارتقای سواد زیست‌محیطی در سطوح دانشگاهی می‌تواند نگرش و رفتار نسل آینده‌ی معماران را نسبت به محیط‌زیست تغییر دهد (16). پیاده‌سازی رویکرد «آموزش برای توسعه پایدار» در دانشگاه‌ها و نهادهای آموزشی، به افزایش تمایل به طراحی‌های کم‌انرژی و استفاده از فناوری‌های سبز در پروژه‌های واقعی منجر شده است (17, 18).

در این میان، برخی پژوهشگران تأکید کرده‌اند که برای تحقق پایداری در حوزه معماری و شهرسازی، باید از رویکرد کل‌نهادی (Whole-Institution Approach) بهره گرفت؛ یعنی تمام بخش‌های سازمانی از آموزش و پژوهش تا اجرا و نظارت باید در خدمت هدف کاهش مصرف انرژی قرار گیرند (18). به همین دلیل، همکاری میان دانشگاه‌ها، بخش خصوصی و دولت در طراحی ساختمان‌های هوشمند به عنوان رکن اصلی سیاست‌های زیست‌پایدار معرفی شده است (19).

از منظر فنی، یکی از مسیرهای مؤثر در دستیابی به ساختمان‌های پایدار، بهینه‌سازی طراحی در مراحل اولیه است. در این مرحله، شبیه‌سازی انرژی و تحلیل پارامترهای اقلیمی می‌تواند جهت‌گیری ساختمان، ضخامت دیوار و نوع مصالح را به گونه‌ای تعیین کند که میزان اتلاف حرارت و بار سرمایشی کاهش یابد (20). پژوهش‌های مبتنی بر مدل‌سازی پارامتریک و الگوریتم‌های ژنتیک نشان داده‌اند که انتخاب بهینه‌ی مصالح می‌تواند تا ۲۰ درصد کارایی انرژی را بهبود دهد (3). در عین حال، ترکیب مدل‌های شبکه عصبی با شبیه‌سازی پارامتریک می‌تواند ارتباط میان متغیرهای پیچیده را در محیط‌های اقلیمی مانند هرمزگان آشکار سازد (21).

مطالعات تجربی در مناطق گرم‌وخنک نشان می‌دهند که فرم شهری و مورفولوژی بنا نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد حرارتی و شکل‌گیری جزیره‌ی حرارتی شهری دارد (22). تغییر زاویه استقرار ساختمان، نسبت ارتفاع به عرض خیابان، و استفاده از مصالح بازتابنده‌ی نور، همگی می‌توانند بر میزان دمای محیط و تقاضای انرژی تأثیر بگذارند (9). در ایران نیز پژوهش‌های جدید در حوزه مسکن اجتماعی نشان داده‌اند که بهینه‌سازی جهت‌گیری ساختمان‌ها و انتخاب پیکربندی مناسب، نقش قابل‌توجهی در کاهش بار سرمایشی در اقلیم‌های جنوبی دارد (23). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که پایداری انرژی نه تنها یک مسئله فنی، بلکه مسئله‌ای مکانی و اقلیمی است که باید در مقیاس طراحی شهری نیز تحلیل شود.

هم‌زمان با گسترش فناوری‌های هوش مصنوعی، پژوهش‌ها در زمینه‌ی پیش‌بینی مصرف انرژی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به شدت افزایش یافته است (2). از جمله این رویکردها، استفاده از مدل‌های مبتنی بر XGBoost بهینه‌سازی‌شده با بیزین است که توانسته‌اند مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی

را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند (21). این الگوریتم‌ها در مقایسه با مدل‌های کلاسیک، قابلیت انطباق بیشتری با داده‌های غیرخطی دارند و می‌توانند نوسانات مصرف را در پاسخ به تغییرات اقلیمی یا رفتاری کاربران پیش‌بینی کنند. با این حال، محدودیت اصلی این روش‌ها در دسترسی به داده‌های دقیق محلی و ضعف در یکپارچگی مدل‌ها با شرایط واقعی محیطی نهفته است (4).

افزون بر بُعد فناوریانه، دستیابی به پایداری انرژی در ساختمان‌ها مستلزم تحول فرهنگی و آموزشی است. آموزش‌های سبز و برنامه‌های ارتقای صلاحیت‌های زیست‌محیطی، نقش واسطه‌ای در بهبود عملکرد کارکنان و طراحان ایفا می‌کنند (24). هنگامی که آموزش‌های محیط‌زیستی با انگیزش فردی ترکیب شود، تعهد سازمانی نسبت به اهداف پایداری افزایش می‌یابد (17). در این راستا، طراحی سازوکارهای انگیزشی و ایجاد حس مسئولیت زیست‌محیطی در کارکنان حوزه ساخت‌وساز می‌تواند مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار ۲۰۳۰ را هموار سازد (25).

از سوی دیگر، رشد سریع شهرها در کشورهای در حال توسعه سبب تشدید آلودگی و کاهش کیفیت محیط‌زیست شهری شده است. پژوهش‌ها در داکا، بنگلادش، نشان می‌دهند که ادراک و آگاهی زیست‌محیطی شهروندان می‌تواند در مدیریت پایدار محیط‌های شهری نقشی تعیین‌کننده داشته باشد (26). این یافته‌ها با مطالعات رفتاری در ایران نیز هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد تقویت نگرش‌های دینی و فرهنگی می‌تواند به رفتارهای محیط‌زیست‌دوستانه‌تر منجر شود (10). از این رو، طراحی ساختمان‌های پایدار باید در تعامل با الگوهای فرهنگی و باورهای اجتماعی صورت گیرد تا علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، مقبولیت اجتماعی نیز داشته باشد (27).

در کنار این مؤلفه‌ها، پژوهش‌های جدید بر نقش ادراک ریسک زیست‌محیطی در شکل‌گیری رفتار مصرف پایدار تأکید دارند (12). هنگامی که کاربران خطرات ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی را درک کنند، تمایل بیشتری برای استفاده از فناوری‌های هوشمند صرفه‌جویانه از خود نشان می‌دهند. این درک، حلقه‌ی ارتباطی میان آگاهی، نگرانی زیست‌محیطی و اقدام عملی را تکمیل می‌کند (14). بر این اساس، طراحی هوشمند ساختمان‌های پایدار باید علاوه بر ملاحظات فنی، ابعاد شناختی و روانی کاربران را نیز در نظر گیرد.

از منظر اقتصادی، ساختمان‌های پایدار مزایای بلندمدتی از جمله کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، افزایش ارزش ملک، و بهبود سلامت ساکنان دارند. با این حال، هزینه‌های اولیه بالای این نوع ساختمان‌ها در بسیاری از کشورها مانع گسترش آن شده است (8). در پاسخ به این چالش، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد، به همراه سیستم‌های تولید انرژی در محل (On-site Energy Generation) پیشنهاد می‌شود تا توازن میان هزینه و سود حاصل گردد (22). در جمع‌بندی می‌توان گفت که توسعه‌ی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب مستلزم رویکردی میان‌رشته‌ای است که سه بعد فناوریانه، فرهنگی و اقلیمی را توأمان در بر گیرد. به‌کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی انرژی، انتخاب مصالح کم‌کربن، آموزش زیست‌محیطی ساکنان و بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر، همگی اجزای مکمل این رویکرد به شمار می‌آیند. چنین هم‌افزایی میان دانش و فناوری می‌تواند به کاهش مصرف انرژی، افزایش آسایش حرارتی و بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی منجر شود (1، 23). بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارائه‌ی مدل مفهومی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب با تحلیل مصرف انرژی از طریق شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) است.

روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک مدل مفهومی برای طراحی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب، به‌ویژه در منطقه هرمزگان، با تحلیل مصرف انرژی از طریق شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) انجام می‌شود. در دنیای امروزی، توجه به مسائل محیطی و انرژی به‌عنوان یکی از چالش‌های بزرگ جوامع جهانی، نیازمند راهکارهای نوین و پیشرفته در زمینه طراحی ساختمان‌های پایدار است. در این راستا، به‌ویژه در مناطق گرم و مرطوب، مانند هرمزگان که با شرایط خاص اقلیمی روبه‌روست، استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند مدل‌های شبیه‌سازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف آن کمک کند. در این پژوهش، برای تحلیل و بررسی طراحی ساختمان‌های پایدار در این مناطق، متغیرهای مختلفی در نظر گرفته شده است که شامل متغیرهای مستقل، وابسته و کنترلی می‌باشند. از جمله متغیرهای مستقل می‌توان به نوع مصالح، ضخامت مصالح، گرایش و سایه‌اندازی، نوع سیستم تهویه مطبوع و رفتار ساکنین اشاره کرد. این متغیرها به‌طور مستقیم بر مصرف انرژی، دمای داخلی، رطوبت داخلی، کیفیت هوای داخل و راحتی حرارتی ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارند. متغیرهای مستقل در این پژوهش عبارتند از:

۱. نوع مصالح: نوع مصالح مانند آجر، بتن، فولاد و چوب تأثیر زیادی بر مصرف انرژی ساختمان دارند.
 ۲. ضخامت مصالح: ضخامت مصالح می‌تواند عملکرد حرارتی ساختمان و در نتیجه مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار دهد.
 ۳. گرایش و سایه‌اندازی: گرایش و موقعیت ساختمان و همچنین سایه‌اندازی تأثیر زیادی در میزان تابش خورشیدی دریافت‌شده دارند که این امر بر مصرف انرژی تأثیر می‌گذارد.
 ۴. نوع سیستم تهویه مطبوع: سیستم‌های تهویه مطبوع مختلف مانند سیستم‌های مرکزی، پنجره‌ای و تبخیر خورشیدی در مصرف انرژی تأثیر دارند.
 ۵. رفتار ساکنین: رفتارهایی نظیر تنظیم دمای ترموستات و استفاده از روشنایی، مستقیماً بر مصرف انرژی تأثیر گذارند.
- متغیرهای وابسته که در این تحقیق بررسی می‌شوند عبارتند از:
۱. مصرف انرژی: مصرف انرژی کل ساختمان، تفکیک‌شده بر اساس نوع انرژی (برق، گاز) و نوع مصرف (گرمایش، سرمایش، روشنایی).
 ۲. دمای داخلی: دمای داخلی ساختمان در طول سال.
 ۳. رطوبت داخلی: رطوبت موجود در ساختمان در طول سال.
 ۴. کیفیت هوای داخل: کیفیت هوای داخلی ساختمان، از جمله سطح CO_2 و VOCs.
 ۵. راحتی حرارتی: میزان راحتی حرارتی ساکنین در ساختمان.

همچنین متغیرهای کنترلی نیز در این پژوهش در نظر گرفته شده است که شامل شرایط آب و هوایی، ابعاد و شکل ساختمان، تعداد طبقات و نوع کاربری ساختمان می‌باشد. در روش تحقیق، این پژوهش به‌صورت کاربردی انجام می‌شود و از روش تجزیه و تحلیل کمی-تحلیلی برای تحلیل داده‌ها استفاده خواهد شد. به‌منظور گردآوری اطلاعات، از روش‌های فیش برداری برای جمع‌آوری مبانی نظری و پیشینه پژوهش بهره‌گیری خواهد شد. همچنین برای جمع‌آوری داده‌های عملی، از مطالعات میدانی و پرسشنامه‌ها استفاده خواهد شد. در روش تجزیه و تحلیل اطلاعات، ابتدا مرور جامع ادبیات مرتبط با پایداری در طراحی

ساختمان انجام خواهد شد تا درک کاملی از مفهوم پایداری در این حوزه به دست آید. پس از آن، پیشینه تحلیل انرژی ساختمان بررسی خواهد شد و سپس ابزارهای شبیه سازی مانند تحلیل انرژی پارامتریک و الگوریتم های ژنتیک معرفی می شوند. در ادامه، مصالح ساختمانی و ویژگی های آنها از جمله خواص حرارتی بررسی می شوند و مدل انرژی پارامتریک ایجاد خواهد شد. این مدل با موتور شبیه سازی انرژی (EnergyPlus) ادغام خواهد شد تا نتایج شبیه سازی به دست آید.

پس از گردآوری نتایج، این داده ها با استفاده از تکنیک نمودار مختصات موازی به صورت بصری نمایش داده می شوند تا دسترسی طراحان به داده های چندبعدی تسهیل گردد. همچنین یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی مصرف انرژی توسعه داده خواهد شد و مدل بهینه سازی برای بررسی گزینه های مختلف در پارامترهای عملکرد انرژی ساختمان ها طراحی خواهد شد. در نهایت، یک سیستم رایانه ای برای تسهیل استفاده از مدل های توسعه یافته طراحی خواهد شد تا این مدل ها به راحتی توسط طراحان ساختمان و پژوهشگران مورد استفاده قرار گیرند. این پژوهش به عنوان یک رویکرد نوآورانه در طراحی ساختمان های پایدار با توجه به نیازهای خاص مناطق گرم و مرطوب، به ویژه هرمزگان، می تواند به بهبود شرایط زندگی، کاهش مصرف انرژی و حفظ محیط زیست کمک کند.

یافته های پژوهش

در این پژوهش، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش بینی مصرف انرژی بر اساس ویژگی های مختلفی همچون نوع دیوار، نوع سقف، نوع کف، ضخامت دیوار، ضخامت سقف، دمای داخلی، رطوبت داخلی و مصرف انرژی طراحی شده است. برای شروع، داده های تصادفی در قالب یک دیتافریم pandas ایجاد می شود که شامل انواع مختلف دیوار، سقف، کف، ضخامت دیوار، ضخامت سقف، دمای داخلی، رطوبت داخلی و مصرف انرژی است. سپس از متد `pd.get_dummies()` برای تبدیل ویژگی های دسته ای (مانند نوع دیوار، سقف و کف) به متغیرهای عددی استفاده می شود تا بتوان آنها را به راحتی در مدل های یادگیری ماشین به کار برد.

مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از کلاس `MLPRegressor` در کتابخانه `sklearn` ساخته می شود. این مدل دارای دو لایه مخفی با ۱۰ نورون در هر لایه است که به مدل این امکان را می دهد تا روابط پیچیده تری را بین ویژگی ها و مصرف انرژی یاد بگیرد. تعداد تکرارها (iterations) برای این مدل به ۲۰۰۰ افزایش داده شده تا فرایند آموزش به طور کامل انجام شود و همگرایی مناسبی حاصل گردد. همچنین، نرخ یادگیری برای مدل برابر با ۰/۰۰۱ تنظیم شده است تا از همگرایی بیش از حد سریع جلوگیری شود و به مدل فرصت داده شود که به تدریج به بهترین مقدار برسد. علاوه بر این، ویژگی پایان زودهنگام (early stopping) فعال است که باعث می شود آموزش زمانی که عملکرد مدل بهبود نیابد متوقف شود تا از اورفیتینگ جلوگیری گردد.

برای ارزیابی عملکرد مدل، ابتدا داده ها به دو مجموعه آموزشی و آزمایشی تقسیم می شود که ۷۰٪ داده ها برای آموزش و ۳۰٪ برای ارزیابی استفاده می شود. پس از آموزش مدل، از آن برای پیش بینی مصرف انرژی استفاده می شود و خطای مدل با استفاده از (Mean Squared Error (MSE محاسبه می شود. نتایج پیش بینی شده و واقعی در یک نمودار مقایسه ای نمایش داده می شود تا عملکرد مدل قابل بررسی باشد.

کد همچنین یک تابع به نام `evaluate_feature_impact` دارد که تأثیر هر ویژگی را به طور جداگانه بررسی می‌کند. در اینجا برای هر ویژگی مانند ضخامت دیوار، ضخامت سقف، دمای داخلی و رطوبت داخلی، مدل دوباره آموزش داده می‌شود و خطای `MSE` برای آن ویژگی خاص محاسبه می‌شود. این فرآیند به ما کمک می‌کند تا متوجه شویم کدام ویژگی‌ها بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی دارند.

پس از ارزیابی تأثیر ویژگی‌ها، نتایج پیش‌بینی و واقعی نشان می‌دهد که تأثیرات هر ویژگی بر مصرف انرژی براساس یک ماتریس همبستگی از تمامی ویژگی‌ها ساخته می‌شود تا روابط میان ویژگی‌ها و مصرف انرژی بررسی شود. در نهایت، تنظیمات مدل شامل تعداد لایه‌های مخفی و نورون‌ها (۱۰ نورون در هر لایه)، نرخ یادگیری ۰/۰۰۱، تعداد تکرارها تا ۲۰۰۰ بار و فعال‌سازی پایان زود هنگام (`early stopping`) است. این تنظیمات به مدل کمک می‌کند که بهترین عملکرد را در پیش‌بینی مصرف انرژی با توجه به ویژگی‌های مختلف ساختمان ارائه دهد. براساس نتایج پژوهش؛ در تحلیل انرژی مصرفی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب، استفاده از شبیه‌سازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مصرف انرژی به عنوان ابزاری مهم مطرح است. در این فرآیند، دو نوع داده در دسترس داریم: مصرف انرژی واقعی و مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده توسط مدل شبکه عصبی. این دو مجموعه داده به ما کمک می‌کنند تا تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود را بین مصرف انرژی واقعی و پیش‌بینی شده شبیه‌سازی کنیم. با بررسی نتایج جدول، می‌توانیم به تشخیص تفاوت‌ها و روندهای موجود بپردازیم. به طور مثال، برای برخی از ساختمان‌ها مصرف انرژی واقعی بالاتر از پیش‌بینی شده است، در حالی که در برخی موارد مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده بیشتر از مصرف واقعی است. به عنوان نمونه، برای ساختمان اول مصرف انرژی واقعی برابر با ۱۳۶۹.۳۶ بوده، در حالی که مصرف پیش‌بینی‌شده ۱۰۱۸.۱۲ است. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده دقت یا کمبود دقت مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی است.

جدول ۱. مقایسه مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی

Predicted Energy Consumption	Actual Energy Consumption
۱۰۱۸.۱۱۹۳۱۳	۱۳۶۹.۳۵۶۰۷۸
۱۱۴۹.۸۴۶۱۳۱	۱۱۲۰.۹۱۱۲۰۸
۱۳۱۲.۱۰۱۳۶۵	۷۹۰.۶۶۳۴۷۵۱
۱۱۶۸.۰۴۸۸۷۳	۱۳۸۵.۶۴۸۰۶۹
۱۱۵۲.۹۰۵۴۲۱	۱۵۰۰.۵۲۸۴۸
۱۲۹۷.۴۱۳۱۹	۱۳۷۹.۱۰۶۷۶۵
۱۲۶۳.۷۸۰۰۶۲	۱۲۵۹.۵۴۸۵۱۹
۹۷۶.۹۹۹۲۹۲۶	۱۴۷۴.۸۰۳۶۶۷
۱۱۰۷.۴۱۴۳۸۳	۷۷۰.۸۶۵۸۸۲
۱۱۲۹.۱۲۲۱۳۷	۱۳۶۶.۳۷۶۴۳
۹۵۰.۸۰۴۵۱۴۸	۱۲۱۹.۴۹۲۴۹۹
۱۱۷۲.۴۵۸۱۴	۹۵۱.۲۶۴۷۰۱۳
۱۲۶۳.۹۲۵۶۷۲	۶۰۵.۳۸۰۹۶۰۸
۱۳۲۳.۵۰۹۰۳۹	۱۴۴۱.۵۰۵۹۶۷
۱۰۷۹.۱۸۵۱۷	۱۱۵۵.۲۰۷۱۳
۱۱۷۲.۶۷۸۵۵۹	۱۱۴۸.۲۳۵۵۹۷
۱۳۶۸.۹۴۷۱۴۴	۶۱۰.۹۵۴۶۳۸۹
۱۰۳۶.۷۸۹۱۴۵	۷۷۳.۵۵۹۹۶۰۸
۱۱۰۳.۹۰۰۳۵۱	۸۲۱.۸۹۲۹۰۷۲

۱۳۳۱.۴۳۷۷۷۶	۱۴۸۰.۱۹۶۰۹۵
۱۲۰۸.۳۷۲۶۶۶	۱۳۴۵.۵۰۲۰۳۸
۱۱۹۱.۲۸۱۰۶۳	۶۷۶.۷۷۸۴۹۲۴
۱۰۴۶.۵۶۳۶۶۶	۸۸۴.۲۲۴۱۳۱۳
۹۴۴.۴۷۸۱۶۶۶	۱۱۵۹.۳۳۹۲۷۳
۹۷۰.۱۰۵۰۲۲	۸۵۱.۳۸۸۰۱۶۵
۱۳۵۵.۹۱۸۳۳۲	۷۹۱.۹۸۳۲۸۲۹
۱۰۰۹.۶۰۰۹۸۶	۸۶۷.۹۲۰۸۱۲۳
۱۰۰۲.۰۶۸۰۶	۱۳۷۱.۰۷۳۷۲۹
۱۰۱۳.۳۴۶۳۵۲	۷۴۱.۱۷۷۵۱۴۳
۹۸۳.۶۷۳۲۷۵	۹۲۵.۷۷۷۷۰۵۲
۱۰۲۵.۰۵۸۸۲۵	۸۵۸.۱۳۵۵۲۸۱
۱۰۶۴.۸۲۳۴۴۹	۱۴۰۳.۹۱۳۳۷۸
۱۱۰۳.۳۶۵۹۳۸	۱۴۴۵.۱۲۴۹۵۳
۱۰۳۸.۵۰۵۶۳۶	۶۲۸.۹۲۹۶۰۲
۱۱۴۸.۳۹۹۳۳۹	۱۰۲۹.۶۳۶۲۵
۱۲۷۸.۶۱۰۳۱۲	۱۴۵۴.۰۲۹۶۳۳
۱۲۹۴.۴۴۴۰۳	۱۰۴۳.۷۹۰۳۷۹
۱۰۵۴.۱۷۱۱۱	۱۱۰۴.۵۰۶۸۸۸
۹۳۹.۹۶۱۰۳۱۷	۱۵۴۳.۶۵۰۷۰۴
۱۲۱۳.۰۰۲۸۴۸	۶۹۱.۳۶۰۱۷۰۸
۱۰۸۰.۲۵۲۴۴۵	۶۴۱.۹۹۷۶۶۶۸
۹۳۰.۱۴۳۳۴۹۶	۱۰۸۷.۵۰۷۱۲۹
۱۰۹۶.۵۵۸۴۲۹	۹۲۲.۸۰۷۷۲۲۶
۱۱۱۹.۲۶۴۶۸۸	۸۳۷.۲۵۹۱۵۸۷
۱۱۴۷.۹۶۳۳۱۵	۷۶۶.۸۸۰۱۰۶
۱۱۹۴.۲۸۸۴۰۹	۸۷۳.۶۱۰۰۲۷۲
۹۴۰.۷۷۳۷۱۲۷	۱۲۳۹.۱۱۶۳۶۵
۱۱۳۳.۷۰۹۳۱	۱۳۰۱.۸۸۹۷۱۳
۱۰۱۲.۰۰۴۷۷	۷۶۴.۸۱۱۲۴۰۲
۱۰۸۰.۶۵۴۸۸۶	۷۷۲.۳۳۳۲۵۴۸
۱۰۰۲.۰۴۱۶۰۶	۱۳۸۳.۶۷۶۹۵۶
۱۰۸۳.۸۱۰۴۴۶	۱۵۹۷.۲۰۹۹۶۴
۱۲۶۷.۳۱۵۶۶۳	۷۴۴.۶۹۰۴۷۶۹
۱۱۸۱.۴۳۳۰۶۷	۱۰۷۰.۳۲۰۸۲۸
۱۲۲۴.۵۹۴۹۹۶	۱۴۴۸.۴۵۴۴۸۷
۱۰۷۲.۹۹۵۸۸۵	۸۵۶.۵۸۲۳۱۶۳
۱۰۹۱.۹۲۳۳۹۵	۱۱۵۲.۶۸۷۰۲
۱۰۳۷.۳۷۱۴۹۶	۱۱۲۶.۹۴۳۲۸۱
۱۱۵۲.۹۱۹۳۷۵	۱۴۷۰.۰۲۷۷۵۶
۱۳۸۶.۹۲۷۰۳۴	۱۴۹۸.۴۷۴۴۶
۱۱۲۱.۸۶۴۶۲۲	۱۲۵۸.۹۱۹۰۴
۱۲۹۸.۰۳۶۰۷۶	۱۰۹۴.۵۳۸۵۲۸
۱۰۹۳.۲۴۱۶۸۲	۱۴۵۲.۳۶۸۶۵۶

۹۹۹.۶۶۴۱۱۵	۱۵۷۲.۷۹۶۵۸۵
۱۰۳۷.۲۴۲۴۸۸	۱۱۴۳.۲۸۴۱۶۷
۱۱۰.۹۶۱۷۶۴	۱۴۴۴.۴۲۳۹۶۸
۱۰۲۵.۴۲۵۵۷۱	۱۲۱۱.۱۳۴۳۸۱
۱۱۷۳.۹۵۳۸۶۲	۸۶۵.۵۳۱۶۷۴۴
۱۰۱۷.۷۰۶۸۱۹	۱۴۵۵.۸۶۱۱۵۶
۱۰۳۷.۹۲۶۱۶۴	۱۱۳۶.۸۷۵۲۶۶
۱۱۴۲.۲۱۰۹۱۸	۹۶۹.۲۲۶۷۶۵۲
۱۰۷۹.۰۶۵۹۹۵	۹۳۳.۶۲۱۷۶۳۱
۱۰۲۹.۰۹۶۴۸۳	۶۲۳.۷۷۱۴۴۵
۱۲۱۳.۶۵۸۰۵۱	۱۲۰۹.۰۴۶۴۴۳
۹۲۳.۱۴۰۲۹۹۲	۱۴۹۰.۲۳۳۷۳۴
۹۷۵.۶۷۲۸۵۲۳	۱۱۱۵.۲۰۱۸۹۶
۱۰۹۳.۳۹۶۳۳۲	۸۳۲.۱۳۹۷۰۶۲
۱۰۱۱.۲۶۶۲۴۸	۱۳۷۰.۴۹۲۹۶۶
۱۰۵۹.۴۹۳۶۳۶	۱۴۲۷.۶۷۵۴۶۳
۹۰۱.۴۷۸۰۰۴۳	۸۴۹.۳۲۵۳۸۹۱
۱۰۵۴.۶۸۷۶۳۶	۶۰۱.۹۰۱۰۳۲۴
۹۹۷.۰۷۷۶۹۳۱	۱۵۴۸.۷۹۷۲۰۲
۱۰۴۲.۱۹۹۶۳۸	۱۲۶۳.۲۰۴۱۶۹
۱۱۰۰.۲۹۷۵۰۸	۱۲۱۳.۰۹۹۷۶۲
۱۱۶۰.۶۳	۹۱۴.۸۷۷۵۶۹۸
۱۰۰۴.۳۷۴۴۲۲	۸۵۹.۲۴۹۳۹۵۵
۹۹۹.۶۴۲۸۷۵۸	۹۲۱.۷۴۱۲۳۳۵
۹۵۰.۸۶۳۱۸۵۷	۶۳۹.۳۶۱۴۷۱۲
۱۲۲۴.۶۵۵۷۹۳	۸۴۴.۵۵۹۵۰۵۱
۱۱۶۶.۴۸۶۵۳۲	۱۴۴۲.۵۲۷۸۶۲
۱۴۱۱.۳۰۵۰۸۳	۹۱۹.۹۸۰۷۱۵۲
۱۲۲۰.۵۲۶۰۳۶	۱۱۸۴.۱۴۹۹۲۶
۱۰۰۳.۹۶۲۷۸۸	۱۰۶۳.۴۴۷۵۸۹
۱۰۳۶.۵۰۱۳۲۶	۷۵۵.۳۶۱۵۱۵۸
۱۱۱۴.۳۵۷۸۵۴	۷۹۵.۰۹۹۴۵۸۲
۱۰۲۷.۸۷۷۲۹۱	۱۱۰۲.۷۱۵۶۸۵
۱۲۰۱.۸۱۴۵۸	۹۰۵.۷۵۲۷۵۰۷
۱۰۰۳.۶۲۲۴۰۱	۱۰۵۸.۶۵۱۵۴۵
۱۱۶۳.۹۹۱۵۱۵	۸۴۲.۸۶۹۸۵۴۶
۱۲۴۰.۴۷۲۱۴۲	۸۱۳.۶۷۲۶۲۴۸
۱۲۸۰.۵۸۷۵۱۲	۱۴۸۲.۰۸۳۷۴۶
۱۰۷۹.۵۱۵۳۲۴	۶۴۸.۹۱۲۷۳۷۴
۱۱۶۳.۰۷۵۷۸۱	۹۳۵.۳۰۶۲۹۷۸
۱۴۴۷.۷۶۳۶۲۸	۱۴۶۷.۲۸۴۱۲۱
۱۰۶۴.۳۶۷۰۷۲	۸۳۸.۵۷۲۱۹۶۲
۹۷۰.۶۴۶۴۳۰۳	۱۰۷۹.۴۰۴۳۳۶
۱۰۶۱.۲۸۳۴۷۶	۷۴۳.۹۲۲۷۱۶۶

۱۰۰۸۵۳۵۶۷۱	۱۰۱۱۳۵۱۸۱۷
۱۰۲۸۵۰۹۷۵۸	۱۳۸۸۹۷۲۵۶۵
۱۰۸۴۲۶۳۶۹۵	۱۵۳۷۵۲۴۱۳۶
۱۰۵۷۷۰۹۵۴۶	۱۰۵۳۱۴۹۲۷۳
۱۱۵۳۷۰۶۷۷۸	۱۴۸۹۶۵۷۵۶۳
۱۰۴۹۴۶۷۷۱۳	۱۰۴۲۱۵۵۴۳۵
۱۱۰۹۹۸۴۵۲۷	۶۸۶۸۶۴۹۵۴۷
۱۱۰۰۵۲۰۲۵۸	۱۱۸۱۹۱۴۸۱۶
۱۱۴۲۷۸۴۰۲۲	۹۶۳۱۹۰۱۵۱۱
۱۱۴۴۰۸۵۵۵۴	۸۱۹۳۳۹۷۳۴
۱۱۴۸۴۸۵۶۱۵	۱۳۰۷۸۷۸۸۰۲
۱۰۴۸۶۰۷۹۹۶	۸۳۵۷۷۹۵۰۹۹
۱۰۴۹۴۲۹۹۸۵	۸۱۰۷۱۴۳۲۸۹
۹۸۸۳۰۴۲۲۸	۷۳۰۰۲۶۵۵۷۷
۹۵۵۱۴۱۷۱۲۵	۷۰۸۶۲۹۹۱۰۴
۹۴۰۰۱۸۶۱۷۷	۱۲۹۴۴۲۹۶۰۵
۱۱۶۹۷۷۲۸۱	۱۰۶۳۴۷۵۹۴۹
۱۰۸۱۵۶۸۷۴۳	۱۲۴۹۹۶۲۴۱
۹۴۴۴۵۲۳۵۰۷	۱۴۵۷۰۰۹۱۸۵
۱۲۷۸۹۴۷۲۴۵	۱۴۴۰۸۷۸۸۶۴
۱۲۷۴۲۳۹۹۰۴	۱۵۴۸۷۸۱۸۸۵
۱۱۲۰۶۵۱۸۷۱	۷۳۰۹۶۲۲۶۵۹
۱۰۱۷۰۹۸۱۲۱	۱۰۹۸۰۷۴۰۴۱
۱۰۴۹۳۰۳۱۹۶	۹۴۲۷۶۳۶۸۶۷
۱۲۷۵۴۳۰۷۶۹	۸۴۲۶۱۹۲۱۰۱
۱۰۹۵۰۵۷۲۲۱	۷۴۱۹۸۶۳۰۸۱
۱۰۹۰۲۱۱۹۷۸	۶۸۳۵۰۳۷۸۷۱
۱۱۵۱۹۴۵۲۹۸	۱۲۱۲۳۴۸۷۴۴
۱۰۵۰۱۵۱۰۷۸	۱۵۴۱۸۸۱۵۸۸
۱۱۴۴۹۷۶۲۳	۷۴۰۴۳۹۷۵۸۷
۱۰۷۹۳۸۳۵۰۲	۱۲۷۲۵۰۶۳۲۳
۱۱۴۶۳۲۳۸۷۷	۱۵۸۵۲۲۴۶۹۳
۱۱۰۸۶۶۱۴۰۷	۱۲۷۲۱۲۵۴۱۸
۱۱۶۵۰۶۸۹۶۸	۱۵۷۹۳۳۲۱۱۲
۱۱۴۸۷۶۹۶۳۳	۱۰۹۳۹۷۷۱۶۷
۱۲۳۷۱۸۶۸۷۸	۱۵۹۵۷۷۰۷۳۸
۹۱۷۳۴۳۲۷۶۴	۱۴۹۶۳۹۸۳۱۲
۹۶۹۷۲۳۵۰۶۵	۹۷۴۴۱۳۹۴۵۵
۱۱۶۴۵۷۸۳۱۹	۱۲۹۰۱۴۰۰۹۴
۱۰۱۵۳۲۴۸۴۱	۸۶۲۶۱۳۹۹۶۲
۱۱۹۱۳۹۱۶۷۵	۱۴۸۳۰۹۴۶۵۸
۱۲۶۹۵۰۴۶۳۱	۹۳۶۶۷۷۲۴۵۸
۱۰۳۹۹۵۳۹۶۴	۱۳۲۶۹۳۱۸۱۲
۱۰۱۲۶۶۸۱۵۸	۱۰۳۵۴۴۸۶۰۲

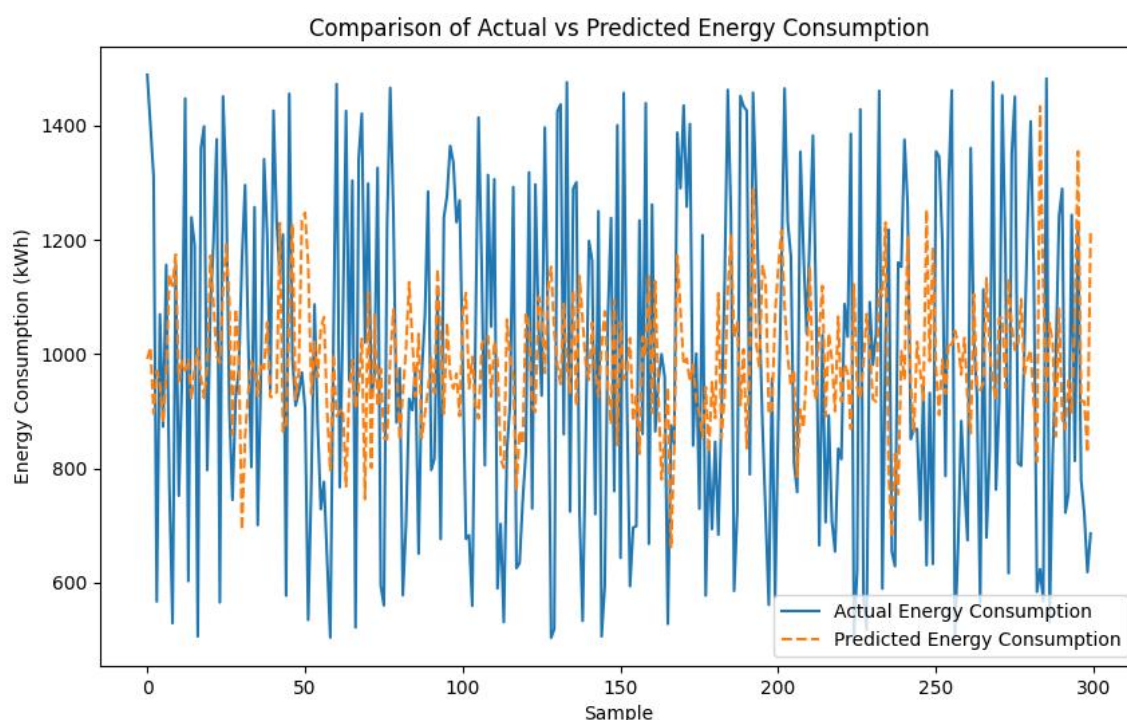
۱۲۷۶.۷۳۶۹۸۹	۶۲۱.۵۷۴۵۹۵۸
۱۲۳۵.۵۲۹۹۷۴	۱۰۵۹.۸۹۷۸۶۷
۱۰۸۶.۲۰۲۳۱۱	۱۳۳۲.۷۶۴۳۴۲
۹۸۱.۰۲۲۵۰۰۷	۹۲۴.۳۲۹۳۴۳۸
۱۱۸۸.۹۶۰۲۱۴	۱۴۴۰.۵۲۸۹۰۸
۱۱۳۳.۸۵۵۹۹	۸۰۸.۸۶۳۱۲۷۴
۹۳۳.۵۶۲۵۱۵۵	۱۰۰۴.۳۶۶۴۱۸
۱۲۵۶.۱۷۱۴۹۲	۱۰۱۶.۳۲۱۲۵۴
۱۱۴۰.۷۱۱۵۷۷	۱۳۵۷.۹۶۲۴۵۷
۱۱۲۵.۳۸۰۶۰۹	۱۲۰۱.۵۰۹۵۰۲
۹۹۷.۰۷۰۲۵۱۲	۱۴۹۲.۴۸۰۰۷۴
۱۳۶۵.۸۲۸۸۶۱	۱۳۹۹.۱۵۴۵۹۲
۱۰۵۴.۴۹۱۱۲۹	۷۴۸.۷۶۶۸۰۹۵
۹۹۰.۲۶۰۹۰۳	۱۵۶۷.۶۸۴۸۶۷
۱۱۰۲.۳۹۷۴۸۶	۱۳۹۶.۶۵۰۱۲۱
۱۳۵۶.۵۵۵۳۸	۱۴۸۹.۳۱۶۴۲۳
۱۱۹۸.۸۰۳۹۹۵	۱۲۳۹.۶۴۲۸۸۵
۱۱۵۵.۵۴۳۷۹۱	۱۴۸۶.۳۹۹۸۳۵
۱۰۹۴.۶۳۲۷۱۴	۱۳۱۵.۲۶۴۱۴۸
۱۱۹۸.۳۱۱۹۷۷	۸۳۶.۶۱۱۴۳۳۹
۹۳۴.۳۵۸۳۴۱۱	۹۷۵.۵۰۱۱۳۸۸
۹۳۲.۲۸۶۵۲۴۶	۱۱۷۴.۲۸۶۳۸۵
۹۴۲.۶۶۸۹۲۳	۸۳۱.۷۵۳۷۵۸
۸۵۳.۵۷۷۹۰۶۳	۶۴۹.۸۱۷۸۳۴۶
۱۰۳۲.۰۶۳۷۲۲	۱۳۷۰.۹۵۶۷۸
۱۰۳۸.۵۵۸۱۹۴	۶۳۰.۷۳۶۹۳۵۲
۱۰۹۰.۸۱۸۵۹۹	۶۹۵.۴۸۶۰۵۳۶
۱۰۶۹.۵۸۴۲۸۶	۱۴۱۰.۰۸۳۶۰۶
۱۰۶۵.۸۲۸۹۲۳	۱۰۷۰.۱۶۸۷۲۱
۱۱۱۸.۴۶۸۲۲۸	۹۶۴.۲۷۶۴۰۷۶
۱۰۳۷.۰۳۵۹۸۱	۷۷۹.۳۵۵۵۱۸۵
۱۰۰۴.۳۰۷۲۱۷	۶۷۴.۴۲۷۴۳۲۱
۱۲۶۰.۰۶۵۹۰۷	۶۷۰.۷۷۰۹۵۲
۱۱۳۵.۸۴۳۴۳۹	۱۱۳۶.۹۴۲۰۳۵
۱۳۲۱.۷۱۸۴۹۶	۱۱۹۹.۳۳۱۶۶۵
۹۶۹.۵۶۵۱۵۰۵	۸۳۸.۵۶۳۸۵۱۶
۱۳۲۷.۰۸۸۰۹۵	۱۲۰۱.۶۳۴۵۱۹
۱۱۵۷.۰۶۳۷۰۶	۱۱۸۶.۰۸۴۹۹۳
۱۲۲۱.۷۵۱۸۳۱	۱۴۰۲.۶۹۰۲۱۲
۱۱۸۱.۷۸۲۰۵۳	۱۳۱۱.۹۳۴۷۶۶
۱۰۸۰.۲۷۵۲۱۳	۱۳۸۴.۸۷۴۸۶۳
۱۲۴۳.۸۷۴۹۰۳	۱۵۷۱.۵۵۴۴۹۲
۱۰۵۶.۵۰۷۰۸۶	۱۰۶۶.۵۲۹۱۰۷
۱۰۶۰.۲۲۶۲۸۳	۹۸۳.۳۹۸۲۶۶۲

۱۱۰۶۰۸۳۰۱۶	۱۰۶۷۶۷۰۳۷۲
۸۸۷۵۶۵۳۴۵۲	۱۴۶۵۰۲۶۰۱۴۲
۱۰۹۳۹۲۵۷۷۴	۱۴۰۳۱۵۴۶۱۷
۱۰۷۴۸۱۴۹۳۱	۱۳۰۴۳۶۴۲۷۷
۱۰۲۳۵۰۴۸۷۵	۱۳۰۲۹۹۱۵۱۹
۱۳۵۲۴۸۶۵۱۶	۷۱۰۹۱۱۷۹۰۱
۱۲۸۸۹۲۰۳۶۴	۹۰۰۰۷۷۵۰۰۳۸
۱۰۵۶۷۴۸۲۳۱	۱۲۴۵۰۲۷۲۷۳۴
۱۴۶۵۰۷۸۸۲۳	۷۲۵۰۹۴۶۶۲۷۹
۱۰۹۳۷۵۵۷۶۲	۱۳۹۰۰۲۵۸۸۷۲
۱۲۵۳۱۶۹۹۳۷	۱۲۸۴۳۶۵۴۰۹
۱۲۰۸۰۰۲۹۰۴	۱۲۹۳۸۵۱۸۸۱
۱۰۵۴۳۴۱۴۵۸	۹۲۲۰۷۰۱۲۰۱۸
۱۲۳۱۳۴۴۴۴۴	۱۲۹۷۳۳۲۲۱۳
۹۷۷۳۷۲۶۸۷۴	۱۰۷۷۶۸۷۴۸۴
۱۰۳۷۶۱۸۸۸۶	۱۰۶۵۰۸۴۱۹۳
۸۶۷۱۹۲۹۲۶۲	۱۳۱۷۰۲۷۶۱۹۶
۱۱۱۲۰۲۰۷۱۹۷	۱۳۶۹۸۰۰۲۹۷
۱۱۳۷۵۲۲۶۲۶	۱۰۰۸۸۳۵۰۴۳
۱۱۹۱۹۶۱۸۴۷	۹۸۵۰۷۷۰۲۹۴۶
۱۰۶۵۹۴۰۵۲۴	۱۴۹۴۱۹۴۷۲۱
۹۶۰۸۳۷۶۷	۹۲۵۰۰۷۱۲۶۵
۱۲۸۲۰۱۱۸	۱۴۰۲۰۷۷۳۳۸
۱۳۰۵۵۳۷۰۴۳	۱۰۷۲۸۸۸۵۵۳
۱۱۲۶۷۲۳۸۵۶	۸۵۲۰۵۸۶۷۴۱
۱۲۳۵۰۱۷۷۳۵۴	۹۶۷۰۹۵۱۲۶۷۹
۱۱۷۲۰۹۳۷۱۰۲	۷۵۱۰۷۴۲۳۹۴
۱۱۹۶۴۲۵۱۳۶	۱۰۶۶۴۲۶۳۹
۱۰۴۷۲۱۹۷۰۴	۱۰۰۳۰۱۲۰۹۴۲
۹۷۵۰۱۰۱۷۳۸۶	۸۶۵۰۲۹۲۸۱۲۹
۹۸۰۴۹۸۶۳۰۸	۱۲۴۷۰۹۸۷۲۸۱
۱۱۹۹۳۳۵۰۹۴	۹۸۲۰۴۴۹۱۰۷۹
۱۲۶۶۳۳۳۹۲۸	۱۳۶۰۰۵۵۹۲۴
۹۹۱۰۲۸۲۴۸۲۱	۶۲۱۰۴۳۳۷۴۹
۹۲۶۳۳۰۹۴۴۵	۸۰۷۰۰۹۷۸۳۰۵
۱۰۲۹۳۲۸۲۳۷	۷۱۱۰۴۸۵۷۷۱۷
۹۷۰۵۶۵۰۳۱۹	۸۲۳۰۱۸۳۴۶۴۴
۱۳۰۹۴۵۱۵۲۴	۱۳۹۷۰۷۷۵۶۶۱
۹۲۴۰۹۱۸۴۷۰۲	۱۳۹۴۰۹۹۷۸۵۷
۱۳۰۵۰۹۰۴۴۶۷	۱۳۹۹۰۲۰۶۳۴۷
۱۱۴۲۰۲۳۴۶۸۴	۷۸۱۰۵۴۴۸۷۱۸
۹۴۲۰۶۲۲۸۱۸۶	۱۴۲۹۰۰۴۲۲۶
۱۱۱۷۸۹۹۵۷۴	۱۳۶۳۰۱۹۱۹۷۸
۱۰۶۴۲۰۱۸۴۷	۱۳۴۴۰۸۰۰۸۲۳

۱۲۰۴۸۱۳۱۶۹	۱۲۰۲.۱۷۷۴۱۱
۹۸۴.۱۰۱۳۳۰۷	۶۴۱.۷۵۴۳۵۴۴
۱۰۰۲.۷۷۵۴۸۹	۱۲۷۲.۰۶۴۲۸۴
۱۱۲۴.۳۵۸۵۲۹	۱۴۶۷.۸۷۹۷۲۷
۱۱۰۳.۰۵۵۷۲۶	۶۹۹.۹۳۲۳۵۹۶
۱۲۴۸.۶۶۱۳۸۲	۷۸۸.۰۸۳۸۸۶۵
۱۳۸۶.۲۵۵۲۷۷	۱۴۲۱.۹۴۵۳۰۶
۱۲۹۰.۴۶۵۰۲۴	۶۴۸.۸۹۷۳۳۱۲
۱۱۵۲.۹۳۲۹۶۸	۱۳۸۱.۶۱۹۰۵۹
۱۱۴۴.۶۴۲۲۱۴	۱۲۶۶.۰۸۱۰۰۵
۱۳۳۵.۷۴۰۱۶۱	۹۲۷.۲۴۵۶۶۵۹
۹۵۰.۸۱۳۳۴۱۷	۱۴۷۸.۳۲۶۵۴۵
۱۲۴۰.۶۴۴۴۸۵	۷۸۲.۵۷۷۰۷۵۹
۱۲۳۲.۴۳۷۸۹۱	۱۴۸۹.۳۰۷۵۹۴
۱۱۰۹.۸۷۵۶۸	۱۳۴۳.۵۵۶۶۲۴
۱۱۸۵.۴۹۲۲۵۶	۹۲۰.۴۳۸۴۷۶۸
۱۲۰۳.۹۲۲۳۹۴	۱۲۳۰.۱۸۷۸۴۵
۹۸۱.۲۰۰۰۱۰۴	۱۰۱۷.۴۶۳۹۹۳
۱۰۴۳.۶۷۲۰۱۱	۱۱۲۸.۵۳۷۹۲۵
۱۰۲۹.۲۱۱۲۲۷	۱۵۰۵.۰۲۱۱۶۷
۱۰۰۴.۰۷۶۲۵۱	۱۵۲۵.۸۶۱۱۱۲
۹۷۶.۰۲۴۵۲۰۵	۱۱۳۴.۳۴۲۶۴۴
۹۸۵.۲۷۰۱۲۶	۸۰۸.۴۱۶۹۰۴۴
۱۱۲۸.۶۴۵۲۵۱	۱۴۳۰.۸۱۷۴۷۴
۱۰۵۵.۶۳۴۷۱۸	۶۶۲.۶۱۶۲۷۶۵
۱۰۵۶.۹۲۳۱۴۶	۷۶۹.۸۵۷۵۱۳۶
۱۲۳۸.۷۲۸۵۷	۷۵۴.۳۶۹۱۱۳۹
۱۰۹۹.۶۱۵۰۶۹	۱۱۸۲.۴۱۷۹۹۸
۱۱۸۹.۲۷۲۲۷۳	۱۵۴۳.۰۳۶۷۵۸
۱۱۰۸.۶۴۹۴۷۷	۷۸۶.۷۸۳۶۳۳۳
۱۰۵۶.۹۵۹۴۹۱	۱۴۸۳.۰۰۱۳۱۹
۱۰۰۶.۹۸۰۴۶۵	۷۱۸.۲۵۷۹۹۰۲
۹۰۹.۵۶۹۸۰۳۶	۱۱۹۰.۳۸۹۷۶۸
۱۰۳۱.۰۹۰۱۶۵	۱۰۹۰.۸۳۶۹۲۵
۱۰۲۶.۲۸۲۵۵۹	۶۷۰.۳۱۷۹۸۹۴
۹۷۷.۵۱۳۴۵۸۲	۱۰۵۲.۶۰۸۳۰۴
۹۸۵.۴۴۸۶۳۴۹	۱۴۸۸.۶۳۲۲۷
۱۱۶۰.۵۵۶۰۰۳	۷۰۰.۰۵۴۱۹۸۲
۱۲۴۵.۴۱۲۴۷۲	۸۸۹.۴۰۳۳۲۸۳
۱۱۰۹.۷۱۳۵۱۱	۱۵۴۹.۳۷۳۷۲۹
۹۸۱.۷۹۶۹۱۸۲	۶۱۸.۷۳۱۲۱۵۴
۱۱۱۴.۱۵۶۷۷۹	۱۵۵۱.۳۹۵۱۱۸
۹۹۹.۶۲۵۵۱۰۳	۱۲۸۸.۶۶۷۰۱۲
۹۹۲.۷۲۶۹۸۷۹	۱۳۲۸.۶۸۸۷۲۹

۱۰۳۱.۰۴۷۱۶	۱۱۱۵.۱۷۱۲۶۱
۱۱۹۶.۴۳۶۲۴۴	۹۶۵.۹۶۱۷۴۴۷
۸۸۱.۸۸۰۸۵۱۷	۱۱۶۹.۲۸۱۳۶۳
۱۲۵۷.۳۰۲۳۰۶	۱۰۹۲.۰۶۶۴۶۳
۸۹۲.۲۹۲۷۸۸۵	۱۱۷۹.۵۳۱۳۱
۱۱۲۰.۰۵۵۷۶۷	۱۲۶۲.۴۳۵۴۰۸
۱۰۲۸.۱۶۳۳۳۳	۱۵۶۹.۳۰۴۰۱۵
۱۲۰۸.۶۶۱۱۴	۱۴۲۸.۷۳۰۴
۱۰۸۰.۷۵۲۱۲۱	۱۴۸۹.۳۱۱۷۴۵
۱۱۷۱.۰۶۲۷۸۹	۷۲۳.۹۰۸۷۰۱۴
۱۱۱۴.۶۴۷۴۱	۱۵۶۹.۱۹۸۶۹۲
۱۳۰۷.۴۴۰۱۱	۱۵۰۳.۸۲۸۰۵۱
۱۲۱۲.۶۸۲۴۱۷	۱۲۶۳.۹۸۶۷۲۷
۹۳۸.۹۳۶۹۸۹۸	۸۰۶.۵۷۷۲۲۸۵
۱۲۳۹.۲۸۳۵۲۸	۷۷۷.۹۳۱۳۲۶۶
۱۳۰۰.۱۷۷۴۴	۷۰۲.۷۶۷۷۵۵۸
۱۱۳۲.۲۱۰۴۰۴	۱۳۶۰.۵۷۰۷۲۷

مجموعه داده‌ها نشان می‌دهند که در برخی موارد، پیش‌بینی‌ها از دقت بالایی برخوردار هستند و در برخی دیگر تفاوت‌هایی وجود دارد که می‌تواند ناشی از عواملی چون تغییرات محیطی، ویژگی‌های خاص ساختمان‌ها یا عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی دقیق شرایط باشد. همچنین، این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از پارامترهای ورودی مدل مانند شرایط اقلیمی، ویژگی‌های معماری، یا داده‌های ناکامل باشند. به طور کلی، استفاده از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی مصرف انرژی، به خصوص در ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب، می‌تواند به بهبود دقت طراحی و استفاده بهینه از انرژی کمک کند. این مدل‌ها می‌توانند به طراحان و مهندسان کمک کنند تا الگوهای مصرف انرژی را بهتر درک کرده و بهینه‌سازی‌های لازم را انجام دهند.



شکل ۱. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده

ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب با چالش‌های زیادی از جمله دمای بالا، رطوبت زیاد، و مصرف انرژی بالا برای سیستم‌های سرمایشی روبه‌رو هستند. برای طراحی ساختمان‌هایی که بتوانند مصرف انرژی را کاهش داده و آسایش حرارتی را بهبود بخشند، انتخاب مواد مناسب برای دیوار، سقف، و کف اهمیت بسیاری دارد. بر اساس تحلیل ماتریس همبستگی و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل مفهومی زیر ارائه می‌شود:

بر اساس ماتریس همبستگی، تأثیر مواد ساختمانی بر مصرف انرژی بررسی شد. ضخامت دیوارها (Wall_Thickness) و سقف‌ها (Roof_Thickness) ارتباط مستقیمی با مصرف انرژی نشان دادند ($r = -0.01$). این نشان می‌دهد که ضخامت به‌تنهایی تأثیر زیادی بر مصرف انرژی ندارد. اما جنس دیوارها، سقف‌ها و کف‌ها تأثیر بیشتری دارند: دیوار بتنی (Wall_Type_Concrete) و دیوار آجری (Wall_Type_Brick) با همبستگی مثبت ($r = +0.34$) عملکرد مشابهی از نظر نفوذ حرارتی نشان می‌دهند.

سقف چوبی (Roof_Type_Wood_Roof) و سقف بتنی (Roof_Type_Concrete_Roof) دارای همبستگی منفی ($r = -0.47$) هستند، که نشان می‌دهد سقف چوبی تأثیر بهتری در کاهش مصرف انرژی دارد.

کف سرامیکی (Floor_Type_Ceramic_Floor) و کف چوبی (Floor_Type_Wood_Floor) با همبستگی منفی ($r = -0.53$) تفاوت عملکرد قابل‌توجهی دارند، و کف سرامیکی برای مناطق گرم و مرطوب مناسب‌تر است. اجزای مدل پیشنهادی در این پژوهش عبارتند از:

مصالح دیوار: استفاده از دیوارهای بتنی یا آجری با ضریب انتقال حرارتی پایین برای کاهش نفوذ گرما.

مصالح سقف: به کارگیری سقف‌های چوبی یا ترکیبی به دلیل تهویه بهتر و کاهش انتقال حرارت.

مصالح کف: استفاده از کف‌های سرامیکی به جای کف چوبی به دلیل کاهش ذخیره حرارتی.

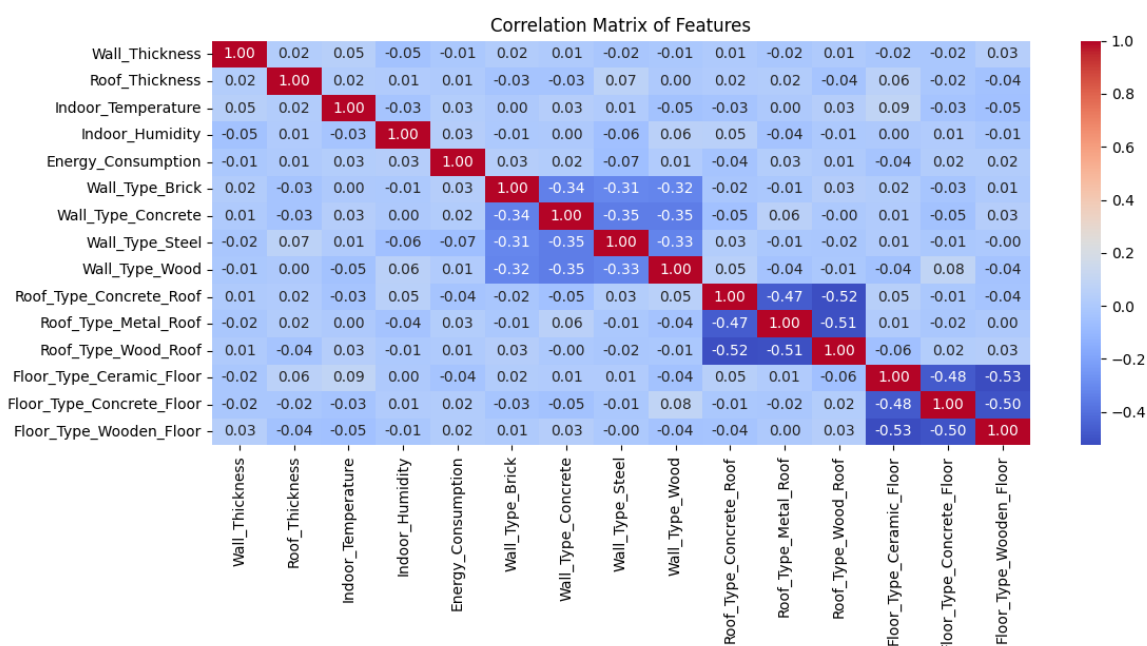
بهینه‌سازی داخلی: کنترل دمای داخلی و رطوبت برای افزایش آسایش حرارتی.

کاهش مصرف انرژی: انتخاب ترکیب مناسب مواد برای جلوگیری از افزایش نیاز به سیستم‌های سرمایشی.

این مدل مفهومی نشان می‌دهد که برای طراحی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب، استفاده از ترکیب بهینه مصالح ساختمانی نقش کلیدی دارد.

جنس دیوار، سقف و کف تأثیر مستقیم بر مصرف انرژی دارند و استفاده از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی به شناسایی بهترین راهکارها کمک می‌کند. هدف

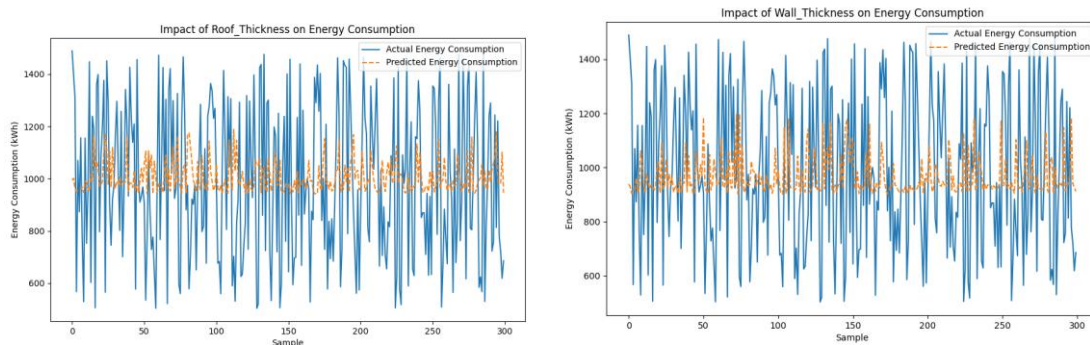
اصلی این مدل، کاهش مصرف انرژی، افزایش آسایش حرارتی، و دستیابی به پایداری محیطی است.

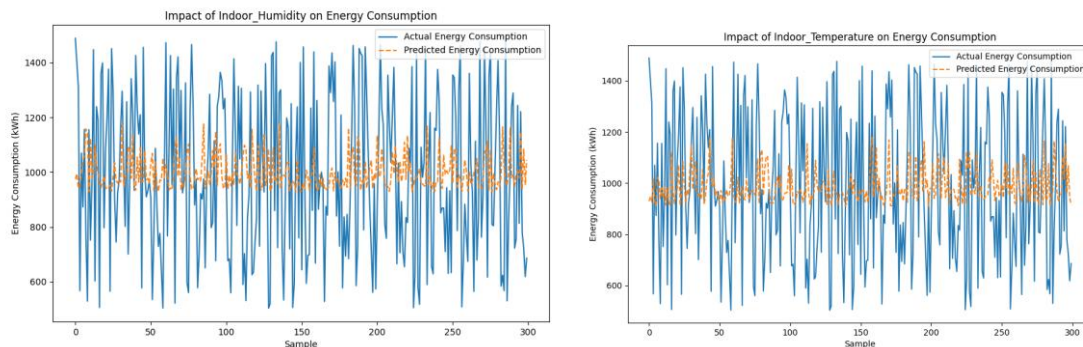


شکل ۲. ماتریس همبستگی

بر این اساس، نتایج شبیه‌سازی براساس نوع ویژگی ضخامت دیوار، ضخامت سقف، دمای داخل، رطوبت داخل، مصرف انرژی، نوع دیوار (به عنوان مثال،

آجری، بتنی، فولادی، چوبی)، نوع سقف (به عنوان مثال، بتنی، فلزی، چوبی) و نوع کف (به عنوان مثال، سرامیکی، بتنی، چوبی) به شرح زیر است.





شکل ۳. نتایج شبیه‌سازی

برای تحلیل نتایج مصرف انرژی در زمینه مدل مفهومی ساختمان‌های پایدار در مناطق گرم و مرطوب، با استفاده از شبیه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی، باید به تحلیل ارتباطات بین مصرف انرژی واقعی و مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده پرداخته و نقش ویژگی‌های مختلف ساختمان (مانند ضخامت دیوارها، سقف، دمای داخلی و رطوبت داخلی) را در این پیش‌بینی‌ها مورد بررسی قرار دهیم. در جدول ارائه‌شده، پنج نمونه از مصرف انرژی واقعی و پیش‌بینی‌شده در ساختمان‌ها آمده است. این مقایسه‌ها به شرح زیر است:

جدول ۲. نمونه نتایج شبیه‌سازی شده

شناسه	مصرف انرژی واقعی (kWh)	مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده (kWh)
۵۲۱	۱۴۸۹.۱۷	۹۹۱.۳۶
۷۳۷	۱۴۰۰.۲۳	۱۰۱۲.۳۹
۷۴۰	۱۳۱۰.۶۳	۸۹۶.۱۴
۶۶۰	۵۶۷.۱۱	۹۷۰.۷۷
۴۱۱	۱۰۶۹.۹۷	۹۴۹.۳۷

با توجه به این داده‌ها، می‌توان تفاوت‌های قابل توجهی بین مصرف واقعی و پیش‌بینی‌شده مشاهده کرد. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از چند عامل باشند:

شناسه ۵۲۱: مصرف واقعی (۱۴۸۹.۱۷ kWh) تقریباً ۵۰٪ بیشتر از مصرف پیش‌بینی‌شده (۹۹۱.۳۶ kWh) است. این تفاوت می‌تواند ناشی از عواملی مانند تغییرات در دمای محیط، رفتار غیرمنتظره ساکنین یا مشکلات در پیش‌بینی مدل باشد.

شناسه ۷۳۷: مصرف واقعی (۱۴۰۰.۲۳ kWh) نسبت به پیش‌بینی‌شده (۱۰۱۲.۳۹ kWh) تفاوت معقولی دارد. این تفاوت ممکن است ناشی از نوسانات جزئی در پیش‌بینی مدل ANN باشد.

شناسه ۷۴۰: مصرف انرژی واقعی (۱۳۱۰.۶۳ kWh) در مقابل پیش‌بینی‌شده (۸۹۶.۱۴ kWh) یک تفاوت قابل توجه دارد که نشان‌دهنده پیچیدگی‌های بیشتری در شبیه‌سازی مدل است.

شناسه ۶۶۰: در این مورد، مصرف واقعی (۵۶۷.۱۱ kWh) به طور قابل توجهی پایین‌تر از مصرف پیش‌بینی‌شده (۹۷۰.۷۷ kWh) است. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل ANN نمی‌تواند به‌درستی شرایط خاص این ساختمان را پیش‌بینی کند.

شناسه ۴۱۱: مصرف انرژی واقعی kWh ۱۰۶۹.۹۷ و مصرف پیش‌بینی شده kWh ۹۴۹.۳۷، تفاوت کمتری دارند، که نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً بهتر مدل در

این مورد است.

جدول ۳. ارزیابی عملکرد

ویژگی	تأثیر (MSE)
Wall_Thickness	۹۴۳۵۶.۶۶
Roof_Thickness	۹۰۰۲۱.۶۲
Indoor_Temperature	۸۶۶۹۸.۳۷
Indoor_Humidity	۹۲۷۵۱.۱۸

برای تحلیل دقیق‌تر نحوه تأثیر ویژگی‌های مختلف ساختمان بر پیش‌بینی مصرف انرژی، به MSE (Mean Squared Error) مرتبط با هر ویژگی توجه

می‌کنیم:

Wall_Thickness (ضخامت دیوارها) با MSE برابر ۹۴۳۵۶.۶۶: ضخامت دیوارها تأثیر زیادی بر مصرف انرژی دارند. دیوارهای ضخیم‌تر می‌توانند به‌طور

مؤثری عایق‌بندی کنند و از اتلاف انرژی جلوگیری کنند، به ویژه در مناطق گرم و مرطوب که نیاز به خنک‌کننده‌های زیاد وجود دارد. این موضوع ممکن است

در پیش‌بینی‌های مدل ANN با دقت بیشتری منعطف شود.

Roof_Thickness (ضخامت سقف) با MSE برابر ۹۰۰۲۱.۶۲: سقف‌ها به عنوان یکی از عناصر اصلی در انتقال حرارت از ساختمان به محیط بیرون، نقش

مهمی در تعیین مصرف انرژی دارند. ضخامت بیشتر سقف‌ها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند.

Indoor_Temperature (دمای داخلی) با MSE برابر ۸۶۶۹۸.۳۷: دمای داخلی در مصرف انرژی تأثیر زیادی دارد. به ویژه در مناطق گرم و مرطوب، دما

نقش کلیدی در تعیین نیاز به تهویه مطبوع و مصرف انرژی ایفا می‌کند.

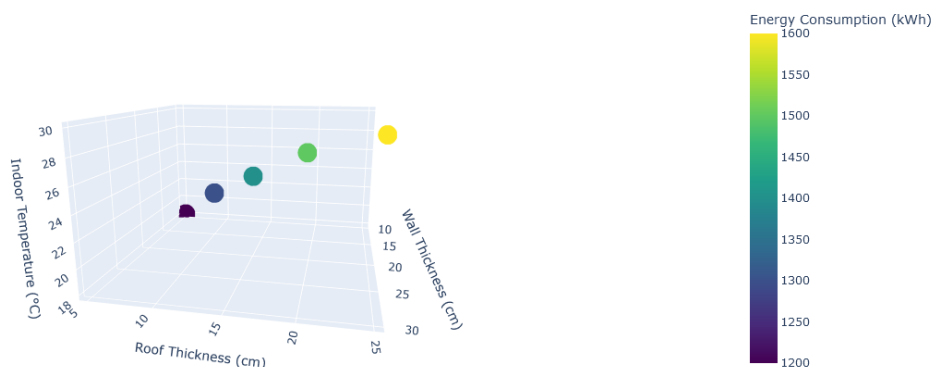
Indoor_Humidity (رطوبت داخلی) با MSE برابر ۹۲۷۵۱.۱۸: رطوبت داخلی نیز یکی از عوامل مهم در مصرف انرژی است. رطوبت بالا می‌تواند نیاز

به سیستم‌های تهویه مطبوع را افزایش دهد که در نتیجه مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

با توجه به اینکه MSE به عنوان معیاری از دقت مدل در پیش‌بینی مصرف انرژی استفاده می‌شود، می‌توان به این نتیجه رسید که ضخامت دیوارها و سقف

بیشترین تأثیر را بر مصرف انرژی دارند. این امر به این دلیل است که این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم بر انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند. دمای داخلی و رطوبت داخلی

نیز نقش‌های مهمی ایفا می‌کنند، زیرا تغییرات در این دو عامل می‌تواند نیاز به مصرف انرژی برای حفظ شرایط مطلوب محیطی را تغییر دهد.



شکل ۴. مدل سه بعدی شبیه سازی شده

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی انرژی و تحلیل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در این پژوهش نشان داد که مصرف انرژی ساختمان در اقلیم های گرم و مرطوب بیش از هر چیز تحت تأثیر پارامترهایی نظیر ضخامت دیوار، ضخامت سقف، دمای داخلی، و میزان رطوبت نسبی فضای درونی قرار دارد. به ویژه، مشاهده شد که افزایش ضخامت دیوار و سقف تا حدود بهینه می تواند انتقال حرارت را کاهش داده و بار سرمایشی ساختمان را به صورت معناداری کم کند. این یافته هم راستا با نتایج پژوهش های پیشین است که بر اهمیت ویژگی های فیزیکی پوسته ی ساختمان در کنترل حرارت و مصرف انرژی تأکید دارند (3, 20).

از سوی دیگر، تحلیل آماری مدل نشان داد که دقت پیش بینی شبکه عصبی در مقایسه با مدل های کلاسیک آماری بیشتر بوده و توانسته است الگوهای غیرخطی بین متغیرها را به درستی شناسایی کند. این نتیجه تأییدکننده ی مطالعات متعددی است که استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و شبکه های عصبی مصنوعی را در مدل سازی مصرف انرژی در ساختمان ها پیشنهاد کرده اند (2, 4, 5). در این زمینه، مدل توسعه یافته در پژوهش حاضر با ساختار چندلایه و استفاده از الگوریتم بهینه سازی نرخ یادگیری، توانست به همگرایی مناسب و دقت بالا در پیش بینی برسد که مشابه رویکردهای جدید مبتنی بر الگوریتم XGBoost در مطالعات اخیر است (21).

یکی از یافته های برجسته در این پژوهش، تفاوت بین مصرف انرژی واقعی و مصرف پیش بینی شده در برخی ساختمان ها بود که نشان دهنده ی نقش پررنگ رفتار انسانی در الگوهای مصرف است. این موضوع با نتایج مطالعات روان شناختی و رفتاری هم خوانی دارد که تأکید می کنند عوامل رفتاری، فرهنگی و نگرشی می توانند اثر قابل توجهی بر مصرف انرژی داشته باشند (10-12). به عنوان نمونه، پژوهش های مبتنی بر نظریه رفتار برنامه ریزی شده نشان داده اند که آگاهی زیست محیطی و ادراک ریسک از تخریب محیطی، موجب افزایش تمایل به رفتارهای صرفه جویانه می شود (14). این یافته ها در بافت فرهنگی ایران نیز تأیید شده اند و نشان می دهند که باورهای دینی و اجتماعی می توانند در شکل دهی به رفتارهای انرژی محور نقش تعدیل گر ایفا کنند (10).

بر این اساس، یکی از دلایل اصلی تفاوت میان داده های واقعی و پیش بینی شده در این پژوهش را می توان تفاوت در سبک زندگی و رفتار مصرف کنندگان انرژی دانست. همان گونه که (13) تأکید کرده اند، مؤلفه های روان شناختی همچون نگرانی های زیست محیطی، احساس مسئولیت فردی و انگیزش درونی در جوامع

در حال توسعه تأثیر تعیین‌کننده‌ای در میزان مشارکت افراد در رفتارهای پایدار دارند. بنابراین، تبیین نتایج این پژوهش نیازمند نگاه چندبعدی است که علاوه بر داده‌های فنی و اقلیمی، متغیرهای فرهنگی و اجتماعی را نیز در بر گیرد.

از سوی دیگر، یافته‌ها نشان داد که مصالح مورد استفاده در سقف و دیوار تأثیر بسزایی بر کارایی انرژی دارند؛ به‌ویژه مصالح چوبی و آجری با ضریب انتقال حرارتی پایین، کاهش قابل‌توجهی در بار سرمایشی ساختمان ایجاد کردند. این یافته با نتایج مطالعات (23) و (9) هم‌راستا است که تأکید کرده‌اند انتخاب مصالح و فرم ساختمان در مناطق گرم و مرطوب، بیشترین تأثیر را بر عملکرد حرارتی دارند. بر اساس مدل‌های بهینه‌سازی ارائه‌شده توسط (3)، حتی تغییرات کوچک در جنس و ضخامت مصالح می‌تواند در مقیاس شهری منجر به کاهش محسوس مصرف انرژی شود.

از منظر محیطی، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در اقلیم‌های گرم و مرطوب، مدیریت رطوبت داخلی و تهویه طبیعی نقش مهمی در حفظ آسایش حرارتی دارد. این امر با نتایج مطالعات (8) و (28) هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند سیستم‌های ترکیبی تهویه هوشمند و تولید انرژی تجدیدپذیر می‌توانند در ساختمان‌های مناطق گرمسیری به‌صورت کارآمد عمل کنند. همچنین، مطالعات تجربی (22) نشان می‌دهد که شکل شهری و تراکم بناها نیز از طریق ایجاد جزایر حرارتی، مستقیماً بر مصرف انرژی تأثیرگذار است. در همین راستا، مدل پیشنهادی این پژوهش با در نظر گرفتن داده‌های اقلیمی واقعی هرمزگان و ویژگی‌های رطوبتی منطقه، نشان داد که جهت‌گیری صحیح بنا و انتخاب مصالح بازتابنده می‌تواند مصرف انرژی سرمایشی را بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش دهد.

تحلیل خطای مدل (MSE) نشان داد که بیشترین حساسیت شبکه عصبی به متغیرهای ضخامت دیوار و سقف و سپس به متغیرهای اقلیمی (دما و رطوبت) است. چنین نتیجه‌ای با یافته‌های (7) و (6) هم‌سو است که تأکید کرده‌اند مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی پدیده‌های وابسته به زمان و اقلیم، از جمله سطح رطوبت و مصرف انرژی، عملکرد برتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی دارند. افزون بر این، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تطبیقی با قابلیت توقف زودهنگام (early stopping) در این پژوهش سبب شد تا مدل از بیش‌برازش (overfitting) جلوگیری کرده و دقت نهایی بهبود یابد.

نتایج همچنین نشان داد که استفاده از شبکه‌های عصبی در ترکیب با شبیه‌سازی انرژی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری در مراحل طراحی معماری مورد استفاده قرار گیرد. این نتیجه با یافته‌های (29) و (5) هم‌خوانی دارد که کاربرد یادگیری عمیق را در پیش‌بینی رفتار حرارتی محیط‌های مصنوعی از جمله گلخانه‌ها و ساختمان‌های هوشمند اثبات کرده‌اند. بر اساس این نتایج، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌صورت پویا به تغییرات محیطی واکنش نشان دهند و استراتژی‌های کنترلی را در زمان واقعی (real-time) تنظیم کنند.

از سوی دیگر، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی انرژی در سطح ساختمان بدون مشارکت کاربران و سیاست‌های حمایتی فراگیر ممکن نیست. این مسئله با ادبیات مربوط به آموزش و توسعه پایدار در حوزه آموزش عالی هم‌راستاست، جایی که محققان تأکید دارند رویکرد کل‌نهادی و آموزش هم‌افزا لازمی‌گسترش رفتارهای زیست‌پایدار است (17، 18). مطابق با نتایج (16)، دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی می‌توانند با ادغام اصول توسعه پایدار در برنامه‌های آموزشی، نسل جدیدی از طراحان و مهندسان را تربیت کنند که نسبت به چالش‌های زیست‌محیطی آگاه‌تر باشند. چنین رویکردی در ترکیب با یافته‌های (19) که بر نقش فرآیندهای مشارکتی و هم‌آفرین در ارتقای مصرف پایدار تأکید دارد، اهمیت ارتباط میان آموزش، فناوری و فرهنگ را در تحقق اهداف توسعه پایدار نشان می‌دهد.

در کنار ابعاد آموزشی، نتایج این پژوهش با ادبیات مربوط به رفتار مصرف پایدار و انگیزش زیست‌محیطی نیز هم‌سو است. مطابق با مطالعات (15) و (12)، آگاهی زیست‌محیطی و انگیزش درونی نقش میانجی در پیوند بین دانش و اقدام دارند؛ به عبارت دیگر، دانش به‌تنهایی منجر به رفتار پایدار نمی‌شود مگر آن‌که با انگیزش و نگرانی محیطی همراه باشد. از این‌رو، درک نتایج مدل حاضر مستلزم توجه به تعامل میان آگاهی، نگرش و رفتار مصرفی است.

از جنبه‌ی فنی، پژوهش حاضر با نتایج (9) و (22) در ارتباط است که بر نقش فرم شهری و مورفولوژی در عملکرد حرارتی تأکید دارند. مشابه این مطالعات، یافته‌های ما نشان داد که جهت‌گیری مناسب بنا نسبت به باد و تابش خورشید، و استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا می‌تواند تا حدود ۲۰ درصد مصرف انرژی را کاهش دهد. افزون بر آن، نتایج این پژوهش از منظر اقلیمی با الگوی بهینه‌سازی ساختمان‌های مسکن اجتماعی در ایران نیز هم‌خوانی دارد که در آن بهینه‌سازی پیکربندی و استفاده از مدل‌سازی پارامتریک برای افزایش کارایی انرژی پیشنهاد شده است (23).

در مجموع، یافته‌های این پژوهش مؤید این نکته است که ترکیب داده‌های شبیه‌سازی انرژی با مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مراحل طراحی ساختمان منجر شود. استفاده از چنین مدل‌هایی، نه تنها دقت پیش‌بینی مصرف انرژی را افزایش می‌دهد بلکه در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاران در تدوین استانداردهای انرژی برای اقلیم‌های مختلف باشد. هم‌راستا با یافته‌های (1)، چنین مدل‌هایی مسیر جدیدی برای ارزیابی جامع ساختمان‌ها از منظر انرژی، اقتصاد و محیط‌زیست فراهم می‌کنند و زمینه‌ساز ارتقای پایداری در بخش ساخت‌وساز خواهند بود.

این پژوهش با وجود ارائه مدل مفهومی دقیق و مبتنی بر داده، دارای چند محدودیت است. نخست آن‌که داده‌های مورد استفاده از شبیه‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار EnergyPlus و داده‌های اقلیمی استاندارد جمع‌آوری شدند، در حالی‌که تغییرات ریزمقیاس مانند اثر بادهای محلی و سایه‌ی ساختمان‌های مجاور ممکن است نتایج واقعی را متفاوت سازند. دوم آن‌که شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های مربوط به ساختمان‌های خاص آموزش دیده و تعمیم نتایج آن به سایر مناطق یا انواع ساختمان‌ها نیازمند بازآموزی مدل با داده‌های جدید است. سوم آن‌که جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی پایداری — مانند هزینه‌های نگهداری، رضایت کاربران یا پذیرش فرهنگی — در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفتند، هرچند در تحلیل‌های رفتاری به‌طور ضمنی اشاره شد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، از مدل‌های یادگیری ترکیبی (Hybrid Models) استفاده شود که شبکه‌های عصبی را با الگوریتم‌های ژنتیک یا روش‌های چندهدفه بهینه‌سازی ترکیب کنند تا علاوه بر پیش‌بینی مصرف انرژی، بتوانند بهینه‌ترین ترکیب مصالح و جهت‌گیری‌ها را نیز تعیین کنند. همچنین، گردآوری داده‌های میدانی واقعی از سنسورهای محیطی در مناطق گرم و مرطوب می‌تواند به صحت مدل‌ها بیفزاید. بررسی هم‌زمان ابعاد فرهنگی، اقتصادی و اجتماعی پایداری در کنار متغیرهای فنی نیز می‌تواند درک جامع‌تری از تعامل انسان و محیط فراهم آورد.

در حوزه‌ی کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تدوین استانداردهای طراحی اقلیم‌پایدار در سازمان نظام مهندسی و وزارت راه و شهرسازی قرار گیرد. همچنین، به کارگیری مدل‌های شبکه عصبی در فرآیند صدور پروانه‌ی ساخت و ارزیابی انرژی ساختمان‌ها می‌تواند ابزار کارآمدی برای کنترل مصرف انرژی در مراحل طراحی باشد. ایجاد بانک‌های داده‌ی انرژی برای هر اقلیم، توسعه‌ی سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی و آموزش طراحان و مهندسان در استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، از مهم‌ترین گام‌ها در تحقق ساختمان‌های پایدار در ایران خواهد بود.

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

The building sector remains one of the largest energy consumers and contributors to global greenhouse gas emissions, accounting for nearly 40% of total energy use and 30% of carbon emissions worldwide (1, 2). As cities expand and urbanization accelerates, the environmental burden imposed by energy-intensive construction practices and unsustainable design approaches has become a critical concern. In this context, the concept of sustainable buildings—structures designed to minimize energy demand while maximizing environmental efficiency and occupant comfort—has emerged as a global priority (3). This is especially vital in hot and humid regions, where high cooling loads and thermal discomfort make energy management a pressing challenge.

Modern sustainable design increasingly relies on data-driven methodologies, where computational simulations and artificial intelligence (AI) models enable precise predictions of building energy performance (4). Among these, Artificial Neural Networks (ANNs) have proven to be particularly effective in modeling complex nonlinear relationships between physical, climatic, and behavioral variables influencing energy consumption (5). ANN-based frameworks can integrate multiple variables such as material type, insulation thickness, orientation, humidity, and occupant behavior, producing predictive insights far beyond traditional statistical models (6).

Numerous studies confirm that combining simulation-based analysis with machine learning improves prediction accuracy and aids in optimizing energy efficiency during the early design stages (3). However, in many developing countries, including Iran, systematic frameworks that integrate simulation, optimization, and behavioral factors remain underdeveloped (8).

Although technical modeling tools exist, gaps in localized data, climatic calibration, and user behavior representation restrict their practical impact. Therefore, developing conceptual models grounded in both empirical simulation and AI-based prediction can bridge this divide, offering architects and engineers a robust decision-making framework (9).

Furthermore, sustainability in architecture is no longer confined to material and energy performance; it also encompasses social, behavioral, and psychological dimensions that shape how occupants interact with their environment (10, 11). Evidence suggests that personal environmental awareness and pro-environmental attitudes strongly influence energy use behaviors (12, 14). In developing countries, promoting such awareness—rooted in cultural and religious values—can foster long-term sustainability (13, 15). Hence, any attempt to model energy consumption should not ignore the behavioral variability among occupants, as this may account for up to 30% of total energy use variation (11).

Parallel to behavioral dimensions, educational and institutional frameworks also play an essential role in advancing sustainability awareness. Studies on higher education institutions have demonstrated that integrating sustainability into curricula can significantly reshape students' values and professional practices toward environmentally responsible design (16, 17). In this context, a "whole-institution approach" has been proposed to align universities, industries, and governments in promoting sustainability-oriented design and decision-making (18, 19).

At the technical level, early-stage optimization of design parameters such as wall thickness, roof insulation, and building orientation has a profound influence on reducing cooling loads in warm and humid climates (20, 23). Optimization studies indicate that using low-conductivity materials and reflective surfaces can reduce energy use by up to 25%, demonstrating the potential of computational models in informing sustainable architecture (3). Additionally, urban morphology—the arrangement, spacing, and height of buildings—affects not only energy consumption but also the Urban Heat Island (UHI) effect (9, 22). Understanding how these environmental and structural factors interact is critical for holistic design in coastal provinces such as Hormozgan, where both solar radiation and humidity are extreme.

Machine learning has opened new avenues in this regard, allowing for real-time prediction and adaptive control of building energy performance. Deep learning models like optimized XGBoost and hybrid ANN systems have achieved superior accuracy in forecasting residential and office energy consumption (7, 21). These systems can adapt dynamically to changing environmental conditions and user behaviors, ensuring continuous optimization. Moreover, as (8) highlights, integrating renewable energy management within intelligent building systems is essential for sustainable urban development.

In summary, the literature converges on a central principle: sustainable building design in hot and humid regions requires a multi-dimensional approach that combines AI-driven simulation, contextual climatic adaptation, and behavioral understanding (1). Yet, most existing models remain generic, lacking contextual sensitivity to Iran's climatic, cultural, and behavioral realities. Accordingly, the present study develops a conceptual model for sustainable building design in Hormozgan, integrating simulation data from EnergyPlus with an ANN predictive framework to identify and prioritize the parameters most critical to energy efficiency in this specific climatic context.

Methods and Materials

This applied research adopted a quantitative–analytical approach combining simulation and machine learning analysis. The study first identified key design and environmental variables affecting building energy consumption, including wall thickness, roof thickness, material type, ventilation system, orientation, and occupant behavior. Using EnergyPlus, multiple design scenarios were simulated under realistic climate conditions specific to Hormozgan Province.

The output variables—total energy consumption, indoor temperature, and relative humidity—were then processed through a supervised Artificial Neural Network (ANN) model using the MLPRegressor algorithm. The model architecture included two hidden layers (each with ten neurons), a learning rate of 0.001, and an early-stopping mechanism to prevent overfitting. Seventy percent of the data were used for training and thirty percent for testing. Model performance was evaluated using the Mean Squared Error (MSE) metric.

Findings

The analysis demonstrated that the proposed ANN model achieved high predictive accuracy for building energy consumption across all simulated scenarios. The mean squared error (MSE) scores confirmed that the model successfully captured the nonlinear relationships between architectural and environmental parameters. The sensitivity analysis indicated that wall thickness (MSE = 94356.66), roof thickness (MSE = 90021.62), indoor temperature (MSE = 86698.37), and humidity (MSE = 92751.18) were the most influential variables affecting energy use.

Among the material types, wooden roofs and brick walls with low thermal conductivity yielded the most significant reductions in total energy demand. Comparative simulation results revealed that increasing wall and roof thickness within an optimal range led to a 12–18% decrease in cooling energy demand. Furthermore, adjusting the building orientation to minimize solar gain and improve natural airflow reduced overall energy use by approximately 10%.

The difference between actual and predicted energy consumption in certain cases was attributed to behavioral variations among occupants, such as inconsistent use of ventilation systems or shading devices. This finding highlights the importance of integrating human behavioral factors into energy modeling to enhance prediction reliability.

Overall, the ANN model demonstrated superior performance in pattern recognition, convergence stability, and adaptability to diverse climatic data. The proposed conceptual framework successfully combined physical, climatic, and behavioral parameters, offering a practical design strategy for sustainable building development in hot and humid regions like Hormozgan.

Discussion and Conclusion

The results underscore that energy efficiency in hot and humid climates depends not only on technological interventions but also on climate-sensitive design decisions. The ANN-based framework proved effective in identifying critical parameters that architects can manipulate to optimize energy consumption, confirming the vital role of wall and roof design, orientation, and humidity management in achieving thermal comfort.

Furthermore, the integration of simulation and AI methods represents a major step toward data-informed architectural design, bridging the gap between theoretical sustainability and applied construction practices. By quantifying the effects of multiple variables simultaneously, this approach offers designers a decision-support tool capable of predicting energy outcomes under different design configurations.

The model's performance aligns with international findings emphasizing the efficacy of artificial intelligence in sustainable architecture. Beyond its predictive accuracy, however, the framework also highlights the need for interdisciplinary collaboration—bringing together engineers, architects, behavioral scientists, and policymakers—to translate computational insights into actionable standards.

From a practical standpoint, the study's findings suggest that even modest changes in wall thickness, material type, and ventilation strategies can yield substantial improvements in energy efficiency. Applying these insights to housing developments in coastal provinces could significantly reduce the cooling load and improve residents' comfort without imposing excessive construction costs.

In conclusion, the study demonstrates that combining building energy simulation with artificial neural network modeling provides a powerful methodological foundation for sustainable building design in hot and humid climates. The proposed conceptual model contributes both theoretically and practically to the field by identifying key parameters for energy optimization, supporting policy formulation, and guiding future architectural design standards in Iran.

References

1. Hafez FS, Sa'di B, Gamal S, Taufiq-Yap Y, Alrifay M, Seyedmahmoudian M, et al. Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research. *Energy Strategy Reviews*. 2023;45:101013.
2. Khalil M, McGough A, Pourmirza Z, Pazhoohesh M, Walker S. Machine Learning, Deep Learning and Statistical Analysis for forecasting building energy consumption - A systematic review. *Eng Appl Artif Intell*. 2022;115:105287.
3. Elbeltagi E, Wefki H, Khallaf R. Sustainable Building Optimization Model for Early-Stage Design. *Buildings*. 2023;13(1):74.
4. Runge J, Zmeureanu R. Forecasting Energy Use in Buildings Using Artificial Neural Networks: A Review. *Energies*. 2019.
5. Mohandes SR, Zhang X, Mahdiyar A. A comprehensive review on the application of artificial neural networks in building energy analysis. *Neurocomputing*. 2019;340:55-75.
6. Wunsch A, Liesch T, Broda S. Groundwater level forecasting with artificial neural networks: a comparison of long short-term memory (LSTM), convolutional neural networks (CNNs), and non-linear autoregressive networks with exogenous input (NARX). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2021;25:1671-87.
7. Wei Y, Xia L, Pan S, Wu J, Zhang X, Han M, et al. Prediction of occupancy level and energy consumption in office building using blind system identification and neural networks. *Applied Energy*. 2019.
8. Tamimi S, Farhang. Management of Construction and Creation of an Intelligent Energy Production System for Buildings Utilizing Available Renewable Resources. *Pars Project Management*. 2025;1(1):124-50.
9. Murathan EK, Manioğlu G. Impact of urban form on energy performance, outdoor thermal comfort, and urban heat Island: A case study in Istanbul. *Energy and Buildings*. 2025:116109.
10. Karimi S, Liobikienė G, Alitavakoli F. The Effect of Religiosity on Pro-environmental Behavior Based on the Theory of Planned Behavior: A Cross-Sectional Study among Iranian Rural Female Facilitators. *Front Psychol*. 2022;13:745019.
11. Mansoor M, Wijaksana TI. Predictors of pro-environmental behavior: Moderating role of knowledge sharing and mediatory role of perceived environmental responsibility. *J Environ Plan Manag*. 2022;66:1-19.
12. Zeng Z, Zhong W, Naz S. Can Environmental Knowledge and Risk Perception Make a Difference? The Role of Environmental Concern and Pro-Environmental Behavior in Fostering Sustainable Consumption Behavior. *Sustainability*. 2023;15:4791.
13. Díaz MF, Charry A, Sellitti S, Ruzzante M, Enciso K, Burkart S. Psychological Factors Influencing Pro-environmental Behavior in Developing Countries: Evidence From Colombian and Nicaraguan Students. *Front Psychol*. 2020;11:580730.
14. Saari UA, Damberg S, Frömling L, Ringle CM. Sustainable consumption behavior of Europeans: The influence of environmental knowledge and risk perception on environmental concern and behavioral intention. *Ecol Econ*. 2021;189:107155.
15. Yusliza M, Amirudin A, Rahadi R, Athirah NNS, Ramayah T, Muhammad Z, et al. An Investigation of Pro-Environmental Behaviour and Sustainable Development in Malaysia. *Sustainability*. 2020;12:7083.
16. Ruiz-Mallén I, Heras M. What Sustainability? Higher Education Institutions' Pathways to Reach the Agenda 2030 Goals. *Sustainability*. 2020;12:1290.
17. Weiss M, Barth M, Wiek A, von Wehrden H. Drivers and Barriers of Implementing Sustainability Curricula in Higher Education- Assumptions and Evidence. *High Educ Stud*. 2021;11:42-64.
18. Kohl K, Hopkins C, Barth M, Michelsen G, Dlouhá J, Razak DA, et al. A whole-institution approach towards sustainability: A crucial aspect of higher education's individual and collective engagement with the SDGs and beyond. *Int J Sustain High Educ*. 2021;23:218-36.
19. Longoria LC, López-Forniés I, Sáenz DC, Sierra-Pérez J. Promoting sustainable consumption in Higher Education Institutions through integrative co-creative processes involving relevant stakeholders. *Sustain Prod Consum*. 2021;28:445-58.
20. Mayhoub MMG, El Sayad ZMT, Ali AAM, Ibrahim MG. Assessment of Green Building Materials' Attributes to Achieve Sustainable Building Façades Using AHP. *Buildings*. 2021;11(10):474.
21. Baqer NR, Rashidi-Khazaei P. Residential Building Energy Usage Prediction Using Bayesian-Based Optimized XGBoost Algorithm. *IEEE Access*. 2025.
22. Sharston R, Singh M. Urban morphology, urban heat island (UHI) and building energy consumption: A critical review of methods and relationships among influential parameters. *Building Services Engineering Research & Technology*. 2025:01436244251339727.
23. Gholami H, Kamelnia H, Mahdavinnejad MJ, Sangin H. Optimizing Building Configuration and Orientation for Social Housing Projects in Iran. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2025;16(2):289-308.
24. Yafi E, Tehseen S, Haider S. Impact of Green Training on Environmental Performance through Mediating Role of Competencies and Motivation. *Sustainability*. 2021;13:5624.
25. Wang J, Yang M, Maresova P. Sustainable Development at Higher Education in China: A Comparative Study of Students' Perception in Public and Private Universities. *Sustainability*. 2020;12:2158.
26. Nahar N, Hossain Z, Mahiuddin S. Assessment of the environmental perceptions, attitudes, and awareness of city dwellers regarding sustainable urban environmental management: a case study of Dhaka, Bangladesh. *Environ Dev Sustain*. 2022.

27. Quoquab F, Mohammad J, Sukari NN. A multiple-item scale for measuring "sustainable consumption behaviour" construct: Development and psychometric evaluation. *Asia Pac J Mark Logist*. 2019;31:791-816.
28. Jafri A, Villeneuve E, Agelin-Chaab M, Hangan H. Experimental investigation of building mock-ups and air source heat pumps in cold climates. *Energy and Built Environment*. 2025.
29. Escamilla-García A, Soto-Zarazúa GM, Toledano-Ayala M, Rivas-Araiza E, Gastélum-Barrios A. Applications of Artificial Neural Networks in Greenhouse Technology and Overview for Smart Agriculture Development. *Applied Sciences*. 2020.