



طراحی جزئیات بهینه دیوارهای جنوبی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان ها با کاربری یادگیری عمیق

محمد نیرومند¹، محمد جلیلی^{2*}، حسین یاراحمدی³

1- گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

2- گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

3- گروه کامپیوتر، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

*Mohammad.jalili@iau.ac.ir

چکیده

یکی از چالش های اساسی در معماری پایدار، کاهش میزان مصرف انرژی در ساختمان ها است. دیوارهای جنوبی نقش کلیدی در کنترل انتقال حرارت و تابش خورشید به درون ساختمان ها ایفا می کنند. این پژوهش با هدف طراحی بهینه مصالح دیوارهای جنوبی و با روش تحقیق توصیفی - تحلیلی، به تاثیر لایه های مصالح این نوع از دیوارها بر کنترل میزان انتقال حرارت و همچنین مصرف انرژی ساختمان ها پرداخته است. در ادامه پژوهش یک نمونه دیوار جنوبی با مصالح معمولی از نظر میزان انتقال حرارت توسط نرم افزار دیزاین بیلدر بررسی شده است و بار دیگر میزان انتقال حرارت یک دیوار طراحی شده با مصالح نوین مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دیوار جنوبی طراحی شده برای هر لایه آن، چند گزینه مصالح با توجه به معیارهای حرارتی و فیزیکی انتخاب شده است؛ سپس با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق، ترکیب بهینه مصالح از بین گزینه های متنوع و پیش انتخاب شده با بررسی غیرخطی معیارها تعیین می گردد. نتایج نشان می دهد که دیوار جنوبی طراحی شده با کمک مصالح نوین و یادگیری عمیق میزان انتقال حرارت را متناسب با شرایط آب و هوایی تمام فصول یک اقلیم گرم، از فضای بیرون به داخل 51/80 درصد و همچنین از فضای داخل به بیرون 34/29 درصد در بازه زمانی یک سال کاهش داده است و همین موضوع باعث کاهش بار سرمایش و گرمایش فضای داخل و بهبود میزان مصرف انرژی می شود.

کلیدواژه ها: دیوارهای جنوبی، کاهش مصرف انرژی ساختمان ها، طراحی جزئیات، یادگیری عمیق، نرم افزار دیزاین بیلدر

Designing optimal details of southern walls to reduce buildings energy consumption using deep learning

Mohammad Niroumand¹, Mohammad Jalili^{2*}, Hossein Yarahmadi³

1- Department of Architecture, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran

2- Department of Architecture, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran

3- Department of Computer Engineering, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran

* Mohammad.jalili@iau.ac.ir

Received: 11 August 2025 Accepted: 13 May 2026

Abstract

One of the fundamental challenges in sustainable architecture is reducing energy consumption in buildings. Southern walls play a key role in controlling heat transfer and solar radiation into buildings. This study aims to design optimal materials for southern walls and, using a descriptive-analytical research method, examines the effect of material layers in this type of wall on controlling heat transfer and energy consumption in buildings. In the following study, a southern wall sample with conventional materials was examined for heat transfer using Design Builder software, and once again, the heat transfers of a wall designed with new materials was evaluated. In the designed southern wall, for each layer, several material options have been selected according to thermal and physical criteria; then, using a deep learning model, the optimal combination of materials is determined from the various and pre-selected options by nonlinear examination of the criteria. The results show that the southern wall designed with the novel materials and deep learning has reduced the heat transfer rate from outside to inside by 51.80% and from inside to outside by 34.29% over a period of one year, in accordance with the weather conditions of all seasons of a hot climate, and this reduces the cooling and heating load of the interior space and improves energy consumption.

Keywords: Southern Walls, Buildings Energy Consumption Reduction, Optimal Details, Deep Learning, Design Builder Software

1- مقدمه

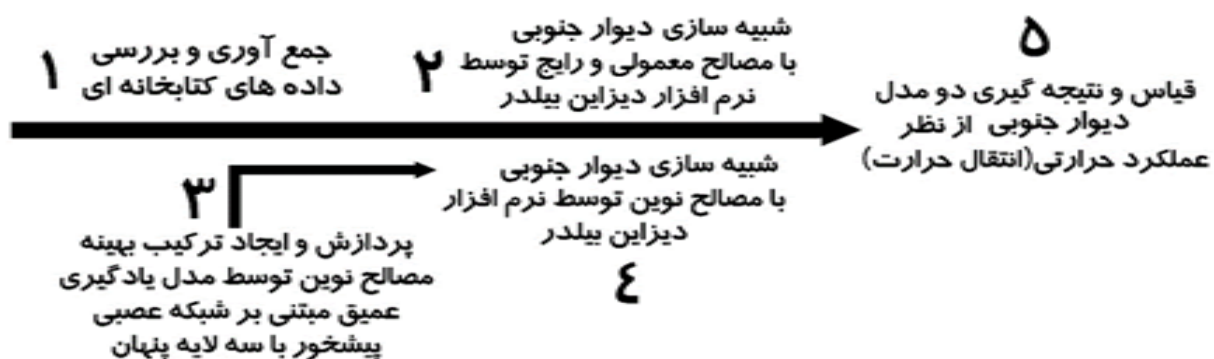
رشد روزافزون ساخت‌وسازها و افزایش هزینه‌ها در این حوزه در دهه‌های اخیر موجب افزایش چشمگیر توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش ساختمان شده است [1]. در این میان، دیوارهای جنوبی به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای طراحی ساختمان در شهرهایی با اقلیم گرم مانند تهران، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل انتقال حرارتی ساختمان‌ها ایفا می‌کنند [2]. انتخاب مصالح مناسب برای دیوارها همواره با چالش‌هایی همراه بوده است. از یک سو نیاز به کاهش انتقال حرارت و از سوی دیگر تنوع مصالح با ویژگی‌های حرارتی و فیزیکی، انتخاب بهینه مصالح را به مسئله‌ای پیچیده تبدیل کرده است [3]. در این پژوهش، با بهره‌گیری از منابع کتابخانه‌ای معتبر، نرم افزار شبیه‌سازی و یادگیری عمیق به طراحی بهینه مصالح دیوارهای جنوبی پرداخته شده است. ابتدا عملکرد حرارتی دیواری جنوبی با مصالح متعارف مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس برای هر یک از لایه‌های آن، گزینه‌های مصالح با در نظر گرفتن معیارهای حرارتی و فیزیکی انتخاب شدند. در مرحله بعد با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق، ترکیب بهینه مصالح از میان گزینه‌های پیش‌انتخاب شده تعیین گردید. این روش امکان تحلیل همزمان معیارهای مختلف و کشف روابط غیرخطی بین آنها را فراهم می‌سازد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نشان می‌دهد که دیوار طراحی شده با این روش می‌تواند به بهبود قابل توجهی در عملکرد حرارتی دست یابد. این پژوهش گامی مؤثر در جهت تلفیق دانش معماری با فناوری‌های نوین برای دستیابی به راهکارهای بهینه در معماری پایدار محسوب می‌شود.

2- روش پژوهش

این مطالعه با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. ابتدا داده‌های لازم از طریق مطالعات کتابخانه‌ای جمع‌آوری شده و منابع معتبر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، عملکرد حرارتی دیوار جنوبی در دو حالت با مصالح متعارف و بهینه‌شده شبیه‌سازی شده است. برای بهینه‌سازی مصالح، مدل یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی پیشخور با سه لایه پنهان به کار گرفته شده است.

این مدل با تحلیل روابط غیرخطی بین معیارهای حرارتی و فیزیکی، ترکیب بهینه‌ای از میان مصالح نوین و متنوع برای هر لایه دیوار مشخص کرده است. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به صورت کمی تحلیل و مقایسه شده‌اند (شکل 1).



شکل 1 فرآیند پژوهش

3- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش دیوارها در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها پرداخته‌اند. بررسی‌ها نشان داده‌است که دیوارهای جنوبی به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، تأثیر قابل توجهی بر کنترل انتقال حرارتی دارند. برخی پژوهش‌ها به مقایسه عملکرد انواع مختلف عایق دیوارهای ساختمان پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که طراحی مناسب این عناصر می‌تواند در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کند [4].

در این زمینه، تحقیق‌هایی نیز به بررسی ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در دیوارها توجه کرده‌اند و تأثیر پارامترهایی مانند ضریب هدایت حرارتی و جرم حجمی مصالح را بر عملکرد حرارتی ساختمان تحلیل نموده‌اند [5]. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته در بهینه‌سازی مصالح ساختمانی مورد توجه قرار گرفته است. برخی پژوهشگران از الگوریتم‌های هوشمند برای بهبود ویژگی‌های مصالح استفاده کرده‌اند [6]. در این میان، یادگیری عمیق به‌عنوان یکی از روش‌های نو، امکان تحلیل روابط پیچیده بین

پارامترهای مختلف مصالح را فراهم می‌سازد. این روش با قابلیت یادگیری الگوهای غیرخطی، می‌تواند ترکیب‌های بهینه‌ای از مصالح را پیشنهاد دهد که با معیارهای چندان سازگار باشند [7]. یادگیری عمیق به‌ویژه در مواردی که نیاز به بررسی همزمان چندین پارامتر و یافتن روابط پنهان بین آن‌ها وجود دارد، کارایی بالایی از خود نشان داده‌اند. با وجود بررسی‌های گسترده در زمینه دیوارها و مصالح ساختمانی، تحقیق‌های قابل توجهی در خصوص ترکیب این دو حوزه با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق پرداخته نشده‌است. به طور خاص در مورد بهینه‌سازی مصالح دیوارهای جنوبی با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق و شبیه‌سازی حرارتی، شکاف پژوهشی محسوسی مشاهده می‌شود. بیشتر پژوهش‌های موجود بر روی طراحی پوسته‌های جنوبی ساختمان متمرکز بوده‌اند. بنابراین، پژوهش حاضر با ترکیب دانش معماری و مواد، مدل یادگیری عمیق و شبیه‌سازی حرارتی، رویکردی نوین در این زمینه ارائه می‌دهد که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است (جدول 1).

جدول 1 مقایسه پژوهش حاضر با تحقیق‌های صورت گرفته پیشین

جدول 2 مقایسه پژوهش حاضر با تحقیقات صورت گرفته پیشین

مزایای زیست محیطی	مزایای اقتصادی
کاهش بار سرمایش ساختمان	افزایش ارزش ملک
بهبود آسایش حرارتی ساکنان	صرفه جویی اقتصادی بلند مدت
کاهش مصرف انرژی سیستم های مکانیکی	کاهش هزینه های ناشی از مصرف انرژی
کاهش اثر جزیره گرمایی شهری	
بهبود کیفیت هوای داخلی	
کاهش انتشار گازهای گلخانه ای	

5- تاثیر مصالح دیوارهای جنوبی بر میزان مصرف انرژی ساختمان ها

دیوارهای جنوبی معمولاً از چهار لایه اصلی تشکیل شده اند که هر کدام نقش مشخصی در کنترل انتقال حرارت ایفا می کنند (شکل 2).

لایه بیرونی که در تماس مستقیم با تابش خورشید قرار دارد، عموماً از آجرهای نما تیره رنگ (ضخامت 100 میلی متر با بافت متراکم و صاف، ضریب هدایت حرارتی 0/84 وات بر مترکلون، ظرفیت گرمایی 800 ژول بر کیلوگرم کلون و جرم حجمی 1700 کیلوگرم بر متر مکعب) ساخته شده است. [12]. این لایه با کاهش جذب حرارت سطحی، نقش کلیدی در عملکرد تابستانی دارد.

لایه زیرین آجر که به عنوان هسته عایق عمل می کند، معمولاً از پلی استایرن با رنگ زرد تیره (ضخامت 80 میلی متر با بافت متراکم، ضریب هدایت 0/0340 وات بر مترکلون) تشکیل شده و با ظرفیت گرمایی 1400 ژول بر کیلوگرم کلون و جرم حجمی 35 کیلوگرم بر متر مکعب هم در کاهش انتقال حرارت تابستانی و هم در ذخیره سازی حرارت زمستانی مؤثر است [13]. لایه زیرین عایق از بلوک سیمانی با رنگ تیره با ضخامت 150 میلی متر و بافت خشن، ضریب هدایت 0/51 وات بر مترکلون، ظرفیت گرمایی 1000 ژول بر کیلوگرم کلون و جرم حجمی 1400 کیلوگرم بر مترمکعب می باشد که بیشترین ضخامت را در دیوار دارد.

لایه داخلی که با فضای ساختمان در تماس است، عموماً از گچ گچیوم با رنگ روشن سفید (ضخامت 20 میلی متر با بافت متراکم و صاف، ضریب هدایت 0/4 وات بر مترکلون و ظرفیت گرمایی 1000 ژول بر کیلوگرم کلون) ساخته می شود و با جرم حجمی حدود 1000 کیلوگرم بر مترمکعب به تعدیل نوسانات دمایی کمک می کند [14، 15].

برای دستیابی به عملکرد بهینه دیوار جنوبی در اقلیم گرم، مقادیر معیارهای حرارتی هر لایه باید به صورت یکپارچه تنظیم شوند؛ لایه بیرونی بهتر است دارای ضریب هدایت حرارتی پایین برای کاهش تبادل حرارت، ظرفیت گرمایی متوسط برای تعدیل نوسانات دما و جرم حجمی بالا برای ذخیره حرارت باشد.

لایه عایق نیازمند ضریب هدایت بسیار پایین برای مقاومت حرارتی بالا، ظرفیت گرمایی متوسط و جرم حجمی کم برای سبکی است. لایه سازه ای باید

تحقیقاتی پیشین	روش استفاده شده	محدودیت ها	نوآوری پژوهش حاضر
[4]	شبیه سازی انرژی	بررسی تنها یک لایه از مصالح نمای ساختمان	شبیه سازی انرژی چندین لایه از مصالح دیوارهای جنوبی ساختمان
[5]	شبیه سازی انرژی، آزمایش های عملی	بهبود سازی تک معیاری مصالح	بهبود سازی چندمعیاری مصالح با یادگیری عمیق
[6]	استفاده از یک نوع الگوریتم هوشمند	بهبود مصالح ساختمانی	بهبود مصالح جهت بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان با چندین ابزار هوشمند
[7]	بررسی یادگیری ماشین و عمیق	بهبود مصالح ساختمانی	الگوریتم های یادگیری عمیق، شبیه سازی مصرف و مصالح و داده های کتابخانه ای معتبر

4- دیوارهای جنوبی و مزایای آن ها

دیوارهای جنوبی به عنوان عناصر معماری نقش کلیدی در کنترل ورود و خروج حرارت به ساختمان های واقع در نیمکره شمالی ایفا کرده اند. دیوار جنوبی با بهره گیری از طراحی هوشمند مصالح، در زمستان مانند یک جاذب حرارتی عمل می کند؛ تابش خورشید را جذب و با کمک جرم حرارتی مصالح گرما را به تدریج به فضای داخلی منتقل می کند.

همزمان، لایه های عایق از هدررفت این گرما به بیرون جلوگیری می کنند. در تابستان، پوشش بیرونی بازتابنده بخش عمده ای از تابش خورشید را منعکس کرده، در حالی که عایق های حرارتی مانع از نفوذ گرمای باقیمانده به داخل می شوند. این رفتار دوگانه، نیاز به سیستم های گرمایشی و سرمایشی را به حداقل می رساند.

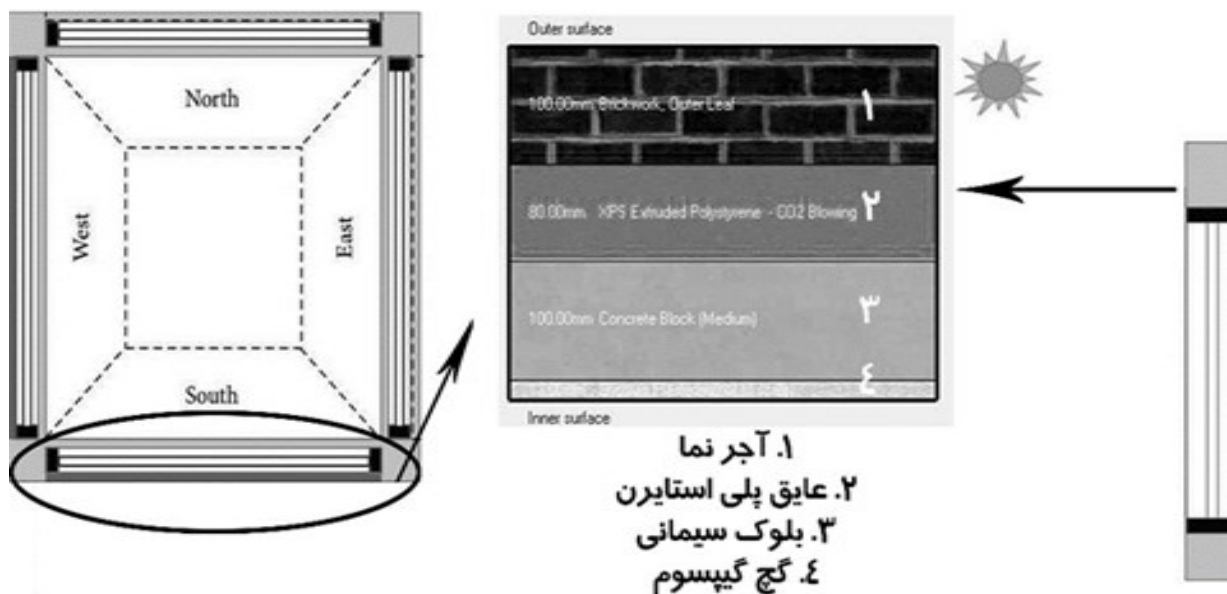
مصالح با ظرفیت حرارتی بالا نیز نوسانات دمایی را کاهش داده و یک محیط پایدار ایجاد می کنند. در نتیجه، این عملکرد یکپارچه بدون نیاز به انرژی اضافی، تعادل حرارتی ساختمان را در تمام فصول حفظ می کند [8]. مطالعات نشان داده اند که عملکرد حرارتی دیوارها به ویژگی های حرارتی و فیزیکی مصالح به کار رفته از جمله ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، جرم حجمی، رنگ، ضخامت و بافت وابسته بوده است [9، 10].

طراحی و اجرای بهینه دیوارهای جنوبی باعث به وجود آمدن مزایای زیست محیطی، اقتصادی و معماری قابل توجهی در فضای شهری می شود و در جدول 2 قابل مشاهده است [11].

همزمان با کنترل انتقال حرارت در فصول مختلف، مصرف انرژی را به حداقل می‌رساند [16,17].

ضریب هدایت متوسط، ظرفیت گرمایی بالا برای ذخیره حرارت و جرم حجمی متوسط داشته باشد.

لایه داخلی مناسب دارای ضریب هدایت پایین، ظرفیت گرمایی بالا برای پایداری دمایی و جرم حجمی متوسط است. این ترکیب یکپارچه از مصالح،



شکل 2 اجزای تشکیل‌دهنده دیوارهای جنوبی

4. ضخامت لایه: ضخامت مصالح طبق استانداردها انتخاب می‌گردد. تغییر ضخامت‌ها می‌تواند نتایج را غیرواقعی کند؛ بنابراین این معیار با دقت و بر اساس شیوه‌های مرسوم ساخت انتخاب می‌شود.

5. رنگ و میزان جذب تابش: رنگ از عوامل بسیار مؤثر در جذب تابش خورشید است. برای مثال مصالح بیرونی روشن کمترین جذب تابش و آجرهای تیره بیشترین جذب را دارند. این داده در طراحی اولیه اهمیت دارد و به عنوان ورودی مدل یادگیری عمیق نیز در کنار سایر ویژگی‌ها استفاده می‌شود.

6. بافت سطحی: بافت متراکم باعث جذب بیشتر حرارت سطحی و بافت‌های زبر یا متخلخل موجب پراکندگی انرژی تابشی می‌شوند. بنابراین در مرحله انتخاب مصالح، بافت یکی از شاخص‌های تصمیم‌گیری می‌باشد و به صورت کیفی در مدل به صورت دسته‌بندی شده وارد می‌گردد.

7. دسترسی پذیری و امکان اجرای مصالح: تمامی مصالح انتخاب‌شده باید از نظر اجرایی قابل استفاده در ساختمان‌سازی باشند. به همین دلیل مصالحی که در پروژه‌های واقعی قابل اجرا نمی‌باشند کنار گذاشته می‌شود.

8. سازگاری با اقلیم شهر تهران: رفتار حرارتی مصالح در اقلیم گرم و نیمه‌خشک مبنای انتخاب می‌باشد. برخی مصالح که در اقلیم سرد یا مرطوب عملکرد خوبی دارند اما در اقلیم گرم ناکارآمد هستند کنار گذاشته می‌شود.

6- مدل یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی پیشخور با سه لایه پنهان

یادگیری عمیق به عنوان زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی، الگوریتم‌هایی را شامل می‌شود که با تقلید از ساختار مغز انسان، قادر به یادگیری الگوهای پیچیده از داده‌ها هستند. شبکه‌های عصبی، هسته اصلی این سیستم‌ها

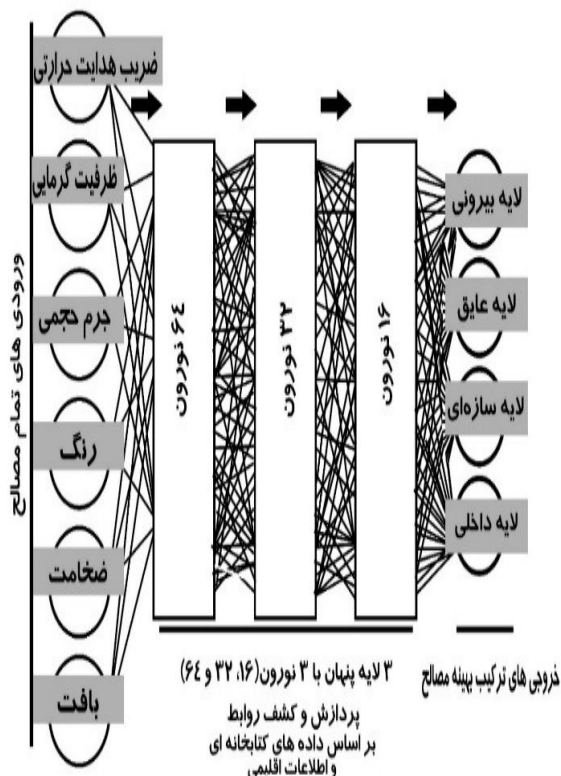
5-1- معیارهای انتخاب مصالح برای شبیه‌سازی اولیه و ورود به مدل یادگیری عمیق

همچنین معرفی گزینه‌ها به مدل یادگیری عمیق، مجموعه‌ای از معیارهای حرارتی، فیزیکی و اجرایی در نظر گرفته شده است. این معیارها بر اساس اهداف اصلی پژوهش یعنی کاهش انتقال حرارت دیوار جنوبی در اقلیم گرم و امکان‌پذیری اجرای مصالح در ساخت‌وساز ایران تعیین می‌گردند. معیارهای انتخاب مصالح به صورت زیر می‌باشند:

1. ضریب هدایت حرارتی: این شاخص مهم‌ترین معیار در عملکرد حرارتی دیوار محسوب می‌شود. مصالح با لاندا پایین‌تر برای کاهش انتقال حرارت از بیرون به داخل در تابستان و از داخل به بیرون در زمستان اولویت بیشتری دارند. داده‌های این معیار برای مصالح معمولی از منابع معتبر کتابخانه‌ای استخراج می‌شود و برای مصالح نوین نیز مطابق گزارش‌های فنی و پژوهش‌های جدید جمع‌آوری می‌گردد.

2. ظرفیت گرمایی ویژه: مصالحی که ظرفیت گرمایی بالاتری دارند می‌توانند در شب گرما را ذخیره کرده و به تدریج آزاد کنند. در اقلیم گرم این ویژگی موجب کاهش نوسانات دمای داخلی می‌شود. بنابراین مصالح با ظرفیت گرمایی متوسط تا بالا برای لایه سازه‌ای و داخلی ترجیح داده می‌شود.

3. جرم حجمی: جرم حجمی مصالح نقش کلیدی در تأخیر فازی حرارت دارد. مصالح سنگین‌تر برای لایه‌های بیرونی یا سازه‌ای می‌توانند بخش مهمی از انرژی حرارتی را جذب و با تأخیر منتقل کنند. این موضوع در تحلیل اولیه دیزاین‌بیلدر و انتخاب ورودی مدل اهمیت ویژه‌ای دارد.



شکل 3 مدل یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی پیشخور 3 لایه پنهان

6-1- روند استفاده از الگوریتم مدل یادگیری عمیق

به منظور استخراج ترکیب بهینه مصالح دیوار جنوبی، روند استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق در چند مرحله منظم انجام می‌شود. ابتدا داده‌های حرارتی و فیزیکی مربوط به مصالح معمولی و مصالح نوین منتخب شامل شش معیار اصلی یعنی: ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، جرم حجمی، ضخامت، رنگ و بافت جمع‌آوری و استانداردسازی می‌شوند. سپس این داده‌ها به صورت ساختاریافته در قالب ماتریس ورودی مدل تهیه می‌گردد که در هر ردیف آن یک گزینه مصالح و در هر ستون یکی از معیارها قرار گرفته است.

در مرحله بعد، یک شبکه عصبی پیشخور با سه لایه پنهان با زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی می‌شود. لایه ورودی شامل شش نورون متناظر با شش معیار مصالح و لایه خروجی شامل یک نورون می‌باشد که مقدار امتیاز عملکرد حرارتی مصالح در دیوار جنوبی را پیش‌بینی می‌کند. این امتیاز با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر برای هر ترکیب اولیه محاسبه می‌شود و مدل بر اساس آن آموزش می‌بیند. برای جلوگیری از بیش‌برازش، از روش‌های: دراپ‌اوت و اسپلیت ولیدیشن استفاده می‌شود و تابع فعال‌سازی لایه‌ها و تابع هزینه مدل انتخاب می‌گردد. مدل طی 300 دوره آموزشی با نرخ یادگیری 0/001 بر روی داده‌های ورودی آموزش داده می‌شود. در مرحله سوم، مدل آموزش‌دیده برای ارزیابی تمام ترکیب‌های ممکن از مصالح نوین به کار گرفته می‌شود. از آنجا که هر لایه دیوار چند گزینه متفاوت دارد، تمامی حالت‌های ممکن به صورت خودکار تولید و وارد مدل می‌شوند. شبکه با تحلیل غیرخطی روابط بین معیارها، برای هر ترکیب یک امتیاز پیش‌بینی می‌کند. ترکیبی که بالاترین امتیاز عملکرد حرارتی را در اقلیم شهر تهران کسب کند به عنوان بهینه‌ترین ترکیب مصالح انتخاب می‌شود.

محسوب می‌شوند و در این پژوهش، از یک شبکه عصبی پیشخور با سه لایه پنهان و سه مدل نورون استفاده شده (حداقل تعداد لایه‌های پنهان برای ایجاد یک مدل یادگیری عمیق) که توانایی تحلیل روابط غیرخطی بین معیارهای مختلف مصالح (مانند ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی و جرم حجمی) را در شرایط مختلف آب و هوایی دارد [18].

در این مدل، ویژگی‌های مصالح بر اساس داده‌های کتابخانه‌ای به شبکه عصبی وارد می‌شوند. در ادامه با توجه به اطلاعات اقلیم شهر گرمی مانند تهران، درون لایه اول سیستم با تحلیل ترکیب‌های مختلف این ویژگی‌ها، الگوهای اولیه را شناسایی می‌کند. نتایج این تحلیل به لایه دوم منتقل شده و روابط پیچیده‌تر بین معیارها بررسی می‌شود. در لایه سوم، مهم‌ترین الگوهای مؤثر در بهینه‌سازی مصالح استخراج شده و در نهایت، ترکیب برتر به عنوان پیشنهاد نهایی ارائه می‌گردد. مزیت اصلی این روش در توانایی آن برای پردازش همزمان معیارهای چندگانه میان مصالح متنوع و کشف تاثیرهای متقابل و غیرخطی آن‌ها با یکدیگر و با داده‌های اقلیمی است [19,20].

در حالی که روش‌های تحلیلی سنتی توسط انسان معمولاً قادر به بررسی یک یا دو پارامتر به صورت جداگانه هستند، شبکه عصبی پیشخور می‌تواند تمامی تأثیرات متقابل بین ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی مصالح را در قالب یک مدل جامع ارزیابی کند. این قابلیت به ویژه در مواردی که نیاز به بررسی تأثیر همزمان عواملی مانند ضخامت، رنگ و بافت مصالح بر عملکرد حرارتی وجود دارد، حیاتی است. همچنین، سرعت بالای پردازش این مدل پس از مرحله آموزش، امکان بررسی چندین ترکیب مختلف مصالح را در زمانی کوتاه فراهم می‌آورد که با روش‌های دستی غیرممکن است. برای درک بهتر این فرآیند، تصویری طراحی شده است که مسیر ورودی داده‌ها (ویژگی‌های مصالح)، لایه‌های پردازش شبکه عصبی و خروجی نهایی (ترکیب بهینه مصالح) را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد. این نمایش بصری به درک بهتر نحوه تصمیم‌گیری مدل کمک می‌کند (شکل 3).

توقف زود هنگام با صبر ۲۰ دوره استفاده شد؛ به این معنا که اگر به مدت ۲۰ دوره پیاپی خطای مجموعه اعتبارسنجی بهبود نمی‌یافت، فرایند آموزش پیش از رسیدن به ۳۰۰ دوره متوقف می‌گردید.

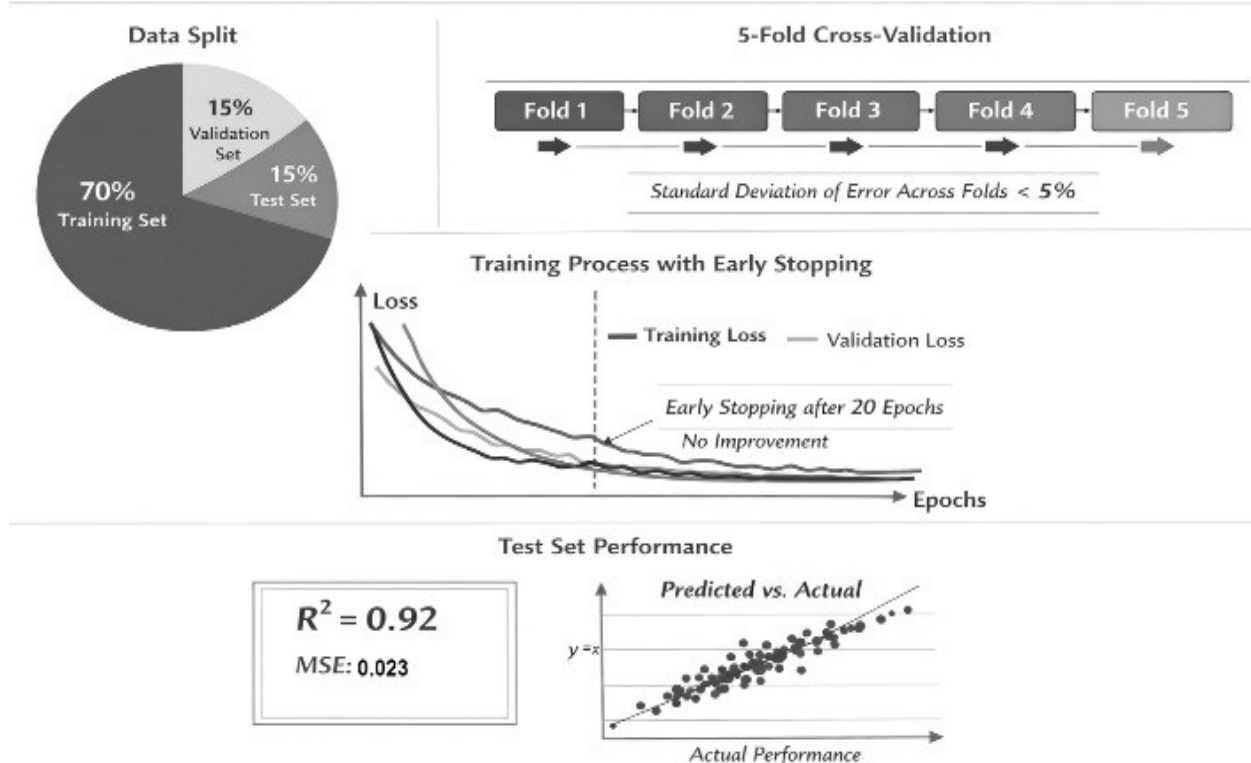
معیارهای ارزیابی شامل میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین بودند. نتایج بر روی مجموعه آزمون نشان داد که مدل قادر است امتیاز عملکرد حرارتی ترکیب‌های مختلف را با دقت بالایی (ضریب تعیین حدود 0/92) پیش‌بینی کند. همچنین از روش اعتبارسنجی متقاطع 5 لایه برای اطمینان از پایداری مدل استفاده شد که انحراف معیار خطا در لایه‌های مختلف کمتر از 5 درصد بود. این مقادیر بیانگر توانایی مطلوب مدل در تعمیم‌پذیری و پیش‌بینی دقیق عملکرد حرارتی ترکیب‌های متنوع مصالح می‌باشد. در ادامه دیاگرام گرافیکی اعتبارسنجی مدل آورده شده است (شکل 4).

در نهایت، ترکیب پیشنهادی مدل در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی مجدد می‌شود تا عملکرد واقعی آن بر اساس بار حرارتی سالانه بررسی و با دیوار معمولی مقایسه گردد. این روند تلفیقی از یادگیری عمیق و شبیه‌سازی حرارتی، امکان انتخاب مصالح دیوار را با دقت بالا و بر اساس تحلیل همزمان چندین معیار فراهم می‌کند.

6-2- ارزیابی و اعتبارسنجی مدل یادگیری عمیق

برای اطمینان از عملکرد صحیح مدل و جلوگیری از بیش‌برازش، داده‌های مصالح پس از نرمال‌سازی به سه مجموعه آموزش (70 درصد)، اعتبارسنجی (15 درصد) و آزمون (15 درصد) تقسیم شدند. مدل با حداکثر ۳۰۰ دوره آموزشی تعریف گردید، اما به‌منظور جلوگیری از حفظ کردن داده‌ها، از مکانیزم

Deep Learning Model Validation for Building Material Optimization



شکل 4 اعتبارسنجی مدل یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی مصالح ساختمان

حرارتی ضرایب تبادل حرارت بیرونی را به‌طور خودکار بر اساس شرایط باد و دمای لحظه‌ای محاسبه می‌کند. جذب تابش خورشیدی نیز با توجه به رنگ و بافت ثبت‌شده برای هر مصالح در لایه بیرونی در نظر گرفته می‌شود. برای سطح داخلی دیوار، یک فضای تک‌منطقه به‌عنوان اتاق مبنا (نشیمن و پذیرایی) تعریف می‌شود که دمای آن مطابق استانداردهای آسایش حرارتی، در زمستان روی ۲۱ درجه سانتی‌گراد و در تابستان روی ۲۴ درجه سانتی‌گراد تثبیت می‌گردد. تبادل حرارتی داخلی نیز بر اساس ضرایب جابجایی ثابت و مدل تشعشعی میانگین دمای تابشی تنظیم می‌شود.

هندسه دیوار با جهت‌گیری دقیق ۱۸۰ درجه (کاملاً رو به جنوب) مدل‌سازی می‌شود تا اثر واقعی تابش خورشید اقلیم تهران به‌درستی منعکس

7- شبیه‌سازی دیوارهای جنوبی در دو حالت با مصالح معمولی و نوین بهینه شده

برای انجام شبیه‌سازی حرارتی دیوار جنوبی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، ابتدا فایل آب‌وهوایی معتبر شهر تهران در نرم‌افزار بارگذاری می‌شود تا تمام پارامترهای اقلیمی شامل: دما، رطوبت نسبی، شدت تابش مستقیم و پراکنده، سرعت و جهت باد و فشار هوا به‌صورت ساعتی در مدل اعمال شوند. شبیه‌سازی‌ها به‌صورت پویا و برای یک دوره کامل یک‌ساله انجام می‌گیرد تا رفتار حرارتی دیوار در تمام فصول سال ارزیابی شود.

سطح بیرونی دیوار جنوبی تحت تأثیر مستقیم تابش خورشید، نوسانات دمای محیط و جریان باد قرار دارد و نرم‌افزار با استفاده از مدل‌های جابجایی

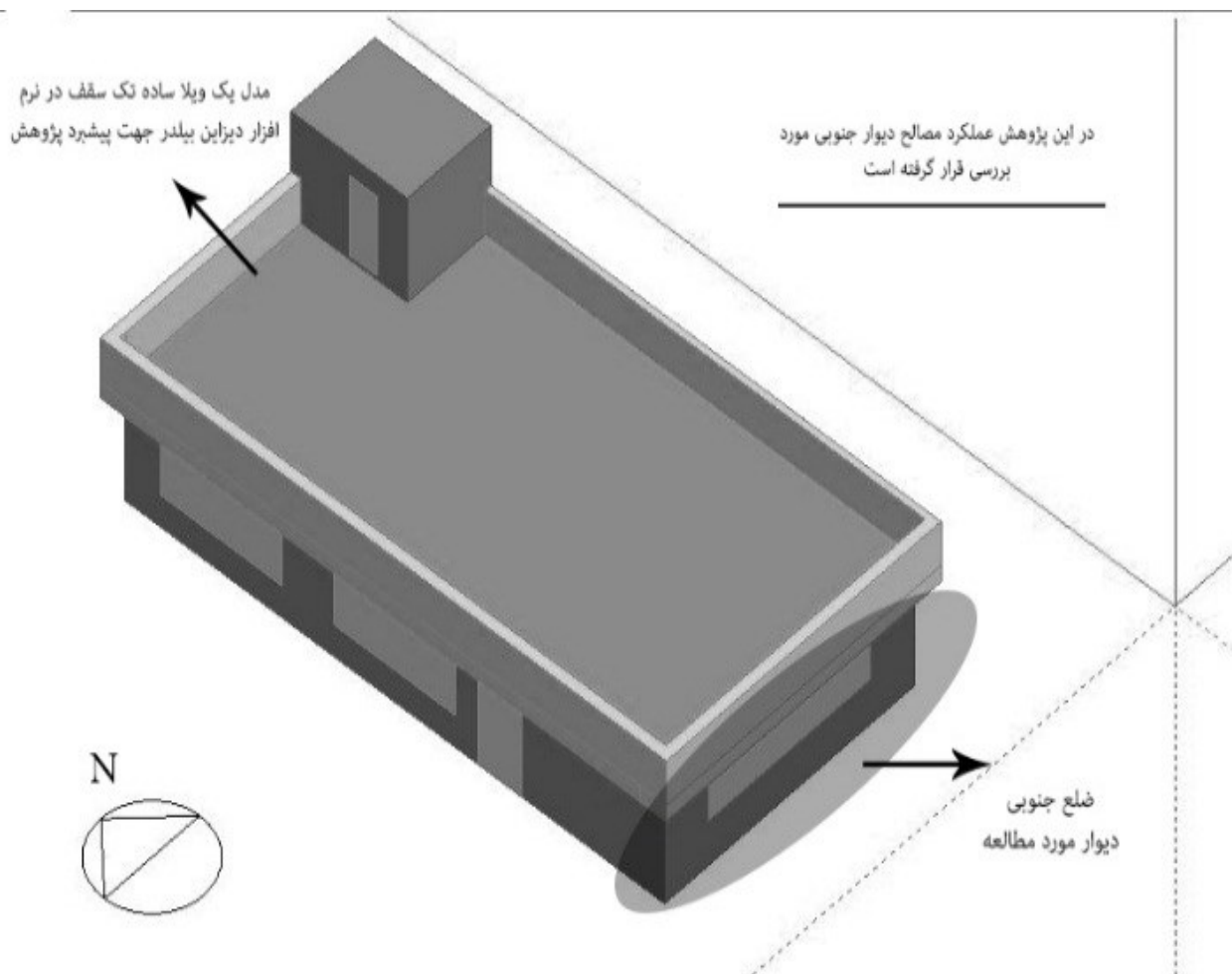
7-1- مشخصات دقیق طرح نمای جنوبی ساختمان و بازشوی آن

مطالعه بر روی یک ویلا مسکونی تک سقف شبیه سازی شده در شرایط آب و هوایی منطبق با واقعیت صورت گرفته است (شکل 5). متراژ کل 128 مترمربع تعیین گردیده است و نمای جنوبی دارای یک دیوار ساده با 80 سانتی متر عقب نشینی (سایه بان بهینه اقلیم شهر تهران طبق زاویه تابش در زمستان 32/5 درجه از افق و تابستان 78/3 درجه از افق) و یک بازشوی کشیده می باشد.

به منظور شبیه سازی دقیق و واقع گرایانه عملکرد حرارتی دیوار جنوبی، ابتدا هئندسه مشخصی برای آن تعریف گردید. کاربری فضای داخلی پشت دیوار جنوبی این ساختمان مسکونی، نشیمن و پذیرایی به مساحت 30/50 مترمربع تعیین شده است.

گردد. برای جلوگیری از دخالت عوامل جانبی در تحلیل، سایه اندازی های خارجی حذف می شود تا نقش خالص مصالح دیوار بر انتقال حرارت سنجیده شود. لایه بندی دیوار در هر دو حالت مصالح معمولی و مصالح نوین دقیقاً بر اساس داده ها تعریف می شود و ترتیب قرارگیری لایه ها مطابق اجرای واقعی (لایه بیرونی، عایق، لایه سازه ای و لایه داخلی) وارد نرم افزار می گردد.

در نهایت، نرم افزار انتقال حرارت بین فضای بیرونی و داخلی را بر اساس اختلاف دما، ضرایب هدایت و ظرفیت گرمایی مصالح، تأثیر تابش خورشیدی و رفتار گذرای گرما در بازه زمانی ۸۷۶۰ ساعت محاسبه می کند و خروجی های حرارتی ماهانه برای هر دو سیستم مصالح معمولی و مصالح نوین تولید می شود. این شرایط مرزی امکان مقایسه دقیق عملکرد دو دیوار را فراهم می سازد و مبنای تحلیل های ارائه شده در ادامه پژوهش می باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تنها داده های انتقال حرارت از جانب دیوار جنوبی و مصالح تشکیل دهنده آن بررسی گردیده است.



شکل 5 مدل شبیه سازی شده ساختمان مسکونی مورد مطالعه

(مساحت 7/82 مترمربع) تعبیه شده است که بر این اساس، نسبت سطح شیشه به دیوار معادل 33 درصد محاسبه می گردد.

مشخصات فنی پنجره مورد استفاده در شبیه سازی شامل فریم پو پی وی سی با ضریب انتقال حرارتی معادل ۲/۲ وات بر مترمربع کلونین و شیشه دو

در نرم افزار، دیوار جنوبی مورد بررسی قرار گرفته است تا تأثیر خالص مصالح بر انتقال حرارت ارزیابی شود. ابعاد این دیوار به صورت مستطیلی با ارتفاع 3/10 متر و عرض 7/60 متر (مساحت کل 23/56 مترمربع) تعیین گردیده است. در این دیوار، یک بازشوی کشیده با ارتفاع 1/70 متر و عرض 4/60 متر

کتابخانه‌ای در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی شده و میزان انتقال حرارت در بازه زمانی یک‌ساله استخراج گردید. سپس ترکیب بهینه مصالح نوین که توسط مدل یادگیری عمیق انتخاب شده‌است، تحت شرایط کاملاً یکسان مورد شبیه‌سازی قرار گرفت تا امکان مقایسه دقیق عملکرد حرارتی این دو حالت فراهم شود.

8-1- شبیه‌سازی دیوار جنوبی با مصالح معمولی

مصالح معمولی یک دیوار جنوبی با تمام معیارهای حرارتی و فیزیکی آن طبق داده‌های معتبر کتابخانه‌ای جمع‌آوری شده‌است (جدول 3). حجم این نوع دیوار جنوبی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با جزئیات دقیق حرارتی و فیزیکی مصالح آن در یک اقلیم گرم ایران مانند شهر تهران شبیه‌سازی گردید (شکل‌های 6، 7).

با توجه به تمرکز این پژوهش تنها بر بررسی انتقال حرارت در دیوار جنوبی و واکنش حرارتی یک فضای داخلی نسبت به آن، تمام شبیه‌سازی‌ها و انتقال حرارت ثبت‌شده منحصراً به عملکرد این دیوار جنوبی مربوط می‌شود و داده‌های خروجی در بازه زمانی یک سال نمایش داده شده‌است (شکل 8).

است. همچنین بیشترین اتلاف حرارتی از فضای داخل به بیرون با مقدار 49/85- کیلووات ساعت در سردترین ماه ثبت شده است.

جداره (۶ میلیمتر شیشه + ۱۲ میلیمتر فاصله هوای پر شده با گاز آرگون + ۶ میلیمتر شیشه) با ضریب انتقال حرارت کلی برابر 2/7 وات بر مترمربع کلون و ضریب کسب حرارت خورشیدی معادل 0/58 می‌باشد که در نرم‌افزار ثابت بوده‌است.

تأکید می‌گردد که تمامی این مشخصات هندسی و فیزیکی شامل ابعاد دیوار، ابعاد بازشو، موقعیت آن، نوع فریم، مشخصات شیشه و سایه‌انداز برای هر دو سناریوی شبیه‌سازی (دیوار با مصالح معمولی و دیوار با مصالح نوین بهینه‌شده) به‌صورت کاملاً یکسان اعمال شده‌است. این ثبات شرایط، تضمین می‌کند که تفاوت در نتایج خروجی، صرفاً ناشی از تغییر ترکیب مصالح لایه‌های دیوار بوده و تأثیر عوامل مداخله‌گری مانند نوع پنجره یا ابعاد بازشو در آن دخیل نیست.

8-2- یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد حرارتی دیوار جنوبی در دو حالت مجزا ارائه می‌گردد. ابتدا دیوار با مصالح معمولی مطابق داده‌های بعد از خروجی داده‌های مرتبط با عملکرد حرارتی دیوار جنوبی با مصالح معمولی، حاصل شد که در گرم‌ترین ماه سال مقدار 39/80 کیلووات ساعت انتقال حرارت از فضای بیرون به داخل به عنوان بیشترین میزان معین گردیده

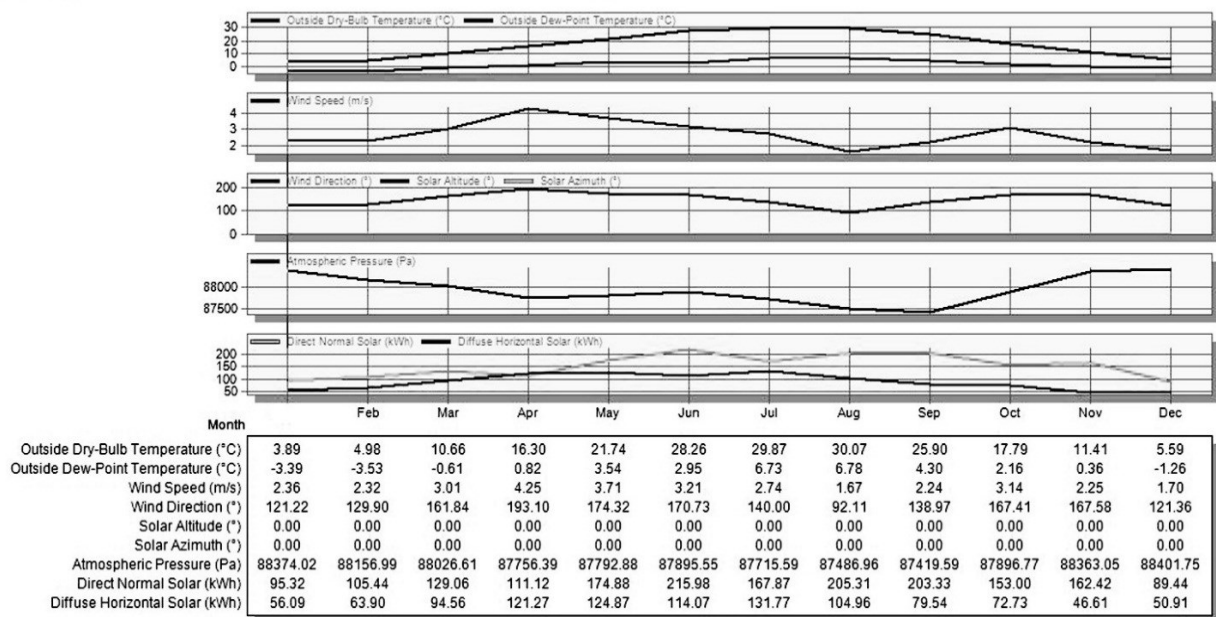
جدول 3 معیارهای حرارتی و فیزیکی مصالح معمولی [21]

مصالح	ضخامت (میلی‌متر)	ضریب هدایت حرارتی (وات بر مترکلون)	ظرفیت گرمایی (ژول بر کیلوگرم کلون)	جرم حجمی (کیلوگرم بر مترمکعب)	رنگ	بافت
آجر نما (لایه بیرونی)	100	0/840	800	1700	تیره	صاف و متراکم
عایق پلی استایرن (عایق)	80	0/0340	1400	35	تیره	متراکم، صاف و نرم
بلوک سیمانی (لایه سازه‌ای)	150	0/51	1000	1400	تیره	متخلخل متراکم
گچ گیپسوم (لایه داخلی)	20	0/4	1000	1000	روشن	متراکم و پودری

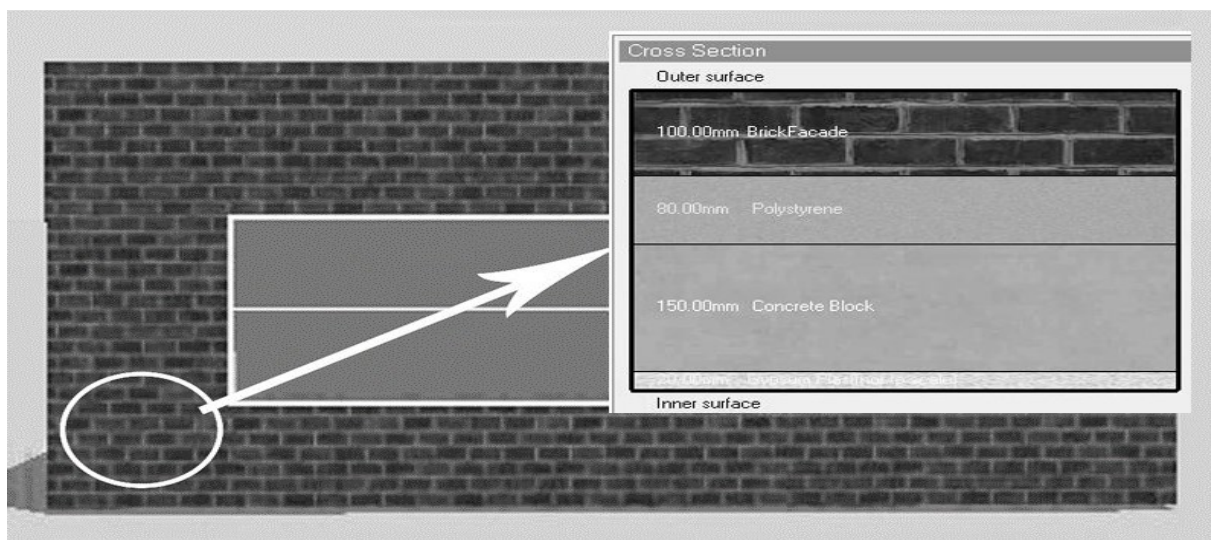
3.89

Weather Data

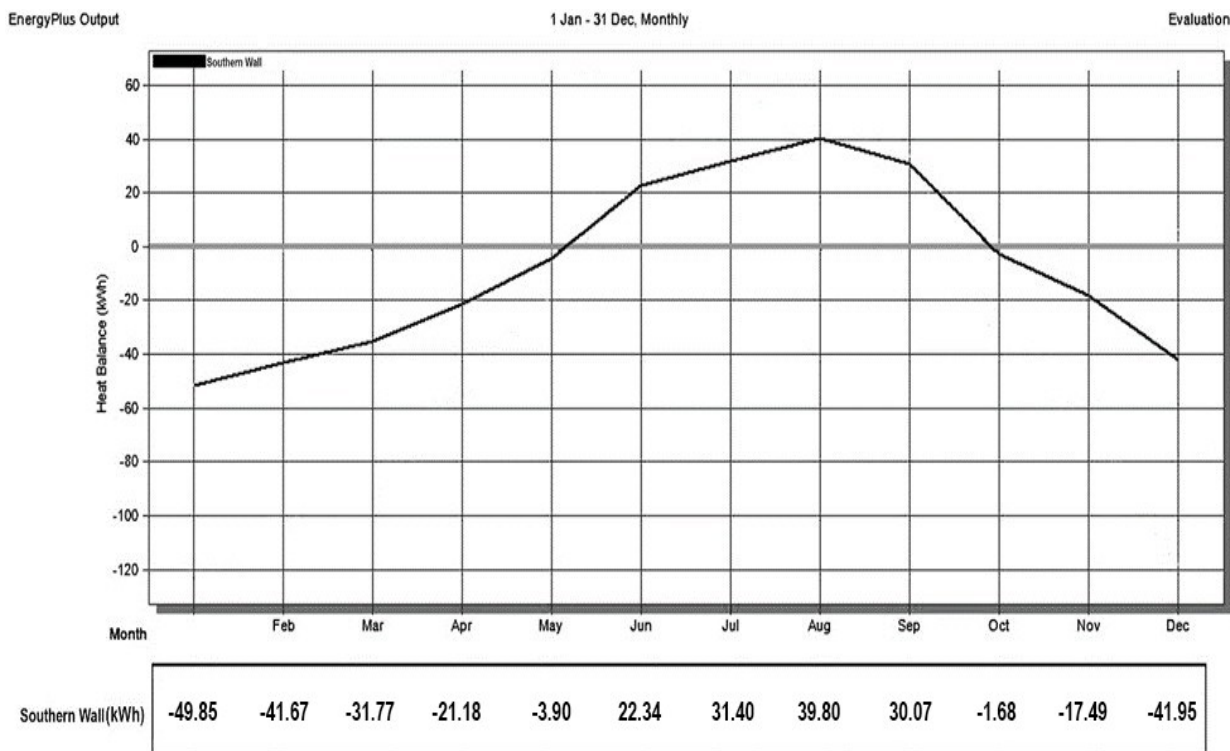
Site Data - Untitled
Monthly



شکل 6 اطلاعات اقلیم شهر تهران



شکل 7 دیوار جنوبی با مصالح معمولی



شکل 8 میزان انتقال حرارت دیوار جنوبی با مصالح معمولی

است. مدل به دقت تشخیص داده که چه نوع ترکیب مصالح عملکرد بهتری دارد و نتیجه بر اساس تحلیل همزمان چندین شرایط محیطی متفاوت (دما، فشار هوا و تابش خورشید) در اقلیم گرم شهر تهران ارائه شده است. در ادامه پژوهش، دیوار جنوبی با دیگر ترکیب بهینه مصالح نوین شبیه‌سازی گردید که جزئیات و خروجی آن در شکل‌های 9 و 10 قابل مشاهده می‌باشد. بعد از خروجی داده‌های مرتبط با عملکرد حرارتی دیوار جنوبی با مصالح نوین بهینه شده، حاصل شد که در گرم‌ترین ماه سال مقدار 19/19 کیلووات‌ساعت انتقال حرارت از فضای بیرون به داخل به عنوان بیشترین میزان معین گردیده است. همچنین بیشترین اتلاف حرارتی از فضای داخل به بیرون با مقدار 36/11- کیلووات‌ساعت در سردترین ماه ثبت شده است.

8-2- شبیه‌سازی دیوار جنوبی با مصالح نوین بهینه شده توسط یادگیری عمیق

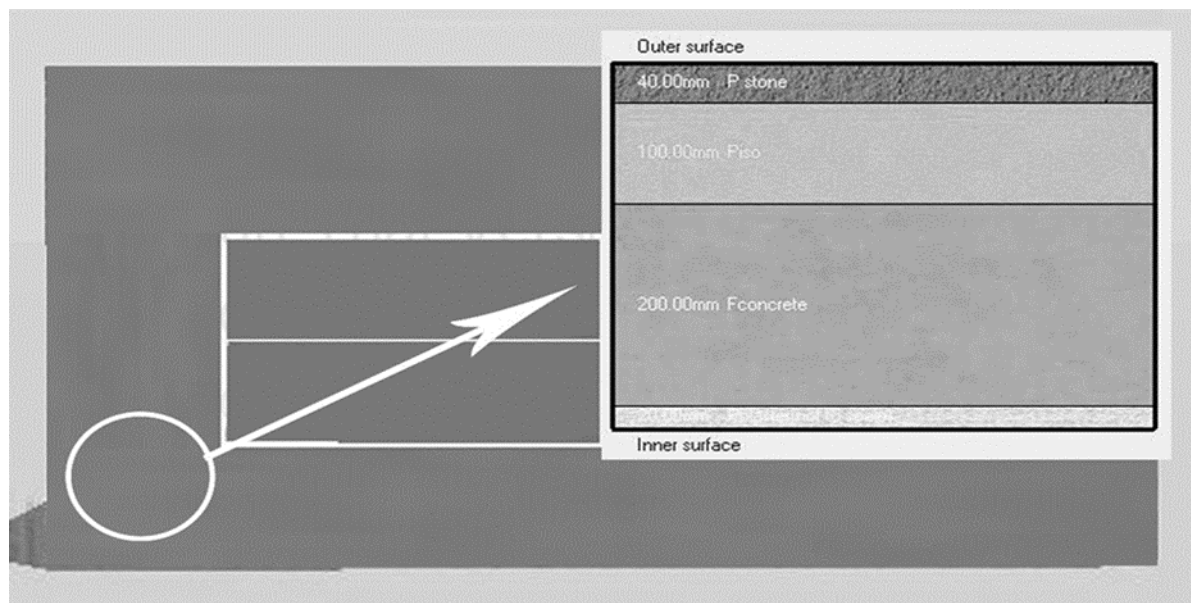
چندین گزینه از مصالح نوین منتخب طبق تحلیل و بررسی پژوهش‌های موجود در جدول شماره 4 تنظیم شده است. در ادامه از میان مصالح نوین، بهینه‌ترین ترکیب توسط مدل یادگیری عمیق یاد شده و توسعه یافته در محیط زبان برنامه‌نویسی پایتون و مبتنی بر شبکه عصبی پیشخور با سه لایه پنهان انتخاب شده است (جدول 5).

مدل پیشرفته ما توانسته است با پردازش هوشمندانه داده‌های چندبعدی (شامل معیارهای کلیدی مانند ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، جرم حجمی، ضخامت، رنگ و بافت برای هر لایه)، روابط پیچیده غیرخطی بین این معیارها را شناسایی کند که تحلیل دستی آنها بسیار دشوار و یا غیرممکن

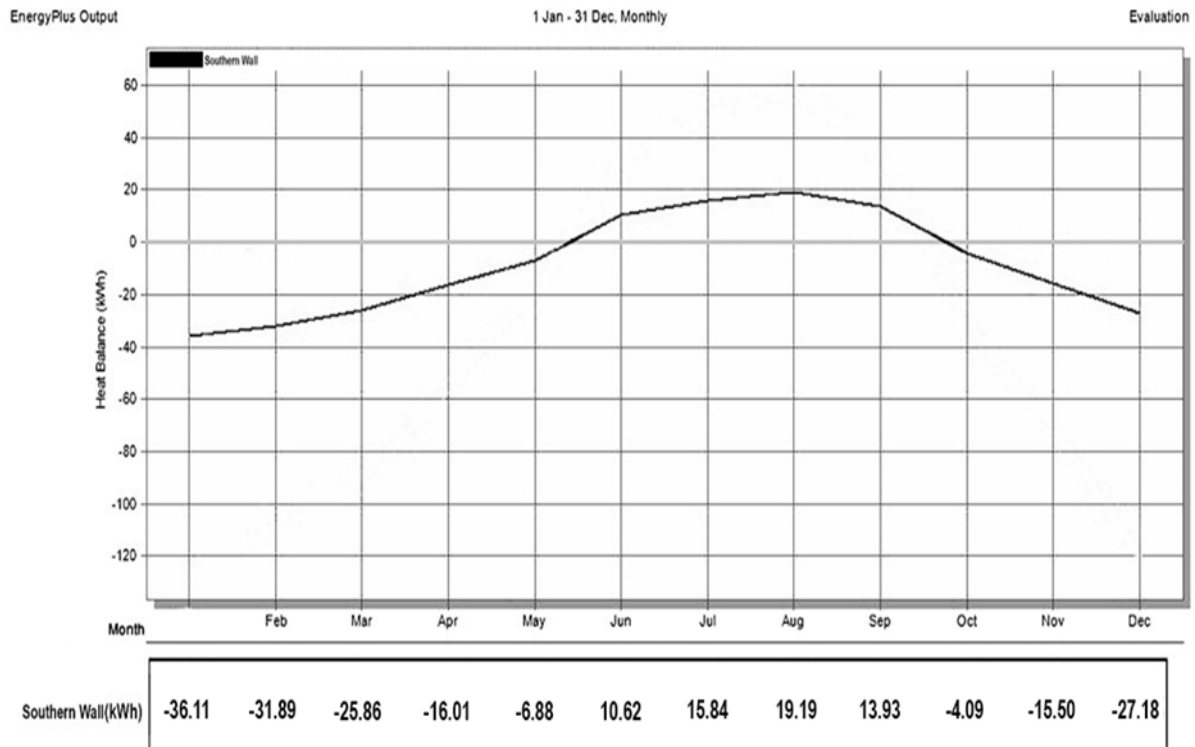
جدول 4 مصالح نوین منتخب طبق بررسی‌ها [22,23,24]

مصالح	ضخامت (میلی‌متر)	ظرفیت گرمایی (ژول بر کیلوگرم کلون)	جرم حجمی (کیلوگرم بر مترمکعب)	رنگ	بافت
پانل سرامیکی کنترل‌گر (لایه بیرونی)	30	0/4	1300	1900	روشن صاف متراکم
سنگ پلیمری (لایه بیرونی)	40	0/6	1400	2200	متنوع زبر مات
پلی ایزوسیاناترات (لایه عایق)	100	0/025	1600	50	تیره اسفنجی متراکم
پشم سنگ متراکم (لایه عایق)	120	0/04	1000	120	تیره الیافی فشرده
بلوک بتن هوادار (لایه سازه‌ای)	200	0/35	1100	700	تیره متخلخل ریز
بلوک فوم بتن (لایه سازه‌ای)	200	0/3	1300	800	روشن متخلخل یکنواخت
گچ پرلیتی (لایه داخلی)	25	0/3	1500	1000	روشن پودری متراکم

گچ با الیاف (لایه داخلی)	20	0/45	1100	900	روشن	الیافی و زیر
جدول 5 ترکیب مصالح نوین بهینه شده توسط مدل یادگیری عمیق						
مصالح	ضخامت (میلی متر)	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)	ظرفیت گرمایی (ژول بر کیلوگرم کلوین)	جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	رنگ	بافت
سنگ پلیمری (لایه بیرونی)	40	0/6	1400	2200	متنوع	زبر مات
پلی ایزوسیاناترات (لایه عایق)	100	0/025	1600	50	تیره	اسفنجی متراکم
بلوک فوم بتن (لایه سازه‌ای)	200	0/3	1300	800	روشن	متخلخل یکنواخت
گچ پرلیتی (لایه داخلی)	20	0/45	1100	900	روشن	پودری و متراکم



شکل 9 دیوار جنوبی با مصالح نوین بهینه شده



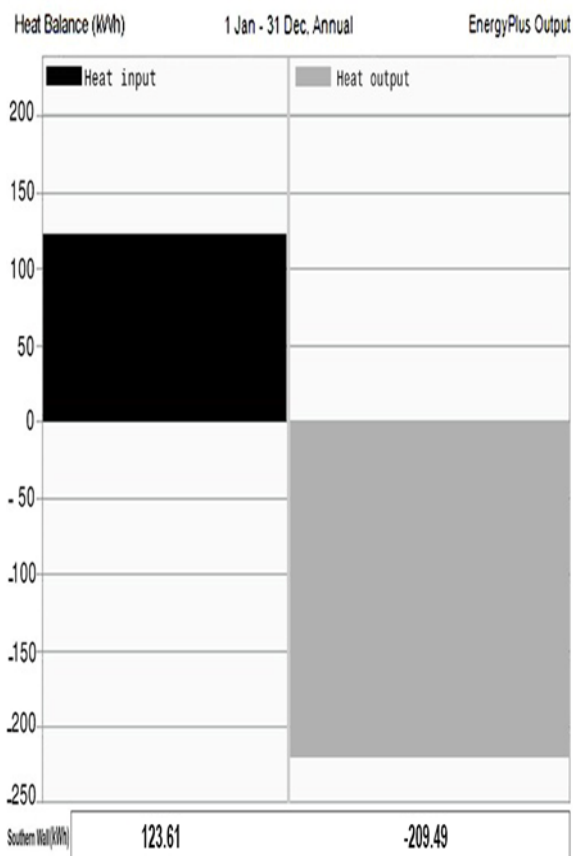
شکل 10 میزان انتقال حرارت دیوار جنوبی با مصالح نوین بهینه شده

9- بحث و نتایج

بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان دهنده آن است که مدل یادگیری عمیق مدنظر، از میان مصالح نوین یک ترکیب بهینه را با توجه به بررسی همزمان معیارهای مصالح و تاثیر متقابل و غیر خطی آن‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی اقلیم گرم انتخاب کرده است که این روند براساس روش سنتی و دستی توسط انسان بسیار زمان‌بر، دشوار و یا غیرممکن می‌باشد. معیارهای مورد بررسی شامل: ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، جرم حجمی و ویژگی‌های ظاهری بوده‌است.

بر اساس یافته‌های شبیه‌سازی، عملکرد حرارتی دیوار جنوبی در هر دو ماه اوج گرم و سرد سال بهبود چشمگیری یافته است. در گرم‌ترین ماه سال، دیوار بهینه‌سازی شده توسط مدل یادگیری عمیق، انتقال حرارت از فضای بیرون به داخل را از ۳۹/۸۰ کیلووات‌ساعت در حالت معمولی به ۱۹/۱۹ کیلووات‌ساعت کاهش داده است که بیانگر کاهش بار سرمایشی قابل توجه در این ماه می‌باشد. به‌طور مشابه، در سردترین ماه سال، میزان اتلاف حرارت از فضای داخل به بیرون از ۴۹/۸۵ کیلووات‌ساعت به ۳۶/۱۱ کیلووات‌ساعت کاهش یافته که این امر کاهش بار گرمایشی و بهبود پایداری حرارتی فضای داخلی را در پی داشته است.

در کل، ترکیب بهینه مصالح نسبت به نوع معمولی آن، مقدار ۱۲۳/۶۱ کیلووات‌ساعت انتقال حرارت را به ۵۹/۵۸ کیلووات‌ساعت از فضای بیرون به داخل (کاهش بار سرمایش فضای داخلی) و همچنین میزان ۲۰۹/۴۹-کیلووات‌ساعت اتلاف حرارت را به ۱۳۷/۶۶-کیلووات‌ساعت از فضای داخل به بیرون (کاهش بار گرمایش فضای داخلی) در بازه زمانی یک سال کاهش داده است (شکل‌های ۱۱، ۱۲).



شکل 11 عملکرد حرارتی دیوار جنوبی با مصالح معمولی

همچنین پژوهش بین‌المللی [۸] دقت و قابلیت اتکای نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر را برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها مورد تأیید قرار داده است. بر اساس پروتکل‌های بین‌المللی از جمله راهنمای شماره ۱۴ مؤسسه مهندسين گرمایش، تبريد و تهويه مطبوع آمریکا، محدوده خطای قابل قبول برای مدل‌های کالبره‌شده انرژی ساختمان (با استفاده از شاخص سی‌وی‌ار ام اس ای در بازه زمانی ماهانه) حداکثر ۱۵ درصد تعیین شده است که پژوهش انجام‌شده توانایی آن در دستیابی به خطایی کمتر از این آستانه را تأیید می‌کند.

9-1-2- اعتبار و دقت نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر

نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به‌عنوان یکی از معتبرترین ابزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان، دارای اعتبارسنجی رسمی مطابق با استانداردهای بین‌المللی از جمله اشیر 140 و بست تست می‌باشد و آزمون‌های این استاندارد را با موفقیت پشت سر گذاشته است. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که مدل‌های کالبره‌شده با این نرم‌افزار قادر به دستیابی به دقت بالایی بوده و مقادیر خطای شاخص‌های آماری را به کمتر از ۱۵ درصد در محدوده ۵ درصد کاهش می‌دهند. این یافته‌ها نشان‌دهنده قابلیت اتکای بالای نرم‌افزار در پیش‌بینی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها و تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی می‌باشد [25].

9-1-3- استفاده از داده‌های اقلیمی معتبر

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در شبیه‌سازی مربوط به ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران به‌عنوان معتبرترین و کامل‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه می‌باشد. این داده‌ها شامل پارامترهای اصلی اقلیمی از قبیل دما، رطوبت نسبی، شدت تابش مستقیم و پراکنده، سرعت و جهت باد و فشار هوا به‌صورت ساعتی بوده و مطابق با استانداردهای بین‌المللی قالب‌بندی و در نرم‌افزار بارگذاری شده است.

10- نتیجه‌گیری

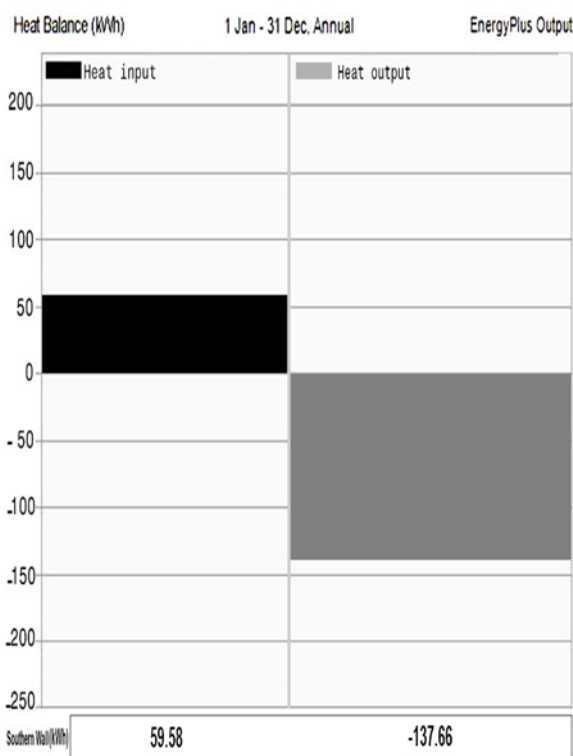
پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی جزئیات دیوارهای جنوبی ساختمان‌ها در اقلیم گرم، با تلفیق شبیه‌سازی حرارتی و مدل یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی پیش‌خور، توانست ترکیب بهینه‌ای از مصالح نوین را برای چهار لایه اصلی دیوار شناسایی کند.

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نشان داد که این ترکیب بهینه، میزان انتقال حرارت از فضای بیرون به داخل را به میزان 51/80 درصد و از فضای داخل به بیرون را 34/29 درصد در طول یک سال کاهش داده است که به‌طور مستقیم در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی و در نتیجه بهبود عملکرد انرژی ساختمان مؤثر بوده است.

این پژوهش ضمن تأکید بر قابلیت بالای یادگیری عمیق در تحلیل همزمان و غیرخطی معیارهای چندگانه مصالح (همچون ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، جرم حجمی و ویژگی‌های ظاهری)، رویکردی نوین را در فرآیند طراحی معماری همساز با اقلیم ارائه می‌دهد. تلفیق دانش معماری با ابزارهای پیشرفته محاسباتی هوشمند، می‌تواند افق‌های تازه‌ای را در جهت دستیابی به اهداف معماری پایدار و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها بگشاید.

11- مراجع

- [1] M. Niroumand and N. Faramarzi Fard, Investigating the role of green roof in reducing energy consumption of educational buildings (Case



شکل 12 عملکرد حرارتی دیوار جنوبی با مصالح نوین بهینه شده

بر این اساس در بازه زمانی و شرایط آب و هوایی اقلیم مورد نظر، کل انتقال حرارت از فضای بیرون به داخل 51/80 درصد و از فضای داخل به بیرون 34/29 درصد کاهش یافته است که این موضوع تأثیر مطلوب بر بهبود مصرف انرژی ساختمان را به‌دنبال دارد.

نتایج به‌دست‌آمده با تکرار شبیه‌سازی برای چند ترکیب تصادفی و مقایسه با خروجی مدل، پایداری روش را تأیید کرد. بنابراین ترکیب معرفی‌شده توسط مدل یادگیری عمیق، علاوه بر بهبود چشمگیر عملکرد حرارتی، از اعتبار محاسباتی کافی برخوردار است.

9-1- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

فرآیند صحت‌سنجی به‌منظور اطمینان از دقت نتیجه‌گیری و قابلیت اتکای شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در چند گام مجزا صورت پذیرفته است.

9-1-1- تطابق با پژوهش‌های پیشین معتبر

اگرچه در این پژوهش امکان انجام اندازه‌گیری میدانی مستقیم فراهم نبوده است اما برای اطمینان از صحت روند شبیه‌سازی، نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهش‌های مشابه که در اقلیم‌های هم‌خانواده انجام شده‌اند مقایسه گردیده است.

بررسی تطبیقی نشان می‌دهد که الگوی تغییرات انتقال حرارت فصلی و سهم هر یک از لایه‌های مصالح شبیه‌سازی شده در عملکرد حرارتی کلی دیوار با نتایج گزارش‌شده در پژوهشی معتبر همخوانی دارد. پژوهش معتبری که به صحت‌سنجی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر در اقلیم شهر تهران در ارتباط با عملکرد حرارتی مصالح دیوارهای ساختمان پرداخته است [۲۴].

- [21] M. Momeni and A. Tanoursaz, Comparison of the impact of external wall materials on thermal comfort of occupants and optimal material selection in hot and semi-arid climates (Case study: Dezful city), *Hot and Dry Climate Architecture*, vol. 11, no. 17, pp. 211–227, 2023. (in Persian)
- [22] C. Piselli, F. Sciurpi, C. Fabiani, C. Carletti, and A. L. Pisello, Experimental and numerical analysis of novel insulation materials for the building wall, *International Association of Building Physics. Singapore: Springer Nature Singapore*, 2024, pp. 418–423.
- [23] S. K. Shukla and S. Kaul, Advanced building materials, *Thermal Evaluation of Indoor Climate and Energy Storage in Buildings*. vol. 1, 2025.
- [24] M. Moradi and A. Ameri Siahouei, Evaluating the Role of Building Materials in Energy Consumption of an Educational Space in Tehran, *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 57–67, 2024. (in Persian)
- [25] Garg, V., Mathur, J., & Bhatia, A. (2020). *Building energy simulation: A workbook using designbuilder™*. CRC Press.
- study: Hagh Panah primary school for girls in Isfahan city), *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 139–145, 2021.
- [2] M. T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, I. Alexopoulos, and K. A. Antonopoulos, Thermal behavior of a building with incorporated phase change materials in the South and the North Wall, *Computation*, vol. 7, no. 1, p. 2, 2018.
- [3] A. K. M. Yahia and M. Shahjalal, Sustainable materials selection in building design and construction, *International Journal of Science and Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 10–62304, 2024.
- [4] N. Amani, Energy efficiency of residential buildings using thermal insulation of external walls and roof based on simulation analysis, *Energy Storage and Saving*, vol. 4, no. 1, pp. 48–55, 2025.
- [5] V. J. Reddy, M. F. Ghazali, and S. Kumarasamy, Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review, *Journal of Energy Storage*, vol. 81, p. 110494, 2024.
- [6] L. Goswami, M. K. Deka, and M. Roy, Artificial intelligence in material engineering: A review on applications of artificial intelligence in material engineering, *Advanced Engineering Materials*, vol. 25, no. 13, p. 2300104, 2023.
- [7] W. Li, P. Chen, B. Xiong, G. Liu, S. Dou, Y. Zhan, et al., Deep learning modeling strategy for material science: From natural materials to metamaterials, *Journal of Physics: Materials*, vol. 5, no. 1, p. 014003, 2022.
- [8] R. A. Kishore, M. V. Bianchi, C. Booten, J. Vidal, and R. Jackson, Enhancing building energy performance by effectively using phase change material and dynamic insulation in walls, *Applied Energy*, vol. 283, p. 116306, 2021.
- [9] M. Arici, F. Bilgin, M. Krajčik, S. Nižetić, and H. Karabay, Energy saving and CO2 reduction potential of external building walls containing two layers of phase change material, *Energy*, vol. 252, p. 124010, 2022.
- [10] B. Lamrani, K. Johannes, and F. Kuznik, Phase change materials integrated into building walls: An updated review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110751, 2021.
- [11] A. E. Ahmed, M. S. Suwaed, A. M. Shakir, and A. Ghareeb, The impact of window orientation, glazing, and window-to-wall ratio on the heating and cooling energy of an office building: The case of hot and semi-arid climate, *Journal of Engineering Research*, vol. 13, no. 1, pp. 409–422, 2025.
- [12] K. A. Ismail, F. A. Lino, M. Teggari, M. Arici, P. L. Machado, T. A. Alves, et al., A comprehensive review on phase change materials and applications in buildings and components, *ASME Open Journal of Engineering*, vol. 1, 2022.
- [13] Y. A. Abera, Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction, *Composites and Advanced Materials*, vol. 33, p. 26349833241255957, 2024.
- [14] A. Kurdi, N. Almoatham, M. Mirza, T. Ballweg, and B. Alkahlan, Potential phase change materials in building wall construction—a review, *Materials*, vol. 14, no. 18, p. 5328, 2021.
- [15] M. Alegbe, Comparative analysis of wall materials toward improved thermal comfort, reduced emission, and construction cost in tropical buildings, *11th Masters Conference: People and Buildings*, 2022.
- [16] R. S. Athauda, A. S. Asmone, and S. Conejos, Climate change impacts on facade building materials: A qualitative study, *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7893, 2023.
- [17] S. A. Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, and I. Alsyouf, Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and energy consumption, *Results in Engineering*, vol. 16, p. 100643, 2022.
- [18] K. Sharifani and M. Amini, Machine learning and deep learning: A review of methods and applications, *World Information Technology and Engineering Journal*, vol. 10, no. 7, pp. 3897–3904, 2023.
- [19] K. Choudhary, B. DeCost, C. Chen, A. Jain, F. Tavazza, R. Cohn, et al., Recent advances and applications of deep learning methods in materials science, *npj Computational Materials*, vol. 8, no. 1, p. 59, 2022.
- [20] Ketkar and J. Moolayil, Feed-forward neural networks, in *Deep Learning with Python: Learn Best Practices of Deep Learning Models with PyTorch*. Berkeley, CA: Apress, 2021, pp. 93–131.