

مقاله پژوهشی

مقایسه تأثیر مصالح جداره‌های خارجی بر آسایش حرارتی ساکنین و انتخاب مصالح بهینه در اقلیم گرم و نیمه‌خشک (نمونه موردی: شهر دزفول)

کوروش مؤمنی^{۱*}، مهسا تنور ساز^۲

۱- دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران

۲- مدرس گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران

چکیده

ارزیابی دیوار خارجی ساختمان به جهت دستیابی به ساخت و سازی پایدار در صنعت ساختمان‌سازی مسکونی و در راستای کاهش مصرف انرژی و ایجاد شرایط آسایش ساکنین در اقلیم‌های مختلف همواره دارای اهمیت است. پژوهش حاضر تلاش دارد تا رفتار حرارتی مصالح به‌کاررفته در دیوارهای خارجی ساختمان‌های مسکونی واقع در شهر دزفول را موردبررسی قرار دهد. مدل‌های آزمایشی موردبررسی جمعاً شامل دوازده نوع دیوار با مصالح: آجر سوراخ‌دار، بلوک سفالی، بلوک هبلکس و بلوک لیکا به همراه عایق‌های حرارتی ETICS و XPS هستند. در انتها به‌منظور شناسایی شرایط آسایش در درون فضاهای مسکونی با در نظر گرفتن مقیاس هفت‌گانه اشتری بهینه‌ترین دیوار معرفی می‌گردد. پژوهش فوق دارای روش‌شناسی کمی و مقایسه‌ای است که بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی با شبیه‌سازی ۱۲ نوع دیوار در اقلیم گرم و نیمه‌خشک دزفول توسط نرم‌افزار دیزاین بیلدر به تجزیه و تحلیل پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی در حالت ناپایدار مغایر با شرایط پایدار در اقلیم گرم و نیمه‌خشک است. بر اساس روش محاسباتی شرایط پایدار، دیوار با ضریب هدایت حرارتی کمتر دارای رفتار حرارتی بهینه‌تری است. درحالی‌که در شرایط ناپایدار، دیوار با جرم حرارتی بالاتر نقش مؤثرتری را به جهت دستیابی به شرایط آسایش حرارتی ساکنین ایفا می‌کند. از میان ۱۲ دیوار بررسی‌شده، با توجه به شرایط آسایش نشان داده‌شده در شاخص PMV و نظر به نیاز غالب سرمایه‌های اقلیم گرم و نیمه‌خشک دزفول می‌توان نتیجه گرفت که دیوارهای دارای عایق حرارتی ETICS و XPS دارای عملکرد مناسبی نیستند. درحالی‌که دیوارها با آجر سوراخ‌دار، بلوک سفالی، بلوک هبلکس و بلوک لیکا بدون عایق حرارتی عملکرد بهتری را دارا هستند؛ از میان این دیوارها، دیوار با بلوک لیکا بدون عایق حرارتی مناسب‌ترین رفتار حرارتی و دیوارها با بلوک هبلکس و آجر سوراخ‌دار هر دو بدون عایق حرارتی به ترتیب در رتبه دوم و سوم در جهت دستیابی به آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی قرار می‌گیرند.

تاریخ دریافت:

۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۷ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژه‌ها:

آسایش حرارتی

دیوار خارجی

عایق حرارتی

کاهش مصرف انرژی

دزفول

doi : 10.22034/AHDC.2023.20068.1737

E-ISSN: 2645-372X /© 2023. Published by Yazd University This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



۱- مقدمه

جهان روزبه‌روز به سمت ایجاد شهرها و صنعتی شدن پیش می‌رود. درحالی‌که تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد از جمعیت کشورهای درحال توسعه شهرنشین هستند. پیش‌بینی می‌شود در چند دهه آینده، ۶۰ تا ۷۰ درصد از کل جمعیت به شهرها روی آورند (Koch-Nielsen, 2013). شهرنشینی روزافزون و تغییر سبک زندگی از روستایی به شهری، نیاز مبرم به تأمین مسکن را در پی خواهد داشت.

افزایش مصرف انرژی مرتبط با معماری، پایه منطقی برای تبیین قسمت عمده مصرف جهانی انرژی است. چه به گمان بعضی ۵۰ درصد از مصرف انرژی جهانی و تا ۵۳ درصد از صدور گازهای گلخانه‌ای، مربوط به شهر و معماری است. (Heydari, 2014). طبق برآورد به‌عمل‌آمده در انجمن معماری ۲۰۳۰ آمریکا تا ۳۰ سال آینده سه‌چهارم ساختمان‌های موجود بازسازی یا مجدداً ساخته می‌شوند. لذا فرصت خوبی برای معماران و سازندگان است که مسائل زیست‌محیطی را در طراحی ساختمان لحاظ کنند (Mansoureh, 2017). پس از بحران انرژی سال ۱۹۷۰ بشر به همزیستی مجدد با طبیعت روی آورد، اما به‌گونه‌ای متفاوت و با همراهی فناوری. او ابتدا به مطالعه راهکارهای بومی برای ممانعت از عوامل نامطلوب پرداخت و سپس با استفاده از ابزاری به قدرتمندی فناوری، موانع و محدودیت‌ها را از پیش روی برداشت و تهدید عوامل نامطلوب طبیعی را به فرصتی گران‌قیمت تبدیل کرد. می‌توان گفت یکی از اصلی‌ترین مشکلات در معماری‌های همساز با طبیعت وجود عوامل نامطلوب مانند جذب مستقیم نور و گرمایش خورشیدی اضلاع آفتاب‌گیر بنا در اقلیم گرم است. از راهکارهای ایستا برای جلوگیری از آن‌ها، ایجاد سایه‌بان و عبور جریان هوا از سطح این جبهه‌هاست، که میزان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. درحالی‌که از عوامل نامطلوب در اقلیم سرد وجود بادهای در اضلاع آفتاب‌گیر بناست که تنها راهکار ایستا برای جلوگیری از آن‌ها، مسدود ساختن این جبهه‌هاست که میزان جذب مستقیم نور و گرمایش خورشیدی را کاهش می‌دهد (Sokhdan Sorkhabi, 2016). در مناطق گرم و نیمه‌خشک، بیش از نیمی از مصرف انرژی به ایجاد سرمایش در ساختمان‌ها اختصاص یافته است (Regulations, 2020). از آنجایی‌که میزان انرژی مصرفی برای سرمایش بیشتر از گرمایش است، فشاری که برای تأمین انرژی موردنیاز این مناطق به وجود می‌آید بسیار زیاد خواهد بود؛ بنابراین اهمیت یافتن راهکارهایی برای مواجهه با بحران انرژی کاملاً آشکار و ضروری است. روند طراحی غیرفعال، روندی است که در آن طراحی با تکیه بر روش‌هایی که نیازمند مصرف انرژی نیستند، صورت پذیرد. این طراحی مانند هر طراحی موفق دیگر، بایستی منجر به ایجاد شرایط آسایش حرارتی برای ساکنین آن باشد (Koch-Nielsen, 2013).

از بنیادی‌ترین موارد کنترل غیرفعال در ساختمان توجه به پوسته و انتقال حرارت از آن است (Heydari, 2014). پوسته ساختمان به‌عنوان واسطه اصلی بین فضای داخل و خارج، نقش قابل‌توجهی در تعدیل شرایط آب و هوایی و تأمین آسایش ساکنین و در نتیجه کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی دارد و طراحی و اجرای پوسته‌های ساختمانی که بتوانند با رفتار حرارتی مناسب بالاترین میزان آسایش حرارتی را در فضای داخل بدون کمک تجهیزات مکانیکی تأمین کنند، می‌تواند تا حدود زیادی سبب صرفه‌جویی در مصرف انرژی گردد (Mohammad, 2013).

در معماری بومی منطقه گرم و نیمه‌خشک دزفول، دیوارهای آجری با ضخامت زیاد که در برخی موارد عرض آن‌ها به یک متر می‌رسد، دارای جرم حرارتی بالایی هستند تا به میزان زیادی تعدیل‌کننده شرایط حرارتی و رطوبتی محیط پیرامون بوده و تأمین‌کننده شرایط آسایش برای ساکنین ساختمان باشند. حال آنکه در معماری معاصر شهر دزفول، استفاده از مصالحی مانند آجر سوراخ‌دار، بلوک سفالی، بلوک هبلکس (AAC) و بلوک لیکا (LECA) متداول بوده و جایگزین دیوارهای آجری با ضخامت زیاد شده است.

پژوهش حاضر به دنبال بررسی خواص ترموفیزیکی مواد و انتقال حرارت به‌واسطه جدار خارجی ساختمان در شرایط مرزی پایدار و ناپایدار است. به‌منظور ارزیابی تأثیر انتقال حرارت به‌واسطه مصالح جدار خارجی به‌عنوان تنها متغیر بر تغییر دمای داخلی در بدترین شرایط، مدلی آزمایشی بدون بازشو و چهار طرف باز (بیشترین ارتباط جدار با دمای خارجی و تابش خورشید) در نظر گرفته شده است.

پرسش‌های تحقیق

این پژوهش در پی پاسخ به سؤالات زیر است:

- از میان مصالح متداول مصرفی در دیوارهای ساختمان‌های شهر دزفول در شرایط عدم استفاده از تهویه مطبوع و طبیعی، همچنین در نظر گرفتن دمای داخلی فضا و نظریه فانگر با کاربری مسکونی، کدام یک عملکرد بهینه‌تری در راستای دستیابی به آسایش حرارتی دارد؟
- در اقلیم گرم و نیمه‌خشک بین روش‌های محاسباتی بر اساس شرایط پایدار (ضریب هدایت حرارتی) و شرایط ناپایدار (جرم حرارتی) کدام یک نتایجی بر پایه واقعیت در اختیار قرار خواهد داد؟
- خواص ترموفیزیکی مصالح به‌کاررفته در دیوار خارجی ساختمان در اقلیم گرم و نیمه‌خشک به‌منظور حصول عملکرد بهینه باید دارای چه ویژگی‌هایی باشد؟

۲- پیشینه پژوهش

در خصوص رفتار و عملکرد حرارتی دیوارهای خارجی ساختمان پژوهش‌های متعددی انجام پذیرفته که از جمله می‌توان به این موارد اشاره نمود: بیهانگ لو و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان "یک مدل پارامتری تقریبی برای کمی کردن جرم حرارتی با تغییرات هارمونیک دمای هوای بیرون" باهدف اهمیت ظرفیت حرارتی در انتقال حرارت جداره خارجی به ارائه مدل کلی برای ارزیابی ظرفیت حرارتی می‌پردازند و درنهایت به دست‌کم گرفتن تأثیر جرم حرارتی و تأثیر آن بر کاهش انتقال حرارت و تأخیر زمانی، منتج می‌شود (Lu, Hu, & Zhong, 2022). سعادت و همکاران در مقاله‌ای با عنوان "ارزیابی انرژی، تحلیل اقتصادی و مطالعه محیطی یک ساختمان ایرانی: تأثیر مصالح دیوار و شرایط اقلیمی" به بررسی انتخاب مصالح دیوار خارجی در سه اقلیم گرم، سرد و نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای بر پایه ظرفیت حرارتی پرداخته‌اند. مصالح مورد مطالعه بلوک AAC، بلوک LECA و پلی استایرن اکستروژده است. در روند پژوهش بر اساس شرایط آب و هوایی، انتخاب مناسب مصالح باعث کاهش بار سرمایش و گرمایش سالانه و همچنین دی‌اکسید کربن به ترتیب تا ۲۳/۲، ۲۶/۴ و ۱۸/۵ درصد خواهد بود (Sadati, Rahbar, & Kargarsharifabad, 2023). سیموئر و همکاران در مقاله با عنوان "شبیه‌سازی تأخیر حرارتی سیستم‌های چندلایه با استفاده از روش‌های تحلیلی" نتایج تحلیلی را با استفاده از محاسبات تحلیلی انتقال حرارت از طریق رسانش و بررسی دو سیستم چهار لایه از مواد عایق حرارتی (چوب‌پنبه طبیعی (NC)، پانل‌های پلی‌استایرن منبسط شده (EPS)، تخته فیبر با چگالی متوسط (MDF)) به دست آورده‌اند. برای دستیابی به نتایج تجربی، آزمایش‌ها در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه در دما (۲۳ درجه) و رطوبت (۵۰ درصد) مطبوع انجام شد. بعد از مقایسه نتایج، شباهت بسیاری میان دستاوردهای تجربی و تحلیلی مشاهده شد. نتایج نهایی، دستیابی به فرمولی برای مطالعه انتشار شرایط مرزی ناپایدار با دیدگاه محاسبات تأخیری حرارتی ساختمان و MDF به‌عنوان عایقی با کمترین میزان انتشار حرارت را در اختیار قرار می‌دهد (Simões, Simões, & Tadeu, 2012). پکدوگان و باساران در مقاله خود با عنوان: "عملکرد حرارتی سازه‌های مختلف دیوار خارجی بر اساس جهت‌گیری دیوار" نمونه‌های دیوار صلب را در جهت‌های مختلف جغرافیایی و عایق حرارتی را در شرایط قرارگیری در بیرون، داخل، میانه دیوار و ساندویچ پنل از جنس عایق پلی‌استایرن اکستروژده (XPS) در فصل‌های زمستان و تابستان در ۴ شهر ترکیه با ۴ اقلیم متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در تابستان از میر با هوای گرم، در همه جهات کمترین میزان نیاز به عایق حرارتی لازم است (Pekdogan & Basaran, 2017). شریفیان در مقاله خود با عنوان "مطالعه چگونگی تأثیر جرم حرارتی مصالح رایج در ساخت جداره‌های خارجی ساختمان در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های تبریز" با توجه به اهمیت جداره خارجی ساختمان و تأثیر آن بر آسایش حرارتی به بررسی جرم حرارتی مصالح رایج مورد استفاده در دیوار خارجی ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی در اقلیم سرد پرداخته است. شریفیان به این نتیجه رسیده است که ضریب هدایت حرارتی در این اقلیم اهمیت بیشتری نسبت به ظرفیت حرارتی دارد (Sharifian-Qazijehani, 2016). محمد در مقاله خود با عنوان

"مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار، مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تهران" مصالحی از جمله بلوک سفالی، لیکا، هبلکس و عایق حرارتی در ساخت جداره خارجی ساختمان باهدف بررسی نقش جرم حرارتی و عایق حرارتی در شرایط پایدار و ناپایدار را در اقلیم گرم و خشک مورد مطالعه قرار داده است. نتایج گواه آن است که جرم حرارتی در انتقال حرارت توسط جدار خارجی در شرایط واقعی و خارج از آزمایشگاه دارای اهمیت بسیار بیشتری است (Mohammad, 2013). رودریگوس و همکاران او در مقاله خود تحت عنوان "تأثیر انتقال حرارت بر مصرف انرژی ساختمان‌های مدیرانه‌ای با جرم حرارتی متفاوت" با در نظر گرفتن این موضوع که جرم حرارتی بالا یک استراتژی سرمایش غیرفعال در فصل تابستان است، به بررسی آن در خانه‌های مسکونی کوچک منطقه مدیرانه پرداخته است. نتایج عنوان می‌کند مقدار جرم حرارتی و نوع اقلیم در کنار هم می‌تواند نتایج متفاوتی از نظر انتقال حرارتی به دست دهد (Eugenio Rodrigues, Fernandes, Gaspar, Gomes, & Costa, 2019). دانوسکا و همکاران در مقاله با عنوان "عدم قطعیت شبیه‌سازی انتقال حرارت اجزای ساختمان‌های چوبی در اقلیم ایتالیا: نقش ضریب هدایت حرارتی" به نقش انتقال حرارت در شرایط پایدار و ناپایدار محیطی برای ساختمان‌های چوبی پرداخته است. نتیجه حاصل اینکه انتقال حرارت در شرایط ناپایدار (ظرفیت حرارتی) نسبت به پایدار (ضریب هدایت حرارتی) تا ۹ درصد افزایش دارد (Danovska, Pernigotto, Baggio, & Gasparella, 2022). ریلی و کینان در مقاله خود با عنوان "تأثیر جرم حرارتی بر مصرف انرژی ساختمان" به تأثیر جرم حرارتی در اقلیم‌های گرم با خنک‌کننده فعال و اقلیم‌های سرد با گرمایش فعال پرداخته است. نتیجه حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که جرم حرارتی بالا در اقلیم گرم باعث کاهش مصرف انرژی و در اقلیم سرد باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود (Reilly & Kinnane, 2017). برن و همکاران در مقاله خود تحت عنوان "رفتار حرارتی جدار ساختمان مقاوم‌سازی شده با عایق حرارتی در دیوار و سقف در شرایط پایدار و ناپایدار" تمرکز خود را روی مقاوم‌سازی دیوار و سقف یک ساختمان جهت دستیابی به بازده انرژی در ایرلند با اقلیم اقیانوسی قرار داده‌اند. در این پژوهش با بررسی مقاومت و تلفات انرژی در سقف و دیوار در شرایط پایدار و ناپایدار این نتیجه حاصل شد که محاسبات پایدار به دلیل عدم وجود مزیت جرم حرارتی در شرایط واقعی قابل قبول نیست (Byrne, Byrne, Davies, & Robinson, 2013).

جدول ۱: پیشینه تحقیق (مأخذ: نگارندگان)

ردیف	مقاله	هدف	نتیجه
۱	یک مدل پارامتری تقریبی برای کمی کردن جرم حرارتی با تغییرات هارمونیک دمای هوای بیرون	اهمیت ظرفیت حرارتی در انتقال حرارت جداره خارجی	تأثیر چشمگیر جرم حرارتی مصالح بر کاهش انتقال حرارت
۲	ارزیابی انرژی، تحلیل اقتصادی و مطالعه محیطی یک ساختمان ایرانی: تأثیر مصالح دیوار و شرایط اقلیمی	انتخاب مصالح دیوار خارجی در سه اقلیم گرم، سرد و نیمه‌خشک و مدیرانه‌ای بر پایه ظرفیت حرارتی	بر اساس شرایط آب و هوایی انتخاب مناسب مصالح می‌توان کاهش بار سرمایش و گرمایش سالانه و همچنین دی‌اکسید کربن در پی داشته باشد.
۳	شبیه‌سازی تأخیر حرارتی سیستم‌های چند لایه با استفاده از روش‌های تحلیلی	بررسی عایق‌های حرارتی با روش تحلیلی و تجربی و مقایسه نتایج آن‌ها	دستیابی به فرمولی برای مطالعه انتشار شرایط مرزی ناپایدار با دیدگاه محاسبات تأخیری حرارتی ساختمان-MDF به عنوان عایقی با کمترین میزان انتشار حرارت
۴	عملکرد حرارتی سازه‌های مختلف دیوار خارجی براساس جهت‌گیری دیوار	عملکرد عایق حرارتی در جهات جغرافیایی و اقلیم‌های متفاوت	در تابستان از میر با هوای گرم، در همه جهات کمترین میزان نیاز به عایق حرارتی لازم است.
۵	مطالعه چگونگی تأثیر جرم حرارتی مصالح رایج در ساخت جداره‌های خارجی ساختمان در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های تبریز	بررسی جرم حرارتی مصالح رایج مورد استفاده در دیوار خارجی ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی در اقلیم سرد	که ضریب هدایت حرارتی در این اقلیم اهمیت بیشتری نسبت به ظرفیت حرارتی دارد.

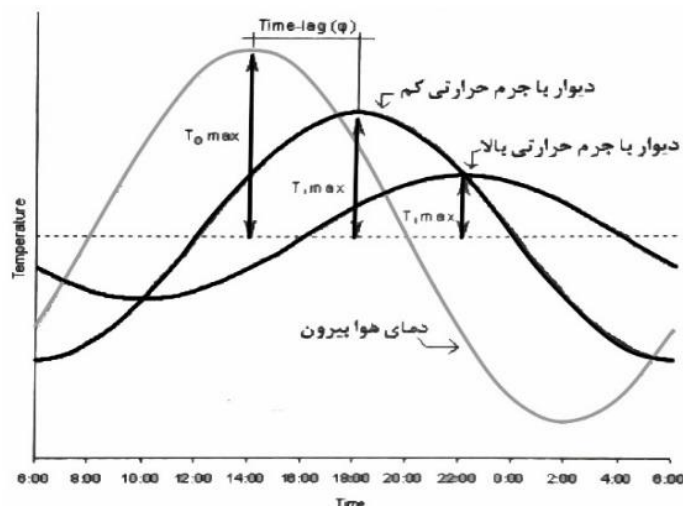
۶	مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار، مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تهران	استفاده از مصالح متداول، بلوک سفالی، لیکا، هبلکس و عایق حرارتی در ساخت جداره خارجی ساختمان با هدف بررسی نقش جرم حرارتی و عایق حرارتی در شرایط پایدار و ناپایدار	در اقلیم گرم و خشک جرم حرارتی در انتقال حرارت توسط جدار خارجی در شرایط ناپایدار دارای اهمیت بسیار بیشتری است.
۷	تأثیر انتقال حرارت بر مصرف انرژی ساختمان‌های مدیرانه‌ای با جرم حرارتی متفاوت	بررسی جرم حرارتی در خانه‌های مسکونی کوچک منطقه مدیترانه	مقدار جرم حرارتی و نوع اقلیم در کنار هم می‌تواند نتایج متفاوتی از نظر انتقال حرارتی بدست دهد.
۸	عدم قطعیت شبیه سازی انتقال حرارت اجزای ساختمان‌های چوبی در اقلیم ایتالیا: نقش ضریب هدایت حرارتی	نقش انتقال حرارت در شرایط پایدار و ناپایدار محیطی برای ساختمان‌های چوبی	انتقال حرارت در شرایط ناپایدار (ظرفیت حرارتی) نسبت به پایدار (ضریب هدایت حرارتی) تا ۹ درصد افزایش دارد.
۹	تأثیر جرم حرارتی بر مصرف انرژی ساختمان	تأثیر جرم حرارتی در اقلیم‌های گرم با خنک‌کننده فعال و اقلیم‌های سرد با گرمایش فعال	جرم حرارتی بالا در اقلیم گرم باعث کاهش مصرف انرژی و در اقلیم سرد باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود.
۱۰	رفتار حرارتی جدار ساختمان مقاوم سازی شده با عایق حرارتی در دیوار و سقف در شرایط پایدار و ناپایدار	مقاوم سازی دیوار و سقف یک ساختمان جهت دستیابی به بازده انرژی در ایرلند با اقلیم اقیانوسی	محاسبات پایدار به دلیل عدم وجود مزیت جرم حرارتی در شرایط واقعی قابل قبول نیست.

همانطور که از پیشینه پژوهش برمی‌آید، مصالح در اقلیم‌های متفاوت در شرایط پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل تفاوت چشمگیری دارد. از این رو جهت دستیابی به مصالح بهینه و مصرفی متداول در اقلیم گرم و نیمه خشک دزفول، با استفاده از مدل آزمایشی به بررسی دمای داخلی حاصل از انتقال حرارت بدون وجود تهویه و تأثیر نور خورشید بر دمای داخلی در شرایط مرزی پایدار و ناپایدار پرداخته می‌شود؛ تا علاوه بر شناخت خواص ترموفیزیکی مصالح مناسب این اقلیم به رتبه‌بندی مصالح متداول مصرفی در دزفول در راستای کاهش مصرف انرژی دست یابیم.

۳- مواد و روش‌ها

روش‌های تحلیل عملکردی مواد و مصالح مصرفی ساختمان در دو مجموعه محاسباتی پایدار و ناپایدار دسته‌بندی می‌شوند (Mohammad, 2013). در محاسبات شرایط پایدار، دمای فضای داخل و خارج در زمان مشخص ثابت فرض می‌شود؛ این محاسبات با در نظر گرفتن خاصیت عایق بودن مواد یا همان ضریب هدایت حرارتی (λ) می‌آید. با توجه به رابطه معکوس میان مقاومت حرارتی (R) و ضریب هدایت حرارتی (λ)، هر چه مقدار λ کمتر مقدار R مصالح و در نهایت دیوار بیشتر خواهد بود (Koch-Nielsen, 2013). خاصیت عایق بودن دیوار برای تخمین تقاضای خالص انرژی گرمایشی به صورت ماهانه در آب و هوای سرد و خنک استفاده می‌شود (Amerine, Berg, & Cruess, 2021). حال آنکه، جداره خارجی ساختمان در معرض دمای متغیر طی شبانه روز است. به بیان دیگر علاوه بر قابلیت عایق بودن در برابر گرما، جرم حرارتی مفید دیوار که تابعی از ظرفیت حرارتی، چگالی و ضریب هدایت حرارتی لایه‌های تشکیل دهنده آن است نیز، نقش مهمی در عملکرد دوره‌ای ساختار دیوار دارد. به طور کلی جرم حرارتی مصالح که قابلیت ذخیره یا انباشت گرما را دارد (Mansoureh, 2017)، در محاسبات شرایط پایدار نادیده گرفته می‌شود؛ در حالی که محاسبات ناپایدار با در نظر گرفتن جرم حرارتی مصالح در شرایط واقعی انجام می‌شود. نتایج حاصل از این محاسبات برای تخمین نیاز انرژی در اقلیم گرم دارای ضریب اطمینان بیشتری خواهد بود (Amerine et al., 2021). در نتیجه اگر بخواهیم به تأثیر تابش آفتاب بر حرارت داخلی بپردازیم، خصوصاً در شرایطی که تهویه طبیعی و مکانیکی وجود ندارد، در درجه نخست باید به خواص ترموفیزیکی مصالح به کار رفته در جداره خارجی پرداخته شود. در این ساختمان‌ها دمای سطوح خارجی (میانگین دمای تابش) در طی ساعات تابش آفتاب به نسبت ثابت و تقریباً برابر با دمای هوا است. هر چه جرم حرارتی مصالح دیوار بیشتر باشد، حرارت با

سرعت کمتری از خارج به سمت داخل انتقال می‌یابد. در نتیجه، سطوح داخلی با تاخیر بیشتری افزایش دما خواهند داشت. با توجه به نمودار ۱ تاخیر زمانی ناشی از انتقال ذره‌ای حرارتی در ساختمانی که جداره خارجی نه چندان مناسبی دارد، حدود سه و نیم ساعت و در ساختمانی با جرم حرارتی دیوار مناسب است حدود هفت و نیم ساعت است (Heydari, 2014). به این منظور با توجه به نیاز اقلیم باید از مصالحی با جرم حرارتی بالا استفاده شود، تا بتواند حرارت بیشتری طی روز در خود ذخیره سازد (Koch-Nielsen, 2013).



نمودار ۱: تاثیر دیوار خارجی ساختمان بر دمای داخلی در مقایسه با دمای خارجی (مأخذ: (Heydari, 2014))

• اقلیم دزفول

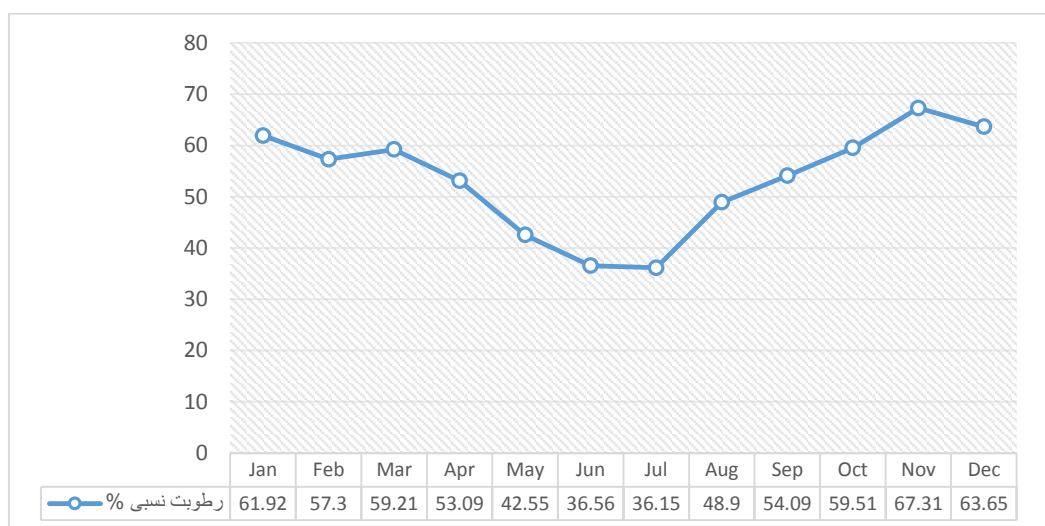
کسب یک درک علمی پایه‌ای از اقلیم در یک مکان، کار دشواری نیست. شهرداری ساختن این درک نیازمند زمان و تجربه است ولی داده‌های مورد نیاز برای تصمیم‌گیری در طراحی در حال حاضر موجود است (Koch-Nielsen, 2013). شهرستان دزفول حدود ۸۷۵۹ km² مساحت دارد. دزفول در ۳۲ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی گرینویچ قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۴۳m می‌باشد. با توجه به میزان درجه حرارت و رطوبت نسبی، می‌توان این منطقه را جزء اقلیم گرم و نیمه خشک محسوب نمود (Qabadian, 1994). با در نظر گرفتن نمودار سایکرومتریک شهر دزفول که با استفاده از نرم افزار ClimateConsultant 6.0 تهیه شده است، میزان پاسخگویی به نیاز حرارتی در شرایط اقلیمی این منطقه که به عنوان استراتژی‌های سرمایشی و گرمایشی در طراحی باید به آن‌ها توجه شود به این شرح است.

شرایط آسایش حرارتی	۱۰/۴ درصد
دریافت مستقیم خورشید غیرفعال براساس جرم حرارتی بالا	۱۱/۲ درصد
گرمایش مکانیکی همراه با رطوبت‌زنی	۸/۶ درصد
دریافت حرارت درونی	۲۰/۵ درصد
سرمایش مکانیکی	۴۰/۳ درصد
سرمایش مکانیکی همراه با رطوبت‌زنی	۱۶ درصد
تهویه به روش طبیعی	۷/۴ درصد
محافظت بازشوها در برابر تابش (سایه‌اندازی)	۲۷/۳ درصد

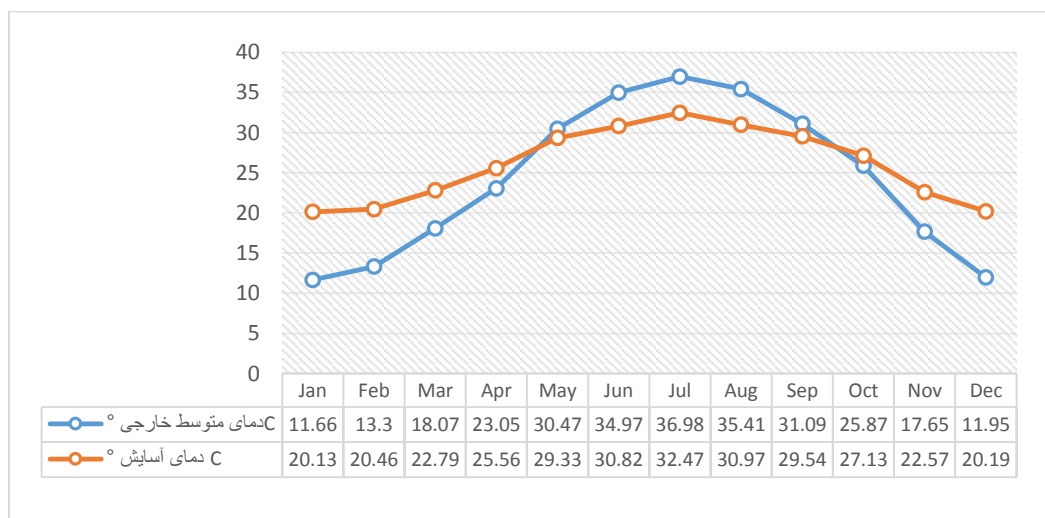
• حدود آسایش حرارتی و دمای خنثی

مفهوم آسایش هسته ایجاد محیط‌های انسانی سالم است (Bryan, 2014). انسان موجودی است با نیازهای متفاوت فیزیولوژیکی و روحی-روانی، همچنین موجودی است اجتماعی که نیاز به تعامل با هم‌نوعان خود دارد. برای ایجاد معماری

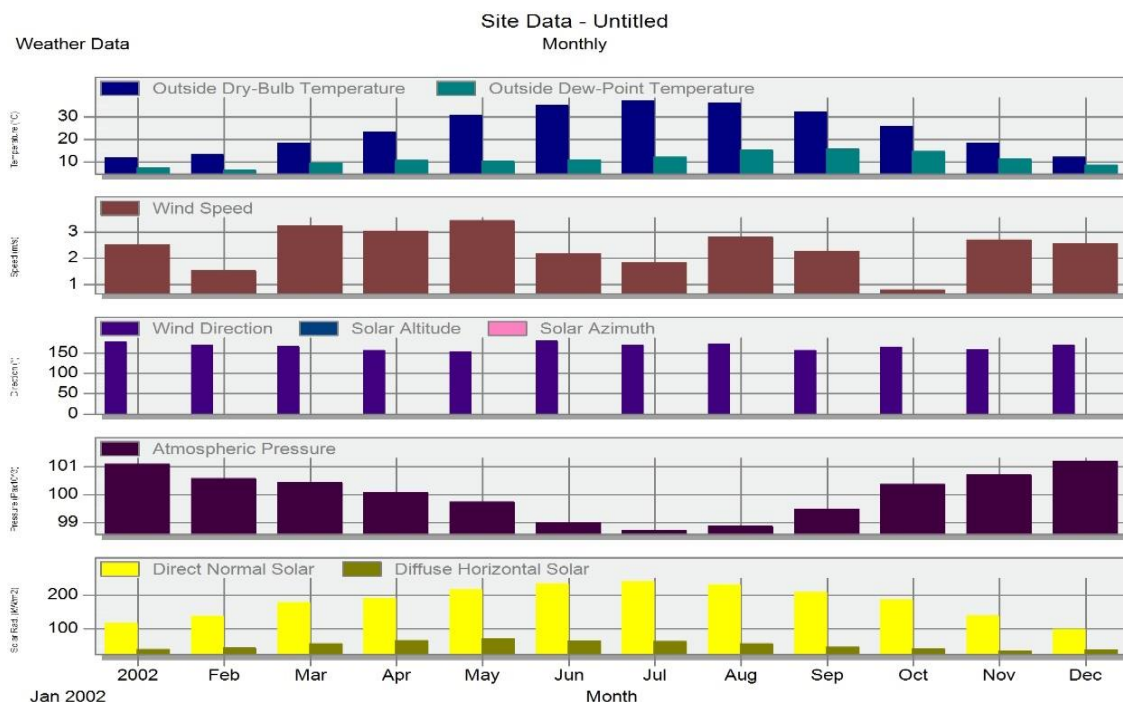
مناسب برای انسان لازم است طراح به کلیه این نیازها توجه کند و به هر یک در خور آن پردازد (Mansoureh, 2017). اگر در زمستان فضایی سرد باشد و افراد دچار تنش سرمایی شوند، آن فضا را باید گرم و اگر بیش از حد گرم شود در این صورت افراد دچار تنش گرمایی می‌شوند. هم تنش گرمایی و هم تنش سرمایی حالتی از نبود راحتی هستند. حد راحتی یعنی تعیین دو مرز بالا و پایین آسایش حرارتی به کمک متغیرهای آب و هوایی مثل دما، رطوبت، وزش باد و تابش به نحوی که هیچگونه تنش گرمایی و سرمایی احساس نشود را می‌توان دمای خنثی یا دمای آسایش بنامیم (Heydari, 2014). بر طبق استاندارد آسایش تطبیقی، حیدری در کتاب سازگاری حرارتی در معماری با در نظر گرفتن میانگین دمای خارجی و میزان رطوبت نسبی، روابطی را برای محاسبه دمای آسایش ارائه کرده است. دمای آسایش ساکنین شهر دزفول با توجه به دما (نمودار ۳) و رطوبت (نمودار ۲) در ماه‌های آذر تا بهمن از رابطه: $T_{\text{Comfort}} = 0.1985 T_{\text{Out}} + 17.82$ و در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور از رابطه: $T_{\text{Comfort}} = 0.3289 T_{\text{Out}} + 19.324$ و در مابقی ماه‌ها از رابطه: $T_{\text{Comfort}} = 0.555 T_{\text{Out}} + 12.767$ بدست آمده است. با در نظر گرفتن شرایط آسایش اقلیمی، فرهنگی و سازگاری شهر دزفول با شهر اهواز حدود آسایش سالانه را با استفاده از مطالعات حیدری، در فصل گرم $23/8$ درجه سانتیگراد و در فصل سرد $16/2$ درجه سانتیگراد و دمای خنثی سالانه 21 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.



نمودار ۲: میانگین رطوبت نسبی شهر دزفول (ماخذ: سازمان هواشناسی شهرستان دزفول)



نمودار ۳: دمای آسایش ساکنین شهر دزفول در ماه‌های مختلف (ماخذ: نگارندگان)



نمودار ۴: تحلیل شرایط اقلیمی شهر دزفول (مأخذ: نگارندگان)

• مصالح متداول در دیوارهای ساختمان‌های مسکونی شهر دزفول

یکی از مهمترین عوامل در کل مجموعه سیاست‌های مربوط به بهره‌برداری انرژی جهانی، کاربرد مصالح مناسب در جدار خارجی ساختمان است، زیرا تقریباً ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی به ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد (Pekdogan & Basaran, 2017). پیشرفت معاصر، در دو زمینه علمی و فناوری منجر به توسعه تولید مصالح و عایق‌های حرارتی نوینی شده است (Mavromatidis, Mankibi, Michel, & Santamouris, 2012). در مورد بکارگیری مصالح متداول و جدید در دیوارهای خارجی ساختمان‌های مسکونی شهر دزفول تاکنون پژوهش‌های جامع و مستندی انجام نشده است. با توجه به این موضوع و استناد به مصاحبه با کارشناسان و مجریان صنعت ساختمان و بازدید میدانی از ساخت‌وساز مناطق مختلف شهر می‌توان به این شرح عنوان نمود: دیوارهای باربر با استفاده از آجر سوراخدار، دیوارهای غیرباربر با بلوک سفالی، بلوک هبلکس (AAC) و بلوک لیکا (LECA). بلوک سفالی و لیکا در مقابل ضربه ناشی از نصب تاسیسات در مقایسه با بلوک هبلکس از مقاومت کمتری برخوردارند. با توجه به ضریب هدایت حرارتی هر یک از مصالح به ترتیب بلوک لیکا با 0.25 w/m.k ، AAC با 0.29 w/m.k و بلوک سفالی با 0.5 w/m.k بیشترین میزان مقاومت در برابر انتقال گرما را دارا هستند. علی‌رغم مقاومت خوب بلوک لیکا در برابر حرارت به دلیل شکننده بودن و هزینه بالای تهیه نوع با کیفیت آن (به دلیل بعد مسافت) کمتر مورد استقبال قرار گرفته است.

نتایج حاصل از پیشرفت علم و فناوری منجر به ساخت عایق‌های حرارتی زیادی شده است که متداول‌ترین آن‌ها عایق حرارتی پلی‌استایرن اکستروژده (XPS) با ضریب هدایت حرارتی 0.041 w/m.k است. عایق حرارتی اتیکس (ETICS) با ضریب هدایت حرارتی 0.038 w/m.k دارای تفاوت چشمگیری در مقایسه با عایق‌های حرارتی دیگر است. هم‌اکنون در کشور آلمان در بیش از ۶۰ درصد ساختمان‌های موجود از این عایق حرارتی استفاده شده است. این دو نوع عایق حرارتی می‌توانند موارد مناسبی جهت بررسی عملکردی در کنار مصالح متداول ساخت در نظر گرفته شوند.

همانطور که پیش‌تر گفته شد کنترل جابجایی گرمای دیوارها به دو عامل خواص عایق بودن مصالح و جرم حرارتی دیوارها بستگی دارد. خاصیت عایق بودن مصالح به عنوان عامل تأثیرگذار بر رفتار حرارتی دیوارها وابسته به ضریب هدایت حرارتی (λ) و ضخامت مصالح (d) است. کاهش ضریب هدایت حرارتی و افزایش ضخامت مصالح منتج به بالا رفتن

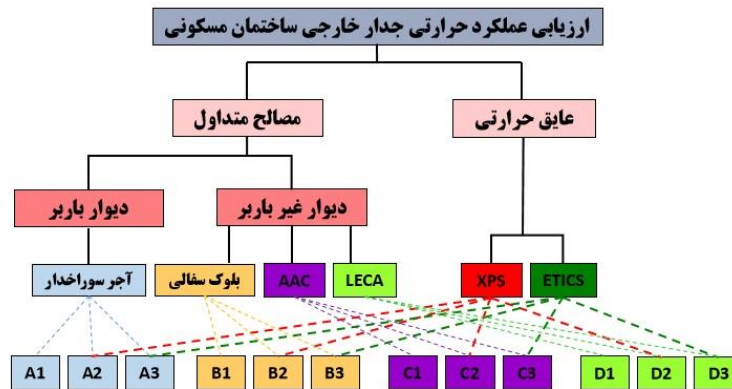
مقاومت (R) و افزایش خاصیت عایق بودن مصالح می‌شود. جرم حرارتی به عنوان عامل دیگر بر سه ویژگی اولیه مصالح شامل: چگالی (ρ)، ظرفیت حرارتی (C) و ضریب هدایت حرارتی استوار است (Eugénio Rodrigues, Fereidani, & Fernandes, & Gaspar, 2023).

پژوهش فوق با رویکردی کمی-مقایسه‌ای به استناد مطالعات میدانی، کتابخانه‌ای و با کمک شبیه‌سازی دوازده نوع دیوار را مورد بررسی قرار داده است. معیار دسته‌بندی دیوارهای باربر و غیرباربر؛ بکارگیری چهار نوع مصالح رایج آجر سوراخدار، بلوک سفالی، بلوک هبلکس و بلوک لیکا در ساختمان‌های مسکونی شهر دزفول و نحوه قرارگیری دو عایق حرارتی ETICS و XPS کنار سایر مصالح دیوار است.

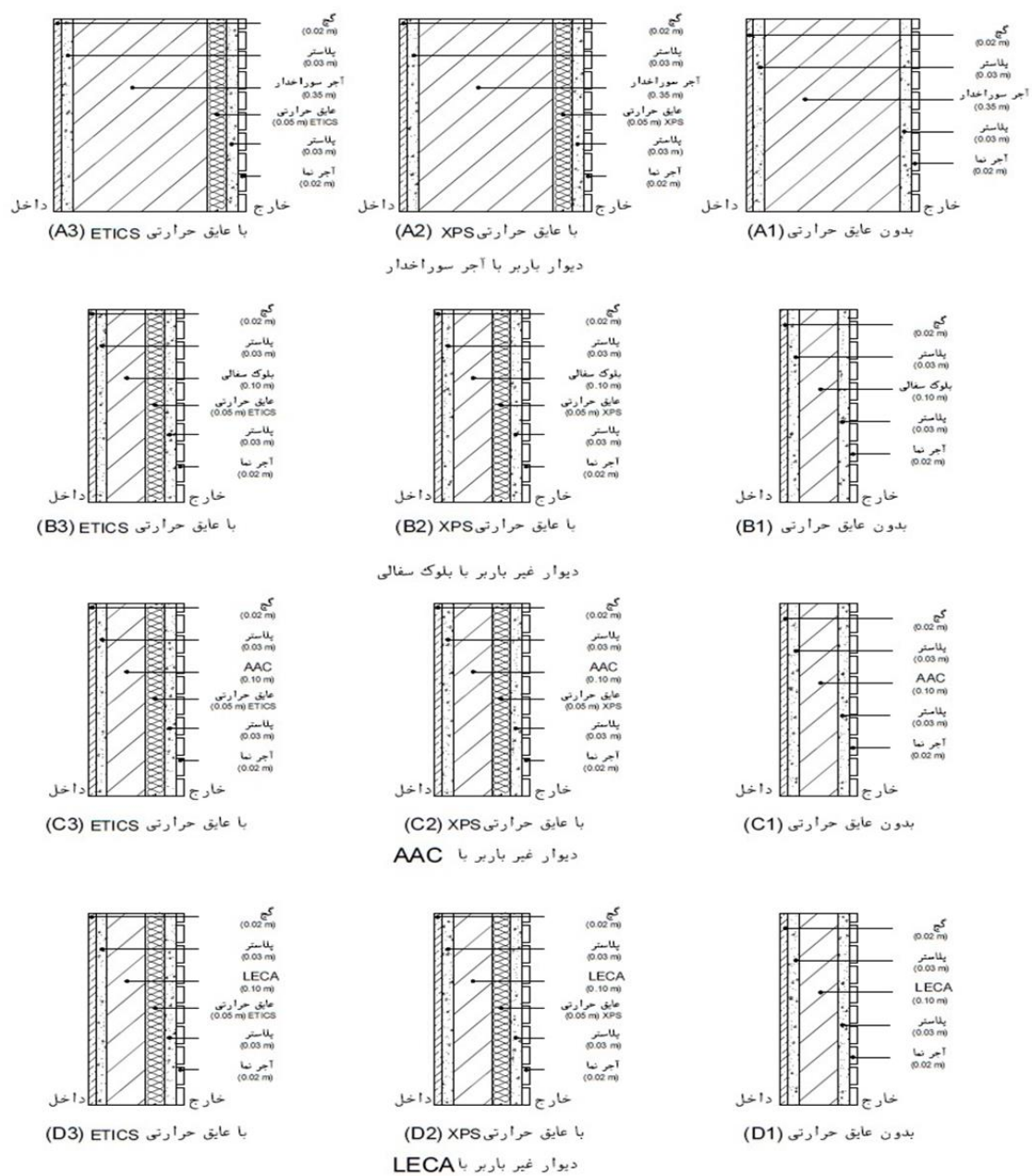
نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با موتور مدلسازی انرژی‌پلاس (EnergyPlus) برای مدلسازی ساختمان از جنبه‌های مختلف مثل فیزیک ساختمان (مصالح ساختمانی)، معماری ساختمان، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی و ... کاربرد دارد. این نرم‌افزار، توسط دپارتمان انرژی آمریکا ساخته شده و از دقیق‌ترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه است. نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر نه تنها از دقت زیادی در محاسبات برخوردار است (Moslehi, 2016)، بلکه در مقایسه با دیگر نرم‌افزارهای مدلسازی موجود از قابلیت‌های زیادی برخوردار است. در خصوص اعتبار سنجی نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر پژوهش‌هایی انجام شده است. از جمله می‌توان به نتایج حاصل از قیاس اختلاف میانگین دمای فضای داخلی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با سناریو واقعی در ساختمان آموزشی، اشاره کرد که در کمترین میزان 1°C و در بیشترین میزان $2/1^{\circ}\text{C}$ اختلاف وجود دارد (Abba, Majid, Ahmed, & Gbenga, 2022). همچنین تحقیقی دیگر در قیاس میان سناریوهای واقعی از اتاق‌های ساده تا ساختمان‌های اداری با شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر این نتیجه حاصل شد که الگوریتم‌های مورد استفاده در این نرم‌افزار بدون خطا هستند (Javed. Saqib, 2016). از این رو دیوارها در شرایط آب‌وهوایی گرم و نیمه خشک دزفول توسط نسخه ۷ نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مدلسازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

مدلسازی در نرم‌افزار برگرفته از سناریو تعریف شده، انجام می‌شود. دمای داخلی ساختمان متأثر از سه عامل: عملکرد مصالح در مقابل حرارت تابش خورشید و دمای هوای مجاور، تهویه (طبیعی-مطبوع) و ورود نور خورشید به فضا است. هر چه مساحت جدار خارجی در معرض هوا و تابش بیشتر باشد، انتقال حرارت بیشتری رخ خواهد داد؛ در حالی که مساحت کف فضا تاثیری بر این روند ندارد. به همین منظور با در نظر گرفتن بدترین شرایط و ساده‌سازی مدلسازی (Amerine et al., 2021)، از یک مدل آزمایشی مکعب مستطیل شکل با ابعاد مفید طول ۴m، عرض ۳m و ارتفاع ۳m، جهت‌گیری بهینه زاویه سمت (Azimout) در شهر دزفول ($172/5^{\circ}$ درجه)، استفاده شده است. چهار طرف مدل آزاد و در معرض تابش و دمای هوا قرار دارد. نظر به اینکه، تنها متغیر پژوهش تاثیر چگونگی عملکرد مصالح بر دمای داخلی است؛ برای دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر، مدلسازی بدون هیچ حفره، پنجره و سیستم سرمایشی و گرمایشی (HVAC) انجام پذیرفت. مصالح استفاده شده در کف و سقف ثابت و در نمونه‌های دارای عایق حرارتی، عایق به لایه‌های کف و سقف اضافه شد.

۱۲ مدل آزمایشی مورد مطالعه در کل (تصویر ۱) شامل دو گروه دیوارهای باربر (A) و دیوارهای غیرباربر (B,C,D) هستند که در سه مرحله شامل: ۱- دیوارهای بدون عایق حرارتی 2 (A1, B1, C1, D1)- دیوارهای با عایق حرارتی 3 (A2, B2, C2, D2) XPS- دیوارهای با عایق حرارتی 3 (A3, B3, C3, D3) ETICS مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند مصالح به کار رفته در دیوارهای باربر آجر سوراخدار (A) و در دیوارهای غیر باربر مصالحی از جمله بلوک سفالی (B)، بلوک هبلکس (C) (AAC) و بلوک لیکا (D) (LECA) استفاده شده است. ورود اطلاعات به نرم افزار شامل ضخامت و ترتیب چینش لایه‌های دیوارها با استفاده از تصویر ۲ و خواص ترموفیزیکی مصالح از جدول ۲ صورت گرفت. شرایط آب و هوایی با بارگذاری فایل اقلیمی دزفول بر روی نرم‌افزار تعریف شد تا شبیه‌سازی تحت شرایط واقعی انجام شود.



تصویر ۱: متغیرهای پژوهش (انواع دیوار) (ماخذ: نگارندگان)



تصویر ۲: نمایش جزئیات دیوارهای مدلسازی شده در نرم افزار دیزاین بیلدر (ماخذ: نگارندگان)

جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های حرارتی - ترموفیزیکی مصالح (ماخذ: (Landolfi & Nicoletta, 2022) و (Regulations, 2020))

ظرفیت حرارتی (C)	چگالی (ρ)	گرمای ویژه (C_p)	مقاومت (R)	ضخامت مصالح (d)	ضریب هدایت حرارتی (λ)	
J/kg	Kg/m ³	J/kg.k	m ² .k/W	m	W/m.k	
329120	1700	880	0.28	0.22	-	آجر سوراخدار
80000	800	1000	0.34	0.1	0.29	بلوک هبلکس
90000	900	1000	0.43	0.1	0.23	بلوک لیکا
109200	1300	840	0.2	0.1	0.5	بلوک سفالی
2680	34	1464	13.15	0.05	0.0038	عایق حرارتی ETICS
2488.8	40	1340	1.22	0.05	0.041	عایق حرارتی XPS
42534	1700	1251	0.01	0.02	0.84	آجر نسوز
36000	1800	1000	0.02	0.02	1	ملات ماسه سیمان
22560	1200	940	0.03	0.02	0.57	گچ

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاکی از آن است که در شرایط پایدار و ناپایدار و تغییرات آب و هوایی در فصول گرم و سرد، اختلاف دمای شب و روز، دیوارها دارای مقاومت حرارتی (R) و ظرفیت حرارتی (C) متفاوت با توجه به ضریب تبادل حرارت (U-value) خود رفتار می‌کنند. این امر با کمک نتایج مستخرج از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، خواص عایق بودن مصالح و جرم حرارتی دیوارها قابل تفسیر است. به صورتی که هر چه گرمای ویژه (C_p) و چگالی (ρ) بیشتر در عین حال ضریب هدایت حرارتی (λ) کمتر باشد، دیوار به عنوان خازن عمل کرده و زمان انتقال حرارت از خارج به داخل افزایش می‌یابد. این عمل منجر به ارائه رفتار بهینه از دیوار می‌شود (Amerine et al., 2021).

۴- نتایج و بحث

براساس روش محاسباتی شرایط پایدار، دیوارهای دارای مقاومت بیشتر و تبادل حرارتی کمتر بهینه‌ترین گزینه جهت استفاده در ساختمان‌ها هستند. چنانچه از نتایج شبیه‌سازی بر می‌آید، در مرحله اول از میان دیوارهای بدون عایق حرارتی (D1, C1, B1, A1) با اختلاف کمی نسبت به هم (جدول ۳)، دارای تبادل حرارتی (U-value) به ترتیب ۲/۱۳۳، ۱/۶۲۹، ۱/۴۲۱ و ۱/۸۱۵ W/m².k و مقاومت حرارتی (R) دیوار ۰/۷۰۴، ۰/۶۱۴، ۰/۴۶۹، ۰/۵۵۱ m².k/W می‌باشند که از این میان دیوار D1 (بلوک لیکا بدون عایق حرارتی) بهترین عملکرد را دارد. در مرحله دوم با اضافه شدن عایق حرارتی، XPS (D2, C2, B2, A2) دارای ضریب هدایت حرارتی 0.041/0 W/m.k به دیوارها، تبادل حرارتی به ترتیب ۰/۶۸۸، ۱/۷۶۸، ۱/۹۲۳، ۱/۸۳۳ W/m².k و مقاومت حرارتی ۱/۶۸۸، ۱/۷۶۸، ۱/۹۲۳، ۱/۸۳۳ m².k/W اگرچه تفاوت زیادی ندارند با این حال، بهینه‌ترین آن‌ها دیوار D2 (بلوک لیکا با عایق حرارتی XPS) است. در مرحله سوم دیوارهای دارای عایق حرارتی ETICS (D3, C3, B3, A3) دارای ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۳۸ W/m.k، تبادل حرارتی به ترتیب ۰/۰۷۲، ۰/۰۷۳، ۰/۰۷۳، ۰/۰۷۳ W/m².k و مقاومت حرارتی ۱۳/۸۶۲، ۱۳/۷۷۲، ۱۳/۶۲۷، ۱۳/۷۰۷ m².k/W که از این میان دیوار D3 (بلوک لیکا با عایق حرارتی ETICS) بهینه‌ترین رفتار حرارتی را از خود به نمایش می‌گذارد، دارای اختلاف زیادی است.

جدول ۳: مقایسه تبادل حرارت، مقاومت، ظرفیت حرارتی دیوارهای مدل شده با نرم افزار (ماخذ: نگارندگان)

نام دیوار	تبادل حرارتی (U)	مقاومت (R)	ظرفیت حرارتی (C)
	$W/m^2.k$	$m^2.k/W$	J/k
A1	1.815	0.551	466214
A2	0.565	1.768	468894
A3	0.073	13.707	468702.8
B1	2.133	0.469	246294
B2	0.592	1.688	248974
B3	0.073	13.627	278782.8
C1	1.629	0.614	217094
C2	0.545	1.833	219774
C3	0.073	13.772	219582.8
D1	1.421	0.704	227094
D2	0.520	1.923	229774
D3	0.072	13.862	229582.8

در ماه‌های زمستان به نسبت تابستان دیوارها بیشتر براساس آنچه از ضریب هدایت حرارتی آن‌ها انتظار می‌رود، رفتار می‌کنند. با نگاهی به جدول ۴ میانگین دماهای داخلی فضاها مدل شده با نتایج به دست آمده مغایرت دارد. در نتیجه دیوارهای دارای عایق حرارتی در فصل گرما و با کوتاه شدن شب زمان کافی برای خروج گرمای ورودی در طول روز را پیدا نمی‌کند. در روزهای متوالی دمای داخلی رو به فزونی می‌گذارد تا جایی که تفاوت قابل توجهی بین دمای درون و بیرون مشاهده می‌شود.

جدول ۴: میانگین دمای داخلی در مدل‌های متفاوت (ماخذ: نگارندگان)

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
فروردین	24.02	26.21	28.30	24.46	26.45	28.51	24.10	26.40	28.51	23.93	26.38	28.48
اردیبهشت	28.07	31.37	33.44	28.72	31.63	33.67	28.03	31.53	33.66	27.69	31.46	33.65
خرداد	31.14	35.76	37.91	32.10	36.16	38.19	31.13	35.97	38.17	30.66	35.87	38.13
تیر	32.06	37.01	39.89	33.13	37.53	40.21	32.03	37.29	40.19	31.51	37.17	40.16
مرداد	31.09	35.52	37.69	32.11	35.99	37.87	31.06	35.76	37.84	30.57	35.65	37.83
شهریور	29.14	33.15	35.68	30.07	33.65	35.91	29.20	33.47	35.89	28.80	33.39	35.88
مهر	26.30	29.27	32.04	27.05	29.73	32.19	26.39	29.59	32.17	26.08	29.54	32.18
آبان	20.87	22.46	26.16	21.11	22.70	26.26	20.96	22.70	26.27	20.90	22.72	26.29
آذر	17.59	17.99	21.50	17.60	18.20	21.62	17.65	18.23	21.63	17.68	18.27	21.65
دی	17.15	17.34	20.28	17.05	17.46	20.41	17.17	17.51	20.42	17.23	17.56	20.42
بهمن	19.07	19.36	21.42	19.17	19.59	21.62	19.09	19.57	21.62	19.05	19.57	21.61
اسفند	21.35	22.84	25.04	21.60	23.03	25.24	21.43	23.02	25.24	21.36	23.03	25.22

• پایین ترین دما نسبت به دیوارهای هم گروه

• پایین ترین دما

• بالا ترین دما

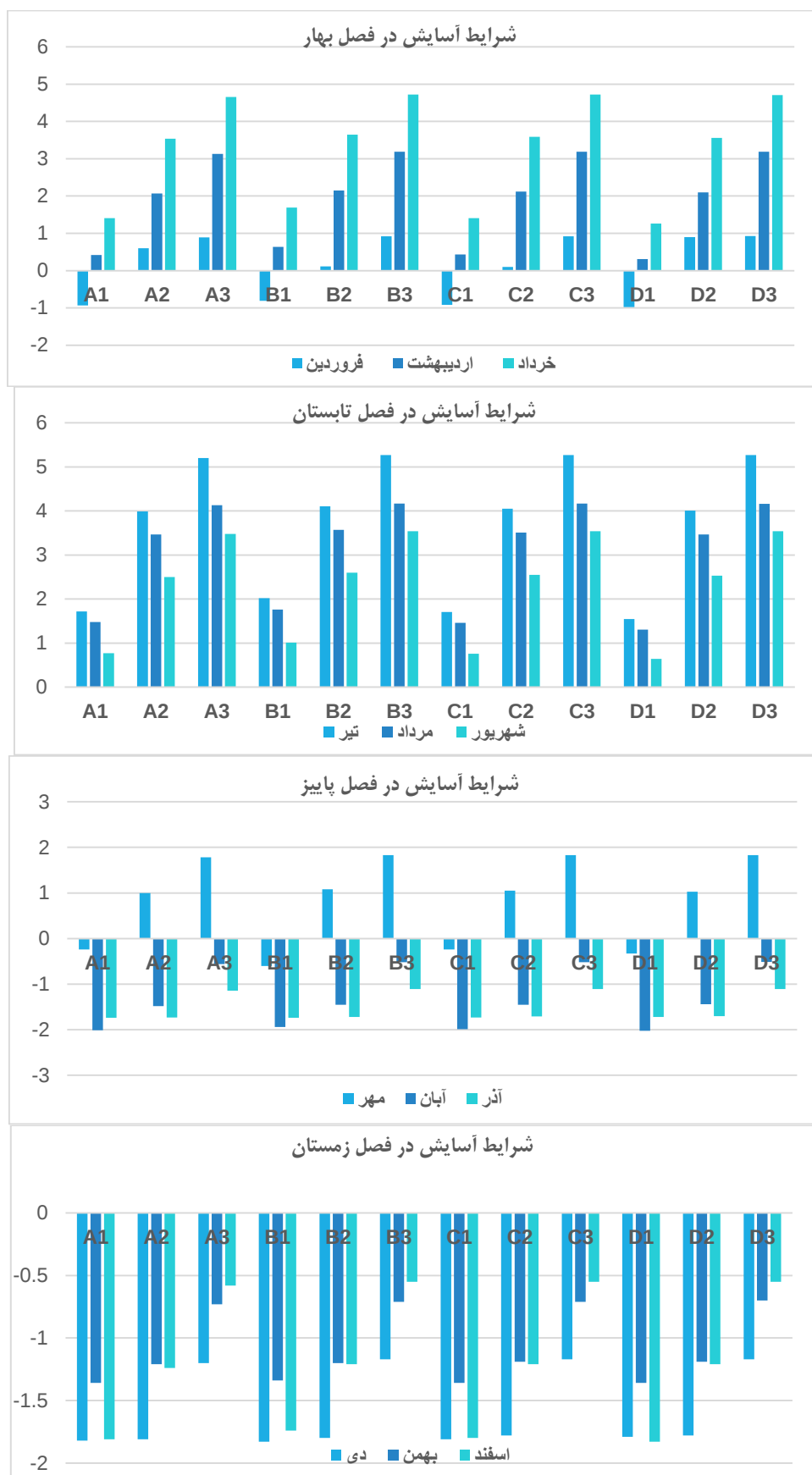
با توجه به این اصل که حرکت همیشگی تبادل حرارتی از سمت گرم به سرد اتفاق می‌افتد؛ و در فصل سرد همواره دما در یک جهت از درون به بیرون منتقل می‌شود. در حالی که در فصل گرم پوسته ساختمان در معرض جریان حرکت در دو جهت چه از بیرون به درون که در طول روز و چه از درون به بیرون که در طول شب اتفاق می‌افتد، است. این اتفاق، موضوعی است که پیش‌بینی‌های اولیه حاصل از مطالعات شرایط پایداری را به چالش می‌کشد.

این پدیده به خوبی با مقایسه رفتار دیوارها در سه مرحله شبیه‌سازی قابل مشاهده است. اگرچه وجود عایق حرارتی در دیوار به طور کامل مانع از انتقال حرارت به فضای داخلی نمی‌شود بلکه بسته به میزان مقاومت آن تا حد زیادی باعث کاهش حرکت گرما در دیوار خواهد شد (Reilly & Kinnane, 2017)؛ به همین منظور ضریب تبادل حرارت دیوارها با عایق حرارتی ETICS تفاوت زیادی با ضریب تبادل حرارت دیوارها با عایق حرارتی XPS دارند ولی در شرایط ناپایدار رفتار مشابه در فصل سرد و گرم از خود نشان می‌دهند. در فصل سرد دمای داخلی در محدوده آسایش حرارتی است؛ این اتفاق نیاز به گرمایش را از بین می‌برد در حالی که در فصل گرم دیوارهای دارای عایق ETICS بخصوص در ماه‌های اردیبهشت تا مهر و در دیوارهای دارای عایق حرارتی XPS در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور فاصله زیادی از منحنی آسایش گرفته‌اند. همچنین دیوارهای بدون عایق حرارتی در فصل سرما به دلیل ضریب تبادل حرارتی بالاتر انتقال گرما از درون به بیرون نسبت به دیوارهای ذکر شده بیشتر صورت می‌پذیرد، پس به همین نسبت نیاز به گرمایش در فصل سرد افزایش می‌یابد. در فصل گرم به دلیل تبادل حرارت دو طرفه، دمای داخلی به شرایط آسایش نزدیک‌تر است، در نتیجه نیاز به سرمایش کاهش می‌یابد.

مقیاس هفت‌گانه اشری به عنوان روشی پذیرفته شده برای پیش‌بینی مرزهای آسایش حرارتی شناخته می‌شود. براساس مقیاس هفت‌گانه اشری (جدول ۵) هنگامی که محدوده "متوسط آرای پیش‌بینی شده" PMV بین (+۱ و -۱) قرار گیرد. نشان دهنده حالتی است که در آن ۷۵ درصد کاربران از شرایط حرارتی محیط خود احساس رضایت دارند (Hashmi, 2017). با در نظر گرفتن نظریه فانگر و نگاهی به نمودار ۵ می‌توان نتیجه گرفت که شرایط آسایش در دیوارهای A1، B1، C1 و D1 در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، شهریور و مهر، در محدوده آسایش حرارتی قرار دارند. دیوارها در باقی ماه‌های سال در حدود آسایش $-2/02$ تا $+2/02$ (خنک - گرم) قرار گرفته‌اند که نیاز به سرمایش و گرمایش وجود دارد. نمونه‌های ساخته شده با دیوارهای A2، B2، C2 و D2 در محدوده $-1/81$ تا $4/11$ قرار دارند. اگر چه نیاز گرمایش این دیوارها از دیوارهای بدون عایق حرارتی کمتر است، اما به دلیل جرم حرارتی مواد در بازه زمانی ماه‌های اردیبهشت تا شهریور میانگین دمای داخلی تا جایی افزایش یافته که یک درجه از مرحله بسیار گرم نظریه فانگر فراتر رفته است. این اتفاق خبر از افزایش بسیار زیاد نیاز به سرمایش را می‌دهد. فروردین و مهر ماه‌هایی هستند که شرایط آسایش در این دیوارها برقرار است. نمونه‌ها با دیوارهای A3 و B3 و C3 و D3 در چهار ماه فروردین، آبان، بهمن و اسفند در بازه رضایتمندی شرایط آسایش هستند. قرارگیری در محدوده $-1/2$ تا $+5/27$ نشان از کاهش میزان گرمایش و در عین حال به دلیل شرایط طاقت فرسای ماه‌های اردیبهشت تا مهر که میانگین دمای داخلی از دمای خارج بالاتر رفته، نیاز سرمایش با افزایش چشمگیری پیش‌بینی می‌شود (جدول ۶).

جدول ۵: شاخص میانگین آراء پیش‌بینی شده (PMV) فانگر (مأخذ: (Heydari, 2014))

شاخص FANGER	احساس
-۳	سرد
-۲	خنک
-۱	کمی خنک
۰	خنثی
۱	کمی گرم
۲	گرم
۳	بسیار گرم



نمودار ۵: میانگین آراء پیش‌بینی شده (PMV) فانگر (ماخذ: نگارندگان)

جدول ۶: طبقه‌بندی دیوارها با در نظر گرفتن رفتار حرارتی (ماخذ: نگارندگان)

ردیف	دیوار	پایین‌ترین دما	بالا‌ترین دما	شرایط آسایش	توضیحات
1	D1	17.23	31.51	فروردین - اردیبهشت - شهریور - مهر	نیاز به گرمایش - نیاز به سرمایش
2	C1	17.17	32.03	فروردین - اردیبهشت - شهریور - مهر	
3	A1	17.15	32.06	فروردین - اردیبهشت - شهریور - مهر	
4	B1	17.05	33.13	فروردین - اردیبهشت - شهریور - مهر	
5	A2	17.34	37.01	فروردین - مهر	نیاز به سرمایش زیاد
6	D2	17.56	37.17	فروردین - مهر	
7	C2	17.51	37.29	فروردین - مهر	
8	B2	17.46	37.53	فروردین - مهر	
9	A3	20.28	39.89	فروردین - آبان - بهمن - اسفند	نیاز به سرمایش بسیار زیاد
10	D3	20.42	40.16	فروردین - آبان - بهمن - اسفند	
11	C3	20.42	40.19	فروردین - آبان - بهمن - اسفند	
12	B3	20.41	40.21	فروردین - آبان - بهمن - اسفند	

براساس نتایج پژوهش‌های صورت گرفته توسط بیهانگ، محمد، سعادت، برن، ریلی، رودریگوس، دانوسکا و همکارانشان، به طور کلی در اقلیم گرم با محاسبات شرایط ناپایدار علاوه بر مقاومت حرارتی، ظرفیت حرارتی نیز بر تبادلات حرارتی دیوار تاثیرگذار است. در حالی که با توجه به پژوهش‌های شریفیان و همکارانش در اقلیم سرد مقاومت حرارتی دارای اهمیت بیشتری است. رودریگوس و همکاران به طور کلی به این نتایج رسیدند که: ۱- تاثیر جرم حرارتی بر ضریب انتقال حرارت، در برخی اقلیم‌ها می‌تواند باعث بهبود رفتار حرارتی دیوار شود (اقلیم گرم) و در برخی دیگر مضر باشد (اقلیم سرد). ۲- هر چه وزن ساختمان بیشتر شود (سنگین‌تر) نیاز به انرژی سرمایشی افزایش می‌یابد و هر چه کمتر شود (سبک‌تر) نیاز به انرژی گرمایشی بیشتر می‌شود. ۳- ویژگی‌های ترموفیزیکی در طراحی پلان و فرم هندسی بنا تاثیرگذار است و در مراحل طراحی باید به آن‌ها توجه شود. دانوسکا و همکاران در پژوهش خود دست یافتند که ضریب تبادل حرارت در آب و هوای مدیترانه‌ای گرم و مرطوب در شرایط ناپایدار ۹ درصد بیشتر از شرایط پایدار است. همچنین برن و همکاران به این نتیجه رسیدند که مقاومت مصالح در شرایط پایدار کمتر از شرایط ناپایدار است (مقاومت در شرایط پایدار در سقف و دیوار به ترتیب ۷۵ درصد و ۶۰ درصد کمتر است). سیموئز و همکاران با ارائه فرمول T.E.R که نسبت انرژی مورد استفاده در مدل ناپایدار به انرژی مورد استفاده در مدل پایدار است، تاکید بر این موضوع دارند که نیاز به انرژی در شرایط پایدار کمتر از شرایط ناپایدار است و از آنجایی که صنعت ساختمان درک بهتری از مقادیر U پایدار دارد این روش می‌تواند برای درک U موثر، مفید باشد. این پژوهشگران پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، مدلسازی واقعی و شبیه‌سازی بر این باورند که دلیل این اختلاف عدم در نظر گرفتن تاثیر جرم حرارتی در محاسبات شرایط پایدار است.

با توجه به دستاوردهای مطالعات پیشین و پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که محاسبات بر پایه ضریب هدایت حرارتی در شرایط پایدار نمی‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد و باید تاثیر ظرفیت حرارتی بر ضریب تبادل حرارت (U) در محاسبات اضافه گردد. لازم به ذکر است که خاصیت عایق حرارتی و ظرفیت حرارتی نقش‌های متفاوتی در رفتار حرارتی کل جداره خارجی دارند، این دو خواص ترموفیزیکی مصالح در کنار هم میزان تبادل حرارت را تعیین می‌کنند. پس می‌توان عنوان نمود که از میان انواع دیوار مورد سنجش، دیوارهای مرحله اول (مصالح بدون عایق حرارتی) عملکرد بهتری در اقلیم گرم و نیمه خشک دزفول دارند؛ از این میان دیوار با بلوک لیکا بدون عایق حرارتی (D1) جهت دستیابی به آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی بهترین گزینه محسوب می‌شود؛ دیوارهای با بلوک هبلکس بدون عایق حرارتی (C1) و آجر سوراخدار بدون عایق حرارتی (A1) به ترتیب در رده دوم و سوم قرار قرار می‌گیرند.

۵- نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی خواص ترموفیزیکی مواد جهت دستیابی به میزان انتقال حرارت توسط جدار خارجی و تاثیر آن بر تغییر دمای داخلی فضا در شرایط بدون تهویه و تاثیر نور خورشید (بدون بازشو)، ۱۲ مدل آزمایشی با کاربری مسکونی، در اقلیم گرم و نیمه خشک شهر دزفول مورد بررسی قرار گرفت. مصالح به کار رفته در مدل‌ها شامل: بلوک لیکا، بلوک هبلکس، بلوک سفالی، آجر سوراخدار و عایق‌های حرارتی XPS و ETICS است. بررسی تغییرات دمای داخلی و محاسبات در شرایط مرزی پایدار و ناپایدار نشان می‌دهد، محاسبات بر پایه ضریب هدایت حرارتی مصالح در شرایط آب و هوایی کنترل شده و آزمایشگاهی به دلیل عدم در نظر گرفتن جرم حرارتی مصالح قابل استناد است. در حالی که در شرایط ناپایدار مرزی علاوه بر ضریب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت حرارتی نیز در نظر گرفته می‌شود. از این رو مواد با ظرفیت حرارتی بیشتر و چگالی کمتر، حرارت کمتری را از خود عبور می‌دهند.

از طرفی عایق حرارتی باعث عدم عبور گرما نمی‌شود بلکه آن را تا مقدار زیادی کاهش می‌دهد، پس مقاومت مصالح به دلیل تبادل دو طرفه گرما در اقلیم گرم و نیمه خشک دزفول تا جایی مفید است که اجازه عبور گرما از داخل فضا به سمت خارج در شب‌های فصل گرم را دهد. در نتیجه همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد عایق‌های حرارتی ETICS و XPS رفتار مناسبی در این اقلیم از خود نشان نمی‌دهند. با در نظر گرفتن تغییرات دمای داخلی فضا و شرایط آسایش حرارتی براساس نظریه فانگر و نیاز غالب سرمایش منطقه از میان دیوارهای مورد مطالعه، دیوارهای مرحله اول (مصالح بدون عایق حرارتی) رفتار مناسب‌تری در این اقلیم از خود به نمایش می‌گذارند. نتایج قیاسی نشان دهنده این است که بهینه‌ترین دیوار در وحله اول، دیوار D1 با بلوک لیکا و بدون عایق حرارتی است؛ در وحله دوم و سوم به ترتیب دیوار C1 با بلوک هبلکس بدون عایق حرارتی و دیوار A1 با آجر سوراخدار بدون عایق حرارتی قرار می‌گیرند. در نتیجه استفاده از این دیوارها نیاز به کولرهای گازی با قدرت کمتر برای مساحت‌های بیشتر را فراهم می‌آورد. بدین صورت علاوه بر کاهش مصرف سوخت فسیلی، فشار اقتصادی تحمیل شده به خانوار نیز کاهش می‌یابد. اگرچه ورود عامل تهویه می‌تواند بر این نتیجه تاثیرگذار باشد؛ که در پژوهش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد.

منابع

- Abba, Habu Yusuf, Majid, Roshida Abdul, Ahmed, Muhammad Hamdan, & Gbenga, Olutobi. (2022). Validation of Design builder Simulation Accuracy Using Field Measured Data of Indoor Air Temperature in A Classroom Building. *Management*, 7(27), 171-178. DOI: [10.35631/JTHEM.727014](https://doi.org/10.35631/JTHEM.727014)
- Amerine, M, Berg, H, & Cruess, William V. (2021). American Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE handbook. *Guide to Sources for Agricultural and Biological Research*, 462.
- Bryan, Edvard. (2014). *Rough Guide to Sustainability*.
- Byrne, Aimee, Byrne, Gerard, Davies, Anna, & Robinson, Anthony James. (2013). Transient and quasi-steady thermal behaviour of a building envelope due to retrofitted cavity wall and ceiling insulation. *Energy and Buildings*, 61, 356-365. DOI: [10.1016/J.ENBUILD.2013.02.044](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.02.044)
- Danovska, Maja, Pernigotto, Giovanni, Baggio, Paolo, & Gasparella, Andrea. (2022). Simulation uncertainty in heat transfer across timber building components in the Italian climates: The role of thermal conductivity. *Energy and Buildings*, 268, 112190. DOI: [10.1016/J.ENBUILD.2022.112190](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112190)
- Hashmi Rafsanjani, Lilisadat, Heydari, Shahin. (2017). Evaluation Of Comparative Thermal Comfort In Residential Houses Of Hot And Dry Climate, Case Study: Kerman Province. *Hot And Dry Climate Architecture*, 7, 43-65. DOI: [10.29252/AHDC.2018.1422](https://doi.org/10.29252/AHDC.2018.1422)
- Heydari, Shahin. (2014). *Thermal Adaptation in Architecture*: Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Javed. Saqib, Lechner. Roman, Behrens. Jan. (2016). Testing and Validation of TEKNOsim: A Building Energy Simulation Program, In Proceedings of the Twelfth World Congress REHVA (Clima 2016).

- Koch-Nielsen, Holger. (2013). *Stay cool: a design guide for the built environment in hot climates*: Routledge. (In Persian).
- Landolfi, Roberto, & Nicoletta, Maurizio. (2022). Durability assessment of ETICS: Comparative evaluation of different insulating materials. *Sustainability*, 14(2), 980. DOI: [10.3390/SU14020980](https://doi.org/10.3390/SU14020980)
- Lu, Yihang, Hu, Jun, & Zhong, Ke. (2022). An approximate parametric model for quantifying the thermal mass with harmonic variation of outdoor air temperature. *Journal of Building Engineering*, 50, 104195. DOI: [10.1016/J.JOBE.2022.104195](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104195)
- Mansoureh, Tahbaz. (2017). *Climatic Knowledge Climatic Design*: University Of Shahid Beheshti. (In Persian).
- Mavromatidis, Lazaros Elias, Mankibi, Mohamed EL, Michel, Pierre, & Santamouris, Mat. (2012). Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy*, 92, 480-491. DOI: [10.1016/J.APENERGY.2011.10.007](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.10.007)
- Mohammad, Shaghaig. (2013). Study of thermal behavior of common wall materials. case study: Tehran residential buildings. *Journal of Fine Arts-Architecture and Urban Development*, 18(1), 69-78. (In Persian).
- Moslehi, Hamed, Abdulhirizi, Rana, Zulfiqari. Alireza, Ebrahimghani. (2016). *Design And Load Calculations Of Mechanical Installations Builder Design*: Noavar. (In Persian).
- Pekdogan, Tugce, & Basaran, Tahsin. (2017). Thermal performance of different exterior wall structures based on wall orientation. *Applied Thermal Engineering*, 112, 15-24. DOI: [10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.10.068](https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.10.068)
- Qabadian, Vahid. (1994). *Climatic analysis Of Iran's Traditional Buildings*: Tehran University. (In Persian).
- Regulations, Office Of National Building. (2020). Chapter 19 of National Building. (In Persian).
- Reilly, Aidan, & Kinnane, Oliver. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, 198, 108-121. DOI: [10.1016/J.APENERGY.2017.04.024](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.04.024)
- Rodrigues, Eugénio, Fereidani, Nazanin Azimi, Fernandes, Marco S, & Gaspar, Adélio R. (2023). Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran. *Journal of Building Engineering*, 74, 106919. DOI: [10.1016/J.JOBE.2023.106919](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106919)
- Rodrigues, Eugenio, Fernandes, Marco S, Gaspar, Adelio Rodrigues, Gomes, Alvaro, & Costa, Jose J. (2019). Thermal transmittance effect on energy consumption of Mediterranean buildings with different thermal mass. *Applied Energy*, 252, 113437. DOI: [10.1016/J.APENERGY.2019.113437](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113437)
- Sadati, Seyed Esmaeil, Rahbar, Nader, & Kargarsharifabad, Hadi. (2023). Energy assessment, economic analysis, and environmental study of an Iranian building: The effect of wall materials and climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103093. DOI: [10.1016/J.SETA.2023.103093](https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103093)
- Sharifian-Qazijehani, Helen. (2016). Investigating The Effect Of Thermal Mass Of Common Materials In the Construction Of External Walls Of Buildings In Reducing The Energy Consumption Of Tabriz Buildings. *International Conference On Architecture, Civil Engineering And Urban Development In The Third Millennium*. (In Persian).
- Simões, I, Simões, N, & Tadeu, A. (2012). Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions. *Energy and buildings*, 49, 631-639. DOI: [10.1016/J.ENBUILD.2012.03.005](https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.03.005)
- Sokhdan Sorkhabi, Zahra, Khanmohammadi, Mohammad Ali.. (2016). Optimizing The Energy Performance Of Non-Opening Walls In Sunny Fronts. *Hoviatshahr*, 23 73-82. (In Persian).