

مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار* مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تهران

شقایق محمد**

ا. کارشناس ارشد طراحی پایدار، دانشکده معماری و مهندسی عمران، دانشگاه Bath، شهر Bath، انگلستان.
(تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۱۰/۲۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۱)

چکیده

پوسته ساختمان به عنوان واسطه اصلی بین فضای بیرون و درون، نقش اساسی در کنترل شرایط محیطی و تامین آسایش ساکنین ساختمان ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، با توجه به ضرورت کاهش و جلوگیری از صدور گازهای گلخانه‌ای، اهمیت مسئله طراحی و اجرای سیستم‌های ساخت و ساز که با کم‌ترین استفاده از سیستم‌های فعال توانایی تامین آسایش حرارتی برای ساکنین را دارا باشند، آشکار است. بررسی این امر که مصالح جدید و سیستم‌های ساخت دیوار رایج تا چه حد می‌توانند آسایش حرارتی ساکنین را تامین کنند، پرسشی است که این تحقیق در پی پاسخ آن است. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی IES-VE، به شبیه‌سازی نحوه رفتار گونه‌های مختلف دیوار که از ترکیب بلوک‌های سفالی، لیکا، هبلکس و عایق حرارتی ساخته شده و در ساختمان‌های مسکونی شهر تهران متداولند، می‌پردازد. ضمن پرداخت و تحلیل نتایج، مواردی از قبیل نقش متفاوت جرم حرارتی و عایق حرارتی، تعریف ویژگی‌های حرارتی دینامیک و رفتار دوره‌ای مصالح در مواجهه با شرایط ناپایدار محیط بیان می‌گردد. نتایج تحقیق نشان از لزوم استفاده از محاسبات شرایط ناپایدار به جای روش مرسوم محاسبات پایدار می‌دهد. همچنین از میان گونه‌های دیوار معرفی شده، دیوار ساخته شده از دو ردیف بلوک لیکای ۱۰ سانتیمتری با ۵ سانتیمتر عایق در میانه آنها مناسب‌ترین عملکرد را از نظر توانایی تامین آسایش حرارتی داراست.

واژه‌های کلیدی

پوسته ساختمان، آسایش حرارتی، جرم حرارتی، رفتار دینامیک مصالح، محاسبات شرایط ناپایدار.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده با عنوان: «ارزیابی رفتار حرارتی مصالح ساختمانی برای ساختمان‌های مسکونی شهر تهران» است که در سپتامبر ۲۰۱۲ (شهریور ۹۱) در دانشگاه Bath کشور انگلستان به انجام رسیده است.
** تلفن: ۰۹۱۲۵۴۶۸۲۰۷، نمابر: ۰۲۱-۸۸۶۴۲۶۷۱، E-mail: Shaghayegh.mohammad@gmail.com.

مقدمه

بوده و تامین کننده شرایط آسایش برای ساکنین ساختمان باشند. در این معماری، کاهگل، خشت و آجر برای ساختن دیوارهایی تا قطر ۶۰ سانتیمتر به کار می‌رفتند. حال آنکه در معماری امروز، این مصالح با مصالحی چون بلوک‌های سفالی توخالی، بلوک‌های رس سبک منبسط شده (لیکا) و بتن سبک گازی (هبلکس) با چگالی و نیز ظرفیت حرارتی پایین‌تر جایگزین شده‌اند که در بعضی مواقع با عایق‌های حرارتی ترکیب شده تا ساختارهای نازک‌تری را به عنوان دیوارهای خارجی تشکیل دهند. رواج سیستم تیر و ستون به جای سیستم دیوار باربر و همچنین گران شدن قیمت زمین، امکان و میل به کم کردن ضخامت دیوارها تا حد ممکن را سبب شدند.

این تحقیق با استفاده از نرم افزار شبیه سازی انرژی IES-VE، رفتار حرارتی سیستم های مختلف ساختمانی دیوار را بررسی می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هر چند مقررات ملی ساختمانی ایران مانند مبحث ۱۹ و دیگر راهنماها و ضوابط ساخت و ساز، بیشتر بر محاسبه ضریب هدایت حرارتی که حاصل شرایط ثابت محیطی و بدون در نظر گرفتن شرایط متغیر آب و هوایی است. به عنوان شاخصی برای ارزیابی رفتار حرارتی پوسته ساختمانی و استفاده از عایق حرارتی در ساخت دیوار برای بهبود رفتار حرارتی آن تاکید دارند، در کنار آن جرم حرارتی و رفتار دوره ای مصالح که تابعی از شرایط متغیر آب و هوایی در یک سیکل ۲۴ ساعته است. نیز در رفتار حرارتی کلی ساختمان نقشی مهم ایفا می‌کنند و نباید در محاسبات حرارتی نادیده گرفته شوند.

بنابر آمار مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۱، جمعیت ۳۴-۱۵ ساله ۴۳ درصد کل جمعیت ایران را تشکیل می‌دهد. این واقعیت یعنی جمعیت جوان کشور در کنار نرخ رو به رشد مهاجرت به شهرهای بزرگ، دلیلی بر روند رو به رشد تقاضا برای خانه‌های جدید به ویژه در این شهرها است. طبق داده‌های مرکز تحقیقات و مسکن (۱۳۸۸)، ساخت ۱/۵ میلیون خانه مسکونی مورد نیاز است. از سوی دیگر مصرف انرژی در بخش ساختمان در ایران، ۲/۵۸ برابر متوسط مصرف جهانی است (Nasrollahi, 2012). طبق آمار منتشره توسط سازمان توانیر، ساختمان‌ها حدود ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی کشور را به خود اختصاص داده که در این میان سهم بخش مسکونی ۳۳ درصد است. این آمار و ارقام نشان دهنده لزوم صرفه جویی در مصرف سوخت در ایران و وجود پتانسیل بالا در بخش مسکونی در راه نیل به هدف یاد شده است.

پوسته ساختمانی به عنوان واسطه اصلی بین فضای داخل و خارج، نقش قابل توجهی در تعدیل شرایط آب و هوایی و تامین آسایش ساکنین و در نتیجه کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی دارد و طراحی و اجرای پوسته‌های ساختمانی‌ای که بتوانند با رفتار حرارتی مناسب بالاترین میزان آسایش حرارتی را در فضای داخل بدون کمک تجهیزات مکانیکی تامین کنند، می‌تواند تا حدود زیادی سبب صرفه جویی در مصرف انرژی گردد. در معماری بومی منطقه گرم و خشک ایران که تهران نیز در آن واقع است، دیوارهای قطور با جرم حرارتی زیاد می‌توانستند تا حدود زیادی تعدیل کننده شرایط حرارتی و رطوبتی محیط بیرون

مبانی نظری

ویژگی های دینامیک حرارتی

آن است نیز، نقش مهمی در عملکرد دوره‌ای^۵ سازه دیوار دارد (گیوونی، ۱۹۹۸). قابل ذکر است که جرم حرارتی، بیشتر هنگامی تاثیرگذار است که دامنه تغییرات دمای بیرون در یک سیکل ۲۴ ساعته زیاد بوده (حدود ۱۰ ساعت) و دمای بیرون نوسان هایی بالا و پایین دمای داخل دارد (De Saullles, 2011). به طور کلی مصالحی که دارای ویژگی‌های مفید حرارتی هستند، یا عایق گرما بوده و یا دارای جرم حرارتی هستند (CBPI, 2006). تاثیر این دو ویژگی یعنی جرم حرارتی و عایق حرارتی که به ترتیب نمایندگان خصوصیات ترموفیزیکی دینامیک و ثابت مصالح هستند، باید به صورت همزمان در نظر گرفته شوند (DCCEE, 2010).

نقش جرم حرارتی و عایق حرارتی در عملکرد پوسته ساختمان

مصالحی که دارای جرم حرارتی زیاد هستند، هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند، می‌توانند حرارت بیشتری در قیاس با سایر مصالح در خود ذخیره کنند (Gregory et al, 2008). آنها همچنین هنگامی که منبع حرارت حذف شود، گرمای ذخیره در خود را با سرعت کمتری آزاد می‌کنند (همان). در روزهای زمستان، مصالح با جرم حرارتی بالا، انرژی حرارتی حاصل از

مقادیر حاصل از محاسبات شرایط پایدار^۱ (که منجر به تعیین ضریب هدایت حرارتی مصالح^۲ می‌شود)، به تنهایی معیار مناسبی برای بررسی عملکرد حرارتی مصالح نیست؛ به عنوان مثال دو دیوار با ضریب‌های هدایت حرارتی یکسان، می‌توانند گرما را به مقدار و شیوه‌های مختلفی جذب و بازتابش کنند (McMullan, 2007). در حقیقت به دلیل ویژگی‌هایی مانند ظرفیت حرارتی^۳ (c)، چگالی (ρ) و ضریب هدایت حرارتی^۴ (λ) مواد و شرایط متغیر آب و هوایی، مصالح رفتار پویایی از خود نشان داده که در محاسبات شرایط پایدار لحاظ نمی‌شود. در محاسبات شرایط پایدار دمای دو طرف دیوار و یا هر سازه‌ای که هدف محاسبه ضریب هدایت حرارتی آن است، ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ حال آنکه در واقعیت، پوسته ساختمانی 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

جهت جذب و آزاد شدن گرما توسط ماده که در حالت عادی ۲۴ ساعت در نظر گرفته می شود (De Saullles, 2011). مقادیر بیشتر Admittance دلالت بر نوسانات کمتر دمای داخلی دارد؛ در نتیجه از دیدگاه جرم حرارتی برخلاف ضریب هدایت حرارتی، Admittance بالاتر مطلوب است (همان). برای یک تمایز واضح تر میان ضریب هدایت حرارتی (U-value) و ضریب پذیرندگی (Y-value) باید متذکر شد که دو ساختار مختلف با قابلیت عایق گرما بودن یکسان (U-value های یکسان) می توانند ویژگی های رفتاری متفاوتی از نظر تعامل با حرارت محیط و تعدیل نوسانات هوای فضای داخلی از خود بروز دهند (جدول ۱).

ضریب کاهش (DF)؛ معرف نسبت نوسانات دمای داخل به نوسانات دمای خارج است (Kruger et al., 2010) و شاخصی برای ارزیابی رفتار عناصر سازه ای در انتقال گرماست. "ضریب کاهش پایین دلالت بر توانایی پوسته ساختمان در کوچک کردن محدوده دمای داخلی در مقایسه با دمای خارج دارد" (CIBSE, 2006).

جدول ۱- مقایسه ضرایب پذیرندگی حرارت و هدایت حرارت در دو سازه متفاوت.

U-value (W/m ² K)	Y-value (W/m ² K)	
۰٫۶	۴	دیوار سنگین: دیوار با جرم حرارتی زیاد (بلوک آجر به همراه لایه ای از عایق در میان دیوار)
۰٫۶	۱	دیوار سبک: دیوار با جرم حرارتی کم (لایه نازک کاری داخلی، عایق، روکاری نمای خارجی از چوب یا مصالح دیگر)

ماخذ: (McMullan, 2007)

ضریب سطح: نسبت جریان حرارت تابشی (از منابع تولید کننده طول های موج کوتاه مثل خورشید)، که از سطح به فضا بازتابش می گردد به جریان حرارت تابش شده بر آن سطح است (CIBSE, 2006). فایده اعمال ضریب سطح اندازه گیری میزان جذب و آزادسازی متعاقب انرژی تابشی خورشید است (همان). ظرفیت حرارتی بالا سبب ضریب سطح پایین تر و زمان تاخیر بیشتر می گردد (Laughton & Warne, 2003).

۳-۱ - منطقه مورد مطالعه و ویژگی ها

۳-۱-۱- اقلیم تهران

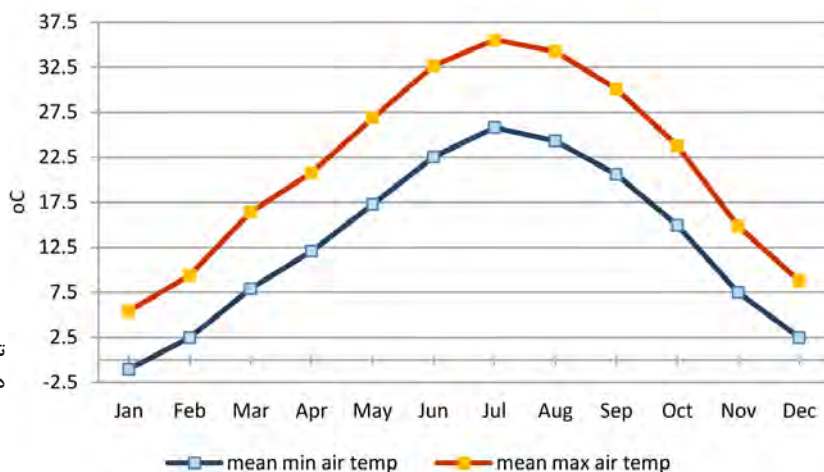
تهران (واقع در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی) طبق طبقه بندی اقلیمی کوپن، دارای اقلیم گرم و خشک قاره ای با تابستان های گرم و خشک و زمستان های سرد است. از میان ایستگاه های سینوپتیک هواشناسی موجود در تهران، آمار ایستگاه ژئوفیزیک جهت بررسی اقلیم منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. دلیل این امر مکان قرارگیری این ایستگاه در مرکز شهر است که می تواند شرایط آب و هوایی گسترده وسیعی از ساختمان های مسکونی شهر را نمایندگی کند. تصویر ۱، میانگین پنج ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۵) حداقل و حداکثر دمای ماهانه را نشان می دهد. تصویر ۲، میانگین پنج ساله رطوبت نسبی را نشان می دهد.

تابش خورشید را که از طریق بازشوها وارد فضای داخل گردیده و محبوس شده است در خود ذخیره کرده و سپس عصر هنگامی که خورشید غروب کرده و منبع حرارت حذف گردیده است و نیاز به گرما در فضای داخلی بیشتر است، دوباره به آهستگی این حرارت را به فضای داخل باز پس می دهند. این امر موجب کاهش بار گرمایشی ساختمان می گردد (Balaras, 1996). در تابستان، جرم حرارتی گرمای ایجاد شده توسط تابش خورشید در فضاهای داخلی را رفته رفته جذب کرده و مانع افزایش ناگهانی دمای داخل و فشار یکبار به بردستگاه های خنک کننده می گردد. سپس هنگامی که کاملاً از گرما انباشته شدند، این مصالح شروع به آزاد کردن گرمای ذخیره در خود می کنند؛ بخشی از این گرما را به فضای داخل باز پس می دهند که (در صورت زمان تاخیر مناسب) می تواند با کمک اختلاف فشار ناشی از دمای پایین تر محیط بیرون نسبت به داخل و نتیجتاً جریان هوا (ناشی از جریان همرفتی) تخلیه شود (همان) و بخشی دیگر را به بیرون تابش می کند که در صورت غیرابری بودن آسمان شب (که عملکردی مشابه جسم سیاه دارد) این تخلیه حرارت می تواند با سرعت بیشتری صورت گیرد^۷ (McMullan, 2007). نقش عایق گرما، کاهش سرعت انتقال گرما بین فضاهای مختلف با دماهای متفاوت است (McMullan, 2007)، که از اتلاف حرارت از طریق پوسته ساختمان در زمستان و انتقال گرما به داخل در تابستان جلوگیری می کند.

تحلیل رفتار حرارتی در شرایط غیرپایدار

روش هایی که برای تحلیل رفتار حرارتی مواد و مصالح معرفی می شوند، در دو مجموعه محاسبات شرایط پایدار^۸ و شرایط ناپایدار^۹ دسته بندی می گردند. در محاسبات شرایط پایدار، دمای فضای داخل و خارج در زمان ثابت در نظر گرفته می شود؛ محاسبه ضریب هدایت حرارتی مواد از این دسته محاسبات است. با این حال این مسئله ثابت شده است که برای تحلیلی جامع از عملکرد حرارتی مصالح، اثر جرم حرارتی ساختمان نیز باید در نظر گرفته شود که این واقعیت پایه محاسبات شرایط ناپایدار را بنیان نهاده است (Balaras, 1996). روش های گوناگونی برای مطالعه و بررسی رفتار حرارتی مصالح تحت شرایط متغیر محیطی (که در واقعیت شاهدش هستیم) معرفی شده است که سبب تعریف پارامترهای گوناگونی به منظور لحاظ کردن اثر جرم حرارتی در مطالعات رفتار حرارتی گردیده است (همان). در بین این روش ها^{۱۰} روش CIBSE Admittance Procedure را معرفی می کند که لحاظ کردن پارامترهایی چون ضریب پذیرندگی^{۱۱} (Y-value، ضریب کاهش^{۱۲} و ضریب سطح^{۱۳} را علاوه بر ضریب هدایت حرارتی هنگام محاسبات الزامی می دارد (CIBSE, 2006).

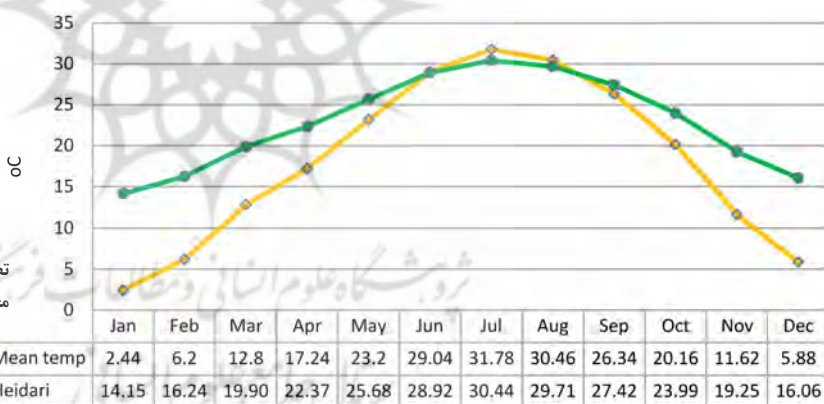
Admittance Value، توانایی یک ماده را جهت رد و بدل کردن گرما با محیط به ازای هر درجه اختلاف دمای فضا با دمای آن ماده توصیف می کند (CIBSE, 2006). پارامترهای دخیل در تعریف این متغیر عبارتند از ظرفیت حرارتی، چگالی، ضریب هدایت حرارتی، مقاومت سطحی و مدت زمان ممکن



تصویر ۱- میانگین پنج ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۵) حداکثر و حداقل دمای ماهانه در ایستگاه هواشناسی ژئوفیزیک تهران.



تصویر ۲- میانگین پنج ساله (۲۰۰۹-۲۰۰۵) رطوبت نسبی در ایستگاه هواشناسی ژئوفیزیک تهران.



تصویر ۳- دمای آسایش ساکنین شهر تهران در ماه‌های مختلف.

و نیکول^{۱۶} ارایه گردید، حیدری (۱۳۸۸)، رابطه‌ای برای محاسبه دمای آسایش^{۱۷} مردم تهران معرفی کرده است. دمای آسایش یا همان دمای خنثی^{۱۸}، دمایی است که در آن فرد نه احساس گرما و نه احساس سرما می‌کند. دمای آسایش ساکنین شهر تهران طبق رابطه زیر بر اساس دمای بیرون محاسبه می‌گردد:

$$T_{\text{conf}} = 0.555 T_{\text{out}} + 12.8 \quad (12, 1388, \text{حیدری})$$

طبق استاندارد آسایش تطبیقی، بدن انسان قابلیت تطبیق با محیط خود را داراست. در نتیجه همانطور که از رابطه بالا قابل محاسبه است، در ماه‌های مختلف سال، بدن انسان در دماهای مختلفی احساس آسایش می‌کند. دمای آسایش مردم تهران در ماه‌های مختلف در تصویر ۳ نمایش داده شده است که بر اساس میانگین دمای ماهانه و با استفاده از معدل پنج ساله (۲۰۰۵-۲۰۰۹) دمای هوا در ایستگاه سینوپتیک ژئوفیزیک محاسبه شده است.

مصالح ساختمانی متداول در ساختمان‌های مسکونی


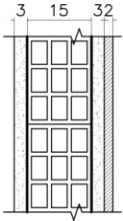

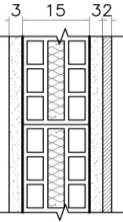



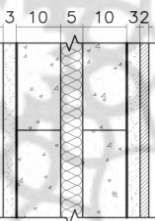

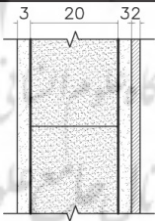

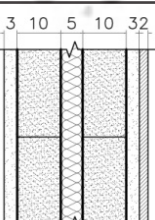
شهر تهران

طبق گفتگوهای انجام شده با کارشناسان فعال در صنعت ساخت و ساز و مشاهدات میدانی نگارنده، مصالح رایج ساختمانی که در ساختمان‌های مسکونی شهر تهران استفاده می‌شوند، در جدول ۲، طبقه‌بندی گردیده‌اند. دیوارها اغلب از بلوک‌های توخالی سفالی، بلوک‌های لیکا و بلوک‌های هبلکس ساخته می‌شوند که در این میان، بلوک‌های سفالی بیشترین میزان استفاده را دارد که به نظر می‌رسد در آینده با لیکا جایگزین خواهند شد. استفاده از بلوک هبلکس به دلیل مشکلاتی که هنگام اجرای نازک کاری به همراه دارد، کمتر متداول است.

دمای آسایش مردم تهران

طبق استاندارد آسایش تطبیقی^{۱۴} که ابتدا توسط هامفری^{۱۵}

جدول ۲- جزئیات سازه ای دیوارهای متداول در ساختمان های مسکونی.

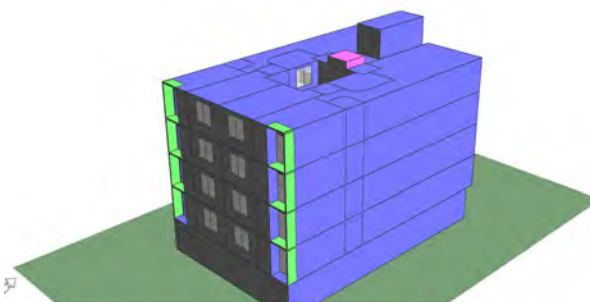
نمونه مصالح	ضخامت (cm)	U-value (W/m ² K)	جزئیات	لایه های تشکیل دهنده	گونه دیوار
	۲۱	۱/۳		<ul style="list-style-type: none"> گچ و خاک ملات (۳ cm) بلوک سفالی (۱۵ cm) ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	HCB1 بلوک سفالی توخالی (۱۵ cm)
	۲۱	۱/۰۸		<ul style="list-style-type: none"> ملات گچ و خاک (۳ cm) بلوک سفالی (۱۵ cm) با ۲ cm عایق پلی استایرن ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	HCB2 بلوک سفالی توخالی (۱۵ cm)
	۲۸	۱/۳۴		<ul style="list-style-type: none"> ملات گچ و خاک (۳ cm) بلوک لیکا (۲۰ cm) ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	L1 LECA ⁺ بلوک (۲۰ cm): * Light Expanded Clay Aggregate
	۳۳	۰/۴۱		<ul style="list-style-type: none"> ملات گچ و خاک (۳ cm) بلوک لیکا (۱۰ cm) فضای خالی پر شده با عایق پلی استایرن منبسط (۵ cm) بلوک لیکا (۱۰ cm) ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	L2 LECA ⁺ بلوک (۱۰ cm): * Light Expanded Clay Aggregate
	۲۸	۰/۷۱		<ul style="list-style-type: none"> ملات گچ و خاک (۳ cm) AAC بلوک (۲۰ cm) ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	A1 AAC ⁺ بلوک (۲۰ cm): * Autoclaved aerated concrete
	۳۳	۰/۳۷		<ul style="list-style-type: none"> ملات گچ و خاک (۳ cm) AAC بلوک (۱۰ cm) فضای خالی پر شده با عایق پلی استایرن منبسط (۵ cm) AAC بلوک (۱۰ cm) ملات ماسه سیمان (۳ cm) سنگ نما (۲ cm) 	A2 AAC ⁺ بلوک (۱۰ cm): * Autoclaved aerated concrete

شبیه سازی در نرم افزار IES-VE

برای مطالعه و تحلیل این مسئله که ساختارهای مختلف دیوار تا چه اندازه در شرایط متغیر آب و هوایی، متفاوت از آنچه طبق مطالعات شرایط پایدار و بر اساس ضرایب هدایتی شان مورد انتظار است، رفتار می کنند، یک نرم افزار شبیه سازی حرارتی، IES-VE، به کار گرفته شده است. این ابزار قادر است رفتار ساختمان را تحت شرایط غیرپایدار محیطی در اقلیم

مورد نظر شبیه سازی کند و یکی از نرم افزارهایی است که به طور گسترده مورد استفاده طراحان قرار دارد (Doyle, 2008). Crawley و دیگران (2005) در تحقیقی، ۲۲ برنامه مدلسازی انرژی ساختمان را از لحاظ قابلیت و عملکرد در زمینه های گوناگون با یکدیگر مقایسه نمودند که از میان آنها IES-VE، با توجه به قابلیت هایش به ویژه در زمینه مدلسازی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان، مدلسازی شرایط محیط داخل، پذیرش داده های

مصالح و سیستم های ساختمانی سپس از نظر ویژگی های حرارتی اولیه مانند چگالی (ρ)، ظرفیت حرارتی ویژه (C_p)، ضریب هدایت حرارتی (λ)، پخشندگی حرارت^{۱۹} و ویژگی های حرارتی ثانویه (مشتق از ویژگی های اولیه) شامل پذیرندگی حرارتی^{۲۰}، ظرفیت حرارتی مفید (C_{eff})، ضریب کاهش (DF) و تاخیر زمانی تحلیل و با یکدیگر مقایسه می شوند. به علاوه دمای داخلی در کنار دمای آسایش مردم تهران در یک نمودار تصویر می شوند تا نشان دهنده توانایی هر سیستم در تامین آسایش حرارتی ساکنین باشد.



تصویر ۴- مدل سه بعدی از الگوی یک ساختمان مسکونی در تهران، مدل سازی شده در نرم افزار IES-VE.

نتایج و تحلیل نتایج

نتایج شبیه سازی دینامیک نشان می دهد که تیپ های ارایه شده دیوار متفاوت از آنچه بر اساس ضریب هدایت حرارتی آنها مورد انتظار است رفتار می کنند؛ این امر به دلیل پاسخ دوره ای پوسته ساختمان به شرایط آب و هوایی (رفتار متناوب پوسته ساختمان در مقابل شرایط متغیر آب و هوایی) است که به کمک ویژگی های حرارتی دینامیک که در IES به عنوان پارامترهای مستخرج^{۲۱} شناخته می شوند و به ویژه به کمک میزان جرم حرارتی موجود در سازه ساختمان قابل تفسیر است. جرم حرارتی، مهم ترین عامل در رفتار حرارتی در شرایط غیر پایدار، بر سه ویژگی اولیه مصالح وابسته است: چگالی (ρ)، ظرفیت حرارتی (C_p) و ضریب هدایت حرارتی (λ) به این صورت که: ۱. ظرفیت حرارتی بالاتر مقدار حرارت قابل جذب در هر کیلوگرم ماده را افزایش می دهد؛ ۲. مصالح با چگالی بیشتر حرارت بیشتری جذب می کنند؛ ۳. ضریب هدایت حرارتی متوسط کمک می کند تا ظرفیت حرارتی یک ماده کارآمد گردد. هدایت حرارتی متوسط، یک ماده را قادر می سازد تا با محیط با سرعتی مناسب تبادل گرما صورت دهد؛ به این معنی که برخی مصالح مانند چوب ظرفیت حرارتی بالایی (در مورد چوب به دلیل ذخیره آب موجود در آن) دارند ولی به دلیل قابلیت هدایت حرارتی پایین، میزان تبادل حرارت آنقدر پایین است که عملاً ظرفیت حرارتی را غیرفعال می سازد (De Saullès, 2011). این سه ویژگی در عاملی تحت عنوان «قابلیت پخشندگی»^{۲۲} یک ماده جمع می شوند (جدول ۳).

بر پایه دانش تئوری پخشندگی پایین تر سبب زمان تاخیر بیشتری می گردد (Hegger et al., 2008)؛ به این ترتیب برای ماده ای با میزان پخشندگی پایین تر، مدت زمان بیشتری لازم است تا با

جدول ۳- مقایسه ویژگی حرارتی- فیزیکی چند مصالح ساختمانی.

Diffusivity $a=\lambda/\rho c_p$	ρ kg/m ³	λ W/mK	C_p J/kgK	
7.00E-07	1700	1	840	آجر
4.60E-07	1300	0.5	840	سفال
2.56E-07	900	0.23	1000	لیکا
2.43E-07	700	0.17	1000	بتن اتوکلاو شده (AAC)
1.99E-06	15	0.04	1340	پلی استایرن منبسط شده

آب و هوایی اقلیم مختلف و قابلیت ارایه نتایج با بازه های زمانی کوتاه (تا ۵ دقیقه) جهت نیل به هدف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

بدین منظور یک ساختمان چهار طبقه دو واحدی که بر روی بیلوت احداث شده است، به عنوان ساختمانی نمونه از ساختمان های مسکونی شهر تهران برای شبیه سازی در IES در نظر گرفته شد. به منظور بررسی شرایط محیط داخل، یکی از فضاهای داخلی ساختمان انتخاب گردید. این فضا اتاق خواب واحد شرقی به عرض ۳/۴۵ و عمق ۵/۴۰ است که دارای پنجره ای به ابعاد ۱/۶ * ۱/۷ متر رو به جنوب می باشد. کلیه اندازه گیری های دما مربوط به این اتاق است. تصویر ۴، نشان دهنده ساختمان مدل شده در محیط نرم افزار است و اتاق مورد مطالعه بر روی آن مشخص گردیده است. برای بررسی تاثیر پوسته خارجی بر شرایط و دمای آسایش، سازه سقف و کف و دیوارهای داخلی و نیز پنجره ها در تمامی مدل ها ثابت در نظر گرفته شده و تنها جنس دیوارهای خارجی مطابق جدول ۲ تغییر داده شده اند. پنجره ها از جنس یو پی وی سی دوجداره پر شده با گاز آرگون، کف طبقات از جنس تیرچه بلوک که در طبقه زیرین با گچ پوشیده و در طبقه فوقانی با سرامیک مفروش گردیده است و سقف پارکینگ و سقف نهایی دارای ۵ سانتی متر عایق حرارتی هستند.

سناریوی شبیه سازی

در این شبیه سازی تمامی عواملی که در رفتار حرارتی خالص پوسته ساختمان مداخله می کنند مانند منابع تولید کننده حرارت در فضای داخلی (ساکنین، لوازم برقی، اجاق گاز و فر و سایر لوازم تولید کننده حرارت) و نیز تهویه طبیعی و اثر خنک کنندگی جریان همرفتی ناشی از آن از سناریوی تعریف شده برای نرم افزار حذف گردیده اند. بنابراین نه سیستم های سرمایشی / گرمایشی و نه الگویی در خصوص تعداد ساکنین و نحوه استفاده آنان از بنا، تعداد و الگوی روشن / خاموش شدن وسایل منزل و لامپ های روشنایی (منابع تولید گرما) برای نرم افزار تعریف نشده و در شبیه سازی لحاظ نگردیده است. همچنین پروفایلی به منظور باز و بسته شدن پنجره ها تعریف نشده تا ساختمان از تهویه طبیعی و اثرات خنک کنندگی آن مصون باشد. دلیل این امر ارزیابی خالص و واضح از رفتار سیستم انرژی پوسته ساختمان است هنگامی که در معرض شرایط آب و هوایی متغیر قرار دارد.

جدول ۴- ویژگی‌های دینامیک حرارتی دیوارهای معرفی شده.

	U-value W/m ² K	C _m kJ/m ² K	Admittance W/m ² K	ضریب کاهشی DF	زمان تاخیر (Hrs)	ضریب سطح F	ضخامت (m)	λ _{eq block}
HCB1	1.30	71.46	3.52	0.811	4	0.717	0.21	0.28
HCB2	1.08	71.73	3.63	0.802	4	0.729	0.21	0.22
L1	1.34	72.46	3.57	0.812	4	0.709	0.26	0.39
L2	0.41	72.46	4.01	0.439	9	0.695	0.31	0.21
A1	0.71	94.46	3.77	0.385	10	0.686	0.26	0.17
A2	0.37	94.46	3.85	0.286	12	0.677	0.31	0.17

DF: Decrement factor

F: Surface factor

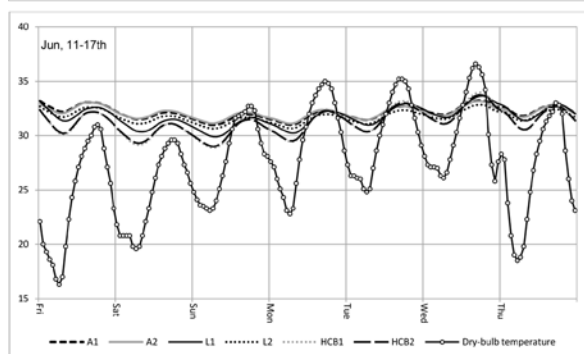
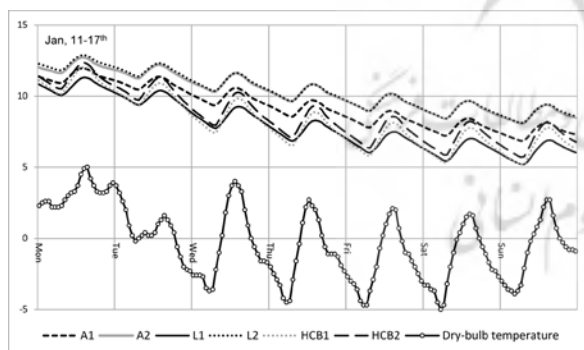
C_m: Effective thermal mass

شرایط پایدار را به چالش می‌کشد. در نتیجه همانطور که در تصویر ۵ دیده می‌شود، در ماه‌های تابستان به جای مشاهده منحنی‌های جدا از هم دمای داخلی حاصل از سازه‌های مختلف دیوار با U-value‌های متفاوت (که در ماه‌های سرد قابل مشاهده است) منحنی‌های دمای داخلی شروع به همپوشانی می‌کنند. این پدیده به خوبی در مقایسه رفتار L2، A1 و A2 با یکدیگر در فصل سرد و فصل گرم قابل مشاهده است. A2 و L2 با ضرایب هدایت حرارتی بسیار نزدیک به هم، در زمستان رفتار مشابهی از خود بروز می‌دهند (تصویر a-۶)؛ در حالیکه در تابستان A1 و A2 با ضرایب حرارتی بسیار متفاوت، رفتاری مشابه از خود نشان می‌دهند، حال آنکه در این زمان (برخلاف زمستان) رفتاری کاملاً متفاوت با A2 به نمایش می‌گذارد (تصویر b-۶). دلیل این امر دخیل شدن اثر جرم حرارتی مصالح در مناسبات

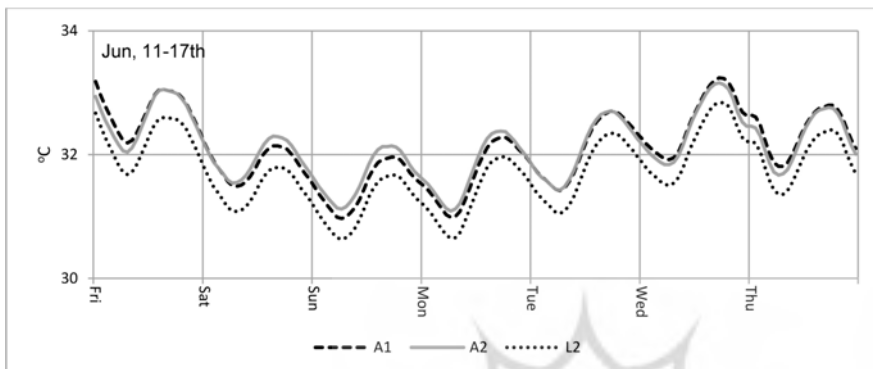
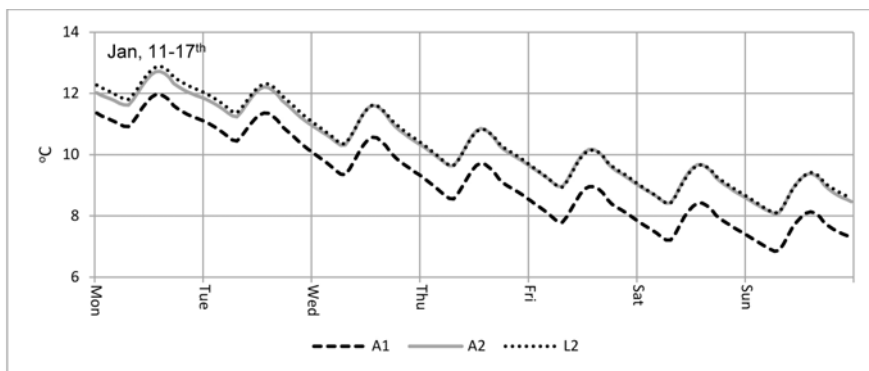
محیط اطراف هم‌دم‌گردد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که با هندسه و ساختار یکسان بین مصالحی که قبل‌تر ذکر شد لیکا و هیلکس رفتار حرارتی دینامیک بهتری نسبت به بلوک سفالی از خود نشان دهند. بدیهی است که شکل و ساختار محصول ساختمانی نهایی به عنوان مثال توپ‌یا توخالی بودن بلوک‌ها، رفتار حرارتی کل سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقادیر ویژگی‌های دینامیک حرارتی هر یک از تیپ‌های دیوار که بر اساس محاسبات روش CIBSE و توسط نرم‌افزار IES صورت می‌گیرد، در جدول ۴ نشان داده شده است. این مقادیر برای تحلیل رفتار حرارتی این دیوارها استفاده می‌شوند.

بر طبق محاسبات شرایط پایدار، دیوار A2 با کمترین ضریب هدایت حرارتی (U-value=0.37) مناسب‌ترین رفتار حرارتی را دارد و به دلیل ضریب کاهش پایین بالاترین قابلیت را در زمینه تعدیل نوسانات دمای داخلی نسبت به نوسانات دمای بیرون دارد. از طرف دیگر سازه تیپ L2 بیشترین میزان thermal admittance را داراست و از آنجا که این پارامتر با در نظر گرفتن مجموعی از خصوصیات حرارتی و فیزیکی محاسبه شده است می‌توان نتیجه گرفت که معیار مناسب‌تری برای تعیین میزان موثر بودن یک ماده ساختمانی از دیدگاه رفتار حرارتی است. بر این اساس مورد انتظار است که L2 با مقدار admittance 4.01 مناسب‌ترین رفتار حرارتی را از خود نشان داده و توانایی بالاتری در تعدیل شرایط محیطی داشته باشد.

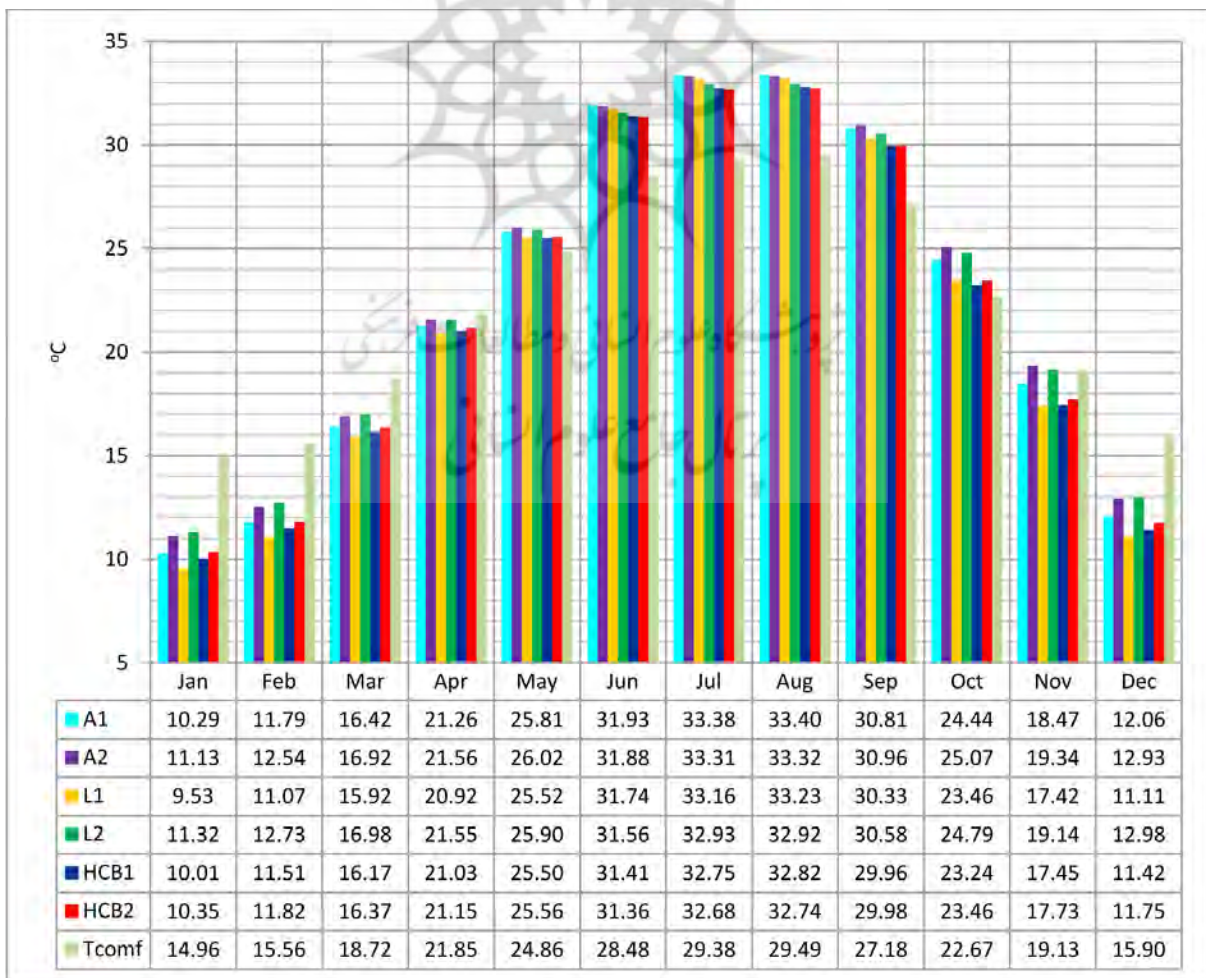
در ماه‌های زمستان به نسبت تابستان دیوارها بیشتر بر اساس آنچه از ضریب هدایت حرارتی شان (U-value) مورد انتظار است، رفتار می‌کنند. این امر به این دلیل صورت می‌گیرد که -همانطور که Givoni (1998) و De Saulles (2011) بیان می‌کنند- ظرفیت حرارتی، بیشتر زمانی سودمند است که شرایط حرارتی محیط در حال تغییر است و دمای بیرون دارای نوساناتی بالا و پایین دمای داخل است. به عبارت دیگر در سرمای زمستان که دمای داخلی همواره بالاتر از دمای بیرون است، جریان حرارت همواره در یک جهت -از درون به بیرون- صورت می‌گیرد؛ در حالیکه در ماه‌های تابستان پوسته ساختمان در معرض جریان حرارت در دو جهت -از خارج به داخل و از داخل به خارج- است و این پدیده‌ای است که پیش‌بینی‌های اولیه حاصل از مطالعات



تصویر ۵- دمای داخلی در ساختمان‌های ساخته شده با تیپ‌های دیوار مختلف در یک هفته از ماه‌های ژانویه (بالا) و ژوئن (پایین).



تصویر ۶- دمای داخلی در ساختمان‌های ساخته شده با گونه‌های دیوار A1، A2 و L2 در زمستان (بالا-a) و تابستان (پایین-b).



تصویر ۷- مقایسه میانگین ماهانه دمای داخل در ساختمان‌های ساخته شده با گونه‌های دیوار مختلف و دمای آسایش.

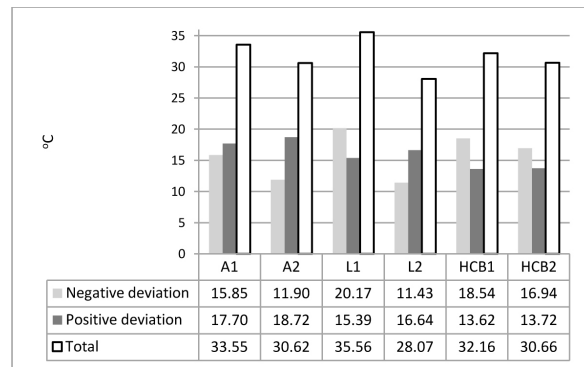
در تامین آسایش به دلیل گرمایی است که در عمق جرم موجود (بلوک های توپر ۲۰ سانتیمتری) جذب و ذخیره شده است. به علاوه از آنجا که ساختمان از تهویه طبیعی و اثر خنک‌کنندگی جریان همرفتی محروم است، این گرمای محبوس شده سبب می شود پوسته ساختمان با دمای بالاتری رفتار حرارتی خود را برای سیکل روز بعد آغاز کند.

سه گونه دیگر دیوار یعنی L1، HCB1 و HCB2 با وجود رفتار حرارتی نامناسب در زمستان، به دلیل توانایی بهتر در عبور گرما و رهایی سریع تر از حرارت انباشته در فضای داخل، در مجموع عملکرد مناسب تری در تابستان از خود نشان می دهند. با این حال قابل ذکر است که این سه ساختار به دلیل ظرفیت حرارتی موثر کمتر و نتیجتاً ضریب کاهش بزرگتر سبب نوسانات بیشتر دمای داخلی می گردند که امری نامطلوب است. نتایج همچنین تاثیر اندک عایق در سیستم دیوار HCB2 را به دلیل گذر مکرر تیغه های سفالی از لایه عایق و ایجاد پل های حرارتی متعدد نشان می دهد.

رفتار سالانه تیپ های دیوار در نمودار ۸، تصویر شده است که نشان دهنده انحراف دمای داخلی از دمای آسایش در تابستان (انحراف مثبت) و در زمستان (انحراف منفی) و کل سال است. همانطور که ملاحظه می شود با به کارگیری L2 به جای L1 در سال به میزان ۷/۵ درجه از انحراف دمای داخلی از دمای آسایش کاسته می شود و از آنجا که هر درجه کاهش در مصرف بار سرمایشی/گرمایشی سبب ۷ درصد صرفه جویی در مصرف انرژی می گردد (حیدری، ۱۳۸۸، ۱۳)، می توان شاهد پتانسیل صرفه جویی ۵۰ درصدی در مصرف انرژی واحد ساختمانی بود. ذکر این نکته ضروری است که با بازکردن پنجره ها در تابستان و بهره مندی از دمای پایین محیط بیرون برای تهویه طبیعی عملکرد سیستم انرژی پوسته ساختمان بهبود یافته و شاهد دماهای داخلی پایین تر (آسایش حرارتی بیشتر) به ویژه در دیوارهای با جرم حرارتی بالا خواهیم بود.

نتیجه

در محاسبات به منظور تحلیلی جامع از رفتار حرارتی پوسته ساختمان نقش هر دو به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. ۳. هرچند، گونه دیوار A2 کمترین ضریب هدایت حرارتی را در بین تیپ های دیوار معرفی شده داراست، L2 دارای بهترین عملکرد از نظر تعدیل شرایط آب و هوایی و تامین آسایش ساکنان می باشد. ۴. با به کارگیری سازه دیوار بهینه که مناسب ترین رفتار حرارتی را از خود نشان می دهد می توان به میزان قابل توجهی در مصرف انرژی ساختمان های مسکونی صرفه جویی کرد.



تصویر ۸- انحراف سالانه دمای داخلی از دمای آسایش.

حرارتی پوسته ساختمان با محیط اطراف به ویژه در ماه های گرم و شرایط متغیر آب و هوایی است.

تصویر کردن میانگین دمای داخلی در هر ماه در کنار دمای آسایش مردم تهران برای هر گونه دیوار نشان دهنده میزان توانایی هر ساختار در تامین آسایش حرارتی برای ساکنین است. بر این اساس همانطور که در تصویر ۷، دیده می شود در ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر L2 و A2 (همانطور که طبق ضرایب هدایت حرارتی این ساختارها قابل انتظار است) به میزان بیشتری تامین کننده آسایش ساکنین هستند در حالیکه در ماه های گرم تر سال مانند می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر این دو ساختار در کنار A1 بیشترین انحراف دمای داخل از دمای آسایش را موجب می شوند. علت این امر را می توان در عدم توانایی این سه سیستم ساختمانی دیوار در رهایی از گرمای انباشته شده در فضای داخلی و نیز جرم دیوار است.

در مورد L2 و A2 دلیل این امر اینست که در شب های تابستان هنگامی که دمای بیرون تا میزانی پایین تر از دمای داخل افت می کند، لایه عایق حرارتی داخل تیپ های دیوار در مقابل عبور حرارت ذخیره شده در جرم دیوار به سمت بیرون جلوگیری می کند و سبب تاخیر در تخلیه گرما از جرم ساختمان و در نتیجه دمای بالاتر در فضای داخل می شود. در تیپ A1 این ناتوانی

هدف از این تحقیق ارزیابی رفتار حرارتی مصالح و ساختارهای دیوار به نسبت جدیدی است که در حال حاضر در ساختمان های مسکونی شهر تهران به جای مصالح سنتی مورد استفاده قرار می گیرند. یافته های تحقیق می تواند به صورت زیر خلاصه گردد:

۱. محاسبات شرایط پایدار که منجر به محاسبه ضریب هدایت حرارتی شده و در شرایط ثابت آزمایشگاهی صورت می گیرد، روش جامعی برای ارزیابی رفتار حرارتی پوسته ساختمان نیست.
۲. عایق حرارتی و جرم حرارتی نقش های متفاوتی در رفتار حرارتی کل پوسته ساختمان بازی می کنند و شایسته است

سپاسگزاری

نگارنده این مقاله بر خود لازم می داند در اینجا مراتب سپاس خود را از دکتر Andrew Shea به دلیل حمایت و دلگرمی هایشان در طول انجام پایان نامه کارشناسی ارشد که منبع و مرجع این مقاله گردید، بیان دارد.

پی‌نوشت‌ها

فهرست منابع

حیدری، شاهین (۱۳۸۸)، دمای آسایش حرارتی مردم شهر تهران، مجله هنرهای زیبا (معماری و شهرسازی)، ۱ (۵)، صص ۵-۱۴.

وبسایت رسمی سازمان آمار ایران (۱۳۹۱)، برآورد جمعیت (آنلاین)، قابل دسترس از آدرس:

<http://www.amar.org.ir/Default.aspx?tabid.1160>=

وبسایت رسمی مرکز تحقیقات راه، مسکن، شهرسازی (۱۳۸۸)، تکنولوژی‌های نوین ساختمانی [آنلاین]، قابل دسترس از آدرس زیر:

<http://www.bhrc.ac.ir/portal/Default.aspx?tabid.668>=

Balaras, C.A. (1996), The role of thermal mass on the cooling load of buildings, An overview of computational methods. *Energy and buildings*, 1-10, 24.

CIBSE (2006), *Environmental design: CIBSE guide A*. 7th ed. Great Britain, Page Bros.

Clay brick and paver institute (CBPI) (2006), *The role of thermal mass in energy-efficient house design*, Australia, Austral bricks.

Crawley, D, Hand, J, Kummert, M, Griffith, B (2005), *Contrasting Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*, US Department of Energy, University of Strathclyde, University of Wisconsin.

Department of climate change and energy efficiency (DCCEE), 2010. *Your home; technical manual (fourth edition)*, Commonwealth of Australia [online]. Available from: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs49.html#where>.

De Saullés, T. (2011), *Thermal mass explained*, TCC (the concrete center), Surrey.

Doyle, M.D. (2008), *Investigation of dynamic and steady state calculation methodologies for determination of building energy performance in the context of the EPBD*, Thesis (M.Phil.), Dublin institute of technology.

Givoni, B. (1998), *Climate considerations in building and urban design*, The USA, Van Nostrand Reinhold.

Gregory, K., Moghtaderi, B., Sugo, H., Page, A. (2008), Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems, *Energy and buildings*, 40, 459-465.

Hegger, M., Fuchs, M., Stark, Th., Zeumer, M. (2008), *Energy manual; sustainable architecture*, Berlin, Birkhauser.

Kruger, E., Cruz, E.G., Givoni, B. (2010), Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate, *Building and environment*, 45, 1422-1433.

Laughton, M.A., Warne D.F. (2003), *Electrical engineer's reference book*.

McMullan, R. (2007), *Environmental science in building*, 6th ed, New York, Palgrave Macmillan.

Nasrollahi, F. (2012), *Urban and architectural criteria for reducing building energy consumption*, National energy committee of Iran.

1 Steady-State.

2 U-value.

۳ ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg K) یک ماده مقدار انرژی گرمایی لازم است برای اینکه دمای یک کیلوگرم از آن ماده را یک درجه کلوین بالا برد.

۴ ضریب هدایت حرارتی (W/mK) نشان دهنده جریان حرارت از محل گرمتر به محل فاقد گرماسست که به صورت حرکت اتم‌ها یا به صورت موجی است در فرم انتقال، تابش، یا همرفت.

5 Cyclic Performance.

۶ در مناطق گرم و خشک نبود رطوبت در هوا و در نتیجه نوسانات گسترده دما در طول شبانه روز سبب ایجاد اختلاف دمای قابل توجه بین روز و شب و سودمندی بیشتر جرم حرارتی می‌گردد.

۷ آسمان صاف شب عملکردی مشابه جسم سیاه دارد "Black Body"

دارد. در تئوری جسم سیاه به عنوان بهترین جاذب و تابش کننده انرژی تابشی است؛ به طور مشابه آسمان تاریک و عاری از ابر شب می‌تواند جذب کننده بسیار خوب گرمای تابشی ساطع شده از اجسام روی سطح زمین باشد و این روند را تسریع کند.

8 Steady State.

9 Non-Steady State.

10 Chartered Institute of Building Services Engineers.

11 Admittance Value.

12 Decrement Factor.

13 Surface Factor.

14 Adaptive Comfort.

15 Michael A Humphreys.

16 J. Fergus Nicol.

17 Comfort Temperature.

18 Neutral Temperature.

19 Diffusivity.

20 Thermal Admittance.

21 Derived Parameters.

22 Diffusivity.