

مطالعه ی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی ملات های رایج در ساخت دیوار

وهب توفیق*، سیما صمدیان فرد، مریم فانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:

ملات
مصالح بنایی
کاهش مصرف انرژی
پارامترهای رسانش حرارتی
آیین نامه ASTM

خلاصه: روند فزاینده ی مصرف انرژی در صنعت ساخت و ساز، مهندسان و طراحان سازه را به سمت بررسی روش هایی سوق داده است که در طی چرخه ی ساخت تا تخریب، میزان انرژی کمتری را مصرف می کنند. تقویت ویژگی های رسانش حرارتی المان های سازه ای در کنار ویژگی های مکانیکی و مقاومتی علاوه بر گسترش زمینه های کاربردی این مصالح، موجب کاهش قابل ملاحظه ی میزان انرژی مصرفی و کاهش پیمادهای مخرب زیست محیطی می شود که این خود هم سو با اهداف توسعه پایدار می باشد. در این پژوهش، پارامترهای حرارتی بر روی ملات های تعریف شده در استاندارد آمریکا به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری می شود. با توجه به محدودیت ها و فرضیات ساده کننده ی روش های اندازه گیری رایج پیشین، در این مطالعه، با به کارگیری سیستم اتا فک کنترل انرژی که روش جدیدی بر مبنای قانون فوریه جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی اجسام متخلخل می باشد، ضرایب مدت زمان تاخیر، ضریب کاهشی و ضریب رسانش حرارتی ملات های ساختمانی محاسبه شده است. نتایج پژوهش حاکی از عملکرد مناسب حرارتی ملات نوع O با ضریب رسانش حداقلی ۰/۲۶۴ وات بر کلوبین-متر و حداکثر مدت زمان تاخیر ۶۶ دقیقه می باشد. با این وجود، به دلیل کم بودن سیمان، این نوع ملات مقاومت فشاری بالایی ندارد. در نتیجه، می بایست حالت بهینه ای برای ملات در نظر گرفته شود تا علاوه بر تامین ویژگی های مکانیکی مصالح، خواص رسانش انرژی آن نیز بهبود یابد.

۱- مقدمه

کنترل و روش های کاهش آن ارائه کردند [۳]. علاوه بر این، حفظ کیفیت مصالح ساخت و ساز نیازمند استفاده از مواد پایا و سازگار با محیط زیست می باشد [۴].

بخش اعظمی از اجزای غیر سازه ای ساختمان ها نظیر دیوار ها و جداکننده ها از بلوک و ملات تشکیل می شود. مطالعات نشان می دهند که بخش عمده ی اتلاف انرژی از سطح مصالح بنایی به دو دلیل قابل تامل به قسمت مصالح چسباننده مانند ملات مربوط می-شود. عامل اول به پیوند دو بخش ملات و آجر مربوط می شود. با توجه به اینکه اکثر سازه های بنایی توسط قشر نامتخصص اجرا می شود، خلل و فرج سطوح تسطیح شده به طور کامل بر طرف نشده

نرخ فزاینده ی نیاز به کاهش مصرف انرژی گرمایی و بهبود سطح عملکرد زیرساخت های موجود، روش های نوین ساخت و ساز و تعبیه ی سیستم های جدید عایق حرارتی برای مصالح ساختمانی را مورد توجه پژوهشگران سازه قرار داده است [۱]. در سال ۲۰۱۳، ۳۰ درصد از میزان کل انرژی مصرفی در ایران به بخش ساخت و ساز ارتباط داده شده است. از طرف دیگر، این میزان انرژی مصرفی، ۴ الی ۵ برابر کشور های اروپایی است [۲]. به همین دلیل می بایست این میزان انرژی مصرفی که به عنوان عامل اصلی تغییر اقلیم شناخته شده،

* نویسنده عهده دار مکاتبات: toufigh@sharif.edu



و بخش عظیمی از انرژی گرمایی از این قسمت به هدر می رود. عامل دوم اتلاف انرژی، تداخل خود ملات می باشد. عکس برداری های الکترونی نشان می دهند که در ساخت ملات از هیچ گونه روش تراکمی استفاده نمی شود. به همین دلیل، این بخش از سازه های بنایی تداخل بالایی دارد. تداخل بالا موجب کاهش جرم حرارتی مصالح شده و رسانش انرژی حرارتی را افزایش می دهد. بنابراین، مطالعه ی پارامترهای حرارتی ملات های ماسه- آهکی که نوع رایجی از ملات ها می باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. بر اساس مطالعات نویسندگان، تعیین پارامترهای حرارتی ملات های رایج در آیین نامه ی ASTM تاکنون به طور جامع انجام نشده است. در همین راستا، روش های مطالعاتی حرارتی برای سایر مصالح نظیر مصالح بنایی، بلوک های آجری و مصالح خاک کوبشی مرور می گردد.

مطالعه ی رفتار حرارتی مصالح بنایی برای اولین بار توسط بوژیک در سال ۱۹۹۶ مطرح شد [۶]. در این مطالعه، دو سازه ی بنایی سه طبقه به ترتیب تحت بارگذاری حرارتی متناوب و پیوسته قرار گرفتند. سازه ها با نرم افزار BRE-Admit که در آن، حداکثر داده های دمایی یک منطقه اعمال شده بود، تحلیل شدند. نتایج بیانگر این مسئله بودند که بدون استفاده از پانل های عایق، سازه های بنایی قادر به تامین حدود مجاز حرارتی برای داخل ساختمان نیستند. در نتیجه، پانل هایی طراحی کردند تا عملکرد منفعل سازه را تقویت کنند.

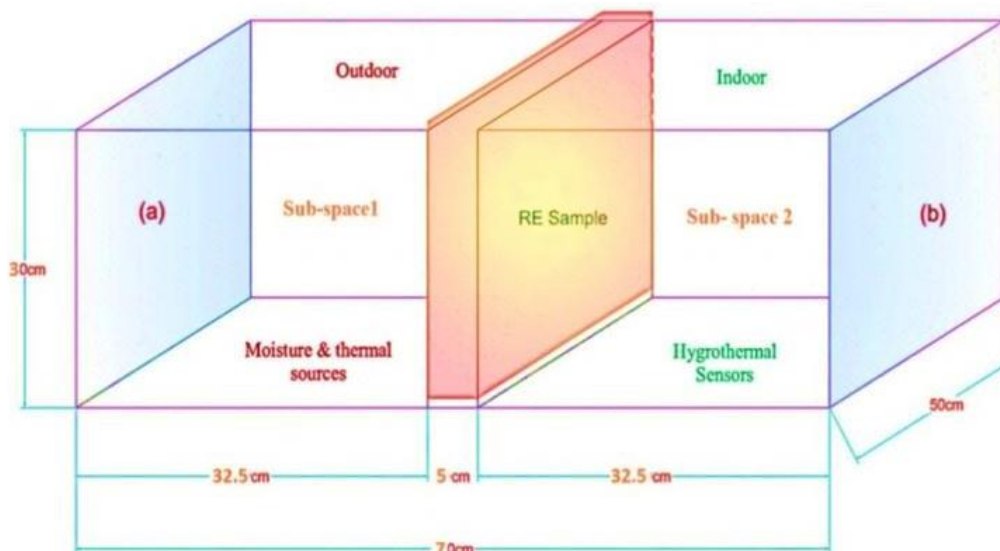
آنالیزهای دینامیکی انتقال انرژی از سطوح جداره های ساختمان ها، بخش مهمی از طراحی های بهینه از نظر انرژی را فرا می گیرد. یکی از این پارامترهای حائز اهمیت، ضریب هدایت حرارتی می باشد. در این زمینه، براردی و همکاران [۷]، ضریب هدایت حرارتی مصالح بنایی را به روش عبور سیم گرم و تحت دماهای مختلف اندازه گیری کردند. نتایج نشان دادند که مقدار واقعی این ضریب با مقدار اسمی آن متفاوت است. علت این امر، وابستگی این ضریب به دما ذکر شد. بنابراین باید روشی ارائه می شد که با اندازه گیری دما در دو طرف نمونه وابستگی آزمایش به دما را از بین ببرد. در غیر این صورت، بایستی این خطاها در تحلیل ها مد نظر قرار می گرفت. آزمایش مشابهی نیز توسط عبدو و بودیوی [۸] انجام گرفت که نتایج مشابهی در پی داشت. این محققان نتیجه گرفتند که عملکرد بهینه ی مصالح بنایی با دست یافتن به طرح اختلاط بهینه برای یک ظرفیت دمایی مشخص فراهم می شود. در غیر این صورت، جایگزین کردن مصالح

جدید با عملکرد حرارتی تایید شده گزینه ی مناسبی می باشد [۹]. مصالح خاک کوبشی، یکی از مصالح سازگار با محیط زیست بوده که ظرفیت حرارتی بالایی دارد. این مصالح به دلیل پتانسیل بالایی که در ذخیره ی انرژی با هر دو روش انفعالی و گرمای نهان دارند، مناسب ترین انتخاب برای جایگزینی مصالح بنایی از نظر حرارتی می باشند [۱۰]. روش انفعالی به قابلیت ذخیره و نگهداشت انرژی در طول روز و پخش آن در شب، زمانی که دما افت پیدا می کند، گفته می شود. این روش به پارامترهای وابسته به زمان نظیر نوسان های حرارتی و تابش خورشیدی مربوط می شود [۱۱]. دومینگز و همکاران [۱۲]، تاثیر روش های مختلف تثبیت کنندگی را بر میزان کاهش تداخل مصالح خاک کوبشی و در نتیجه، بر ظرفیت گرمایی آن مطالعه کردند. آن ها نتیجه گرفتند که با افزودن الیاف های فیبری، رسانش حرارتی مصالح کاهش می یابد ولی این الیاف در دماهای بالا ویژگی های مکانیکی خود را از دست می دهند. برونو و همکاران [۱۳] تاثیر افزودنی های مختلف را بر کیفیت عملکرد حرارتی مصالح خاک کوبشی بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که افزودن مواد قلیایی با این که مقاومت و سختی این مصالح را افزایش می دهد ولی ظرفیت گرمایی این مصالح را پایین می آورد. سرانو و همکاران [۱۴] با بررسی نمونه های ساخته شده به روش خاک کوبشی و اعمال بارگذاری حرارتی- رطوبتی مدیترانه ای اذعان داشتند که کاهش ضخامت دیوارها تاثیر منفی بر رفتار حرارتی این مواد می گذارد. در عین حال، گاه این کار به دلیل الزامات معماری ضرورت می یابد. بنابراین، به منظور جلوگیری از افت عملکرد این مصالح از عایق های حرارتی در قسمت خارجی نمونه استفاده می گردد.

تمامی محققان فوق الذکر بیان کردند که پاسخ مصالح ساختمانی به بارگذاری های حرارتی، وابسته به زمان می باشد. به علاوه، تغییرات دمای محیط خارج ساختمان، پاسخ دینامیکی سازه را تحت تاثیر قرار می دهد و این پاسخ تحت تاثیر پارامترهای وابسته به زمان نظیر مدت زمان تاخیر، نوسان های حرارتی و غیره می باشد. به همین جهت، اندازه گیری این پارامترها به منظور تحقق یک مطالعه ی جامع و مقایسه ای بر مصالح ساختمانی ضروری است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد استفاده شده در ساخت



شکل ۱. نمای شماتیک زیرفضاهای اتاقک

Fig. 1. Schematic view of chamber sub-spaces

و آب و هوای کل روز با تکرار این الگو به وجود می‌آید. با عایق کاری جداره های خارجی، فضای داخل این مجموعه به طور کلی از فضای خارجی جدا شده و بارگذاری حرارتی و رطوبتی اعمال شده در زیرفضای شماره ۱ توسط سنسور های حرارتی و رطوبتی در زیرفضای شماره ۲ ثبت و ذخیره می گردند.

۲-۳- روش ساخت نمونه ها

به منظور ساخت دیوار ملات ماسه-سیمان-آهک، از سیمان نوع ۲ و آهک هیدراته و ماسه شسته استفاده شده است. برای تهیه نمونه ها ابتدا نسبت های حجمی ماسه، سیمان و آهک که طبق آیین نامه استاندارد ملات ها مشخص شده است، با یکدیگر مخلوط می شوند و سپس آب به آرامی به مخلوط جامد اضافه می شود تا جایی که ترکیب همگنی به دست آید و ملات کارایی مناسبی داشته باشد. میزان آب استفاده شده برای هر نوع ملات در جدول ۱ آمده است. نکته حائز اهمیت این است که میزان آب محاسبه شده با در نظر گرفتن رطوبت ماسه می باشد. در مرحله بعد، ملات را به آرامی در قالبی با ابعاد $4 \times 30 \times 50$ سانتی متر ریخته تا یک سوم قالب پر شود. سپس طبق استاندارد پروکتور اصلاح شده [۱۵]، چکش استاندارد از ارتفاع ۴۶ سانتی متری نمونه رها می شود تا نمونه فشرده شود. سطح هر لایه پس از ۵۶ بار کوبش تسطیح شده و لایه بعدی به آن اضافه می شود. پس از گذشت دو روز ملات سفت شده از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در اتاقک استاندارد تحت دما و رطوبت کنترل شده

در این پژوهش، از ماسه شهر تهران برای ساخت نمونه ها استفاده شده است. چگالی خشک این ماسه $2/6$ گرم بر سانتی متر مکعب و رطوبت موجود در آن $2/4$ درصد است. به منظور تثبیت نمونه های ساخته شده، سیمان پرتلند نوع دو با چگالی $3/16$ گرم بر سانتی متر مکعب و به منظور بهبود خواص مکانیکی ملات ها از آهک با چگالی $2/3$ گرم بر سانتی متر مکعب به ترکیب ملات افزوده شده است.

۲-۲- اتاقک کنترل حرارت و رطوبت

اتاقک کنترل حرارت و رطوبت با هدف شبیه سازی نوسانات حرارتی محیط و انتقال جرم رطوبتی از واحد سطح المان های سازه ای ساخته شد. ابعاد این اتاقک $700 \times 500 \times 300$ میلی متر بوده و به منظور انجام آزمایش های حرارتی منطبق بر استاندارد های ASTM و ISO تعبیه گردیده است.

هر نمونه درون اتاقک به نحوی قرار می گیرد که فضای داخلی را به دو زیر فضای یکسان تقسیم کند. شکل ۱ نمای شماتیک این اتاقک را نمایش می دهد. زیر فضای شماره ۱ با هدف شبیه سازی آب و هوای محیط بیرون و زیر فضای شماره ۲ با هدف شبیه سازی فضای داخلی ساختمان ساخته شده اند. با نصب سیستم های خنک کننده، رطوبت ساز و سیستم های حرارتی در زیر فضای شماره ۱، آب و هوای محیط خارج شبیه سازی می گردد.

بارگذاری حرارتی تولید شده در سیستم مذکور الگوی شبه سینوسی را دنبال می کند. دوره ی تناوب این الگو قابل تغییر بوده

جدول ۱. جزئیات نمونه های ساخته شده (kg)

Table 1. Mix design details of specimens

نمونه‌ها	آب	آهک	ماسه	سیمان	نسبت حجمی مواد*
سری N	۱/۹۲	۱/۱۸	۸/۰۰	۱/۶۲	۱:۱:۶
سری O	۲/۱۸	۱/۵۷	۸/۰۰	۱/۰۸	۱:۲:۹
سری S	۱/۷۷	۰/۷۸	۸/۰۰	۲/۰۸	۱:۰/۵: ۴/۵
سری M	۱/۴۲	۰/۴۷	۸/۰۰	۲/۵۹	۱:۰/۲۵: ۳/۷۵

*نسبت حجمی مواد به ترتیب نسبت‌های ماسه و آهک به سیمان می‌باشد.

$$DF = \frac{T_{max,in} - T_{min,in}}{T_{max,out} - T_{min,out}} \quad (2)$$

$T_{max,out}$ ماکزیمم دما و $T_{min,out}$ مینیمم دمایی است که سطح خارجی دیوار که در تماس با محیط بیرون است، تجربه می‌کند. به طور مشابه، $T_{max,in}$ ماکزیمم دما و $T_{min,in}$ مینیمم دمایی است که سطح داخلی دیوار، تجربه می‌کند. شکل ۲، نمای شماتیکی از پارامتر مدت زمان تاخیر را نشان می‌دهد. برای یک دوره ی تناوب از بارگذاری حرارتی، P دوره ی تناوب، T_{sa} پروفیل بارگذاری حرارتی اعمال شده و T_{in} مقدار تغییرات دمایی است که هوای محیط داخل تجربه می‌کند. در این شکل، Φ به عنوان مدت زمان تاخیر شناخته می‌شود که همان مدتی است که طول می‌کشد تا هر دو طرف نمونه به ماکزیمم دمایی خود برسند. لازم به ذکر است که اندازه گیری مدت زمان تاخیر نمونه‌ها مطابق استاندارد ISO ۱۳۷۸۶ [۱۶] بوده است.

۲-۳- ضریب رسانش حرارتی

ویژگی های نارسانایی حرارتی سازه ها به پارامترهای حرارتی مواد سازنده ی آن ها، علی الخصوص ضریب هدایت حرارتی دارد. این پارامتر نیز به ویژگی های مکانیک حرارتی مصالح مربوط بوده که بر رسانش حرارتی، توزیع پروفیل دمایی در راستای ضخامت مواد و عایق‌های پوشاننده ی جداره ی ساختمان ها تاثیر می‌گذارد. برقراری جریان حرارتی در داخل نمونه برای به دست آوردن رژیم همگن

(دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت ۹۰٪) عمل‌آوری می‌شود. جزئیات نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است نسبت مواد در نمونه‌های مطرح شده، بر اساس آیین‌نامه‌ی ASTM C۲۷۰ و بر اساس مطالعات پیشین انتخاب شده اند.

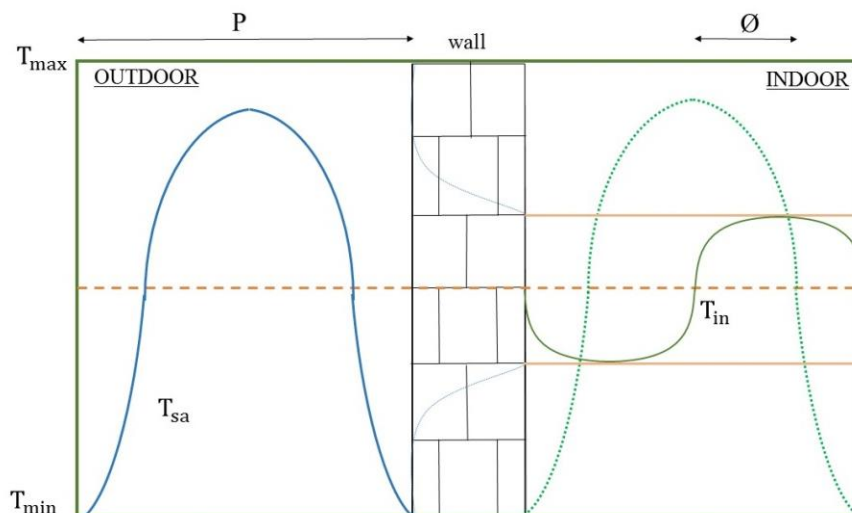
۳- تئوری و فرضیات خصوصیات رفتاری مصالح

۳-۱- مدت زمان تاخیر و ضریب کاهش

پروفیل دمایی در راستای ضخامت دیوار بستگی به تغییرات دمایی دو طرف دیوار دارد. هنگامی که یک سمت دیوار در معرض تابش منبع انرژی مانند خورشید است، در راستای مقطع دیوار افزایش دمای تدریجی رخ داده و نسبتی از این مقدار تغییر یافته به سمت داخلی نمونه می‌رسد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا این پدیده رخ دهد را مدت زمان تاخیر و نسبت بزرگی این دو مقدار را ضریب کاهش می‌نامند. ویژگی های مکانیک حرارتی مصالح ساختمانی بر مقدار این پارامترها تاثیر می‌گذارند. در طی مدت این حالت گذرا، توزیع پروفیل دمایی به صورت سینوسی تغییر می‌کند. متغیرهای مدت زمان تاخیر و ضریب کاهش به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$LT = T_{max,out} - T_{max,in} \quad (1)$$

که در آن:



شکل ۲. نمای شماتیک پارامتر مدت زمان تاخیر

Fig. 2. Graphical description of time-lag parameter

این پژوهش، روش جدیدی برای محاسبه ی رسانش حرارتی مواد متخلخل پیشنهاد شده است. مشکل اصلی روش های پایا، مدت زمان طولانی است که برای آزمایش صرف می شود. در صورت استفاده از محیط های بسته، هوای محبوس موجب افزایش فشار داخلی محفظه می شود. با توجه به این که پارامترهای فشار و دما ارتباط مستقیمی باهم دارند، اندرکنش این دو سرعت تغییرات دمایی را افزایش داده و دما در دو طرف نمونه در مدت زمان کم تری تثبیت می شود.

۴- روش تحقیق خصوصیات رفتاری مصالح

۴-۱- مدت زمان تاخیر

همان طور که قبلا ذکر شد، واحد شبیه سازی با ساخت نمونه به دو زیرفضا تقسیم می شود. در ابتدا به منظور یکسان سازی شرایط اولیه هر دو قسمت به دمای ۲۷ درجه ی سانتی گراد می رسند. سپس با خاموش کردن سیستم گرمایشی در زیر فضای شماره ۲، دمای قسمت ۱ به ۴۵ درجه ی سانتی گراد افزایش داده می شود. در این لحظه گرماساز شماره ۱ نیز خاموش شده و سنسورهای نصب شده بر روی سطح داخلی نمونه و فضای داخلی قسمت ۲ داده های دمایی را ثبت می کنند. مدت زمانی که طول می کشد تا قسمت داخلی نمونه به ماکزیمم دمای خود برسد را مدت زمان تاخیر می نامند. روند انجام آزمایش به طور خلاصه در شکل ۳ آمده است. به منظور افزایش دقت داده های دمایی آزمایش، سطح نمونه به چهار زیرسطح تقسیم شده و داده های اعلام شده در این پژوهش میانگین دمای این چهار

دائمی ضروری است. هنگامی که این جریان برقرار شود، ضریب هدایت حرارتی با استفاده از قانون فوریه [۱۷] که در ادامه ارائه شده است، محاسبه می گردد:

$$q = k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

که در آن،

q نرخ جریان حرارتی به وات (W)، اختلاف دمایی بین دو سمت نمونه به درجه ی سانتی گراد ($^{\circ}C$)، ضخامت نمونه به متر (m) و k ضریب هدایت حرارتی به $W^{\circ}C^{-1}m^{-1}$ می باشد.

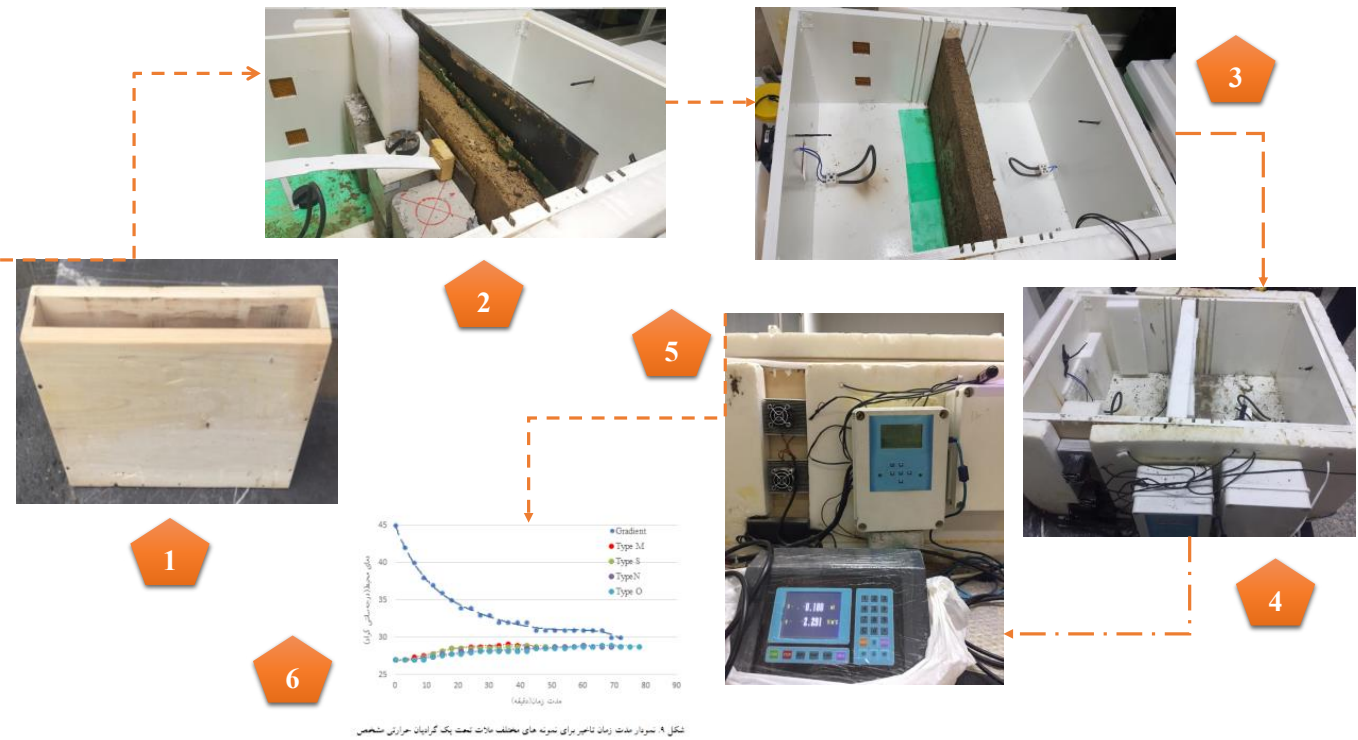
روش های اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی به دو گروه اصلی روش های پایا و گذرا تقسیم می شوند. فاکتورهای قابل ملاحظه ای که بر تعیین این روش ها تاثیر می گذارند، عبارتند از اندازه ی نمونه ها، مدت زمان انجام آزمایش و ابزار های اندازه گیری. در این روش، سیمی از آلیاژ پلاتین حرارت دیده در راستای مرکز یک نمونه ی استوانه ای شکل همگن قرار داده شده به صورت تابع توانی با زمان گرم می شود. شرایط مرزی در این آزمایش شامل دو صفحه است؛ یک صفحه ی سرد و یک صفحه ی گرم. این آزمایش با تکیه بر فرضیات زیر انجام می شود:

۱. صفحات دمایی در تماس کامل با نمونه قرار دارند.

۲. جریان حرارتی تک محوره در راستای خط مرکزی نمونه

برقرار است.

نرخ افزایش دمای سیم به قابلیت رسانش ماده بستگی دارد. در



شکل ۳. آماده سازی نمونه ها و روند انجام آزمایش *
Fig. 3. Experimental procedure and specimen preparation

ضریب رسانش حرارتی و زمان تاخیر مورد توجه جامعه ی مهندسی قرار می گیرند. بدین منظور، با مدنظر قرار دادن این نکته که پارامترهای ذکر شده تاثیر مستقیم بر روی کاهش مصرف انرژی دارند، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته اند. به هنگام انتقال موج گرما از سطح یک المان، بخش قابل توجهی از این گرما از المان عبور کرده و بخش باقی مانده ی آن توسط جرم رطوبتی و ظرفیت گرمایی به کار رفته جذب المان می شود. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه میزان رسانش حرارتی و مدت زمان انتقال حرارت بین چهار نوع ملات ماسه-سیمان-آهک می باشد تا بهینه ترین نوع ملات از نظر میزان شار حرارتی عبوری، ماکزیمم زمان تاخیر افزایش دما و به طور کلی رفتار حرارتی مصالح ساختمانی تعیین گردد.

۵-۱- مقاومت فشاری نمونه ها

به منظور بررسی خواص مکانیکی ملات ها از قالب های مکعبی ۵×۵×۵ جهت ساخت نمونه استفاده شده است. کلیه نمونه ها پس از ساخت به مدت ۲۸ روز در اتاقک استاندارد عمل آوری شده اند. اتاق تحت دما و رطوبت کنترل شده در طول دوره ی عمل آوری قرار دارد. پس از اتمام فرایند عمل آوری، نمونه ها از قالب خارج شده

زیرسطح می باشند.

۴-۲- ضریب رسانش حرارتی

روشی که در این پژوهش برای اندازه گیری این ضریب با استفاده از قانون فوریه ارائه می شود، «روش جعبه‌ای» نام گذاری شده است. در این روش دیوارک ها پس از ساخت به مدت هفت روز عمل آوری می گردند. پس از یکسان سازی دمای دو طرف نمونه، دما در زیرفضای شماره ۱ در مدت سه ساعت به ۴۵ درجه ی سانتی گراد رسیده و در این حالت شرایط پایدار ایجاد می شود. این روش برای ماده‌ای مانند ورق فلزی که ضریب انتقال حرارت آن از قبل مشخص است انجام شده و به این ترتیب نرخ شارش جریان برای دستگاه به دست می آید. سپس با تثبیت شرایط دمایی در دو طرف نمونه و استفاده از قانون فوریه [۱۷] ضریب هدایت حرارتی برای تمامی نمونه های خاکی محاسبه می گردد.

۵- نتایج و بحث

با توجه به اهداف توسعه پایدار و با هدف کاهش میزان مصرف انرژی، پارامترهای موثر در رفتار حرارتی مصالح ساختمانی از جمله

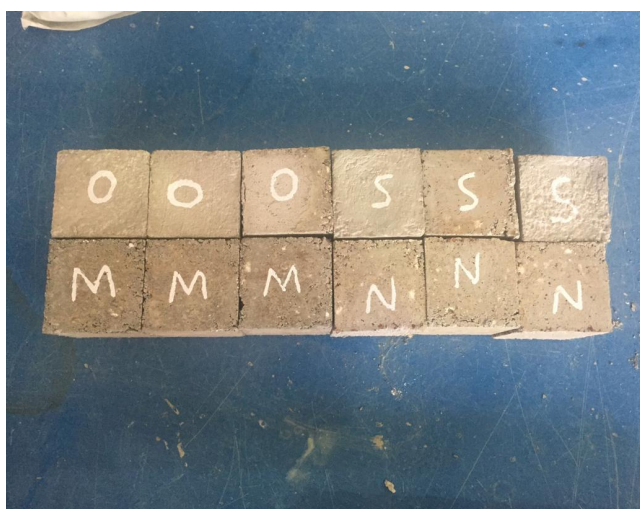
قرارگیری منبع انرژی گرمایی نسبت به نمونه، جهت قرارگیری نمونه و مصالحی که در ساخت نمونه به کار رفته است. در این پژوهش، موقعیت قرار گرفتن منبع انرژی و نحوه قرارگیری نمونه ها ثابت است؛ بنابراین تنها عامل موثر در تغییر مدت زمان تاخیر حرارتی، نوع مصالح به کار رفته می باشد. از آنجا که میزان ماسه استفاده شده در هر چهار ملات یکسان است؛ همچنین نمونه ها به یک اندازه کوبیده شده اند و ضخامت یکسانی دارند، در نتیجه، تنها تفاوت در میزان سیمان و آهک بکار رفته در ملات ها می باشد. نتایج (شکل ۷) نشان می دهند که ملاتی که آهک بیشتری دارد، زمان تاخیر بیشتری نیز

و پس از تسطیح، درون دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری قرار می گیرند. روش اندازه گیری مقاومت فشاری ملات ها بر اساس آیین نامه ASTM C 109 [۱۸] انجام گرفته و سرعت بارگذاری نمونه ها در این آزمایش، ۱۵ کیلو نیوتون بر دقیقه بوده است. سطح بارگذاری شده ی نمونه ها با دقت به و سیله ی کولیس اندازه گیری شده و در نهایت، میزان مقاومت فشاری نمونه ها بر حسب مگاپاسکال در شکل ۴ ارائه شده است.

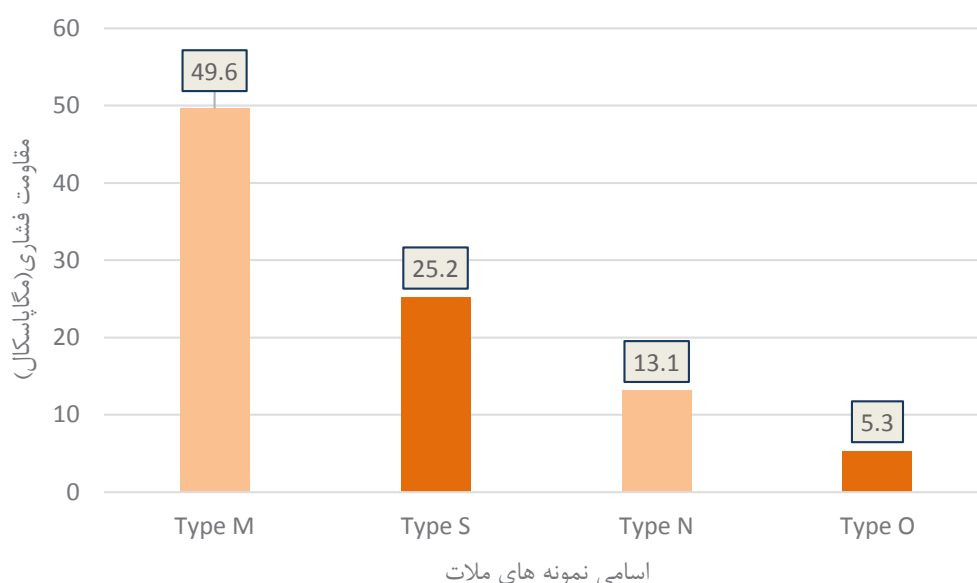
لازم به ذکر است که از هر نوع ملات سه نمونه مکعبی ساخته و آزمایش شده است (شکل ۵). میانگین مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در شکل ۴ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود ملات نوع O کمترین مقاومت فشاری و ملات نوع M بیشترین مقاومت را دارد. این امر به دلیل بیشتر بودن مقدار سیمان در ملات نوع M که عامل چسبندگی بین سنگ دانه ها است، می باشد.

۵-۲- مدت زمان تاخیر

شکل ۶ نتایج حاصل از آزمایش مدت زمان تاخیر برای چهار نمونه ملات ماسه سیمان آهک را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، ملات نوع O بیشترین زمان تاخیر را دارد؛ در نتیجه دمای داخلی ساختمان برای مدت طولانی تری ثابت باقی می ماند. پس از آن، ملات نوع S, N و M به ترتیب زمان تاخیر کمتری دارند. پارامتر های موثر بر مدت زمان تاخیر حرارتی عبارتند از محل

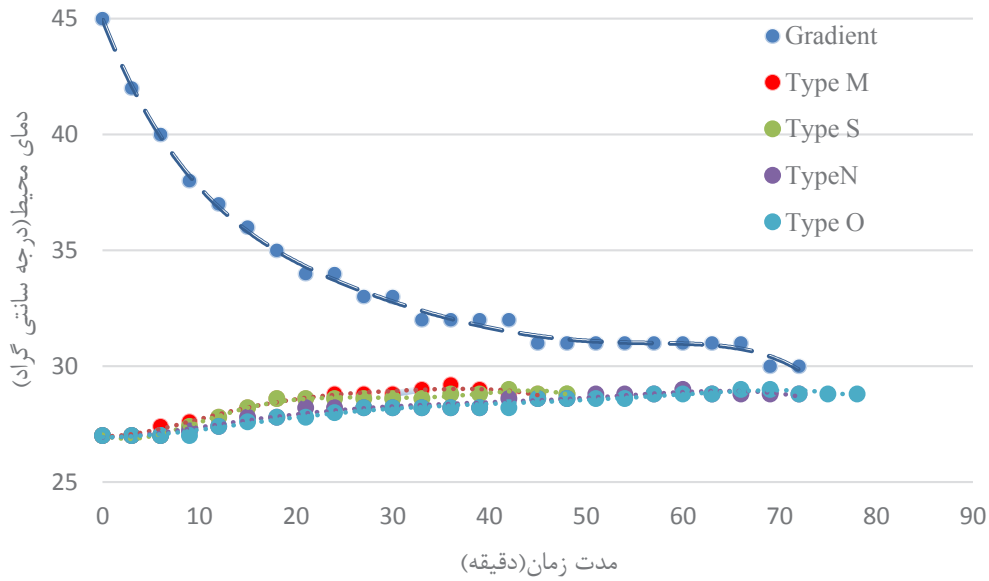


شکل ۵. نمونه های ساخته شده برای تست مقاومت فشاری
Fig. 5. Specimens for compressive strength test

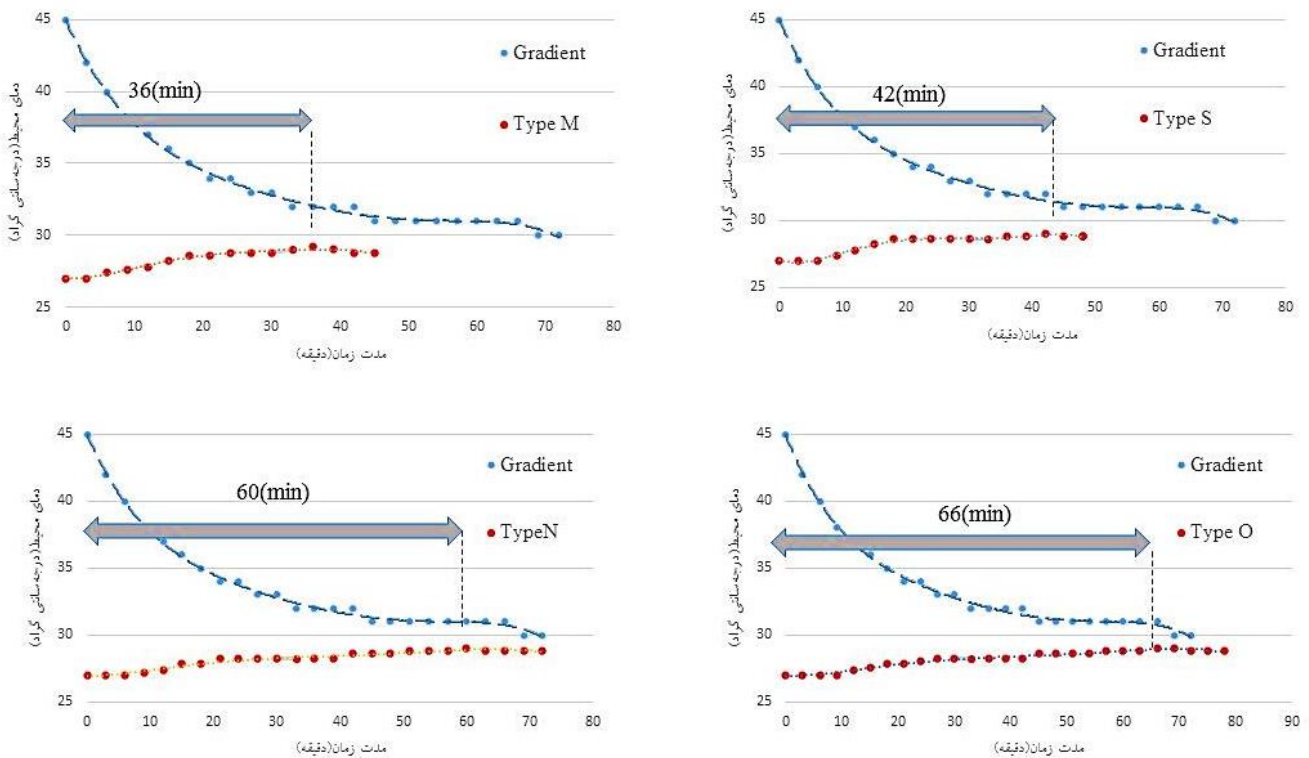


شکل ۴. نمودار مقایسه ای مقاومت فشاری برای ملات

Fig. 4. Comparative diagram of compressive strength of mortar specimens



شکل ۶. نمودار مدت زمان تاخیر برای نمونه های مختلف ملات تحت یک گرادیان حرارتی مشخص
 Fig. 6. Time-lag results for different specimens under specific thermal gradient

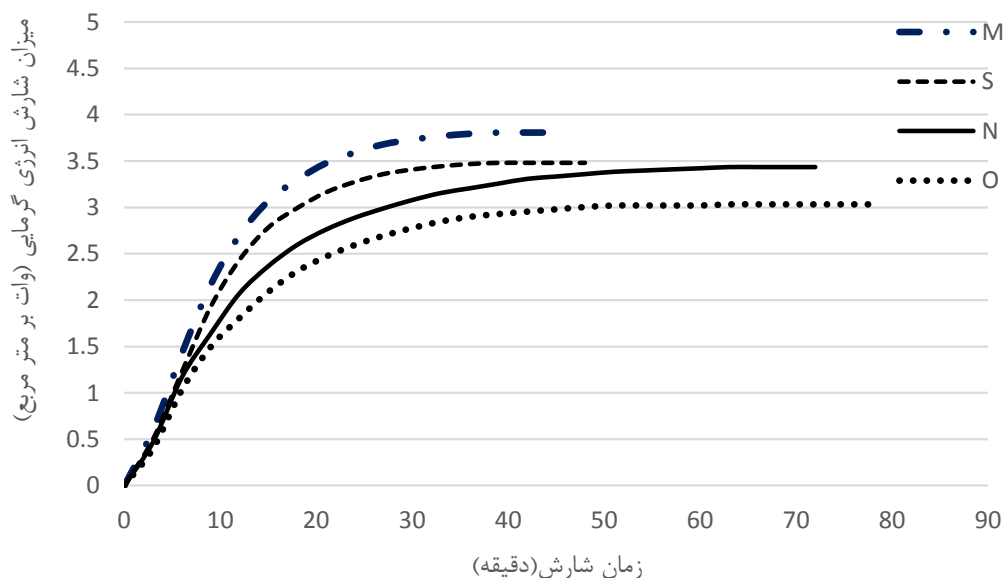


شکل ۷. نتایج کلی مدت زمان تاخیر ملات ها
 Fig. 7. Time-lag results

شود و آزمایش به پایان می رسد. این امر نشانگر این است که از این پس انتقال گرما شروع به کم شدن می کند و در نهایت متوقف می شود. با مقایسه نمودار $q-t$ در چهار نوع ملات ساخته شده مشاهده می شود که تغییرات شار گرمایی برای ملات نوع M بیشترین و برای ملات نوع O کمترین می باشد. در نتیجه، ملات نوع M به سادگی

دارد. در نتیجه، این پدیده به کاهش قابل ملاحظه‌ی هدررفت انرژی گرمایی کمک شایانی می کند.

شکل ۸ نمودار شار گرمایی (q) عبور کرده از نمونه نسبت به زمان را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، q نسبت به زمان افزایش می یابد و به مقدار ثابتی می رسد. سپس، مقدار q کم می



شکل ۸. نمودار شار گرمایی بر زمان

Fig. 8. Thermal flow per time duration diagram

تاخیر حرارتی متفاوتی دارند، ضریب کاهش آن‌ها یکسان است.

۴-۵- ضریب رسانش حرارتی

در این پژوهش، جهت اندازه‌گیری ضریب رسانش حرارتی از روش جعبه‌ای استفاده شده‌است. روش دیگری بنام روش عبور سیم گرم برای اندازه‌گیری ضریب رسانش حرارتی وجود دارد که معمولاً ۱۰-۳۰٪ مقادیر بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برای ضریب رسانش حرارتی بدست می‌دهد. علت این اتفاق منابع کنترل نشده تولید گرما در این روش است. در حالی که در روش جعبه‌ای از عایق XPS به منظور جدا کردن محیط داخلی اتاقک از محیط بیرونی آن استفاده شده است. لازم به ذکر است که به منظور ساده‌سازی حل انتگرال فوریه برای بدست آوردن ضریب رسانش حرارتی، در این پژوهش پروفیل دمایی در راستای ضخامت نمونه خطی در نظر گرفته شده است.

شکل ۹ نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب رسانش حرارتی می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت، ملات نوع O کمترین ضریب رسانش حرارتی و ملات نوع M بیشترین ضریب را دارد. چنین مسئله‌ای بیانگر این واقعیت است که ملات نوع O قدرت بالاتری در جذب انرژی گرمایی نسبت به سه نوع ملات دیگر دارد و این امر به دلیل بیشتر بودن نسبت آهک به سیمان در این ملات می‌باشد.

جدول ۲. نتایج ضریب کاهش حرارتی ملات‌ها

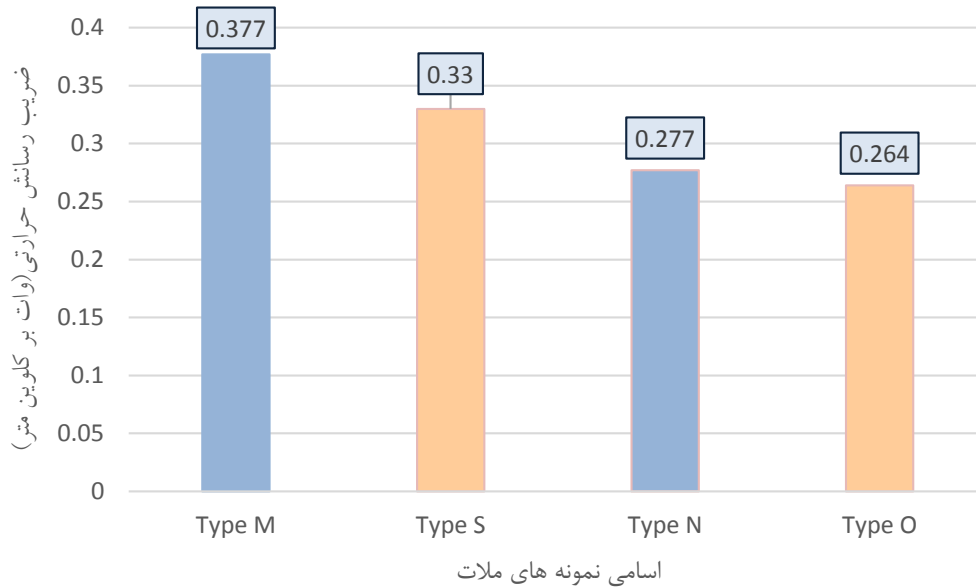
Table 2. Decrement factor results for mortars

ضریب کاهش حرارتی	$T_{max,in}$	$T_{min,in}$	نمونه‌ها
۰/۱۵۷	۲۹/۲	۲۷	M
۰/۱۳۳	۲۹	۲۷	S
۰/۱۳۳	۲۹	۲۷	N
۰/۱۳۳	۲۹	۲۷	O

می‌تواند گرما را از خود عبور دهد و دمای داخلی را سریع‌تر بالا می‌برد. این امر تصدیقی بر نتایج آزمایش مدت زمان تاخیر است.

۵-۳- ضریب کاهش حرارتی

جدول ۲ میزان ضریب کاهش حرارتی را نشان می‌دهد. این ضریب با مدت زمان تاخیر حرارتی رابطه‌ی معکوس دارد. هرچه این ضریب عدد کمتری را نشان دهد، بیانگر کاهش هدر رفت میزان انرژی و ظرفیت بالای نمونه در جذب انرژی گرمایی است. نتایج نشان می‌دهد که ملات نوع M بیشترین ضریب کاهش را داشته و سایر ملات‌ها ضریب کاهش کمتر و یکسانی دارند. دلیل یکسان بودن ضریب کاهش ملات‌های S، N و O این است که دمای کمینه و بیشینه درون ساختمان و بیرون ساختمان برای هر سه ملات یکسان است. با توجه به فرمول ۲، ضریب کاهش وابسته به زمان نیست، بنابراین، به دلیل فاکتورهای ذکر شده این سه نوع ملات علی‌رغم اینکه زمان



شکل ۹. نمودار مقایسه ای ضریب رسانش حرارتی برای ملات
 Fig. 9. Results for thermal conductivity measurement

۶- نتیجه گیری

به منظور ذخیره انرژی و تلاش برای کاهش میزان هدررفت آن توجه ویژه ای به نوع مصالح بکار رفته در طی ساخت و ساز می شود. این امر منجر به کاهش استفاده از سیستم های حرارتی یا خنک کننده و در نتیجه کاهش استفاده از سوخت های فسیلی می شود. با مقایسه ی نتایج حاصل از این پژوهش، ملات نوع O با ضریب رسانش حداقلی ۰/۲۶۴ وات بر کلورین-متر و حداکثر مدت زمان تاخیر ۶۶ دقیقه، بهترین عملکرد را در جلوگیری از عبور گرما از خود دارد که می تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش اتلاف انرژی پس از ساخت و ساز داشته باشد. نکته قابل توجه این است که این ملات به دلیل اینکه نسبت سیمان آن کمتر از سایر ملات ها است، از مقاومت فشاری کمتری (۵/۳ مگاپاسکال) برخوردار است. تلاش برای پیدا کردن ملات بهینه هم از نظر کاهش اتلاف انرژی و هم دارا بودن مقاومت فشاری کافی است. بنابراین ملات نوع N با داشتن مقاومت فشاری ۱۳/۱ مگاپاسکال، ضریب رسانش حرارتی ۰/۲۷۷ وات بر کلورین-متر و مدت زمان تاخیر نسبتا بالای ۶۰ دقیقه، در بین این چهار ملات شرایط میانه ای دارد. با این حال، بهبود عملکرد مقاومتی این نوع ملات می تواند زمینه ای برای انجام و توسعه ی مطالعات آتی پژوهشگران گردد.

مراجع

- Pisello, F. Antretter, T. Poli, F. Cotana, The hygrothermal performance of residential buildings at urban and rural sites: Sensible and latent energy loads and indoor environmental conditions, *Energy and Buildings*, 152 (2017) 792-803.
- [2] M. Pakand, V. Toufigh, A multi-criteria study on rammed earth for low carbon buildings using a novel ANP-GA approach, *Energy and Buildings*, 150 (2017) 466-476.
- [3] M. Saidi, A.S. Cherif, B. Zeghmami, E. Sediki, Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 566-577.
- [4] J. I. Knarud and S. Geving, Comparative study of hygrothermal simulations of a masonry wall FILLIN, *Energy Procedia*, 132 (2017) 771-776.
- [5] L.M. Al-Hadhrami, A. Ahmad, Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia, *Applied Thermal Engineering*, 29(5-6) (2009) 1123-1130.
- [6] N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti, The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings*, 41(11) (2009) 1181-1187.
- [7] U. Berardi, L. Tronchin, M. Manfren, B. Nastasi, On the

- [1] R. Paolini, A. Zani, M. MeshkinKiya, V.L. Castaldo, A.L.

- [13] A.W. Bruno, C. Perlot, J. Mendes, D. Gallipoli, A microstructural insight into the hygro-mechanical behaviour of a stabilised hypercompacted earth, *Materials and Structures*, 51(1) (2018).
- [14] S. Serrano, L. Rincón, B. González, A. Navarro, M. Bosch, L.F. Cabeza, Rammed earth walls in Mediterranean climate: material characterization and thermal behaviour, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, (2016).
- [15] C. Method, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using, 3 (2003) 1–10.
- [16] International Standard ISO13786, Thermal performance of building components- Dynamic thermal characteristics- Calculation methods, 2 (2017).
- [17] F. Kreith and W. Black, *Basic Heat Transfer*, Solar Energy Research Institute, (1980).
- [18] M. Cabinets, M. Rooms, B. Statements, and D. Mass, Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens) 1, (2008) 1–9.
- Effects of Variation of Thermal Conductivity in Buildings in the Italian Construction Sector, *Energies*, 11(4) (2018).
- [8] A. Abdou, I. Budaiwi, The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content, *Construction and Building materials*, 43 (2013) 533-544.
- [9] A. Kyriakidis, A. Michael, R. Illampas, D.C. Charmpis, I. Ioannou, Thermal performance and embodied energy of standard and retrofitted wall systems encountered in Southern Europe, *Energy*, 161 (2018) 1016-1027.
- [10] L. Soudani, M. Woloszyn, A. Fabbri, J.-C. Morel, A.-C. Grillet, Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements, *Solar Energy*, 141 (2017) 70-80.
- [11] A. Rabl, C.E. Nielsen, Solar ponds for space heating, *Solar Energy*, 17(1) (1975) 1-12.
- [12] Y. Liu, C. Ma, D. Wang, Y. Wang, J. Liu, Nonlinear Effect of Moisture Content on Effective Thermal Conductivity of Building Materials with Different Pore Size Distributions, *International Journal of Thermophysics*, 37(6) (2016).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

V. Toufigh, S. Samadianfard, M. Fani, *Experimental Investigation of Thermal Performance of Mortars*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(4) (2021): 1355-1366.

DOI: 10.22060/ceej.2020.16915.6390



