

ساخت یک اندود بر پایه ی گچ و بررسی خواص عایق بندی حرارتی آن

احسان مؤذن^۱، رسول شادنیا^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

^۲ استادیار مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

تحقیق حاضر تلاش کرده است ضمن معرفی یک اندود بر اساس تلفیقی از مصالح نوین و کهن، گامی هر چند کوچک در پیشرفت صنعت عایق های حرارتی چه از نظر کیفیت و چه از بابت هزینه بردارد. در تولید این اندود که بر پایه گچ میباشد در مرحله اول، بررسی ها و آزمایش هایی بر روی مصالح متفاوتی از جمله انواع مخلوط کاهگل سنتی صورت گرفت. سپس محصول نهایی با ترکیب مصالح در دسترس مانند گچ، خاک رس، پودر چوب، پشم شیشه و برخی مواد نانو با هدف تولید یک اندود با ضریب هدایت حرارتی کمتر از اندودهای موجود حاصل گردید. این اندود مانند اندود گچ برای اندودکاری داخل ساختمان استفاده می شود و دارای محاسنی از جمله عدم داشتن پل حرارتی در کل سطح، نداشتن درز و شکاف و همچنین نداشتن تخریب و ریزش به مرور زمان بدلیل چسبندگی بالا می باشد. قابل ذکر است نتایج بدست آمده نشان می دهد که ضریب هدایت حرارتی اندود ساخته شده با ضخامت ۵۰ میلی متر برابر با 0.21 W/m.k می باشد که در مقایسه با ملاتهای دیگر از جمله گچ، ماسه سیمان، کاهگل و ملات گچ و ماسه (در حالت نمونه با ابعاد برابر) دارای ضریب هدایتی پایین تر و همچنین قابلیت ماندگاری بیشتر انرژی در فضای اتاق می باشد. شایان ذکر است میزان کاهش ضریب هدایت حرارتی اندود معرفی شده در مقایسه با اندودهای گچ، ماسه سیمان، کاهگل و ملات گچ و ماسه به ترتیب برابر با ۵۳، ۸۷، ۳۸ و ۷۶ درصد می باشد.

کلیدواژه‌ها: تعداد اندود، کاهگل، گچ، عایق حرارتی، ضریب هدایت حرارتی

۱- مقدمه

نوین جهت کاهش مصرف انرژی توسط انسان از جمله اولویت‌های لازم جهت ادامه و بقا می باشد. در مهندسی عمران نیز محققین زیادی با انجام تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری بر روی مصالح ساختمانی (Ajouguim و همکاران، ۲۰۲۱؛ M'ghari و همکاران، ۲۰۲۱؛ Cardinale و همکاران، ۲۰۱۷؛ Fiore و همکاران، ۲۰۲۰؛ Valenza و همکاران، ۲۰۱۵؛ Shadnia و همکاران، ۲۰۱۵؛ Chen و Li، ۲۰۲۱؛ Singh و همکاران، ۲۰۲۲؛ Khabbazi و همکاران، ۲۰۱۷) و به صورت ویژه اندودها (Maaloufa و همکاران، ۲۰۱۷؛ Maaloufa و همکاران، ۲۰۱۷؛ Touil و همکاران، ۲۰۲۲) و به صورت ویژه تر اندودهای گچی (Iucolano و همکاران، ۲۰۱۸؛ Bicer و Kar، ۲۰۱۷؛ Fatma و همکاران، ۲۰۱۹؛ de Oliveira و همکاران، ۲۰۲۱) سعی در کاهش مصرف انرژی دارند. مهرآبادی و فاطمی (۱۳۹۸) با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی اثر عایق کاری حرارتی بر میزان اتلاف انرژی از یک ساختمان نمونه را بررسی کردند. آنها در تحقیق خود، به کمک ماکت یک ساختمان مسکونی با سقف شیب دار، دو نوع

ایرانیان از زمان های قدیم از کاه و خاک رس برای ساخت خانه های خود استفاده می کردند و دیوارها و سقف های با ضخامت بالا می ساختند تا خانه هایشان در تابستان خنک و در زمستان گرم باشد (Maheri و همکاران، ۲۰۱۱). ساکنان مناطق جنوبی آمریکا، کلبه هایشان را بوسیله جلبک های دریایی خشک شده می ساختند؛ فیبرهای توخالی این جلبک ها به عنوان عایق حرارتی عمل می کردند (Dillehay و همکاران، ۲۰۰۸). بومیان ساکن جزایر هاوایی برای اولین بار از فیبرهای معدنی برای عایق کاری کلبه هایشان استفاده کردند. این فیبرها از پسماندهای آتشفشانی به وجود می آمدند. گازهای فرار موجود در گدازه های آتش فشانی باعث به وجود آمدن این فیبرها می شد (Smith، ۲۰۰۷). عایق های حرارتی در ابتدای انقلاب صنعتی و در اواخر قرن نوزدهم با اهداف تجاری شکل گرفتند و تولید شدند (Bozsaky، ۲۰۱۰). امروزه با توجه به افزایش مصرف و نیز کاهش هرچه بیشتر منابع انرژی بر روی کره زمین، خلق روشهایی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۵۱-۴۴۰۱۲۵۸۲

۲- روش ها

اندود معرفی شده در این تحقیق با ترکیب مصالح در دسترس مانند گچ، خاک رس، پودر چوب، پشم شیشه و برخی مواد نانو با هدف تولید یک اندود با ضریب هدایت حرارتی کمتر از اندودهای موجود حاصل گردید. ابتدا هر یک از مواد تشکیل دهنده اندود به دفعات، کم یا زیاد شده و اندود حاصل بر روی یک بلوک استاندارد (هبلکس رضوی) اجرا و پس از گذشت ۲۴ ساعت (خشک شدن سطح)، اثرات ایجاد شده از جمله چسبندگی، ترک، ماندگاری روی سطح دیوار و رنگ نهایی پس از خشک شدن بررسی شدند. سپس برای اطمینان از برتری حرارتی اندود ارائه شده در این تحقیق، دو دسته آزمایش بر روی نمونه ها انجام پذیرفت: آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی و آزمایش تعیین ماندگاری حرارتی.

۲-۱- آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی عبارت است از مقدار انرژی که از ماده در واحد ضخامت و در واحد زمان، در دمای مشخص عبور می کند. این آزمایش با استفاده از دستگاه KD2 Probe (شکل ۱) و بر اساس آیین نامه ASTM D5334 انجام گردید. این دستگاه شامل چهار سوزن یا سنسور جهت انجام آزمایش می باشد. روش کار بسیار ساده است. ابتدا سوراخی با عمق و قطر حدود ۴ میلی متر با مته ای که در دستگاه موجود میباشد ایجاد می شود و داخل این سوراخ را با گریس حرارتی مخصوص جهت ایجاد تماس بهینه بین سنسور و نمونه پر می گردد. سپس سنسورها در طرفین نمونه و در شکاف های ایجاد شده نصب می شوند. پس از استارت دستگاه، سنسورها از خود پالس گرمایی ساطع کرده و مقدار ضریب هدایت حرارتی به صورت اتومات بر روی مانیتور دستگاه نمایش داده می شود. شایان ذکر است برای هر مقدار ضریب هدایت حرارتی، دستگاه باید ۵ مرتبه استارت شود تا نتیجه نهایی به صورت میانگین یا بهترین نتیجه در صفحه نمایش اعلام گردد. باید به این نکته توجه نمود که برای دستیابی به نتایج دقیق تر، باید سنسورها در دو طرف نمونه به صورت کاملاً موازی نصب شوند. نکته مهم دیگر این است که در صورتیکه فاصله سنسورها از هم از ۵ سانتیمتر کمتر شود امکان بروز خطا افزایش می یابد که خوشبختانه با توجه به ابعاد نمونه های مکعبی استفاده شده در این تحقیق (۵ سانتیمتر)، از بروز این خطا جلوگیری شد. یادآوری می شود دستگاه KD2 Probe قابلیت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی مایعات را نیز دارد که در صورت انجام این آزمایش میبایست تجهیزات مکمل آن مانند مایع مخصوص جهت انجام کاتالیز استفاده شود که به دلیل خشک بودن نمونه ها در تحقیق حاضر، نیازی به استفاده از این مواد مکمل نبود. پس از ساخت نمونه و خشک شدن آن ابتدا ضریب هدایت حرارتی، با هدف

عیق (پشم سنگ و پشم شیشه) با ضخامت های مختلف و در شرایط محیطی متفاوت را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ضخامت عایق (در دامنه آزمایش)، اتلاف حرارت کاهش می یابد. آنها همچنین بر اهمیت اجرای صحیح عایقکاری بر پوسته ساختمان تاکید و اظهار داشتند که در صورت عدم رعایت، ممکن است تأثیر مثبت عایقکاری تا حد زیادی کاهش یابد.

کاکایی و همکاران (۱۳۹۶) با هدف بررسی عایق بندی حرارتی در ساختمان ها، راهکاری در صرفه جویی در مصرف انرژی ارائه نمودند. کاظمی پوران بدر و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تأثیر سیستم مدیریت ساختمان و عایق سازی در کاهش مصرف انرژی با استفاده از تحلیل انرژی ساختمان های مسکونی پرداخته اند.

Durgun (۲۰۲۱) به بررسی مشخصات اندودهای پایه گچ شامل پودر کاشی بازایافتی در دمای اتاق و در دماهای بالاتر تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد پرداخت. وی بر روی نمونه های خود قبل و بعد از قرارگیری در دمای بالا، کاهش وزن مخصوص، سرعت های پالس آلتراسونیک، مقاومت های خمشی و فشاری، تغییرات حجم، تخلخل ظاهری، جذب آب و نیز هدایت گرمایی را بررسی کرد. نتایج وی نشان داد اضافه کردن پودر کاشی بازایافتی باعث کاهش مقاومت اندود و افزایش تخلخل ظاهری و جذب آب می گردد. از طرف دیگر حضور پودر کاشی بازایافتی باعث بهبود هدایت گرمایی و مقاومت در دمای بالا گردید.

Cherki و همکاران (۲۰۱۴) با هدف بهبود مشخصات گرمایی و برای سبک تر کردن اندود گچ، به آن چوب پنبه دانه ای جمع آوری شده از جنگل مامورا در مراکش اضافه کردند. ایشان در تحقیق خود تأثیر اندازه چوب پنبه دانه ای بر روی مشخصات گرمایی اندود گچ را نیز به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند.

تحقیق حاضر سعی در تلفیق روشهای کهن و امروزی با هدف ساخت یک اندود نو به امید برداشتن گامی نو در جهت ذخیره و استفاده بهینه از منابع باارزش انرژی دارد. این تحقیق تلاش کرده است در راستای افزایش کیفیت عایقهای حرارتی در صنعت ساختمان و با ایده گرفتن از رفتار کاهگل، اندودی به مراتب بهینه تر چه از بابت کارایی و در دسترس بودن و صرفه جویی در مصرف انرژی و چه از بابت هزینه های تمام شده تولید کند. لذا این تحقیق با ترکیب مصالح در دسترس مانند گچ، خاک رس، پودر چوب، پشم شیشه و برخی مواد نانو و انجام آزمایش های تعیین ضریب هدایت حرارتی و نیز آزمایش ماندگاری حرارتی بر روی اندود حاصل، به دنبال تولید یک اندود با عملکرد حرارتی بهتر از اندودهای موجود می باشد.



شکل ۲- نمونه های ۵ سانتی متری اندود برای انجام آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی

۲-۲- آزمایش تعیین ماندگاری حرارتی

در این تحقیق برای تعیین ماندگاری حرارتی از آزمایش مکعب شیشه‌ای استفاده شده است که روشی ساده برای تعیین عملکرد حرارتی انواع مصالح می‌باشد. این آزمایش از پروژه شبیه‌سازی انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تابش در محفظه بسته مربعی در نرم افزار انسیس-فلوئنت ایده برداری شده است. در این نرم افزار دمای داخل محفظه مربعی با توجه به مقدار گرمایش ورودی در نرم افزار ثبت می‌شود، اما در آزمایش تعیین ماندگاری حرارتی در این تحقیق، با توجه به متغیر بودن دما در طول روز از دستگاه‌های رطوبت سنج و دماسنج در داخل دستگاه استفاده شده است. برای انجام این آزمایش از یک مکعب شیشه‌ای به ابعاد یک متر استفاده شده است که تنها در قسمت بالایی آن حفره ای به ابعاد 4×10 سانتی‌متر طبق شکل ۳ جهت عبور دماسنج و رطوبت‌سنج دیجیتال ایجاد شده است. شایان ذکر است دماسنج و رطوبت سنج توسط سیم حدود ۲۵ سانتی متری به صورت معلق در مرکز مکعب شیشه‌ای آویزان شده تا نزدیک دیواره‌های مکعب قرار نگیرد. نحوه انجام آزمایش به این صورت می‌باشد که ابتدا مکعب را در دمای معمولی محیط و زیر سایه گذاشته و تمام سطوح مکعب پس از پوشیده شدن از توری پلاستیکی جهت ایستادگی اندود، از اندودهای مورد نظر با ضخامت یک سانتی متر پوشیده می‌شود. بعد از آن دماسنج و رطوبت سنج دیجیتال در داخل مکعب قرار داده شده و فضای باقیمانده در سوراخ نیز با اندود پر می‌شود. پس از خشک شدن سطح اندود و ثابت شدن دما و رطوبت در دماسنج و رطوبت سنج در داخل مکعب پوشیده شده از اندود و شنیده شدن آلامر ثابت شدن آنها، مکعب به یک محل آفتابگیر منتقل شده بطوری که ۱۲ ساعت تمام مکعب زیر آفتاب بماند. بعد از آن دمای دماسنج مجدد ثبت شده تا اختلاف دمای ایجاد شده بر اثر عبور گرمای خورشید به داخل مکعب و گرمای حاصل شده در مدت ۱۲ ساعت سنجیده شود. شایان ذکر است ماندگاری حرارتی در واقع همان مدت زمانی است که دمای اتاق شیشه‌ای با قطع شدن منبع گرما دچار تغییر دما و سرد شدن شود. این آزمایش برای تمام اندودهای مورد آزمایش انجام می‌گیرد شایان ذکر است دمای روزهای مختلف انجام آزمایش بسیار نزدیک به هم بود به طوری که از اختلاف ناچیز دمای محیط صرف نظر گردید.

دستیابی به مصالحی با ضریب هدایت حرارتی کمتر از اندود کاهگل (با ملاک قراردادن ضریب هدایت حرارتی اندود کاهگل 0.34 w/m.k) مورد آزمایش قرار گرفت.

واضح است آن دسته از نمونه‌هایی که نتوانستند حداقل ضریب هدایت حرارتی اندود کاهگل را کسب نمایند، نتوانستند به عنوان نمونه ثبت شوند. شایان ذکر است در روند انجام آزمایش‌ها، تنها پایین‌ترین مقدار بدست آمده با در نظر گرفتن بهترین حالت اندود پس از اجرا ثبت گردید. همچنین برای انجام آزمایش‌های تعیین ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های مکعبی (به ابعاد ۵ سانتی متر) از انواع ملاتهای متداول شامل ملات گچ، ملات ماسه سیمان، ملات کاهگل، ملات گچ و ماسه ساخته شد و آزمایش ضریب هدایت حرارتی بر روی آنها انجام و نتایج ثبت گردید. سپس برای پیدا کردن اندودی با بهترین ضریب هدایت حرارتی، با تغییر درصد هر یک از مواد تشکیل دهنده اندود (شامل آب، گچ، کاه، خاک رس، سیمان، مواد نانو، پشم سنگ و عایق رنگ نانو پلیمر)، نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی متری دیگری تهیه گردید. در این مرحله ۳۲ نمونه مکعبی ۵ سانتی متری از اندود مورد نظر (شکل ۲) ساخته شد. لازم به ذکر است پس از تهیه هر نمونه مکعبی و انجام آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی، این نمونه‌ها به جهت اجرایی نیز مورد آزمایش قرار گرفتند تا به لحاظ چسبندگی، ترک، ماندگاری روی سطح دیوار و رنگ‌نهایی پس از خشک شدن مورد بررسی قرار گیرند. بدین صورت که هر بار اندود ساخته شده روی یک بلوک استاندارد (هیلکس رضوی) اجرا و پس از ۲۴ ساعت نتیجه مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است هر یک از ترکیبات به دفعات کاهش یا افزایش داده شده و مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱- دستگاه تعیین ضریب هدایت حرارتی



شکل ۳- جزئیات مربوط به آزمایش های تعیین ماندگاری حرارتی

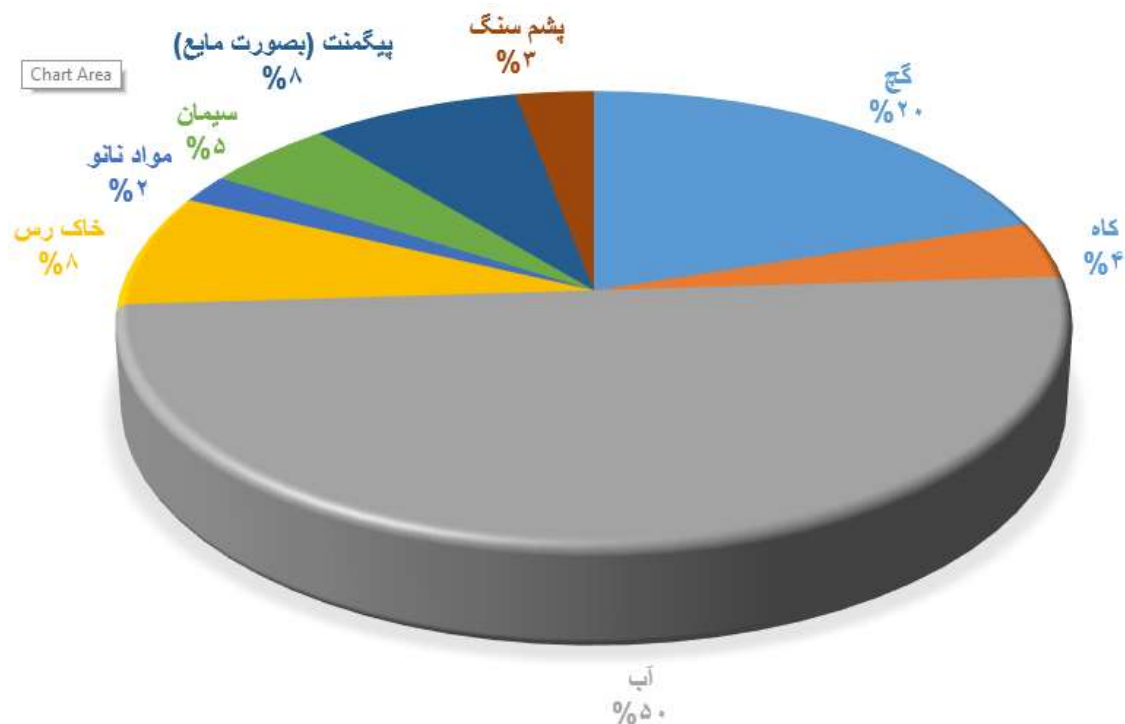
۳- مصالح تشکیل دهنده اندود

جدول ۱ مصالح تشکیل دهنده اندود (برای یک کیلوگرم اندود) را نشان می دهد. برای تهیه نمونه های آزمایشگاهی، استفاده از مصالح در دسترس اولویت اول را دارا می باشد. شایان ذکر است که هریک از مواد تشکیل دهنده، بر مبنای ویژگی خاصی که در جدول ۱ ذیل ستون "علت استفاده در ترکیب اندود" به آن اشاره شده، در ترکیب اندود قرار گرفته است. در خصوص "اثرات کاهش و افزایش مصرف بیش از حد" مندرج در جدول، توضیح این مطلب ضروری به نظر می رسد که هر یک از مواد تشکیل

دهنده اندود به دفعات، کم یا زیاد شده و اندود حاصل بر روی یک بلوک استاندارد (هبلکس رضوی) اجرا و پس از گذشت ۲۴ ساعت (خشک شدن سطح)، اثرات ایجاد شده مورد بررسی و در جدول قرار گرفتند. همچنین بر مبنای کاهش و افزایش میزان مصرف هریک از مواد تشکیل دهنده اندود، تعداد آزمایش های انجام شده جهت رسیدن به بهترین مقدار مصرف در داخل جدول ثبت گردیده است. شکل ۴ نیز اجزای تشکیل دهنده اندود به صورت درصد را نشان می دهد.

جدول ۱- اجزای تشکیل دهنده اندود

نام ماده	وزن (kg)	علت استفاده در ترکیب اندود	اثرات کاهش مصرف بیش از حد	اثرات افزایش مصرف بیش از حد	تعداد آزمایشهای انجام شده
گچ	۰/۲۰	جهت افزایش گیرش اندود و ایجاد ملاتی نرم تر و صاف پس از اجرا	کاهش گیرایی اندود - تغییر رنگ اندود - ایجاد ترک در سطح پس از اجرا	زودگیر شدن و کاهش خواص باقی مصالح	۶
کاه	۰/۰۴	جهت ذخیره رطوبت و دما در داخل اندود برای رسیدن به خاصیت ماندگاری حرارتی (جذب سریع سرما و گرما و نیز خارج شدن آن به کندی از کاه) - افزایش مقاومت در برابر ترک	کاهش خواص ماندگاری سرما و گرما در اندود - خوردن رنگ های صورت گرفته بر روی اندود دیوار و نیاز به رنگ شدن مجدد دیوار	اشتعال پذیری بیشتر اندود - کاهش چسبندگی اندود بر روی سطوح - تغییر رنگ و بافت اندود	۶
آب	۰/۵۰	جهت ترکیب شدن مصالح و آزاد شدن خواص هر یک از مواد موجود در اندود	عدم ترکیب اجزای تشکیل دهنده اندود	ناکارآمدی اندود و عدم ایستادگی بر روی سطح	۲
خاک رس	۰/۰۸	کمک به ترکیب پذیری بهتر مصالح و تنظیم دما و گیرش بهتر اندود	زودگیر شدن به علت قالب شدن گچ در اندود و نیز کاهش خاصیت مخلوط پذیری	تغییر رنگ اندود و نیز ترک خوردن اندود پس از استفاده بر روی دیوار - فرسایش سریعتر سطح اندود بر اثر اصطکاک	۳
مواد نانو (نانو سلولز - نانوفیبر)	۰/۰۲	افزایش تجزیه پذیری اندود در محیط زیست پس از تخریب، افزایش مقاومت اصطکاک و میکرو ترکها و نیز افزایش استحکام اندود - کمک بسیار زیاد به خواص کاه جهت ذخیره گرما و سرما	کاهش دوام و کارایی	سرعت در زمان گیرش - تغییر رنگ پس از خشک شدن - دانه ای شدن سطح اندود پس از استفاده و خشک شدن روی سطح دیوار	۴
سیمان	۰/۰۵	جهت افزایش مقاومت در برابر ترک، کاهش انتقال حرارت و نیز رنگ پذیرتر شدن اندود به علت ترکیب پذیری بهتر با پیگمنت	کاهش رنگ پذیری اندود با پیگمنت - کاهش مقاومت حرارتی - خشن تر شدن اندود	حرارت بیشتر ملات - رنگ پذیری کمتر در صورت انجام رنگ پس از خشک شدن سطوح - ایجاد برخی ترکهای عمقی - پوسته شدن برخی از سطوح نود پس از اجرا و خشک شدن	۵
پیگمنت (رنگ بتن) حتما جداگانه با آب مخلوط شود	۰/۰۸	با قطری حدود یک دهم قطر سیمان جهت چسبندگی بهتر با ملات و نیز استحکام بیشتر - کاهش هزینه های مربوط به رنگ و رنگ کاری (نتیجه: زیبایی و جلوه این رنگ بسیار بالاتر از گرانترین رنگها حتی رنگ اکرولیک با دوام بیشتر)، قابل شستشو با دستمال مرطوب و نیز صافتر شدن سطح پس از رنگ کاری	میزان مصرف ۰/۰۲ کیلوگرم باعث کاهش جزئی استحکام ملات - مرده شدن رنگ ملات	میزان مصرف ۰/۱۵ کیلوگرم باعث کاهش مقاومت چسبندگی اندود و در نتیجه ایجاد ترک و ریختن اندود از سطح پس از خشک شدن	۲
پشم سنگ (ماده اولیه ی بازالت از گروه سنگ های آذرین)	۰/۰۳	جهت همبستگی بیشتر اندود و نیز فیلتر شدن اندود جهت تبدیل بهتر و سریع تر سرمای شدید به گرما	تغییر در ضریب حرارتی و نیز کاهش خواص گرم تر نمودن محیط	ایجاد سطوحی ناصاف و پرزه های بیرون زده در سطح اندود - کاهش خواص کاه و گچ جهت ذخیره حرارت و گیرش	۴
جمع کل	۱				۳۲



شکل ۴- درصد اجزای تشکیل دهنده اندود

از ملات های مورد آزمایش را نشان می دهد. مطالب مندرج در این بخش از جدول گویای این است که چگونه اندود معرفی شده در این تحقیق می تواند جایگزینی مناسب برای تمام موارد این جدول باشد.

همانطور که در جدول ۲ مشخص است اندود ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با ملاتهای دیگر (در حالت نمونه با ابعاد برابر) دارای ضریب هدایتی پایین تر و همچنین قابلیت ماندگاری بیشتر انرژی در فضای اتاق می باشد که این مورد بر روی شکل ۵ نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است در ضریب انتقال هدایتی کم بودن عدد و در ماندگاری حرارتی بیشتر بودن عدد مزیت محسوب میشود. علت کمتر بودن ضریب انتقال حرارتی و بیشتر بودن ماندگاری حرارتی اندود معرفی شده در این تحقیق را می توان به حضور مصالح عایق حرارتی در ساخت این اندود مرتبط کرد. بطور مثال کاه موجود در کاهگل که در روستاها جهت خنک شدن اتاق در تابستان و گرم ماندن در زمستان استفاده میشود جزو مصالحی است که به تنهایی تا حد زیادی ضریب انتقال حرارتی را کاهش و ماندگاری حرارتی را افزایش میدهد و باعث عایق شدن اندود می گردد؛ از طرف دیگر وجود مواد نانو و پشم سنگ که خود به تنهایی باعث کاهش انتقال حرارتی میشوند، در ترکیب اندود معرفی شده در این تحقیق به همراه کاه و مصالح دیگر با ایجاد همبستگی مناسب باعث تولید اندودی با ضریب هدایت حرارت کمتر و ماندگاری حرارتی بیشتر می شوند.

۴- نتایج و بحث

نتایج آزمایش های انجام شده بر روی اندود از دو منظر میبایست مورد توجه قرار گیرد. اول بررسی نتایج آزمایشگاهی با هدف ارزیابی کارآمدی و رسیدن به هدف تحقیق و دوم برآورد و مقایسه قیمت با هدف اطمینان از صرفه اقتصادی آن که در کنار کارآمدی بسیار مهم و ضروری می باشد. پس از انجام آزمایش های لازم با هدف ارزیابی کارآمدی و برآوردهای مالی، نتایجی حاصل گردید که منجر به تعیین مقدار مناسب هریک از مواد موجود در اندود و نیز خواص اندود گردید.

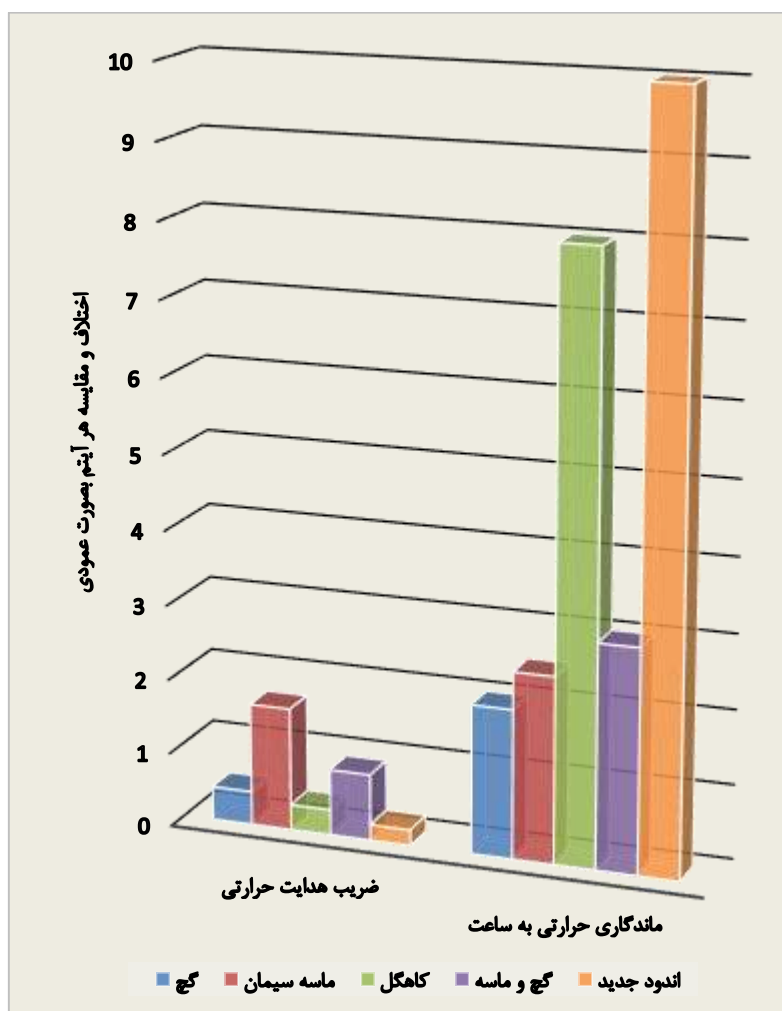
در نتیجه اندود نهایی هم از بابت آزمایشگاهی به لحاظ خاصیت عایق هدایت حرارتی و هم از بابت اجرایی دارای بهترین نتیجه می باشد. پس از انجام آزمایش های آزمایشگاهی، نتایج بدست آمده از اندودها و ملات های مختلف با هم مقایسه گردیدند. لازم به ذکر است شاخص ترین خواص اندود ساخته شده در این تحقیق شامل رنگ پذیری، عملکرد بهتر از نظر عایق حرارتی و به صرفه بودن از جهت اقتصادی می باشد.

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

جدول ۲ مقادیر اندازه گیری شده ضریب هدایت حرارتی اندود ساخته شده در این تحقیق را با اندود های دیگر شامل گچ، ملات ماسه سیمان، کاهگل و ملات گچ و ماسه مقایسه می کند. ستون موسوم به "کاربرد" در جدول، نوع و محل استفاده اجرایی هر یک

جدول ۲- مقایسه ضریب هدایت حرارتی اندودهای مختلف با اندود

ماندگاری حرارتی جهت انتقال هوای داخل و بیرون (ساعت)	کاربرد	ضریب هدایت حرارتی (w/m ² k)	نوع اندود
۲	به عنوان اندود و سطح نهایی، بدون نیاز به رنگ، با خاصیت عایق حرارتی	۰/۴۵	گچ
۲,۵	به عنوان لایه آستر جهت استحکام دیوار، نیاز به سطح نهایی و رنگ، بدون خاصیت عایق حرارتی	۱/۶۵	ماسه سیمان
۸	به عنوان لایه آستر جهت پر کردن سوراخهای دیوار نیاز به سطح نهایی و رنگ، با خاصیت عایق حرارتی	۰/۳۴	کاهگل
۳	به عنوان لایه آستر جهت استحکام دیوار، نیاز به سطح نهایی و رنگ، بدون خاصیت عایق حرارتی	۰/۸۹	گچ و ماسه
۱۰	به عنوان اندود و سطح نهایی، بدون نیاز به رنگ و سطح نهایی، با خاصیت عایق حرارتی	۰/۲۱	اندود معرفی شده در این تحقیق



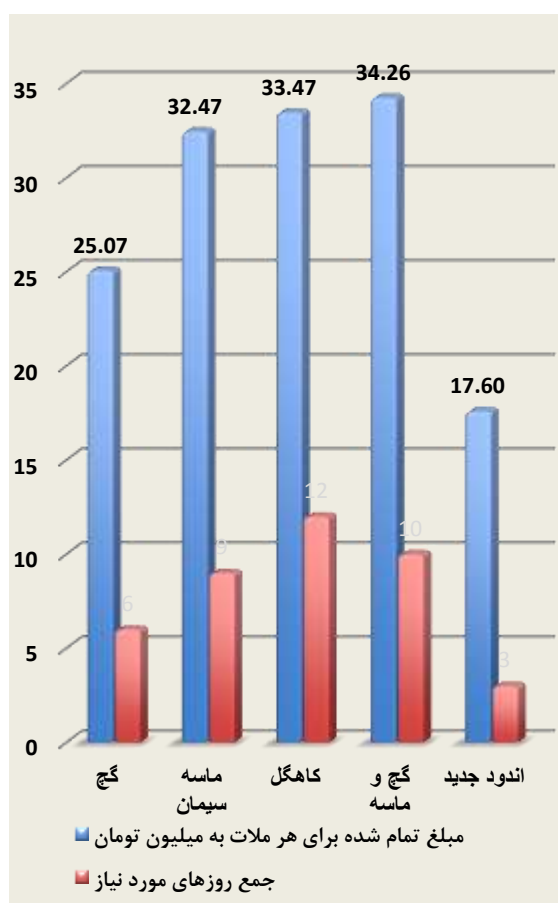
شکل ۵- مقایسه ضریب هدایت حرارتی و ماندگاری حرارتی کل نمونه ها با اندود معرفی شده در این تحقیق

۴-۲- برآورد و مقایسه قیمت

یکی دیگر از اهداف مهم ساخت این اندود، صرفه اقتصادی آن می باشد. شایان ذکر است که در اینجا، صرفه اقتصادی در پایان کار مد نظر می باشد. همانطور که در سالهای گذشته، در زمان تولید هبلکس های ساختمانی برآورد قیمت آن به نسبت مترآژ مورد نظر در مقایسه با آجر و بلوک سفالی بیشتر بنظر می رسید، اما بعد از محاسبه هزینه های مربوط به عدم نیاز به لایه گچ و خاک و نیز افزایش سرعت کار، توجیهی مناسب جهت جایگزینی آن حاصل شد، این اندود نیز راهی مشابه با هبلکس را در پیش خواهد داشت. به بیان دیگر هر چند ممکن است در ابتدا بنظر قیمتی بالا را نشان دهد، اما در انتها شاهد حذف مواردی چون هزینه های رنگ، آستر گچ و انجام عایق کاری خواهیم بود. از طرف دیگر افزایش چشمگیر سرعت اجرا و ماندگاری بیشتر نیز در راستای کاهش هزینه ها باید مد نظر قرار گیرد. نکته قابل توجه در کنار اولویت های مذکور، تلاش برای ساختن اندودی پرکاربرد نسبت به اندودهای مشابه می باشد. این اندود میتواند در بسیاری از موارد حسن عملکرد خود را نمایان سازد. از جمله این موارد کمک بسیار زیاد در زمان اجرا میباشد که چندین مرحله در یک مرحله خلاصه می شود و چند محصول در یک محصول جای داده شده است. بطور مثال در اندودکاری متداول، بعد از اتمام مرحله سفت کاری ساختمان مرحله اجرای اندودها شروع خواهد شد که اول شامل انجام گچ و خاک و بعد اجرای گچ و نیز اجرای رنگ کاری می باشد. البته هریک از این مراحل شامل زمان تهیه، جابجایی، ساخت، اجرا و مهم تر زمان لازم جهت اتمام و خشک شدن هر مرحله و شروع مرحله بعد می باشد که در انتها و در اکثر مواقع تنها سطحی صاف و تمیز اما بدون عایق مناسب حاصل خواهد شد. شایان ذکر است که خود عمل عایق کاری شامل زمان و هزینه های اضافی میباشد. اما اندود معرفی شده در این تحقیق، میتواند بجای انجام تمام موارد گفته شده بصورت یکباره انجام و تمام خواص خواسته شده را برآورده نماید. شایان ذکر است که این اندود با بهره بردن از مصالح جدید و قدیمی توانسته است از جهات مختلف از جمله در دسترس بودن، ارزانتر بودن و سرعت اجرای بیشتر ارزش خود را نمایان سازد. برآوردهای صورت گرفته طبق نرخ نامه های موجود در ۲۵ مرداد ماه ۱۴۰۰ در جدول ۳ صورت گرفته است. شایان ذکر است قیمت های نهایی مندرج در جدول، برای ۲۰ متر مربع اندود و با توجه به انجام ۸ ساعت کار در یک روز کاری محاسبه شده اند. تعداد روزها بر اساس اتمام یک

مرحله بطور کامل و خشک شدن آن به جهت اجرای لایه بعدی می باشد.

شکل ۶ قیمت تمام شده اندودهای مختلف شامل اندود معرفی شده در این تحقیق را به همراه تعداد روز مورد نیاز برای اجرای آن اندودها را مقایسه می کند. همانطور که در نمودار به راحتی مشاهده می شود قیمت تمام شده و نیز تعداد روزهای مورد نیاز برای اجرای اندود معرفی شده در این تحقیق از همه اندودهای متداول دیگر کمتر می باشد.



شکل ۶- مقایسه قیمت تمام شده (میلیون ریال) و تعداد روزهای مورد نیاز اندودهای مختلف با اندود معرفی شده در این تحقیق

جدول ۳: مقایسه قیمت (به تومان) تمام شده اندودهای مختلف با اندود معرفی شده در این تحقیق تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

ردیف	نوع اندود	قیمت برای ۲۰ متر مربع سطح به تومان (ساخت و اجرای یک نفره) (صرف نظر از قیمت آب)	مصالح مکمل جهت رسیدن به سطح بهره برداری	اجرای رنگ جهت رسیدن به سطح بهره برداری به ازای هر متر ۲۰ متر مربع	اجرای عایق جهت رسیدن به سطح بهره برداری به ازای هر متر ۵۳۰۰۰ تومان و برای ۲۰ متر مربع	اجرت بر اساس تعداد دفعات اجرا جهت رسیدن به سطح بهره برداری با ورودی ۱۵۰۰۰۰ تومان و برای ۲۰ متر مربع	تعداد روزهای مورد نیاز جهت اتمام و رسیدن به سطح بهره برداری	قیمت نهایی تمام شده یا مصالح و اجرت به تومان
۱	گچ	(۴ روز) $۳۷۰۰۰ = ۲۰ \times ۱۸۵۰$	ندارد	دارد - (۱ روز)	دارد - (۱ روز)	تعداد ۳ مرحله	۶ روز	۲۵۰۷۰۰۰
۲	ماسه سیمان	(۳ روز) $۵۹۰۰۰۰ = ۲۰ \times ۲۹۵۰۰$	(۴ روز) ۳۷۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۹۶۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۱۰۶۰۰۰	تعداد ۴ مرحله	۹ روز	۳۲۴۷۰۰۰
۳	کاهگل	(۶ روز) $۶۹۰۰۰۰ = ۲۰ \times ۳۴۵۰۰$	(۴ روز) ۳۷۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۹۶۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۱۰۶۰۰۰	تعداد ۴ مرحله	۱۲ روز	۳۳۴۷۰۰۰
۴	گچ ماسه	(۴ روز) $۷۶۹۰۰۰ = ۲۰ \times ۳۸۴۵۰$	(۴ روز) ۳۷۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۹۶۰۰۰	دارد - (۱ روز) ۱۰۶۰۰۰	تعداد ۴ مرحله	۱۰ روز	۳۴۲۶۰۰۰
۵	اندود معرفی شده در این تحقیق	(۳ روز) $۱۶۱۰۴۰۰ = ۲۰ \times ۸۰۵۲۰$	ندارد	ندارد	ندارد	تعداد ۱ مرحله	۳ روز	۱۷۶۰۴۰۰

۵- نتیجه گیری

اندود معرفی شده در این تحقیق برگرفته از بناهای کاهگلی ساخته شده در زمان های قدیم، اما با ترکیب و شکلی نوین و متناسب با شرایط فعلی می باشد. برای تهیه این اندود ابتدا اطلاعاتی از بناهای کاهگلی شامل روش ساخت اینگونه بناها با کاربری های مختلف از جمله مسکونی، سردخانه و اتاق نگهداری حیوانات جمع آوری شد. اما به علت عدم امکان استفاده از ترکیب کاهگل در بناهای جدید مباحث تغییراتی در آن ایجاد میشد؛ پس اطلاعاتی نیز در مورد انواع مصالح و ترکیبات نوین که میتوانستند تعادل حرارتی کاهگل را ایجاد نمایند بدست آمد. در ادامه این ترکیبات از جهات مختلف از جمله داشتن ضریب هدایت حرارتی مناسب، حفظ ماندگاری در سطح دیوار و صرفه اقتصادی مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه نتایج آزمایش ها و بررسی های انجام شده بر روی اندود معرفی شده در این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

۱. اندود ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با ملاتهای دیگر (در حالت نمونه با ابعاد برابر) دارای ضریب هدایت حرارتی پایین تر (0.21 w/m.k) می باشد.
۲. قابلیت ماندگاری حرارتی این اندود در مقایسه با ملات های دیگر بررسی شده در این تحقیق بیشتر (۱۰ ساعت) می باشد.
۳. مقایسه قیمت تمام شده این اندود با اندودهای های مختلف بررسی شده در این تحقیق نشان می دهد که قیمت تمام شده و نیز تعداد روزهای مورد نیاز برای اجرای اندود مذکور از همه اندودهای متداول دیگر کمتر می باشد.
۴. اندود معرفی شده در این تحقیق علاوه بر داشتن ویژگیهای فوق، می تواند پیشنهادی مناسب جهت افزایش سرعت در اجرا، قیمت مناسب و کارآمدی بهتر نسبت به اندودهای متداول در صنعت ساختمان و قدمی نو برای کاهش مصرف انرژی باشد. شایان ذکر است که تولید این اندود بصورت انبوه، می تواند در کنار ارائه تمام مزایای مذکور، به لحاظ اقتصادی نیز توجیه پذیرتر باشد.

۶- تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه مرکز تحقیقات بتن گروه مهندسی عمران دانشگاه حکیم سبزواری و نیز آزمایشگاه ترمودینامیک و انتقال حرارت گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و همچنین مسئولین محترم هر دو دانشگاه بابت فراهم نمودن تجهیزات و امکان استفاده از آن کمال تشکر و قدردانی میگردد.

۷- مراجع

کاطمی پوران بدر س، دانشجو ف، معصومی حقیقی ع، شایانفر م ع، "بررسی تاثیر سیستم مدیریت ساختمان و عایق سازی در کاهش مصرف انرژی با استفاده از تحلیل انرژی ساختمان های مسکونی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و ساخت، ۱۳۹۹، ۷، (۲)، ۵-۲۳.

کاکایی و، اقتداری ع، اسدی نیک م، "بررسی عایق بندی حرارتی در ساختمان ها راهکاری در صرفه جویی در مصرف انرژی"، دومین همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، استهبان؛ ۱۳۹۶.

مهرآبادی ع، فاطمی م، "مطالعه آزمایشگاهی عایق های مرسوم در صنعت ساختمان جهت به حداقل رساندن اتلاف انرژی"، دومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، مواد و متالوژی، تفلیس-گرجستان - سازمان بین المللی مطالعات دانشگاهی، با همکاری دانشگاه جورجیا در شهر تفلیس، ۱۳۹۸.

Ajouguim S, Talibi S, Djelal-Dantec C, Hajjou H, Waqif M, Stefanidou M, Saadi L, "Effect of Alfa fibers on the mechanical and thermal properties of compacted earth bricks", *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37, 4049-4057.

Bicer A, Kar F, "Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth", *Thermal Science and Engineering Progress*, 2017, 1, 59-65.

Bozsaky D, "The historical development of thermal insulation materials", *Periodica Polytechnica Architecture*, 2010, 41(2), 49-56.

Cardinale T, Arleo G, Bernardo F, Feo A, De Fazio P, "Investigations on thermal and mechanical properties of cement mortar with reed and straw fibers", *International Journal of Heat and Technology*, 2017, 35(S1), 375-382.

Chen L, Li Y, "Research on feature of thermal performance of integrated composite system", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2021, 16(3), 894-909.

Cherki AB, Remy B, Khabbazi A, Jannot Y, Baillis D, "Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite", *Construction and building materials*, 2014, 54, 202-209

Smith C, "This cold house: the simple science of energy efficiency", *Johns Hopkins University Press*, 2007, ISBN-13:9780801886225

de Oliveira KA, Oliveira CAB, Molina, JC, "Lightweight recycled gypsum with residues of expanded polystyrene and cellulose fiber to improve thermal properties of gypsum", *Materiales de Construcción*, 2021, 71(341), e242-e242.

Dillehay TD, Ramírez C, Pino M, Collins MB, Rossen J, Pino-Navarro JD, "Monte Verde: seaweed, food, medicine, and the peopling of South America", *science*, 2008, 320(5877), 784-786.

Durgun MY, "Experimental research on gypsum-based mixtures containing recycled roofing tile powder at ambient and high temperatures", *Construction and Building Materials*, 2021, 285, 122956.

- Fatma N, Allègue L, Salem M, Zitoune R, Zidi M, "The effect of doum palm fibers on the mechanical and thermal properties of gypsum mortar", *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(19), 2641-2659.
- Fiore V, Di Bella G, Valenza A, "Effect of sheep wool fibers on thermal insulation and mechanical properties of cement-based composites. *Journal of Natural Fibers*, 2020, 17(10), 1532-1543.
- Iucolano F, Liguori B, Aprea P, Caputo D, "Thermo-mechanical behaviour of hemp fibers-reinforced gypsum plasters", *Construction and Building Materials*, 2018, 185, 256-263.
- Khabbazi A, Bencheikh C, Ennaceri H, Khaldoun A, "Insulation Material for a Model House in Zaouiat Sidi Abdessalam", *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2017, 1-6. IEEE.
- Maaloufa Y, Mounir S, Khabbazi A, Elhamdounia Y, "Effect of Ecological Insulating Fiber on the Thermal and Mechanical Properties of Plaster", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12(15), 5078-5088.
- Maaloufa Y, Mounir S, Khabbazi A, Kettar J, "Thermal and mechanical behavior of the plaster reinforced by fiber alpha or granular cork", *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 8(7), :1026-1040
- Maheri MR, Maheri A, Pourfallah S, Azarm R, Hadjipour A, "Improving the durability of straw-reinforced clay plaster cladding for earthen buildings", *International Journal of Architectural Heritage*, 2011, 5(3), 349-366.
- M'ghari O, Hassani FZSA, Mekhzoum MEM, Zari N, Bouhfid R, "Elaboration of a composite material based on plaster reinforced with phase change material/Oakum Fiber: physical, thermal and mechanical properties", *Journal of Energy Storage*, 2021, 35, 102321.
- Shadnia R, Zhang L, Li P, "Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM", *Construction and building materials*, 2015, 84, 95-102.
- Singh S, Maiti S, Bisht RS, Balam NB, Solanki R, Chourasia A, Panigrahi SK, "Performance behaviour of agro-waste based gypsum hollow blocks for partition walls", *Scientific Reports*, 2022, 12(1), 1-16.
- Touil M, Lachheb A, Saadani R, Kabiri MR, Rahmoune M, "A new experimental strategy assessing the optimal thermo-mechanical properties of plaster composites containing Alfa fibers", *Energy and Buildings*, 2022, 111984.
- Valenza A, Fiore V, Nicolosi A, Rizzo G, Scaccianoce G, Di Bella G, "Effect of sheep wool fibres on thermal-insulation and mechanical properties of cement matrix", *Academic Journal of Civil Engineering*, 2015, 33(2), 40-45.