



## بررسی کاربرد نانوموادها در جهت تامین آسایش حرارتی در ساختمان های مسکونی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

کد مقاله: ۲۰۴۵۸

سید عرفان موسوی<sup>۱</sup>، وجیهه ملائی شمس<sup>۲\*</sup>

### چکیده

در دنیای امروزی، کاهش مصرف انرژی یکی از مهم ترین مباحث در صنعت ساختمان سازی است. نفت و گاز منابع سرشاری برای کشورمان به شمار می آید. اگر ما بتوانیم از این منابع به صورت درست و منطقی استفاده کنیم، می توانیم در بحث اقتصادی پیشرفت قابل قبولی را شاهد باشیم. در غیر اینصورت یکی از بزرگترین نعمت های طبیعی خود را از دست داده ایم. از آنجاکه بخشی از انرژی مصرفی برای ایجاد آسایش در ساختمان ها از طریق جداره های ساختمان هدر می رود، مطالعات بسیاری با هدف دستیابی به راهکارهای ذخیره انرژی و کنترل انتقال سرما و گرما انجام شده است. هدف این پژوهش رسیدن به آسایش حرارتی افراد در ساختمان مسکونی و بهینه سازی انرژی با استفاده از مصالح هوشمند است. روش تحقیق از نوع توصیفی-تحلیلی بوده و گردآوری اطلاعات از طریق مطالعات کتابخانه ای و اسنادی انجام شده است. اطلاعات فوق همچنین شامل مطالعات آزمایشگاهی مندرج در سابقه پژوهش است که با تحلیل کیفی به مصالح هوشمند مؤثر در کاهش اتلاف حرارتی دست یافتیم. یکی از این راهکارها استفاده از نانوموادها است. برای انتخاب بهینه مصالح، ارزیابی میزان تأثیر و کارایی نانو موادها و نانو پوشش ها پژوهش حاضر با معرفی و مقایسه انواع نانوموادها به عنوان سامانه فعال و ایستا به سنجش میزان تأثیر سامانه ها بر انرژی مصرفی در ساختمان های مسکونی پرداخته است. در این پژوهش سعی بر آن شده تا به معرفی این نانوموادها و شناسایی انواع آن پرداخته و همچنین مزایا و معایب آنان بررسی و با یکدیگر مقایسه شود، تا امکان انتخاب گزینه برتر در شرایط گوناگون فراهم آید. در نتیجه ی بدست آمده در این پژوهش ما به تعدادی مصالح هوشمند رسیدیم که این مصالح تأثیر بسزایی در تامین آسایش حرارتی ساختمان مسکونی دارند. این مصالح عبارتند از شیشه های کروماتیک، نانو پوشش ها، درزبند ها، مواد تغییر فاز دهنده نانو، و رنگ های ترموکرومیک.

واژگان کلیدی: نانومواد، آسایش حرارتی، ساختمان مسکونی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری داخلی، دانشگاه خاوران

erfan\_mousavi79@yahoo.com

۲- عضو هیات علمی و استادیار معماری، گروه معماری، موسسه آموزش عالی اسرار، مشهد، ایران، نویسنده مسئول

vmshams94@gmail.com

## ۱- مقدمه

بحران انرژی در دهه های اخیر سبب نگرانی جامعه جهانی شده و پژوهشهای مختلفی در عرصه های مختلف علمی تلاش کرده اند تا با استفاده از راهکارهای مختلفی این نگرانی را تا حدودی برطرف کنند. از طرفی، معماری به عنوان رشته ای که در ارتباط مستقیم با طراحی و ساخت ساختمان است نقش مهمی در بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان ها بر عهده دارد. یکی از بخش های ساختمان که توجه به آن در فرآیند طراحی اهمیت فراوانی دارد منافذ یا همان دیواره های ساختمان است که مرز بین فضای داخل و خارج ساختمان است و بهینه سازی این بخش اهمیت فراوانی در بهینه سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی کل ساختمان دارد. (فاطمه مظفری قادیکلای، ۱۴۰۲، ص ۲).

کاربرد فناوری نانو را می توان در همه جنبه های زندگی یافت. اثر این فناوری، در صنایع داروسازی، ارتباطات، حمل و نقل و از همه مهم تر معماری مشاهده می شود. استفاده از فناوری نانو در معماری بسیار گسترده و از مراحل اولیه طراحی و کروکی های ساده گرفته تا مراحل نهایی و لمس فیزیکی نازک کاری هاست. این کاربرد را به ویژه می توان در انتخاب مصالح مناسب یافت که انتخاب این گزینه، به گونه ای انجام می شود که نه تنها بازتابی از ایده ها و تصورات طراحی داشته، بلکه تاثیر عمیقی نیز بر روش تفکر و اندیشه معمار داشته باشد. فناوری نانو، ما را یک قدم به داشتن مصالحی که ویژگی های دلخواه مان را داشته باشند، نزدیک تر می کند، مصالحی که ویژگی های منحصر به فرد ویژه ای دارند و مهندسان را از مصالح قدیمی که مشکلات متعددی هنگام استفاده از آن ها در فرآیند های ساخت و ساز بروز می کند، جدا می کند. (گلابچی و همکاران، ۱۳۹۱، ص ۷۹)

## ۲- پیشینه تحقیق

نخستین مطالعات در زمینه کاربردهای نانو فناوری در صنعت ساختمان به دهه ۱۹۹۰ میلادی باز می گردد. از آن زمان تاکنون فناوری نانو گسترش روز افزونی در معماری و مهندسی ساختمان داشته است، اما به دلایلی نتوانسته به طور کامل به اهداف بلندی که پیش بینی می شد، دست یابد. با این وجود، تولید بسیاری از مصالح نوین، توانمند و پر بازدهی که بر کیفیت ساختمان ها و زیر ساخت های ساخت دست بشر تاثیرات مثبتی بر جای گذاشته و می گذارند، به کمک نانو فناوری و مصالح نانو بنیان میسر شده است. (حاجی حسن، ۱۳۹۱، ص ۳). مهدی بازاری خورشو (۱۳۹۰) در پژوهشی تحت عنوان بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان به وسیله نانوفناوری اظهار داشت که استفاده از برخی مصالح هوشمند نانو مانند نانو پوشش ها، شیشه های هوشمند، و غیره می تواند تاثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی ساختمان، حفظ محیط زیست از آلاینده ها و بالابردن منافع اقتصادی بلند مدت ساختمان، داشته باشد. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در مق پژوهشی ای تحت عنوان بررسی و کاربرد نانو پوشش ها در ساختمان در راستای معماری پایدار اظهار داشتند که مطالعات اصولی تر بر روی فناوری نانو ضروری به نظر می رسد تا با یافتن کاربردهای آن در زمینه کاهش مصرف انرژی در ساختمان ها گامی در جهت پایداری شهری و معماری برداشته شود و امید است در آینده ای نزدیک در کشور استفاده از این قبیل فناوری ها مورد توجه بیشتر قرار بگیرد. انتظار می رود که نانو تکنولوژی نیاز بشر را به مواد کمیاب کمتر کرده و با کاستن آلاینده ها، محیط زیستی سالم تر را فراهم کند. مظفری قادیکلای و همکارانش (۱۴۰۲)، در پژوهشی تحت عنوان شیشه های هوشمند، گامی نو در جهت توسعه بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان، به توضیح کامل انواع شیشه های هوشمند پرداخته اند و کاربرد انواع شیشه های هوشمند توضیح داده اند و نتیجه به این رسیدند که شیشه های هوشمند می تواند مصرف انرژی ساختمان را به مقدار چشمگیری پایین بیاورد. مهرانی و همکارانش (۱۳۹۵) در پژوهشی تحت عنوان کاربرد نانو تکنولوژی در ساختمان های انرژی نزدیک صفر توضیح دادند که ساختمان های انرژی نزدیک به صفر چیست و انواع پارامتر های آن را معرفی کرده اند. یکی از مهم ترین پارامتر های آن استفاده از نانو فناوری در ساختمان است که به وسیله آن در مصالح ساختمانی بتوانند ساختمان را در برابر حرارت عایق کنند و به ساختمان انرژی صفر نزدیک شوند.

## جدول ۱- پیشینه پژوهش

عنوان	نویسندگان	نتیجه پژوهش
شیشه های هوشمند گامی نو در علوم مهندسی در جهت توسعه بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان	فاطمه مظفری قادیکلای عالمه صالحی بالادهی صابر حسین پور بهنمیری ۱۴۰۲	پیدا کردن بهترین پاسخ برای کاهش انتقال گرما از طریق پنجره و کاهش بار سرمایشی تا حد ممکن ضروری است. دو نوع شیشه های هوشمند وجود دارند که تاثیر مستقیم بر کاهش انتقال گرما از طریق پنجره دارند. مورد اول شیشه های ترموکرومیک و مورد دوم شیشه های الکتروکرومیک.
مواد تغییر فاز نانوامولسیون برای کاربرد ذخیره سازی انرژی: طراحی، شناسایی و عملکرد گرمایی	سیده پانته آحسینی لرگانی حامد سلیمی کناری سید رضا نبوی ۱۴۰۱	با وجود قابلیت بالقوه این مواد در کاربردهای گرمایی مختلف برای دستیابی به مزیت رقابتی نسبت به سیالات انتقال گرمای معمولی در سطح صنعتی، لازم است که به طور ویژه، محدودیتهایی مانند ناپایداری، ابرسرمایش و افزایش گران روی مورد توجه قرار گیرند و به حداقل برسند.

عنوان	نویسندگان	نتیجه پژوهش
بررسی تاثیر مصالح هوشمند در دستیابی به (تکنولوژی نانو) معماری پایدار	سیما حاجی حسن ۱۴۰۱	عرصه هایی در معماری که فناوری نانو می تواند سبب بهبود شرایط ساخت و ساز در آنها شود عبارتند از: بهینه سازی مصالح، پیشگیری از آسیب، کاهش وزن و حجم مصالح و عناصر ساختمانی، کاهش مراحل تولید، استفاده مفید و پر بازده از مصالح، کاهش نیاز به نگهداری و کم شدن هزینه نگهداری در ساختمان سازی است.
سنتر و بررسی خواص فیزیکی آئروژل نانو کامپوزیت سلولز-هیدروکسید منیزیم به منظور کاربرد به عنوان عایق حرارتی	سعید صفاری مهدی عادل فرد سید احمد نبوی امری ۱۳۹۷	این پژوهش به بررسی روش های سنتز و ویژگی های فیزیکی آئروژل نانو کامپوزیت سلولز-هیدروکسید منیزیم می پردازد. این ماده به عنوان یک عایق حرارتی نوآورانه مورد مطالعه قرار گرفته است. آئروژل های نانو کامپوزیت به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند چگالی پایین، تخلخل بالا، و رسانایی حرارتی بسیار پایین، گزینه های جذابی برای استفاده در عایق کاری حرارتی هستند.
بررسی و کاربرد نانوپوشش ها در ساختمان در راستای معماری پایدار	زهره محمدی وحید اسدالهی ۱۳۹۴	فناوری نانو از جمله تکنولوژی های نوینی است که کاربردهای مهم و ارزشمندی در صنعت ساختمان به خصوص در حیطه حفظ انرژی دارد که تنها نانوپوشش ها در بخش های متنوع و مهمی کاربرد دارند که این فناوری خواص بسیاری از مصالح را بهبود بخشیده و ویژگی های مطلوبی به آنها می دهد.
بررسی جایگاه فناوری و تکنولوژی نانو در دستیابی به معماری پایدار	فاطمه السادات مجیدی محمد هاشمی شهرکی فرهاد عوض نژاد ۱۳۹۴	از آنجایی که هدف معماری پایدار، صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش منابع تجدید ناپذیر، تقویت و افزایش عمر بنا، کاهش آلودگی های زیست محیطی و نیز کاهش هزینه ها است، لذا با استفاده از فناوری نانو در معماری و کمک به ساخت موادی با ویژگی ها و کاربردهای یاد شده، می توان انتظار داشت که مواد و مصالح را به گونه ای اقتصادی تر تولید کرده و همچنین از منابع طبیعی کمتری برداشت نمود.
پیامدهای انرژی آسایش حرارتی در ساختمان ها با توجه به تغییرات آب و هوایی	Daniel Sánchez-García David Bienvenido-Huertas 2023	آسایش حرارتی که یک جزء اساسی از سلامت انسان است، به طور مستقیم بر سطح رفاه و بهره وری ما تاثیر می گذارد. ساختمان ها با حفظ دمای داخلی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد، یک محیط راحت فراهم می کنند. برای کاهش پیامدهای انرژی آسایش حرارتی، طراحی ساختمان بسیار مهم است. تکنیک های طراحی نوآورانه می توانند نیاز به گرمایش و سرمایش مکانیکی را کاهش دهند، مانند طراحی خورشیدی غیرفعال و بام های سبز. کاهش مصرف انرژی نیز به بهبود مواد و تکنولوژی های ساختمانی، مانند سیستم های HVAC، کارآمد و پنجره های هوشمند بستگی دارد.
مروری بر روش های مختلف مطالعه آسایش حرارتی	S.dus S.subudhi 2022	عوامل مختلفی که بر آسایش حرارتی تاثیر می گذارند و مشخص شده است که فعالیت، مهم ترین عامل در میان عوامل فیزیولوژیکی مختلفی است که بر آسایش حرارتی تاثیر می گذارد. عامل عایق، مانند لباس، به شدت بر آسایش حرارتی تاثیر می گذارد، بنابراین نوع لباسی که فرد می پوشد به شدت نرخ انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار می دهد. همچنین مشاهده شده است که عوامل محیطی مانند حرکت هوا، دمای محیط، رطوبت و تابش نقش حیاتی در مطالعه راحتی حرارتی دارند.
مواد عایق نانو برای کاربرد در ساختمان انرژی نزدیک به صفر	Ligia mogal Adrian bucur 2018	نتیجه ی این پژوهش یک راه حل جایگزین ارائه شده است، که توسط مواد عایق نانو مانند آئروژل و پانل های عایق خلاء ارائه می شود که دارای خواص عایق حرارتی بسیار خوبی در ضخامت کاهش یافته هستند.
استفاده از نانوذرات در محل کارهای فناوری نانو	Thomas AJ Kuhlbusch Christof Asbach Heinz Fissan Daniel Göhler Michael Stintz 2011	به طور کلی، تمام مطالعات بررسی شده نشان می دهند که مقدار نانوذرات آزاد شده نتیجه ترکیب فرآیند درمان و مواد استفاده شده است. تمام فرآیندهای کنترل پودر، برخی از نانوذرات را آزاد می کنند. در مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با محیط کار، آزادسازی نانوذرات مهندسی در فرآیندهای مرتبط با پوشش ها و کامپوزیت ها مشاهده نشد، زیرا نانومواد هنوز در جریان ماده ماتریس جاسازی شده بودند.
نانوتکنولوژی در بتن	Florence Sanchez Konstantin Sobolev 2010	پتانسیل نانو تکنولوژی برای بهبود عملکرد بتن و ایجاد کامپوزیت های نوین، پایدار و پیشرفته بر پایه سیمان با خصوصیات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی منحصر به فرد، چشمگیر است و انتظار می رود که در سال های آینده فرصت های جدیدی به وجود بیاید. پیشرفت های در دستگاه ها و علوم محاسباتی به دانشمندان و مهندسان این امکان را می دهد که اطلاعات بی نظیری از بتن، از مقیاس اتمی تا مقیاس پیوسته، به دست آورند و نقش

### ۳- ادبیات نظری

گلابچی و همکاران (سال ۱۳۹۱، ص ۴۷) بر این نظرند که قرن هاست بشر از نانومواد استفاده می‌کند. کوزه گران رومی و حتی مردمان پیش از آن‌ها از چنین موادی استفاده می‌کرده‌اند. صنعتگران و هنرمندان دوران باستان، از ذرات ریز نانومقیاس در ساخت شیشه های زمان خود استفاده می‌کرده اند، تا زمانی که بصورت تصادفی به شیشه تائیده می‌شود، رنگی منحصر به فرد را ایجاد کند. در آن زمان، هیچ درک علمی پیرامون این پدیده وجود نداشته و تنها مشاهده و امتحان بوده که موجب شده صنعتگران آن زمان با اتکا بر کوشش و خطا، به تجربه این پدیده را کشف کنند.

اما امروزه تحقیقات و توسعه محصولات در حوزه نانوفناوری به طور پیوسته افزایش یافته است، به ویژه به دلیل خواص جدید و مفید نانومواد. نانوفناوری به عنوان یک فناوری میان‌رشته‌ای در دستگاه‌های الکتریکی، مصالح ساختمانی و کامپوزیت‌ها، به عنوان کاتالیزور و پوشش‌های ضدباکتریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به طور فزاینده‌ای در محیط‌های کاری و محصولات مصرفی حضور دارد. این افزایش پیوسته با تولید، دستکاری و پردازش بیشتر مواد نانو ساختاری و حجم بالاتر نانومواد همراه است. نانومواد جدید، که بخش جدایی‌ناپذیری از توسعه‌های نانوفناوری هستند، از یک سو امکان تولید محصولات و راه‌حل‌های جدید برای مشکل آسایش حرارتی مربوط به ساختمان، تولید و ذخیره‌سازی انرژی را فراهم می‌کنند. (Kuhlbusch Thomas A, 2011, p1)

#### ۳-۱- نانوموادها

نانو علمی است که در آن به مطالعه خواص نانو مواد، تولید و استفاده از آنها در بهبود بخشیدن خواص و ویژگی های مواد استفاده می‌شود. چرا که بسیاری از خواص ماده در ابعاد نانومتری، متفاوت از خواص در ابعاد ماکروسکوپی می‌باشد. فناوری نانو یک زمینه بین رشته ای است که در محدوده علوم کاربردی مختلفی نظیر فیزیک، مواد، الکترونیک و غیره وارد شده است. فناوری نانو، خود به تنهایی یک علم نیست؛ بلکه با استفاده از آن می‌توان به کاربردی کردن علوم مختلف کمک کرد. فناوری نانو به سه صورت تعریف می‌شود:

- ۱- فناوری نانو تحقیقات و مطالعه ی مواد و خصوصیات آنها در محدوده نانومتر (۱ به توان منفی ۹) را در بر می‌گیرد.
- ۲- با کمک فناوری نانو ساختارهای نانویی را می‌توان خلق کرد که خصوصیات آنها با ساختارهای ماکروسکوپی همان مواد متفاوت است.

۳- با کمک فناوری نانو نمی‌توان از طریق کنترل خصوصیات، در آنها تغییراتی ایجاد کرد (حاجی حسن، ۱۴۰۱، ص ۴)

مواد نانویی دیگر به عنوان عایق پوشش‌ها و رنگدانه‌ها هستند که این مواد، به ویژه در کاهش انتقال گرما به روش تابش، بسیار موثرند. هر ماده ای انرژی تابش را سطح، جذب، و منعکس میکند. مواد کم گسیل موادی هستند که میزان انتشار انرژی بازتابش آنها بسیار کم است. شیشه کم گسیل معمولاً یک پوشش بسیار بزرگ دارد که از فلز ساخته شده و تابش گرمایی را منعکس میکند و در زمستان انرژی گرمایی تابشی تولیدشده در اتاق به سمت داخل بازتابش میشود؛ در تابستان، تابش گرمایی فروسخ حاصل از خورشید به سمت بیرون منعکس میشود که در نتیجه هوای اتاق خنک باقی میماند. دو روش عمده در تولید انبوه شیشه های دارای پوشش برای قابلیت نشر پایین وجود دارد: روش پوشش سخت، و روش پوشش نرم. شیشه های تولیدشده با روش پوشش نرم بسیار موثرتر و کارآمدتر از نمونه های ساخته شده با روش پوشش سخت هستند، هرچند شیشه های با پوشش سخت بادوامترند (Anderson, R.; Roberts, D. R. 2008).

#### ۳-۲- آسایش حرارتی

بشر از ابتدا متوجه شده که آب و هوا بر سلامتی او تاثیر زیادی دارد (Matzarakis, 2007). مفهوم آسایش حرارتی به راحتی قابل تعریف نیست. ولی به طور کلی می‌توان آن را احساس راحتی نمودن فرد با قرارگیری در یک فضای زیستی مصنوعی تعریف نمود. از آن جایی که شرایطی که افراد مختلف در آن احساس می‌نمایند متفاوت است، مفهوم آسایش حرارتی نیز متفاوت است. (s.Dus, 2022). احساس سرما و گرما بستگی به عادات مردم دارد و با توجه به این که انسان قابلیت تطابق خوبی با محیط دارد ممکن است شرایطی برای بعضی در حالات راحتی و برای افراد دیگر ناراحت کننده باشد. (بهاری نژاد و یعقوبی، ۱۳۸۵). در شکل‌گیری شرایط آسایش انسان از دیدگاه اقلیمی؛ چهار عنصر دما، رطوبت، باد و تابش نقش دارند. در بین این عناصر دما و رطوبت تاثیر بیشتری در سلامت و راحتی انسان دارند و به این دلیل بیشتر مدل های سنجش آسایش انسان بر این دو عنصر استوار شده است. (گندمکار و محرر احمدی، ۱۳۹۰). عایق کاری نقش بسیار مهمی در گرم نگه داشتن ساختمان در فصل زمستان و خنک نگه داشتن آن در فصل تابستان دارد. به کمک عایق کاری یک خانه را در زمستان ۵ درجه گرم تر و در تابستان ۱۰ درجه

خنک تر نگه داشت (بازباری خوشرودی، ۱۳۹۰، ص ۵). برای ایجاد آسایش حرارتی کافی است دمای هوا در محدوده ۱۶ تا ۳۰ درجه باقی بماند. (s.Dus,2022).

### ۳-۳- تاثیر مصالح نانو موادی بر آسایش حرارتی

امروزه فناوری نانو از جمله تکنولوژی های نوینی است که کاربردهای مهم و ارزشمندی در صنعت ساختمان به خصوص در حیطه حفظ انرژی دارد که تنها نانو پوشش ها در بخش های متنوع و مهمی کاربرد دارند که این فناوری خواص بسیاری از مصالح را بهبود بخشیده و ویژگی های مطلوبی به آنها می دهد. این کاربرد عموماً در افزایش قابلیت های سطوحی است که به طور روزمره در صنعت ساختمان با کاربران سر و کار پیدا می کنند. لذا زندگی و کار در ساختمان هایی که به چنین پوشش هایی مجهز شده باشند در آینده می تواند موجبات راحتی و آسایش محیطی را برای انسان به ارمغان بیاورد. از این روست که مطالعات اصولی تر بر روی فناوری نانو ضروری به نظر می رسد تا با یافتن کاربردهای آن در زمینه کاهش مصرف انرژی در ساختمان ها گامی در جهت پایداری شهری و معماری برداشته شود و امید است در آینده ای نزدیک در کشور استفاده از این قبیل فناوری ها مورد توجه بیشتر قرار بگیرد. انتظار میرود که نانو تکنولوژی نیاز بشر را به مواد کمیاب کمتر کرده و با کاستن آلاینده ها، محیط زیستی سالمتر و آسایش حرارتی را فراهم کند (محمدی، ۱۳۹۴، ص ۱۰). در بخش بعدی انواع مصالح هوشمند نانومواد از جمله شیشه های هوشمند، نانو پوشش ها، نانو عایق ها، درزبند نانو، نانو بتن، و رنگ ترموکرومیک که در جهت تامین آسایش حرارتی موثر هستند معرفی می شوند.

#### ۳-۳-۱- شیشه های هوشمند<sup>۱</sup>

منظور از شیشه های هوشمند، انواع شیشه هایی است که با ممانعت از عبور بخش مشخصی از پرتو نور خورشید سبب کاهش اتلاف حرارت در ساختمان ها میشوند. با استفاده از این نوع شیشه ها میزان مصرف انرژی با افزایش بازده گرمایی در هوای سرد و کاهش آن در هوای گرم بهبود می یابد. در یک دسته بندی کلی میتوان انواع شیشه های هوشمند را به شیشه های ترموکرومیک، کریستال مایع، الکتروکرومیک، گاز کرومیک و SPD تقسیم بندی نمود. شیشه های ترموکرومیک، شیشه هایی با رنگ متغیر نسبت به تغییرات دمایی هستند (جلیل شاعری، رزا و کیلی، ۱۳۹۷، ص ۴) شیشه های هوشمند در یک ساختمان معمولی، فقط حدود ۵ تا ۲۴ درصد ساختمان از شیشه تشکیل می گردد، در حالیکه حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد اتلاف انرژی از این حجم کم صورت می گیرد. با افزایش تعداد پنجره ها در ساختمان میزان حرارت وارده و خارج بیشتر و در نتیجه میزان آسایش ساکنین کمتر خواهد شد. لازم به ذکر است که انتقال حرارت در شیشه ها مانند سایر مواد، از سه طریق تابش، همرفت و هدایت گرمایی اتفاق می افتد. با روشهای موجود تنها می توان جلوی ۱/۳ اتلاف انرژی را که از دو راه همرفت و هدایت می باشد، متوقف سازیم و نمی توان جلوی ۲/۳ اتلاف از طریق تشعشع را گرفت (مظفری قادیکالی و همکاران، ۱۴۰۲، ص ۴).

لایه های به کار رفته درون پنجره نیز اثری قابل توجه در کاهش انتقال گرما نسبت به پنجره های معمولی دارند. این لایه ها فوایدی در مقایسه با پوشش ها دارند؛ آنها میتوانند بدون کاهش شفافیت شیشه، طول موجهای مشخصی از نور را منعکس کنند. این لایه ها که در اندازه های نانویی ساخته شده اند، نقشی مانند صافی در مقابل پرتوهای فرابنفش و فروسرخ دارند. همچنین فناوری نانو با استفاده از آیروزل ها تاکنون در این بخش نوآوری هایی داشته و کمک هایی مانند مقاوم سازی، عایق سازی حرارتی و رطوبتی، خاصیت خودتمیزشوندگی و از بین بردن آلودگی ها را به این بخش از ساختمان داده است (عرب مارکده و همکاران، ۱۳۹۵، ص ۴) از پرکاربردترین شیشه های هوشمند، شیشه های الکتروکرومیک (یا الکتروکروماتیک) است که در آن، شیشه به وسیله یک لایه از تری اکسید تنگستن ( $WO_3$ ) یا اکسید نیکل، به تغییر ولتاژ ایجاد شده واکنش نشان می دهد. در این روش، به محض لمس یک دکمه بر تیرگی شیشه افزوده خواهد شد و باعث کاهش مصرف انرژی و آسایش حرارتی خواهد شد. (گلابچی، ۱۳۹۱، ص ۱۴۰) بیشتر شیشه ای که در ساختمان مسکونی استفاده می شود، در جبهه بیرونی ساختمان قرار می گیرد و از این رو، کنترل نور و حرارت وارد شده به بنا از این راه انجام شده و شیشه ها نقش بسیار مهم و پررنگی در پایدار بودن (زیست محیطی) ساختمان ایفا خواهد کرد. (گلابچی، ۱۳۹۱، ص ۱۳۹)

#### ۳-۳-۲- پوشش های نانو ساختار<sup>۲</sup>

معمولاً روکش یا پوشش، به لایه نازکی اطلاق می شود که بر روی ماده کشیده می شود تا ویژگی سطح مورد نظر را بهبود بخشد یا برای آن جلوه و سیمای بهتری ایجاد کند. نانو پوشش ها گونه ای از لایه های نازک هستند که به روش های شیمیایی یا فیزیکی بر روی سطوح مختلف قرار می گیرند و ضخامتی کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند. (محمدی، ۱۳۹۴، ص ۳). نانو پوشش ها

1 Nano Smart Glass

2 Nanocoatings

بهترین فرصت را برای ارتقای کیفی محصولات ساختمانی موجود یا حتی دیگر مصالح نانوبنیان جدید فراهم کرده اند. نخستین بهره برداری عملکردی از نانوپوشش ها، افزایش مقاومت مواد در برابر پوسیدگی و فرسودگی، سایش و خوردگی و پایداری حرارتی است. (گلابچی، ۱۳۹۱، ص ۱۶۴)

پوشش های نانولایه ای، برای افزایش سختی سطوح برنده تیغ ها به کار می روند. همچنین از این نوع پوشش ها می توان برای استفاده از بهبود پایداری حرارتی مواد نیز استفاده کرد. مثل سرامیک های نانومتخلخل، به عنوان پوشش های حرارتی استفاده می شوند و عملکرد عایق حرارتی را ایفا میکنند. (گلابچی، ۱۳۹۱، ص ۱۶۵)

### ۳-۳-۳- نانوژل های سیلیکا<sup>۱</sup>

نانوژل یک ماده جامد با تراکم بسیار پایین است که ترکیبات مایع در آن با گاز جایگزین گردیده است. محتوای نانو ژل شامل فقط ۵ درصد مواد جامد و ۹۵ درصد هوا است و به نظر می آید که سبک ترین ماده جامد در جهان است. این ماده با وجود وزن بسیار کم توان تحمل بیشتر از ۲۰۰۰ برابر وزن خودش را دارد. به دلیل خلل و فرج موجود در نانو ژل ها، این مواد به رطوبت حساس هستند، از این جهت اغلب آنها به شکل فشرده بین پانل های دیواری که از نفوذ رطوبت جلوگیری می کنند، به بازار عرضه می شوند. کاربردهای معماری نانو ژل ها شامل پنجره ها، پنجره های سقفی و پانل دیواری نیمه شفاف است. نانو ژل ها گازهای مختلفی را برای استفاده به عنوان آشکار ساز محصور می نمایند. آنها مانند جوهر مورد استفاده در یک نقاشی می باشند. پانل های نانو ژل ویژگی های شفافیت و عایق بودن را هم زمان فراهم می نمایند. (مجیدی و همکاران، ۱۳۹۴، ص ۵)

آئروژل سلولز بدلیل فراوانی منافذ داخلی، چگالی پایین، رسانش حرارتی پایین و استحکام مکانیکی بالا بعنوان یکی از نویدبخشترین مواد عایق حرارتی زیستسازگار پذیر در نظر گرفته شده است. (صفاری، عادل، ۱۳۹۷، ص ۲)

نانوژل ها می توانند بهبود قابل توجهی در آسایش حرارتی محیط های داخلی ایجاد کنند. این مواد با خاصیت عایق بندی حرارتی بالا، قادر به تنظیم دمای محیط به شکلی کارآمد هستند. استفاده از نانوژل ها در ساختمان ها و پوشش های ساختمانی، می تواند میزان تبادل حرارتی را کاهش داده و در نتیجه، مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش را به حداقل برساند. (داس، ۲۰۲۲، ص ۶)

نانوژل ها به دلیل ساختار پلیمری و تراکم کم، قابلیت بالایی در عایق بندی حرارتی دارند. این مواد می توانند در دیوارها، سقف ها و کف ها استفاده شوند تا انتقال حرارت را کاهش داده و نیاز به سیستم های گرمایشی و سرمایشی را کمتر کنند. (sanchez, D., 2023, p5)

### ۴-۳-۳- درزبندهای نانو<sup>۲</sup>

مواد درزبند را به طور معمول با این هدف بر روی سطوح استفاده میکنند که جذب، نفوذ یا عبور مایعات یا گازها را از سطح مورد نظر مسدود کنند. در ادبیات ساختمانی، چنانچه هدف، ممانعت از نفوذ مایعات باشد، درزبند مورد نظر را آب بند و چنانچه هدف، سد کردن مسیر عبور گازها باشد، هوا بند نامند. معمولاً درزبند ها، ابتدا به صورت مایع یا مواد جامد لزجی هستند که هنگام مالیده شدن روی سطح، به آن چسبیده و به کمک فرایند های شیمیایی یا استفاده از حلال ها، آرام آرام سخت شده و به ماده ای جامد تبدیل می شوند. به طور معمول، درزبندها را بر سطح مواد متخلخل یا نواحی از ساختمان که خطر نفوذ آب و هوا از آن ممکن باشد (مانند فصل مشترک کاشی کاری های بدنه و کف فضاهای مرطوب یا فصل مشترک قاب پنجره و دیوار) اعمال کنند. از درزبندها، هم با هدف بیرون نگه داشتن مایعات و گازها و پیشگیری از ورود آن ها به داخل استفاده می شود (مانند پنجره) و هم برای اینکه مایع یا گاز را درون حجمی نگاه داشته و مانع از بیرون ریختن آن شوند (مانند استخر یا وان). (گلابچی، ۱۳۹۱، ص ۱۷۹)

### ۳-۳-۵- بتن های نانو ساختار<sup>۳</sup>

فناری نانوبتن به معنای بهره گیری از تکنولوژی نانو در تولید بتن است، که با اضافه کردن نانوذرات به ترکیبات بتن، خواص بتن را بهبود می دهد. این نانوذرات ممکن است شامل موادی مانند دی اکسید تیتانیوم، دی اکسید سیلیسیم، نانوذرات کربنی مانند (مانند نانوتیوب های کربنی) و غیره باشند. فناوری نانوبتن به دلیل ویژگی های منحصر به فرد نانوذرات مورد استفاده، از جمله افزایش مقاومت مکانیکی، بهبود خواص حرارتی، مقاومت در برابر پوسیدگی و افزایش دوام بتن، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. پتانسیل نانو تکنولوژی برای بهبود عملکرد بتن و ایجاد کامپوزیت های نوین، پایدار و پیشرفته بر پایه سیمان با خصوصیات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی منحصر به فرد، چشمگیر است و انتظار می رود که در سال های آینده فرصت های جدیدی به وجود

1 Aerogel

2 Nano Sealants

3 Nanostructured Concrete

باید. بتن نانویی به عنوان یک جنبه نوآورانه در بهبود خواص حرارتی بتن مورد توجه قرار گرفته است. این نوع بتن با افزودن نانومواد به ترکیبات خود، می‌تواند خواص حرارتی بهتری نسبت به بتن معمولی ارائه دهد، از جمله کاهش انتقال حرارت و بهبود عایق حرارتی. (Sanchez, F, 2010)

### ۳-۳-۶- مواد تغییردهنده فاز نانو ساختار<sup>۱</sup>

اهمیت استفاده از انرژی های تجدید پذیر بر کسی پوشیده نیست. در میان انواع انرژی های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، بیشترین کاربرد را به خود اختصاص داده است. اما استفاده از آن خورشیدی در شب و یا هوای ابری کارایی خود را از دست می‌دهند. ذخیره‌سازی گرمای نهان توسط مواد تغییر فاز دهنده میتواند به عنوان یک راه حل برای مشکل فوق به کار گرفته شود. (جعفریان و همکاران، ۱۳۹۸، ص ۲)

فناوری های بر پایه انرژی خورشیدی از مؤثرترین روش های کاهش مصرف سوخت های فسیلی و مواجهه با مشکلات اخیر در حوزه انرژی و گرمایش کره زمین است. با وجود این، استفاده از انرژی خورشیدی نیز مانند اکثر منابع انرژی تجدیدپذیر، به طور متناوب امکان پذیر بوده که باعث عدم تطابق تولید و مصرف انرژی شده است. از این رو، افزون بر افزایش بازده در جذب انرژی خورشیدی، ذخیره انرژی اضافی برای استفاده بعدی به یکی از چالش های اصلی برای تقویت و بهبود تأسیسات خورشیدی تبدیل شده است. (حسینی و همکاران، ۱۴۰۱، ص ۲۵)

### ۳-۳-۷- رنگ های ترموکرومیک<sup>۲</sup>

رنگ‌های ترموکرومیک حاوی رنگدانه‌ها یا ترکیبات ترموکرومیک هستند که به طور برگشت‌پذیر رنگ و خواص نوری را با توجه به دمای سطح تغییر می‌دهند. اثر ترموکرومیک توسط دمایی ایجاد می‌شود که باعث می‌شود: تغییرات پی‌اچ، تبدیل نوع کریستالی، از دست دادن آب کریستالی با گرم شدن، تغییر در تعادل الکترون و گیرنده الکترون، واکنش باز کردن حلقه مولکول‌ها با گرم شدن. رنگ‌های ترموکرومیک می‌توانند به حفظ دمای مناسب داخلی ساختمان کمک کنند، به طوری که در تابستان بازتاب خورشیدی را افزایش دهند و از گرم شدن بیش از حد جلوگیری کنند، و در زمستان بازتاب خورشیدی را کاهش داده و به حفظ گرما کمک کنند. ۵۰ درصد انرژی مورد نیاز ساختمان تاثیر رنگ های ترموکرومیک از نظر صرفه جویی در انرژی در ساختمان های بدون عایق حرارتی ۲ تا ۸ درصد بیشتر از ساختمان های عایق شده است. (Granadeiro V, 2020 p14)

## ۴- بحث و نتایج

در جدول زیر مصالحی که معرفی شدند را دسته بندی کرده و ویژگی ها و کاربرد آن در فضای مسکونی مشخص شده است.

کاربرد در فضای مسکونی	نقش آن در آسایش حرارتی	ویژگی ها	مصالح نانومواد
شیشه های پنجره ساختمان مسکونی	جلوگیری از ورود حرارت کمتر به ساختمان می‌شود و در نهایت باعث آسایش حرارتی افراد خواهد شد.	قابلیت تنظیم جذب نور و حرارت	شیشه های هوشمند الکتروکروماتیک
فصل مشترک کاشی کاری های بدنه و کف فضاهای مرطوب یا فصل مشترک قاب پنجره و دیوار	درزبندهای نانو می‌توانند به عنوان عوامل عایق حرارتی عمل کنند و از انتقال حرارت از داخل به بیرون و بالعکس جلوگیری می‌کنند، که این می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و تامین آسایش حرارتی با آن کمک کند	مقاوم در برابر رطوبت مقاوم در برابر انتقال گرما و سرما	درزبندها
در بتن های جداره ساختمان های مسکونی	با اضافه شدن نانوذرات مختلف به بتن می‌تواند خواص حرارتی آن تغییر کند و به کاهش انتقال حرارت و تامین آسایش حرارتی کمک کند.	عایق حرارتی مقاوم در برابر رطوبت مقاومت مکانیکی	نانو بتن
عایق کاری دیواره ها و	باعث جلوگیری از عبور سرما و گرما میشود	تنظیم حرارت	

<sup>1</sup> Nanostructured Phase Change Materials

<sup>2</sup> Thermochromic Colors

پوشش های خود تمیز شونده	تقلیل در نفوذ حرارت انعکاس نور مقاومت در برابر آب و شرایط جوی	و دمای خانه را تثبیت میکند که باعث آسایش حرارتی خواهد شد	کف و سقف ساختمان نمای ساختمان
نانو پوشش ها	عایق حرارتی بسیار عالی قابلیت تنظیم جذب نور مقاوم در برابر شرایط جوی	این مواد با خاصیت عایق بندی حرارتی بالا، قادر به تنظیم دمای محیط به شکلی کارآمد هستند.	دیوارها، سقفها و کفها
رنگ های ترموکرومیک	تعیین دما تناسب و راحتی استحکام و پایداری سرعت تغییر	رنگ ترموکرومیک به عنوان یک ابزار بصری که به تغییرات دما پاسخ می دهد، می تواند در تأمین آسایش حرارتی و افزایش آگاهی از شرایط حرارتی کاربران بسیار موثر باشد.	در نمای ساختمان
مواد تغییر دهنده فاز نانو	افزایش ظرفیت ذخیره سازی انرژی حرارتی	این مواد در دمای مشخص تغییر فاز داده و حرارت را جذب یا آزاد می کنند. به تثبیت دمای داخلی ساختمان کمک میکند و نیاز به سیستم گرمایشی و سرمایشی را کاهش می دهد.	در دیواره ها سقف ها کف های ساختمان

ماخذ جدول: نگارندگان

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر استفاده از نانومواد بر آسایش حرارتی ساختمان های مسکونی بررسی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که نانومواد، به ویژه شیشه های کروماتیک، نانوپوشش ها، درزبندها، مواد تغییر فاز دهنده نانو، و رنگ های ترموکرومیک، به طور قابل توجهی در بهبود عملکرد حرارتی ساختمان ها موثر هستند. استفاده از این نانومواد می تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه ای در مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمان ها شود. این مواد با قابلیت های منحصر به فرد خود، نه تنها به افزایش بهره وری انرژی کمک می کنند، بلکه در ایجاد محیطی راحت تر و پایدارتر برای ساکنین نیز نقش مهمی ایفا می کنند. از این رو، توصیه می شود که در طراحی و ساخت ساختمان های مسکونی جدید و همچنین در بازسازی ساختمان های موجود، استفاده از این نانومواد مورد توجه قرار گیرد. با توجه به مزایای فراوان این مصالح، سرمایه گذاری در تحقیقات و توسعه بیشتر در زمینه نانومواد ساختمانی می تواند به دستیابی به ساختمان های پایدار و بهره ور انرژی کمک شایانی کند.



۱. بازیاری خوشرودی، مهدی، بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان به وسیله فناوری نانو، نشریه مطالعات مهندسی انتظامی، سال ۱۳۹۰
۲. بهاری نژاد، مهدی و یعقوبی، محمود، کتاب تهویه و سرمایش طبیعی در ساختمان های سنتی ایران، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، سال ۱۳۸۶
۳. جعفریان، مصطفی، امید، محمود، خانعلی، مجید، و مختاری مومنی شیروان، مظفر. (۱۳۹۸). بهبود ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره سازی انرژی حرارتی با استفاده از فناوری نانو. مهندسی بیوسیستم ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۰(۲)، ۳۱۹-۳۲۹. <https://sid.ir/paper/144475/fa>. SID.
۴. حاجی حسن، سیماء، ۱۴۰۱، بررسی تاثیر مصالح هوشمند (تکنولوژی نانو) در دستیابی به معماری پایدار، <https://civilica.com/doc/1655111>
۵. حسینی لرگانی، سیده پانته آر، سلیمی کناری، حامد، نبوی، سید رضا، ربیع نتاج درزی، احمد علی. (۱۴۰۲). مواد تغییر فاز نانوامولسیون با کارکرد ذخیره سازی انرژی: طراحی، شناسایی و عملکرد گرمایی. فصلنامه علمی بهار. ۳(۴)، ۱۵-۲۸. doi: 10.22063/basparesh.2023.3243.1639
۶. شاعری، جلیل و وکیلی نژاد، رزا، تاثیر شیشه های هوشمند در بهره وری خورشیدی و بار سرمایش در یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و مرطوب بوشهر، نشریه مهندسی مکانیک ایران، سال بیستم شماره ۴ (پیاپی ۵۳، زمستان ۱۳۹۷)
۷. صفاری، سعید و عادل فرد، مهدی و نبوی امری، سید احمد، سنتر و بررسی خواص فیزیکی آئروژل نانوکامپوزیت سلولز-هیدروکسید منیزیم به منظور کاربرد به عنوان عایق حرارتی، فصلنامه نانو مقیاس سال پنجم شماره ۳ (پیاپی ۱۹ سال ۱۳۹۷)
۸. عرب مارکده، فرشاد، چامیان، ریحانه، مهرانی، محمدجواد، و شمس هرندی، مرضیه. (۱۳۹۵). کاربرد نانو تکنولوژی در ساختمان های انرژی نزدیک صفر (NZEB). کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی. SID. <https://sid.ir/paper/881718/fa>
۹. گلابچی، محمود و تقی زاده، کتابیون و سروش نیا، احسان، کتاب نانو فناوری در معماری و مهندسی ساختمان، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم سال ۱۳۹۱
۱۰. گندمکار، امیر و محرر احمدی، مژگان، ۱۳۹۰، بررسی اقلیم آسایشی شهرستان کاشمر با استفاده از مدل PET، همایش ملی بوم های بیابانی، گردشگری و هنرهای محیطی، نجف آباد، <https://civilica.com/doc/167978>
۱۱. مجیدی، فاطمه سادات و هاشمی شهرکی، محمد و عوض نژاد، فرهاد، (۱۳۹۴) بررسی جایگاه فناوری و نانوتکنولوژی در دستیابی به معماری پایدار، مجله صنعت ساختمان، شماره ۱۱۴، ۱۲-۱۹
۱۲. محمدی، زهره، و اسدالهی، وحید. (۱۳۹۴). بررسی و کاربرد نانوپوشش ها در ساختمان در راستای معماری پایدار. کنفرانس بین المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط زیست. SID. <https://sid.ir/paper/827857/fa>
۱۳. مظفری قادیکلای، فاطمه و صالحی بالادهی، عالمه و حسین پور بهنمیری، صابر، ۱۴۰۲، شیشه های هوشمند گامی نو در علوم مهندسی در جهت توسعه بهینه سازی مصرف انرژی ساختمان، <https://civilica.com/doc/1817362>
14. Adrian Bucur a Author Moga B, Nano insulation materials for application in nZEB, a Technical University of Cluj-Napoca, str. Memorandumului, nr. 28, Cluj-Napoca, 400114, Romania, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.047>
16. Anderson, R.; Roberts, D. R. Maximizing Residential Energy Savings: Net Zero Energy Home Technology Pathways; ed.; National Renewable Energy Laboratory: 2008 ; <https://doi.org/10.3390/app131910708>
17. Das, S., Subudhi, S. A review on different methodologies to study thermal comfort. Int. J. Environ. Sci. Technol. 19, 2155–2171 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03210-8>
18. Granadeiro V, Almeida M, Souto T, Leal V, Machado J, Mendes A. Thermochromic Paints on External Surfaces: Impact Assessment for a Residential Building through Thermal and Energy Simulation. Energies. 2020; 13(8):1912. <https://doi.org/10.3390/en13081912>
19. Jacobson, M. Z. Review of Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security, Energy & Environmental Science 2009, 2, 148- 173 .
20. Kuhlbusch Thomas A, Asbach C, Fissan H, Göhler D, Stintz M. Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: a review. Part Fibre Toxicol. 2011 Jul 27;8:22. <https://particleandfibretoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-8977-8-22>

21. Matzarakis, A., (2007), "climate. Thermal comfort and tourism", Meteorological Institute, University of Freiburg, Germany
22. Sanchez, F. and Sobolev, K. (2010) Nanotechnology in Concrete—A Review. Construction and Building Materials, 24, 2060-2071.
23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
24. Sánchez-García D, Bienvenido-Huertas D. Energy Implications of Thermal Comfort in Buildings Considering Climate Change. Applied Sciences. 2023; 13(19):10708. <https://doi.org/10.3390/app131910708>