ششمین همایش بین‌المللی افق های نویـن در
مهندسی برق، کامپیوتـر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mhconf.ir

تأثیر نانوتکنولوژی در مصرف بهینه انرژی در ساختمان‌ها

محمد پورجعفرقلی

استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه پدافند هوائی خاتم‌الانبیاء(ص)، تهران mpourjafargholi@gmail.com

چکیده

امروزه با توجه به تغییرات آب و هوا، مشکلات زیست محیطی، افزایش جمعیت و کمبود سوخت های فسیلی نیاز به استفاده از روشهای نوین بهبود مصرف انرژی در بخش‌های پر مصرف مانند ساختمان‌های مختلف بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. با توجه به موارد متعدد هدر رفت انرژی در ساختمانها می‌توان برای هر کدام از آنها روشهای متفاوتی از جمله استفاده از نانوعایق‌های حرارتی در پوشش ساختمان، استفاده از نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در مبدلهای حرارتی برای گرمایش ساختمانها که عملکرد بهتری نسبت به سیال پایه دارند، استفاده از انواع پنجره‌های هوشمند با پوشش‌های نازک نانومتری مانند دی‌اکسید وانادیوم مخلوط شده با فقط ۱/۹٪ فلز تنگستن که به عنوان انعکاس‌دهنده‌های گرما جهت خنک‌سازی محل مورد نظر عمل می‌کنند، و همچنین افزایش کیفیت مصالح ساختمانی اشاره کرد. در مقاله حاضر، راه‌های مختلف کاهش مصرف انرژی با استفاده از نانومواد در مصالح ساختمانی مانند پوشش‌ها و نانوعایق‌های بکار رفته در ساختمانها و استفاده از نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در وسایل گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. افزودن نانوذرات یک ماده به سیالات پایه (نانوسیالات) یا چند ماده به سیالات پایه (نانوسیالات هیبریدی) می‌تواند عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش و سرمایشی را بهبود بخشدکه منجر به کاهش مصرف انرژی می شود. چنین نانوسیالاتی رسانایی حرارتی بالاتری را در مقایسه با سیال پایه خود نشان می دهند که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می شود.

واژه‌های کلیدی

نانومواد، مصرف انرژی، نانوسیال، پنجره هوشمند، نانوعایق حرارتی

۱. مقدمه

با اطمینان می‌توان گفت که یکی از مهمترین مسائل قرن حاضر در تمام دنیا مسئله انرژی و نحوه استفاده از آن است. تلاش برای استفاده از فناوری‌های نوین مانند نانو برای کارآمدسازی منابع انرژی، یکی از الگوهای اصلی در بهبود روند مصرف انرژی است. علم نانو به دلیل توانایی در متحول ساختن ویژگی های بنیادین مواد و ایجاد مصالح جدید با ویژگی های خاص مورد توجه قرار گرفته است. پیشرفت در حوزه مواد نانوساختار، امیدهای فراوانی در زمینه افزایش کارایی ساختمان‌ها از لحاظ مصرف انرژی به وجود آورده است. نانومواد می توانند فولاد و بتن را تقویت کنند، سطوح را به حالت خود تمیز شونده تبدیل کنند، مواد را در برابر آتش مقاوم کنند، شکاف‌های ساختاری را شناسایی کنند، کارایی پنل‌های خورشیدی و خواص عایق مواد را بهبود بخشند. یک مثال، پوشش‌های ذرات دی‌اکسید تیتانیوم است که وقتی در معرض نور ماوراء بنفش قرار می‌گیرد، می‌تواند مولکول‌های واکنشی تولید کند که از تشکیل فیلم‌های باکتریایی روی سطوح جلوگیری می‌کند [۱]. نانو عایق‌ها نیز به دلیل ضخامت و رسانایی حرارتی بسیار کم که تقریباً ده برابر کمتر از مواد عایق معمولی هستند، راه حلی امیدوارکننده برای ارائه عایق حرارتی با کارایی بالا در ساختمان ها در نظر گرفته می شود. از طرف دیگر شیشه‌ها و پنجره‌های هوشمند نیز با بهره‌مندی از نانوفناوری به گونه ای ساخته شده‌اند که توان تغییر میزان جذب نور پنجره‌های مورد استفاده دارند. در نهایت برای کاهش میزان مصرف انرژی از طریق سیستمهای گرمایشی و سرمایشی در ساختمانها می‌توان به نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی اشاره نمود که باعث کاهش مصرف سوخت نسبت به سیالات پایه می‌شوند.

۲. عایق‌های حرارتی

عایق‌های حرارتی موادی هستند که برای کم کردن تلفات حرارتی سطوح مختلف ساختمان مانند دیوارها، سقف، پوشش لوله‌های آب گرم و سرد، کانال‌ها و مخازن استفاده می‌شوند[۲]. با پیشرفت فناوری و نیاز به ساختمان‌های سبک‌تر موجب کاهش ضخامت دیواره‌ها به حداقل ممکن شد، که برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی گرمایی از پوسته خارجی ساختمان‌ها و کاهش هزینه ایجاد گرما و سرما، با قرار دادن عایق حرارتی در پوسته ساختمان‌ها ضریب هدایت حرارتی مجموعه را به میزان قابل توجهی کاهش داده‌اند. اصولاً حرارت به سه طریق انتقال می‌یابد: تشعشع، جابجایی و هدایت. انتقال حرارت از جداره‌های خارجی ساختمان به شکل هدایت حرارت، مهمترین عامل اتلاف یا کسب حرارت در ساختمان‌های معمولی است. در عایق‌های حرارتی حفره‌های کوچک موجود در بین ذرات جامد، یک ماتریس صلب را ایجاد می‌کند. تخلیه هوا از این حفره‌ها در تمام انواع عایق‌های حرارتی، باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی آنها می‌شود [۳].

۱،۱،۱. نانوعایق‌های حرارتی

نانوعایق‌ها ضریب هدایت حرارتی بسیار پائینی دارند و استفاده از این عایق‌ها که از کارایی بالایی در جلوگیری از هدر رفتن انرژی در ساختمان برخوردارند، تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی دارد. به طور کلی نانوتکنولوژی ویژگی‌های منحصر به فردی را در صنعت ساخت و ساز ارائه می دهد. اینها کامپوزیت‌های قوی‌تر، ساختارهای سبک‌تر، خواص بهتر مواد سیمانی، کارایی انرژی، کاهش انتقال حرارت، سطوح ضد باکتریایی، پوشش های خود تمیز شونده، بتن خود ترمیم شونده، افزایش بازتاب شیشه و تولید انرژی هستند[۴].

استفاده از نانوعایق‌ها بر روی نمای ساختمان برای کاهش مصرف انرژی تاثیرگذار خواهد بود زیرا این پوشش‌ها پایداری حرارتی در خانه را افزایش داده و هم درفصل زمستان و هم درفصل تابستان باعث متعادل بودن دمای منزل می‌شوند. گرمایش و سرمایش فضا، بیش از ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی در ساختمانها را در سراسر جهان تشکیل می دهد و در کشورهای با آب و هوای سرد این میزان تا ۵۰ درصد افزایش می یابد. البته باید توجه داشت که در بخش مسکونی ، سهم مصرف انرژی مورد استفاده برای گرمایش و سرمایش در کشورهای با آب و هوای سرد بیش از ۶۰ درصد است [۵].

در خصوص پوشش ساختمان، تعدادی از عناصر مهم برای دستیابی به کاهش عمیق در نیازهای گرمایش و سرمایش فضا و مصرف سوخت های فسیلی ساختمانهای موجود مورد نیاز است[۶].

۱- سطوح بالای عایق در دیوارها ، سقف ها و کفها برای کاهش تلفات گرما در آب و هوای سرد ، با استفاده از ارزیابی هزینه چرخه عمر ، بهینه شده است
۲- سطوح بالای اینرسی حرارتی و سطوح بسیار منعکس کننده در سقف ها و دیوارها برای کاهش گرمازدگی تابستانی در آب و هوای گرم
۳- پنجره های با کارایی بالا با انتقال حرارت پائین و ضریب افزایش حرارت خورشیدی[1] مناسب آب و هوا.
۴- به حداقل رساندن پل های حرارتی (اجزایی که به راحتی گرما/سرما را هدایت می کنند) ، مانند اتصال دهنده های رسانای بالای حرارتی و عناصر ساختمانی
۵- سیستم های انرژی تجدید پذیر، کارآمدتر و بهتر در پوشش ساختمان ادغام شده اند.

فناوری نانو ممکن است پیشرفت های مهمی در بهره وری انرژی پوشش ساختمان و ادغام انرژی تجدیدپذیر به همراه داشته باشند ، که به مواد پیشرفته با پاسخ عملکردی بالای ثابت یا پویا اجازه می دهد تا الزامات عملکرد را با الزامات زیبایی شناسی و محدودیت های معماری متعادل سازد. اینها به طور خاص شامل هستند در [۶]:

۱- مواد عایق پیشرفته (روکش‌های ایروژل تقویت شده با فیبر، پانل های عایق خلاء) با ضخامت بسیار کم، که قادر به ایجاد یکپارچگی معماری ، حداقل بار ، کاهش پل های حرارتی و مورد استفاده در لوله کشی هستند.

هَوا-ژِل یا ایروژل یک ماده تولیدی است که کمترین چگالی را در میان مواد جامد دارد. این مادّه از یک ژل به دست می‌آید که در آن قسمت مایع ژل با گاز جایگزین می‌شود. نتیجه این فرایند ماده‌ای جامد با چگالی بسیار کم و در عین حال، ویژگی قابل‌توجه در زمینه عایق گرمایی است. هواژل در فرهنگ عامه مردم تحت نام‌های دیگری هم‌چون دود منجمد، دود جامد، هوای جامد یا دود آبی نیز شناخته می‌شود که این نام‌گذاری‌ها به دلیل ظاهر شفاف و نیز نحوه پخش نور در این ماده‌است.

۲- مواد عایق شفاف هواژل[2] برای ترکیب روشنایی روز با بهره وری انرژی
۳- مواد تغییر فاز دهنده[3] برای افزایش اینرسی حرارتی پوشش یا تیغه‌های داخلی و میسر ساختن ذخیره گرمای حرارتی برای گرمایش غیر فعال خورشیدی بدون افزایش جرم.
۴- پوشش های انعکاسی برای افزایش عایق‌بندی حرارتی یا کاهش بار اضافی تابش خورشیدی (بام های خنک)
۵- لعاب خود تمیز شونده و ضد انعکاس برای به حداکثر رساندن شفافیت درخشان
۶- لعاب عایق حرارتی پیشرفته (ایروژل یکپارچه) و لعاب حرارتی برای کاهش تلفات حرارتی از پنجره ها در آب و هوای سرد و بهبود آسایش حرارتی
۷- لعاب دینامیکی (پنجره های هوشمند) برای کنترل دینامیکی تابش خورشیدی و یکپارچه سازی HVAC
۸- لعاب PV برای کاهش تابش خورشید ورودی و در عین حال تولید برق

استفاده از محصولات فناوری نانو در واقع می تواند در ارتقاء انرژی ساختمانها در آب و هوای گرم و سرد مزایای قابل توجهی را به همراه داشته باشد (جدول(۱)).

جدول ۱- کاربرد اصلی محصولات فناوری نانو در مداخلات مقاوم سازی انرژی [۷]

آب و هوا گرم	مواد و فناوری‌های نانو اقلیم برای مقاوم‌سازی انرژی پوشش ساختمان لعاب با ضریب رشد حرارت خورشیدی بسیار پائین[4] یا لعاب دینامیکی لایه‌های نازک کنترل خورشیدی برای پنجره‌ها بام‌های خنک و پوشش های انعکاسی سیستم های سایه انداز فتوولتائیک[1]

[1] solar heat gain coefficient -SHGC
[2] Aerogel TIMs (Transparent Insulating Materials)
[3] PCM- Phase Change Materials
[4] SHGC- solar heat gain coefficient

	مواد تغییر فاز دهنده[2] (اینرسی حرارتی)
	لعاب و سطوح خود تمیز شونده
سرد	لعاب عایق پیشرفته
	لعاب دینامیک
	لعاب ضد انعکاس
	لعاب با لایه نازک معلق
	سیستم های تغییر جهت نور و سیستم‌های چشمی (اپتیکال)
	لعاب گرمایش
	پوسته فتوولتائیک یکپارچه و مورد استفاده در ساختمان[3]
	لغاب و سطوح خود تمیز شونده
	مواد عایق پیشرفته برای عایق‌بندی داخل یا خارج و عایق‌بندی تجهیزات
	مواد تغییر فاز دهنده (برای رشد غیر فعال خورشیدی یا عایق‌بندی داخلی)
	پوشش های حرارتی انعکاسی برای دیوارهای داخلی

از سایر نانوعایق‌های حرارتی مورد استفاده در ساختمان‌ها می‌توان به عایق حرارتی ایزوهم ساخته شده از الیاف نانو با تکنولوژی روز دنیا اشاره کرد. این عایق از چندین لایه الیاف پلی استر تشکیل شده است که در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد در تولید به هم چسبیده شده و پارچه نبافته ۱۰۰٪ پلی استر را ایجاد می کند. بنابراین تولید به طور کامل بدون استفاده از عوامل پیوند آلی یا شیمیایی به دست می آید. ثبات فرم عالی آن عایق بادوام را تضمین می‌کند زیرا ایزوهم شکل خود را حفظ کرده و آویزان نمی‌شود.

از ویژگی های منحصر به فرد عایق حرارتی ایزوهُم می توان به موارد زیر اشاره کرد [۸]:

۱- عایق حرارتی با ضریب هدایتی بالا
۲- غیر قابل اشتعال و کند سوز
۳- نرم و قابل انعطاف
۴- عمر بیش از صد سال
۵- عدم جذب رطوبت
۶- مقاوم در زیر خاک و آب
۷- ضد پوسیدگی و سایش
۸- قابل نصب در تمامی سطوح مسطح و شیب‌دار و بدون زیر سازی
۹- سازگار با انواع ملات و آب و هوای گرم
۱۰- جلوگیری از تعریق دیوارها در فصل زمستان
۱۱- کاملا بهداشتی

علاوه بر توضیحات ذکر شده در مورد ایزوهم، این عایق با ضخامت کم تولید و بدون نیاز به زیرسازی قابل نصب می باشد و همچنین تمامی ملات های ساختمانی اعم از گچ و سیمان روی محصول به راحتی اجرا می گردد [۹].

---

[1] PV-Photovoltaic
[2] PMC-Phase Change Materials
[3] BIPV/BAPV- Building Integrated and Applied Photovoltaic

۲،۱،۱. پنجره‌های هوشمند

حدود یک سوم انرژی یک ساختمان از طریق پنجره‌ها هدر می رود. تحقیقات متعددی برای یافتن راه‌های ذخیره انرژی انجام شده و نیاز به ذخیره انرژی موجب استفاده از انواع جدیدی از پنجره‌های شیشه‌ای در ساختمان‌ها شده است [۱۰]. یکی از بهترین راه‌های کنترل اتلاف انرژی استفاده از پنجره‌های هوشمند است .

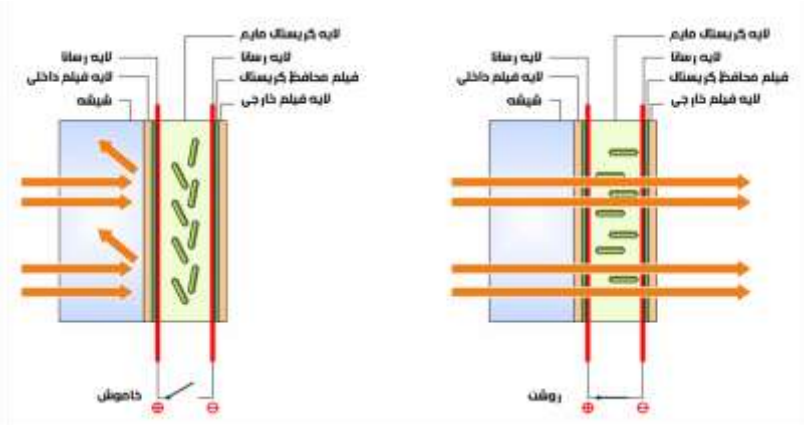
شیشه پنجره‌های هوشمند به گونه‌ای ساخته می‌شوند که نسبت به شرایط حرارتی محیط تغییر کرده و میزان نور ورودی را تنظیم می کنند، مثلاً از عبور گرمای بیش از حد جلوگیری می‌کنند. بیشتر شیشه‌هایی که در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، در جبهه بیرونی ساختمان قرار می‌گیرند و از این رو، کنترل نور و حرارت وارد شده به بنا از این راه انجام شده و شیشه‌ها نقش بسیار مهم و پر رنگی در پایدار بودن (زیست‌محیطی) ساختمان ایفا خواهند کرد [۱۱]. هم اکنون پوشش‌های نازک نانومتری دی‌اکسید وانادیم مخلوط شده با فقط ۱/۹٪ فلز تنگستن در پنجره‌ها استفاده می‌شود که به عنوان انعکاس‌دهنده‌های گرما عمل می‌کنند، در حالی‌که همچنان تمام نور مرئی را از خود عبور می‌دهند. دی‌اکسید وانادیم از جمله گزینه‌های مهم در حوزه الکترونیک و نور است. این ماده قادر است از حالت شفاف به حالت مات در آید. در حالت شفاف در دمای پایین خواص نیمه‌هادی داشته و تابش مادون قرمز از آن عبور می‌کند اما در حالت مات خاصیت فلزی داشته و نور مرئی از آن عبور می‌کند[۱۲].

انواع شیشه هوشمند

پنجره هوشمند با شیشه کریستال مایع

کریستال‌های مایع یا بلورهای مایع یکی از فازهای ماده هستند که خواصی بین مایعات معمولی و کریستال‌های جامد دارند. به عنوان مثال، یک کریستال مایع ممکن است مانند یک مایع جریان داشته باشد، اما ممکن است مولکولهای آن به شکلی شبیه به کریستال جهت‌یابی شوند. با اینکه مایعات معمولاً همسان‌گرد (ایزوتروپ) هستند، حدود ۲۰۰ ماده شناخته شده‌اند که در حالت مایع و در دماهایی بالاتر از دمای ذوبشان خواص ناهمسان‌گرد دارند. به این مواد، کریستال (بلور) مایع گفته می‌شود.

ساختمان درونی شیشه کریستال مایع از دو لایه شفاف قلع به عنوان الکترود تشکیل شده است که لایه‌ای از کریستال مایع بین آنها ساندویچ شده است (شکل ۱).با گذراندن جریان الکتریسیته از فیلم کریستال مایع، شیشه شفاف می‌شود. با قطع جریان، کریستال‌ها با جهت‌گیری تصادفی خود در فضا موجب پخش کردن نور، و در نتیجه مات شدن شیشه می‌شوند. پنجره‌های هوشمند ساخته شده با این شیشه‌ها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند؛ برای این کار، پنجره‌ها سرمای درون خانه را حفظ کرده و مقدار نور ورودی به داخل را کنترل می‌کنند.



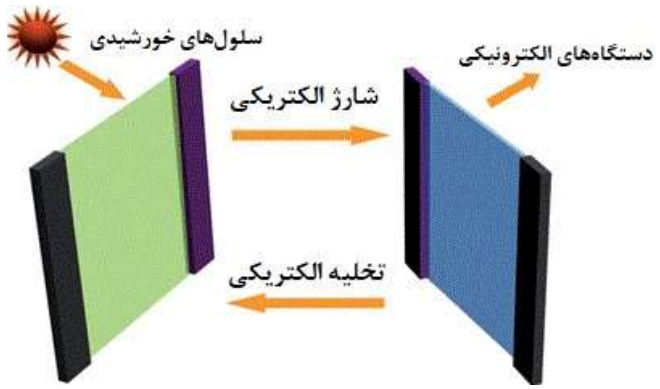
شکل ۱-نمایش نحوه عملکرد شیشه های الکتروکرومیک (انواع فیلم کریستال مایع) [۱۳]

پنجره‌های هوشمند (آرایه‌های نانوسیمی پلی‌آنیلین)

در ساخت این پنجره‌ها از ابرخازن‌ها استفاده شده است. این ابرخازن‌ها درون پنجره‌های الکترونیکی قرار داده شده‌اند؛ پنجره‌هایی که قادر به تغییر رنگ هستند. زمانی که تابش نور خورشید شدید است، این پنجره‌ها نور را جذب کرده و در خود ذخیره می‌کنند (شکل ۲)، زمانی که ظرفیت این پنجره‌ها تکمیل شد، شیشه‌ها تاریک شده و عبور نور را محدود می‌کنند. با این کار مقدار نور ورودی به خانه و دمای آن تحت کنترل در می‌آید و از سوی دیگر انرژی ذخیره شده در آن را می‌توان برای استفاده در ادوات الکترونیکی دیگر نظیر نمایشگرهای تلویزیونی به کار گرفت. با مصرف انرژی ذخیره شده در پنجره هوشمند توسط دیگر ادوات، خازن‌ها تخلیه شده و دوباره با جذب نور خورشید شارژ می‌شوند.

این پنجره‌های هوشمند از آرایه‌های نانوسیمی پلی‌آنیلین ساخته می‌شوند که روی یک فیلم شفاف رسوب داده شده‌اند؛ فیلم‌های شفاف، خود توسط لایه‌های رسانا پوشانده شده‌اند. این نانوسیم‌ها به وسیله یک ژل الکترولیتی پوشانده می‌شوند تا به عنوان الکترود مورد استفاده قرار گیرند. دو الکترود به صورت ساندویچی دور هم پیچیده می‌شوند تا یک ساختار جدید ایجاد شود [۱۴].

پلی‌آنیلین دارای ظرفیت بالایی است؛ و هزینه تولید آن اندک است، از دیگر مزایای این ماده شفاف بودن و انعطاف‌پذیر بودن آن است. پارامتر انعطاف‌پذیر بودن بسیار مهم است؛ زیرا به راحتی می‌توان آن را به صورت رول درآورد و در ادواتی با اشکال مختلف استفاده کرد، برای مثال می‌توان پرده‌هایی هوشمند تولید کرد.



شکل ۲- شیشه‌هایی که نور خورشید را به الکتریسیته تبدیل کرده و در اَبَرخازن ذخیره می‌کنند [۱۵].

سلول خورشیدی یا سلول فتوولتائیک، یک قطعه الکترونیکی است که به کمک اثر فوتوولتاییک، انرژی نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی ساخته شده از ویفرهای سیلیکونی کاربرد بسیاری دارند. ویفر سیلیکونی یک برش نازک از یک نیمه‌رسانا مانند سیلیکون بلورین است که در ساخت تراشه‌های الکترونیکی و در فتوولتائیک برای ساخت سلول‌های خورشیدی کاربرد دارد [۱۶]. از این ویفرها در میکروابزارهای الکترونیکی به عنوان یک زیرلایه استفاده می‌شود به گونه‌ای که این میکروابزارها درون و روی ویفرها ساخته می‌شوند.

۲. نقش نانوسیال در کاهش مصرف انرژی در ساختمان

برخی تغییرات ساختاری در سیالات پایه مانند افزودن نانوذرات به آن‌ها که نانوسیالات نامیده می‌شوند، ممکن است عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش و سرمایشی را بهبود بخشدکه منجر به کاهش مصرف انرژی می شود. نانوسیالات، سوسپانسیون های کلوئیدی مهندسی شده نانوذرات در یک سیال پایه مانند آب، روغن و اتیلن گلیکول هستند[۱۹-۱۷]. نانوذرات مورد استفاده در نانوسیال‌ها با اندازه

۱۰۰-۱ نانومتر معمولاً از فلزات، اکسیدها، کاربیدها یا نانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند. افزودن نانوذرات فلزی با ضریب هدایت حرارتی بالا مانند مس، آلومینیوم، سیلیکون و نقره به سیالات پایه، باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می‌شود، میگردد[۲۱-۲۰]. بنابراین قابلیت انتقال حرارت کلی آنها را بالا می‌برد[۲۳-۲۲]. نانوسیالات با خواص جدیدی که نسبت به سیالات پایه دارند در بسیاری از موارد کاربردی انتقال حرارت مانند میکروالکترونیک، پیل‌های سوختی، فرآیندهای دارویی، و موتورهای هیبریدی[۲۴]، خنک‌کننده موتور، چیلر و مبدل‌های حرارتی مفید هستند[۲۵]. باید توجه داشت که اطلاع از دانش رفتار رئولوژیکی[۱] نانوسیالات در تصمیم گیری برای مناسب بودن آنها برای کاربردهای انتقال حرارت جابجایی حیاتی است[۲۷-۲۶].

تجزیه و تحلیل نشان می دهد که استفاده از نانوسیالات در مبدل‌های حرارتی می‌تواند نرخ جریان حجمی و جرمی را کاهش دهد و منجر به صرفه جویی کلی در توان پمپاژ شود. نانوسیالات به سیستم‌های گرمایشی کوچک‌تری نیاز دارند که می‌توانند همان مقدار انرژی حرارتی را با سیستم‌های گرمایش بزرگ‌تر با استفاده از سیالات پایه ارائه کنند، اما هزینه کمتری دارند. این امر هزینه تجهیزات اولیه را بدون احتساب هزینه نانوسیال کاهش می‌دهد و همچنین باعث کاهش آلاینده‌های محیطی می‌شود زیرا واحدهای گرمایشی کوچکتر، انرژی کمتری مصرف می‌کنند و واحد انتقال حرارت در پایان چرخه عمر خود، ضایعات مایع و مواد کمتری برای دور انداختن دارد [۲۸].

تحقیقات متعددی درباره نتایج استفاده از نانوسیالات در سیتمهای گرمایشی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به کار دواتا و همکاران [۲۸] اشاده کرد. آنهاکاربرد نانوسیال برای استفاده در سیستمهای گرمایشی ساختمان را مورد مطالعه قرار داده و به نتایج زیر رسیدند.

۱- ویسکوزیته نانوسیال به طور تصاعدی با افزایش دما کاهش می یابد.

۲- با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد.

۳- در عدد رینولدز ثابت، با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می یابد.

۴- استفاده از نانوسیالات برای گرم کردن ساختمان‌ها می‌تواند اندازه سیستم انتقال حرارت را کاهش دهد و در نتیجه باعث کاهش افت فشار و قدرت پمپاژ شود.

همچنین داهاری ماهر و همکاران [۲۹] انتقال حرارت نانوسیالات در گرمایش ساختمان را بررسی کردند. آنها انتقال حرارت جابجایی اجباری توربولانس در یک لوله دایروی گرم شده را برای سه نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید مس (Cuo)، دی اکسید سیلیسیم یا سیلیکا (Sio_2) به صورت عددی مطالعه کرده و به نتایج زیر دست یافتند:

۱- نرخ انتقال حرارت با افزودن نانوذرات در مقایسه با اتیلن گلیکول/آب افزایش یافت.

۲- میزان انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و عدد رینولدز افزایش می‌یابد و تأثیر عدد رینولدز در افزایش میزان انتقال حرارت بیشتر از غلظت حجمی است.

۳- افت فشار و تنش برشی دیواره از طریق لوله با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و عدد رینولدز جریان افزایش می‌یابد.

۴- با توجه به تجزیه و تحلیل رفتار هیدرودینامیکی جریان در داخل لوله، مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار افزایش می یابد.

۵- به دلیل خواص و پتانسیل بالای انتقال حرارت در نانوسیالات، استفاده از نانوسیال منجر به کاهش دمای سطح در مقایسه با سیال پایه می شود. حداکثر افزایش در نسبت ضریب انتقال حرارت همرفتی در اعداد رینولدز پایین رخ می دهد . این نسبت با افزایش عدد رینولدز به وضوح کاهش می یابد .این نشان می دهد که کاربرد نانوسیال برای کارایی در اعداد رینولدز پایین مناسب تر است.

---

[۱] علم جریان و تغییر شکل جریان‌ها که برهمکنش بین نیروها، تغییر شکل و زمان را توصیف می‌کند

بنابراین می‌توان در کل استفاده از نانوسیالات مناسب با ضریب هدایت حرارتی بالا و توزیع مناسب ذرات در سیال پایه به کاهش مصرف انرژی در سیستمهای گرمایشی ساختمانها امیدوار بود هر چند که برای بدست آموردن نتایج مطلوب هنوز به تحقیقات تجربی بیشتری مورد نیاز است. یکی از دیگر تحقیقات در حال انجام، کار بر روی نانوسیالات هیبریدی است که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.

۱،۲.نانوسیال هیبریدی

نانوذرات هیبریدی به نانوذراتی گفته می‌شود که از دو یا چند ماده مختلف در اندازه‌های نانومتری تشکیل شده‌اند. سیالات تهیه شده با نانوذرات هیبریدی به عنوان نانوسیال هیبریدی شناخته می شوند. افزایش انتقال حرارت نانوسیالات در درجه اول به هدایت حرارتی نانوذرات، غلظت حجم ذرات و نرخ جریان جرمی بستگی دارد. تحت غلظت‌های ثابت حجم ذرات و نرخ‌های جریان، افزایش انتقال حرارت تنها به هدایت حرارتی نانوذرات بستگی دارد. رسانایی حرارتی نانوذرات ممکن است با تهیه نانوذرات هیبریدی تغییر یابد. انگیزه برای تهیه نانوسیال‌های هیبریدی، دستیابی به افزایش انتقال حرارت با افزایش رسانایی حرارتی این نانوسیال‌ها است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوسیال‌های هیبریدی، سیالاتی با انتقال حرارتی مؤثرتر از نانوسیال‌های مبتنی بر نانوذرات تک فاز یا سیال‌های معمولی هستند [۳۰].

البته باید توجه داشت که پایداری نانوذرات نانوکامپوزیتی در سیال پایه یک چالش بزرگ است. در حالی که برای نانوسیال‌های تک فاز، پایداری ذرات با تکنیک‌های تثبیت‌شده به دست می‌آید، ولیکن برای نانوسیال‌های مبتنی بر نانوکامپوزیت، پراکندگی دو ماده مختلف در سیال پایه به دلیل بار سطحی (مثبت یا منفی)، مشکل قابل‌توجهی ایجاد می‌کند که از یک ذره به ذره دیگر متفاوت است. بنابراین، هنگام تهیه نانوسیال های هیبریدی باید به جنبه های زیر توجه شود:

۱- انتخاب مواد مناسب،
۲- اختلاط مواد نانوکامپوزیت،
۳- پیوند بین مواد درگیر در کامپوزیت،
۴- استفاده از سورفکتانت[۱] کافی

یکی از چالشهای نانوسیالات هیبریدی، افزایش ویسکوزیته آنها در مقایسه با سیال پایه است. نانوسیالات هنگامی که در جریان‌های داخلی استفاده می شوند، منجر به افزایش اصطکاک و افت فشار و در نتیجه افزایش قدرت پمپاژ می شوند.

۲،۲.خواص ترموفیزیکی نانوسیال[۳۱]

ویژگیهای زیر برای نانوسیالات گوناگون توسط محققین مختلف مشاهده شده است:

۱-چگالی نانوسیال

الف) با قانون مخلوط کلاسیک، چگالی نانوسیال به عنوان تابعی از غلظت حجمی (φ) و چگالی هر عنصر به صورت زیر قابل بیان است:

$\rho = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$	(۱)

ب) غلظت حجمی نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$\varphi = \frac{\rho_f \varphi_m}{\rho_f \varphi_m + \rho_s(1-\varphi_m)+}$	(۲)

که φ_m کسر جرمی نانوذره می‌باشد.

[۱] سورفکتانت (ماده فعال سطحی): سورفکتانت‌ها موادی هستند که هنگامی که به مقدار بسیار ناچیز استفاده می‌شوند کشش سطحی آب را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

۲- گرمای ویژه نانوسیال

بر اساس قانون مخلوط، گرمای ویژه نانوسیال‌ها به صورت تابعی از غلظت حجمی و چگالی هر عنصر بیان می‌شود[۳۲]:

$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_p$	(۳)

ρ چگالی نانوسیال،f سیال و p نانوذره هستند.

۳- ضریب هدایت حرارتی

با توجه به نتایج تجربی محققان، ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اعـم از فلـزی یـا اکسـیدی و همچنـین بشدت به کسر حجمی نانوذرات معلق در نانوسیال وابسته می‌باشد (جدول (۲)).

جدول ۲- تعدادی از مدلهای اصلی مورد استفاده برای تخمین ضریب هدایت حرارتی[۳۳]

مدل	رابطه
مدل ماکسول	$\frac{K_{eff}}{K_m} = 1 + \frac{3(\alpha-1)v}{(\alpha+2)-(\alpha-1)v}$
مدل هامیلتون-کراسر	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{\alpha+(n-1)-(n-1)(1-\alpha)v}{\alpha+(n-1)+(1-\alpha)v}$
مدل دیویس	$\frac{K_{eff}}{K_m} = 1 + \frac{3(\alpha-1)v}{(\alpha+2)-(\alpha-1)v}\left[v + f(\alpha)v^2 + O(v)^3\right]$
$\beta = R_k K_m / R_2$ (Kapitza) مقاوت کاپیتزا R_k و هستند.	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{(\alpha(1+2\beta)+2)+2v(\alpha(1-\beta)-1)}{(\alpha(1+2\beta)+2)-v(\alpha(1-\beta)-1)}$
مدل جانگ و چوی	$K_{eff} = K_m + (1-v) + K_2 v + vh\delta_T$
مدل پراشر و همکاران	$\frac{K_{eff}}{K_m} = \left\{1 + AR_e^m \Pr^{0.333} \Phi\left[2(1-v)/(2+v)\right]\right\}$

k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر مخلوط جامد- سیال، $a = K_2 / K_m$ ، K_m و K_2 بترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و ذره، n ضریب شکل تجربی ($n = \frac{3}{\psi}$ و ψ کرویت ذره[۱]). u کسر حجمی، h ضریب انتقال حرارت جابجایی و δ_T ضخامت لایه هستند.

۲،۲.خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی

با توجه به نتایج تجربی پژوهشگران از روابط چگالی، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی زیر برای نانوسیالات هیبریدی به شرح جدول (۳) می‌توان بهره برد:

جدول ۳- تعدادی از مدلهای مورد استفاده برای تخمین خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی

خاصیت ترموفیزیکی	رابطه
چگالی[۳۴]	$\rho_{hnf} = \phi_{np1}\rho_{np1} + \phi_{np2}\rho_{np2} + \left(1-\phi_{np1}-\phi_{np2}\right)\rho_{bf}$

[۱] کرویت برای ذرات کروی و استوانه‌ای به ترتیب ۱ و ۰/۵ می‌باشد.

گرمای ویژه[۳۴]	$\rho_{hnf}C_{p,hnf} = \phi_{np1}\rho_{np1}C_{p,np1} + \phi_{np2}\rho_{np2}C_{p,np2} + \left(1-\phi_{np1}-\phi_{np2}\right)\rho_{bf}C_{p,bf}$
ضریب هدایت حرارتی [۳۵]	$k_{HNF} = \frac{2(\phi_{NP1}k_{NP1}+\phi_{NP2}k_{NP2}) - 2k_{BF}(\phi_{NP1}+\phi_{NP2}) + 2k_{BF} + \left[\frac{\phi_{NP1}k_{NP1}+\phi_{NP2}k_{NP2}}{\phi_{NP1}+\phi_{NP2}}\right]}{-(\phi_{NP1}k_{NP1}+\phi_{NP2}k_{NP2}) - k_{BF}(\phi_{NP1}+\phi_{NP2}) + 2k_{BF} + \left[\frac{\phi_{NP1}k_{NP1}+\phi_{NP2}k_{NP2}}{\phi_{NP1}+\phi_{NP2}}\right]}$
ویسکوزیته [۳۵]	$\mu_{HNF} = \frac{\mu_{BF}}{(1-\phi_{NP1}-\phi_{NP2})^{2.5}}$

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، راه‌های مختلف کاهش مصرف انرژی با استفاده از نانومواد در مصالح ساختمانی مانند پوشش‌ها و نانوعایق‌های بکار رفته در ساختمانها و استفاده از نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در وسایل گرمایش مورد بررسی قرار گرفت. افزودن نانوذرات یک ماده به سیالات پایه (نانوسیالات) یا چند ماده به سیالات پایه (نانوسیالات هیبریدی) می‌تواند عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش و سرمایشی را بهبود بخشدکه منجر به کاهش مصرف انرژی می شود.

یکی دیگر از راههای مؤثرکنترل اتلاف انرژی استفاده از پنجره‌های هوشمند است. پنجره‌های هوشمند طوری طراحی شده اند که می توانند با محیط تعامل و سازگاری داشته باشند، مثلاً گرمای بیش از حد را دفع خواهندکرد. چنین شیشه هایی در ماه‌های گرم که هزینه مصرف انرژی به خاطر تهویه هوا بالا است مناسب هستند. پنجره‌های رنگی حساس به نور (فوتوکرومیک) که پرتوهای خورشید را دفع می‌کنند سالهاست ساخته شده اند.

منابع

[1] Pacheco Torgal F., Cinzia B., Siva K., Claes-Göran G., Volodymyr I., 2016. Nano and Biotech Based Materials for Energy, Building EfficiencySpringer International Publishing Switzerland.
[2]. https://fa.wikipedia.org/wiki/ عایق_حرارتی
[3] Theodore L., Adrienne S., Incropera F.,Dewitt D., 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, SEVENTH EDITION, by John Wiley & Sons, Inc..
[4] A.K. Rana, et al., 2009 Significance of nanotechnology in construction engineering, Int. J. Recent Trends Eng. 1 (4) 6.
[5]. IEA, 2013. *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050* (OECD/IEA, Paris).
[6]. M. Casini (2016), *Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance* (Woodhead Publishing, Cambridge, 2016).
[7]. Marco Casini (2016), Nano insulating materials and energy retrofit of buildings, AIP Conference Proceedings 1749, 020005.
[8] https://www.airgreeninsulation.com/home-iso
[9] https://www.sakhtemanchi.com/4-عایق-حرارتی-پرمصرف-در-ساختمان/
[10] http://mazeco.ir/articles/smart-glass/
[11] Calkins M. (2009): Materials for Sustainable Sites (A Complete Guide to the Evaluation, Selection and Use of Sustainable Construction Materials),1st edition, newjersey, usa, wiley.
[12] https://news.nano.ir/36789/بهبود-خواص-دیاکسید-وانادیم-برای
[13]https://toranji.ir/2017/06/19/شیشه-های-هوشمند-کریستال-مایع -pdlc/

[۱۴] ستاد ویژه توسعه نانو، گزارشهای رصد فناوری نانو در صنعت، کاربردفناوری نانو در صنعت ساخت و ساز (آلمان)

[15].https://mychem.ir/news/world-news/1391/05/ذخیره-انرژی-در-پنجره‌های-هوشمند

[16]. *Laplante, Phillip A. (2005). "Wafer". Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press. p. 739. ISBN 978-0-8493-3086-5.*

[17] *Taylor, R.A.; et al. (2013). "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids". Journal of Applied Physics. **113** (1): 011301–011301–19. Bibcode:2013JAP...113a1301T. doi:10.1063/1.4754271.*

[18] *Buongiorno, J. (March 2006). "Convective Transport in Nanofluids". Journal of Heat Transfer. **128** (3): 240–250. doi:10.1115/1.2150834. Retrieved 27 March 2010.*

[19] *"Argonne Transportation Technology R&D Center". Retrieved 27 March 2010.*

[20] N. Zhao, S. Li, J. Yang, 2016. A review on nanofluids: Data-driven modeling of thermalphysical properties and the application in automotive radiator, Renew. Sustain. Energy Rev. (66) pp. 596–616, https://doi.org/10.1016/j. rser.2016.08.029.

[21] V. Murali Krishna, K.M. Sandeep, 2019. Numerical analysis of forced convective heat transfer of nanofluids in microchannel for cooling electronic equipment, Mater. Today:. Proc. (17) pp. 295–302, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.433.

[22] Xuan Y, Li Q., 2003. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. ASME J Heat Transfer, 125:151–5.

[23] *Kakaç, Sadik; Anchasa Pramuanjaroenkij (2009). "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer. **52** (13–14): 3187–3196. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006.*

[24] *Das, Sarit K.; Stephen U. S. Choi; Wenhua Yu; T. Pradeep (2007). Nanofluids: Science and Technology. Wiley-Interscience. p. 397. Archived from the original on 3 December 2010. Retrieved 27 March 2010.*

[25] Minkowycz, W., et al., 2013. Nanoparticle Heat Transfer and Fluid Flow, CRC Press, Taylor & Francis.

[26] S. Witharana, H. Chen, Y. Ding; 2011. Stability of nanofluids in quiescent and shear flow fields, Nanoscale Research Letters, 6:231 http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/231/

[27] *Chen, H.; Witharana, S.; et al. (2009). "Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on Rheology". Particuology. **7** (2): 151–157. doi:10.1016/j.partic.2009.01.005.*

[28] Devdatta P. Kulkarni, Debendra K. Das*, Ravikanth S. Vajjha, 2009. Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution, Applied Energy (86), pp. 2566–2573.

[29] Dhahri Maher, Aouinet Hana, Sammouda Habib, 2020. Investigation of heat-transfer and fluid dynamic of nanofluids used in heating building, Nanomaterials and Energy, Volume 9, Issue 2, pp. 202-214

[30] L. SyamSundar, K.V.Sharma, Manoj K.Singh, A.C.M.Sousa. 2017. Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 68, part 1, pp 185-198.

[۳۱] محمد پورجعفرقلی*، قنبرعلی شیخ زاده. ۱۳۹۳. بررسی ویژگی های نانوسیالات و چالش های استفاده از آنها برای بهبود انتقال حرارت. مجله *مهندسی مکانیک، شماره ۹۸، ص. ۴۱-۲۷*

[32] Xuan Y, Roetzel W (2000) Conceptions for heat transfer correlation of Nanofluids. Int J Heat Mass Transf 43:3701–3708

[33]. E.K. Goharshadi, H. Ahmadzadeh, S. Samiee and M. Hadadian, 2013. "Nanofluids for Heat Transfer Enhancement-A Review ", Phys. Chem. Res., Vol. 1, No. 1, pp. 1-33.

[34] Ho CJ, Huang JB, Tsai PS, Yang YM., 2010. Preparation and properties of hybrid water-based suspension of Al2O3 nanoparticles and MEPCM particles as functional forced convection fluid. Int Commun Heat Mass Transf; 37:490–4.

[35]. Hassan, M.; Marin, M.; Ellahi, R.; Alamri, S.Z., 2018. Exploration of convective heat transfer and flow characteristics synthesis by Cu–Ag/water hybrid-nanofluids. Heat Transf. Res. 49, 1837–1848.