



## بررسی کاربرد فناوری نانو برای افزایش جذب مستقیم تابش خورشیدی

مجتبی جمعیتی<sup>\*۱</sup>

۱. استادیار، گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران،

\* نویسنده مسئول: [drmjamiati@gmail.com](mailto:drmjamiati@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

### چکیده

هدف از این تحقیق ارزیابی پتانسیل نانوسیال‌های خورشیدی (مایع با نانوذرات پراکنده) برای جذب مستقیم تابش خورشید و تولید بخار است. در حال حاضر سیستم‌های انرژی خورشیدی متحمل تلفات زیادی به دلیل فرآیندهای انتقال حرارت می‌شوند، بنابراین، توسعه فناوری نانو و دستاوردهای آن مانند ذرات مختلف، امیدهای زیادی را در جهت افزایش کارایی کلکتورهای خورشیدی از طریق جذب مستقیم نور خورشید ایجاد نموده است. به منظور استفاده بهینه از سیستم‌های نانوسیال خورشیدی، نیاز به شناسایی و مطالعه آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق چهار نانوسیال مختلف سنتز، مشخص و ارزیابی شده است. دو مورد از آنها نانوسیال مبتنی بر آب و دو مورد دیگر نانوسیال مبتنی بر روغن حرارتی بودند. همچنین خواص نوری نانوسیال‌ها در دمای اتاق با یک اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شده و با سیال پایه مقایسه گردیده است. خواص نوری، به غیر از اندازه‌گیری در دمای اتاق، پس از عملیات حرارتی انجام شده بر روی نانوسیال‌ها در دمای بالا نیز ارزیابی شده است. این افزایش دما با هدف بازآفرینی شرایط عملیاتی برای کسانی که به کاربردهای واقعی نزدیک تر هستند، می‌باشد. اندازه‌گیری‌های DLS یک اندازه متوسط هیدرودینامیکی مشابه ۱۳۸ نانومتر برای نمونه حاوی SDS و ۱۳۵ نانومتر برای نمونه حاوی SDS و PVP را نشان می‌دهند.

**کلمات کلیدی:** فناوری نانو، کلکتور خورشیدی، بهینه‌سازی انرژی، تابش خورشیدی، نانوسیال.

### مقدمه

تغییر اقلیم نتیجه استفاده از فناوری‌هایی است که  $CO_2$  را به جو منتشر می‌کنند. این فناوری‌ها سوخت‌های فسیلی را عمدتاً برای تولید انرژی می‌سوزانند. بنابراین، انرژی‌های تجدید پذیر نقش رو به رشدی در اقتصاد جهانی ایفا می‌کنند زیرا کمتر مضر هستند، سازگارتر با محیط زیست هستند و در عین حال از منابع طبیعی مانند باد، خورشید و مخازن زمین گرمایی بهره می‌برند. در میان انواع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی و به طور خاص انرژی حرارتی خورشیدی از اهمیت بالایی برخوردار است. فرآیند حرارتی خورشیدی از دو جزء تشکیل شده است، یعنی جمع‌آوری تابش خورشیدی و تبدیل این انرژی به گرمای محسوس و یا نهان یک حامل گرما تبدیل می‌شود. فناوری‌های معمول حرارتی خورشیدی از سطوح سیاه به عنوان جاذب استفاده می‌کنند که گرما را به سیال انتقال حرارت<sup>۱</sup> (HTF) منتقل می‌کند [۴-۱].

این استراتژی با برخی اشکالات مرتبط است و جایگزین‌های جدید برای دستیابی به کارایی بالاتر در حال حاضر تحت مطالعه می‌باشند [۵]. یکی از جایگزین‌هایی که اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند، استفاده از نانوسیال‌های خورشیدی است. نانوسیال‌ها سوسپانسیون‌هایی هستند که در آنها نانوذرات با اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰ نانومتر پراکنده می‌شوند. متداول‌ترین مواد نانو ذرات فلزات، اکسیدهای فلزی و آلوتروپ کربن هستند. در میان دیگران، آب اغلب به عنوان سیال پایه استفاده می‌شود. یک گروه از خانواده نانوسیالات، نانوسیالات خورشیدی هستند. این مایعات خاص نور خورشید را در محدوده مرئی و نزدیک مادون قرمز جذب می‌کنند. بار نانوذرات این سوسپانسیون‌های ویژه نسبتاً کم است. با این حال، نانوذرات پراکنده قابلیت جذب بالایی را با توجه به تابش خورشیدی نشان می‌دهند. انتظار این است که نانوذرات اضافه شده به سیال پایه، توانایی جذب و هدایت حرارتی آن و در نتیجه کل فرآیند انتقال حرارت را بهبود بخشد [۶ و ۷]. بنابراین، از آنجایی که نانوسیال‌های خورشیدی به عنوان



جاذب مستقیم نور خورشید پیشنهاد می‌شوند، مطالعه خواص نوری آنها برای اطمینان از مناسب بودن آن از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، لازم به ذکر است که افزودن نانوذرات به آب باعث کدورت می‌شود، که این خاصیت نوری یک سوسپانسیون است که باعث می‌شود نور به جای انتقال از طریق سوسپانسیون، پراکنده و جذب شود [۹و۸].

کدورت با غلظت ذرات جامد معلق در آب مرتبط است. مطالعات اولیه در مورد بررسی سیالات سیاه (مثل کربن) که به عنوان مبدل حرارتی در کلکتور حرارتی خورشیدی کار می‌کنند قبلاً انجام شده است و نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد [۹و۱۰]. اصطلاح نانوسیال سیاه معمولاً در جامعه نانوسیال برای مشخص کردن سوسپانسیون‌های عمدتاً مبتنی بر کربن (به جز الماس) اما در هر صورت نانوذرات سیاه برای تشخیص این سوسپانسیون‌های خاص از سایر سوسپانسیون‌ها استفاده می‌شود. کلکتورهای حرارتی خورشیدی دستگاه‌هایی هستند که انرژی تابش خورشید را با استفاده از نانوسیال سیاه به عنوان جاذب مستقیم انرژی خورشیدی برداشت می‌کنند. این واقعیت که این سیالات در کلکتورهای حرارتی خورشیدی هم به عنوان جاذب نور بسیار کارآمد و هم به عنوان سیالات انتقال حرارت استفاده می‌شوند، نشان دهنده یک مزیت مهم نسبت به سیستم‌های فعلی است که از یک مایع شفاف مبادله کننده گرما با یک جاذب جامد استفاده می‌کنند. نانوسیال‌های سیاه ممکن است بر اساس جوهر آلی هندی<sup>۱</sup> [۱۱] یا نانوشاخ‌های کربن مصنوعی<sup>۲</sup> (CNH) باشند. با این حال، این مایعات از طریق قرار گرفتن در معرض نور خورشید به میزان‌های مختلفی تجزیه می‌شوند. حتی اگر این ایراد تقریباً در تمام موادی که تاکنون مورد مطالعه قرار گرفته است وجود داشته باشد، به نظر می‌رسد که تعلیق‌های با CNH هنوز کاندیدهای بسیار امیدوارکننده‌ای برای جاذب‌های خورشیدی هستند [۹].

در این کار، نانوسیال‌های سیاه رنگ با توجه به قابلیت‌های آنها برای استفاده به عنوان جاذب مستقیم نور خورشید مورد بررسی قرار می‌گیرند. ظرفیت جذب حرارت نانوسیال سیاه رنگ با قرار دادن نمونه‌ها در معرض خورشید مصنوعی و اندازه گیری تغییرات دمایی هر نمونه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های ویژگی نوری انجام می‌شود که امکان تعیین کسری از انرژی جذب شده و توزیع فضایی آن‌ها را فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه به طراحی بهینه کلکتور خورشیدی و سیستم‌های جذب اجازه می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

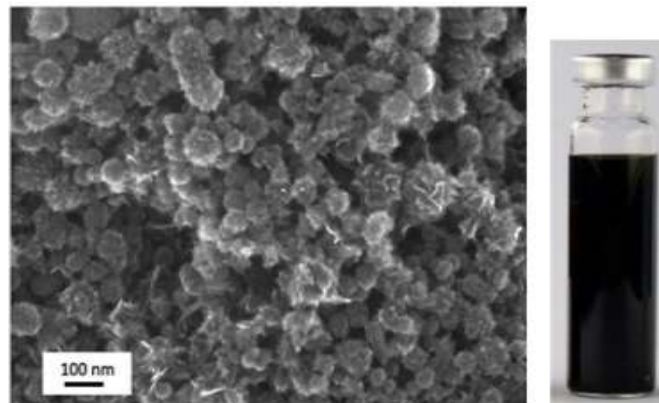
آزمایش‌ها در یک محفظه جداگانه با فضای موجود در حدود ۲۵۰ متر مکعب (۶۵۰۰ میلی‌متر در ۵۵۰۰ میلی‌متر در ۷۰۰۰ میلی‌متر) انجام می‌شود. یک فن با توان ۵۰۰ وات در این محفظه اندازه‌گیری قرار دارد تا دمای محیط یکنواخت در طول دوره اندازه‌گیری تضمین شود و همچنین تمامی آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده انجام شوند. خورشید مصنوعی شامل دوازده لامپ با توان ۲۰۰۰ وات است. شیب ساختار حامل لامپ‌ها  $CO_2 64 \pm 0.3^\circ$  به منظور دستیابی به تابش بهینه با توجه به نگهدارنده نمونه است. فن‌ها برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد لامپ‌ها، یک خروجی خطی در زیر لامپ‌ها با هوای خنک کننده فراهم می‌کنند. نگهدارنده نمونه شامل یک صفحه سیاه رنگ به مساحت ۱ متر مربع (۱۰۰۰ میلی‌متر در ۱۰۰۰ میلی‌متر) است که از ۵ لوله شیشه‌ای پشتیبانی می‌کند. چهار لوله از پنج لوله دارای قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر هستند. تمام لوله‌ها با یک پلاگین لاستیکی مهر و موم شده‌اند. با این حال، مهر و موم‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که هنگام گرم شدن نمونه، هوا بتواند از آن خارج شود و در نتیجه سیال داخل منبسط شود. به منظور ایمنی، کل نگهدارنده نمونه در یک وان کم عمق قرار داده می‌شود تا هر نانوسیال سیاه رنگی را که ممکن است در طول آزمایش‌ها فرار کند، جذب کند. تابش خورشید مصنوعی با استفاده از یک پیرانومتر (KIPP، CMP11 و ZONEN، هلند) اندازه‌گیری می‌شود. پیرانومتر در قسمت میانی بالایی نگهدارنده نمونه قرار دارد.

1 . organic Indian ink

2 . carbon nanohorns

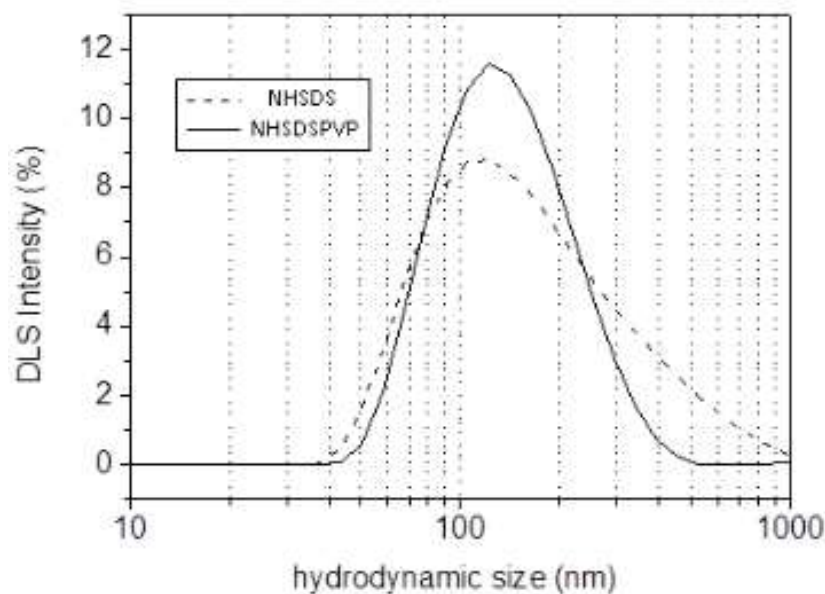


فرض بر این است که تلفات حرارتی برای هر یک از سیلندرهای شیشه‌ای بسیار مشابه است. علاوه بر این، این مطالعه با هدف برجسته کردن تفاوت‌های بین نانوسیال‌های سیاه با توجه به توانایی‌های جذب آن‌ها انجام شده است. بنابراین، مدل‌سازی دقیق تلفات حرارتی انجام نمی‌شود. نانو شاخ‌های کربنی تک جداره<sup>۱</sup> (SWCNHs) توسط فرآیندی مبتنی بر تراکم سریع اتم‌های کربن بدون هیچ کاتالیزوری و با هزینه‌های تولید بسیار کاهش یافته تولید شدند. خصوصیات مورفولوژیکی نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی<sup>۲</sup> (FESEM) با ابزار SIGMA Zeiss (Carl Zeiss SMT Ltd, UK) انجام شد. دو سوسپانسیون حاوی ۰/۰۲ گرم در لیتر SWCNHs در محلول آبی حاوی سورفکتانت تهیه شد. در نمونه اول، سدیم دو دسیل سولفات به عنوان یک سورفکتانت با غلظت ۳-۱۰/۵ گرم در لیتر استفاده شد، در حالی که در نمونه دوم مخلوطی از SDS و PVP با غلظت‌های ۳-۱۰/۵ گرم در لیتر و ۲-۱۰/۵ گرم در لیتر به ترتیب استفاده شد. دو سوسپانسیون طبق روش زیر تهیه شدند. ابتدا ۲۵۰ میلی‌لیتر از محلول سورفکتانت در آب تهیه شد و پس از آن ۰/۰۲ گرم در لیتر از SWCNH ها از طریق همگن سازی اولیه با یک پردازنده اولتراسونیک (Sonics & Materials, VCX 130) با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و ۶۵ وات در محلول پراکنده شدند. پس از ۱۰ دقیقه، سوسپانسیون به مدت ۱۵ دقیقه در یک هموژنایزر فشار بالا (GEA Niro Soavi, Panda, آلمان) با فشار ۱۰۰۰ بار پردازش شد. شکل (۱) نمونه‌ای از میکروگراف FESEM از پودر نانو شاخ کربنی را نشان می‌دهد. میانگین ابعاد نانو شاخ‌های کربنی که با استفاده از نرم‌افزار ImageJ IJ 1.46r ارزیابی شده‌اند، ۱۵ ± ۵۵ نانومتر است. تجمع به دلیل فرآیند خشک کردن در حین آماده‌سازی نمونه برای انجام مشاهده FESEM است. پتانسیل<sup>۳</sup> نمونه حاوی سدیم دو دسیل سولفات<sup>۳</sup> (SDS) و نمونه حاوی (SDS) و پلی وینیل پیرولیدون<sup>۴</sup> (PVP) به ترتیب ۴۳ میلی ولت و ۳۵ میلی ولت است. وجود PVP، که یک سورفکتانت غیر یونی است، منجر به کاهش جزئی پتانسیل می‌شود، اما عملکرد فضایی آن همچنان به بهبود پایداری کلوئیدی منجر می‌شود. در واقع، اندازه‌گیری‌های DLS یک اندازه متوسط هیدرودینامیکی مشابه ۱۳۸ نانومتر برای نمونه حاوی SDS و ۱۳۵ نانومتر برای نمونه حاوی SDS و PVP را نشان می‌دهند، اما با توزیع اندازه بسیار واضح‌تر برای دومی، همانطور که در شکل (۲) گزارش شده است [۹].



شکل (۱): میکروگراف FE-SEM پودر نانو شاخ کربن و نانوسیال سیاه. نمونه سمت راست NHSDS را قبل از استفاده نشان می‌دهد.

- 1 . Single-wall carbon nanohorns
- 2 . Field Emission Scanning Electron Microscopy
- 3 . sodium dodecyl sulphate
- 4 . poly vinyl pyrrolidone



شکل (۲): اندازه گیری DLS نانوسیال سیاه.

### خصوصیات نانوسیال سیاه

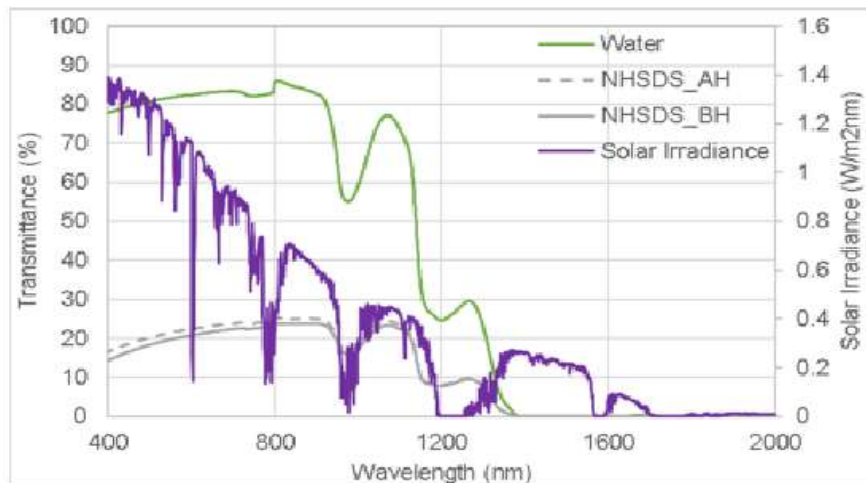
خواص ترموفیزیکی مانند هدایت حرارتی، چگالی و ویسکوزیته پارامترهای مرکزی با توجه به رفتار جذب نانوسیال سیاه‌رنگ در این مطالعه بررسی نشده‌اند. بنابراین، خصوصیات تعلیق بر روی کیفیت نوری آنها متمرکز است. خصوصیات نوری به منظور ارزیابی پتانسیل نانوسیال سیاه رنگ مورد مطالعه به عنوان جاذب مستقیم انرژی خورشیدی انجام شده است. برای به دست آوردن مشخصات نوری عمیق‌تر، عبور بالستیک، طیف جذب و کسری از توان فرودی جذب شده بررسی می‌شود. انتقال بالستیک تمام نانوسیال‌های سیاه و سیال پایه به عنوان مرجع قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض خورشید مصنوعی انجام می‌شود. در واقع، نمونه‌هایی از دو نانوسیال سیاه رنگ مورد استفاده در این آزمایش‌ها از سیلندرهای شیشه‌ای خارج شده و با توجه به طیف‌های عبوری آن‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند [۹].

نمودار شکل (۳الف) طیف گذر نانوسیال‌های سیاه معمولی تثبیت شده (NHSDS) را نشان می‌دهد. طیف نانوسیالات سیاه تثبیت مضاعف (NHSDSPVP) در نمودار شکل (۳ب) ارائه شده است. در هر دو مورد، انتقال نانوسیال CNH کمتر از آب خالص DI است. علاوه بر این، به وضوح قابل مشاهده است که در محدوده بین ۱۵۰۰ نانومتر و ۲۰۰۰ نانومتر انتقال برای همه مایعات از جمله آب DI صفر می‌شود.

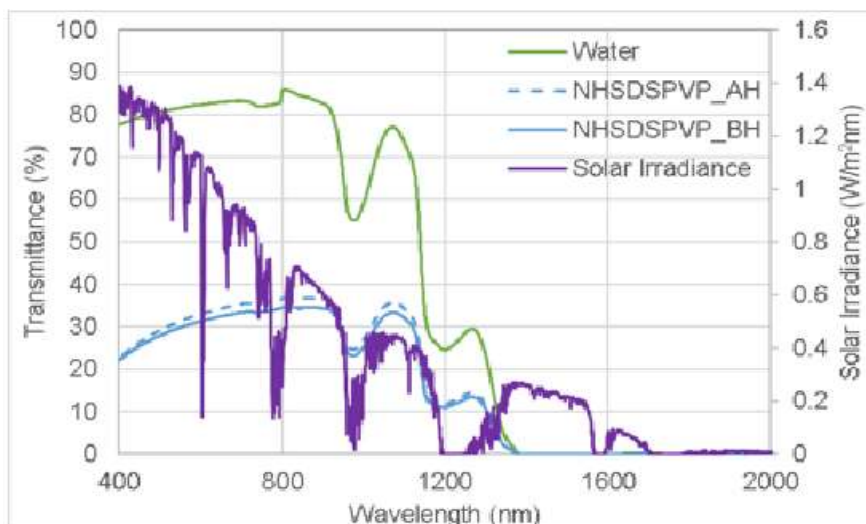
علاوه بر این، مقادیر عبور نانوسیال تثبیت شده ۲ برابر به طور متوسط حدود ۳۲ درصد بیشتر از نانوسیال تثبیت شده منفرد است. این اثر نشانگر این است که تثبیت مضاعف به درستی عمل می‌کند به این معنا که از تجمع جلوگیری می‌کند، که به نوبه خود منجر به درصد بالاتری از عبور نور از نمونه می‌شود. توجه داشته باشید که باید بین نتایج تجربی کافی و ضروری تمایز قائل شد تا ادعا شود که یک سوسپانسیون خاص در مقایسه با یک مایع مرجع تجمع کمتری را نشان می‌دهد. تغییرات طیف جذب یافت شده نشان دهنده یک شرط ضروری است که نانوسیالات دوبرابر تثبیت شده تراکم کمتری نسبت به نانوسیالات یکبار تثبیت شده نشان می‌دهند. اطمینان کافی با اندازه گیری مستقیم درجه تراکم در طول گرمایش به دست می‌آید. ضرایب انقراض، جذب و پراکندگی با استفاده از طیف‌های عبوری مورد بحث در بالا محاسبه می‌شوند. نتایج به ترتیب در شکل (۴الف)، شکل (۴ب) و شکل (۵) نشان داده شده است. در حالی که ضریب خاموشی مقدار نوری را مشخص می‌کند که از نمونه عبور نمی‌کند و به طور کلی به عنوان مجموع ضریب جذب و پراکندگی تعریف می‌شود، ضریب جذب میزان انرژی جذب شده توسط نمونه را نشان می‌دهد. هر دو پارامتر به وضوح نشان می‌دهند که افزودن مقدار کمی CNH عملکرد جذب



سیال خالص - در مورد DI-آب - را با توجه به تابش خورشیدی بهبود می‌بخشد. نانوسیالات به عنوان ضریب جذب و پراکندگی جذب کننده مستقیم انرژی خورشیدی، ضریب جذب نشان دهنده مقدار انرژی جذب شده هر دو پارامتر به وضوح نشان می‌دهند که افزودن مقدار کمی CNH عملکرد جذب سیال خالص - در مورد DI-آب - را با توجه به تابش خورشیدی بهبود می‌بخشد. نانوسیال تثبیت شده دو برابر NHSDSPVP ضرایب جذب و انقراض کمتری را نسبت به نانوسیال NHSDS تثبیت شده منفرد نشان می‌دهد. بنابراین، ضرایب جذب و انقراض برای نمونه‌ها پس از حرارت دادن، کمتر از نمونه‌های قبل از گرمایش است [۱۰ و ۹].

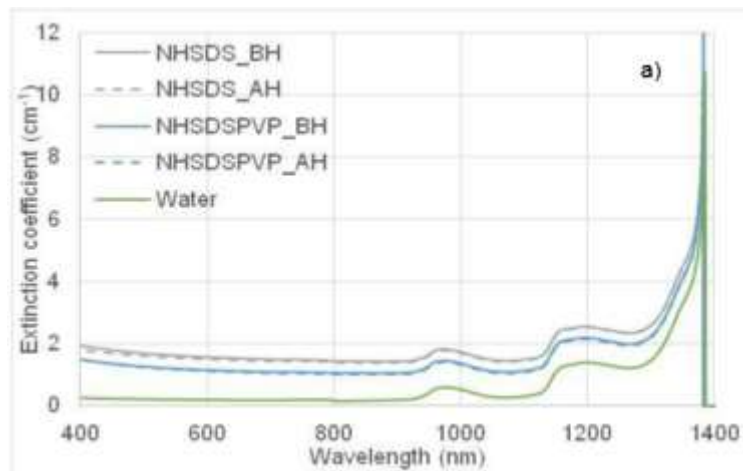


(الف)

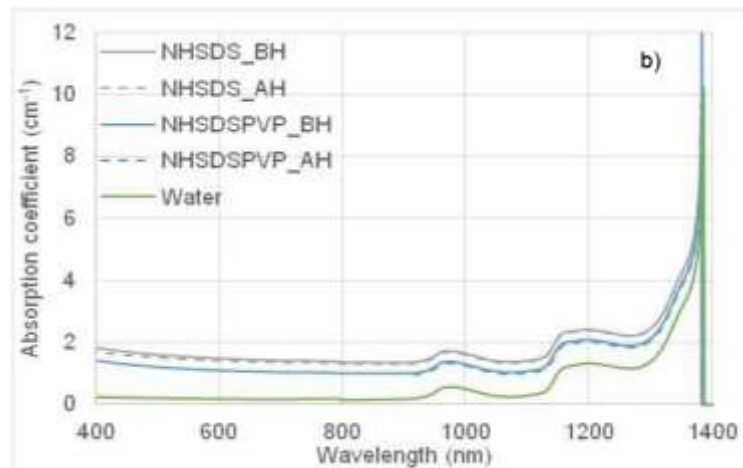


(ب)

شکل (۳): طیف انتقال برای تعلیق CNH در DI-آب. (الف) NHSDS قبل از گرم کردن (NHSDS BH) و NHSDS بعد از گرم کردن (NHSDS AH). (ب) NHSDSPVP قبل از گرم کردن (NHSDSPVP BH) و NHSDSPVP بعد از گرم کردن (NHSDSPVP AH). نمودار سبز رنگ رفتار سیال پایه برای مقایسه.

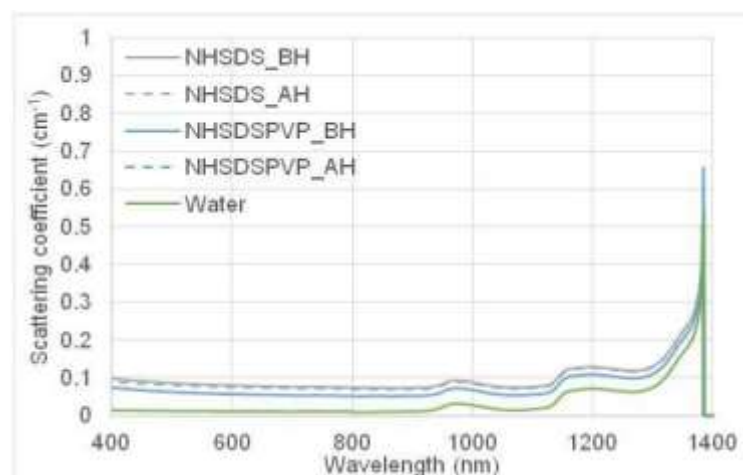


(الف)



(ب)

شکل (۴): ضرایب نوری نانوسیالات CNH قبل از (NHSDS BH و NHSDSPVP BH) و بعد از گرم شدن (NHSDS AH و NHSDSPVP AH): (الف) ضریب خاموشی، (ب) ضرایب جذب نانوسیالات مشابه.



شکل (۵): ضرایب پراکندگی نوری نانوسیالات CNH قبل از (NHSDS BH و NHSDSPVP BH) و بعد از گرم شدن (NHSDS AH و NHSDSPVP AH): (الف) ضرایب خاموشی، (ب) ضرایب جذب نانوسیالات مشابه.



### نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل آزمایش‌های اولیه پایداری حرارتی انجام شده، نشان می‌دهد سوسپانسیون‌های مبتنی بر آب تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند، در حالی که سوسپانسیون‌های مبتنی بر گلیکول تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند. بهبود خواص پایداری حرارتی نانوسیال را باید با بهینه‌سازی نسبت غلظت سورفکتانت SWCNH انتظار داشت. در مورد خواص نوری نانوسیال، اندازه‌گیری‌های توصیف‌شده نشان می‌دهند که تعلیق‌های مبتنی بر نانو شاخ، جاذب‌های مستقیم نور خورشید بسیار امیدوارکننده‌ای برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی حرارتی هستند. ضریب پراکندگی مقادیر سیال پایه در حدود ۹۰۰ نانومتر است. این در واقع یک نتیجه مورد انتظار است، زیرا سیال پایه حاوی نانوذرات نیست، که معمولاً مسئول پدیده‌های پراکندگی هستند. از سوی دیگر، ضرایب پراکندگی برای هر دو نانوسیال سیاه به دلیل شکل یکسان نانوذرات استفاده شده و غلظت یکسان ۰/۰۰۲ گرم در لیتر CNH، کاملاً مشابه است. با این حال، به دلیل اندازه کوچک CNH، اثرات پراکندگی بسیار ضعیف است. بنابراین، خاموش شدن نور فرودی توسط CNH عمدتاً به دلیل جذب (۰/۹۵) است. مقادیر عبور کمتر از ۰/۱٪ منجر به سطوح شدت عبور کمتر از وضوح آشکارساز مادون قرمز و در نتیجه مقداری نویز بالای ۱۴۰۰ نانومتر می‌شود.

### مراجع

- [1] Jamiati, M. (2020). Fabrication of solar cells based on CZTSSe films with optimized chemical composition. *Journal of Quantum Chemistry and Spectroscopy*, 11(35), pp 23-30.
- [2] Sun, W., Huang, R., Ling, Z., Fang, X., Zhang, Z. (2020). Numerical simulation on the thermal performance of a PCM-containing ventilation system with a continuous change in inlet air temperature. *Renewable Energy*, 145, pp 1608-1619.
- [3] Jidhesh, P., Arjunan, T. V., Gunasekar, N. (2021). Thermal modeling and experimental validation of semitransparent photovoltaic- thermal hybrid collector using CuO nanofluid. *J. Clean. Prod.*, 316, pp 128360.
- [4] Jamiati, M., Khoshnevisan, B., Mohammadi, M. (2018). Second- and third-order elastic constants of kesterite CZTS and its electronic and optical properties under various strain rates. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(8), pp 977-986.
- [5] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Golden, J. S. (2009). Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems. *Solar Energy*, 83, pp 969-977.
- [6] Jamiati, M. (2021). Modeling of Maximum Solar Power Tracking by Genetic Algorithm Method. *Iranian Journal of Energy and Environment (IJEE)*, 12 (2), pp 118-124.
- [7] Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., Wu, Q. (2002). Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of applied physics*, 91, pp 4568-4572.
- [8] Faridi Khouzestani, R., Ghafouri, A., (2020), Numerical study on heat transfer and nanofluid flow in pipes fitted with different dimpled spiral center plate, *Journal SN Applied Sciences*. 2(2), pp 1-19.
- [9] Furio, A., G. (2019), On the use of nanofluids to enhance the direct absorption of solar radiation, A dissertation presented by Alexandra Gimeno Furio for the Degree of Doctor from the Universitat Jaume, Castell' on de la Plana.
- [10] Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Perez, P. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp 1695-1721.
- [11] Mercatelli, L., Sani, E., Fontani, D., Zaccanti, G., Martelli, f., Ninni, P. D. (2011). Scattering and absorption properties of carbon nanohorn-based nanofluids for solar energy applications. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 6, 11025.

