



طراحی نانوسیالات پلاسمونی بر پایه نانوذرات طلا برای استفاده بهینه از انرژی خورشیدی

مهسا محمدزاده*، محسن اشجاری

گروه نانومهندسی شیمی، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

چکیده

با توجه به پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی که روی سطوح نانوذرات فلزی ایجاد می‌شود، نانوسیالات پلاسمونی، به‌منظور افزایش بهره‌وری از کلکتورهای حرارتی خورشیدی جذب مستقیم، استفاده شدند. در این کار پژوهشی، خواص نوری نانوسیالات پلاسمونی شامل نانوذرات طلا با شکل‌ها، اندازه‌ها، نسبت‌های ابعادی و غلظت‌های مختلف، به‌صورت عددی بررسی شدند. نتایج نشان داد که تشدید پلاسمون سطحی موضعی نانومپله‌ها و نانویضی‌گون‌های طلا را می‌توان با تنظیم نسبت ابعاد، بهبود بخشید. همچنین، نانوصفحات طلا نیز پتانسیل بالایی در تبدیل حرارت خورشیدی، از خود نشان دادند. جهت به دست آوردن یک باند جذب پهن در هر دو ناحیه طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک، نانوسیال ترکیبی طلا متشکل از ۶۰٪ از نانومپله‌ها با نسبت ابعادی ۵، ۲۰٪ نانویضی‌گون‌ها با نسبت ابعادی ۲ و ۲۰٪ از نانوصفحات با نسبت ابعادی ۷، طراحی شدند. حاصل کار با ۱۰۴٪ پیشرفت در برداشت انرژی خورشیدی برای نانو سیال ترکیبی طلا در مقایسه با نانوسیال حاوی نانوذرات کروی طلا، همراه بود. این نتیجه در غلظت بسیار کم و اندازه ذرات کوچک نانوسیال ترکیبی به دست آمد که بر ناپایداری نانوسیالات تحت غلظت‌های بالا، غلبه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات طلا، نانوسیالات، برداشت انرژی خورشیدی، تشدید پلاسمون سطحی موضعی، کلکتورهای حرارتی خورشیدی جذب مستقیم، تقریب دوقطبی گسسته

ایمیل نویسنده مسئول: m.mohammadzadeh@grad.kashanu.ac.ir

۱-مقدمه

با مقدار کمی از ذرات آلومینیوم بارگذاری شده، ۹ بار افزایش یافته است. با به‌کارگیری نانوسیالات، هم در جذب و هم در انتقال انرژی خورشیدی کلکتور حرارتی خورشیدی جذب مستقیم (DASC)، اتلاف انرژی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین بازده کل تبدیل حرارتی خورشیدی در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت مرسوم، افزایش می‌یابد [۱۵].

پلاسمون سطحی موضعی (LSP)، نوسانات الکترون‌های آزاد در سطح ذرات فلزی در اندازه نانو می‌باشد. درواقع، پدیده تشدید است که با نور ورودی مناسب فعال می‌شود [۱۶]. پدیده تشدید می‌تواند با تغییر هندسه و گذردهی نانوذرات، تنظیم شود [۱۷]. هنگامی که پلاسمون سطحی موضعی (LSP) اتفاق می‌افتد، انرژی فوتون ورودی می‌تواند با تشدید به پلاسمون سطح منتقل شود. در نتیجه، مقدار زیادی گرما در ذره تولید شده و به محیط اطراف منتقل می‌شود.

بازده تبدیل کل کلکتور حرارتی خورشیدی جذب مستقیم (DASC) بر پایه نانوسیالات، عمدتاً به تطابق خواص نوری آن‌ها و طیف تابش خورشیدی، بستگی دارد. چنانچه از نانوسیالات بر پایه نانوذرات اکسید فلزی [۱۸ و ۱۹] و نانوسیالات گرافیت [۲۰]، استفاده شود، به دلیل ضریب خاموشی نسبتاً کوچک آن‌ها، به غلظت ذرات بالاتری نیاز دارد. با این حال، غلظت ذرات بالا باعث رسوبدهی و آگلومره شدن ذرات می‌شود که موجب ناپایداری

انرژی خورشیدی، خالص‌ترین و فراوان‌ترین انرژی در جهان است. مطالعات بسیاری در زمینه کلکتورهای حرارتی خورشیدی به‌منظور بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، صورت گرفته است [۳-۱]. کلکتورهای حرارتی خورشیدی، مبدل‌های گرمایی هستند که می‌توانند تابش خورشیدی را به انرژی داخلی سیالات در حال کار، تبدیل کنند. اکثر کلکتورهای حرارتی خورشیدی رایج، سطوحی برپایه جذب‌کننده‌ها هستند که منجر به دمای بالای سطح جذب شده و در نتیجه باعث از دست رفتن حرارت تابشی قابل توجهی، می‌شوند. کلکتور حرارتی خورشیدی جذب مستقیم (DASC)، نوعی از جاذب حجمی است که به‌منظور به حداقل رساندن دمای سطح گیرنده‌ها، مورد استفاده قرار گرفت [۴ و ۵]. با افزودن نانوذرات پلاسمونی به سیالات پایه، که نانوسیالات نامیده شدند، خواص نوری به‌طور قابل توجهی تغییر کرد. در سال‌های اخیر، نانوسیالات، به دلیل کاربردهای بالقوه‌ای که در برداشت انرژی خورشیدی، از خود نشان دادند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۶-۱۰]. با به‌کارگیری نانوسیالات پلاسمونی در کلکتور حرارتی خورشیدی جذب مستقیم (DASC)، انرژی تابشی خورشید می‌تواند بسیار موثرتر و کارآمدتر به انرژی حرارتی سیالات پایه، تبدیل شود [۱۱-۱۴]. طبق مطالعات صورت گرفته، جذب انرژی خورشیدی ورودی آب خالص در مقایسه با زمانی که

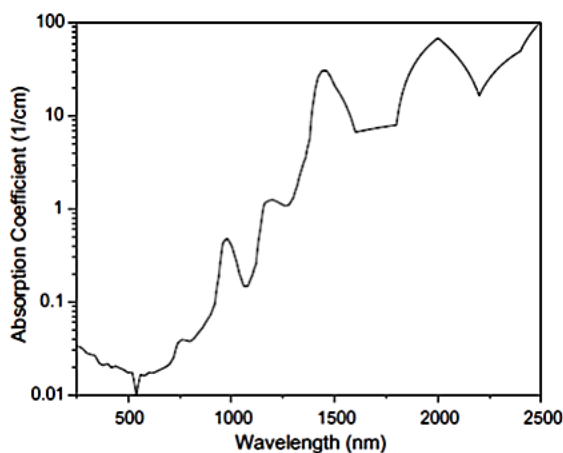
۱-۲- خاصیت نوری سیال پایه

در این مطالعه، آب به دلیل در دسترس بودن و قدرت جذب خوب در ناحیه مادون قرمز نزدیک، به عنوان سیال پایه انتخاب شده است. برای آب خالص، اثر پراکندگی محیط را می توان نادیده گرفت و تنها اثر جذب باید در محاسبات، لحاظ گردد. ضریب جذب طیفی سیال پایه را می توان با فرمول زیر محاسبه کرد:

$$K_{a.f} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن k ، ضریب جذب سیال پایه و λ طول موج نور ورودی است. ثابت نوری آب از مرجع (هیل و کوری، ۱۹۷۳)، گرفته شد [۲۷].

شکل (۱)، ضریب جذب آب خالص را که با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است، نشان می دهد. در شکل مشهود است که آب خالص، یک محیط جذب بسیار ضعیف در طیف نور فرابنفش و مرئی، می باشد. در محدوده طول موج ۲۵۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر، آب را می توان به عنوان یک محیط شفاف در نظر گرفت. باین حال، هنگامی که طول موج به ناحیه مادون قرمز نزدیک، جابجا می شود، آب به یک جاذب کارآمد تبدیل می شود. بنابراین، نانوذراتی که اضافه می شوند، باید قابلیت جذب در محدوده طول موج ۲۵۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر را داشته باشد. این کار، بر توسعه نانوسیالات پلاسمونی که نیاز به باند جذب تابشی خورشیدی گسترده را برطرف سازد، متمرکز شده است.



شکل ۱. ضریب جذب آب خالص

۲-۲- خاصیت نوری نانوذرات

همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، بیشتر تابش خورشیدی توسط نانوذرات اضافه شده، جذب می شوند، بنابراین خواص نوری نانوذرات باید به درستی مورد بررسی قرار گیرند. در کلکتورهای حرارت خورشیدی جذب مستقیم^۱ (DASC) واقعی بر پایه نانوسیالات با یک طول مسیر جذب وسیع، در مقایسه با طول موج ورودی مشخص، اندازه نانوذرات پلاسمونی معلق شده، کاملاً کوچک بوده و کسر حجمی آن بسیار کم می باشد. در نتیجه، اثر پراکندگی نانوذرات پلاسمونی در سیالات پایه، می تواند به عنوان پراکندگی مستقل در نظر گرفته شود. ما می توانیم خواص

سیالات می شود. برخی محققان برای افزایش جذب تابش خورشیدی، نانوذرات فلزی را اضافه کردند [۲۱ و ۲۲]. با توجه به دامنه طیف گسترده تابش خورشیدی و یک پیک جذب باریک در نور مرئی ذرات کروی فلزات، نانوسیالات حاوی ذرات کروی فلز، عملکرد ضعیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک دارند. باند جذب پهن را می توان با استفاده از ذرات هسته-پوسته مخلوط شده و یا نانوذرات فلزی گران بهای مخلوط شده، به دست آورد. به منظور برانگیختن پلاسمون سطحی موضعی (LSP) ذرات هسته-پوسته سیلیکا-طلا در ناحیه مادون قرمز نزدیک، ضخامت پوسته باید کمتر از ۵ نانومتر باشد که باعث مشکلات جدی در تولید می شود [۲۳]. علاوه بر این، اثر پراکندگی ساختارهای هسته-پوسته، به طور قابل توجهی بالا است [۲۴]، که در کاربردهای فوتونی-حرارتی، نامطلوب است.

یک روش امیدوارکننده برای دستیابی به باند گسترده جذب خورشیدی، به کارگیری نانوذرات فلزی گران بها در نانوسیالات است. چون و همکاران، به طور تجربی خواص نوری نانوسیالات برپایه نانومیله های طلا با نسبت های ابعادی مختلف را مطالعه کردند [۲۵]. نتایج نشان داد که نانومیله های طلا، جذب بالایی هم در ناحیه مرئی و هم در ناحیه مادون قرمز نزدیک دارند و با افزایش نسبت ابعاد نانومیله های طلا، موقعیت پیک تشدید پلاسمون سطحی طولی (LSPR)، یک جابجایی قرمز را نشان می دهد [۲۵]. راتیوا و گومز-مالاگون، خواص نوری نانوبیضی گون ها با نسبت های ابعادی مختلف را با استفاده از مدل ماکسول-گارنت^۲، بررسی کردند [۲۶]. آن ها دریافتند که تشدید پلاسمون سطحی طولی (LSPR) نانوبیضی گون ها را می توان با تغییر نسبت ابعاد، تنظیم کرد و نانوبیضی گون های طلا با اندازه ذرات کوچک (۲/۵ نانومتر) و نسبت ابعاد بالا (AR=۴)، می تواند یک ضریب جذب گسترده خورشیدی نزدیک به شرایط ایده آل، به دست آورد [۲۶]. هرچند، یک بررسی مقایسه ای بر خواص نوری شکل های مختلف نانوذرات در برداشت انرژی خورشیدی، هنوز انجام نشده است. در این مطالعه، ما به تأثیرات شکل، اندازه و غلظت نانوذرات طلا بر خواص نوری نانوسیالات پلاسمونی، می پردازیم. با استفاده از روش تقریب دوقطبی گسسته^۳، ضریب های خاموشی نانومیله ها، نانوبیضی گون ها و نانوصفحات طلا، به صورت عددی مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرند. سپس، یک طراحی بهینه از نانوسیال مخلوط شده حاوی سه نوع متفاوت نانوذرات طلا، ارائه کردیم که می تواند از تشدید پلاسمون سطحی طولی (LSPR) در طیف خورشید، به طور کامل استفاده کند. هدف اصلی کار انجام شده در این مقاله، طراحی نانوسیالی با عملکرد فوتوترمال عالی با غلظت ذرات کم است که بتواند به پایداری بالایی دست یابد.

۲- روش مدل سازی

خواص نوری نانوسیالات، با هر دو جزء تشکیل دهنده آن ها یعنی سیال پایه و نانوذرات، تعیین می شود. بنابراین، خواص نوری سیال پایه و نانوذرات، به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفتند.

اتراف، یعنی سیال پایه آب خالص، ۱/۳۳ گرفته شد. از آنجایی که نانوذرات به طور تصادفی در سیال پایه توزیع می شود، خواص نوری تمام محلول باید به طور تصادفی در نظر گرفت. در این شبیه سازی، میانگین قطبی شدن و میانگین جهت گیری برای ذرات غیر کروی، در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از شبیه سازی، بازده خاموشی، بازده جذب و بازده پراکندگی برای نانوذراتی که میانگین جهت گیری شان در نظر گرفته شد، به دست می آیند. با رابطه بین بازده خاموشی و ضریب خاموشی، ضریب خاموشی کل نانوذرات معلق شده در سیال پایه، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد [۳۲]:

$$K_{e,p} = \frac{3f_v Q_{ext}}{2d} \quad (7)$$

که در آن، f_v ، کسر حجمی نانوذرات، d ، قطر معادل نانوذرات و Q_{ext} ، بازده خاموشی یک نانوذره تک است که میانگین تمام جهت گیری های آن در فضا در نظر گرفته شده است. قطر معادل نانوذره، d ، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$d = 2 \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (8)$$

که در آن، V ، حجم ذره می باشد. سپس ضریب خاموشی نانوسیالات را می توان با استفاده از جمع بستن خطی سهم هر دو جزء تشکیل دهنده نانوسیال، یعنی سیال و نانوذرات معلق شده، به دست آورد.

$$K_e = K_{e,p} + K_{a,f} \quad (9)$$

با توجه به قانون بیر-لامبرت، گذردهی طیفی نانوسیالات، T ، از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۳]:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-K_e L} \quad (10)$$

که در آن، L ، شدت نور عبور کرده، I_0 ، شدت تابش ورودی و L ، طول نانوسیالات در امتداد تابش ورودی است. در این مطالعه، I_0 ، تابش طیفی خورشیدی واقعی در سطح دریا، از ASTM G173-03 گرفته شده است. در این کار، ما تنها انرژی خورشیدی ورودی طبیعی را در نظر گرفتیم.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تأیید اعتبار مدل عددی

در شبیه سازی، شکل ذره به وسیله یک کد متلب تعیین می شود. شکل ۲، ضریب خاموشی یک ذره کروی طلا با قطر ۲۰ نانومتر را نشان می دهد که با استفاده از هر دو نظریه روش تقریب دوقطبی گسسته^۲ DDA و مای، محاسبه شده است [۳۲]. ساختار کروی در شبیه سازی DDA، متشکل از بیش از ۱۰۰۰۰ دوقطبی می باشد. نتایج نشان می دهد که ضریب خاموشی محاسبه شده با استفاده از روش تقریب دوقطبی گسسته^۲ DDA همخوانی خوبی با نظریه مای دارد که حاکی از آن است که با استفاده از تعداد کافی دوقطبی ها در شبیه سازی، می توان به نتایج دقیقی رسید.

نوری نانوذرات را با یک نسبت ساده به تعداد کل ذرات معلق، در نظر بگیریم تا انجام محاسبات ساده تر گردد.

خواص نوری ذرات کروی را می توان از طریق تئوری مای^۴، که یک آنالیز تئوری بر پایه معادلات ماکسول است، محاسبه کرد. برای ذرات کروی، تئوری مای، تطابق بسیار بالایی با نتایج آزمایشگاهی داشت [۲۹ و ۲۸]. با این حال، هنگامی که شکل ذرات نامنظم باشد، به دلیل مشکلات الکترومغناطیسی، رسیدن به محلولی دقیق، بسیار دشوار است. برای محاسبه خواص نوری نانوذرات فلزی با اشکال هندسی پیچیده، روش تقریب دوقطبی گسسته^۲ (DDA)، استفاده شد [۳۰]. روش تقریب دوقطبی گسسته^۲ (DDA)، یکی از روش های عددی رایج در محاسبه خواص نوری نانوذرات است. در این روش، ساختارهای نانوذرات با سری هایی از دوقطبی های گسسته، جایگزین می شوند. هیچ محدودیتی برای شکل ذرات وجود ندارد و هر دوقطبی، $\vec{p}_j$ ، قطبش خاص خودش، P_j ، است که با فرمول زیر محاسبه می شود:

$$P_j = \alpha_j E_j(r_j) \quad (2)$$

که در آن، α_j ، قطبش پذیری دوقطبی و E_j ، میدان الکتریکی در موقعیت r_j است که خود شامل دو بخش است: یکی میدان الکترومغناطیسی ورودی است که دوقطبی ها را فعال می کند و دیگری برهمکنش تمام دوقطبی های دیگر در ناحیه شبیه سازی، می باشد.

$$E_j(r_j) = E_{inc..j}(r_j) - \sum_{n \neq j} A_{nj} P_n \quad (3)$$

که در آن، A_{nj} ، ماتریس برهمکنش 3×3 است که با فرمول زیر محاسبه می شود:

$$A_{nj} P_n = \frac{\exp(ikr_{jn})}{r_{jn}^3} \times \{k^2 r_{jn} \times (r_{jn} \times P_n) + \frac{(1 - ikr_{jn})}{r_{jn}^2} [r_{jn}^2 - 3r_{jn}(r_{jn} \cdot P_n)]\} \quad (4)$$

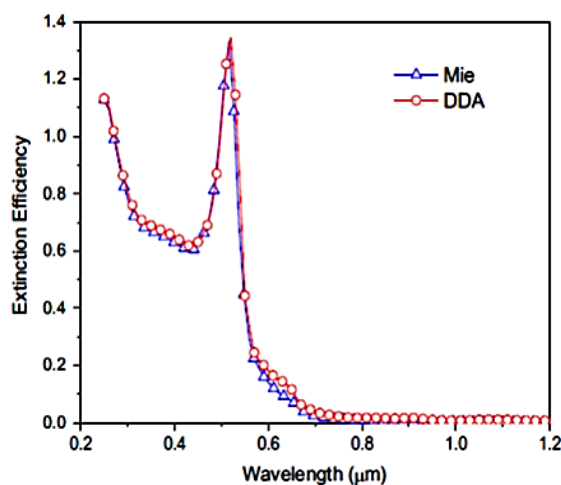
که در آن $K = \omega$ و $r_{jn} = r_j - r_n$ می باشد. با معادلات (۳) و (۴)، معادلات خطی پیچیده سه بعدی، به دست آمد. سپس نواحی متقاطع خاموشی و جذب را می توان با روابط زیر محاسبه کرد:

$$C_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(E_{inc..j}^* \cdot P_j) \quad (5)$$

$$C_{abs} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \{ \text{Im}[P_j \cdot (\alpha_j^{-1})^* P_j^*] - \frac{2}{3} k^3 |P_j|^2 \} \quad (6)$$

در این کار، برای محاسبه خواص جذب و پراکندگی نانوذرات فلزی از کد منبع باز DDSCAT، استفاده شد. برای اطمینان از صحت و درستی محاسبات، فاصله بین دوقطبی در شبیه سازی، روی ۰/۵ نانومتر تنظیم شده است. ضریب بازدارندگی^۵ طلا، از هندبوک خواص نوری، گرفته شده است [۳۱] و ضریب بازدارندگی محیط

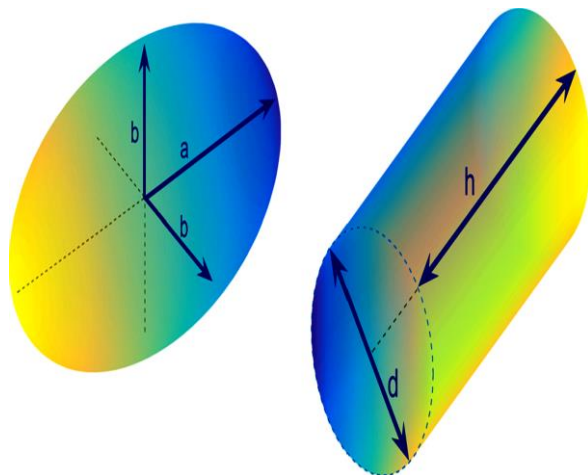
نانوذرات به دو بخش مرتبط است: یکی مربوط به حالت نوسانات عرضی است که نقش کلیدی در نانوذرات کروی دارد و دیگری حالت نوسان طولی^۱ (LOM) که به گشتاور دوقطبی^۲ بستگی دارد. به طور کلی، هرچه فاصله بین اتم‌های پلاریزه شده، بیشتر باشد، به دلیل تشدید پلاسمون سطحی موضعی طولی، پیک جذب پهن‌تری دارد. بنابراین، حالت نوسان طولی، حالت غالب جذب نانومیله‌ها و نانویضی‌گون‌ها می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که پیک جذب با توجه به برانگیختگی حالت نوسان طولی، یک جابجایی قرمز در امتداد طول موج‌های بلندتر محور دارد. ضریب جذب به دست آمده برای نانویضی‌گون‌ها و نانومیله‌ها در شکل ۴، با طیف جذب نظری نانویضی‌گون‌های طلا [۲۶] و نتایج تجربی محلول‌های کلئیدی نانومیله‌های طلا [۲۵ و ۳۴]، مطابقت دارد. در هر دو کار نظری و تجربی، پیک جذب، یک جابجایی قرمز و افزایش چشمگیری را با افزایش نسبت ابعاد نانوذرات نشان می‌دهد که با نتایج عددی حاضر، مطابقت دارد. باین‌حال، در مقایسه با ضریب جذب، نسبت میزان پراکندگی به ضریب خاموشی به دلیل کوچک بودن اندازه ذرات، ناچیز است. ضریب انعکاس، نسبت پراکندگی به خاموشی تعریف شده است که برای بررسی میزان پراکندگی، محاسبه می‌شود. شکل ۵، ضریب انعکاس نانومیله‌ها و نانویضی‌گون‌ها را با نسبت‌های ابعادی مختلف نشان می‌دهد. ضریب انعکاس در تمام طیف، برای هر دو نوع نانوذر، کمتر از ۰/۰۵۵ محاسبه شد که به معنی غالب بودن اثر جذب نانومیله‌ها و نانویضی‌گون‌ها می‌باشد، درواقع بیشتر تابش ورودی، توسط نانوذرات جذب شده است.



شکل ۲. ضریب خاموشی محاسبه شده با استفاده از دو روش مختلف

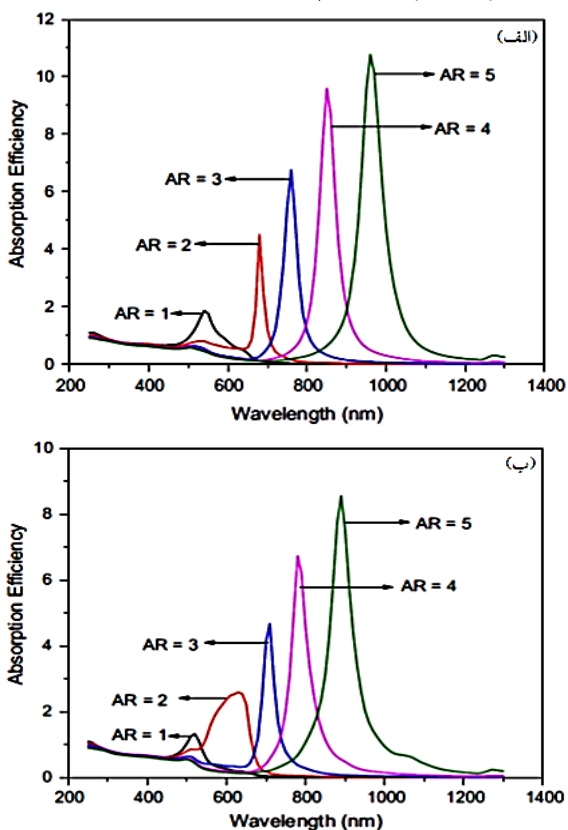
۳-۲- اثر نسبت ابعاد

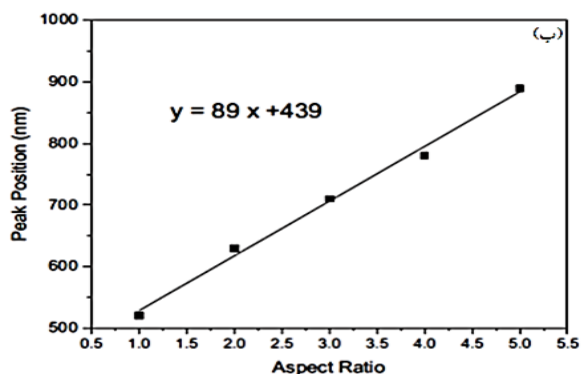
شماتیک یک نانوذره میله‌ای ($h > d$) و بیضی‌گون ($a > b = c$) در شکل ۳، نشان داده شده است. نسبت ابعاد^۳ (AR) نانومیله $\frac{h}{d}$ و نانویضی‌گون $\frac{a}{b}$ ، تعریف می‌شود.



شکل ۳. شماتیک نانومیله (راست) و نانویضی‌گون (چپ)

خواص نوری نانومیله‌ها و نانویضی‌گون‌های طلا با نسبت‌های ابعادی مختلف، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. قطر معادل هر دو ذره میله‌ای و بیضی‌گون، روی ۲۰ نانومتر تنظیم شده است. شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب ضریب جذب و انعکاس ذرات با نسبت‌های ابعادی مختلف را در برابر طول موج نور ورودی، نشان می‌دهد. محدوده طیف از ۲۵۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر می‌باشد که بیش از ۸۵٪ انرژی خورشیدی را پوشش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، موقعیت پیک ضریب جذب با نسبت ابعاد، به صورت خطی تغییر می‌کند و ضریب جذب نانوذرات با افزایش نسبت ابعاد، افزایش می‌یابد. دلیل این امر، این است که تشدید پلاسمون سطحی موضعی



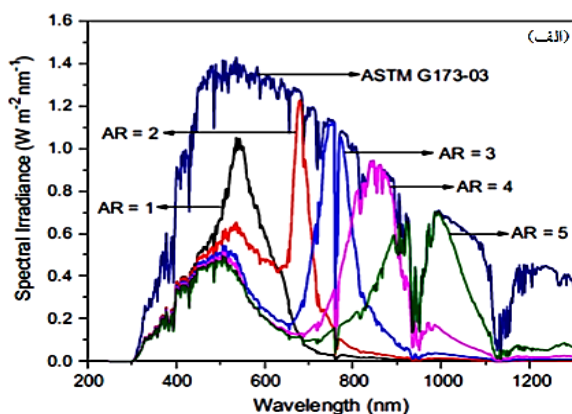


شکل ۶. رابطه خطی بین موقعیت پیک جذب و نسبت ابعاد. (الف) نانومیلها و (ب) نانویضی‌گون‌ها

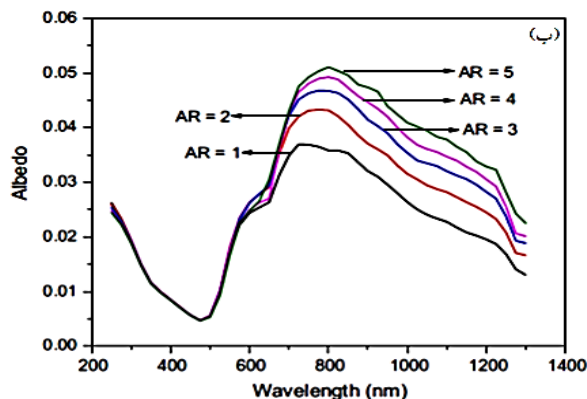
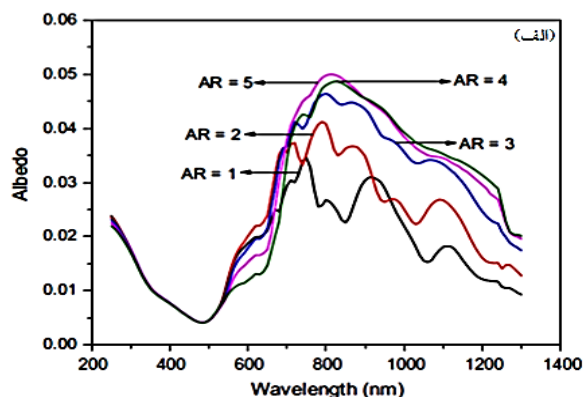
به‌منظور بررسی اثر نسبت ابعاد بر جذب انرژی خورشیدی، پارامتر $E_{\lambda}(1 - e^{-k_{el}L})$ در مقایسه با تابش خورشید (ASTM G173-03 AM 1.5 Global)، در شکل ۷ ارائه شده است. مساحت زیر منحنی نشان دهنده انرژی خورشیدی جذب شده است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \int E_{\lambda}(1 - e^{-k_{el}L})d\lambda \quad (11)$$

حجم نانوذرات یکسان در نظر گرفته شده است تا تعداد ذرات در سیال پایه ثابت نگه داشته شود. در شبیه‌سازی، برای هر دو نوع نانوذره میله‌ای و بیضی‌گون، قطر معادل ۲۰ نانومتر، غلظت نانوذرات ۰/۰۰۰۱٪ و ضخامت ست‌های حاوی سیال ۱ سانتی‌متر، در نظر گرفته شده است. نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها با نسبت‌های ابعادی مختلف، جذب خوبی در طول‌موج‌های مختلف طیف از خود نشان داده‌اند، همان‌طور که در شکل ۷، نشان داده شده است. برای هر دو نوع نانوذره میله‌ای و بیضی‌گون با نسبت ابعادی بزرگ‌تر، نور نزدیک مادون قرمز قابل استفاده است، درحالی‌که به‌ندرت توسط نانوذرات کروی جذب می‌شود.

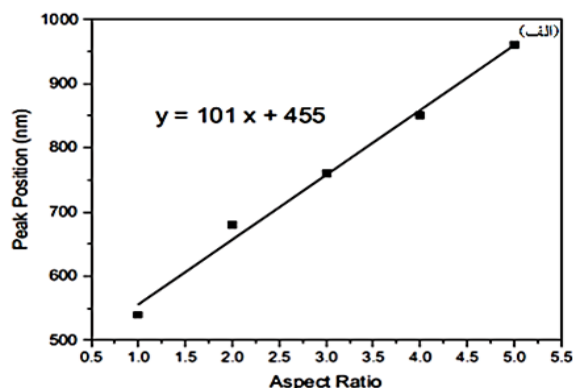


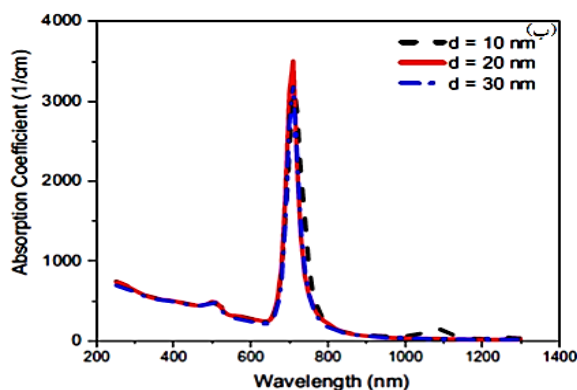
شکل ۴. اثر نسبت ابعاد بر ضریب جذب. (الف) نانومیلها و (ب) نانویضی‌گون‌ها



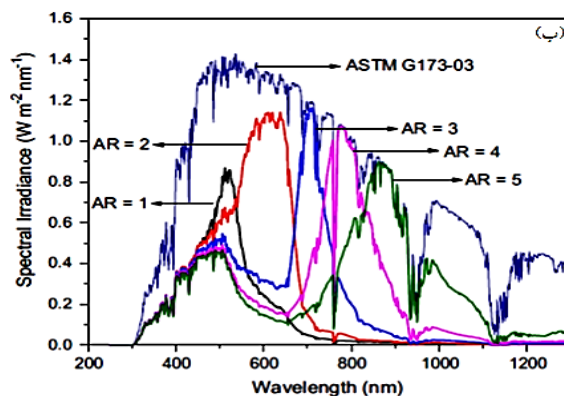
شکل ۵. اثر نسبت ابعاد بر ضریب انعکاس. (الف) نانومیلها و (ب) نانویضی‌گون‌ها

موقعیت پیک‌های جذب نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها در نسبت‌های ابعادی مختلف، با استفاده از روش حداقل مربعات^{۱۱}، در شکل ۶ رسم شده است. همان‌طور که در شکل به وضوح قابل مشاهده است، یک رابطه خطی بین نسبت ابعاد و پیک جذب وجود دارد. با استفاده از معادلات خطی آورده شده در شکل ۶، موقعیت پیک‌های نانومیلها و نانویضی‌گون‌های طلا را می‌توان در یک نسبت ابعاد مشخص، محاسبه کرد.





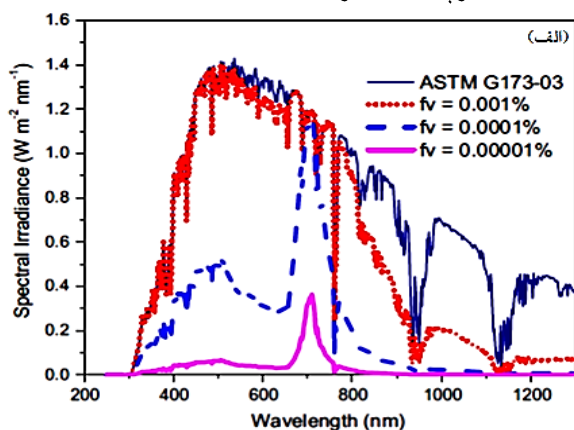
شکل ۸. اثر اندازه ذرات بر ضریب جذب. (الف) نانومیلها و (ب) نانویضی‌گون‌ها



شکل ۷. تابش خورشیدی و انرژی جذب شده توسط نانوذرات با نسبت‌های ابعادی مختلف. (الف) نانومیلها و (ب) نانویضی‌گون‌ها

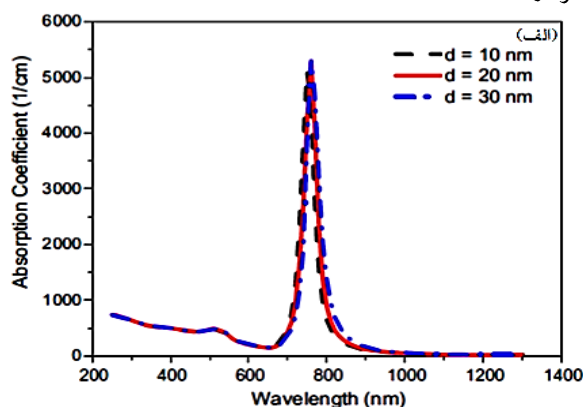
۴-۳- اثر غلظت ذرات

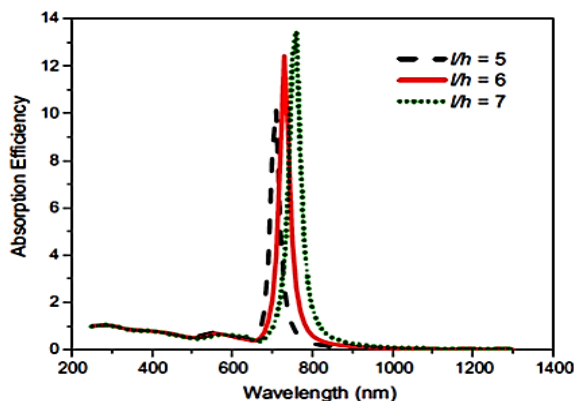
طبق رابطه (۷)، تحت شرایط پراکندگی مستقل ($f_v < 0.6\%$)، ضریب خاموشی با غلظت حجمی ذرات، به‌طور خطی افزایش می‌یابد. بنابراین، ضریب خاموشی رابطه خطی با غلظت حجمی ذرات دارد. برای تعیین غلظت بهینه، انرژی خورشیدی جذب شده توسط نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها با کسر حجمی‌های مختلف در شکل ۹، نشان داده شده است. نسبت ابعاد و قطر معادل برای هر دو نوع نانوذره، به ترتیب، ۳ و ۲۰ نانومتر ثابت نگه داشته شده است. غلظت نانوذرات در محدوده 0.001% تا 0.00001% متغیر است و ضخامت ستهای حاوی سیال ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. از شکل ۹ می‌توان دریافت که هر دو نوع نانوذره میله‌ای و بیضی‌گون، عملکرد خوبی در برداشت انرژی خورشیدی حتی در غلظت‌های کم (0.001%) و اندازه ذرات کوچک (۲۰ نانومتر) دارند.



۳-۳- اثر اندازه ذرات

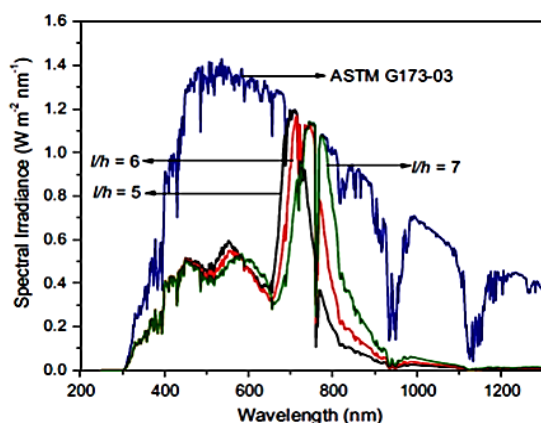
برای مطالعه اثر اندازه ذرات بر جذب انرژی خورشیدی نانوسیالات، ضریب خاموشی نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها با اندازه ذرات مختلف، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شکل ۸، ضریب جذب نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها را با اندازه ذرات مختلف، نشان می‌دهد. نسبت ابعاد هر دو نوع نانوذره ۳ در نظر گرفته شده و غلظت نانوذرات 0.0001% می‌باشد. قطر معادل d ، از ۱۰ تا ۳۰ نانومتر متغیر است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، اندازه ذرات تاثیر کمی بر ضریب جذب در محدوده تابش خورشیدی دارد. بنابراین، استفاده از ذرات کوچک تغییری در جذب انرژی خورشیدی ایجاد نمی‌کند، اما باعث پایداری بیشتر می‌شود. باین‌حال، اثر کوانتومی نانوذرات را بر ثابت نوری، برای نانوذرات بسیار کوچک (کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر)، نمی‌توان نادیده گرفت [۳۵]. در این کار پژوهشی، نانومیلها و نانویضی‌گون‌ها دارای قطر معادل بیش از ۱۰ نانومتر هستند.





شکل ۱۱. ضریب جذب نانوصفحات

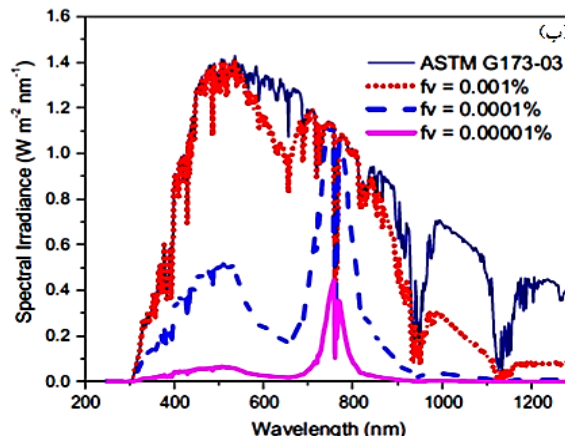
شکل ۱۲ رابطه بین تابش خورشیدی و انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی، غلظت نانوصفحات ۰/۰۰۰۱٪ و ضخامت ست‌های حاوی سیال ۱ سانتی‌متر می‌باشد. نانوصفحات، یک جذب قوی را در محدوده ۶۵۰ تا ۸۰۰ نانومتر، نشان دادند و پیک جذب نانوصفحات، برخلاف نانومیل‌ها و نانوبیضی‌گون‌ها، به فاصله بین اتم‌های پلاریزه شده، بستگی ندارد.



شکل ۱۲. تابش خورشیدی و انرژی جذب شده توسط نانوصفحات

۶-۳ طراحی نانوسیالات ترکیبی

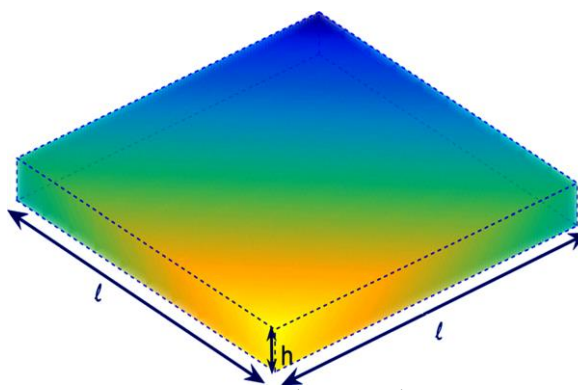
برای استفاده کامل از تشدید پلاسمون سطحی موضعی در تمام طیف خورشیدی با نانوذرات طلا، استفاده از نانوسیالاتی ترکیبی شامل نانومیل‌ها، نانوبیضی‌گون‌ها و نانوصفحات، مطرح شدند. برای این منظور در ابتدا، کسر حجمی کل موردنظر از نانوسیالات ترکیبی و تعداد نانوذرات باید تعیین گردد. با توجه به بخش ۳-۴، غلظت کل نانوذرات ۰/۰۰۰۳٪، در نظر گرفته شد. برای بکار رفتن پیک جذبی که توسط تشدید پلاسمون سطحی موضعی به‌منظور دستیابی به یک باند جذب پهن، برانگیخته شد و موقعیت پیک‌های نانوذرات، هر سه نوع از نانوذرات در نانوسیالات ترکیبی به کار گرفته شدند. بر اساس پیک جذب و تابش خورشیدی، سه نوع نانوسیالات ترکیبی (نانومیل‌های ترکیبی، نانوبیضی‌گون‌های ترکیبی و نانوسیالات ترکیبی بهینه)، طراحی شدند. سپس کسر هر یک از سه نوع نانوذرات، برای داشتن



شکل ۹. تابش خورشیدی و انرژی جذب شده در کسرهای حجمی مختلف. (الف) نانومیل‌ها و (ب) نانوبیضی‌گون‌ها

۵-۳ خواص نوری نانوصفحات

برای بررسی عملکرد حرارتی خورشیدی نانوصفحات، خواص نوری نانوصفحات با نسبت‌های ابعادی مختلف از l/h محاسبه شده است (شکل ۱۰). ضریب جذب نانوصفحات طلا با استفاده از روش روش تقریب دوقطبی گسسته^۲ DDA، محاسبه شده است. به‌منظور یکسان بودن اندازه نانومیل‌ها و نانوبیضی‌گون‌ها، قطر معادل نانوصفحات از رابطه (۸) محاسبه شد و روی ۲۰ نانومتر تنظیم شد.



شکل ۱۰. شما تیک نانوصفحات

نسبت‌های ابعادی l/h برای نانوصفحات در شبیه‌سازی، بزرگ‌تر از ۵ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش l/h پیک جذب نیز افزایش می‌یابد که به این معنی است که صفحات نازک‌تر، تشدید پلاسمون سطحی موضعی را موثرتر برانگیخته می‌کنند. در مقایسه با نانومیل‌ها و نانوبیضی‌گون‌ها، نانوصفحات با اندازه ذرات یکسان، پیک بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند. هرچند، برخلاف نانومیل‌ها و نانوبیضی‌گون‌ها، پیک جذب نانوصفحات طلا با تغییر شکل ذرات، جابجایی قرمز مشهودی در طیف، ظاهر نمی‌شود.

میلها	میلها	نانوسیال ترکیبی
$AR=5$	ترکیبی	بهرینه
۵۷۲	۵۸۰	۶۴۴
انرژی (w/m^2)		

۴. نتیجه گیری

خواص نوری نانوسیالات پلاسمونی حاوی نانومیلها، نانوبیضی-گونها و نانوصفحات طلا، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. تشدید پلاسمون سطحی موضعی نانوذرات طلا را می توان با تغییر شکل ذرات، تنظیم کرد. پیک جذب نانومیلها و نانوبیضی گونها به صورت خطی با نسبت ابعاد، افزایش می یابد. اندازه نانوذرات، تاثیر ناچیزی بر ضریب جذب دارد. با توجه به باند جذب تشدید پلاسمونی در طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک، نانوسیالات حاوی ذرات پلاسمونی، عملکرد خوبی در برداشت انرژی خورشیدی دارند، حتی در غلظت های بسیار کم و اندازه ذرات کوچک که نانوسیال پایداری بسیار بالایی در این شرایط، دارد. بر اساس نتایج حاصل از محاسبات، در ابتدا، نانوسیالات ترکیبی شامل هر سه نوع مختلف نانوذرات طلا، طراحی شد (۶۰٪ از نانومیلها با نسبت ابعادی ۵، ۲۰٪ از نانوبیضی گونها با نسبت ابعادی ۲ و نانوصفحات با نسبت ابعاد ۷)، که می تواند از تشدید پلاسمون سطحی موضعی در تمام طیف خورشیدی، به طور کامل استفاده کند. برداشت انرژی خورشیدی به وسیله نانوسیال ترکیبی طراحی شده، در مقایسه با نانوسیال حاوی ذرات کروی، تحت شرایط یکسان، ۱۰۴٪ افزایش بهره وری داشته است. نتایج این کار پژوهشی می تواند باعث توسعه کلکتورهای حرارتی خورشیدی جذب مستقیم^۱ (DASC) با استفاده از نانوسیالات پلاسمونی، گردد. علاوه بر این، تنظیم پذیری طیفی نانوذرات طلا، می تواند یک سیستم PV/T جدید و ارزشمند را بر پایه نانوسیالات، ارائه دهد [۳۶].

واژه نامه

1. Direct absorption solar thermal collector (DASC)
2. Maxwell-Garnett
3. Discrete dipole approximation method (DDA)
4. Mie theory
5. Refractive index
6. Beer-Lambert Law
7. Aspect Ratio (AR)
8. Longitudinal Oscillation Mode (LOM)
9. Dipole moment
10. Least square method

۵- منابع

- [1] H. Suehrcke, D. Döldehög, J.A. Harris, R.W. Lowe, Sol. Energy, 76, 351-358, (2004).

ضریب خاموشی نسبتا یکنواخت در طیف خورشیدی، محاسبه شدند.

نسبت های حجمی بهینه در هر یک از نانوسیالات ترکیبی طراحی شده، به شرح زیر است. نانومیلها ترکیبی: ۱۰٪ از نسبت ابعادی ۱، ۱۵٪ از نسبت ابعادی ۳ و ۷۵٪ از نسبت ابعادی ۵؛ نانوبیضی گونهای ترکیبی: ۱۵٪ از نسبت ابعادی ۲، ۱۵٪ از نسبت ابعادی ۳ و ۷۰٪ از نسبت ابعادی ۵؛ نانوسیال ترکیبی بهینه: ۲۰٪ از نانوبیضی گونها با نسبت ابعادی ۲، ۶۰٪ از نانومیلها با نسبت ابعادی ۵ و ۲۰٪ از نانوصفحات با نسبت ابعاد ۷. شار خورشیدی کل $780 w/m^2$ می باشد. انرژی خورشیدی جذب شده (محدوده طول موج ۲۵۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر)، توسط نانوسیالات حاوی نانوذرات پلاسمونی مختلف با رابطه (۱۱) محاسبه شد. جزئیات در جدول ۱ و ۲، آورده شده است. غلظت هر سه نانوسیال روی ۰/۰۰۳٪ ثابت نگه داشته شد و ضخامت ست های حاوی سیال، در تمام آزمایش ها و محاسبات ۱ سانتی متر بود. قطر معادل نیز ۲۰ نانومتر در نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهد که نانوسیالات حاوی نانوذرات پلاسمونی، در مقایسه با ذرات کروی (نانوبیضی گونها با نسبت ابعادی ۱)، عملکرد بهتری در برداشت انرژی خورشیدی دارند. جداول ۱ و ۲ نیز نشان می دهند که نانومیلها و نانوبیضی گونها با نسبت های ابعادی بزرگتر، عملکرد بهتری در برداشت انرژی خورشیدی دارند. نانوسیال ترکیبی بهینه شده، متشکل از نانومیلها، نانوبیضی گونها و نانوصفحات طلا، می تواند ۸۲/۳٪ از کل انرژی خورشیدی ورودی را جذب کند که ۱۰۴٪ بیشتر از نانوسیالاتی است که تنها حاوی نانوذرات کروی هستند (۴۰/۵٪).

جدول ۱: برداشت انرژی خورشیدی به وسیله نانوصفحات و نانوبیضی گونها.

صفحات	بیضی گونها	بیضی گونها	بیضی گونها
$l/h=7$	$AR=1$	$AR=2$	بیضی گونهای ترکیبی
انرژی (w/m^2)	۳۱۶	۴۴۰	۴۵۶
بیضی گونها	بیضی گونها	بیضی گونهای ترکیبی	
$AR=4$	$AR=5$		
انرژی (w/m^2)	۴۸۲	۵۵۱	۵۵۸

جدول ۲: برداشت انرژی خورشیدی به وسیله نانومیلها و نانوسیالات ترکیبی بهینه.

میلها	میلها	میلها	میلها
$AR=1$	$AR=2$	$AR=3$	$AR=4$
انرژی (w/m^2)	۴۶۶	۴۹۲	۴۹۷
۵۰۵			



- [27] G.M. Hale, M.R. Querry, *Appl. Opt.*, 12, 555–563, (1973).
- [28] V. Amendola, S. Polizzi, M. Meneghetti, *J. Phys. Chem.*, 110, 7232–7237, (2006).
- [29] V. Amendola, M. Meneghetti, *J. Phys. Chem.*, 113, 4277–4285, (2009).
- [30] B.T. Draine, P.J. Flatau, *J. Opt. Soc. Am.*, 11, 1491–1499, (1994).
- [31] E.D. Palik, E.D., Academic Press, New York, (1998).
- [32] C.F. Bohren, D.R. Huffman, John Wiley and Sons, New York, (2008).
- [33] M.F. Modest, Academic Press, New York, (2013).
- [34] V. Juvé, M.F. Cardinal, A. Lombardi, A. Crut, P. Maioli, J. Pérez-Juste, L.M. Liz-Marzan, N.D. Fatti, F. Vallée, *Nano Lett.*, 13, 2234–2240, (2013).
- [35] X. Fan, W. Zheng, D.J. Singh, *Light: Sci. Appl.*, 3, e179, (2014).
- [36] N.E. Hjerrild, S. Mesgari, F. Crisostomo, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor, *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, 147, 281–287, (2016).
- [2] S.A. Kalogirou, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 30, 231–295, (2004).
- [3] M.S. Valipour, S. Rashidi, *Renew. Energy*, 74, 448–455, (2015).
- [4] N.J. Hogan, A.S. Urban, C. Ayala-Orozco, A. Pimpinelli, P. Nordlander, N.J. Halas, *Nano Lett.*, 14, 4640–4645, (2014).
- [5] A. Lenert, E.N. Wang, *Sol. Energy*, 86, 253–265, (2012).
- [6] G. Ni, N. Miljkovic, H. Ghasemi, X. Huang, S.V. Boriskina, C.T. Lin, J. Wang, Y. Xu, M. Rahman, T. Zhang, G. Chen, *Nano Energy*, 17, 290–301, (2015).
- [7] M. Du, G.H. Tang, *Sol. Energy*, 122, 864–872, (2015).
- [8] V.K. Pustovalov, L.G. Astafyeva, W. Fritzsche, *Sol. Energy*, 122, 1334–1341, (2015).
- [9] V. Khullar, H. Tyagi, N. Hordy, T.P. Otanicar, Y. Hewakuruppu, P. Modi, R.A. Taylor, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 77, 377–384, (2014).
- [10] T.P. Otanicar, P.E. Phelan, R.S. Prasher, G. Rosengarten, R.A. Taylor, *J. Renew. Sustain. Energy*, 2, 033102, (2010).
- [11] M. Chen, Y. He, J. Zhu, Y. Shuai, B. Jiang, B. Huang, *Sol. Energy*, 115, 85–94, (2015).
- [12] Y. Xuan, H. Duan, Q. Li, *RSC Adv.*, 4, 16206–16213, (2014).
- [13] H. Duan, Y. Xuan, *Appl. Energy*, 114, 22–29, (2014).
- [14] B.J. Lee, K. Park, T. Walsh, L. Xu, *ASME J. Sol. Energy*, 134, 021009, (2012).
- [15] H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, *ASME J. Sol. Energy*, 131, 041004, (2009).
- [16] H. Raether, Springer, Berlin Heidelberg, (1998).
- [17] A.V. Zayats, I.I. Smolyaninov, A.A. Maradudin, *Phys. Rep.*, 408, 131–314, (2005).
- [18] T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, *Renew. Energy*, 39, 293–298, (2012).
- [19] Z. Said, R. Saidur, N.A. Rahim, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 59, 46–54, (2014).
- [20] S.M. Ladjvardi, A. Asnaghi, P.S. Izadkhast, A.H. Kashani, *Sol. Energy*, 94, 327–334, (2013).
- [21] R. Saidur, T.C. Meng, Z. Said, M. Hasanuzzaman, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 55, 5899–5907, (2012).
- [22] Q. He, S. Wang, S. Zeng, Z. Zheng, *Energ. Convers. Manage*, 73, 150–157, (2013).
- [23] R.A. Taylor, T.P. Otanicar, Y. Herukerrupu, F. Bremond, G. Rosengarten, E.R. Hawkes, X. Jiang, S. Coulombe, *Appl. Opt.*, 52, 1413–1422, (2013).
- [24] P.K. Jain, K.S. Lee, I.H. El-Sayed, M.A. El-Sayed, *J. Phys. Chem.*, 110, 7238–7248, (2006).
- [25] J. Jeon, S. Park, B.J. Lee, *Opt. Express*, 22, A1101–A1111, (2014).
- [26] D. Rativa, L.A. Gómez-Malagón, *Sol. Energy*, 118, 419–425, (2015).