

تأثیر زاویه قطبش نور بر خواص پلاسمونی و ترموپلاسمونی نانوجارچوب‌های دوتایی ستاره‌ای شکل طلا جهت استفاده در نورگرما درمانی

عباس آذریان و شقایق زمانی نجف آبادی*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم

پست الکترونیکی: s.zamani@stu.qom.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳)

چکیده:

در این پژوهش، اثر زاویه قطبش نور فرودی بر رفتار پلاسمونی و ترموپلاسمونی نانوجارچوب‌های دوتایی ستاره‌ای شکل طلای پنج‌شاخه با حفره‌ای از جنس آب به صورت متقارن، با بهره‌گیری از روش عددی FDTD بررسی شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تغییر زاویه قطبش نور فرودی از 0° تا 90° درجه، به‌ویژه در مد پلاسمونی اول، منجر به جابه‌جایی طیف جذب و افزایش ۱۱۷ برابری میدان الکتریکی موضعی می‌شود. افزایش دمای موضعی تا 140°C و ارتباط آن با چگالی توان گرمایی تولیدشده، پتانسیل این ساختارها را در نورگرما درمانی تأیید می‌کند؛ در حالی که مد پلاسمونی دوم نسبت به تغییرات زاویه قطبش حساس نیست. در ضمن طول‌موج 1800 نانومتر به‌عنوان نقطه ایزوبستیک معرفی می‌شود که در آن پاسخ نوری ساختار نسبت به زاویه قطبش نور فرودی مستقل است. این نتایج گویای قابلیت مهندسی پاسخ نوری و حرارتی نانوجارچوب‌های مورد مطالعه از طریق کنترل زاویه قطبش با هدف توسعه کاربردهای نانوفوتونیک است.

واژه‌های کلیدی: پلاسمون، ترموپلاسمون، تشدید پلاسمون سطحی، زاویه قطبش، نورگرما درمانی، نانوذرات دوتایی، نانوذرات ستاره‌ای، نقاط ایزوبستیک.

۱. مقدمه

به کاربرد آن‌ها در سلول‌های خورشیدی [۳ و ۴]، تشخیص و درمان سرطان [۵]، دارورسانی هدفمند [۶]، حسگرها [۷]، درمان فوتودینامیک و فراگرمایی (هایپرترمیا) اشاره کرد [۸]. در همین راستا نانوذرات طلا به علت زیست سازگاری، پایداری حرارتی نسبتاً بالا و ویژگی‌های نوری بی‌نظیر مانند قرار گرفتن بیشینه جذب پلاسمونی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک (پنجره‌های درمانی)، به‌عنوان عامل‌های جذب خارجی قابل تنظیم و کنترل‌پذیر با نور به کار گرفته می‌شوند. این نانوذرات با افزایش میزان جذب تابش نور فرودی و ایجاد گرمای موضعی امکان تخریب سلول‌های سرطانی را فراهم کرده و در عین حال کمترین آسیب را به بافت سالم اطراف وارد می‌کنند [۹].

در طول دو دهه گذشته علاقه پژوهشگران به استفاده از نانوذرات فلزی به عنوان منابع گرمایی قابل کنترل از راه دور، به معرفی و شکل‌گیری زمینه ترموپلاسمونی انجامیده است [۱]. نانوذرات فلزات نجیب مانند طلا هنگامی که تحت تابش امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، جذب فوق العاده‌ای در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک از خود نشان می‌دهند و گرمای قابل توجهی در بسامد تشدید پلاسمون سطحی موضعی تولید می‌کنند. این تبدیل نور به گرما در نانو ذرات کاربردهای متنوع و متعددی در نانوفناوری دارد [۲]، که از جمله می‌توان

۲. مبانی نظری

برای بررسی اثر نور گرمایی نانوذرات پلاسمونی، می‌توان سطح مقطع جذب (σ_{abs}) نانو ذراتی را که تحت تابش امواج الکترومغناطیسی قرار گرفته اند، از رابطه زیر به دست آورد [۱۰]:

$$\sigma_{abs} = \frac{k}{\epsilon_0} \int_{NP} \text{Im}(\epsilon_\omega) |\vec{E}(\vec{r})|^2 d\vec{r} \quad (1)$$

که در این رابطه $k = \frac{n\omega}{c}$ عدد موج، ϵ_ω تابع دی الکتریک نانو ذره، E_0 دامنه میدان الکتریکی نور فرودی، n ضریب شکست محیط اطراف، ω بسامد نور فرودی، $E(\vec{r})$ میدان الکتریکی کل و انتگرال بر روی حجم نانوذره محاسبه می‌شود [۱۰]. زمانی که نانوذرات فلزی تحت تابش امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، اگر بسامد تشدید پلاسمون سطحی آن‌ها با بسامد میدان الکتریکی نور فرودی برابر باشد، اُفت انرژی رخ می‌دهد. این اتلاف انرژی عمدتاً ناشی از اثر گرمایش ژول است که طی آن انرژی الکترومغناطیسی جذب شده به گرما تبدیل می‌شود [۱۱]. چگالی توان گرمایی در زمان t و در مکان \vec{r} برای نانوذرات فلزی، رابطه مستقیمی با مجذور میدان الکتریکی نور فرودی و تابع دی الکتریک نانو ذره دارد که به صورت زیر است [۱۱]:

$$q(\vec{r}) = \frac{\omega}{\gamma} \text{Im}(\epsilon_\omega) |\vec{E}(\vec{r})|^2 d\vec{r} \quad (2)$$

توان کل گرمایی تولید شده درون نانوذرات از رابطه زیر به دست می‌آید که به وضوح وابسته به قسمت موهومی تابع دی الکتریک نانوذره، بسامد نور فرودی (ω) و شدت میدان الکتریکی است [۱۱]:

$$Q = \int q(\vec{r}) d\vec{r} = \frac{\omega}{\gamma} \text{Im}(\epsilon_\omega) \int_{NP} |\vec{E}(\vec{r})|^2 d\vec{r} \quad (3)$$

راه دیگر برای به دست آوردن توان گرمای Q تولید شده در داخل نانوذرات، استفاده از رابطه مستقیمی است که با سطح مقطع جذب نور فرودی رابطه دارد [۱۲]:

$$Q = \sigma_{abs} I = \sigma_{abs} \frac{nc\epsilon_0}{\gamma} |\vec{E}_0|^2 \quad (4)$$

که شدت تابش نور فرودی I در این رابطه برابر $\frac{nc\epsilon_0}{\gamma} |\vec{E}_0|^2$

است [۱۲]. با توجه به این که گرمای تولید شده توسط نانوذرات، با انتشار به محیط اطراف، گرادیان دمایی ایجاد می‌کند، چگالی توان گرمایی نانوذرات فلزی در محیطی با رسانندگی گرمایی K ، چگالی ρ و ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت c_p را می‌توان با کمک اثر گرمایش ژول، در زمان t و در مکان \vec{r} از رابطه فضا- زمانی زیر به دست آورد [۱۳ و ۱۴]:

$$q = \rho c_p \delta_t T - k \nabla^2 T \quad (5)$$

این معادله را می‌توان برای نانوذرات مختلف از جمله نانوجارچوب‌های دوتایی مورد مطالعه در این پژوهش حل کرد و معادله یا رفتار توزیع دما بر روی سطح و محیط اطراف نانوذرات را مورد بررسی قرار داد [۱۵]. در این مقاله چگالی توان گرمایی q فقط داخل نانوذرات فلزی غیر صفر در نظر گرفته شده است و در خارج از نانوذرات فلزی (محیط اطراف)، معادله همگن انتشار گرما حل شده است [۱۲ و ۱۶].

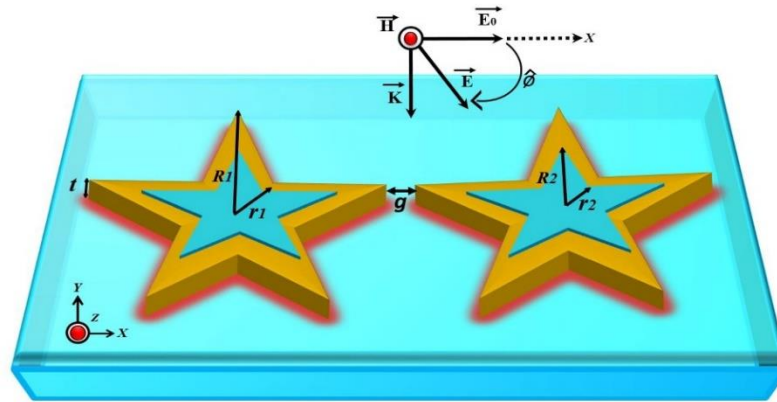
$$\nabla \cdot [K_{in} \cdot \nabla T(\vec{r})] = -q(\vec{r}) \quad \text{درون نانوذرات} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot [K_{out} \cdot \nabla T(\vec{r})] = 0 \quad \text{خارج از نانوذرات}$$

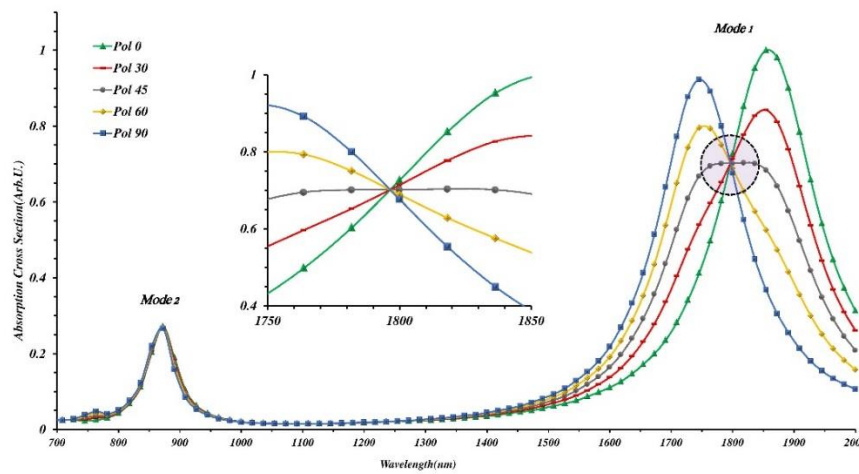
۳. نتایج

در این پژوهش، سطح مقطع جذب نانوجارچوب‌های دوتایی طلا با استفاده از داده‌های جانسون و کریستی [۱۷] بر روی زیر لایه‌ای از جنس آلومینا در محیط آب به روش المان محدود در حوزه زمان (FDTD)^۱ محاسبه شده است. سپس به بررسی نحوه توزیع دما بر روی سطوح و محیط اطراف این نانوذرات در طول موج تشدید پلاسمون سطحی موضعی آن‌ها در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی‌ها از تابش موج تخت با شدت $I = 1 \text{ kw/m}^2$ استفاده شده است. نانوذرات شبیه‌سازی شده به شکل ستاره ۵ پر با شعاع خارجی $R_1 = 78/3 \text{ nm}$ ، شعاع داخلی $r_1 = 30 \text{ nm}$ ، فاصله حدود $g = 4 \text{ nm}$ و هریک دارای حفره‌ای ستاره‌ای شکل با شعاع خارجی $R_2 = 45 \text{ nm}$ و شعاع داخلی $r_2 = 17/5 \text{ nm}$ از جنس آب، هم مرکز با آن‌ها و به صورت متقارن هستند که آن‌ها را تبدیل به نانوفریم کرده است.

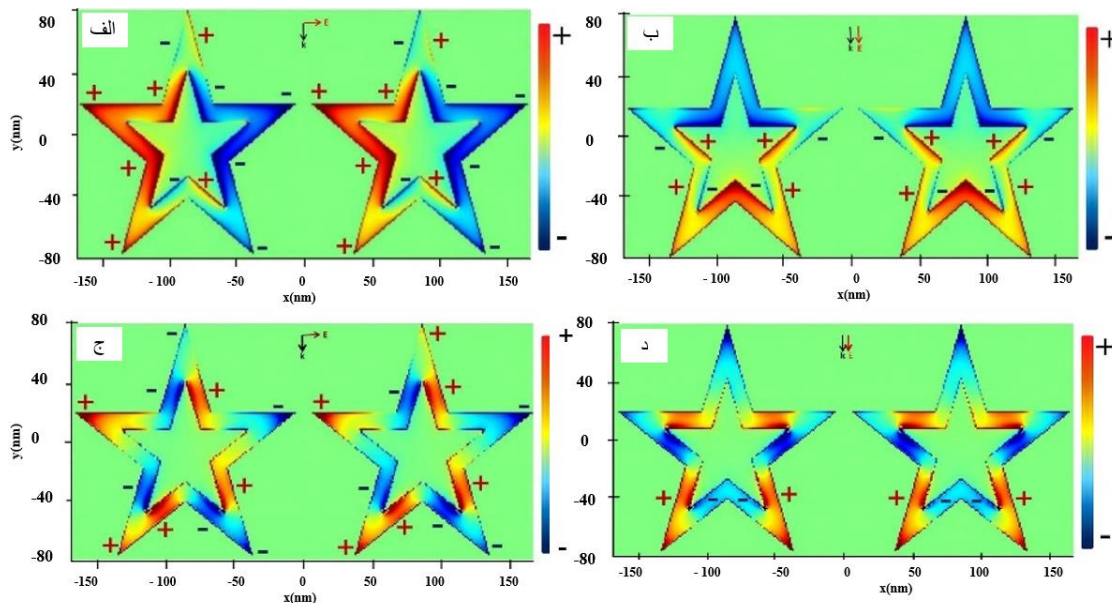
۱. Finite difference time domain



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از نانوذرات دوتایی ستاره‌ای شکل طلای شبیه‌سازی شده در محیط آب با جهت تابش k و زاویه قطبش نور فرودی ϕ .



شکل ۲. سطح مقطع جذب نانوذرات دوتایی ستاره‌ای شکل طلا به‌ازای زوایای قطبش ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و قسمت داخلی شکل طول موج ۱۸۰۰ نانومتر (نقطه ایزوستیک).



شکل ۳. الگوی توزیع چگالی بار برای الف. مُد پلاسمونی اول در زاویه قطبش صفر درجه، ب. مُد پلاسمونی اول در زاویه قطبش ۹۰ درجه، ج. مُد پلاسمونی دوم در زاویه قطبش صفر درجه، و د. مُد پلاسمونی دوم در زاویه قطبش ۹۰ درجه.

ضخامت نانوساختار $t = 12 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است و مطابق شکل ۱ زاویه قطبش میدان الکتریکی با جهت مثبت محور x برابر با ϕ فرض شده است. شکل ۲، طیف سطح مقطع جذب نانوذرات دوتایی ستاره‌ای شکل طلا را در زوایای مختلف قطبش نور فرودی (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) نشان می‌دهد، که در آن دو مُد یا قله پلاسمونی واضح برای هر زاویه قطبش مشاهده می‌شود. موقعیت مُد پلاسمونی اول با افزایش زاویه قطبش، از ۱۸۵۴ نانومتر تا ۱۷۴۵ نانومتر تغییر می‌کند. به طوری که برای زاویه‌های بزرگتر از ۴۵ درجه، به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر (جابه‌جایی آبی) و برای زاویه‌های کوچک‌تر از ۴۵ درجه به سمت طول موج‌های بلندتر (جابه‌جایی قرمز) تغییر می‌کند. همچنین برای مُد پلاسمونی اول، بیشترین و کمترین مقدار سطح مقطع جذب به ترتیب در زاویه‌های ۰ و ۴۵ درجه مشاهده می‌شود. ولی موقعیت مُد پلاسمونی دوم بر خلاف مُد اول، برای همه زوایای قطبش در طول موج ۸۷۲ نانومتر ثابت و میزان سطح مقطع جذب نیز تقریباً در تمامی زاویه‌ها یکسان است. بنابراین، مُد پلاسمونی دوم تحت تأثیر زاویه قطبش نور فرودی قرار ندارد. مطابق با قسمت داخلی شکل ۲، محل تلاقی طیف جذب نانوچارچوب‌ها در طول موج ۱۸۰۰ نانومتر واقع شده که در آن سطح مقطع جذب نانوذرات با هم یکسان و نسبت به زاویه قطبش نور فرودی مستقل است و نقطه ایزوبستیک^۱ نامیده می‌شود. در نهایت دلیل این تغییرات در طیف جذب نانوذرات پلاسمونی را می‌توان با استفاده از الگوی توزیع چگالی بار شکل ۳ توجیه کرد. همان‌طور که در قسمت الف و ب شکل ۳ مشاهده می‌شود، حضور یک دوقطبی در نزدیک‌ترین فاصله دوتایی (ناحیه شکاف میان دو نانوذره) در مُدهای پلاسمونی اول و دوم در زاویه قطبش صفر درجه بسیار حائز اهمیت است. برای مُد پلاسمونی اول در زاویه قطبش صفر درجه، دوقطبی در جهت میدان الکتریکی نور فرودی و برای زاویه قطبش ۹۰ درجه دوقطبی عمود بر میدان الکتریکی نور فرودی مشاهده می‌شود. بنابراین، توزیع بار به وضوح با تغییر زاویه قطبش نور فرودی تغییر می‌کند. الگوی توزیع بار نامتقارن و وابسته به زاویه قطبش است که این بیانگر

حساسیت فوق العاده مُد اول به زاویه قطبش نور فرودی است. قسمت‌های ج و د شکل ۳ نشان می‌دهند که برای مُد دوم توزیع بارهای الکتریکی روی شاخه‌های دوتایی به صورت متقارن و تقریباً مستقل از زاویه قطبش نور فرودی است. این پایداری و عدم تغییر محسوس در توزیع چگالی بار بیانگر آن است که مُد پلاسمونی دوم نسبت به زاویه قطبش نور حساسیت کمی دارد. شکل ۴، الگوی توزیع میدان الکتریکی در زوایای قطبش متفاوت نانوذرات ستاره‌ای شکل را نشان می‌دهد. قسمت‌های الف و ب به ترتیب الگوی توزیع میدان برای مُدهای پلاسمونی اول و دوم در زاویه قطبش صفر درجه است. از آنجا که بارهای مخالف در شاخه‌های مجاور دوتایی و با فاصله بسیار نزدیک قرار گرفته‌اند لذا بیشینه جذب و تقویت میدان الکتریکی موضعی در محل این دو قطبی مشاهده می‌شود. این ناحیه با چگالی میدان بالا (لکه داغ^۲) کانون اصلی تقویت میدان الکتریکی و افزایش دما است. در حالی که، در قسمت‌های ج و د از شکل ۴ که دو مُد را در زاویه قطبش ۹۰ درجه نشان می‌دهد، در نزدیکترین فاصله بین دوناوستاره بارهای همنام قرار دارند. بنابراین، شدت میدان الکتریکی در این ناحیه به طور محسوس تقویت نمی‌شود، و میدان بسیار ضعیف و یکنواخت است.

در شکل ۵، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که حداکثر ضریب تقویت میدان الکتریکی موضعی در محل لکه داغ ناشی در قطبش صفر درجه نسبت به میدان فرودی به بیش از ۱۱۷ برابر می‌رسد، در حالی که این مقدار در قطبش ۹۰ درجه فقط ۳۰ برابر است. در طول موج ۱۸۰۰ نانومتر (نقطه ایزوبستیک) نیز شدت میدان در مقایسه با مُدهای پلاسمونی اول و دوم بسیار کمتر است. به عبارت دیگر، در نقطه ایزوبستیک هیچ نقطه‌ای به طور خاص تقویت نمی‌شود.

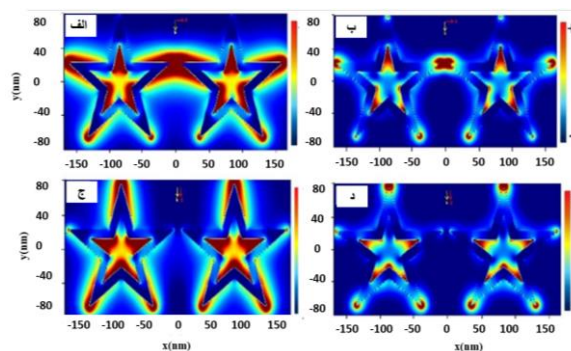
با بررسی الگوی توزیع چگالی بار سطحی در دو طول موج متناظر با قله‌های طیف جذب مشخص می‌شود که این دو قله ناشی از برانگیختگی مُدهای متفاوت چندقطبی هستند. در قله اول (مد اول)، چگالی بار سطحی به طور عمده به صورت دوقطبی توزیع شده است؛ یعنی بارهای مثبت و منفی در دو

۱. Isosbestic

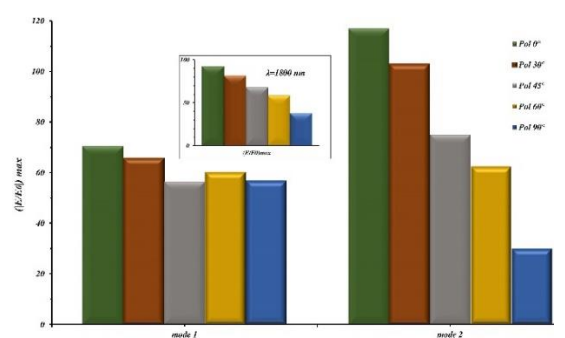
۲. Hot spots

رأس روبه‌روی هم قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، الگوی دوقطبی باعث ایجاد یک ناحیه با شدت میدان الکتریکی بسیار بالا بین دو نانوساختار می‌شود که به شکل نقطه داغ ظاهر می‌گردد. به دلیل هم‌راستایی این مُد با محور میدان تابیده‌شده، بیشترین مقدار جذب و در نتیجه بیشترین افزایش دمای موضعی در این طول موج مشاهده می‌شود.

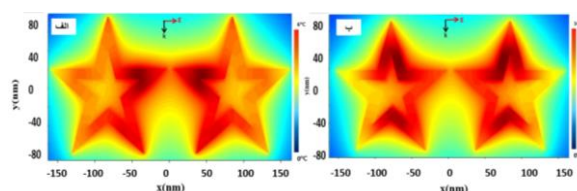
در مقابل، در قله دوم (مد دوم)، توزیع بار به شکل چهارقطبی است؛ به این معنا که بارهای مثبت و منفی به‌طور متقارن در چهار ناحیه مختلف از ساختار ظاهر می‌شوند. این نوع مُد نسبت به دوقطبی جفت‌شدگی ضعیف‌تری با میدان نور فرودی دارد و بنابراین سطح مقطع جذب و توان گرمایش آن نیز کمتر است. در این حالت نقاط داغ با شدت پایین‌تری ایجاد می‌شوند. در شکل ۶، الف، الگوی توزیع دما بر روی سطح نانوذرات ستاره‌ای شکل و محیط اطراف آن‌ها تحت زاویه قطبش صفر درجه نمایش داده شده است. همان‌طور که از الگوی توزیع میدان الکتریکی در شکل ۴ انتظار می‌رود بیشترین افزایش دما برای مُد پلاسمونی اول در ناحیه شکاف دو نانوذره مشاهده می‌شود و برای مُد پلاسمونی دوم گرما به‌صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بیش‌ترین تغییرات بیشینه دمای موضعی در زاویه قطبش صفر درجه و برابر با $\Delta T_{\max} = 140^\circ\text{C}$ است، درحالی‌که کمترین افزایش دما مربوط به زاویه قطبش 90° درجه و $\Delta T_{\max} = 41^\circ\text{C}$ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قطبش افقی میدان تابیده‌شده منجر به ایجاد نقطه داغ قوی‌تری در ناحیه بین دو رأس مجاور نانوساختار می‌شود. این رفتار با توجه به هندسه سامانه قابل پیش‌بینی است، زیرا در این حالت میدان الکتریکی تابشی بیشترین هم‌راستایی را با محور دوقطبی مؤثر دارد. در نتیجه دو رأس نزدیک به هم نقش تعیین‌کننده‌ای در تقویت میدان موضعی و مُد دوقطبی ایفا می‌کنند. این پیکربندی باعث افزایش شدت میدان الکتریکی موضعی در شکاف بین دو نانو ستاره شده و منجر به جذب بیشتر و تولید گرمای بالاتری نسبت به سایر زاویه‌های قطبش می‌شود. به عبارت دیگر، قطبش افقی شرایط هندسی بهینه‌ای را برای تحریک مُد دوقطبی فراهم می‌کند و این مد همان‌گونه که در تحلیل‌های طیفی نیز مشخص



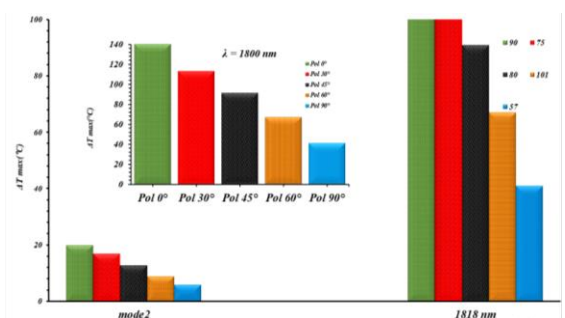
شکل ۴. الگوی توزیع میدان الکتریکی موضعی برای الف. مُد پلاسمونی اول در زاویه قطبش صفر درجه، ب. مُد پلاسمونی دوم در زاویه قطبش صفر درجه، ج. مُد پلاسمونی اول در زاویه قطبش 90° درجه، و د. مُد پلاسمونی دوم در زاویه قطبش 90° درجه.



شکل ۵. تغییرات بیشینه نسبت میدان الکتریکی موضعی به میدان الکتریکی نور فرودی به ازای زاویه‌های قطبش 0° ، 30° ، 45° ، 60° و 90° درجه، و قسمت داخلی شکل میزان تقویت میدان الکتریکی برای طول موج 1800 نانومتر (نقطه ایروبستیک) است.



شکل ۶. الگوی توزیع دما در زاویه قطبش صفر درجه به ازای الف. مُد پلاسمونی اول و ب. مُد پلاسمونی دوم.



شکل ۷. تغییرات بیشینه دمای نانوذرات به ازای زاویه‌های قطبش 0° ، 30° ، 45° ، 60° و 90° درجه و قسمت داخلی شکل میزان افزایش دما برای طول موج 1800 نانومتر است.

$T_{\max} = 140^{\circ}\text{C}$ ، تابش، $S = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ سطح مقطع مورد تابش، بیشینه دمای اندازه‌گیری شده، $T_{\text{sur}} = 25^{\circ}\text{C}$ دمای محیط، I شدت تابش نورفرودی و A_{λ} ضریب جذب در طول موجی خاص است. در نهایت، مقدار بازده ۳۸ درصد به دست آمده است که نشانگر کارایی بسیار مطلوب ساختار مورد مطالعه در تبدیل نور به گرما است.

مقایسه پارامترهای کلیدی ساختار مورد مطالعه در این پژوهش با نانو ساختارهای مشابه نیز در جدول ۱ نمایش داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

نانوچارچوب‌های دوتایی مورد مطالعه در این پژوهش، توانایی فوق‌العاده‌ای برای تقویت میدان الکتریکی و تولید حرارت موضعی قابل کنترل از خود نشان می‌دهند. بررسی اثر زاویه قطبش در این نانو ساختارها می‌تواند بهینه‌سازی توزیع میدان و گرما را ممکن سازد. همچنین وجود نقطه ایزوبستیک در طول موج 1800 نانومتر ویژگی منحصر به فردی است که پایداری عملکرد این ساختار را در نورگرما درمانی تضمین می‌کند. ضمن آن که بازدهی تبدیل نورگرمایی ساختار تا حدود ۳۸٪ و بیشینه افزایش دمای موضعی 140°C درجه سانتیگراد، نویدبخش کاربردهای دقیق در نورگرما درمانی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی با حداقل آسیب به بافت‌های سالم اطراف است.

جدول ۱. مقایسه طول موج تشدید پلاسمون سطحی، بیشینه میدان الکتریکی موضعی و بیشینه افزایش دمای موضعی.

	LSPR(nm)	(E/E ₀) _{max}	ΔT_{\max} °C	Ref
Nanospheres	۵۳۸ nm	۱۴/۸	۴۷°C	[۱۹]
Monostar	۱۴۰۰nm	۱۱۴	۱۵۱°C	[۲۰]
SGDNs	۱۱۸۰nm	۲۵۰	۳۰°C	[۲۱]
Star shaped dimer	۱۸۰۰nm	۱۱۷	۱۴۰°C	This work

شد، بیشترین سهم را در پاسخ ترموپلاسمونی و افزایش دمای موضعی دارد.

داده‌های به دست آمده حاکی از آن است که بیشترین تراکم انرژی حرارتی در ناحیه میان دو ذره، یعنی همان لکه داغ، ناحیه با چگالی میدان بالا شکل می‌گیرد که با موقعیت دوقطبی بین دو نانوذره هم‌خوانی دارد. این نتیجه ناشی از تمرکز شدید میدان الکتریکی در این ناحیه بحرانی است که تحت تأثیر هندسه خاص نانوذرات مورد مطالعه و ویژگی‌های پلاسمونی آنها قرار دارد.

محاسبه بازدهی تبدیل گرمانوری

برای ارزیابی دقیق عملکرد گرمایی نانوذرات، پیشنهاد می‌شود مقدار بازده تبدیل نور به گرما η از رابطه زیر محاسبه شود [۱۸]:

$$\eta = \frac{hS(T_{\max} - T_{\text{sur}})}{I(1 - 10^{-A_{\lambda}})} \quad (7)$$

که در آن $h = 1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ضریب انتقال حرارت،

۵. مراجع

1. G Baffou, F Cichos and R Quidant, *Natur Mater* **19** (2020) 946.
2. V Ruhoff, et al., *Nano Lett* **3** (2024) 777.
3. A Indhu, et al., *Beil J. Nanotech* **14** (2023) 380.
4. S Zhang, et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **282** (2025) 113416.
5. Z Yang, et al., *Mol. Med. Rep* **20** (2019) 5.
6. A Akouibaa, et al., *J. Drug Deliv. Sci. Technol* **95** (2024) 105559.
7. E Ferrari, *Biosensors* **13** (2023) 411.
8. K Sztandera, et al., *Mol. Pharm* **16** (2018) 1.
9. R Yang, et al., *View* **3** (2022) 20200171.
10. Baffou, et al., *App Phys Lett* **94** (2009) 153109.
11. Das, U, et al., *Eur.Phys. J.Plus* **137** (2022) 1248.
12. G Baffou and R Quidant, *Laser Photonics Rev.* **7** (2013) 171.
13. G Baffou, *Thermoplasmonics* **1** (2017) 36.
14. G Liu, *Thermoplasmonics* **1** (2024) 72.

15. L Khosravi Khorashad, et al., *J. Phys. Chem C* **120** (2016) 13215.
16. S Manrique-Bedoya, et al., *J. Phys. Chem C* **124** (2020) 17172.
17. P Johnson and B Christy, *Phys. Rev.B* **6** (1972) 4370.
18. X Cui , et al., *Chem.Rev.* **123** (2023) 6891.
19. Baffou, et al., *Sci.App.* **9** (2020) 108.
20. A Azarian and S Zamani, *Iran. J. Phys. Res.* **24** (2024) 263.
21. A Azarian and S Zamani, *Opt. Quantum Electron.* **57** (2025) 1.