

# مطالعه توزیع دما در یک نانو توری فلزی مبتنی بر ماده غیرخطی کر تحت تابش نور لیزر تپی نانوثانیه

## آرزو رشیدی

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

پست الکترونیکی: arezou.rashidi@umz.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵)

### چکیده

در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود به بررسی نحوه توزیع دما در یک نانوتوری فلزی یک بعدی که تحت گرمایش نور لیزر تپی گوسی نانوثانیه قرار دارد، پرداخته می‌شود. فرض می‌شود که شیارهای نانوتوری با یک ماده غیرخطی از نوع کر پر می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که توزیع دمایی سامانه به شدت به شاریدگی (فلوئنس) نور لیزر تابشی وابسته است؛ طوری که، با افزایش شاریدگی تپ لیزری در اطراف قله تپ و بعد از آن، توزیع دمای کاملاً متفاوتی در دو رژیم خطی و غیرخطی حاصل می‌شود. در واقع، تحریک اثر اپتیکی غیرخطی کر، به ویژه در شاریدگی‌های بالای لیزر، منجر به تغییر پاسخ دمایی در رژیم غیرخطی نسبت به رژیم خطی می‌شود. همچنین، بسته به طول موج نور لیزر اعمالی، امکان افزایش یا کاهش دما نسبت به مورد خطی وجود دارد. از طرفی نیز برای بروز اثر غیرخطی نمی‌توان شاریدگی نور لیزر را تا هر مقداری بالا برد؛ زیرا امکان افزایش دما حتی بالاتر از دمای ذوب مواد نیز وجود دارد. بنابراین، در هنگام اعمال تپ‌های قوی لیزر، بایستی بررسی‌های دمایی صورت گیرند تا از گرم شدن بیش از حد و آسیب به سامانه جلوگیری شود.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع دما، نانوتوری، لیزر تپی، شاریدگی، رژیم‌های خطی و غیرخطی

به عنوان مثال، در محاسبه انتقال گرما، بازده حرارتی و تولید آنتروپی فرایندها و چرخه‌های ترمودینامیکی مختلف مانند موتورهای گرمایی، یخچال‌ها و پمپ‌های گرمایی استفاده می‌شوند [۲]. همچنین، در طراحی و بهینه‌سازی مواد برای کاربردهای حرارتی خاص مانند عایق، سینک‌های گرمایی، دستگاه‌های ترموالکتریک و حسگرهای حرارتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. به علاوه، توزیع دما می‌تواند در مطالعه خواص حرارتی مواد و پاسخ آنها به تحریکات خارجی نیز کمک شایانی کند. از جمله تحریکاتی که می‌تواند منجر به تغییرات دمایی در اجسام شود، استفاده از نور لیزر است که شار گرمایی بالایی را در مدت زمان کوتاه اعمال می‌کند [۴]. از طرف دیگر، هنگامی که محیطی با یک منبع نور به شدت قوی

### ۱. مقدمه

رسانش گرما و توزیع دما در فیزیک، مفاهیم مهمی به شمار می‌روند که چگونگی انتقال و توزیع گرما یا انرژی حرارتی را در داخل یک جسم یا بین اجسام توصیف می‌کنند [۱]. رسانش گرما فرایندی است که طی آن گرما از نواحی با دمای بالای یک جسم به نواحی با دمای پایین به دلیل برهم‌کنش بین ذرات، منتقل می‌شود. در واقع، دما به عنوان نیروی محرکه انتقال گرما است. توزیع دما تابعی است که دمای هر نقطه از جسم را در طول زمان و مکان تعریف می‌کند. رسانش گرما و توزیع دما کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی دارند.

لیزری قرار گرفته است، می‌پردازیم. نانوتوری پیشنهادی با یک ماده غیرخطی از نوع کر پر شده است. درصدد آن هستیم که در شاریدگی‌های بالای تپ لیزری و با در نظر گرفتن دو رژیم خطی و غیرخطی به بررسی چگونگی افزایش دمای سامانه بپردازیم. در واقع، سعی داریم تا با مقایسه دو رژیم نامبرده، اهمیت مطالعه انتقال گرما را در سامانه‌های غیرخطی که نیاز به شدت‌های بالای لیزری دارند، بحث و بررسی کنیم. محاسبات در نرم‌افزار کامسول انجام می‌گیرد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

## ۲. مدل و روش شبیه‌سازی

ساختار پیشنهادی، یک نانوتوری نقره‌ای یک بعدی است که طرحواره‌ای از سلول واحد آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. دوره تناوب توری ۳۰۰ نانومتر، ضخامت آن ۴۰۰ نانومتر و عرض شیارها نیز ۳۸ نانومتر انتخاب شده‌اند. فرض می‌شود که که شیارها با یک ماده دی‌الکتریک غیرخطی مرتبه سوم (کر) با ضریب شکست خطی ۱.۵۵ و ضریب غیرخطی  $\text{cm}^2/\text{MW}$   $\epsilon_2 = 2/5 \times 10^{-5}$  پر شده است [۱۴]. ضریب شکست نقره پاشنده است که مطابق با داده‌های تجربی موجود در مرجع [۱۵] انتخاب شده است. فرض می‌شود که نور لیزر تپی نانوثانیه‌ای به طور عمود بر ساختار در راستای  $y$  بر آن بتابد و جهت میدان الکتریکی نیز عمود بر شیارها در راستای  $x$  باشد. شدت لیزر تپی اعمالی از عبارت زیر بیان می‌شود:

$$I(t) = \frac{2F_L}{t_p} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left(\frac{-(4 \ln 2)(t - t_0)^2}{t_p^2}\right), \quad (1)$$

که  $t_p = 1/5 \text{ ns}$  پهنای کامل در نصف بیشینه نمایه (پروفایل) تپی،  $t_0 = 2 \text{ ns}$  مرکز قله تپ و  $F_L$  شاریدگی لیزر فرودی را توصیف می‌کنند. محاسبات مبتنی بر روش المان محدود<sup>۱</sup> است که با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول انجام می‌گیرد. مطابق با آنچه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی از یک سلول واحد دو بعدی با شرایط مرزی تناوبی (PBC) فلوکه<sup>۲</sup> در راستای محور  $y$  استفاده می‌کنیم.

مانند نور لیزر تحریک شود، پاسخ اپتیکی غیرخطی در آن محیط القا می‌شود. یکی از پدیده‌های جالب غیرخطی که توجه زیادی را به خود جلب کرده است، غیرخطیت مرتبه سوم یا اثر غیرخطی کر است که در آن ضریب شکست ماده به میزانی متناسب با شدت نور فرودی تغییر می‌کند [۵]. غالباً از این اثر در ساختارهای مختلف برای کارکردهای سوئیچ زنی سریع نوری و طراحی دیودهای نوری استفاده می‌شود [۶ و ۷]. در این میان، یکی از سامانه‌هایی که به دلیل سادگی در ساخت و تنظیم ساده اندازه و شکل و قابلیت به دام انداختن مؤثر نور، در بسیاری از کاربردهای غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند، توری‌ها هستند. توری‌ها را به طور تجربی می‌توان با استفاده از روش‌های لیزری و نانولیتوگرافی ساخت [۸]. محققان با وارد کردن مواد غیرخطی در شیارهای توری‌ها به ویژگی‌هایی مانند انحراف پرتو [۹]، دوپایی و سوئیچ زنی نوری [۱۰-۱۲] دست یافته‌اند. لازم به ذکر است که اثر غیرخطی در این سامانه‌ها با استفاده از نور لیزر پیوسته موج تحریک شده است که نیاز به شدت‌های ورودی بالا است و بنابراین، یک محدودیت اساسی در به کارگیری آنها در کاربردهای عملی استاندارد به شمار می‌رود. برای فایق آمدن بر چنین محدودیت‌هایی، اخیراً از نور لیزر تپی در ساختارهای توری غیرخطی استفاده شده است که افزایش میدان الکتریکی برای تحریک اثر غیرخطی در مقایسه با لیزر پیوسته موج در شدت‌های نسبتاً پایین‌تری صورت می‌گیرد [۱۳].

با این حال، نکته مهمی که در هیچ‌کدام از این مطالعات بدان پرداخته نشده است، اثر نور لیزر بر افزایش دمای سامانه است. در واقع، تاباندن تپ لیزری قوی بر ماده می‌تواند به خاطر جذب نور در آن منجر به تولید گرما و افزایش دمای آن شود. چنین افزایش دمایی می‌تواند بر اثر بالا بردن دما تا نقطه ذوب ماده به آن آسیب برساند. بنابراین، مطالعه توزیع دمایی در سامانه‌هایی که برای ظهور اثر اپتیکی غیرخطی تحت تابش نور شدید لیزر قرار می‌گیرند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این رو، در مطالعه حاضر به شبیه‌سازی و بررسی نحوه انتقال گرما و توزیع دمایی در یک نانوتوری فلزی یک بعدی که تحت گرمایش

۱. Finite-element-method

۲. Floquet

در جدول ۱ ذکر شده‌اند [۱۷،۱۶،۱].

در معادله (۲)،  $\dot{e}_{gen}$  تولید گرما را نشان می‌دهد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

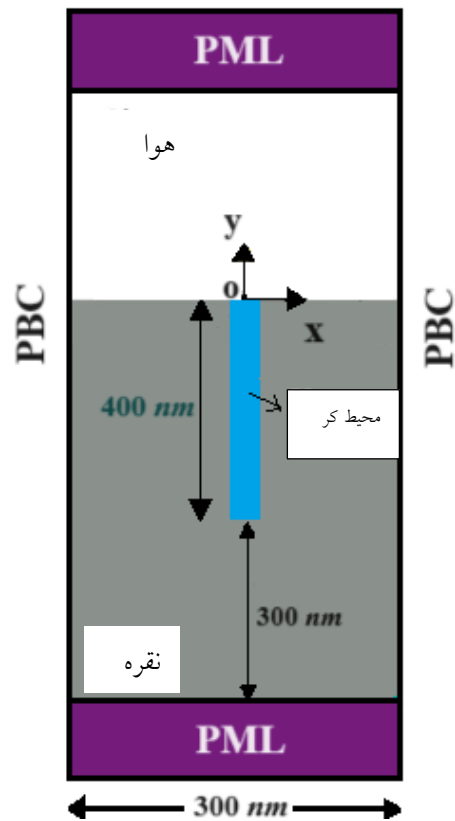
$$\dot{e}_{gen} = \frac{1}{\rho} \epsilon_r \omega |E_i|^2 \text{Im}(\epsilon(\omega)), \quad (3)$$

لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از تپ گوسی با نمایه شدت زمانی، محاسبات در حلگر وابسته به زمان صورت می‌گیرد. به علاوه، معادله رسانش گرمای (۲) یک معادله ناپایا است که با حل آن، دمای وابسته به مکان و زمان به دست می‌آید.

جدول ۱. پارامترهای حرارتی مواد مورد استفاده در نانوتوری.

ک (W/m.K) c	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	(J/kg.K)	ماده
۱۰۰۰	۳۵۳ KT	۰/۰۳	هوا
۲۳۵	۱۰۵۰۰	۴۲۹	نقره
۱۵۰۰	۱۳۰۰	۰/۸	محیط کر

شایان ذکر است که پس از ایجاد هندسه و اختصاص فیزیک به مدل خود در کامسول، گام مهم بعدی ساخت مش است که در آن فضا به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود و معادلات مورد نظر به این جزءها تعمیم داده می‌شود. بدین صورت متغیرهایی مانند شدت میدان الکتریکی و ... در تمام فضا محاسبه خواهند شد. مش مورد استفاده، سرعت حل و دقت همگرایی معادلات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای مثال، اندازه مش باید به حد کافی کوچک باشد تا بتواند تغییرات میدان را در فضای مسئله نشان دهد. شکل مش هم باید با توجه به نوع هندسه و فضای مسئله انتخاب شود. برای مثال، مش‌های مثلثی، چهارضلعی و شش ضلعی می‌توانند برای مسائل مختلف به کار روند. همچنین، روش‌های مختلفی برای مش‌بندی وجود دارند که می‌توانند برای فضاهای مختلف مناسب باشند. برای مسائل با هندسه منظم و مستطیلی که در ساختار ما نیز حاکم است، از روش شبکه‌بندی<sup>۱</sup> می‌توان استفاده کرد که دقت حل معادلات را افزایش می‌دهد.



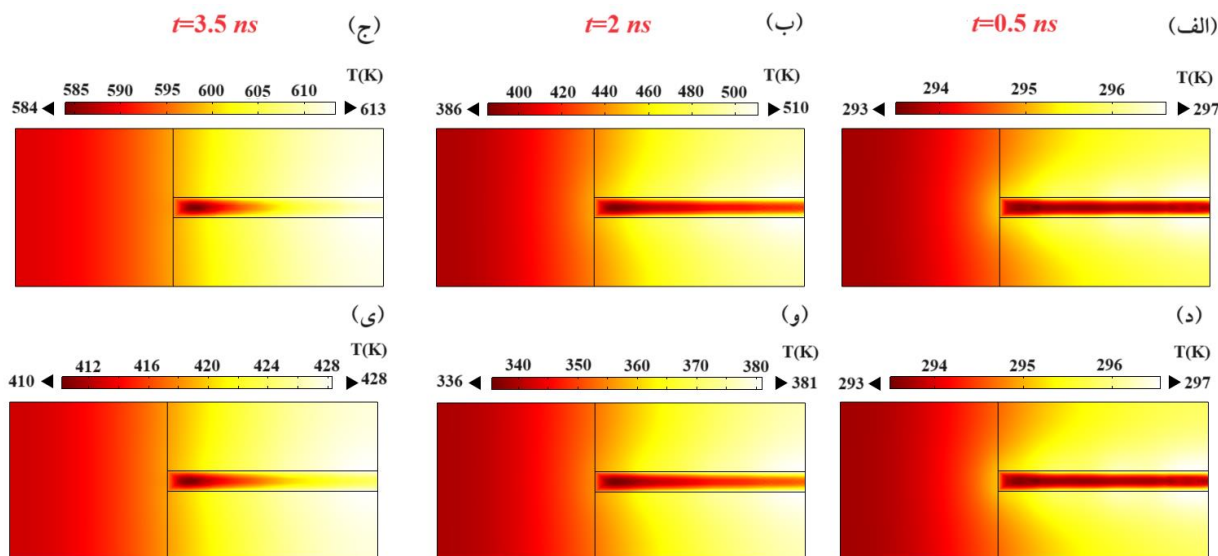
شکل ۱. نمای دوبعدی از سلول واحد نانوتوری فلزی پیشنهادی با شرایط مرزی تناوبی (PBC) از نوع فلوکه در امتداد محور  $y$  و لایه‌های کاملاً منطبق (PML) که در بالا و پایین ساختار قرار گرفته‌اند.

از لایه‌های کاملاً منطبق (PML) در بالا و پایین سلول واحد نیز برای جلوگیری از بازگشت امواج الکترومغناطیسی پراکنده به فضای مدل استفاده می‌شود. با توجه به این که هر گونه ناپیوستگی در ضریب شکست مرزها می‌تواند بازتاب ایجاد کند، بسیار مهم است که ضریب شکست PML همانند محیط مجاور خود تنظیم شود. از آنجایی که نانوتوری پیشنهادی در هوا قرار گرفته است، ضریب شکست PML‌ها نیز برابر با یک انتخاب می‌شوند. برای محاسبه توزیع دما از ماژول انتقال گرما در جامدات (ht) استفاده می‌کنیم. تحلیل دما در این ماژول با استفاده از معادله انتقال گرمای زیر انجام می‌گیرد [۱]:

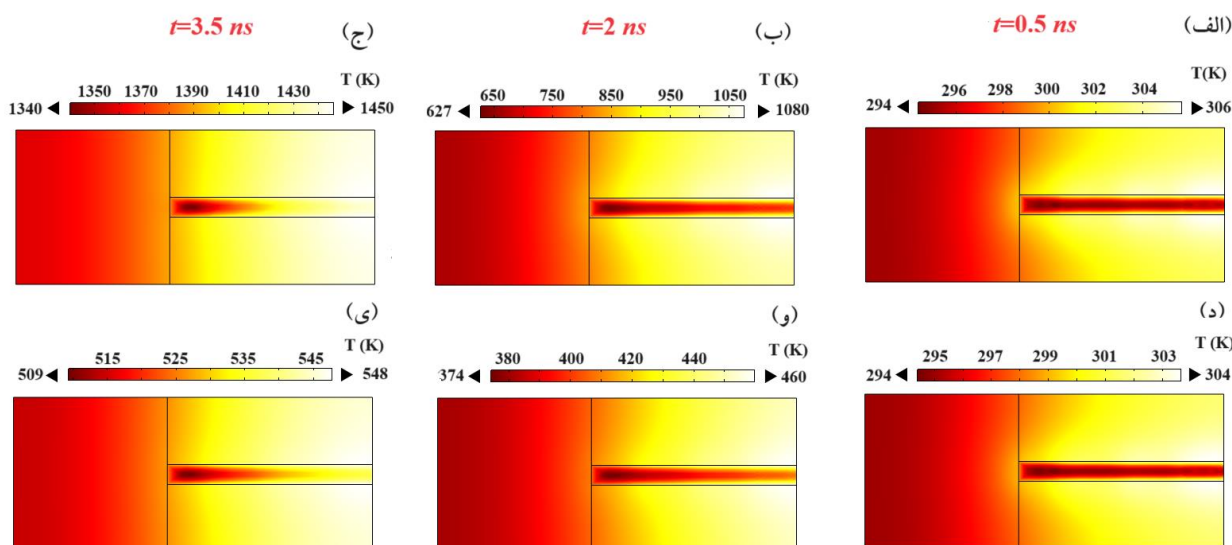
$$c(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k(\mathbf{r}) \nabla T(\mathbf{r}, t)) + \dot{e}_{gen}(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

که  $k$  رسانندگی گرمایی،  $\rho$  چگالی ماده،  $c$  گرمای ویژه و  $T$  دما را بیان می‌کند. این پارامترها برای نقره، ماده غیرخطی و هوا

<sup>۱</sup> Mapped



شکل ۲. توزیع دما در نانوتوری پیشنهادی در زمان‌های مختلف بعد از اعمال لیزر تپی نانوثانیه با طول موج  $600 \text{ nm}$  و  $F_L = 50 \text{ mJ/cm}^2$  در رژیم خطی (الف تا ج) و رژیم غیرخطی  $n_2 = 2/5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{MW}$  (د تا ی).



شکل ۳. همانند شکل ۲ برای  $F_L = 180 \text{ mJ/cm}^2$ .

که دمای قابل حصول در قلّه تپ ( $t = 2 \text{ ns}$ ) و بعد از آن ( $t = 3/5 \text{ ns}$ ) برای مورد خطی بالاتر از رژیم غیرخطی است، به طوری که حتی بیشینه دمای حاصله در رژیم غیرخطی از کمیته مربوط به مورد خطی کمتر است. برای بررسی بیشتر، شاریدگی نور لیزر را به مقدار  $180 \text{ mJ/cm}^2$  افزایش داده و توزیع دمای ساختار را بررسی می‌کنیم (شکل ۳). ملاحظه می‌شود که روند توزیع دما در مکان‌های مختلف داخل نانوتوری با مورد پیشین مشابه است. همچنین، در شروع تپ بعد از گذشت  $0/5 \text{ ns}$ ، افزایش دمای ساختار نسبت به دمای اتاق

### ۳. نتایج و بحث

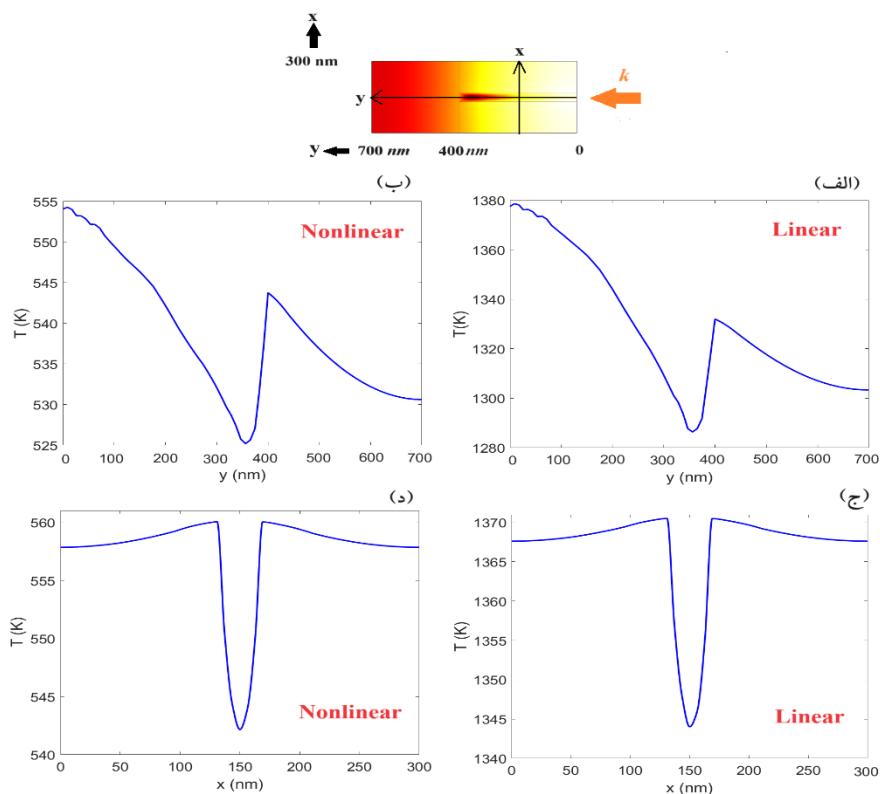
در شکل ۲ توزیع دمای نانوتوری پیشنهادی را در زمان‌های مختلف  $t = 0/5, 2, 3/5 \text{ ns}$  بعد از اعمال لیزر تپی با شاریدگی  $50 \text{ mJ/cm}^2$  در طول موج  $600 \text{ nm}$  نمایش داده‌ایم. نمودارهای (الف تا ج) برای رژیم خطی ( $n_2 = 0$ ) و نمودارهای (د تا ی) برای رژیم غیرخطی ( $n_2 = 2/5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{MW}$ ) شبیه‌سازی شده‌اند. مشاهده می‌شود که نحوه توزیع دما در هر دو رژیم خطی و غیرخطی مشابه‌اند. با این تفاوت

بسیار اندک بوده و توزیع دمای هر دو مورد خطی و غیرخطی یکسان هستند. با این حال، با گذشت زمان در قله تب و بعد از آن، افزایش دمای قابل توجهی به ویژه در حالت خطی (شکل های ۳. ب و ج) ایجاد می شود، طوری که  $3.5 ns$  بعد از اعمال تب، دمای ساختار فراتر از دمای ذوب نقره ( $1235 K$ ) است. این در حالی است که افزایش دما در رژیم غیرخطی، بسیار کمتر از دمای ذوب است. باید توجه داشت که ماده غیرخطی مورد نظر ما بدون اتلاف بوده و نور لیزر فرودی بر سامانه تنها توسط نقره جذب و باعث تولید گرما و افزایش دمای آن می شود. افزایش دما از طریق رسانش به کل نانو ساختار منتقل می شود. از طرفی نیز اثر نور لیزر بر ماده کر، تحریک اثر غیرخطی است. در واقع، با افزایش شاریدگی نور لیزر، به دلیل جایگزینی شدید میدان الکتریکی در شیارهای نانو توری که شامل ماده غیرخطی است، اثر غیرخطی کر ظاهر می شود [۱۳]. در نتیجه، توزیع دما در رژیم خطی و غیرخطی کاملاً متفاوت خواهند بود. نمایش کامل تغییرات دمایی در طول اعمال تب برای هر دو رژیم خطی و غیرخطی، به صورت فایل GIF در قسمت تکمیلی الکترونیکی ارائه شده است.

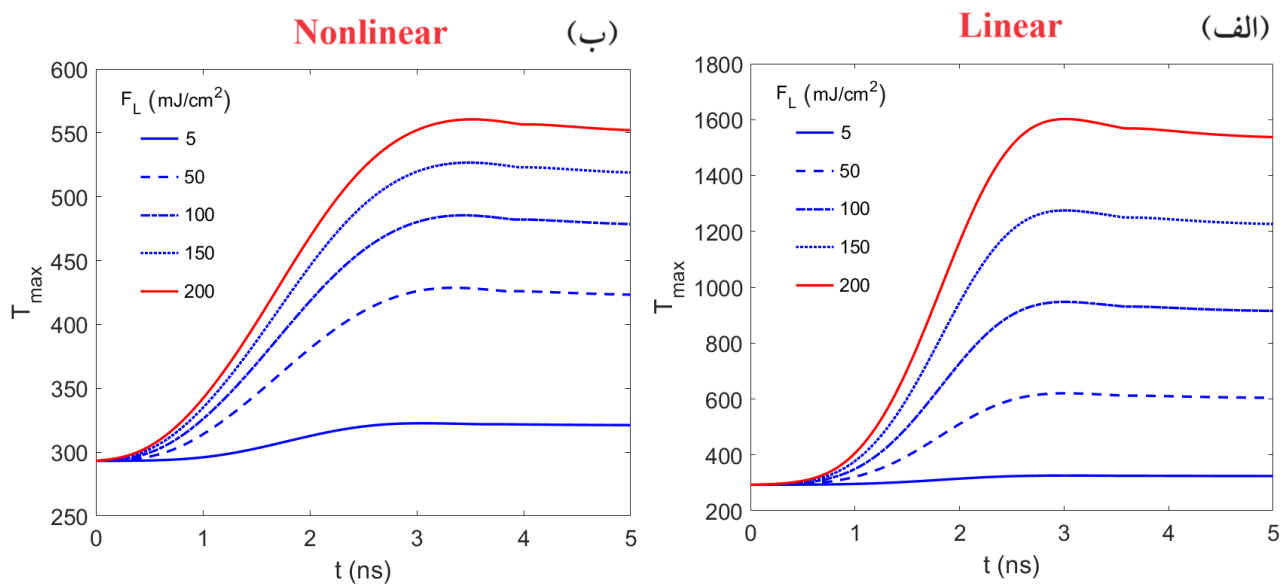
برای بررسی بیشتر، در شکل ۴ توزیع فضایی دمای نانو توری را  $3.5$  نانو ثانیه بعد از اعمال لیزر تپی با طول موج  $600$  نانومتر و شاریدگی  $180 mJ/cm^2$  در امتداد خط افقی  $y$  و خط عمودی  $x$  برای رژیم خطی و غیرخطی نمایش داده ایم. همانطور که از شکل ۴. الف و ب بر می آید، دما در داخل لایه غیرخطی روند نزولی دارد ولی با نزدیک شدن به مرز  $400$  نانومتر که در تماس با نقره قرار می گیرد، افزایش می یابد و سپس در داخل نقره در امتداد خط  $y$  دوباره کاهش می یابد. از شکل های ۴. ج و د نیز مشهود است که دما در قسمت مرکزی خط  $x$  که مربوط به ماده غیرخطی است، کاهش می یابد. در واقع، دما در مرزهای شیار-نقره بالا و با نزدیک شدن به مرکز آن کاهش و به کمترین مقدار خود می رسد. به علاوه، مقادیر دما در رژیم خطی بسیار بالاتر از نقطه ذوب موادمند که مؤید شکل ۳ هستند.

اکنون، برای فهم تحول زمانی دما و چگونگی تأثیر شاریدگی نور لیزر بر توزیع دمایی، بیشینه دمای قابل حصول در نانو توری

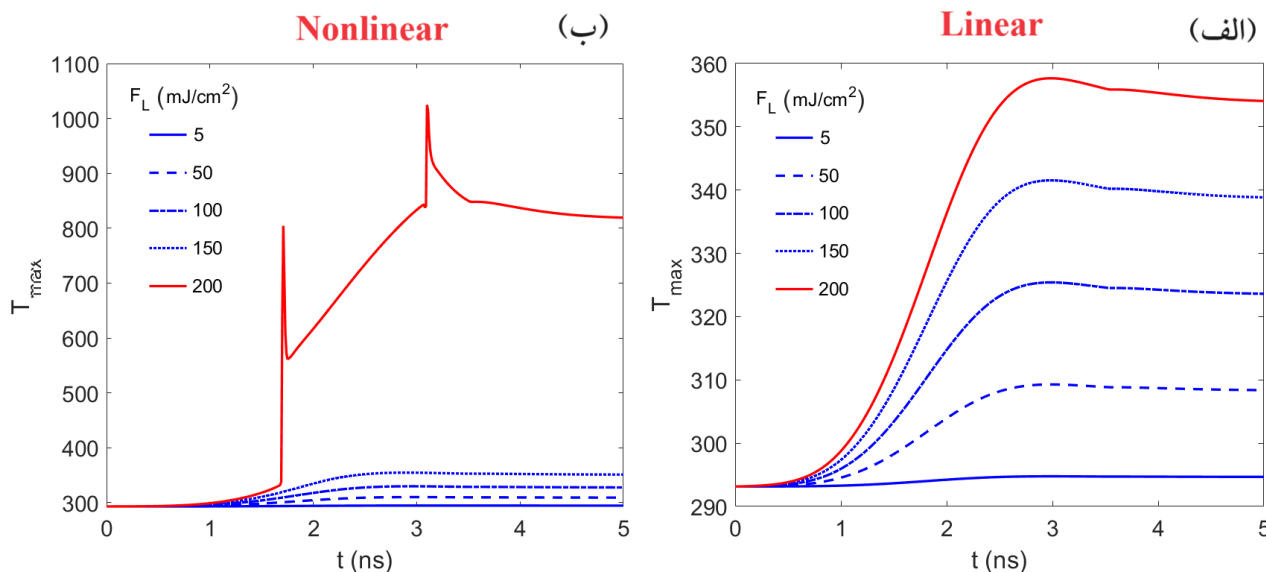
پیشنهادی را در طول اعمال لیزر تپی برای شاریدگی های مختلف بررسی می کنیم (شکل ۵). در اینجا، طول موج لیزر همانند قبل  $600$  نانومتر در نظر گرفته شده است. مشاهده می شود که در  $F_L = 5 mJ/cm^2$  اختلاف چندانی از دمای اتاق حاصل نشده است. اما با افزایش شاریدگی،  $1$  نانو ثانیه بعد از اعمال تب، دما شیب صعودی دارد تا این که بعد از حدود  $3$  نانو ثانیه، تقریباً ثابت باقی می ماند. همچنین، در رژیم خطی، با افزایش شاریدگی تب تا حدود  $F_L = 150 mJ/cm^2$  بیشینه دمای قابل حصول، پایین تر از دمای ذوب مواد است. با این حال، رژیم غیرخطی مناسب تر است؛ چراکه دمای بیشینه قابل حصول، بسیار پایین تر از دمای ذوب مواد است. برای مثال،  $3$  نانو ثانیه بعد از اعمال تب در  $F_L = 200 mJ/cm^2$ ، دمای رژیم خطی تقریباً  $2/9$  برابر مورد غیرخطی است. علاوه بر این، از مقایسه این دو نمودار بر می آید که در شاریدگی پایین تر  $F_L = 5 mJ/cm^2$  ساختار همچنان رژیم خطی خود را حفظ می کند؛ در صورتی که با افزایش شاریدگی و نزدیک شدن به قله تب، ماده پرکننده شیار نانو توری، پاسخ اپتیکی غیرخطی نشان می دهد. بنابراین، پاسخ دمایی سامانه نسبت به مورد خطی تغییر یافته و در واقع، نمودار (ب) رفتار دمایی واقعی سامانه را نشان می دهد که آسیب دمایی نیز در ساختار وجود ندارد. به عبارتی، چشم پوشی از اثر غیرخطی در این شاریدگی، منجر به نتیجه اشتباه می شود. بالاخره برای تکمیل مطالعه، طول موج نور لیزر را به  $630$  نانومتر تغییر داده و مجدداً افزایش دمایی نانو توری را در هر دو رژیم بررسی می کنیم (شکل ۶). همانطور که از شکل ۶. الف مشاهده می شود، رفتار خطی مشابه با قبل است، جز این که در اینجا دمای بیشینه رژیم خطی تا حد بسیار قابل توجهی پایین تر است. برای مثال، در شاریدگی  $200 mJ/cm^2$  بیشینه دمای حاصله در حدود  $358 K$  است. جالب است که مطابق با شکل ۶. ب، در رژیم غیرخطی نیز با افزایش شاریدگی نور لیزر تا  $150 mJ/cm^2$ ، بیشینه دمای ساختار بسیار اندک بوده و تقریباً با مورد خطی یکسان است؛ به عبارتی افزایش شاریدگی تا این مقدار، اثر غیرخطی را در ساختار تحریک نکرده است.



شکل ۴. توزیع‌های فضایی دما در زمان ۳/۵ نانوثانیه بعد از اعمال لیزر تپی با طول موج ۶۰۰ نانومتر و شاریدگی  $180 \text{ mJ/cm}^2$  در امتداد خط افقی y و خط عمودی x.



شکل ۵. بیشینه دمای نانوتوری بر حسب زمان در شاریدگی‌های مختلف نور لیزر تپی برای رژیم خطی (الف) و رژیم غیرخطی (ب). در اینجا لیزر تپی در طول موج ۶۰۰ نانومتر تنظیم شده است.



شکل ۶. بیشینه دمای نانوتوری برحسب زمان در شاریدگی های مختلف نور لیزر تپی برای رژیم خطی (الف) و رژیم غیرخطی (ب). در اینجا لیزر تپی در طول موج  $630$  نانومتر تنظیم شده است.

مستلزم شدت بالای نور لیزر است، از اهمیت خاصی برخوردار است.

#### ۴. نتیجه گیری

با بررسی توزیع دمایی نانوتوری مشاهده می شود که در شاریدگی های بالای لیزر تپی، امکان افزایش دما در هر یک از رژیم خطی یا غیرخطی وجود دارد. در صورت تحریک اثر غیرخطی توسط نور لیزر با شاریدگی بالا که منجر به پیدایش اثر اپتیکی غیرخطی کر می شود، توزیع دمایی سامانه نسبت به رژیم خطی کاملاً متفاوت خواهد شد، طوری که بسته به طول موج نور لیزر اعمالی، امکان افزایش یا کاهش دما نسبت به مورد خطی وجود دارد. اگر شاریدگی نور لیزر بسیار بالا باشد، امکان افزایش دما حتی بالاتر از دمای ذوب مواد نیز می تواند پیش آید. بنابراین، در هنگام اعمال تپ های قوی لیزر، بایستی بررسی های دمایی صورت گیرند تا از گرم شدن بیش از حد و آسیب به سامانه جلوگیری شود.

#### قدردانی

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی (گرنه) دانشگاه مازندران انجام شده است.

حال آن که با افزایش بیشتر شاریدگی لیزر به  $200$   $mJ/cm^2$ ، رفتار کاملاً متفاوتی مشاهده می شود. با نزدیک شدن به قله تپ، خیزش و افت ناگهانی در دما مشاهده می شود. این زمان را زمان بحرانی می نامیم که مربوط است به ظهور اثر غیرخطی کر در نانوتوری که به دلیل جایگزیدگی شدید نور، منجر به تغییر ناگهانی توزیع دمایی ساختار نسبت به حالت خطی می شود. سپس با گذشت زمان، دما سیر افزایشی داشته و با نزدیک شدن به زمان  $3$  نانوثانیه، دوباره افزایش و افت ناگهانی تکرار می شود. در واقع، شاریدگی مذکور منجر به تحریک اثر غیرخطی در این بازه زمانی شده است و بعد از آن با نزدیکی به زمان خاموشی تپ، دمای نانوتوری همچنان بالا بوده و تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. بنابراین، بسته به طول موج لیزر فرودی بر ساختار و شاریدگی اعمالی که می تواند منجر به تحریک اثر غیرخطی شود، توزیع دمایی متفاوتی در ساختار نمایان می شود. چشم پوشی از لثر غیرخطی کر در شاریدگی های بالا با توجه به تغییر توزیع دمایی سامانه و احتمال افزایش دما بالاتر از دمای ذوب آن، در مطالعات نظری به نتیجه ای کاملاً اشتباه منجر می شود. از طرفی نیز برای بروز اثر غیرخطی نمی توان شاریدگی نور لیزر را تا هر مقداری بالا برد؛ چرا که منجر به افزایش دما و آسیب به سامانه می شود. بنابراین بررسی توزیع دمایی ساختار در اپتیکی غیرخطی که

## مراجع

1. Y Cengel, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", McGraw-Hill Higher Education (2014).
2. H S Leff, *Am. J. Phys.* **86** (2018) 344.
3. Y Jia, Z Zhang, C Wang, H Sun, and W Zhang, *Appl. Therm. Eng.* **200** (2022) 117568.
4. Y G Lv, X L Huai, and W Wang, *Chem. Eng. Sci.* **61** (2006) 5717.
5. R W Boyd, "Nonlinear Optics", Academic press (2020).
6. K Ikeda and Y Fainman, *Solid. State. Electron.* **51** (2007) 1376.
7. S Rashidi, S R Entezar, and A Rashidi, *Appl. Opt.* **60** (2021) 8651.
8. A Mellor, H Hauser, C Wellens, J Benick, J Eisenlohr, M Peters, A Guttowski, I Tobías, A Martí, and A Luque, *Opt. Express* **21** (2013) A295.
9. M A Vincenti, A D'Orazio, M Buncick, N Akozbek, M J Bloemer, and M Scalora, *JOSA B* **26** (2009) 301.
10. T T Hoang, K Q Le, and Q M Ngo, *Curr. Appl. Phys.* **15** (2015) 987.
11. T Christopoulos, G Sinatkas, Tsilipakos, and E E Kriezis, *Opt. Quantum Electron* **48** (2016) 1.
12. T Ning, H Liang, Y Huo, and L Zhao, *Opt. Express* **28** (2020) 20532.
13. A Rashidi and A Hatef, *Phys. Scr.* **98** (2023) 85510.
14. V Grigoriev and F Biancalana, *New J. Phys.* **12**, (2010) 053041.
15. P B Johnson and R Wjp Christy, *Phys. Rev. B* **6** (1972) 4370.
16. X Chen, Y Chen, M Yan, and M Qiu, *ACS Nano* **6** (2012) 2550.
17. T G Harvey, W Ji, A K Kar, B S Wherrett, D Bloor, and P A Norman, *JOSA B* **8** (1991) 33.