

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

## پالسی نانو ثانیه

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: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵)

### 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 پالسی گاوسی نانو ثانیه قرار دارد، پرداخته می‌شود. فرض می‌شود که شیارهای نانوتوری با یک ماده غیرخطی از نوع کر پر می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که توزیع دمایی سیستم به شدت به فلوئنس نور لیزر تابشی وابسته است. طوری که، با افزایش فلوئنس پالس لیزری در اطراف قله پالس و بعد از آن، توزیع دمای کاملاً متفاوتی در دو رژیم خطی و غیرخطی حاصل می‌گردد. در واقع، تحریک اثر اپتیکی غیرخطی کر، به ویژه در فلوئنس‌های 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 فلوئنس 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 پالس‌های قوی لیزر، بایستی بررسی‌های دمایی صورت گیرند تا از گرم شدن بیش از حد و آسیب به سیستم جلوگیری شود.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع دما، نانوتوری، لیزر پالسی، فلوئنس، رژیم‌های خطی و غیرخطی

### ۱. مقدمه

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 می‌گردد [۲]. همچنین، در طراحی و بهینه سازی مواد برای کاربردهای حرارتی خاص مانند عایق، سینک‌های گرمایی، دستگاه‌های ترموالکتریک و حسگرهای حرارتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. بعلاوه، 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 گردد، استفاده از نور لیزر می‌باشد که شار گرمایی بالایی را در مدت زمان کوتاه اعمال می‌کند [۴].

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 فرآیندی است که طی آن گرما از نواحی با دمای بالای یک جسم به نواحی با دمای پایین بدلیل برهم کنش بین ذرات، منتقل می‌شود. در واقع، دما به عنوان نیروی محرکه انتقال گرما می‌باشد. 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.

گرما و توزیع دمایی در یک نانوتوری فلزی یک بعدی که تحت گرمایش لیزری قرار گرفته است، می‌پردازیم. نانوتوری پیشنهادی با یک ماده غیرخطی از نوع کر پر شده است. درصد آن هستیم که در فلوننس‌های بالای پالس لیزری و با در نظر گرفتن دو رژیم خطی و غیرخطی به بررسی چگونگی افزایش دمای سیستم پردازیم. در واقع، سعی داریم تا با مقایسه دو رژیم نامبرده، اهمیت مطالعه انتقال گرما را در سیستم‌های 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 شماتیکی 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 شیارها با یک ماده دی‌الکتریک غیرخطی مرتبه سوم (کر) با ضریب شکست خطی ۱.۵۵ و ضریب غیرخطی  $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{MW}$  ضرب 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 پالسی نانو ثانیه‌ای 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 پالسی 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 پروفایل پالسی،  $t_0 = 2 \text{ ns}$  مرکز قله پالس و  $F_L$  فلوننس لیزر فرودی را توصیف می‌کند. 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 می‌گردد، در شبیه‌سازی از یک سلول واحد دو بعدی با شرایط مرزی تناوبی (PBC) فلوکه<sup>۲</sup> در راستای محور  $y$  استفاده می‌کنیم.

از طرف دیگر، هنگامی که محیطی با یک منبع نور به شدت قوی 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 [۷، ۶]. در این میان، یکی از سیستم‌هایی که بدلیل 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 می‌باشند. 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 [۱۰-۱۱] دست یافته‌اند. لازم به ذکر است که اثر غیرخطی در این سیستم‌ها با استفاده از نور لیزر پیوسته موج تحریک شده است که نیاز به شدت‌های ورودی بالا می‌باشد و بنابراین، یک محدودیت اساسی در بکارگیری آنها در کاربردهای عملی استاندارد بشمار می‌رود. برای فایق آمدن بر چنین محدودیت‌هایی، اخیراً از نور لیزر پالسی 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 سیستم می‌باشد. در واقع، تاباندن پالس لیزری قوی بر ماده می‌تواند بخاطر جذب نور در آن منجر به تولید گرما و افزایش دمای آن گردد. چنین افزایش دمایی می‌تواند بر اثر بالا بردن دما تا نقطه ذوب ماده به آن آسیب برساند. بنابراین، مطالعه توزیع دمایی در سیستم‌هایی که برای ظهور اثر اپتیکی غیرخطی تحت تابش نور شدید لیزر قرار می‌گیرند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این روی، در مطالعه حاضر به شبیه‌سازی و بررسی نحوه انتقال

<sup>1</sup> Finite-Element-Method

<sup>2</sup> Floquet

دما را بیان می‌کنند. این پارامترها برای نقره، ماده غیرخطی و هوا در جدول ۱ ذکر شده‌اند [۱۷،۱۶،۱].

در معادله ۲، تولید گرما را نشان می‌دهد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

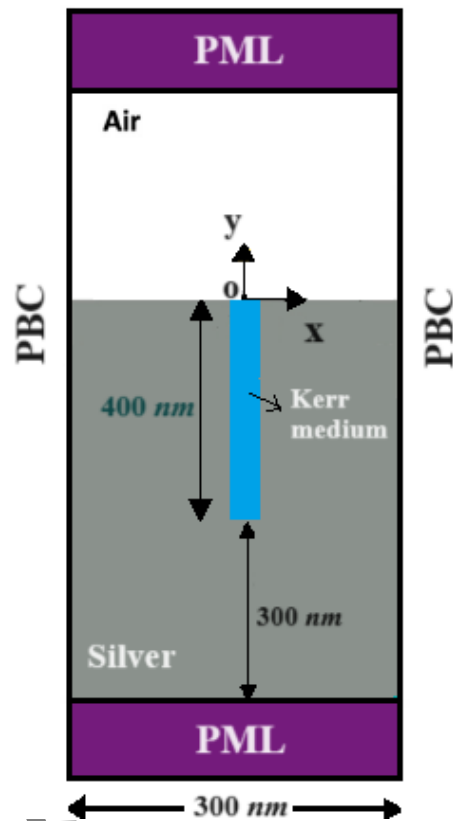
$$\dot{e}_{gen} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \omega |E_i|^2 \text{Im}(\epsilon(\omega)). \quad (3)$$

لازم به ذکر است که بدلیل استفاده از پالس گاوسی با پروفایل شدت زمانی، محاسبات در حلگر وابسته به زمان صورت می‌گیرد. بعلاوه، معادله رسانش گرمای (۲) یک معادله ناپایا می‌باشد که با حل آن، دمای وابسته به مکان و زمان بدست می‌آید.

جدول ۱. پارامترهای حرارتی مواد مورد استفاده در نانوتوری.

Material	$c$ (J/kg.K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/m.K)
Air	1000	353K/T	0.03
Silver	235	10500	429
Kerr Medium	1500	1300	0.8

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 می‌گردد و معادلات مورد نظر به این جزها 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 و می‌توانند برای مسائل مختلف بکار 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 شبکه بندی<sup>۱</sup> می‌توان استفاده کرد که دقت حل معادلات را افزایش می‌دهد.



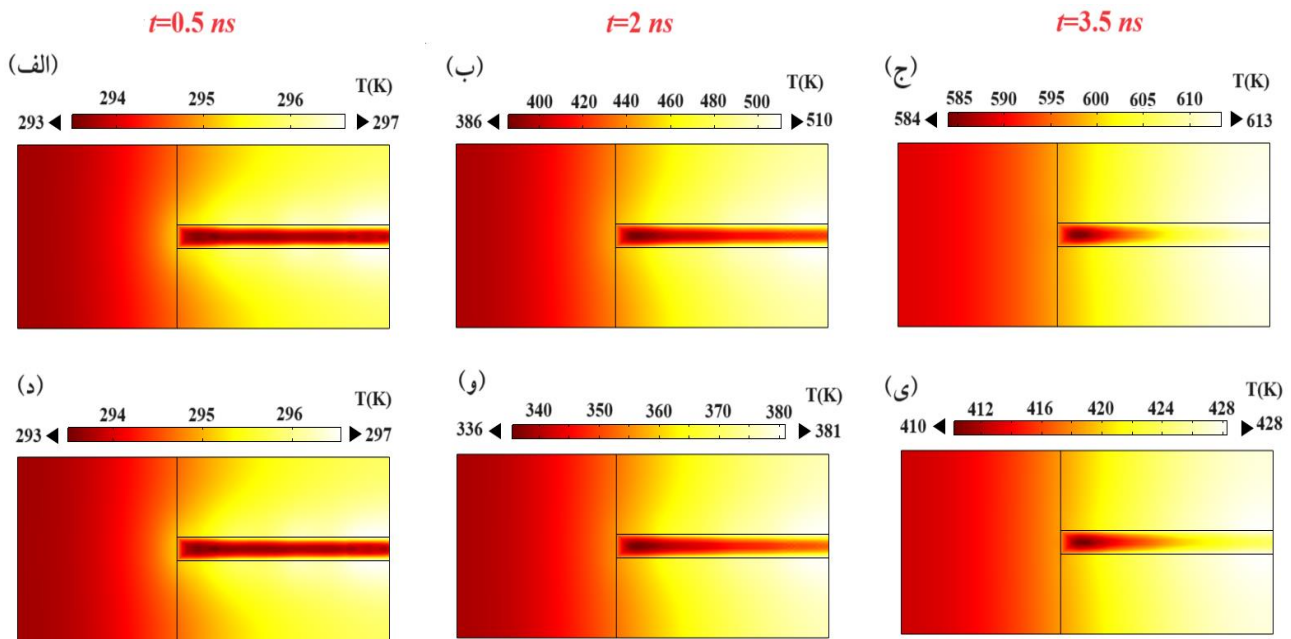
شکل ۱. نمای دوبعدی از سلول واحد نانوتوری فلزی پیشنهادی با شرایط مرزی تناوبی (PBC) از نوع فلوکه در امتداد محور  $y$  و لایه‌های کاملاً منطبق (PML) که در بالا و پایین ساختار قرار گرفته‌اند.

از لایه‌های کاملاً منطبق (PML) در بالا و پایین سلول واحد نیز برای جلوگیری از بازگشت امواج الکترومغناطیسی پراکنده به فضای مدل استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه 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 می‌گردند. 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]:

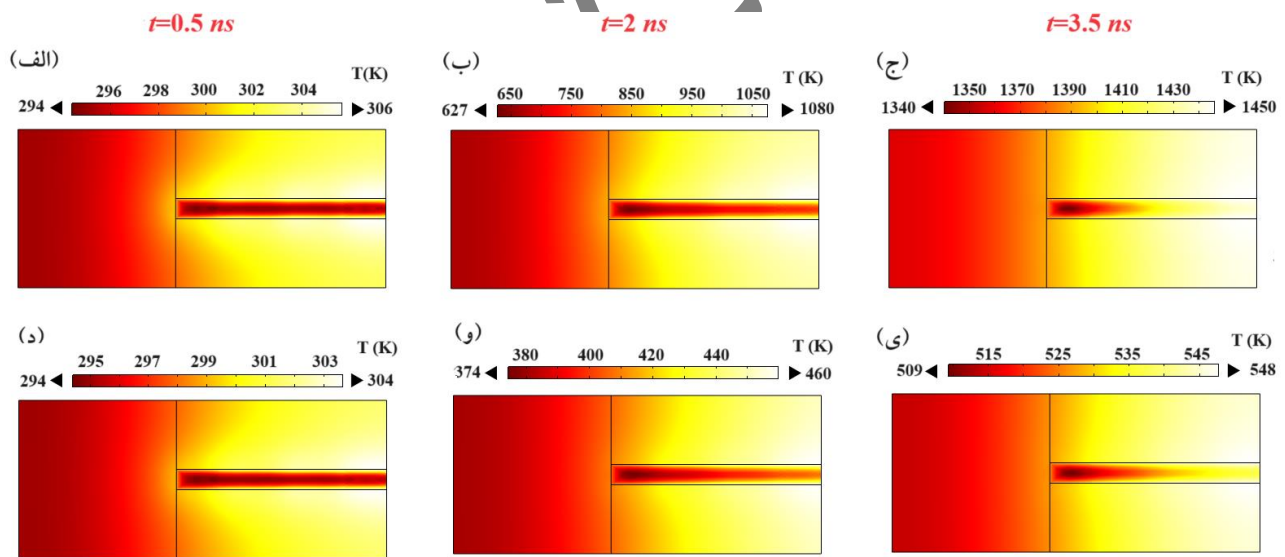
$$c(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k(\mathbf{r}) \nabla T(\mathbf{r}, t)) + \dot{e}_{gen}(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

که  $k$  رسانندگی گرمایی،  $\rho$  چگالی ماده،  $c$  گرمای ویژه و  $T$

<sup>1</sup> Mapped



شکل ۲. توزیع دما در نانو توری پیشنهادی در زمان‌های مختلف بعد از اعمال لیزر پالسی نانو ثانیه با طول موج  $600$  نانومتر 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  $F_L=180 \text{ mJ/cm}^2$ .

شبهه‌سازی شده‌اند. مشاهده می‌گردد که نحوه توزیع دما در هر دو رژیم خطی و غیرخطی مشابه‌اند. با این تفاوت که دمای قابل حصول در قله پالس ( $t=2 \text{ ns}$ ) و بعد از آن ( $t=3.5 \text{ ns}$ ) برای مورد خطی بالاتر از رژیم غیرخطی است. طوری که حتی بیشینه دمای حاصله در رژیم غیرخطی از کمینه مربوط به مورد خطی کمتر است. برای بررسی بیشتر، فلوننس نور لیزر را به مقدار  $180 \text{ mJ/cm}^2$  افزایش داده و توزیع دمای ساختار را بررسی می‌کنیم (شکل ۳). ملاحظه می‌گردد که روند توزیع دما

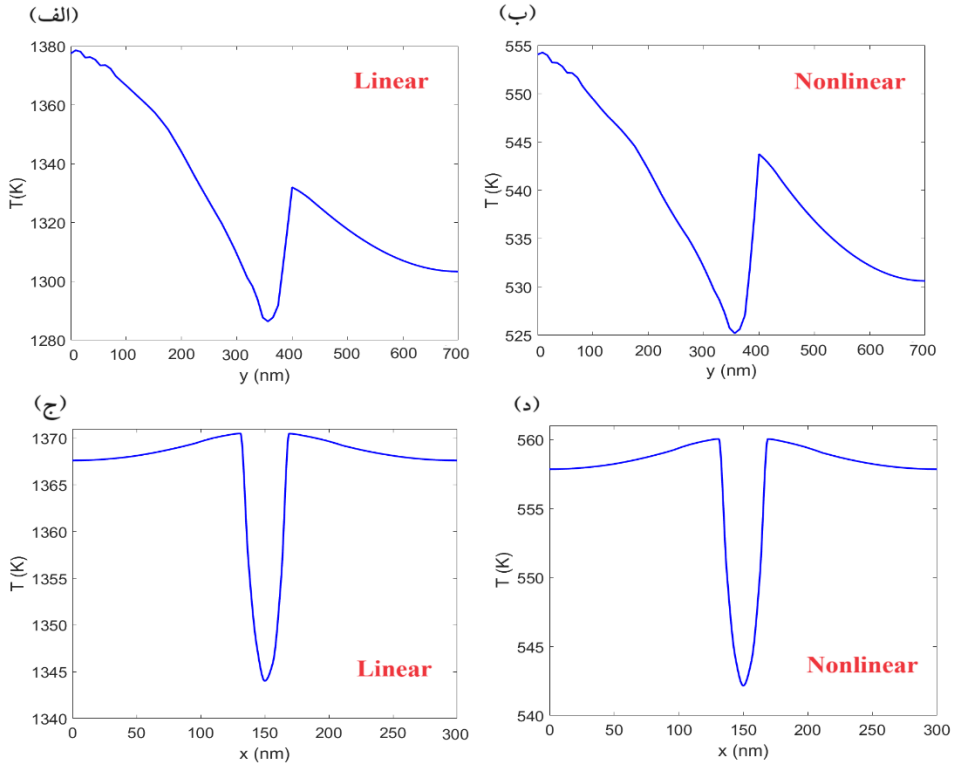
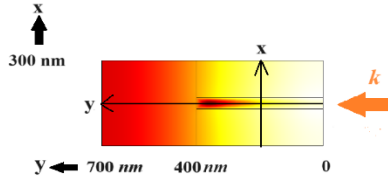
### ۳. نتایج و بحث

در شکل ۲ توزیع دمای نانو توری پیشنهادی را در زمان‌های مختلف  $t=0.5, 2, 3.5 \text{ ns}$  بعد از اعمال لیزر پالسی با فلوننس  $50 \text{ mJ/cm}^2$  در طول موج  $600$  نانومتر نمایش داده‌ایم. نمودارهای (الف تا ج) برای رژیم خطی ( $n_2=0$ ) و نمودارهای (د تا ی) برای رژیم غیرخطی ( $n_2=2/5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{MW}$ )

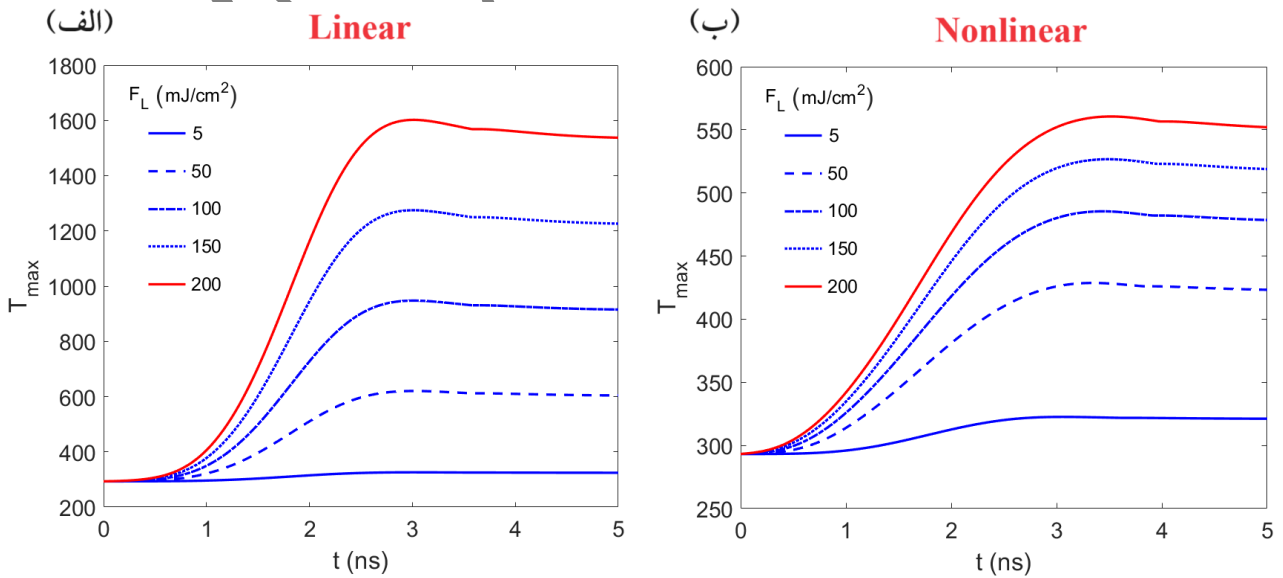
در مکان‌های مختلف داخل نانوتوری با مورد پیشین مشابه است. همچنین، در شروع پالس بعد از گذشت  $0.5\text{ ns}$ ، افزایش دمای ساختار نسبت به دمای اتاق بسیار اندک بوده و توزیع دمای هر دو مورد خطی و غیرخطی یکسان هستند. با این حال، با گذشت زمان در قله پالس و بعد از آن، افزایش دمای قابل توجهی به ویژه در حالت خطی (شکل‌های ۳ ب و ج) ایجاد می‌گردد. طوری که  $3.5\text{ ns}$  بعد از اعمال پالس، دمای ساختار فراتر از دمای ذوب نقره ( $1235\text{ K}$ ) است. این در حالی است که افزایش دما در رژیم غیرخطی، بسیار کمتر از دمای ذوب می‌باشد. باید توجه داشت که ماده غیرخطی مورد نظر ما بدون اتلاف بوده و نور لیزر فرودی بر سیستم تنها توسط نقره جذب و باعث تولید گرما و افزایش دمای آن می‌شود. افزایش دما از طریق رسانش به کل نانو ساختار منتقل می‌گردد. از طرفی نیز اثر نور لیزر بر ماده کر، تحریک اثر غیرخطی است. در واقع، با افزایش فلوننس نور لیزر، بدلیل جایگزیدگی شدید میدان الکتریکی در شیارهای نانوتوری که شامل ماده غیرخطی است، اثر غیرخطی کر ظاهر می‌شود [۱۳]. در نتیجه، توزیع دما در رژیم خطی و غیرخطی کاملاً متفاوت خواهند بود. نمایش کامل تغییرات دمایی در طول اعمال پالس 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 نانوتوری را  $3.5$  نانوثانیه بعد از اعمال لیزر پالسی با طول موج  $600$  نانومتر و فلوننس  $180\text{ mJ/cm}^2$  در امتداد خط افقی  $y$  و خط عمودی  $x$  برای رژیم خطی و غیرخطی نمایش داده‌ایم. همانطور که از شکل ۴ (الف و ب) بر می‌آید، دما در داخل لایه غیرخطی روند نزولی دارد ولی  $88$  با نزدیک شدن به مرز  $400$  نانومتر که در تماس با نقره قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد و سپس در داخل نقره در امتداد خط  $y$  دوباره کاهش می‌یابد. از شکل‌های ۴ (ج و د) نیز مشهود است که دما در قسمت مرکزی خط  $x$  که مربوط به ماده غیرخطی می‌باشد، کاهش می‌یابد. در واقع، دما در مرزهای شیار-نقره بالا و با نزدیک شدن به مرکز آن کاهش و به کمترین مقدار خود می‌رسد. بعلاوه، مقادیر دما در رژیم خطی بسیار بالاتر از نقطه ذوب مواد می‌باشند که مؤید شکل ۳ هستند.

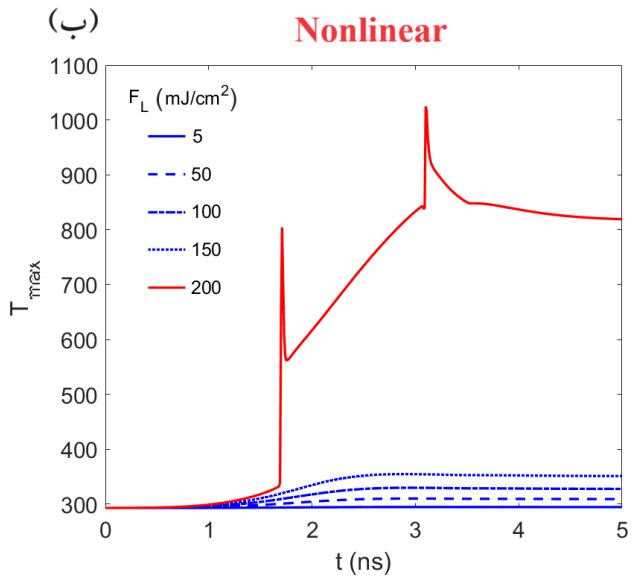
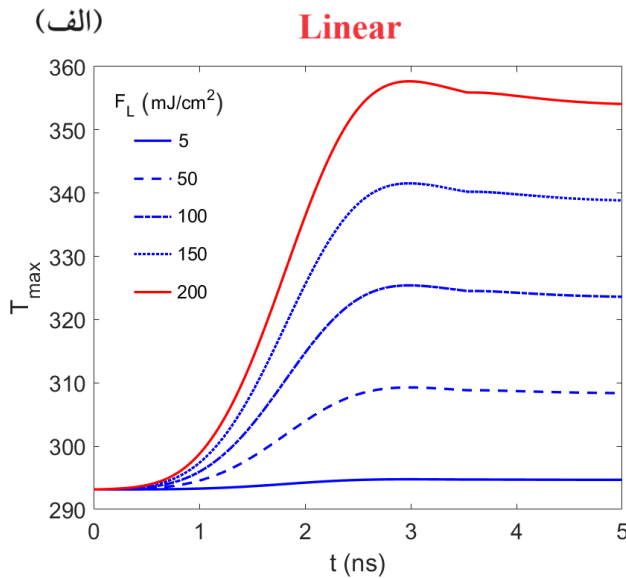
اکنون، برای فهم تحول زمانی دما و چگونگی تأثیر فلوننس نور لیزر بر توزیع دمایی، بیشینه دمای قابل حصول در نانوتوری پیشنهادی را در طول اعمال لیزر پالسی برای فلوننس‌های مختلف بررسی می‌کنیم (شکل ۵). در اینجا، طول موج لیزر همانند قبل  $600$  نانومتر در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌گردد که در  $F_L=5\text{ mJ/cm}^2$  اختلاف چندانی از دمای اتاق حاصل نشده است. اما با افزایش فلوننس،  $1$  نانوثانیه بعد از اعمال پالس، دما شیب صعودی دارد تا اینکه بعد از حدود  $3$  نانوثانیه، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین، در رژیم خطی، با افزایش فلوننس پالس تا حدود  $F_L=150\text{ mJ/cm}^2$  بیشینه دمای قابل حصول، پایتتر از دمای ذوب مواد است. با این حال، رژیم غیرخطی مناسب‌تر است؛ چراکه، دمای بیشینه قابل حصول، بسیار پایین‌تر از دمای ذوب مواد می‌باشد. برای مثال،  $3$  نانوثانیه بعد از اعمال پالس در  $F_L=200\text{ mJ/cm}^2$ ، دمای رژیم خطی تقریباً  $2.9$  برابر مورد غیرخطی است. علاوه بر این، از مقایسه این دو نمودار بر می‌آید که در فلوننس پایتتر  $F_L=5\text{ mJ/cm}^2$  ساختار همچنان رژیم خطی خود را حفظ می‌کند؛ در صورتی که با افزایش فلوننس و نزدیک شدن به پیک پالس، ماده پرکننده شیار نانوتوری، پاسخ اپتیکی غیرخطی نشان می‌دهد. بنابراین، پاسخ دمایی سیستم نسبت به مورد خطی تغییر یافته و در واقع، نمودار (ب) رفتار دمایی واقعی سیستم را نشان می‌دهد که آسیب دمایی نیز در ساختار وجود ندارد. به عبارتی، چشم پوشی از اثر غیرخطی در این فلوننس، منجر به نتیجه اشتباه می‌گردد. بالاخره برای تکمیل مطالعه، طول موج نور لیزر را به  $630$  نانومتر تغییر داده و مجدداً افزایش دمایی نانوتوری را در هر دو رژیم بررسی می‌کنیم (شکل ۶). همانطور که از شکل ۶ (الف) مشاهده می‌گردد، رفتار خطی مشابه با قبل می‌باشد؛ جز اینکه در اینجا دمای بیشینه رژیم خطی تا حد بسیار قابل توجهی پایین‌تر می‌باشد. برای مثال، در فلوننس  $200\text{ mJ/cm}^2$  بیشینه دمای حاصله در حدود  $358\text{ K}$  می‌باشد. جالب است که مطابق با شکل ۶ (ب)، در رژیم غیرخطی نیز با افزایش فلوننس نور لیزر تا  $150\text{ mJ/cm}^2$ ، بیشینه دمای ساختار بسیار اندک بوده و تقریباً با مورد خطی یکسان می‌باشد؛ به عبارتی افزایش فلوننس 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 پالسی با طول موج ۶۰۰ نانومتر و فلوئنس  $180 \text{ mJ/cm}^2$  در امتداد خط افقی  $y$  و خط عمودی  $x$ .



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



شکل ۶. بیشینه دمای نانوتوری برحسب زمان در فلوننس‌های مختلف نور لیزر پالسی برای رژیم خطی (الف) و رژیم غیرخطی (ب). در اینجا لیزر پالسی در طول موج ۶۳۰ نانومتر تنظیم شده است.

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

#### ۴. نتیجه‌گیری

با بررسی توزیع دمایی نانوتوری مشاهده می‌گردد که در فلوننس‌های بالای لیزر پالسی، امکان افزایش دما در هر یک از رژیم خطی یا غیرخطی وجود دارد. در صورت تحریک اثر غیرخطی توسط نور لیزر با فلوننس بالا که منجر به پیدایش اثر اپتیکی غیرخطی می‌شود، توزیع دمایی سیستم 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 فلوننس نور لیزر بسیار بالا باشد، امکان افزایش دما حتی بالاتر از دمای ذوب مواد نیز می‌تواند پیش آید. بنابراین، در هنگام اعمال پالس‌های قوی لیزر، بایستی بررسی‌های دمایی صورت گیرند تا از گرم شدن بیش از حد و آسیب به سیستم جلوگیری شود.

#### ۵. قدردانی

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

حال آنکه با افزایش بیشتر فلوننس لیزر به  $200 \text{ mJ/cm}^2$ ، رفتار کاملاً متفاوتی مشاهده می‌شود. با نزدیک شدن به قله پالس، خیزش و افت ناگهانی در دما مشاهده می‌گردد. بین زمان با زمان بحرانی می‌نامیم که مربوط است به ظهور اثر غیرخطی که در نانوتوری که بدلیل جایگزیدگی شدید نور، منجر به تغییر ناگهانی توزیع دمایی ساختار نسبت به حالت خطی می‌گردد. سپس با گذشت زمان، دما سیر افزایشی داشته و با نزدیک شدن به زمان ۳ نانوثانیه، دوباره افزایش و افت ناگهانی تکرار می‌شود. در واقع، فلوننس مذکور منجر به تحریک اثر غیرخطی در این بازه زمانی شده است و بعد از آن با نزدیکی به زمان خاموشی پالس، دمای نانوتوری همچنان بالا بوده و تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین، بسته به طول موج لیزر فرودی بر ساختار و فلوننس اعمالی که می‌تواند منجر به تحریک اثر غیرخطی شود، توزیع دمایی متفاوتی در ساختار نمایان می‌شود. چشم پوشی از اثر غیرخطی که در فلوننس‌های بالا با توجه به تغییر توزیع دمایی سیستم و احتمال افزایش دما بالاتر از دمای ذوب آن، در مطالعات نظری به نتیجه‌ای کاملاً اشتباه منجر می‌شود. از طرفی نیز برای بروز اثر غیرخطی نمی‌توان فلوننس نور لیزر را تا هر مقداری بالا برد چرا که منجر به افزایش دما و آسیب به سیستم می‌گردد. بنابراین بررسی توزیع دمایی ساختار در اپتیک غیرخطی که مستلزم

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.-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, O. 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.