

شبیه‌سازی و مدل‌سازی دینامیک کندوسوز لیزری عنصرهای تیتانیم، سیلیسیم و تنگستن با لیزر تپی نئودیمیم یاگ در محیط آب مقطر

مهسا پاشازاده^۱، الناز ایرانی^۲، میرمقصود گلزان^۱، رسول صدیقی بنابی^{۳*}

۱. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی: ۵۷۱۵۳-۱۶۵، ارومیه - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی: ۱۴۱۱۵-۱۷۵، تهران - ایران

۳. دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۵/۸

چکیده: یکی از روش‌های سریع، ایمن و پاک برای تولید نانوذره‌های کلوییدی با ویژگی‌های مختلف ساختاری و نوری، روش کندوسوز لیزر تپی در محیط مایع است. در صورتی‌که، دیگر روش‌های ساخت نیاز به دمای بالا، زمان واکنش طولانی و رویه‌های شیمیایی چند مرحله‌ای دارند. این مقاله شبیه‌سازی فرایند کندوسوز لیزر تپی و عامل‌های مؤثر بر ویژگی‌های نانوذره‌های تولیدی عنصرهای تیتانیم، سیلیسیم و تنگستن در محیط آب مقطر به ارتفاع یک سانتی‌متر از سطح نمونه را مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین‌منظور لیزر نئودیمیم-یاگ تپی با پهنای زمانی ۱۵ ns، طول موج‌های ۱۰۶۴ و ۵۳۲ nm و قطر کانونی ۲۰۰ μm به کار گرفته شد. هم‌چنین محاسبه‌ها با در نظر گرفتن تأثیر محیط آب مقطر و اثر تعداد مختلف تپ لیزر در نرخ کندگی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دما روی سطح فلز، میزان کندگی و شاریدگی آستانه‌ی کندگی با مدل انتقال حرارت دو سیالی و توسط نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: دینامیک کندوسوز لیزری، تیتانیم، سیلیسیم، تنگستن، لیزر نئودیمیم-یاگ

Dynamic modelling and simulation of laser ablation of titanium, silicon and tungsten elements by pulsed Nd: YAG laser in a distilled water

M. Pashazadeh¹, E. Irani², M. M. Golzan¹, R. Sadighi- Bonabi^{3*}

1. Department of Physics, Faculty of Science, Urmia University, P.O.Box: 57153-165, Urmia -Iran

2. Department of Physics, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, P.O.Box: 14115-175, Tehran -Iran

3. Department of Physics, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11365-9567, Tehran -Iran

Abstract: Pulsed laser ablation in liquid solution is a fast, safe and clean method for producing colloidal nanoparticles with different structural and optical characteristics. However, the other synthesis methods require high temperatures, long reaction times and multi-step chemical synthetic procedures. In this paper, the simulation of nanosecond pulsed laser ablation process and effective parameters on the Titanium, Silicon, and Tungsten elements in distilled water environment at the height of 1 cm from the surface of the metal is investigated. For this purpose, the pulsed Nd:YAG laser with nanosecond time duration, wavelengths of 1064nm and 532nm, a focal diameter of 200 μm is used. The simulation is based on considering the effects of the water environment and number of laser pulses. The distribution of temperature on the metal surface and the threshold fluence is determined by two-fluid heat transfer model using Comsol Multi physic Package.

Keywords: Laser ablation, Titanium, Silicon, Tungsten, Nd:YAG laser

*Email: sadighi@sharif.ir

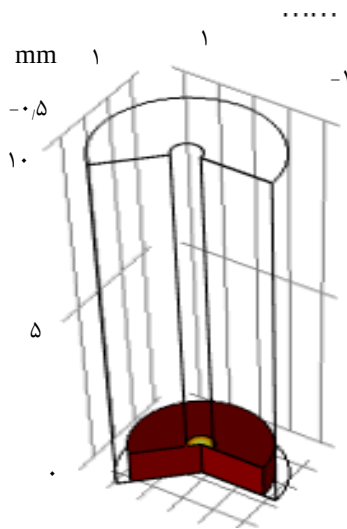
۱. مقدمه

بررسی ویژگی‌های نانوساختارهای برابند مواد مختلف همواره یکی از زمینه‌های پژوهش جدی و با کاربردهای ارزشمند در زمینه‌های مختلف از جمله نور- الکترونیک، صنعت، فن‌آوری هسته‌ای، پزشکی و داروسازی است. تاکنون روش‌های متعددی برای تولید و ساخت نانومواد به کار گرفته شده است. اغلب این روش‌ها، رویه‌های دما- بالا، زمان‌بر و غیرپاک هستند. یکی از روش‌های متداول، ایمن و پاک در زمان محدود برای تولید نانوذره‌ها، روش کندوسوز لیزر تپی است. با استفاده از این روش و توسعه‌ی آن در فن‌آوری هسته‌ای، امکان تولید باریکه‌ی اتمی به منظور جداسازی ایزوتوپ از بخار اتم و مطالعه‌ی فرایندهای هسته‌ای شیمیایی برهم‌کنش فلزها با لیزرهای پرشدت فراهم شده است. از این شیوه هم‌چنان می‌توان در تبخیر جامدات در خلأ، گاز و محیط مایع استفاده کرد. با کانونی کردن تابش لیزر با چگالی بالای انرژی بر روی هدف فلزی پلاسمای ستونی ایجاد می‌شود که در تمام جهت‌ها گسترش می‌یابد. به عبارتی نمونه بعد از برخورد لیزر به هدف تبخیر شده و گسیل گرمایونی براساس سازوکار تابش ترمزی معکوس صورت می‌گیرد و سپس براساس شرایط ترمودینامیکی پلاسمای شروع به سرد شدن می‌کند. موج ضربه‌ای به علت تغییر ناگهانی در ویژگی‌های دمایی و فشار محیط ایجاد می‌شود. ذره‌های ایجاد شده در اثر تابش لیزر در مایع پراکنده می‌شوند. این ذره‌ها مجدداً با باریکه‌ی لیزر فرودی در محیط معلق ایجاد شده برهم‌کنش می‌کنند. ذره‌های کنده شده‌ی فلزی در محیط آب مقطر با اکسیژن ترکیب و اکسید فلزی به عنوان فراورده‌ی واکنش ایجاد می‌شود. پارامترهای لیزر، ویژگی‌های هدف و مشخصه‌های محیط مایع در ویژگی‌های ساختاری نانوذره‌های تولیدی اثر گذارند. ویژگی مهم روش کندوسوز لیزری تپی فراهم نمودن نانوذره‌های خالص و فارغ از محصول‌های جانبی است. هم‌چنین تولید نانوذره‌ها در محیط محلول با لیزر تپی از دیدگاه کاربردی و تجهیزهای مورد نیاز روش مناسب‌تری نسبت به تولید نانوذره‌ها در محیط گازی و خلأ است.

مزیت‌های مهم کندوسوز لیزری در محیط محلول می‌توان به هزینه‌ی کمتر نسبت به محیط گاز و خلأ، جمع شدن تمام

محصول در مایع و سهولت حمل و نقل آن، عدم نیاز به محفظه و پمپ خلأ، امکان نگهداری نانوذره‌های تولید شده در زمان‌های طولانی و ضمانت محیط مایع برای انجام واکنش بین پلاسمای ایجاد شده بر روی سطح هدف توسط لیزر و محیط مایع به منظور تولید ترکیب‌های مختلف اشاره کرد. کندوسوز لیزری در محیط مایع یک روش ایمن، مستقیم و سریع برای تولید نانوذره‌های قابل کنترل و از پیش تعریف شده است [۱]. اما پیچیده بودن فرایندهای حاکم بر برهم‌کنش لیزر و مایع، محصور شدن پلاسمای و دشواری جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی در مرحله‌های آغازین کندوسوز در محیط مایع، خاموشی سریع گدازه در محیط مایع، محصور شدن آن و اثر حفره‌سازی از عامل‌های مؤثر بر عدم درک دقیق سازوکارهای موجود در فرایند به شمار می‌روند [۲-۴]. بنابراین به دلیل‌های اهمیت موضوع و جدید بودن روش ساخت نانوذره‌ها، ارایه‌ی یک مدل جامع نظری برای فهم بهتر فرایند حاکم که بتواند بر محدودیت‌های امکانات تجربی نیز غلبه کند ضروری است. از این‌رو، در این کار تلاش شده است با ارایه‌ی یک مدل دقیق همراه با ملاحظه‌ی تأثیر محیط آب، عامل‌های مؤثر بر نرخ کندگی از عناصر تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن مورد بررسی قرار گیرد. هم‌چنین نانوذره‌های تولیدی از این عناصر با خاصیت واکنش‌یاری نوری به عنوان ذره‌های پراکننده در محیط رنگینه برای تولید لیزر کاتوره‌ای گزینه‌ی بسیار مناسبی هستند [۵-۷]. شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار کامسول و به روش مدل عنصرهای محدود و با استفاده از مشخصه‌های لیزر نئودیمیم- یاک تپی با پهنای زمانی ns، قطر کانونی $200\text{ }\mu\text{m}$ با طول موج- های 1064 nm و 532 nm در محیط آب مقطر انجام شده است. توزیع دما روی سطح نمونه، عمق و شعاع کندگی برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰ محاسبه شده است. هم‌چنین تغییرات عمق کندگی با پهنای تپ و طول موج لیزر بررسی و نیز با تغییر در شار ورودی لیزر، شار آستانه‌ی کندگی برای این سه عنصر مورد توجه محاسبه و مقایسه شده است. هم‌چنین توزیع دما در سطح مشترک ماده و آب مقطر برای پارامترهای مختلف مورد بررسی نمایش داده شده است.

۲. مدل مسئله



شکل ۱. طرحواره‌ی هندسه‌ی محیط شبیه‌سازی شده.

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right] + \frac{a}{\rho c_p} I(z,t) \quad (1)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه، ρ چگالی، k رسانش گرمایی، t زمان و T دمای نمونه است. شدت تابش لیزر در فاصله‌ی z از سطح هدف را می‌توان چنین نوشت [۸].

$$I(z,t) = I_0(t) e^{-\alpha z (1-R)} \quad (2)$$

که در آن $I_0(t)$ شدت تابش فرودی لیزر بر سطح و R ضریب بازتابش سطح در طول موج لیزر مورد استفاده است. جواب معادله‌ی بالا پس از عملیات جبری این است.

$$T(z,t) = \frac{B_0}{\gamma} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 t} \left[A_n \sin\left(\frac{B_n}{\sqrt{a}} z\right) + B_n \cos\left(\frac{B_n}{\sqrt{a}} z\right) \right] + EzI(z,t) \quad (3)$$

در این جا $\alpha = k / \rho C_p$ و $\beta_n = \gamma \sqrt{an\pi}$ است؛ A_n و B_n ضریب‌های معادله‌اند که با اعمال شرایط مرزی و اولیه به دست می‌آیند. با ثابت در نظر گرفتن دما قبل از شروع تابش و با فرض پیشینه بودن دما در محل تابش در $Z=0$ داریم:

$$E = \frac{-I_0(t)}{K} \quad (4)$$

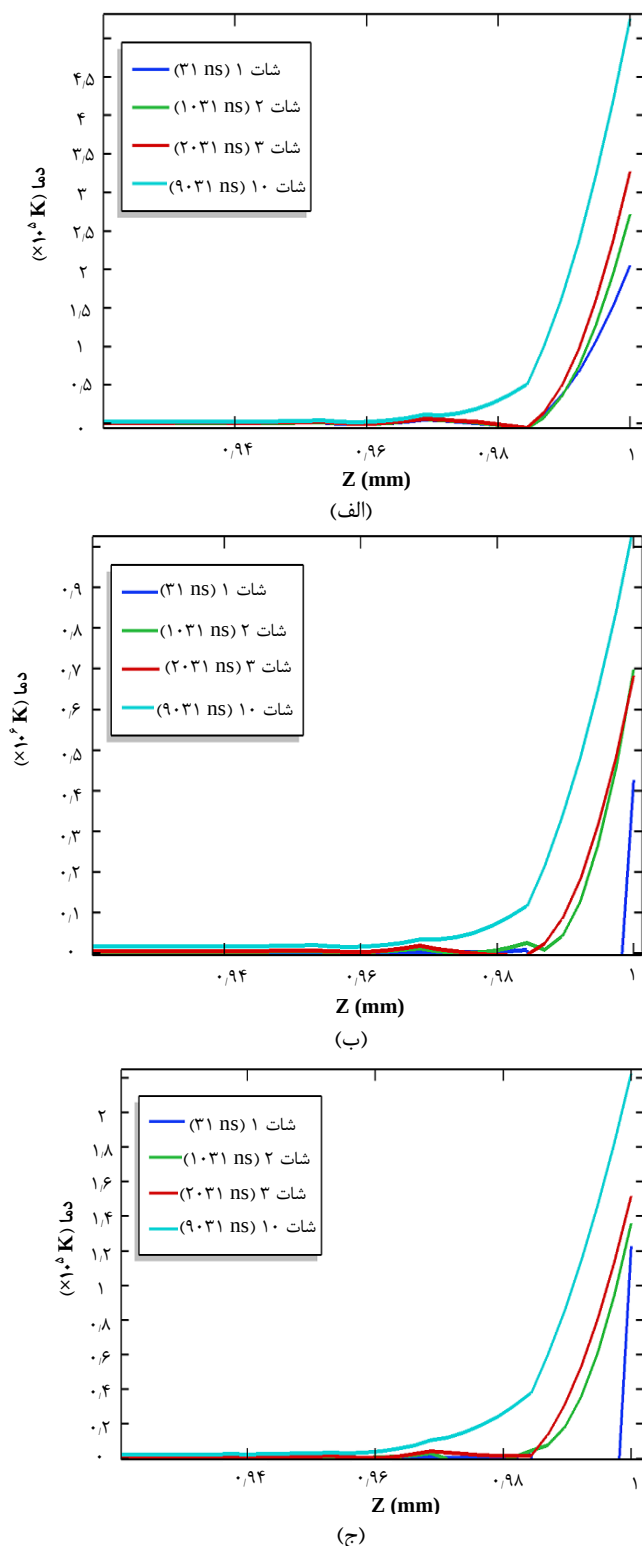
$$A_n = 0 \quad (5)$$

در این مقاله از مدل انتقال حرارت دو سیالی برای مدل‌سازی استفاده شده است. بررسی پویایی نرخ تولید گرما توسط پارامترهای تپ لیزر یکی از جنبه‌های اصلی در مدل انتقال حرارت است. معادله‌های انتقال حرارت در یک مختصات استوانه-ای دو بعدی براساس روش عنصرهای محدود حل شده است. برای حل معادله‌ها در این روش، سیستم با شکل هندسی و اعمال منبع انرژی به صورت عنصرهای محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و سپس عنصرها دوباره با یکدیگر جمع می‌شوند تا رفتار واقعی سیستم مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل ۱ نمایی از هندسه به کار رفته برای محاسبه‌های عددی نشان داده شده است.

در اثر تابش باریکه‌ی لیزر به سطح ماده ابتدا دمای سطح بالا رفته و لایه‌ی سطحی نمونه ذوب و سپس تبخیر می‌شود. نوع برهم‌کنش لیزر با ماده بسته به ویژگی‌های لیزر به عنوان یک منبع نوری به صورت‌های فوتومکانیکی، فوتوشیمیایی، فوتوگرمایی و ... است. در کندگی به وسیله‌ی لیزر با توجه به محدوده‌ی انرژی و طول تپ، فرایندهای غالب متفاوت خواهند بود. برای تپ‌های میکرو و نانوثانیه، می‌توان از ترمودینامیک کلاسیک در توصیف کندگی لیزری استفاده کرد. در این مرحله تنها سه فرایند گرمایی تبخیر، جوش معمولی و جوش انفجاری می‌تواند ماده را از هدف تحت تابش لیزر جدا سازد. با تابش تپ لیزر و به دلیل جذب انرژی آن میدان دمایی روی سطح ماده تشکیل می‌شود و بسته به دمای حاصل ماده ذوب و تبخیر می‌شود و یا به حالت پلاسما می‌رود. تحت شرایط خاص با تپ لیزر کوتاه‌تر از 10^{-7} s جوش انفجاری از اهمیت بیش‌تری در فرایند کندگی برخوردار است. در این فرایند ماده‌ی جامد سریعاً به دمای بحرانی ترمودینامیکی رسیده و ترکیبی از فاز مایع-بخار از طریق تشکیل هسته‌ی همگن در ماده‌ی تحت تابش خواهیم داشت. در حالت کلی ساختار و فاز نهایی نانو و میکروذره‌های تولید شده تحت تأثیر عامل‌هایی چون دما، فشار، غلظت مواد کنده شده، نوع محلول و پارامترهای لیزر مورد استفاده قابل کنترل است.

فرایند انتشار گرما در لایه‌ی سطحی برای عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن براساس معادله‌ی رسانندگی گرمایی شبیه‌سازی شده است.

۳ و ۱۰ با انرژی ۲۸۵ mJ در زمانی که دمای سطح به ازای هر تپ به حداکثر مقدار خود می‌رسد نمایش داده شده است. سیستم بعد از ۳۱ ns به حداکثر دمای خود پس از شروع هر تپ لیزر می‌رسد و سپس دما کاهش می‌یابد.



شکل ۲. تغییرات دمایی برای عناصر الف) تیتانیوم، ب) سیلیسیم، ج) تنگستن در راستای Z برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰ در زمانی که دمای سطح به ازای هر تپ به حد اکثر مقدار خود می‌رسد.

$$B_0 = \frac{I_0(t)}{\alpha k} \left[1 - \frac{2(e^{-\alpha z(1-R)} - 1)}{\alpha^2} \right] \quad (6)$$

$$B_n = 2 \frac{I_0(t)}{\alpha k (\alpha^2 + 4n^2 \pi^2)} (e^{\alpha z(1-R)} - 1), n \neq 1 \quad (7)$$

و جواب تحلیلی معادله‌ی ۱ با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه و پس از انتگرال‌گیری به صورت زیر است:

$$T(z, t) = \frac{I_0(t) [-\alpha^2 + 2 - 2e^{-\alpha z(1-R)}]}{2\alpha^2 k} - \frac{I_0(t)}{\alpha^2 k} (\alpha z - e^{-\alpha z(1-R)}) + \sum_{n=1, odd}^{\infty} e^{-B_n t} \left(\frac{4I_0(t)}{\alpha k n \pi^2} \right) \cos\left(\frac{B_n}{\sqrt{a}} z\right) \quad (8)$$

انرژی تپ‌های لیزر تابشی برابر ۲۸۵ mJ در نظر گرفته شده و میزان انرژی جذب شده توسط ماده به شدت تابع پهنای تپ تابشی و سطح مقطع تحت تابش است. معادله‌ی انتقال حرارت برحسب دما در حین تابش لیزر و بعد از آن نیز حل شده است. محاسبات با در نظر گرفتن اندازه‌ی هدف فلزی قرصی شکل به ضخامت ۱ mm و به شعاع ۱ mm، ارتفاع آب ۱۰ mm و محصورسازی نمونه با شعاع ۱/۲ mm انجام شده، که با توجه به اندازه‌ی قطر لکه‌ی لیزر برابر ۲۰۰ μm، ابعاد انتخاب شده مناسب‌اند. به منظور بالا بردن دقت محاسبات انجام شده و برای این که نتیجه‌های شبیه‌سازی هر چه بیش‌تر به داده‌های واقعی نزدیک‌تر شود ابعاد مش‌بندی فضا- زمانی بسیار کوچک انتخاب شده است. مش‌بندی فضایی بسیار ریز و با دقت ۰/۲ μm و با تقسیم ناحیه‌ی مرتبط به عنصرهای مش مثلثی صورت گرفته است و معادله‌ها با مرتبه‌های زمانی ۱ ns حل شده است. همچنین باریکه‌ی لیزر به صورت پرتو گاوسی آرمانی فرض شده و بازتاب چندگانه در حفره‌ی حاصل از کندوسوز نادیده گرفته شده است. فاصله‌های زمانی بین تپ‌های لیزر ۱۰۰۰ ns در نظر گرفته شده است. خاصیت‌های مواد مانند جذب، چگالی و گرمای ویژه، ثابت بوده و ضریب انتقال گرمایی نسبت به دما متغیر در نظر گرفته شده است. مواد مورد مطالعه همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده و سطح‌های کناری و زیرین مواد با تعیین شرایط مرزی عایق فرض شده است.

۳. نتیجه‌های شبیه‌سازی

در شکل ۲ تغییرات دمایی برای سه عنصر تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن در دو راستای Z و راستای شعاعی برای تعداد تپ ۱، ۲،

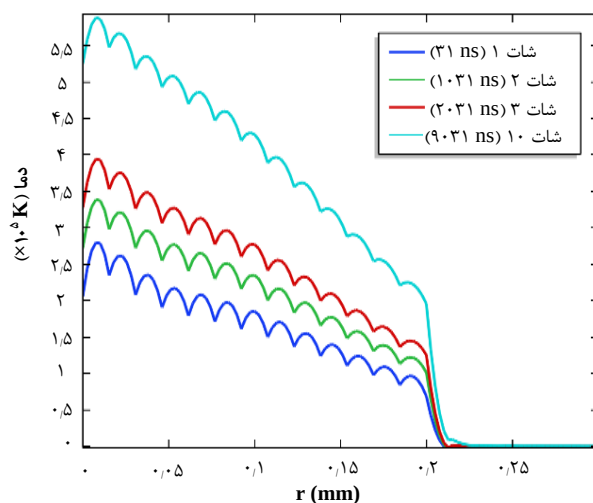
با حل معادله‌ی انتقال حرارت، توزیع دما در ماده به صورت تابعی از زمان و مکان به دست می‌آید؛ می‌توان محدوده‌ی مکانی بخشی از ماده را که دمای آن تا دمای جوش ماده و بیش‌تر افزایش می‌یابد به دست آورد و عمق و شعاع کندگی را محاسبه نمود. شاریدگی آستانه‌ی کندگی با کاهش شار انرژی تا حدی که حجم محدوده‌ی مکانی بخشی از ماده که دمای آن تا دمای جوش ماده افزایش یافته، به صفر میل کند محاسبه شده است. با توجه به دمای جوش تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن که به ترتیب برابر ۳۵۶۰، ۳۵۳۸ و ۵۸۲۸K است حداکثر عمق کندگی و شعاع کندگی در تعداد تپ‌های مختلف برای این عناصرها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ فهرست شده است. عمق کندگی برای هر سه عنصر تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. رابطه‌ی خطی عمق کندگی با افزایش تعداد تپ برای سیلیسیم به صورت تجربی برای تابش لیزر ns و fs در طول موج فرابنفش گزارش شده است [۹]. در نمودار تغییرات شعاعی دما نوسان‌هایی مشاهده می‌شود که به دلیل شرایط مرزی و به علت گسیل هم‌زمان موج‌های ضربه‌ای در محیط بوده است که باعث بروز نوسان دما در راستای شعاعی می‌شود. با استفاده از نتیجه‌های به دست آمده و محاسبه‌های تغییرات دمای روی سطح هدف با تغییر پارامترهای لیزر پیش‌بینی می‌شود که با افزایش تعداد تپ و با بیش‌تر شدن مدت زمان تابش و افزایش دما بر روی سطح هدف چگالی نانوذرهای حاصل از فرایند کندگی لیزری افزایش یافته و به دلیل برهم‌کنش تپ‌های بعدی لیزر با ذره‌های کنده شده میانگین اندازه‌ی نانوذرهای حاصل کاهش یابد.

جدول ۱. حداکثر عمق کندگی (در راستای Z) برای عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن در تعداد تپ‌های متفاوت

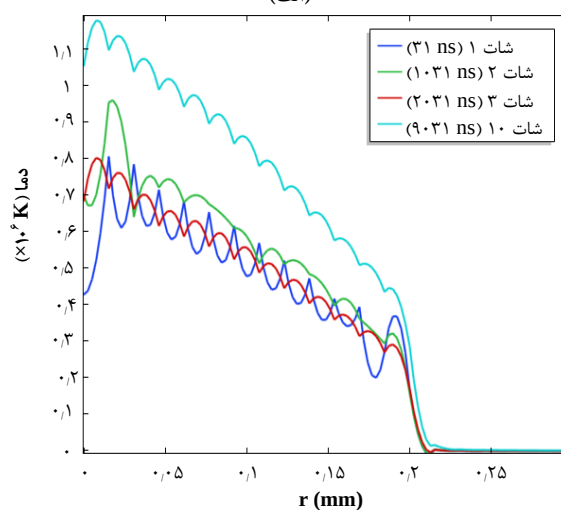
عمق کندگی	تعداد تپ			
	۱۰	۳	۲	۱
تیتانیوم (μm)	۳۰٫۰۱	۳۰٫۵۱	۳۱٫۴۹	۴۲٫۰۳
سیلیسیم (μm)	۳۰٫۸۶	۴۶٫۱۶	۶۱٫۹۹	۱۷۰٫۷۸
تنگستن (μm)	۱۸٫۲۰	۲۲٫۲۷	۲۳٫۱۹	۳۵٫۷۱

جدول ۲. شعاع کندگی برای عناصر تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن در تعداد تپ‌های متفاوت

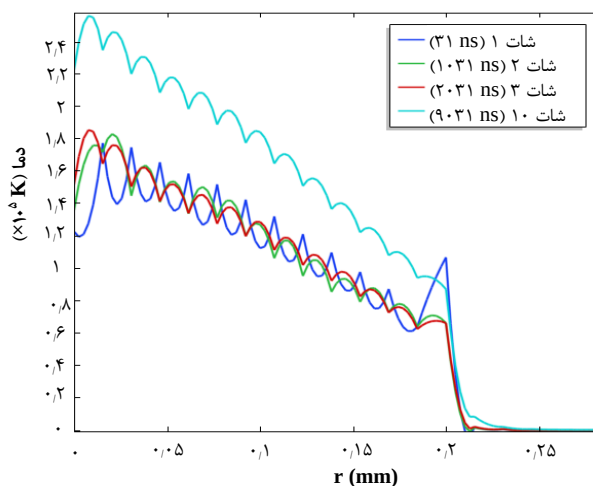
شعاع کندگی	تعداد تپ			
	۱۰	۳	۲	۱
تیتانیوم (μm)	۲۱۴٫۰۴	۲۱۴٫۳۴	۲۱۴٫۴۳	۲۲۱٫۵۷
سیلیسیم (μm)	۲۱۹٫۱۰	۲۲۱٫۵۰	۲۲۳٫۳۱	۲۳۲٫۲۲
تنگستن (μm)	۲۱۱٫۶۲	۲۱۲٫۰۴	۲۱۳٫۳۵	۲۱۵٫۵۱



(الف)



(ب)

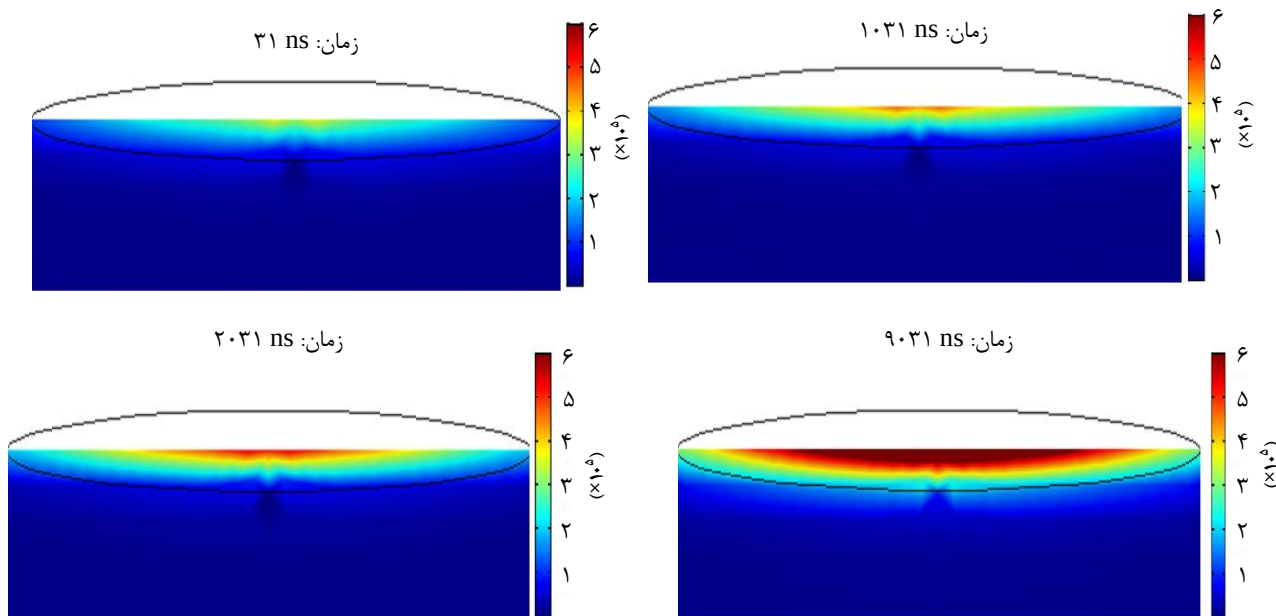


(ج)

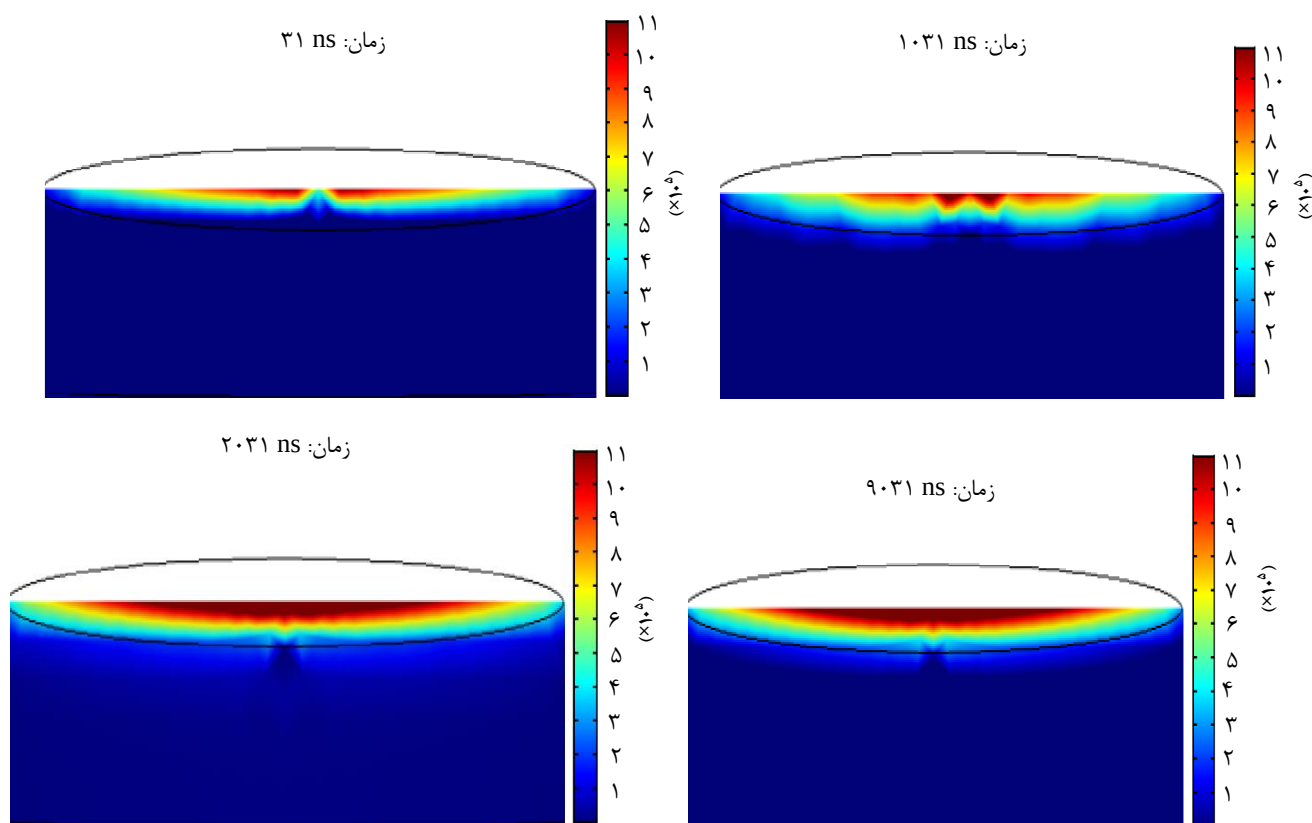
شکل ۳. تغییرات دمایی برای عناصر الف) تیتانیوم، ب) سیلیسیم، ج) تنگستن در راستای شعاعی برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰ در زمانی که دمای سطح به ازای هر تپ به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

لیزر و در زمان 90.31 ns در نزدیکی سطح تیتانیوم، سیلسیم و تنگستن در نقطه‌ی کانونی تپ لیزر به ترتیب تا $5/2 \times 10^5$ و $10/5 \times 10^5 \text{ K}$ افزایش می‌یابد.

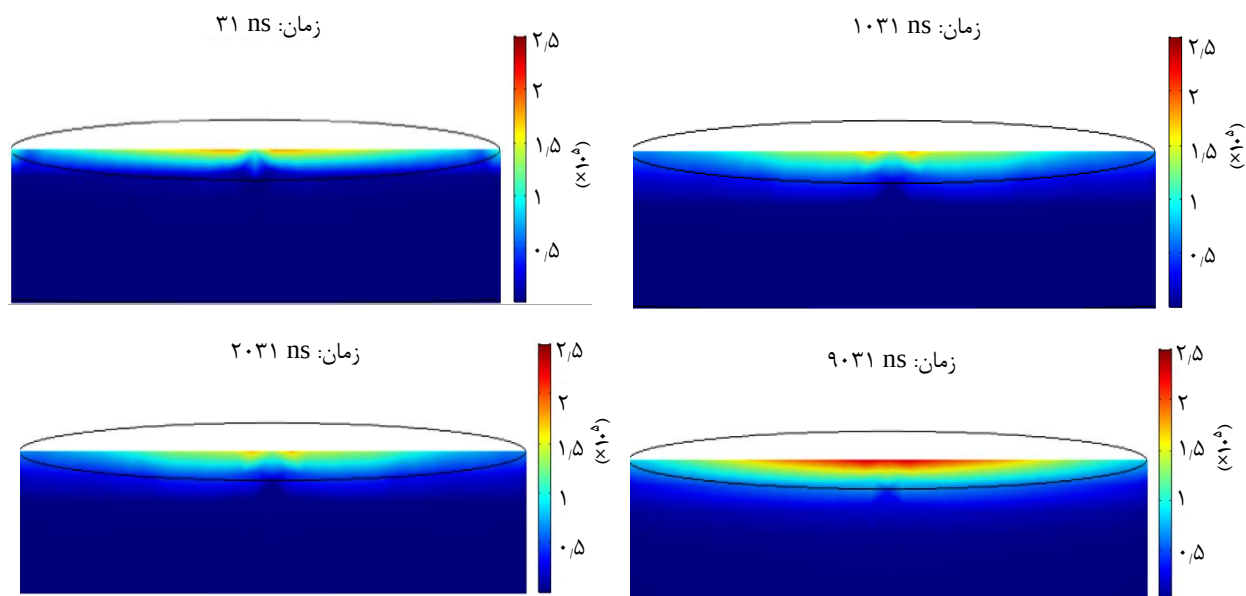
هم‌چنین تحول زمانی توزیع دما در ساختار دو بعدی در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ برای عنصرهای به ترتیب تیتانیوم، سیلسیم و تنگستن نمایش داده شده است. حداکثر دما در حالت ۱۰ تپ



شکل ۴. توزیع دما در سطح تیتانیوم برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰.



شکل ۵. توزیع دما در سطح سیلسیم برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰.

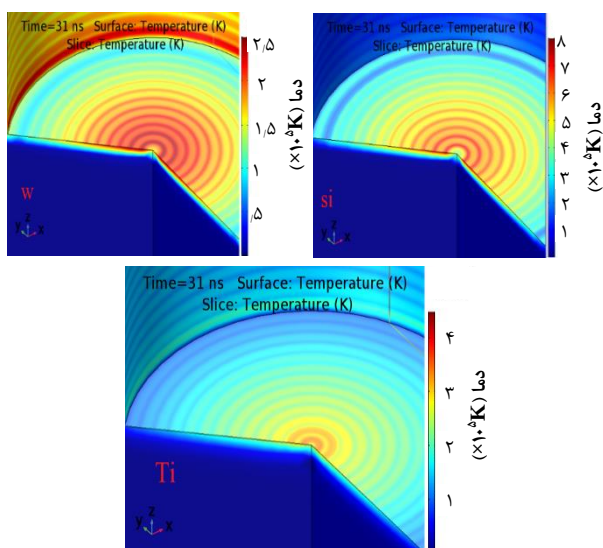


شکل ۶. توزیع دما در سطح تنگستن برای تعداد تپ‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۰.

جدول ۳. حداکثر عمق کندگی عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن (در راستای Z) برای پهنای زمانی مختلف یک تک تپ

تنگستن	سیلیسیم	تیتانیوم	پهنای زمانی تپ (ns)
۲۰,۲۱	۳۶,۷۵	۳۰,۹۲	۵
۱۸,۲۰	۳۰,۸۶	۳۰,۰۱	۱۰
۱۴,۸۹	۲۷,۴۶	۲۹,۴۹	۲۰
۱۴,۳۱	۲۶,۶۲	۲۹,۲۴	۳۰

در جدول ۳ حداکثر مقدار عمق کندگی برای عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن برای پهنای زمانی مختلف یک تک تپ با انرژی ۲۸۵ mJ مقایسه شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که حداکثر عمق کندگی با افزایش پهنای تپ، کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل کاهش میزان جذب انرژی در پهنای بزرگ‌تر تپ است. جان کیم و همکاران با بررسی تجربی تأثیر پهنای تپ بر تولید نانوذره‌های نقره به نتیجه‌های مشابهی دست یافتند [۱۰].



شکل ۷. توزیع دما در سطح مشترک ماده و آب مقطر و همچنین در داخل ماده در طول موج ۵۳۲nm و در زمان اتمام تک تپ لیزر با انرژی ۲۸۵mJ و پهنای ۱۰ns.

به منظور مطالعه‌ی اثر طول موج لیزر بر عمق کندگی، حداکثر عمق کندگی در طول موج ۵۳۲ nm در زمان اتمام تک تپ لیزر با انرژی ۲۸۵mJ و پهنای تپ ۱۰ns شبیه‌سازی شد. حداکثر عمق کندگی برای تیتانیوم و تنگستن به ترتیب تا ۴۰,۳۹ و ۱۹,۴۸ μm افزایش یافت که به دلیل افزایش ضریب جذب و کاهش ضریب بازتابش سطحی در طول موج ۵۳۲ nm است. حداکثر عمق کندگی برای سیلیسیم حتی به رغم بیش‌تر بودن ضریب جذب در طول موج ۵۳۲nm به ۲۸,۳۹ μm کاهش یافت که به دلیل بیش‌تر بودن ضریب بازتابش سطحی سیلیسیم در این طول موج است. در شکل ۷ توزیع دما در سطح مشترک ماده و آب مقطر و نیز در داخل ماده در طول موج ۵۳۲nm نشان داده شده است. همچنین اثر شاریدگی انرژی تپ لیزر به عنوان پارامتر مؤثر بر میزان کندگی تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن در شکل ۸ نشان داده شده و شاریدگی آستانه برای هر یک از عناصر تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن محاسبه شده است.

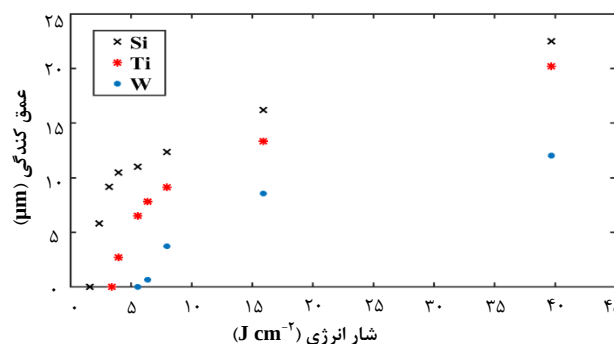
عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن آورده شد. میزان کندگی در شرایط یکسان تابش لیزر به ترتیب بر روی عنصرهای سیلیسیم، تیتانیوم و تنگستن حالت نزولی دارد. در شرایط یکسان تابش لیزر سرعت کندوسوز شبه‌فلز سیلیسیم به صورت قابل توجهی بالاتر از فلزهای تیتانیوم و تنگستن است. شدت آستانه‌ی کندگی هم برای سیلیسیم، تیتانیوم و تنگستن به ترتیب برابر ۱/۵۹، ۳/۴۲ و $۵/۵۷ \text{ J cm}^{-۲}$ است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های مداوم آزمایشگاه تحقیقاتی لیزر دانشگاه صنعتی شریف ابراز می‌نمایند.

مراجع

1. V. Amendola, M. Meneghetti, *Laser ablation synthesis in solution and size manipulation of noble metal nanoparticles*, Phys. Chem. Chem. Phys. **11**, 3805 (2009).
2. S. Cheng-Yu et al. *Zhigilei Generation of Subsurface Voids, Incubation Effect, and Formation of Nanoparticles in Short Pulse Laser Interactions with Bulk Metal Targets in Liquid: Molecular Dynamics Study*, J. Phys. Chem. C **121**, 16549 (2017).
3. V. Oliveira, R. Vilar, *Finite element simulation of pulsed laser ablation of titanium carbide*, Applied Surface Science **253**, 7810 (2007).
4. H. S. Lim, J. Yoo, *FEM based simulation of the pulsed laser ablation process in nanosecond fields*, Journal of Mechanical Science and Technology **7**, 1811 (2011).
5. F.J. Al-Maliki, *Detection of Random Laser Action from Silica Xerogel Matrices Containing Rhodamine 610 Dye and Titanium Dioxide Nanoparticles*, Advances in Materials Physics and Chemistry **2**, 110 (2012).
6. A. M. Brito-Silva et al. *Random laser action in dye solutions containing Stöber silica nanoparticles*, Journal of Applied Physics **108**, 033508 (2010).
7. F. Luan et al. *Lasing in nanocomposite random media*, Nano Today **10**, 168 (2015).
8. A. Bogaerts et al. *Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling*, Spectrochimica Acta Part B **58**, 1867 (2003).
9. Z. Xianzhong et al. *Ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon: ablation efficiency and laser-induced plasma expansion*, (2004).
10. J. Jeon et al. *The Effect of Laser Pulse Widths on Laser-Ag Nanoparticle Interaction: Femto- to Nanosecond*, Lasers Appl. Sci. **8**, 112 (2018).



شکل ۸. اثر شار انرژی لیزر بر عمق کندگی تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن.

مطابق شکل ۸ در شرایط یکسان، مقدار کندگی برای شبه فلز سیلیسیم حدود ۱/۳ برابر تیتانیوم و ۱/۸ برابر تنگستن است که دلیل آن را می‌توان پایین بودن آستانه‌ی کندگی برای شبه‌فلز سیلیسیم در مقایسه با شبه فلز تیتانیوم و تنگستن دانست. کندگی تنگستن با شیب کم‌تری نسبت سیلیسیم و تیتانیوم با افزایش شاریدگی انرژی افزایش می‌یابد. انرژی تپ هم‌چنین بر مقدار ماده‌ی کنده شده و سازوکار کندگی تأثیر می‌گذارد. در انرژی پایین و نزدیک آستانه‌ی کندگی فرایند غالب عمدتاً تبخیر است؛ با افزایش شاریدگی انرژی و دما در سطح هدف و افزایش بازده کندگی، فرایند غالب به جوش انفجاری تغییر می‌کند و منجر به کنده شدن تکه‌های بزرگ‌تری از ماده می‌شود؛ در نتیجه پیش‌بینی می‌شود میانگین اندازه‌ی نانوذره‌های حاصل با انرژی لیزر افزایش یابد.

۴. نتیجه‌گیری

این مقاله مدلی برای شبیه‌سازی فرایند کندوسوز لیزری عنصرهای مختلف تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن در محیط آب مقطر با استفاده از لیزر نئودیمیم-یاگ تپی با طول موج ۱۰۶۴ nm و ۵۳۲ nm، پهنای زمانی ns، و قطر کانونی ۲۰۰ μm و با ملاحظه‌ی فاصله‌های زمانی ۹۰۰۰ ns بین تپ‌های لیزر برای نمایش اطلاعات دقیق سازوکار برهم‌کنش و عامل‌های مؤثر در فرایند ارایه می‌دهد. هم‌چنین توزیع دما در سطح مشترک ماده و آب مقطر برای پارامترهای مختلف نمایش داده شده است. در واقع ویژگی‌های ساختاری و نوری نانوذره‌های برابند به عنوان ذره‌های پراکننده در نحوه‌ی عملکرد لیزرهای کاتوره‌ای مؤثرند. برای تحلیل کامل فرایند برهم‌کنش، عمق کندگی، شعاع کندگی و نیز تحول‌های زمانی، توزیع دمایی بر روی سطح‌های

استناد به این مقاله

مهسا پاشازاده، الناز ایرانی، میرمقصود گلزان، رسول صدیقی بنابی (۱۳۹۸)، شبیه‌سازی و مدل‌سازی دینامیک کندوسوز لیزری عنصرهای تیتانیوم، سیلیسیم و تنگستن با لیزر تپی نئودیمیم-یاگ در محیط آب مقطر، ۸۹-۸.

DOI: 10.24200/nst.2019.1020

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1020.html