



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



شبیه سازی دینامیکی توزیع دما در عمق هدف فلزی در اثر تابش لیزر پالسی

مهدی نظرعلی زاده ، فرشاد مرادی و امیرحسین ساری

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

چکیده - امروزه انتقال حرارت و شبیه سازی دینامیکی توزیع دما کاربرد های فراوانی در شاخه های مختلف علوم به ویژه در صنعت دارد. لذا بر آن شدیم تا نحوه توزیع دما در سطح هدف فلز مس، در اثر تابش لیزر پالسی را به صورت وابسته به زمان شبیه سازی نماییم. در این تحقیق پارامترهای مختلفی مانند ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت حرارتی و چگالی ماده به صورت وابسته به دما در نظر گرفته شده است. همچنین گرمای نهان ذوب در محاسبات لحاظ شده است. شبیه سازی در دو بعد انجام گرفته است.

کلید واژه- شبیه سازی، لیزر پالسی، توزیع دما، رسانندگی حرارتی، گرمای نهان.

## Dynamic Simulation of Temperature Distribution in Depth of a Metallic Target Irradiated by a Pulsed Laser

Mehdi Nazaralizadeh, Farshad Moradi, Amir Hossein Sari

Department of Physics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,  
mehdinazaralizadeh1991@gmail.com, sari@srbiau.ac.ir

**Abstract-** In this paper, the temperature distribution in the depth of Cu target after pulsed laser impact has been simulated. This calculation was done by taking the latent melting heat into account. The specific heat capacity, thermal conductivity and density were taken as temperature dependent. The simulation performed mode is a condition in which the thermo-physical properties such as thermal conductivity material are temperature dependent and specific heat capacity at constant pressure, in the new initiative, a mixture of specific heat capacity depends on temperature and latent melting heat is considered. The effect of different laser powers at various impact time are considered and calculated.

Keywords: Simulation, pulsed laser, temperature distribution, latent heat.

## ۱- مقدمه

که در آن  $F(T)$  به صورت تابع دلتای دیراک است:

$$F(T) = \frac{1}{\sqrt{\pi\Delta T}} \exp\left(-\frac{(T-T_m)^2}{\Delta T^2}\right) \quad (3)$$

در رابطه بالا  $T_m$  دمای نقطه ذوب ماده هدف است. اطلاعات مربوط به  $K(T)$  و  $Cp(T)$  و  $\rho(T)$  مواد مورد نظر از جداول، توابع و نمودارهای موجود در کتابهای مرجع جمع آوری و استفاده شده است [6-7]. چگالی توانی پالس لیزر را (با واحد  $W/m^2$ ) به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$W(t) = \begin{cases} P & 0 < t < 7 \times 10^{-9} \\ 0 & t > 7 \times 10^{-9} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن  $P$  توان لیزر و  $t$  زمان بر حسب ثانیه است.

لیزر نئودیمیم یگ با طول موج  $1.064$  نانومتر و پهنای پالس  $7$  نانوثانیه و شعاع  $5$  میلی متر را به نمونه دو بعدی خود که مربعی به ابعاد  $10$  میلی متر که از مس تشکیل شده است می تابانیم. (لیزر را به سطحی معادل با اندازه شعاع لیزر بر روی دیواره آن می تابانیم نه به تمام دیواره). شرایط مرزی را نیز به صورت زیر تعریف می نماییم که در آن  $T_0$  دمای اولیه می باشد.

$$T(x, t = 0) = T_0 \quad (5)$$

$$T(x = \infty, t) = T_0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

## ۳- نتایج و بحث

با استفاده از الگوریتم المان محدود، معادله انتقال حرارت به روش عددی حل و نتایج آن در شرایط مختلف به دست آمد. شکل (۱) نحوه توزیع دما در عمق ماده را در زمانهای مختلف برای هدف مس در حالتی نشان می دهد که چگالی توان اعمال شده توسط لیزر  $1e12 \frac{W}{m^2}$  می باشد. با آغاز به کار لیزر در هر لحظه دما رفته رفته افزایش یافته و مجدد به دمای  $293$  باز می گردد که نشان از انتخاب درست

در دو دهه ی اخیر کارهای تجربی متعددی در زمینه ی کاربرد بر هم کنش باریکه های پر انرژی پالسی همانند تابش لیزری با سطح یک هدف جامد انجام گرفته است [1-5]. شبیه سازی این فرآیند و استخراج نحوه توزیع پارامترهای مختلف (مانند دما) در طول زمان نقش تعیین کننده ای در تحلیل نتایج آزمایش ها و بهینه سازی آنها دارند. در این تحقیق از لیزر تنها به عنوان یک منبع حرارتی استفاده و از پارامترهای لیزر نظیر اثر طول موج، ضریب جذب و بازتاب آن چشم پوشی شده است. این شبیه سازی در فضای دو بعدی صورت گرفته شده است که در آن خواص ترموفیزیکی ماده نظیر رسانندگی حرارتی به دما وابسته بوده و ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت در ابتکاری جدید به صورت تلفیقی از ظرفیت گرمایی ویژه وابسته به دما و گرمای نهان ذوب در نظر گرفته شده است. هدف از انجام این پروژه این است که ببینیم با اعمال چگالی توان لیزر با مدت زمان پالس  $7$  نانوثانیه، در هر لحظه از زمان نحوه توزیع دما و میزان نفوذ آن در عمق ماده چگونه است. همچنین بفهمیم هر بار چه مقدار از سطح ماده مس ذوب می شود.

## ۲- مدل مسئله

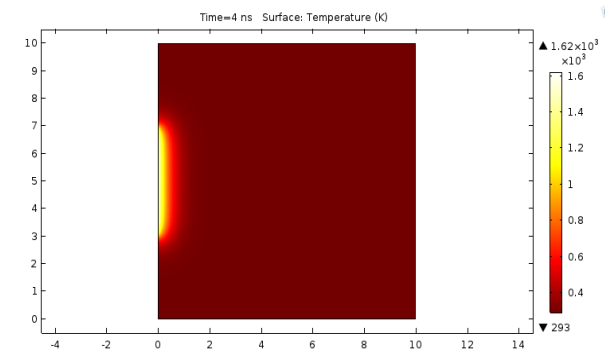
فرم کلی معادله انتقال حرارت در جامدات از طریق رسانش به صورت زیر می باشد:

$$\rho(T)C_{pe}(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left[ k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right] = Q \quad (1)$$

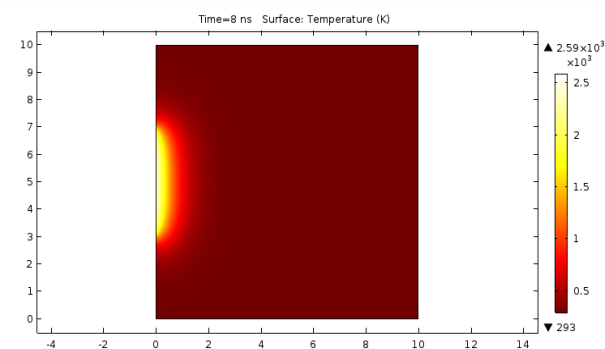
که در آن  $\rho$  چگالی بوده،  $k$  رسانایی حرارتی و  $C_{pe}$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت می باشد. در این رابطه  $Q$  را به عنوان منبع گرما معرفی می کنیم و ظرفیت گرمایی ویژه را به صورت زیر، بر حسب گرمای نهان ذوب ماده تعریف می کنیم:

$$C_{pe}(x, T) = C_p(x, T) + L(x) F(T) \quad (2)$$

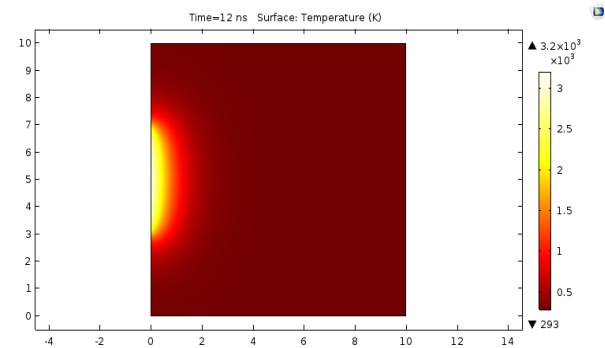
شرایط مرزی در این شبیه سازی دارد. در ادامه خواهیم دید چگونه می توان به کمک شبیه سازی نتایج حاصل از بر هم کنش میان لیزر و سطح مواد و آنچه در واقعیت رخ می دهد را با دقت بسیار بالا پیش بینی نمود.



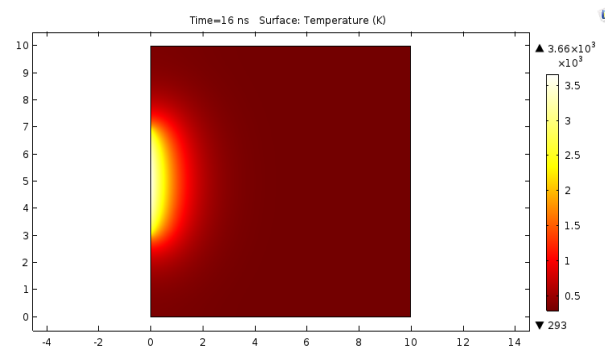
شکل ۳: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 4ns



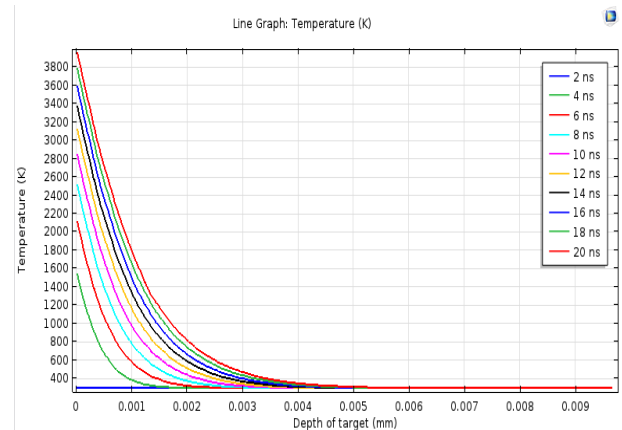
شکل ۴: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 8ns



شکل ۵: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 12ns

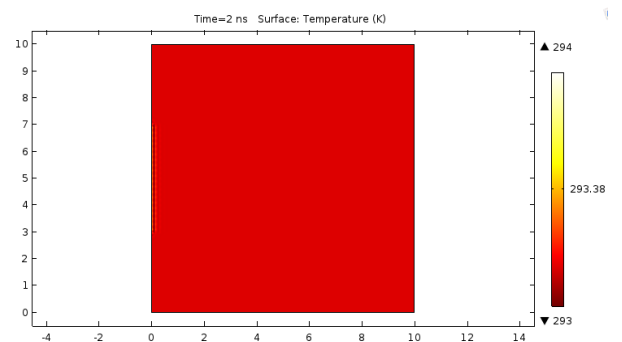


شکل ۶: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 16ns



شکل ۱: نحوه توزیع دما در عمق فلز مس در زمان های مختلف

در شکل فوق با رسیدن دمای نمونه هدف به دمای نقطه ذوب ( $T_m$ ) بخشی از سطح ماده هدف ذوب می شود. همان گونه که از شکل پیداست با گذر از دمای نقطه ذوب (دمای نقطه ذوب برای مس ۱۳۵۸ درجه کلوین می باشد) بخشی از سطح (به طور تقریبی کمتر از ۱ میلی متر) ذوب خواهد شد.



شکل ۲: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 2ns

در شکل ۲ لیزر تازه شروع به کار نموده و دمای نمونه هدف تقریباً برابر است با دمای اتاق اما با گذشت زمان دمای نمونه افزایش خواهد یافت که در ادامه خواهید دید.

استحکام و سختی بالاتر و ... است که با توجه به نوع کاربرد آن‌ها مورد نیاز است که یکی از این گزینه‌ها برای رسیدن به این اهداف استفاده از لیزر در اصلاح سطح است.

## مرجع‌ها

[۱] چهرقانی، علی. ۱۳۹۱. آزمایشگاه فرآوری مواد با لیزر، مرکز علوم و فنون لیزر ایران. برگرفته از مقالات ارائه شده در کنفرانس‌های داخلی

[۲] چهرقانی، علی؛ ترکمنی، محمدجواد؛ صباغ زاده، جمشید. ۱۳۹۰، مدل سازی برهم کنش پرتو لیزر پالسی با اهداف فلزی و تعیین پهنا و عمق نفوذ حرارت. مرکز ملی علوم و فنون ایران، شانزدهمین دوره از کنفرانس انجمن اپتیک و فوتونیک ایران

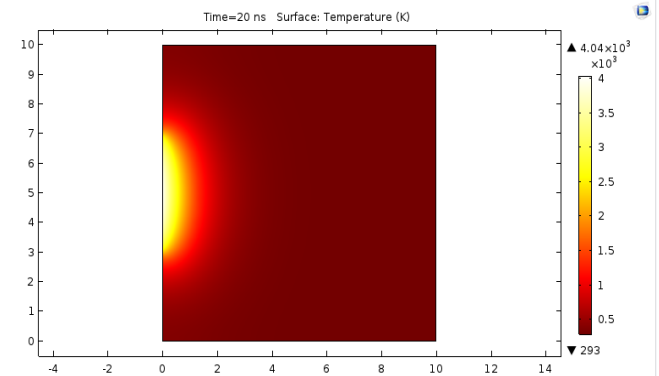
[3] H. Akamatsu, TY. Ikeda, K. Azuma, E. Fujiwara, M. Yatuszuka, Jpn. J. Appl. Pys. 41 (2002) 399.

[4] .. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York, 1985.

[5] D.J. Rej, H.A. Davis, G.E. Remnev, V.A. Shulov, R.W. Stinnett, K. Yasusi, J. Vac. Sei. Technol., A 15 (1997) 1089.

[۶] Shackelford, J.F and Alexander, W. 2001. Materials Science and Engineering Handbook. 3 Edition. .

[۷] Brades. E.A., and Brook .G.B., 1999. SMithells Metals Reference Book. Butterworth Heinemann



شکل ۷: میزان توزیع حرارت و نفوذ آن در عمق ماده در لحظه 20ns

از گذشته تا کنون روش‌های متعددی برای بررسی انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته است که اغلب زمان بر، غیر پاک و پرهزینه هستند لذا به دلیل اهمیت موضوع و جدید بودن آن، تصمیم گرفتیم تا مدل جامع تئوری فوق را ارائه دهیم که علاوه بر صرفه جویی در وقت و هزینه‌ها، بر محدودیت‌های امکانات تجربی نیز غلبه کند. در این روش شما می‌توانید در هر لحظه از زمان، در هر مکانی از سطح و یا عمق ماده هدف توزیع حرارت و نحوه تغییرات دما را ملاحظه نمایید. مواد مختلف دارای خواص ترموفیزیکی و همچنین نقطه ذوب متفاوتی نسبت به یکدیگر هستند که وجود تفاوت در این پارامترها باعث ایجاد تفاوت در نحوه توزیع حرارت در عمق هریک از این مواد خواهد بود.

اگر خواص ترموفیزیکی را وابسته به دما در نظر بگیریم و اثر گرمای نهان ذوب ماده را در محاسبات خود لحاظ کنیم، هردو بر روی محاسبات تاثیرگذار خواهند بود. با توجه به کاربردهای روز افزون فلزات و آلیاژهای آن‌ها در صنعت، تحقیقات زیادی در جهت بهتر شدن خواص سطحی آنها انجام می‌شود که اهداف اصلی در این تحقیقات رساندن فلزات به خواص مطلوبی مانند مقاومت به خوردگی بالاتر و