بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# بررسی اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده در ماده‌برداری لیزری هدف تیتانیومی با استفاده از لیزر پالسی نانوثانیه در محیط آب

مرضیه اکبری جعفرابادی و محمد حسین مهدیه

دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

**چکیده – در این مقاله اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده در برهم‌کنش لیزر پالسی پرتوان نانوثانیه (لیزر *Nd:YAG*) با هدف تیتانیومی در محیط مایع بررسی شده است. قطر حفره‌ها با استفاده از یک میکروسکوپ نوری با دقت میکرونی به دست آمده است. برهم کنش در محیط آب مقطر در یک سلول آب صورت گرفته است. هدف مورد تابش در عمق های مختلف آب قرار داده شد و تابش دهی صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند که قطر حفره‌ها برای شارهای بالاتر، بزرگتر است. همچنین کاهش قطر در اثر افزایش تعداد نانوذرات برای شارهای بالاتر محسوس‌تر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اندازه قطر حفره‌ها به ارتفاع مایع بالای سطح هدف بستگی دارد.**

کلید واژه- قطر حفره، لیزر پالسی پرتوان، ماده برداری لیزری، محیط برهم کنش مایع، هدف فلزی.

# Evaluation of Crater Geometry in Ti Target Irradiated by Nanosecond Laser Beam in Water

Marzieh Akbari Jafarabadi, Mohammad Hossein Mahdieh

Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- Micro size craters were created by focusing of nanosecond laser beam on Ti target in distilled water. The geometry of craters is important in some applications such as micromachining. In this paper we concentrate on the diameter of the craters. The crater geometry was characterized by using an optical microscope. Different laser fluences were used in the experiment and their effects on the crater diameter were studied. Target was placed inside the water cell and the experiment was carried out for different water depths. The results show that for higher fluences, the crater diameters are larger. Results also show that the crater diameters' can be varied if the water depth is changed.

Keywords: Crater diameter, High power pulsed laser, Laser ablation, Liquid interaction medium, Metal target.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

## ۱- مقدمه

ماده‌برداری لیزری به دلیل کاربردهای متنوعی که دارد، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. از جمله این کاربردها می‌توان به لایه‌نشانی لیزری، تولید نانوذرات، ماشین‌کاری ظریف و شناسایی مواد اشاره کرد.

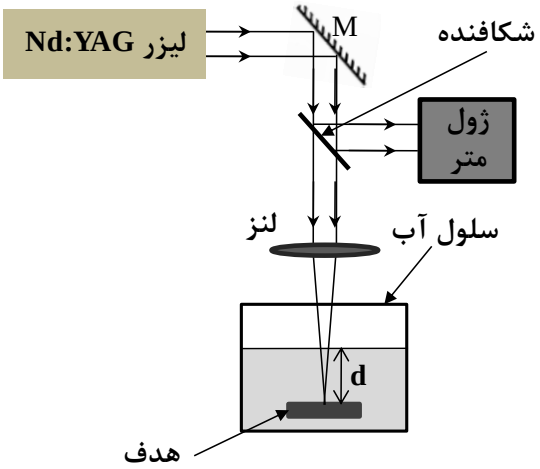
در ماده‌برداری لیزری معمولا پرتو یک لیزر پرتوان پالسی را بر روی یک هدف جامد متمرکز می‌کنند. بخشی از انرژی رسیده به سطح هدف، توسط الکترون‌های آزاد جذب می‌شود و در اثر برهم‌کنش الکترون- فنون سطح هدف گرم می‌شود. با توجه به شار فرودی لیزر، فرآیندهای دیگری همچون تبخیر سطحی، ذوب، تشکیل پلاسما و انبساط آن، تولید موج شوک (در محیط‌های غیر از خلا) و خروج مواد از سطح (ماده‌برداری) می‌توانند اتفاق بیافتند. نتیجه برهم‌کنش پرتو لیزر و هدف، در شارهای کم تغییر ساختار سطح و در شارهای زیاد ایجاد حفره در ناحیه برهم‌کنش می‌باشد.

عوامل مختلفی از جمله مشخصات پرتو لیزر (انرژی، قطر لکه، طول موج و طول پالس)، مشخصات ماده هدف (خواص گرمایی، نوری و مکانیکی) و مشخصات محیط برهم‌کنش پرتو لیزر و هدف بر میزان ماده‌برداری لیزری تاثیرگذارند [۳-۱]. استفاده از مایعات به عنوان محیط برهم‌کنش در کاربردهایی همچون تولید نانوذرات و ماشین‌کاری ظریف بسیار مناسبند [۴و ۵]. به علت محدودشدگی پلاسمای تولید شده در برهم‌کنش پرتو لیزر و هدف توسط مایع، فشار و دمای پلاسما در محیط مایع نسبت به حالت محیط‌های برهم‌کنش گاز و خلا بیشتر است [۵]. به همین علت بازده تولید نانوذرات در محیط مایع بیشتر است. همچنین محیط برهم‌کنش مایع از نشستن دوباره مواد خارج شده از سطح بر کناره های حفره به وجود آمده جلوگیری می‌کند. بنابراین محیط مایع، محیط مناسبی برای ماشین‌کاری ظریف نیز می‌تواند باشد [۴]. از جمله دیگر عوامل مهم در ماشین‌کاری ظریف، قطر حفره‌های به وجود آمده بر سطح هدف در اثر ماده‌برداری لیزری می باشد که موضوع اصلی مورد بررسی در این مقاله می‌باشد.

در این مقاله قطر حفره‌های به وجود آمده در برهم‌کنش پرتو لیزر پالسی نانوثانیه پرتوان با هدف تیتانیوم در محیط مایع با ارتفاع‌های مختلف و برای شارهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه قطر حفره‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری به دست آمده است.

## ۲- آزمایش

شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. پرتو لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm، ۱۰ ns و فرکانس تکرار ۱۰ Hz، پس از عبور از یک پرتوگستر توسط یک لنز با فاصله کانونی ۱۸ cm بر روی هدف متمرکز شده است. بخشی از پرتو توسط یک شکافنده به یک ژول‌متر فرستاده شده است. قطر لکه لیزر بر سطح هدف ۱۵۰ ماکرون می‌باشد. از تیتانیوم با ضخامت ۳ mm به عنوان هدف مورد تابشدهی استفاده شده است. از آب مقطر به عنوان محیط برهم‌کنش استفاده شده است. هدف در یک سلول آب و در عمق‌های مختلف آب قرار گرفته و تابشدهی انجام شده است. آزمایش در دو قسمت انجام شده است. در یک قسمت اثر شار بر اندازه قطر حفره مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعد اثر ارتفاع آب بر اندازه قطر حفره بررسی شده است.




شکل ۱. طرحواره ای از چیدمان آزمایش.

در قسمت اول، آزمایش برای شارهای ۱۳۰ $J/cm^2$ و ۹۰،۱۱۰، ۵۵ در محیط برهم‌کنش آب (با ارتفاع ۱۰ mm بالای سطح هدف) انجام شده است. زمان تابشدهی برای هر شار ۲۰ دقیقه و تعداد کل ۱۲۰۰۰ عدد پالس تابیده می‌باشد. در هر شار بعد از هر ۱۵۰۰ پالس هدف جابه‌جا و ادامه تابشدهی در مکان جدیدی انجام می‌شود. بنابراین در پایان تابشدهی در هر شار، ۸ حفره بر سطح هدف ایجاد



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

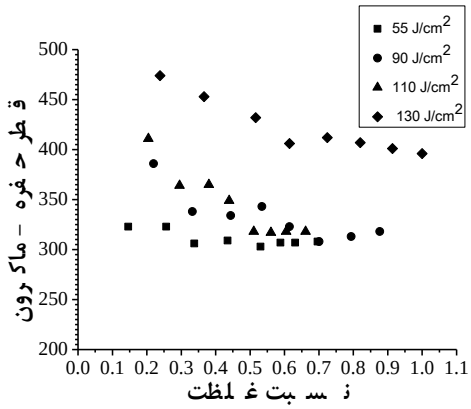
می‌شود.

در بخش دوم، آزمایش برای شار $J/cm^2$ ۵۵ و ارتفاع‌های ۱۰ mm و ۸/۵، ۷/۶، ۶/۷ آب (d در شکل ۱) تکرار شده است. نحوه تابشدهی همانند قسمت اول می‌باشد (۲۰ دقیقه تابشدهی، تعداد کل ۱۲۰۰۰ پالس و جابه‌جایی هدف بعد از هر ۱۵۰۰ پالس).

برای اندازه‌گیری قطر حفره‌های ایجاد شده بر سطح هدف، تصویر حفره‌ها با استفاده از یک میکروسکوپ نوری گرفته شده است. سپس با استفاده از روش پردازش تصویر، قطر حفره‌ها با دقت میکرونی به دست آمده‌اند.

## ۲- نتایج و بحث

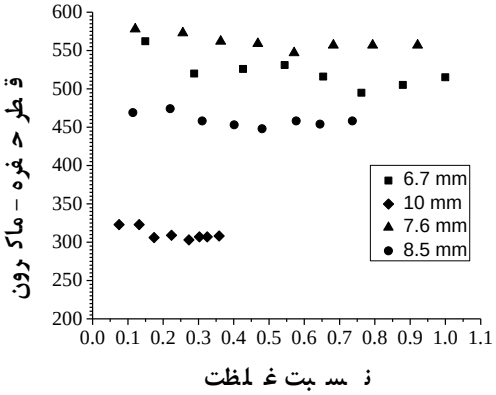
شکل ۲ اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده در سطح هدف در قسمت اول آزمایش را بر حسب نسبت غلظت نانوذرات تولید شده برای شارهای مختلف نشان می‌دهد. قبل از تابشدهی ۱۵۰۰ پالس اول هیچ نانوذره‌ای در محیط برهم‌کنش وجود نداشته است. در پایان تابشدهی اولین ۱۵۰۰ پالس، مقدار نانوذرات تولید شده دارای مقدار معینی است که با نسبت غلظت نانوذرات تولید شده نشان داده شده است. در هر مرحله غلظت نانوذرات تولید شده نسبت به غلظت نهایی نانوذرات تولید شده، با استفاده از هندسه حفره‌ها و محاسبه حجم ماده برداشته شده به دست آمده است. در نتیجه با ادامه تابشدهی تا ۱۲۰۰۰ پالس، نسبت غلظت نانوذرات ایجاد شده در اثر برهم‌کنش لیزر پالسی و هدف افزایش می‌یابد.




شکل ۲. اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده بر سطح هدف تیتانیومی بر حسب نسبت غلظت نانوذرات تولید شده برای شارهای مختلف.

همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، هر چه شار فرودی لیزر افزایش می یابد، قطر حفره‌های ایجاد شده بر سطح هدف نیز بیشتر می‌شود. افزایش قطر اولین حفره با افزایش شار نشان‌دهنده افزایش انرژی رسیده به سطح هدف در شارهای بالاتر می‌باشد. همچنین شکل ۲ نشان می دهد که با افزایش غلظت نانوذرات تولید شده در مایع محیط برهم‌کنش قطر حفره‌ها ابتدا کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. علت کاهش قطر حفره‌ها این است که در حالتی که هیچ نانوذره‌ای در محیط برهم کنش وجود ندارد، پرتو لیزر فرودی فقط توسط محیط مایع جذب می‌شود و باقیمانده آن به سطح هدف می‌رسد. اما با افزایش تولید نانوذرات، پرتو لیزر فرودی علاوه بر جذب توسط مایع، توسط نانوذرات نیز جذب و پراکنده می‌شود. بنابراین با افزایش غلظت نانوذرات، قطر حفره‌ها کاهش می‌یابد.

شکل ۳ نمودار اندازه قطر حفره‌ها بر حسب نسبت غلظت نانوذرات تولید شده را در بخش دوم آزمایش برای ارتفاع‌های مختلف محیط برهم‌کنش نشان می‌دهد.




شکل ۳. اندازه قطر حفره‌های ایجاد شده بر سطح هدف تیتانیومی بر حسب نسبت غلظت نانوذرات تولید شده برای ارتفاع‌های مختلف آب به عنوان محیط برهم‌کنش.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می دهد، در اثر کاهش ارتفاع مایع بالای هدف از ۱۰ mm به ۷/۶ mm قطر حفره‌ها افزایش می‌یابد. افزایش قطر حفره‌ها به علت کاهش لایه جاذب انرژی پرتو لیزر می‌باشد. از آنجا که آب در طول موج استفاده شده در این آزمایش (۱۰۶۴ nm) دارای ضریب جذب بالایی با مقدار $0/5\ cm^{-1}$ می‌باشد، اندازه ارتفاع آب تاثیر قابل توجهی در انرژی رسیده به سطح هدف دارد. یعنی هر چه ارتفاع آب بیشتر باشد، میزان انرژی جذب شده



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

توسط محیط برهم‌کنش افزایش می‌یابد و درنتیجه میزان انرژی رسیده به سطح هدف کاهش می‌یابد. بنابراین قطر حفره‌ها با افزایش ارتفاع آب، کاهش می‌یابد. علت دیگر کاهش قطر حفره‌ها در اثر افزایش ارتفاع آب، می‌تواند افزایش تعداد نانوذراتی است که در مسیر عبور پرتو لیزر قرار می‌گیرند می‌باشد. هر چه ارتفاع آب بیشتر باشد، طول بیشتری از نانوذرات در مسیر پرتو لیزر قرار می‌گیرند. البته همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، غلظت نانوذرات تولید شده در اثر کاهش ارتفاع آب، افزایش یافته است.

نتایج نشان داده شده در شکل ۳ برای ارتفاع آب ۶/۷ mm، کاهش قطر حفره‌ها را نسبت به ارتفاع ۷/۶ mm نشان می‌دهد. همچنین بیشترین غلظت نانوذرات همان‌طور که شکل نشان می‌دهد برای ارتفاع ۶/۷ mm به دست آمده است. همان‌طور که گفته شد، در اثر کاهش ارتفاع آب، جذب پرتو لیزر و طولی از نانوذرات که در مسیر پرتو قرار می‌گیرند کاهش می‌یابد. علاوه بر این دو عامل، در اثر کاهش ارتفاع آب، حجم محیط برهم‌کنش کاهش یافته و در نتیجه غلظت نانوذرات تولید شده در محیط برهم‌کنش بیشتر می‌شود. می‌توان گفت که بین دو عامل اول و عامل سوم رقابتی به ترتیب برای کاهش و افزایش جذب انرژی پرتو لیزر وجود دارد. به نظر می‌رسد در شرایط آزمایش انجام شده ارتفاع بهینه برای به دست آوردن بیشترین قطر، ۷/۶ mm می‌باشد.

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر شار و اندازه ارتفاع مایع محیط برهم‌کنش پرتو لیزر و هدف تیتانیومی بر قطر حفره‌های ایجاد شده در برهم‌کنش بررسی شده اند. نتایج نشان می‌دهند که اندازه قطر حفره‌ها با افزایش شار فرودی لیزر بر سطح هدف افزایش می‌یابد. همچنین در اثر افزایش غلظت نانوذرات تولید شده در هر شار، قطر حفره‌ها کاهش یافته است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که در یک ارتفاع بهینه از آب، بزرگترین قطر حفره را می‌توان داشت.

## سپاسگزاری

از آقای بهزاد فتاحی و آقای اشکان مومنی که در انجام آزمایش ما را یاری رساندند کمال تشکر را داریم.

## مراجع

[1] Chicbkov B.N., Momma C., Nolte S., Alvensleben F. von, Tiinnermann A., *Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Ablation of Solids*, **Appl. Phys. A.** 63 (1996) 109-115.
[2] Stafe M., Vladoiu I., Negutu C., Popescu I. M., *Experimental Investigation of the Nanosecond Laser Ablation Rate of Aluminum*, **Rom. Rep. Phys.** 60 (2008) 789-796.
[3] Vladoiu I., Stafe M., Negutu C., Popescu I. M., *Nanopulsed Ablation Rate of Metals Dependence on the Laser Fluence and Wavelength in Atmospheric Air*, **U.P.B. Sci. Bull. Series A.** 70 (2008) 119-126.
[4] Kruusing A., *Underwater and Water-Assisted Laser Processing: Part 2—Etching, Cutting and Rarely Used Methods*, **Opt. Lasers Eng**. 41 (2004) 329–352.
[5] Kumar B., Thareja R. K., *Synthesis of Nanoparticles in Laser Ablation of Aluminum in Liquid*, **J. Appl. Phys.** 108 (2010) 064906: 1-6.



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]