مطالعه امواج شوک حاصل از فروشکست القایی لیزری با استفاده از روش تصویربرداری سایه‌نگاری

میرمحمدرضا جعفری سیدحقیقی، دکتر سیدحسن توسلی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده – در این مقاله، با استفاده از تکنیک تصویربرداری سایه‌نگاری، موج شوک حاصل از پلاسمای ایجاد شده توسط پالس لیزری که بر سطح یک نمونه آلومینیومی تابیده شده است را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اساس کار سایه‌نگاری به عنوان یک روش موثر و کارامد در ثبت وقایع سریع همچون موج شوک، بر مبنای تغییرات ضریب شکست ناحیه اختلالی می‌باشد. بدین منظور جهت سایه‌نگاری از دو لیزر پالسی _ یکی از آنها جهت کندگی و ایجاد پلاسما در سطح نمونه و دیگری به منظور ساخت سایه موج شوک_ استفاده شده است. ثبت تصاویر مربوط به موج شوک در زمان‌های مختلف و همچنین اندازه‌گیری نتایج تجربی مربوط به پارامترهای مکان و سرعت موج شوک، مورد بحث قرار گرفته است.

کلید واژه- اندازه‌گیری ، پالس لیزر، پلاسما، تصویربرداری، سایه‌نگاری، موج شوک

Study of the shock waves generated by laser induction breakdown by Shadowgraphy imaging technique

MirMohammad Reza Jafari Seyed Haghighi and Seyed Hassan Tavassoli

Tehran, Evin, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- In this article, by shadowgraphical imaging technique, logged shock wave created from the plasma by laser pulse that is on the surface of an Aluminum sample is studied. Shadowgraphy as an effective and efficient method for recoding fast and efficient events like shock wave is based on changes in reflective index of the disordered area. For this purpose, in this article for shadowgraphy, two pulsed lasers are used _ one of them to ablation and creating plasma on the surface of sample and the other to create the shadow of shockwave. Recording the imaging of shock wave at different times and also the measurement of experimental results of the parameters related to position and speed of shock wave is studied.

Keywords: Measurement, Laser pulse, Plasma, Imaging, Shadowgraphy, Shock wave

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

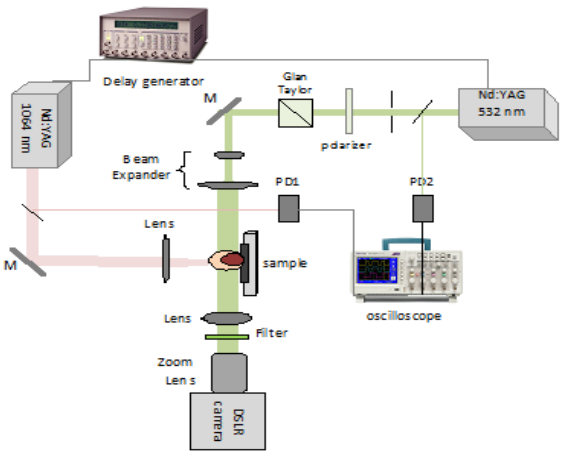
۱- مقدمه

امروزه مطالعات بسیاری بر روی برهمکنش بین نور و ماده انجام می‌شود. یکی از این برهمکنش‌ها، پلاسمای القاییده لیزری می‌باشد که توسط یک لیزر پالسی (با طول پالس نانوثانیه) که دارای انرژی بالایی (حدود ۱۰۰ میلی-ژول بر سانتی‌متر مربع) می‌باشد ایجاد می‌گردد. با انبساط و گسترش ذرات کنده شده و پلاسمای حاصل از این فرایند، یک موج شوک (shockwave) به خاطر تغییرات سریع فشار و چگالی در جلوی پلاسما انتشار می‌یابد. شناخت این فرایند و بررسی پارامترهای مربوط به آن، از اهمیت بسزایی برخوردار است. پارامترهایی مانند سرعت ذرات کنده شده و توزیع آنها درون پلاسما، وابستگی مکان و زمان موج شوک ایجاد شده و غیره، اطلاعاتی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که به شناخت بیشتر فرایند کندگی لیزری و پلاسمای حاصل منجر می‌شود. از طرفی دیگر با توجه به کاربردهای مختلفی که پلاسمای القاییده لیزری پیدا کرده است شناخت هر چه بیشتر پارامترهای مذکور می‌تواند باعث گسترش کاربردهای آن گردد. طیف سنجی فروشکست القایی لیزری (LIBS)، (LA-ICP-MS)، سنسورها، ریزماشین‌سازی، تولید نانو مواد، رسوبسازی توسط لیزر پالسی و منبع نوری برای لیتوگرافی از جمله کاربردهایی است که می‌توان به آنها اشاره کرد[۱و۸]. از دیگر کاربردهای مطالعه موج شوک و بررسی پارامترهای نام‌برده، در صنعت و علوم فضایی است؛ مانند پیشرانه‌های لیزری و چکش‌کاری لیزری[۶و۷].

محدودیتی که در تصویربرداری از موج شوک وجود دارد این است که چنین فرایندی، بسیار سریع می‌باشد (نانوثانیه). برای رفع این مشکل روش‌های تصویربرداری متعددی وجود دارد از جمله "تداخل‌سنجی"، "شلیرن" و "سایه‌نگاری" که اساس کار همه آنها تغییرات ضریب شکست می‌باشد. این سه روش به منزله ابزارهایی ساده و قوی جهت آنالیز پلاسمای القاییده لیزری محسوب می‌گردند. گرادیان‌های دمایی، امواج شوک، پرتاب ذرات و جریان‌های گرمایی توسط این تکنیک‌ها تصویربرداری می‌شوند. سایه‌نگاری، به عنوان یکی از موثرترین روش‌های اپتیکی در تصویربرداری و همچنین مطالعه‌ی تغییرات ثبت شده در تصاویر به حساب می‌آید. در این روش نور از ماده‌ی شفاف مورد مطالعه، همچون پلاسما، هوا، آب و غیره عبور کرده و تغییراتِ به وجود آمده در آنها به صورت سایه در دوربین ثبت می‌گردد[۱]. اساس این روش تغییرات ضریب شکست ناحیه مورد مطالعه و همچنین وجود موانع در برابر آشکارساز می باشد. بطوری که اگر اختلال مزبور، دارای ضریب شکست متغیری باشد، اشعه های نور عبوری از این ناحیه اختلالی بطور مجزایی شکست می یابند و از مسیر اصلی شان منحرف می شوند و یا جلوی آن توسط ذرات منسجم مسدود می‌شود. این تکنیک به طور گسترده‌ای در مکانیک سیالات و انتقال گرما به عنوان ابزاری جهت تصویر برداری شار جریان مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی تصاویر ثبت شده توسط تکنیک سایه نگاری، به مشتق فضایی مرتبه دوم ضریب شکست ناحیه اختلالی وابسته می‌باشد[۳].

موج شوک یا موج ضربه، در مکانیک سیالات به عنوان یک اختلال در حال گسترش شناخته میشود. هنگامی که یک موج مکانیکی در یک سیال، سریع‌تر از سرعت موضعی صوت در آن محیط حرکت کند، موج شوک پدید می‌آید. همانند دیگر امواج، موج شوک با خود، انرژی را منتقل می‌کند و می‌تواند در یک محیط مادی گسترش یابد و فشار و چگالی و دمای محیط را به‌صورت موضعی تغییر دهد. می‌توان از چنین انفجارهایی در اخترفیزیک در قالب **انفجار ابراخترنو** یاد کرد.

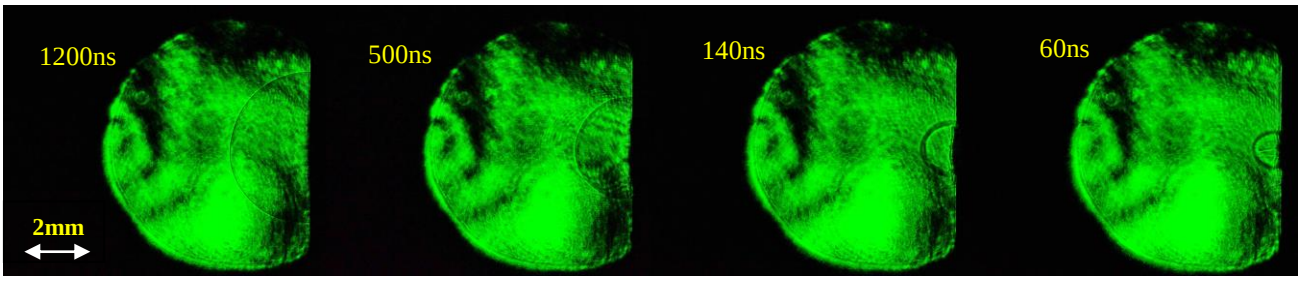
در این مقاله با استفاده از روش سایه‌نگاری، از موج شوک در زمان‌های مختلف، تصویربرداری شده است به طوری که مکان و سرعت موج شوک بر حسب زمان به صورت تجربی بدست آمده است و مقایسه‌ای با نتایج حل عددی و تحلیلی این پدیده انجام شده است. بدین منظور، پارامترهایی که در حل تحلیلی و عددی حرکت موج



شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی کندگی لیزری و سایه نگاری. نور قرمز به‌منظور کندگی و نور سبز نیز به‌منظور ایجاد سایه.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]



شکل ۲: سایه نگاری موج شوک پیشرونده، در تأخیرهای زمانی متفاوت، بین دو پالس لیزری ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر. شاخص اندازه‌گیری در شکل نشان داده شده است.

شوک در فضا مورد نیاز است را در اختیار قرار دهد.

۲- چیدمان تجربی

شکل (۱) چیدمان مربوط به آزمایش را نشان می‌دهد که در آن از دو لیزر پالسی (Q-switch) استفاده شده است. لیزر اول که برای کندگی و ایجاد پلاسما به کار برده می‌شود، یک لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm، پهنای پالس ۱۰ ns و نرخ تکرار ۱ Hz می‌باشد. باریکه این لیزر توسط یک عدسی با فاصله کانونی ۱۰ cm بر روی یک نمونه استاندارد آلومینیوم، متمرکز شده و پلاسما را ایجاد می‌کند. در طرف دیگر چیدمان آزمایش، برای سایه‌نگاری و ثبت تصاویر مربوط به موج شوک حاصل از پلاسمای القاییده لیزری، از یک لیزر Nd:YAG هارمونیک دوم، طول موج ۵۳۲nm و پهنای پالس ۱۰ ns، استفاده می‌شود. همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود تاخیرهای زمانی لازم بین این دو لیزر برای ثبت سایه‌نگاری در زمانهای مختلف توسط یک منبع ایجاد کننده تاخیر (delay generator) اعمال می‌گردد. برای کنترل بسیار دقیق انرژی لیزر سبز از یک تاخیر انداز قطبش قابل تنظیم و یک منشور گلن تیلور استفاده شده است. برای آنکه نور سبز تمام پلاسمای تشکیل شده را بپوشاند از یک پهن کننده باریکه در مسیر لیزر سبز، که متشکل از دو عدسی همگرا می‌باشد استفاده شده است. همچنین برای ثبت فاصله زمانی این دو پالس، از فوتودیودهای PD1 و PD2 و اوسیلوسکوپ استفاده کرده‌ایم. در نهایت نور سبز با عبور از پلاسمای ایجاد شده و گذر از چندین فیلتر مناسب به دوربین دیجیتال رسیده و ثبت می‌شود.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲، تصاویر ثبت شده از سایه‌نگاری مربوط به پلاسمای القاییده لیزری می‌باشد که توسط دوربین عکاسی ثبت شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، سایه موج شوک، توسط لیزر سبز در زمان‌های تاخیری ۶۰ns، ۱۴۰ns، ۵۰۰ns و ۱۲۰۰ns بعد از برخورد لیزر با طول موج ۱۰۶۴nm و با انرژی ۱۰۰mJ بر سطح نمونه، تصویربرداری شده است. موج شوک به صورت یک نیم دایره باز شونده از سطح آلومینیوم به وضوح دیده می‌شود. همانطور که در شکل نیز می‌توان به طور شهودی دید سرعت انتشار موج شوک در لحظات اولیه گسترش، به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سرعت آن در زمان‌های بعدی است. با در نظر گرفتن اندازه لکه سبز به عنوان شاخص اندازه‌گیری و همچنین فاصله موج شوک از سطح نمونه در زمان‌های مختلف، رابطه مکان و سرعت موج شوک را با زمان بدست خواهیم آورد.

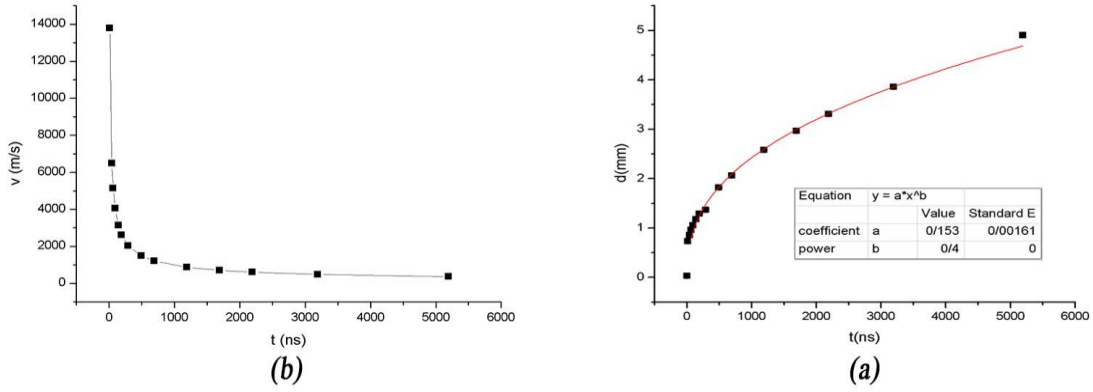
طبق تصاویر ثبت شده از موج شوک در زمان‌های مختلف تاخیری در شکل (۲) و ثبت فاصله موج شوک از سطح نمونه، به نمودار تجربی شکل (۳-a) _نقطه‌های مربعی شکل_ می‌رسیم. در این نمودار، محورهای عمودی و افقی به ترتیب نمایشگر مکان یا فاصله از سطح نمونه (mm) و زمان تاخیری بین دو لیزر (ns) می‌باشد. طبق انتظار رفتار گسترش موج شوک در فضا بسیار شبیه به نمودار مکان-زمان گسترش پلاسما می‌باشد. با توجه به رفتار گسترش پلاسما در فضا که به صورت ($d \propto t^{2/5}$) تغییر می‌کند[۴]، نمودار برازش شده این اطلاعات، به شکل ۳(a) _خط ممتد قرمز_ می‌شود و معادله منحنی نمودار برازش شده نیز، به صورت زیر خواهد بود:

$$d = 0.153 \times (t^{2/5}) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) d به معنای فاصله موج شوک از سطح نمونه و t بیان‌گر زمان می‌باشد. خطای محاسبه شده در این آزمایش ۲۴,۴µm می‌باشد. با درنظر گرفتن رابطه بالا

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]



شکل ۳: (a) ثبت مکان موج شوک در زمان (نقاط مربعی) و برازش کردن نمودار بر روی آن (خط قرمز) (b) نمودار سرعت موج شوک بر حسب زمان

و مشتق گرفتن از آن، عبارت بین سرعت موج شوک در هر لحظه برآورد می‌گردد و این تغییرات مطابق رابطه (۲) بدست می‌آید (شکل ۳(b)):

$$v = 0.0612 \times (t^{-3/5}) \qquad (۲)$$

طبق این رابطه سرعت موج شوک در زمان‌های اولیه بسیار زیاد می‌باشد و با گذشت زمان از آن کاسته می‌شود. همانطور که اشاره شد، این تصاویر از سطح یک صفحه آلومینیومی، در فشار و دمای جو زمین عکسبرداری شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از یکی از کارامدترین روش-های تصویربرداری به ثبت یک اختلال بسیار سریع به نام موج شوک پرداخته شده بود. درواقع با ثبت دقیق مکان این موج شوکِ حاصل از فرایند فروشکست القایی لیزری، از لحظه شروع و در زمان‌های بسیار کم و مورد نیاز (مرتبه نانوثانیه)، توانستیم که معادله مکان و به دنبال آن معادله سرعت موج شوک را برحسب زمان رسم و محاسبه کنیم. همچنین با به‌دست آوردن معادله مکان موج شوک با استفاده از روش تجربی تصویربرداری، و مقایسه آن با معادلات محاسبه شده از طریق حل تحلیلی و عددی که معروف به معادله **سِدُو-تیلور** است، پی به دقت این اندازه‌گیری می‌بریم. معادله مکان موج شوک حاصل از انفجار سِدُو-تیلور که از حل معادلات پایه‌ای **رنکین-هوگونیوت** نتیجه‌گیری شده است[۸]، عبارتنداز:

$$d = \varepsilon \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{n+2}} \times (t)^{\frac{2}{n+2}} \qquad (۳)$$

که در آن ε، E و ρ به‌ترتیب ضریب ثابت وابسته به ظرفیت گرمایی ویژه، انرژی کل انفجار و چگالی گاز زمینه می‌باشد. چون این معادله از طریق روابط تئوری به اثبات رسیده است، در آن به انواع انتشار موج شوک پرداخته است. یعنی ضریب n در رابطه (۳) برای امواج شوکی که به صورت صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی درحال انتشار هستند، به‌ترتیب برابر است با ۱، ۲ و ۳. یعنی برای امواج شوک موجود در این تحقیق که به صورت کروی درحال انتشار هستند، $n=$ ۳ می‌باشد. یعنی در معادله ۳، مکان موج شوک متانسب خواهد بود با ($d \propto t^{2/5}$).

این روابط به خوبی نشان می‌دهند که روابط بدست آمده از داده‌های تجربی، با معادلات تئوری مطابقت دارد و همچنین از طرفی با استفاده از روابط ۱ و ۳ می‌شود ضرایب موجود در رابطه ۳ را بدست آورد. با تعیین شدن ضرایب بالا و مشخص بودن سرعت که از رابطه ۲ بدست آمده است، به پارامترهای موجود در این فرایند مانند: انرژی، چگالی پشت جبهه موج شوک و فشار، پی برد.

مراجع

[1] A. E. Hussein, P. K. Diwakar, S. S. Harilal, and A. HassaneinJ. Appl. Phys. 113, 143305 (2013)

[2] Fatemeh Rezaei and Seyed Hassan Tavassoli. J. Ana l . A t. Spectrom .,2014,

[3] Seyed Hassan Tavassoli, Igor V. Cravetchi, and Robert Fedosejevs". Spatial and Temporal Evolution of Laser-Generated Microplasmas . IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 34, NO. 6, DECEMBER 2006

[4] Qiaofeng Lu, Qing Su, Fei Wang, Chenfei Zhang, Yongfeng Lu, Michael Nastasi, Bai Cui, Influence of laser shock peening on irradiation defects in austenitic stainless steels, Journal of Nuclear Materials 4 89 (2017).

[5] Claude Phipps, Willy Bohn, Thomas Lippert, Akihiro Sasoh, Wolfgang Schall and John Sinko, A Review of Laser Ablation Propulsion, (2010)

[6] Y. B. Zel'dovich and Y. P. Razier, Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena (Dover Publications, Inc.,Mineola, New York, 2002).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-12]