



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



## تأثیر چگالی توان و انرژی تپ لیزری بر امواج فراصوتی تولید شده در دو رژیم فرسایشی و ترموالاستیک

صدیقه ملک‌محمدی<sup>۱</sup>، وحید حقیقی<sup>۱</sup> و محمود سلطان‌الکتابی<sup>۱،۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

<sup>۲</sup> گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی، دانشگاه اصفهان

چکیده - توسط تابش تپ لیزری کوتاه بر سطح ماده، می‌توان امواج فراصوتی را در دو رژیم ترموالاستیک و فرسایشی تولید کرد. در این مقاله ابتدا شکل موج فراصوتی را شبیه‌سازی کرده، سپس شکل امواج تولید شده به روش تجربی را با نتایج شبیه‌سازی مقایسه کردیم. در این پژوهش، اثر دو پارامتر چگالی توان و انرژی تپ لیزری بر شکل موج فراصوتی مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی این نتیجه بدست آمد که عامل موثر گذار از رژیم ترموالاستیک به فرسایشی، چگالی توان لیزر است. افزایش انرژی تپ لیزری باعث افزایش دامنه موج فراصوتی بدون تغییر رژیم آن می‌شود.

کلید واژه- فراصوت لیزری، رژیم فرسایشی، رژیم ترموالاستیک

## The Effect of Laser Power Density and Pulse Energy on Ultrasonic Wave Forms in Ablation and Thermoelastic Regimes

Sedighe Malekmohamadi 1, Vahid Haghighi 1 and Mahmood Soltanolkotabi 1,2

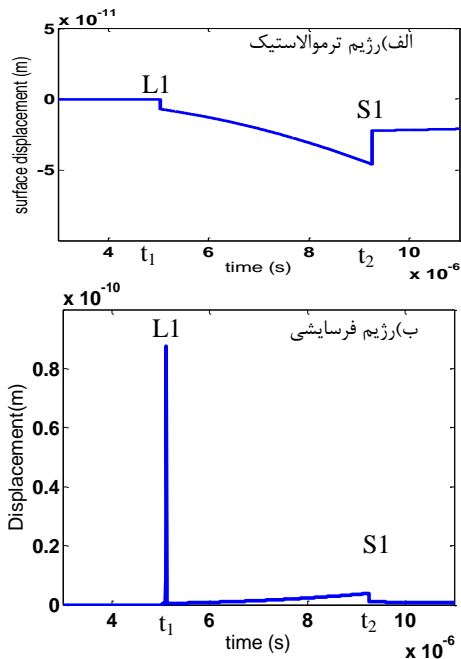
1 Dept of Physics, University of Isfahan

2 Quantum Optics Research Group, University of Isfahan, Isfahan

Abstract- The ultrasound waves can be generated by incidence of a short laser pulse on the specimen surface in thermoelastic and ablation regimes. In this paper, we have simulated ultrasonic wave forms in these regimes. Then we have generated these waves experimentally and we have compared these results with these simulations. The effect of two parameters, laser power density and pulse energy, on ultrasonic waveforms was analyzed. Comparing the experimental and simulated results indicates that the power density could change the ultrasonic wave generation regime. On the other hand, the laser pulse energy could increase the ultrasound wave amplitude regardless of its regime.

Keywords: Laser Ultrasonic, Ablation Regime, Thermoelastic Regime

## ۱- مقدمه



شکل ۱. شکل موج فراصوتی در دو رژیم گوناگون برای نمونه استیل به ضخامت ۳cm و پهنای تپ لیزر ۱۰ns

کامل شرح دادیم و در اینجا تنها نمودار شکل موج فراصوتی در این رژیم را نمایش می‌دهیم (شکل (ب) [۳]). در این مقاله شبیه‌سازی شکل موج فراصوتی را در رژیم ترموالاستیک بیان می‌کنیم. ثابت‌های گرمایی و کشسانی ماده را به صورت:  $\lambda, \mu$ : ضرایب لامه،  $\rho$ : چگالی ماده،  $C$ : ظرفیت گرمایی ویژه و  $\alpha$ : ضریب انبساط گرمایی نام‌گذاری شده‌ایم. اگر انرژی  $\delta E$  از یک تپ لیزری در سطح نمونه جذب شود، قسمت بسیار کوچکی از سطح نمونه به حجم گسترش گرمایی شده و بعنوان یک چشمه تولید موج فراصوتی عمل می‌کند. جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از انتشار موج فراصوتی در سمت دیگر نمونه (به ضخامت  $h$ ) و در امتداد نقطه فرود پرتو لیزر از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

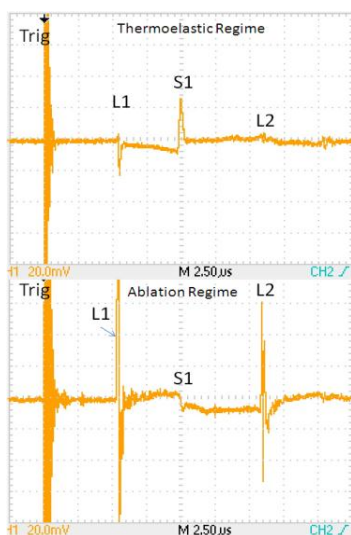
$$u_3(t) = \left\{ \frac{[X_1 + Y_1 t(t^2 - t_1^2 + t_2^2)]^{1/2} / 6\pi\mu h^2 (t^2 - t_1^2 + t_2^2)}{(3\lambda + 2\mu)\delta VH(t - t_1)} \right\} \times \frac{1}{[(t^2 - t_1^2 + \frac{1}{2}t_2^2)^2 - t(t^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2}(t^2 - t_1^2)]^3} + \left\{ \frac{[X_2 + Y_2 t(t^2 - t_2^2 + t_1^2)]^{1/2} / 6\pi\mu h^2 (t^2 - t_2^2 + t_1^2)}{(3\lambda + 2\mu)\delta VH(t - t_2)} \right\} \times \frac{1}{[(t^2 - \frac{1}{2}t_2^2)^2 - t(t^2 - t_2^2 + t_1^2)^{1/2}(t^2 - t_2^2)]^3} \quad (1)$$

آزمون‌های غیرمخرب فراصوتی، یکی از شیوه‌های مهم بررسی و کیفیت‌سنجی قطعات صنعتی بشمار می‌رود و تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای برای توسعه‌ی این‌گونه آزمون‌ها انجام شده است [۲۱]. تولید امواج فراصوتی توسط لیزر در مواد جامد برای اولین بار توسط وایت در سال ۱۹۶۳ مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن سامانه بررسی‌های غیر مخرب و کنترل از راه دور توسط لیزر به منظور کاربردهای گوناگون پیشنهاد شد [۲۱]. آزمون فراصوت-لیزری دارای برتری‌های زیادی همچون غیرتماسی بودن، باند بسامدی گسترده و توانایی تست نمونه‌های بسیار نازک، آزمون نمونه‌های با دمای بالا و همچنین نمونه‌های در حال حرکت با سرعت بالا است [۲]. در این مقاله ابتدا شکل موج فراصوتی تولید شده توسط یک چشمه لیزری را در دو رژیم ترموالاستیک و فرسایشی شبیه‌سازی کردیم. سپس با طراحی و برپایی چیدمان آزمایشگاهی مناسب، شکل امواج فراصوتی دریافت شده را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه کردیم. گستره بسامدی امواج فراصوتی تولید شده در فضای بسامد مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین اثر تغییر چگالی توان لیزر بر شکل موج فراصوتی در انرژی یکسان و اثر تغییر انرژی در چگالی توان یکسان را بطور جداگانه مورد آزمایش قرار دادیم و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردیم.

## ۲- بررسی نظری و نتایج شبیه‌سازی

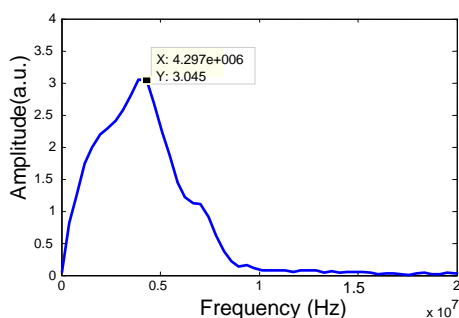
در نتیجه‌ی فرود تپ لیزری کوتاه بر سطح ماده، موج فراصوتی در اثر دو پدیده‌ی فرسایش و گسترش گرمایی پدید می‌آید. در رژیم فرسایش، چگالی توان هر تپ لیزری در حدی است که جذب آن موجب تبخیر بخش بسیار کوچکی از سطح شده و نیروی بازخور این پدیده درون ماده بصورت یک موج فراصوتی انتشار می‌یابد. در رژیم ترموالاستیک، چگالی توان لیزری کمتر از آن است که باعث تبخیر سطح نمونه شود. در این رژیم موج فراصوتی در اثر افزایش دما و گسترش گرمایی ناگهانی قسمت بسیار کوچکی از سطح نمونه که تحت تابش لیزر قرار دارد تولید می‌شود. شکل موج فراصوتی را می‌توان با حل معادلات انتشار موج بدست آورد. در مقاله‌ی پیشین خود شبیه‌سازی شکل موج فراصوتی در رژیم فرسایشی را بطور

صورتی که در رژیم فرسایشی به سمت بیرون جابه‌جا می‌شود [۳ و ۵]. رفتار امواج فراصوتی عرضی در هردو رژیم، وارون رفتار امواج طولی است. سیگنال L2 اولین "پژواک" یا همان موج فراصوتی طولی است که پس از یک بار بازتاب از سطح دیگر نمونه به تراگذار می‌رسد. باید به این نکته اشاره کرد که تفاوت در شکل کلی نتایج آزمایشگاهی و شکل موج نظری به این دلیل است که دریافت موج فراصوتی توسط تراگذار پیزوالکتریک صورت گرفته است. بنابراین شکل موج فراصوتی، حاصل درهم‌پیچش شکل موج نظری و پاسخ نوسانی تراگذار که تقریباً به شکل سینوسی با فروافت نمایی است خواهد بود [۴]. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج آزمایشگاهی سازگاری خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد.



شکل ۳. نتایج تجربی شکل موج فراصوتی

با گرفتن تبدیل فوریه، سیگنال فراصوتی دریافتی را در فضای بسامد مورد مطالعه قرار دادیم (شکل ۴). امواج فراصوتی با بسامد نزدیک ۴.۳MHz دارای بیشترین دامنه هستند و گستره بسامدی امواج دریافت شده توسط این تراگذار تقریباً برابر ۸MHz است.

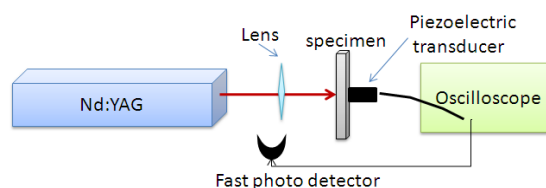


شکل ۴. گستره بسامدی امواج فراصوتی

که تابع Heaviside با گام واحد و  $t_1 = h/c_1$  و  $t_2 = h/c_2$  بترتیب زمان رسیدن امواج طولی و عرضی به سمت دیگر نمونه است که  $c_2 < c_1$  به ترتیب سرعت‌های امواج فراصوتی طولی و عرضی است.  $X_1$  و  $X_2$ ،  $Y_1$  و  $Y_2$  از روابط (۱۱۰-۵) مرجع [۴] بدست می‌آیند که بدلیل طولانی بودن روابط از ذکر آنها در اینجا خودداری نمودیم. شکل امواج طولی (L1) و عرضی (S1) فراصوتی شبیه‌سازی شده در هر دو رژیم در شکل ۱ نشان داده شده است. در بخش بعد به بررسی نمودارها خواهیم پرداخت.

### ۳- برپایی چیدمان آزمایشگاهی

با طراحی و برپایی لیزر مناسب، چیدمان آزمایشگاهی تولید امواج فراصوتی توسط لیزر در نمونه استیل به ضخامت ۳cm را طبق الگوی شکل ۲ برپا کردیم. لیزر تولید کننده، یک لیزر Nd:YAG سوئیچ شده-Q با پهنای تپ ۱۰ns و انرژی ۴۷mJ است.



شکل ۲. الگویی از چیدمان آزمایشگاهی

چگالی توان آستانه فرسایش سطح استیل،  $MW/cm^2$  ۲۹.۵ محاسبه شد [۳]. شکل موج فراصوتی دریافت شده توسط تراگذار پیزوالکتریک ۴MHz در سمت دیگر نقطه فرود در هردو رژیم در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که از نمودارهای هر دو بخش شبیه‌سازی و تجربی دیده می‌شود در رژیم ترموالاستیک امواج طولی (L1) دارای دامنه کوچکتری نسبت به امواج عرضی (S1) هستند. در حالیکه در رژیم فرسایش امواج طولی بسیار قویتر از امواج عرضی هستند. همچنین جابجایی سطحی اولیه ناشی از رسیدن امواج طولی به سمت دیگر نمونه در رژیم ترموالاستیک، بصورت جابه‌جایی‌های منفی است در حالیکه در رژیم فرسایش، بصورت جابه‌جایی‌های مثبت است. این بدان معنی است که در رژیم ترموالاستیک نقطه‌ای از سطح نمونه که دقیقاً در امتداد پرتو لیزر در سمت دیگر نقطه فرود قرار دارد، در لحظه رسیدن موج طولی به درون نمونه کشیده می‌شود در

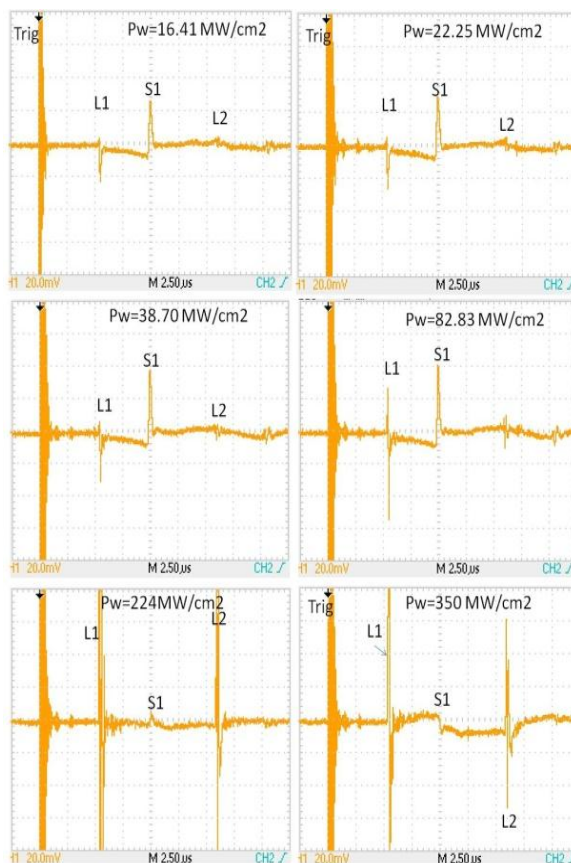
در گام بعدی اثر تغییر چگالی توان و انرژی لیزر را بر شکل موج فراصوتی بطور جداگانه مورد بررسی قرار دادیم. بدین منظور ابتدا انرژی لیزر (۴۷mJ) را ثابت نگاه داشتیم و با تغییر قطر لکه لیزری چگالی توان لیزر را افزایش دادیم (شکل ۵). با افزایش چگالی توان لیزر شکل موج فراصوتی از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایشی تغییر می‌یابد. اما وقتی چگالی توان را ثابت (در این آزمایش آنرا برابر  $36 \text{ MW/cm}^2$  قرار دادیم) و انرژی لیزر را افزایش دهیم شکل موج فراصوتی و در نتیجه رژیم تولید موج فراصوتی تغییر نکرده و تنها دامنه سیگنال افزایش می‌یابد (شکل ۶). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل گذار از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایشی تغییر "چگالی توان لیزر" است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

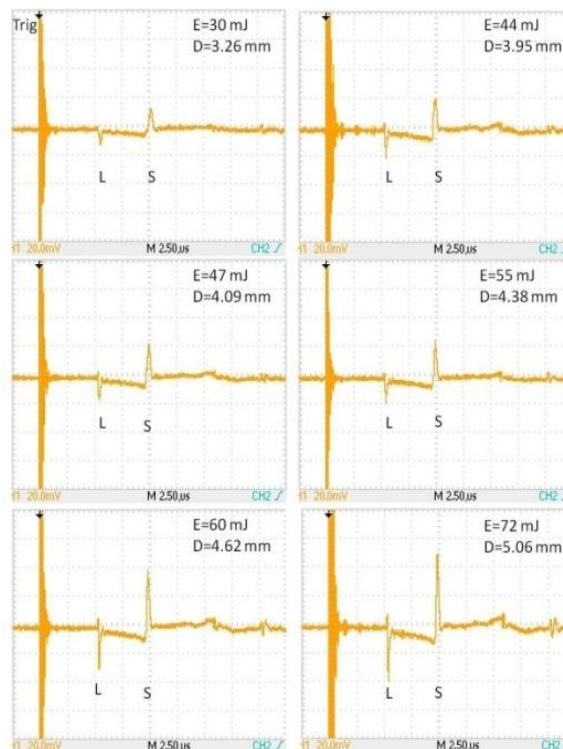
شکل موج فراصوتی تولید شده توسط لیزر در رژیم ترموالاستیک کاملاً متفاوت از رژیم فرسایشی است. امواج طولی در رژیم ترموالاستیک دارای دامنه کمتری نسبت به امواج عرضی هستند در صورتی که در رژیم فرسایش امواج طولی قویتر از امواج عرضی هستند. تغییر شکل موج فراصوتی از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایشی توسط تغییر چگالی توان لیزر صورت می‌گیرد درحالی‌که افزایش انرژی لیزر با ثابت بودن چگالی توان، شکل موج را تغییر نمی‌دهد بلکه تنها دامنه موج را افزایش می‌دهد.

#### مراجع

- [1] Brain Culshaw, *Laser Ultrasound for the Noncontact Characterization of the Mechanical Properties of Materials*, International Symposium on Laser Ultrasonics, 2008.
- [2] Y. An, B. Park and H. Sohn, *Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate*, Smart Materials and Structures, 2013.
- [3] ص. ملک محمدی، و. حقیقی، م. سلطان‌الکتابی، "تولید و انتشار امواج فراصوتی توسط لیزر در رژیم فرسایشی: شبیه‌سازی" نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، زاهدان، ۱۳۹۱.
- [4] C. B. Scruby, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications* (New York, 1990).
- [5] J. D. Aussel, *Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source*, Ultrasonics 26, 1988.



شکل ۵. اثر تغییر چگالی توان لیزر بر شکل موج فراصوتی در انرژی ثابت (۴۷mJ)



شکل ۶. اثر تغییر انرژی لیزر بر شکل موج فراصوتی در چگالی توان ثابت ( $36 \text{ MW/cm}^2$ )