

ارزیابی سیگنال‌های امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر در دو رژیم ترموالاستیک و فرسایش

سید مهدی موسوی
دانشجوی دکتری فیزیک
گروه فیزیک، دانشگاه شیراز
optics_m@yahoo.com

صدیقه ملک‌محمدی
کارشناس ارشد فیزیک
گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان
sm_64629@yahoo.com

وحید حقیقی*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان
vahidreal@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷

چکیده

از جمله روش‌های تولید امواج فراصوتی جهت کاربرد در آزمون‌های فراصوتی، فرود یک تپ لیزری^۱ کوتاه بر سطح نمونه است. در این میان، شناسایی و ارزیابی سیگنال‌های امواج تولیدشده، یکی از دغدغه‌های موجود در این زمینه است. در اثر این فرایند موج فراصوتی در دو رژیم گوناگون ترموالاستیک^۲ (گسترش گرمایی) و فرسایش^۳ تولید می‌شود. در این مقاله، نخست سیگنال‌های موج فراصوتی در هر دو رژیم شبیه‌سازی و در ادامه سیگنال‌های تولیدشده در آزمون‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. با بررسی گستره بسامدی امواج فراصوتی دریافتی، درک بهتری از سیگنال‌های به‌دست آمده حاصل می‌شود. با تغییر چگالی توان لیزر از گستره ترموالاستیک به گستره فرسایش، شکل سیگنال امواج فراصوتی طولی و عرضی تغییر می‌کند. در پایان، با بررسی طیف بسامد و توان سیگنال‌ها تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی و تجربی روی سیگنال‌های منتج‌شده از دو رژیم ترموالاستیک و فرسایشی مشاهده می‌شود.

واژگان کلیدی: فراصوت - لیزری^۴، رژیم ترموالاستیک، رژیم فرسایش

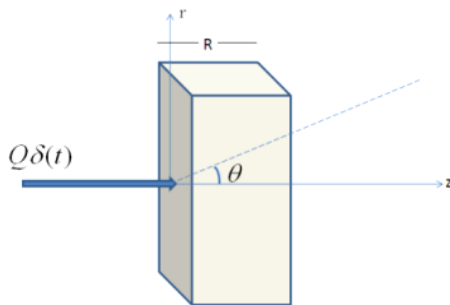
۱. مقدمه

لیزرها بود؛ هرچند آشکارسازی این امواج در کاربردهای صنعتی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هاست [۱]. در سال ۱۹۶۳ م، وایت برای نخستین‌بار تولید موج فراصوتی توسط لیزر را در مواد حالت جامد بررسی کرد. سپس سامانه بررسی غیرمخرب کنترل از راه دور توسط لیزر به‌منظور کاربردهای گوناگون پیشنهاد شد [۲-۳]. در این مقاله، تولید امواج

کاربرد گسترده بررسی‌های غیرمخرب فراصوتی در صنعت و پزشکی سبب شده است که این تکنیک مورد توجه خاص پژوهشگران قرار بگیرد. از جمله روش‌های تولید امواج فراصوتی، استفاده از تپ‌های کوتاه لیزری است. بررسی نظری فراصوت - لیزری از زمان اختراع و توسعه لیزرها آغاز شد. تولید امواج فراصوتی از جمله کاربردهای اولیه

فراصوتی توسط لیزر در دو رژیم ترموالاستیک و فرسایش بررسی و شبیه‌سازی شده است. در این میان سعی شده است تا شکل و ویژگی سیگنال‌های شبیه‌سازی شده مربوط به امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر با نمونه‌های واقعی تشابه داشته باشد. سپس با طراحی و برپایی چیدمان آزمایشگاهی لیزر مناسب جهت تولید امواج فراصوتی، این امواج به صورت عملی تولید شده، پس از دریافت امواج توسط مبدل پیزوالکتریک^۵، شکل موج تولیدشده در هر دو رژیم گرمایی و فرسایشی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌شود. پس از محاسبه چگالی توان آستانه تبخیر و فرسایش سطح نمونه، چگالی توان لیزر را با تغییر قطر لکه لیزری از گستره ترموالاستیک به گستره فرسایش تغییر داده و شکل سیگنال امواج فراصوتی در هر آزمایش ثبت می‌شود. در پایان نیز چگونگی تغییرات شکل موج فراصوتی از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایش به طور کامل تحلیل و بررسی شده است.

مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله ثابت‌های گرمایی و کشسانی ماده به صورت μ, λ ضرایب لامه^۶، ρ چگالی ماده، k ضریب پخش گرمایی، K رسانندگی گرمایی، C_v ظرفیت گرمایی ویژه و α ضریب انبساط گرمایی نامگذاری شده است. مطابق شکل ۱، پرتوی لیزری روی سطح نمونه تابانده می‌شود. همچنین فرض می‌شود تب لیزری تابیده شده در $z=0$ دارای انرژی Q باشد که با تابع دلتای دیراک^۷ $\delta(t)$ نسبت به زمان تغییر می‌کند.



شکل ۱. تصویری از هندسه مسئله

پرتوی لیزری دارای انرژی Q و وابستگی زمانی $\delta(t)$ است

۲. مدل‌های فیزیکی و ریاضی؛ مشخصات کلی مسئله

در نتیجه فرود تب لیزری کوتاه بر سطح ماده، موج فراصوتی در اثر دو پدیده گسترش گرمایی و فرسایشی پدید می‌آید. در رژیم گسترش گرمایی، انرژی لیزر در حدی است که جذب آن در سطح سبب ایجاد تغییرات دمایی ناگهانی در بخش بسیار کوچکی از سطح می‌شود. این تغییرات دمایی به تغییرات موضعی فشار و ایجاد موج فراصوتی می‌انجامد. در رژیم فرسایش اما، چگالی توان هر تب لیزری در حدی است که جذب آن سبب تبخیر بخش بسیار کوچکی از سطح شده، نیروی بازخور این پدیده درون ماده به صورت یک موج فراصوتی انتشار می‌یابد.

ردی^۸ آثار جذب تابش لیزری که دارای چگالی توان $WH(t)$ باشد را مورد بررسی قرار داد که $H(t)$ تابع هویساید^۹ با گام واحد است. ماده به ازای چگالی توانی که از رابطه^۱ به دست می‌آید در زمان τ_0 (ماندگاری تب لیزر) شروع به تبخیر می‌کند [۴-۵]:

$$AW \geq \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{K \rho C_v (T_v - T_i)^2}{\tau_0}} \quad (1)$$

در چگالی توان کم لیزری دمایی ماده در انتهای هر تب لیزر به سرعت به زیر دمایی تبخیر افت می‌کند، لذا تغییرات زمانی فشار ناشی از این تبخیر نیز شبیه تب لیزری خواهد بود. در صورتی که در چگالی‌های توان بالاتر لیزر، پلاسماهای داغ در بالای نقطه تابش ایجاد می‌شود و وجود این پلاسماهای داغ در بالای سطح باعث می‌شود که آهنگ خنک شدن سطح کاهش یابد. در این حالت تغییرات زمانی فشار ناشی از تبخیر به صورت یک تابع هویساید با گام واحد خواهد بود [۴-۵]. بنابراین فرض می‌شود نیروی معادل با

۲-۱. امواج فراصوتی در رژیم فرسایشی

شکل موج فراصوتی را می‌توان با حل معادلات انتشار موج به دست آورد. ابتدا شکل موج فراصوتی در رژیم فرسایشی

دارد، می‌رسد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وابستگی زمانی این امواج شبیه وابستگی زمانی تپ لیزری است که به صورت گاووسی فرض شده است. اما امواج عرضی در زمان $t_s = R/C_s$ به آشکارساز می‌رسند و همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دامنه این امواج نسبت به دامنه امواج طولی بسیار کوچکتر است.

جابه‌جایی‌های سطحی، که در اثر رسیدن امواج فراصوتی طولی در سمت دیگر نمونه اندازه‌گیری می‌شود، دارای دامنه مثبت است. این بدان معناست که در رژیم فرسایشی، در لحظه رسیدن موج فراصوتی طولی، سطح به بیرون نمونه جابه‌جا می‌شود. در حالی که امواج عرضی رفتار وارون نشان می‌دهند.

۲-۲. امواج فراصوتی در رژیم ترموالاستیک

اگر فرض شود انرژی δE از یک تپ لیزری در سطح نمونه جذب می‌شود، قسمت بسیار کوچکی از سطح نمونه به حجم $\delta V = (3\alpha/\rho C)\delta E$ دچار افزایش دمایی ناگهانی و گسترش گرمایی شده و به‌عنوان 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 ۶ محاسبه می‌شود [۶]. به طوری که H تابع هویساید با گام واحد و $t_1 = h/c_1$ و $t_2 = h/c_2$ است که در آن c_1 و c_2 به ترتیب سرعت‌های امواج فراصوتی طولی و عرضی است. مقادیر X_1 و X_2 و Y_1 و Y_2 نیز از روابط ۷ و ۸ به دست می‌آیند [۶]. البته باید توجه داشت که در این روابط مقادیر v و w با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$y = t^2 - t_1^2 \quad u = t_1^2$$

$$v = t_2^2 \quad w = t_2^2 / 2$$

همچنین $X_2 = -X_1$ و $Y_2 = -Y_1$ می‌باشد و داریم

[۶]:

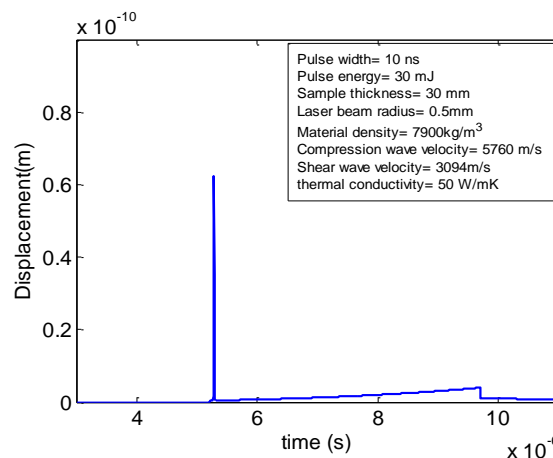
$$y = t^2 - t_2^2 \quad u = t_2^2$$

$$v = t_1^2 \quad w = t_2^2 / 2$$

تبخیر که به صورت عمودی به سطح وارد می‌شود دارای دامنه f_a است و تابع زمانی آن در چگالی توان پایین به شکل یک تپ $\delta(t)$ و در چگالی توان بالا به صورت تابع $H(t)$ است. دامنه جابه‌جایی‌ها در نقطه مرکزی؛ یعنی روی محور تقارن Oz و در سطح $z = R$ برای یک ورقه به ضخامت R با در نظر گرفتن آثار ناشی از بازتاب‌ها به ازای نیروی عمودی $f_a \delta(t)$ به صورت زیر خواهد بود [۵]:

$$u_z(R, \theta, t) = \frac{f_a}{\pi \mu R C_s^2} \left(\frac{\partial g_L}{\partial t} + \frac{\partial g_S}{\partial t} \right) \quad (2)$$

به طوری که در این رابطه مقادیر g_L و g_S با استفاده از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند. این جابه‌جایی‌ها برای حالتی هستند که تپ لیزر را به شکل $\delta(t)$ در نظر بگیریم. برای یک لیزر با تپی به شکل $j(t)$ ، این جابه‌جایی‌ها با درهم‌پیچش معادله ۲ با تابع $j(t)$ به دست می‌آید. با در نظر گرفتن روابط اخیر و با فرض آنکه یک تپ لیزری گاووسی شکل با پهنای زمانی ۱۰ نانوثانیه و انرژی به سطح نمونه‌ای به جنس استیل و ضخامت ۳۰ میلی‌متر تأیید شده، شکل موج فراصوتی در رژیم فرسایشی شبیه‌سازی و نتیجه آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. شکل موج فراصوتی در رژیم فرسایشی

برای نمونه استیل به ضخامت ۳ سانتی‌متر

برای نمونه با ضخامت R ، موج طولی فراصوتی بعد از زمان $t_L = R/C_L$ به دریافت‌کننده، که در طرف دیگر نمونه قرار

$$g_L = \frac{(S_L^2 + C_L^{-2})(2S_L^2 + C_S^{-2})^2}{[(2S_L^2 + C_S^{-2})^2 - 4S_L^2(S_L^2 + C_L^{-2})^{1/2}(S_L^2 + C_S^{-2})^{1/2}]^2} H\left(t - \frac{R}{C_L}\right) \quad (3)$$

$$g_S = \frac{-4S_S^2(S_S^2 + C_L^{-2})(S_S^2 + C_S^{-2})}{[(2S_S^2 + C_S^{-2})^2 - 4S_S^2(S_S^2 + C_L^{-2})^{1/2}(S_S^2 + C_S^{-2})^{1/2}]^2} H\left(t - \frac{R}{C_S}\right) \quad (4)$$

$$S_S^2 = \left(\frac{t^2}{R^2} - \frac{1}{C_S^2}\right), \quad S_L^2 = \left(\frac{t^2}{R^2} - \frac{1}{C_L^2}\right) \quad (5)$$

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

$$X_1 = y(y+w)t_1^2[5y^4 + (10u+9v)y^3 + (5u^2+18uv+4v^2)y^2 + uv(9u+8v)y + 4u^2v^2] - (2y+w)t_1^2[2y^5 + 4(u+v)y^4 + 2(u^2+4uv+v^2)y^3 + 4uv(u+v)y^2 + 2u^2v^2y] \quad (7)$$

$$Y_1 = -y(y+w)t_1^2[5y^3 + (7u+6v+2w)y^2 + (4wv+18uv+6uv-3w^2)y - 2vw^2] + 8uvw - uw^2 + (2y+w)t_1^2[2y^4 + 2(u+v+2w)y^3 + 2(uv+2uw+2vw+w^2)y^2 + 2w(2uv+uw+vw)y + 2uvw^2] \quad (8)$$

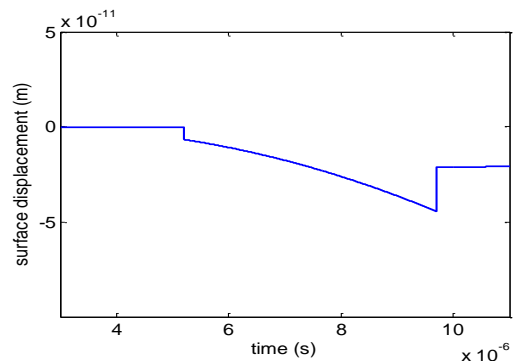
همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در رژیم ترموالاستیک امواج فراصوتی عرضی دامنه بیشتری نسبت به امواج طولی دارند. امواج طولی ترموالاستیک دریافت‌شده در سمت دیگر نمونه و هم‌محور با نقطه فرود پرتو لیزر، به‌صورت جابه‌جایی‌های منفی هستند. این بدان معناست که در لحظه رسیدن موج طولی ترموالاستیک، سطح به‌درون نمونه کشیده می‌شود. این رفتار، کاملاً وارون رفتار امواج فراصوتی در رژیم فرسایش است.

۳. نتایج تجربی آزمون‌ها

۳-۱. شکل موج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر

پس از انجام مطالعات و شبیه‌سازی‌ها در مورد چگونگی تولید امواج فراصوتی توسط لیزر و شکل این امواج در چگالی‌های توان گوناگون، لیزر مناسب جهت تولید موج

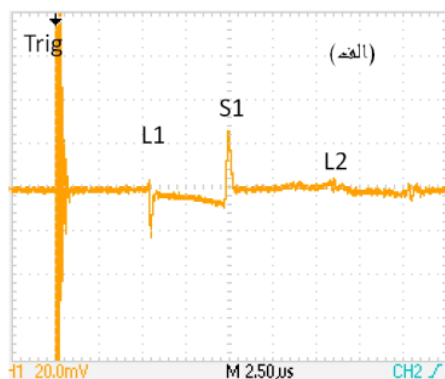
شکل امواج فراصوتی طولی (L) و عرضی (S) شبیه‌سازی شده در رژیم ترموالاستیک برای یک نمونه استیل به‌ضخامت ۳ سانتی‌متر و به‌ازای انرژی لیزر ۳۰ میلی‌ژول و قطر لکه ۴ میلی‌متر در شکل ۳ نمایش داده شده است (پارامترهای نمونه مشابه بخش قبل فرض شده‌اند).



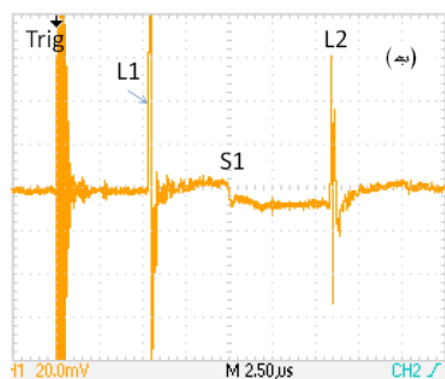
شکل ۳. شکل موج فراصوتی در رژیم ترموالاستیک

برای نمونه استیل به‌ضخامت ۳ سانتی‌متر

است که پس از یک بار بازتاب از سطح دیگر نمونه به مبدل می‌رسد. پیش از مقایسه نتایج حاصل از بخش شبیه‌سازی و تجربی باید به این نکته اشاره کرد که تفاوت در شکل کلی نتایج آزمایشگاهی و شکل موج نظری به دلیل دریافت موج فراصوتی توسط مبدل پیزوالکتریک است. بنابراین شکل موج فراصوتی، حاصل درهم‌پیچش شکل موج نظری و پاسخ نوسانی مبدل، که تقریباً به شکل سینوسی میراث‌ونده است، خواهد بود [۶].



(الف)



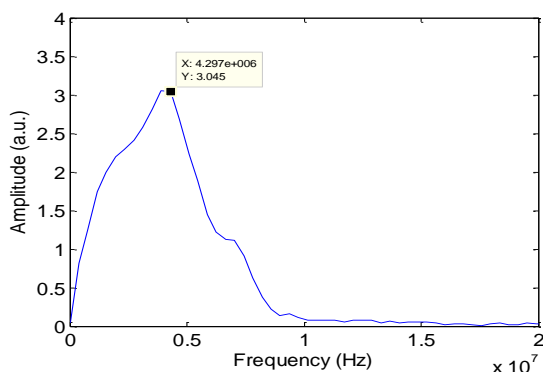
(ب)

شکل ۴. شکل امواج فراصوتی طولی و عرضی در رژیم
 الف) ترموالاستیک (چگالی توان ۲۲/۲۵ مگاوات بر سانتی‌متر مربع)
 ب) فرسایشی (چگالی توان ۳۵۰ مگاوات بر سانتی‌متر مربع)
 در نمونه استیل ۳ سانتی‌متر

همان‌گونه که در شبیه‌سازی‌ها نیز پیش‌بینی شد، در رژیم ترموالاستیک امواج طولی از نظر دامنه ضعیف‌تر از امواج عرضی هستند؛ که داده‌های تجربی نیز آن را تأیید می‌کند.

فراصوتی طراحی و چیدمان آزمایشگاهی آن برپا شد. لیزر طراحی‌شده یک لیزر حالت جامد Nd:YAG با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر است. چون برای تولید امواج فراصوتی به تپ‌های لیزری با ماندگاری زمانی کوتاه نیاز است، پهنای زمانی تپ لیزری با استفاده از روش Q-Switching به حدود ۱۰ نانوثانیه کاهش داده می‌شود. آهنگ تکرار تپ لیزری برابر با ۱ هرتز و انرژی خروجی لیزر برابر ۵۷ میلی ژول اندازه‌گیری شد. در آزمایشات، این امکان وجود داشت که چگالی توان لیزر با تغییر قطر لکه لیزری با استفاده از یک عدسی کوژ به فاصله کانونی ۸۵ میلی‌متر تغییر داده شود. ابتدا با استفاده از رابطه ۱، چگالی توان آستانه تبخیر و فرسایش نمونه به جنس استیل برابر ۲۹/۵ مگاوات بر سانتی‌متر مربع محاسبه شد [۴]. سپس با انتخاب چگالی توانی پایین و در گستره رژیم ترموالاستیک سیگنال فراصوتی توسط یک مبدل پیزوالکتریک ۴ مگاهرتز دریافت شد. همچنین با افزایش چگالی توان لیزر به مقدار بسیار بالاتر از آستانه تبخیر و فرسایش نمونه، امواج فراصوتی را در رژیم فرسایشی تولید کرده، که شکل موج دریافتی در سمت دیگر نمونه، در قسمت ب از شکل ۴ نشان داده شده است. سیگنالی که با علامت Trig نشان داده شده است، مربوط به لحظه‌ای است که تپ لیزر بر نمونه فرود می‌آید. فوتودیود^{۱۰} امواج نوری پراکنده‌شده از پرتو لیزری را دریافت و سیگنالی را برای دریافت‌کننده موج فراصوتی ارسال می‌کند. در واقع این سیگنال لحظه فرود پرتو لیزر بر نمونه را نشان می‌دهد. سرعت امواج فراصوتی طولی در این نمونه استیلی برابر ۵۷۶۰ متر بر ثانیه است، بنابراین موج فراصوتی طولی ۵/۲ میکروثانیه پس از لحظه فرود پرتو لیزر یعنی در زمان L1 دریافت می‌شود. موج فراصوتی عرضی در لحظه S1 به مبدل می‌رسد. سرعت امواج عرضی در این نمونه استیل برابر ۳۰۹۴ متر بر ثانیه محاسبه شده است. بنابراین موج فراصوتی عرضی تقریباً ۹/۷ میکروثانیه پس از فرود پرتو لیزر به مبدل می‌رسد. سیگنال L2 اولین پژواک یا همان موج فراصوتی طولی

خواهیم یافت، به‌گونه‌ای که از این روش می‌توان حتی به کیفیت‌سنجی لایه‌های نازک نیز پرداخت.



شکل ۵. گستره‌بسامدی امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر در استیل

۳-۳. تأثیر تغییر چگالی توان لیزر بر شکل موج

در شکل ۶ تغییر شکل موج فراصوتی دریافت‌شده در طرف دیگر نمونه استیل به ضخامت ۳۰ میلی‌متر نمایش داده شده است. تغییر دامنه امواج طولی و عرضی به‌روشنی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها را تأیید می‌کند. امواج طولی در گذار از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایشی رفته‌رفته قوی‌تر و امواج عرضی ضعیف‌تر می‌شود. همچنین تغییرات مثبت موج فراصوتی عرضی ابتدا در رژیم ترموالاستیک مثبت است؛ حال آنکه در چگالی توان بسیار بالا و در رژیم فرسایشی این تغییرات منفی است. سیگنال‌ها در رژیم فرسایشی دارای دامنه بسیار بزرگتری نسبت به رژیم ترموالاستیک هستند. بنابراین با محاسبه دقیق ضخامت نمونه و با در نظر گرفتن فاصله زمانی دو سیگنال پی‌درپی در این حالت می‌توان به‌سادگی سرعت امواج طولی و عرضی در نمونه را محاسبه کرد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انجام شبیه‌سازی‌های امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر و مقایسه نتایج با نتایج تجربی درک بهتری برای شناسایی و ارزیابی این نوع امواج فراهم آمد.

همچنین جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از رسیدن موج فراصوتی طولی به مبدل منفی است، در حالی که جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از موج عرضی دارای دامنه مثبت است. همان‌گونه که در قسمت ب از شکل ۴ مشاهده می‌شود، در رژیم فرسایشی و در چگالی توان لیزر بسیار بالا (که آن را ۳۵۰ مگاوات بر سانتی‌متر مربع گرفتیم) دامنه موج طولی (L1) بسیار قویتر از موج عرضی (S1) است. امواج طولی در این رژیم به‌صورت سیگنال‌های تیز و قوی ثبت می‌شوند و همان‌گونه که دیده می‌شود، اکوهای بعدی نیز دارای دامنه بزرگی هستند. بنابراین از این روش می‌توان به‌سادگی برای ضخامت‌سنجی مواد استفاده کرد. همچنین جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از رسیدن موج طولی به‌صورت تغییرات دامنه مثبت است، در حالی که جابه‌جایی‌های مربوط به موج عرضی به‌صورت تغییرات دامنه منفی است، به‌گونه‌ای که سطح در لحظه رسیدن موج عرضی به‌درون نمونه کشیده می‌شود، بنابراین تغییرات دامنه در لحظه S1 منفی است.

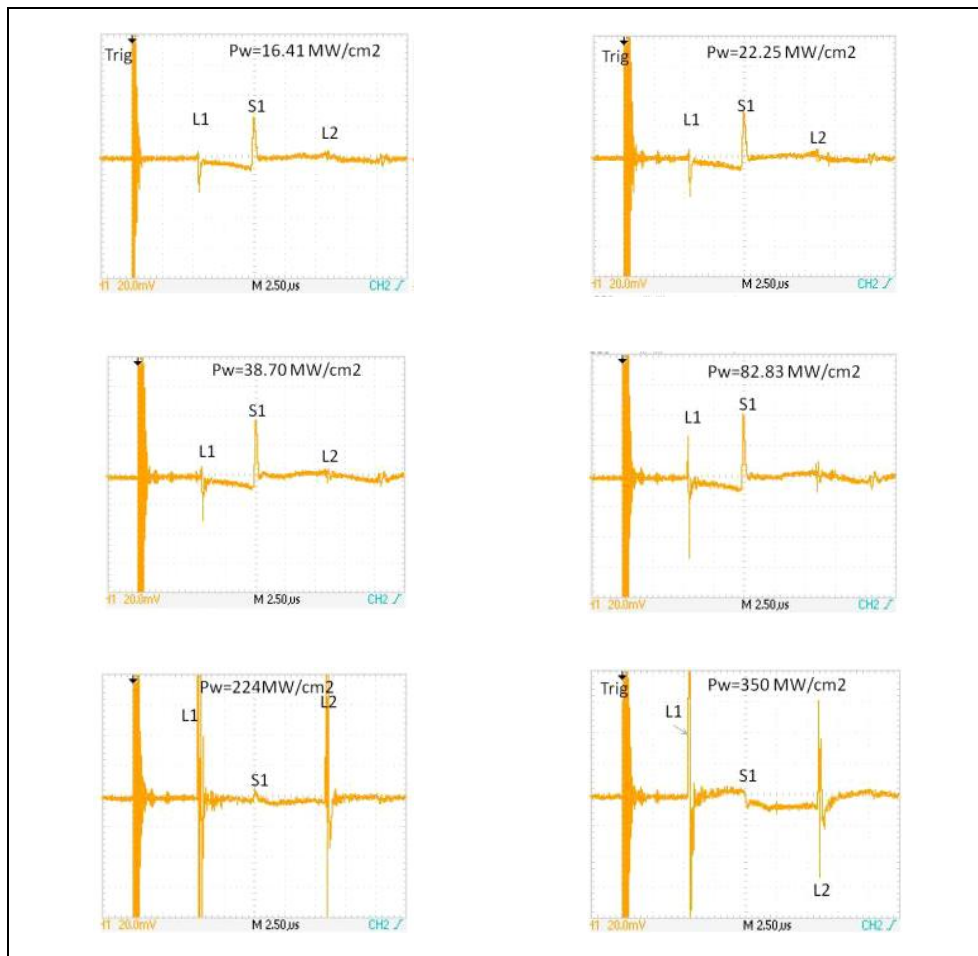
۲-۳. گستره‌بسامدی امواج فراصوتی

جهت شناسایی و درک بهتر از وضعیت امواج تولیدشده توسط لیزر، سیگنال فراصوتی دریافتی در فضای بسامد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل ۵ نیز نتیجه آن نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، امواج فراصوتی با بسامد نزدیک ۴/۳ مگاهرتز دارای بیشترین دامنه‌اند.

گستره‌بسامدی امواج تولیدشده از چند کیلوهرتز شروع می‌شود و تا حدود ۹ مگاهرتز ادامه دارد. این گستره فرکانسی محدوده فرکانس امواج فراصوتی تولیدشده را نشان می‌دهد. در واقع یکی از برتری‌های تولید موج فراصوتی توسط لیزر، پهنای بسامدی گسترده آن است و این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان به بررسی نمونه‌هایی با ضخامت باریک پرداخت. هرچه پهنای تپ لیزری کوچکتر انتخاب شود، به بسامدهای بالاتر موج فراصوتی دست

امواج طولی و عرضی مشخصه شناسایی این نوع سیگنال‌ها می‌باشد. گستره بسامدی امواج فراصوتی تولیدشده توسط لیزر محدوده فرکانسی امواج تولیدشده را مشخص می‌نماید. فهم این مشخصات از امواج تولیدشده به تنظیم و انتخاب پارامترهای مناسب لیزر کمک می‌کند.

با توجه به ماهیت امواج فراصوتی، همچنین اثر تغییر پارامترهای لیزر بر نوع موج فراصوتی، امواج طولی و عرضی در داخل قطعه استیلی انتشار یافت. مشخصاً با ارزیابی سیگنال‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در رژیم فرسایشی و ترموالاستیک، بزرگی و تغییرات دامنه



شکل ۶. تأثیر تغییر چگالی توان لیزر بر شکل موج فراصوتی و گذار از رژیم ترموالاستیک به رژیم فرسایش

۵. مأخذ

- [1] Fiendler, C., T. Ducharme, J. Kwan, *The laser-ultrasonic inspection system (LUIS) at The Sacramento Air Logistics Centre*, Review of Progress in QNDe, edited by D.O. Thompson and D.e. Chimen-ti, Plenum Press, New-York, 1997.
- [2] Culshaw, B. "Laser Ultrasound for the Noncontact Characterization of the Mechanical Properties of Materials." *International Symposium on Laser Ultrasonic*, Montreal, Canada, July 16-18(2008).
- [3] An, Y., B. Park, H. Sohn. "Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate." *Smart Materials and Structures* 2, 220-225 (2013).

[۴] ملک‌محمدی، صدیقه، وحید حقیقی، محمود سلطان‌الکتابی، "تولید و انتشار امواج فراصوتی توسط لیزر در رژیم فرسایشی: شبیه‌سازی"، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به‌همراه پنجمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، زاهدان، ایران، بهمن ۱۳۹۱.

[5] Aussel, J.D. "Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source." *Ultrasonics* 26, (1988):245-255

[6] Scruby, C.B. *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*, New York, 1990.

پی‌نوشت

-
1. laser pulse
 2. thermoelastic regime
 3. ablation regime
 4. laser ultrasonic
 5. piezoelectric transducer
 6. Lamé coefficients
 7. Dirac delta function
 8. Ready
 9. Heaviside
 10. photodiode