



## بررسی تجربی و عددی اثر شوک‌دهی لیزری بر روی تنش پسماند و عمر خستگی در ورق سوراخ‌دار

مهنوش علی نقیان<sup>1</sup>، سعید گلابی<sup>2</sup>، محسن ایرانی رهقی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731753153، irani@kashanu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرایند شوک‌دهی لیزری تکنولوژی جدیدی است که سبب افزایش عمر خستگی توسط ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح و در راستای عمق می‌گردد. هدف از این تحقیق افزایش عمر خستگی در اثر اعمال این فرایند به منظور ایجاد تنش پسماند فشاری در ناحیه‌ی دارای تمرکز تنش است. هدف اصلی، بررسی تأثیر پارامترهای مشخص شوک‌دهی مانند الگوی مسیر و انرژی پالس لیزر بر بیشترین مقدار تنش پسماند فشاری و عمق تنش پسماند فشاری در اطراف سوراخ در ورق به ضخامت 5 میلی‌متر از طریق دو روش شبیه‌سازی سه بعدی و تجربی است. جنس نمونه از آلومینیوم 7075 است. این جنس به دلیل استحکام و مقاومت به خستگی بالا در صنایع هوافضا استفاده می‌شود. از روش شیازنی برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شده است و نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی این حقیقت است که از فرایند شوک‌دهی لیزری می‌توان در قطعات دارای تمرکز تنش به منظور افزایش عمر خستگی استفاده نمود.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 12 بهمن 1399  
داوری اولیه: 15 فروردین 1400  
پذیرش: 3 خرداد 1400

### کلیدواژگان:

شوک‌دهی لیزری  
خستگی  
شیازنی  
تنش پسماند  
تمرکز تنش

## Experimental and numerical investigation of laser shock peening effects on residual stresses and fatigue life in hollow plate

Mahnoush Alinaghian, Saeid Golabi, Mohsen Irani Rahaghi\*

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* P.O.B. 8731753153, Kashan, Iran, irani@kashanu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 8 December 2020  
First Decision: 4 April 2021  
Accepted: 16 April 2021

### Keywords:

Shock Peening  
Fatigue  
Slitting  
Residual stress  
Stress Concentration

### Abstract

Laser shock peening (LSP) process is a modern technology that can be used to improve fatigue life by inducing compressive residual stresses on the surface and along the thickness of peened parts. The aim of this study is to improve fatigue life of parts due to apply this process in order to generate compressive residual stresses (CRS) on samples with stresses concentration. The main objective of this paper is to investigate the effect of LSP parameters include scanning pattern and laser pulse energy on maximum compressive residual stress (MCRS) and depth of CRS around a hole in a 5mm thickness using both finite element technique and experimental results. The specimen material is AA7075-T6. This material is used in the aerospace industry due to its high strength and high fatigue resistance. Slitting method is used to determine the residual stresses. The results show that elaborate application of LSP could efficiently be used for stress concentration points and improve fatigue strength.

### 1- مقدمه

می‌دهند [1، 2]. فرایند شوک‌دهی لیزری سبب بوجود آمدن تنش پسماند فشاری در قطعات می‌شود. تنش پسماند فشاری تنش مفید است که سبب افزایش عمر خستگی، مقاومت به خوردگی و سایش خواهد شد [3-5]. لیزری که در این نوع فرایند استفاده می‌شود لیزرپالسی از نوع ان‌دی‌یاگ<sup>2</sup> و با زمان پالس چند نانو ثانیه و شدت لیزر بیشتر از آگیا وات بر سانتی‌متر مکعب<sup>3</sup> می‌باشد. با تابش اشعه موج به سطح فلز،

عبارت تنش‌های پسماند<sup>1</sup> بیشتر به تنش‌های خود متعادلی اشاره دارد که حتی در صورت عدم وجود بارهای خارجی در یک ماده باقی مانده است. تنش‌های پسماند را می‌توان به دو گروه عمده فشاری و کششی تقسیم کرد که در این میان تنش‌های پسماند فشاری تنش‌های مفیدی هستند که با قرار گرفتن در معرض تنش کششی و بارهای معکوس، مقاومت ماده را افزایش

<sup>2</sup> Nd:Yag  
<sup>3</sup> GW/cm<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (RS)

### Please cite this article using:

M. Alinaghian, S. Golabi, M. Irani Rahaghi, Experimental and numerical investigation of laser shock peening effects on residual stresses and fatigue life in hollow plate, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 59- 67, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بررسی کردند [13]. آقای واسو و همکاران [14، 15] تأثیر فرایند شوک‌دهی لیزری را در سه سطح صاف و مقعر و محدب بر تنش پسماند بررسی کردند و نتایج نشان دادند تنش پسماند فشاری در حالت محدب دارای کمترین و در حالت مقعر دارای بیش‌ترین مقدار است. تنش پسماند با روش‌های مختلفی اندازه‌گیری می‌شود. در روش کانتور، پس از برش نمونه‌ها به دو قطعه و سپس استخراج و اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطح برش، تنش پسماند بدست خواهد آمد. علی‌نقیان و همکاران [16]، [17] از روش کانتور جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سطح مقطع استفاده کردند. روش سوراخکاری و شیارزنی از روش‌های مخرب دیگری هستند که برای اندازه‌گیری تنش پسماند به کار گرفته شده است. در روش سوراخکاری، کرنش‌ها در طی فرایند سوراخکاری در هر مرحله اندازه‌گیری می‌شوند و پس از کالیبراسیون به تنش تبدیل می‌شود [18]. در فرایند شیارزنی نیز کرنش‌ها در هر مرحله بعد از ایجاد شیار اندازه‌گیری می‌شود اما نوع کرنش سنج‌ها و نحوه‌ی اجرای روش متفاوت است [19]. گلابی و همکاران [20] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و کدنویسی پایتون و همچنین با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>3</sup> پارامترهای بهینه فرایند شوک‌دهی لیزری که منجر به ایجاد حداکثر مقدار تنش‌های پسماند فشاری و حداقل هزینه می‌شد را تعیین نمودند. نویسندگان معتقدند از آنجا که فرایند شوک‌دهی لیزری باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری بر روی سطح یک قطعه لایه برداری شده می‌شود، با ایجاد تنش پسماند فشاری در اطراف نقاط تمرکز تنش یک قطعه، ممکن است میزان بارگیری به طوردقیق افزایش یابد. با این حال باید توجه داشت که از آنجا که هر قسمت لایه برداری شده در تعادل ایستا است، هنگامی که تنش پسماند فشاری بر روی سطح یک قطعه ایجاد می‌شود، تنش‌های پسماند کششی<sup>4</sup> نیز در عمق آن ایجاد می‌شوند. این پدیده ممکن است برای به تعویق انداختن ترک خستگی در بخشی که تحت خمش قرار دارد، به کار گرفته شود. بر اساس این تحقیق، وجود تنش پسماند فشاری در ناحیه‌ی دارای تمرکز تنش در یک قطعه، میزان بارگیری را به طور دقیق افزایش می‌دهد. بر این اساس تصمیم گرفته شد تا فرایند شوک‌دهی لیزری در اطراف یک ناحیه‌ی دارای تمرکز تنش مانند یک سوراخ عرضی در یک میله تعیین شود و میزان تنش‌های پسماند توسط هر دو روش المان محدود<sup>5</sup> و تجربی تعیین شود.

منطقه‌ی تحت تابش تبخیر شده و به پلاسما تبدیل می‌شود. پلاسمای ایجاد شده سبب انتقال موج شوک به نمونه خواهد شد و در اثر این انتقال، ناحیه‌ی شوک‌دهی شده دارای کرنش پلاستیک و در نتیجه سبب ایجاد تنش پسماند فشاری خواهد شد. در این نوع آزمایش از یک لایه‌ی شفاف به عنوان خنک‌کننده و از رنگ مشک‌ی برای جذب بیشتر فشار ورودی در سطح نمونه استفاده خواهد شد. چگونگی تشکیل فرایند شوک‌دهی لیزری در تحقیق [6] نشان داده شده است. تحقیقات متعددی در زمینه‌ی شوک‌دهی در سال‌های اخیر انجام شده است. فایرند و کلور [6] تأثیر لایه‌ی خنک‌کننده ولایه‌ی جاذب در شدت موج‌های شوک‌دهی اعمال شده را بررسی کردند. مطالعات بعدی به دو مسیر تقسیم شد: یک مسیر توسعه این نوع فرآیند در کاربردهای صنعتی و در راستای افزایش خواص خستگی قطعات فلزی بوده است. مسیری دیگر تحقیق‌های آکادمیکی در زمینه‌ی مبنا و چگونگی انجام فرایند شوک‌دهی و بررسی گسترده تر تأثیر این فرایند بر خواص مواد بود. به منظور افزایش عمر خستگی نمونه‌های تحت اعمال، هر دو عامل اندازه و نوع توزیع تنش پسماند ناشی از فرایند شوک‌دهی لیزری تعیین کننده هستند، زیرا آنها بر شروع و رشد ترک تأثیرگذار می‌باشند. قطر لکه لیزر، درصد هم پوشانی، انرژی پالس، طول موج و خواص مکانیکی پارامترهایی هستند که به دلیل تأثیر مشخص بر تنش پسماند در تحقیقات ارزیابی می‌شوند [7].

اگرچه مطالعات تجربی قابل توجهی به منظور ارزیابی توانایی فرایند شوک‌دهی لیزری در بهبود خواص مکانیکی مواد صورت پذیرفته است، با این وجود تحقیقات بسیار محدودی در راستای پیش بینی بهبود این خواص از جمله اندازه‌گیری تنش پسماند به ویژه در قطعات سه بعدی انجام شده است [8]. شبیه‌سازی المان محدود یکی از روش‌های مرسوم برای حل معادلات مهندسی از جمله در فرایندهای ساخت و تولید است [9-12]. شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند<sup>1</sup> شوک‌دهی لیزری می‌تواند الزامات آزمایش‌های دشوار و پرهزینه را کاهش دهد. استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی امکان آنالیز و تشخیص چگونگی توزیع تنش‌های پسماند در محیطی مانند محیط واقعی را فراهم می‌سازد. شبیه‌سازی این نوع فرایند، اولین بار توسط برایست و بروکمن معرفی شد و توسط افراد دیگر گسترش پیدا کرد. وارن و همکاران با استفاده از رویکرد طراحی آزمایشات<sup>2</sup>، اثر اندازه لکه لیزر، شدت لیزر و یا درصد هم پوشانی را بر تنش‌های پسماند

<sup>3</sup> (PSO)<sup>4</sup> (TRS)<sup>5</sup> FEM<sup>1</sup> LSP<sup>2</sup> (DOE)

## 2- روش شناسی

در این بخش، مراحل تحقیق شامل آزمایش‌های طراحی شده و شبیه‌سازی شرح داده شده است. این تحقیق شامل 3 مرحله است: تنظیمات فرایند شوک‌دهی، اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش شیپارزنی و شبیه‌سازی فرایند شوک‌دهی لیزری. به منظور اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از روش شیپارزنی استفاده شده است. در این تحقیق، با کمک مدل شبیه‌سازی سه بعدی، تأثیر الگوی مسیر وانرژی پالس لیزر در طی فرایند شوک‌دهی لیزری در نمونه‌های از جنس آلومینیوم 7075 بر توزیع تنش پسماند در سطح و در راستای عمق بررسی شده است. ابعاد نمونه در شکل 1 نشان داده شده است. شکل 2 نشان دهنده‌ی استراتژی مسیر است. اهمیت شبیه‌سازی سه بعدی در امکان تجزیه و تحلیل توزیع تنش‌های پسماند مشابه واقعیت در هر نقطه از حجم، حتی در مناطق غیرقابل دسترس جهت اندازه‌گیری تنش پسماند است. نتایج نشان می‌دهد که چگونه اعمال فرایند شوک‌دهی باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری مفید می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که توزیع تنش پسماند به شدت به جهت الگوی مسیر و انرژی پالس لیزر بستگی دارد. شبیه‌سازی‌های المان محدود امکان بهینه‌سازی استراتژی تابش، کنترل میزان و همچنین توزیع تنش‌های کششی را فراهم می‌کند.

است. ترکیب آلیاژ آلومینیوم 7075 تقریباً شامل 5/6-6/1% روی، 2-2/2% منیزیم، 1/2-1/6 مس و مقدار سیلیسیوم در حدود نیم درصد سیلیکون، آهن، منگنز، کروم، تیتانیوم و دیگر فلزات می‌باشد. جدول 1 نشان دهنده‌ی خواص مکانیکی این نوع آلیاژ است.

در این تحقیق یک مسیر افقی و یک مسیر عمودی در فرایند شوک‌دهی لیزری در نظر گرفته شده است.

در بیشتر مطالعات انرژی پالس‌ها بر اساس نوع ماده، بین 1 تا 5 ژول در نظر گرفته شده است [21، 22]. انرژی بیشتر موجب ناهموار شدن سطح و انرژی کمتر، تأثیر کمی در مقدار تنش پسماند ایجاد شده دارد. مقدار انرژی اعمالی به نوع ماده و پارامترهای شوک‌دهی بستگی دارد. به دلیل اینکه آلیاژ آلومینیوم 7075 از استحکام و سختی کمتری نسبت به نوع فولاد برخوردار است.

جدول 1 خواص مکانیکی AA7075-T6

Table 1 Mechanical properties of AL7075

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Hardness Vickers	Poisson's Ratio	Fatigue Strength (Mpa)	UTS (Mpa)	YS (Mpa)	E (Gpa)
2810	175	0/33	159	572	503	71/7

جدول 2 انرژی لیزر

Table 2 Laser Energy

Run	experimental	LSP	Energy (J)	Radius (mm)	Overlap (%)	Path strategy	RS Experimental	RS (FEA)
1	✓	2	1	50	H	✓	✓	
2	✓	2	1	50	V	✓	✓	
3	✓	1/2	1	50	H	✓	✓	
4	✓	1/2	1	50	V	✓	✓	

## 2-2- تنظیمات فرایند شوک‌دهی

تنظیمات آزمایش تجربی فرایند شوک‌دهی در شکل 3 نشان داده شده است. منبع، یک لیزر ان‌دی:یاگ از نوع پالسی<sup>1</sup> و دارای طول موج 1064 نانومتر است. از لنز همگرا با فاصله کانونی 10 سانتی‌متر استفاده شده است، لنزها برای کنترل انتقال انرژی پالس لیزر به کار گرفته می‌شود. فرکانس لیزر 10 هرتز و زمان پیک فشار 15 نانو ثانیه است، نمونه‌ها توسط یک نگهدارنده قابل تنظیم و همچنین قابل حرکت در راستای هر سه بعد نگه داشته شده‌اند. سطح فوقانی نمونه‌ها در حدود 1 تا 2 میلی‌متر زیر سطح آب قرار می‌گیرد. دلیل استفاده از لایه‌ی شفاف مانند آب به جهت خنک‌کنندگی و همچنین جلوگیری از تشکیل حباب

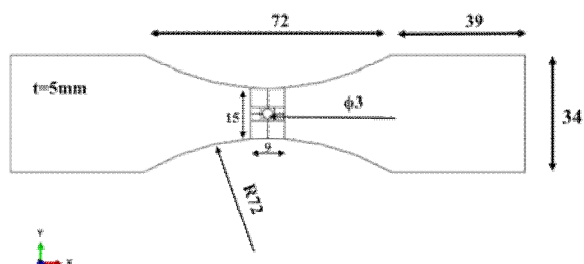


Fig. 1 Schematic drawing and dimensions of samples (mm)

شکل 1 شماتیک ابعاد نمونه

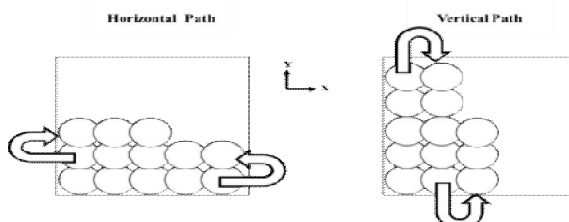


Fig. 2 Path strategies: Horizontal path, Vertical path

شکل 2 استراتژی مسیر: مسیر افقی و مسیر عمودی

## 1-1- مواد

ماده‌ای که برای این نمونه انتخاب شده است آلومینیوم 7075

<sup>1</sup> Q-switch Nd: YAG

در شکل 4،  $L$ ،  $w$ ،  $a$ ،  $t$ ،  $B$  و  $l$  به ترتیب ضخامت، عمق شیار، عرض شیار، طول نمونه، طول کرنش سنج و عرض نمونه را نشان می‌دهند.

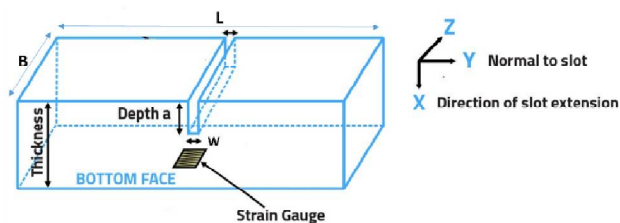


Fig. 4 Schematic of slitting method

شکل 4 شماتیک روش شیارزنی

با توجه به اینکه کرنش سنج به صورت عمود بر محل برش در پشت قطعه متصل می‌شود، بنابراین تنش پسماند  $\sigma_{yy}(x)$  در واقع در جهت عمود بر جهت برش اندازه‌گیری می‌شود. با فرض تابع تنش معادله‌ی (1) می‌توان درایه‌های ماتریس نرمی را یافت. در این رابطه تابع  $I_{ij}(x)$  به عنوان تابع لژاندر شناخته می‌شود که از دومین تابع شروع می‌شود.

$$\sigma \quad (1)$$

عناصر ماتریس ضرایب نرمی  $C_{ij}$  در معادله‌ی (2) از طریق ثبت کرنش‌های آزاد شده در شبیه‌سازی بعد از هر شیار به دست می‌آیند. مکان کرنش‌های آزاد شده، کرنش سنج واقع در محل اصلی اتصال کرنش سنج به نمونه است.

است. برای تأمین آب مورد نیاز از مخزن آب استفاده شده است. نمونه‌ها بر اساس جدول 2 شوک‌دهی شده‌اند. محدوده انرژی تولید شده 2-1/2 ژول و درصد هم پوشانی نیز 50 درصد است و فرایند شوک‌دهی در دو مسیر افقی و عمودی انجام شده است.



Fig. 3 LSP process setup

شکل 3 تنظیمات فرآیند شوک‌دهی

### 3-2- اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش شیارزنی

مرحله بعد از اعمال فرایند شوک‌دهی لیزری، اندازه‌گیری تنش پسماند با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده در جدول 2 است. بر این اساس، از روش شیارزنی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند استفاده شده است. در این روش، قطعه کار دارای تنش پسماند، از یک طرف ثابت می‌شود و به تدریج یک برش کوچک در راستای ضخامت نمونه ایجاد می‌شود. این کرنش‌ها بعداً توسط ماتریس ضرایب نرمی به تنش تبدیل می‌شوند. شماتیک پارامترهای روش شیارزنی در شکل 4 نشان داده شده است.

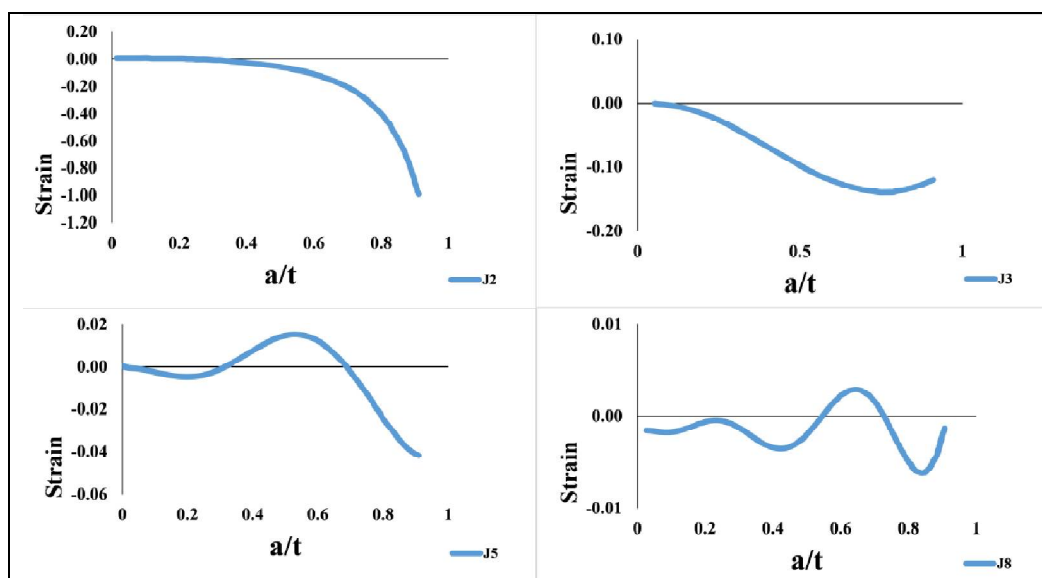


Fig. 5 Strain vs. slit layers for each Legendre number

شکل 5 نمودار کرنش - شیار برای هر تابع لژاندر

پس از هر برش در روش تجربی، کرنش‌های آزاد شده توسط کرنش سنج اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین کرنش‌های ثبت شده توسط ماتریس ضرایب نرمی استخراج شده از شبیه‌سازی آباکوس، به تنش تبدیل می‌شوند. فرض بر این است تا خواص مکانیکی نمونه‌ها ایزوتروپیک و الاستیک باشد. 11 تابع لژاندر  $(L_2(x), L_3(x), \dots, L_{12}(x))$  و 12 برش در طول شبیه‌سازی در نظر گرفته و فقط نیمی از شکل هندسی مدل‌سازی می‌شود. شکل 5 نشان دهنده کرنش‌های اندازه‌گیری شده در هر لایه برای هر تابع لژاندر است. در روش تجربی کرنش سنج در پشت قطعه درست در جایی که قرار است شیار ایجاد شود، متصل می‌شود. محل ایجاد شیار در شکل 7 نشان داده شده است. کرنش‌ها توسط دیتالاگر ثبت می‌شود.

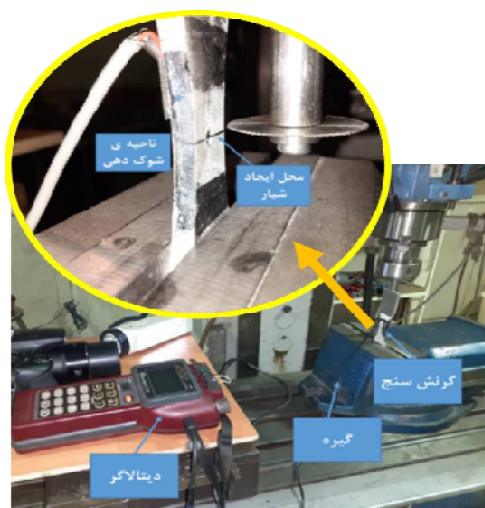


Fig. 7 Experimental setup for slitting method using strain gauge  
شکل 7 تنظیمات دستگاه جهت اندازه‌گیری تنش پسماند با روش شیارزنی

#### 2-4- روش شبیه‌سازی فرایند شوک‌دهی لیزری

یک مدل سه بعدی در نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس توسط حلگر صریح طراحی می‌شود. رفتار الاستیک-پلاستیک معادله‌ی جانسون کوک برای تغییر شکل الاستیک - پلاستیک در طول شوک‌دهی لیزری در نظر گرفته شده است. تعداد هشت مش از نوع المان‌های C3D8R<sup>2</sup> برای ناحیه‌ی شوک‌دهی و همچنین از مش‌های منشور سه خطی<sup>3</sup> از نوع C3D6 برای دیگر نواحی در نظر گرفته می‌شود. اندازه کل مش‌ها  $25 \times 100 \times 100$  میکرومتر و تعداد کل المان‌ها برای ناحیه‌ی شوک‌دهی لیزری برابر 645736 می‌باشد. شبیه‌سازی با کامپیوتر از نوع دو هسته‌ای<sup>4</sup> و با کلاک 2/40 گیگاهرتز و با رم 12 گیگابایت در نظر گرفته

بدین معنی که کرنش اندازه‌گیری شده در شیار به عمق  $a_i$  و تابع لژاندر  $z$  ام است، خوانده شود و در درایه‌های ماتریس جای‌گذاری شود. زمانی که تعداد شیارهای اعمال شده در راستای ضخامت از تعداد توابع لژاندر بیشتر باشد، یک روش عمومی برای محاسبه‌ی توابع ناشناخته‌ی  $A_i$  از روش عملی به صورت معادلات (3-5) است.

$$C_{ij} = \varepsilon (a_i = a_j, \sigma_{yy}(x) = L_j) \quad (2)$$

$$\varepsilon (a_i) = \frac{1}{E'} \sum_{j=2}^m C_{ij} A_j \quad (3)$$

$$\{\varepsilon\} = [C]\{A\} \quad (4)$$

$$\{A\} = \hat{E}^{-1} ([C]^T [C])^{-1} [C]^T \{\varepsilon_{meas}\} \quad (5)$$

$$\hat{E} = E \quad \text{For} \quad \frac{B}{t} \ll 0 \quad (6)$$

$$\hat{E} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad \text{For} \quad \frac{B}{t} \gg 2 \quad (7)$$

زمانی که  $E'$  در راستای تنش و کرنش صفحه‌ای از طریق فرمول معادلات (6) و (7) محاسبه می‌شود. از ماتریس ضرایب نرمی جهت محاسبه‌ی تنش پسماند استفاده می‌شود. ماتریس ضرایب نرمی برای هر دو مدل دو و سه بعدی قابل محاسبه است. در این تحقیق از مدل دو بعدی برای پیدا کردن ماتریس ضرایب نرمی استفاده می‌شود [21, 22]. مدل بایستی بی بعد باشد بنابراین تمامی ابعاد بر ضخامت نمونه تقسیم می‌شود، بنابراین مدول یانگ برابر 1 پاسکال در نظر گرفته می‌شود [23]. ابتدا تعداد 3150 المان خطی چهارگوش<sup>1</sup> از نوع CPS4R توسط مش بندی اتوماتیک ایجاد می‌شوند. سپس تابع لژاندر برای توزیع بار در جهت طول و در هر عمق از ضخامت به کار گرفته می‌شود. در هر لایه، یک لایه غیر فعال و بارگذاری لژاندر در سطح باقی مانده اعمال می‌شود. شکل 6 نشان دهنده‌ی اندازه‌گیری کرنش در نقاط نشان داده شده و محاسبه‌ی ماتریس ضرایب نرمی در مدل دو بعدی در روش شیار زنی نرم‌افزار آباکوس است.

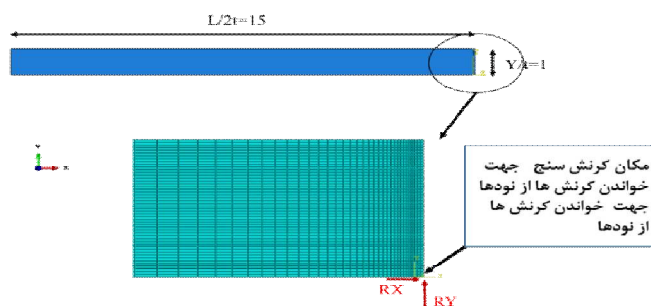


Fig. 6 2D Model for calculating strains and compliance coefficients from FEA

شکل 6 مدل دو بعدی برای محاسبه‌ی کرنش‌ها و ضرایب ماتریس نرمی از طریق شبیه‌سازی

<sup>2</sup> hourglass

<sup>3</sup> Tri-linear prism

<sup>4</sup> Intel Xeon CPU E5530

<sup>1</sup> quadrilateral

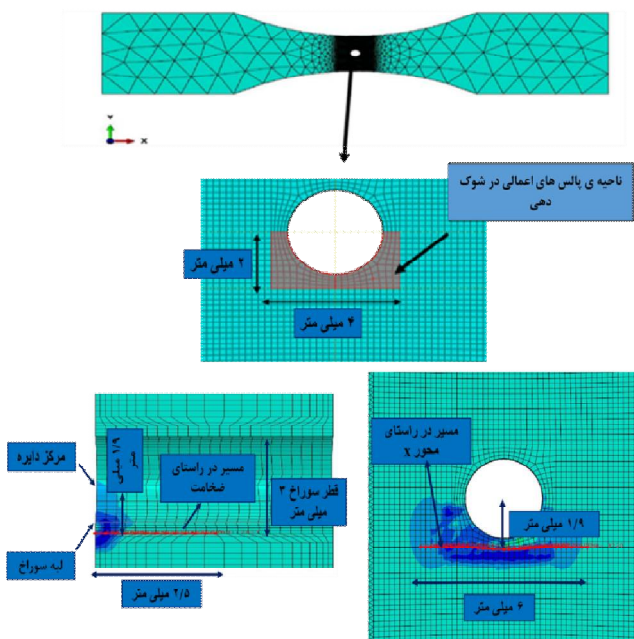


Fig. 8 Meshed part showing the region of applied pulses  
 شکل 8 مسیر و مناطق پالس‌های اعمال شده

### 3- نتایج و بحث

فرایند شوک‌دهی لیزری با موفقیت بر روی چهار نمونه انجام شد. در این بخش نتایج روش تجربی و روش شبیه‌سازی در این بخش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. شکل 9 نشان دهنده تنش پسماند در راستای محور X است.

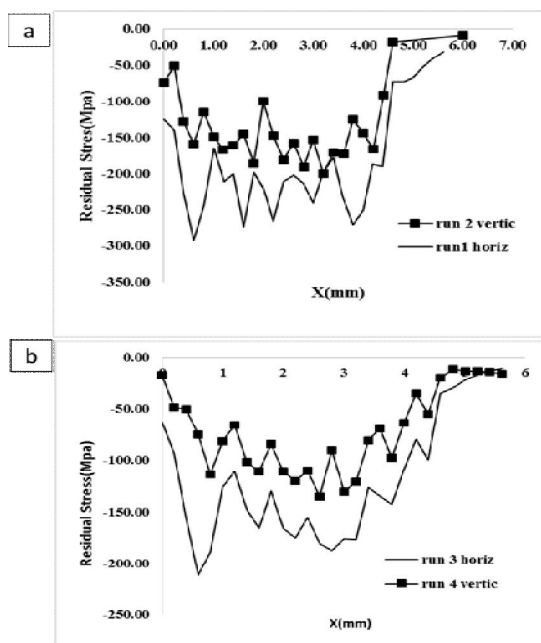


Fig. 9 Distribution of residual stress along x direction on surface  
 شکل 9 توزیع تنش پسماند در راستای X برای a. اجراهای 1 و 2 و b. اجراهای 3 و 4

مسیر در راستای X در حدود 6 میلی‌متر است و نشان دهنده

می‌شود. موج شوک‌دهی لیزری با فشار انتقالی دارای بیشینه 5.25 گیگا پاسکال برای این کار در نظر گرفته شد. فشار اعمالی از طریق معادله (8) محاسبه می‌شود.

$$p(\text{Gpa}) = 1.65 \cdot \sqrt{I_0} \text{ (GW/cm}^2\text{)} [24, 25] \quad (8)$$

$$P(x,y,t) = P(t) \exp[-2.5(x^2 + y^2)/R^2] [26] \quad (9)$$

که در این معادله  $I_0$  شدت لیزر است. توزیع فشار از طریق معادله (9) محاسبه می‌گردد. در جایی که  $x, y$  جهت‌های محور شوک‌دهی و همچنین  $R$  شعاع هر پالس در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی پالس‌های شوک‌دهی لیزری در موقعیت‌ها و زمان‌های متفاوت اعمال می‌شود تا توزیع تنش پسماند تضمین شود. در این تحقیق کمینه زمان استراحت بین دو پالس  $10^{-6}$  میکروثانیه در نظر گرفته شده است که بر اساس تحقیقات ژاوو [27] این زمان، زمان کافی و مناسب برای محاسبه تنش پسماند می‌باشد. شبیه‌سازی از دو بخش تشکیل شده است. یک بخش فرایند شوک‌دهی لیزری و بخش دیگر زمان استراحت است. بخش اول با نام بخش شوک‌دهی<sup>1</sup> و بخش دیگر با نام بخش استراحت<sup>2</sup> در جدول 3 در نظر گرفته شده است.

جدول 3 بخش‌های فرایند شوک‌دهی

Time step name	Physical stage	Time step length	Maximum increment
Shock step	Shock step	200ns	10ns
Recover step	Recover step	1000 ns	none

خواص الاستو پلاستیکی آلومینیوم 7075 با استفاده از معادله‌ی جانسون کوک در معادله‌ی (10) نمایش داده شده است [28].

$$\sigma \quad (10)$$

در این معادله پارامترهای  $A, B, C$  و  $n$  به ترتیب تنش تسلیم، ماژول کار سختی و حساسیت نرخ کرنش هستند. اجراهای شبیه‌سازی با استفاده از کدهای متلب و سابروتین<sup>3</sup> و شبیه‌سازی انجام می‌شود و با مقادیر عملی اعتبار سنجی می‌شود. مدل المان محدود و ناحیه‌ی شوک‌دهی در شکل 8 نمایش داده شده است. طول ناحیه‌ی شوک‌دهی به ابعاد  $4 \times 2$  میلی‌متر است. مسیر در راستای محور X به طول 6 میلی‌متر و در راستای محور Z به طول 2/5 میلی‌متر است و فواصل این مسیرها تا مرکز دایره به طول 1/9 میلی‌متر است.

1 shock  
 2 recover  
 3 VDLOAD

مسیر عمودی برخوردار است. رنگ‌های آبی تیره تر بیانگر تنش پسماند فشاری بیشتر است و محدوده آن در اجرای 1 در حدود 329-473 مگا پاسکال تغییر خواهد کرد اما در اجرای 2 بین 100-150 مگا پاسکال خواهد بود.

بنابراین انتخاب مسیرهای دیگر نیز منجر به این نتایج خواهد شد. مقادیر تنش پسماند در انرژی‌های بیشتر یعنی در اجراهای 1 و 2 دارای مقادیر تیره رنگ‌تری نسبت به اجراهای 3 و 4 است. شکل 11 نشان دهنده توزیع تنش پسماند فشاری در راستای ضخامت است. این نمودار نشان دهنده تنش پسماند فشاری در سطوح بالای قطعه است و به تدریج با افزایش عمق از مقدار این نوع تنش کاسته می‌شود و با نفوذ در عمق بیشتر، تنش پسماند، کشتی می‌شود. تنش پسماند فشاری در اجراهای 1 و 2 دارای بیشینه مقدار در حدود 230-340 مگا پاسکال و عمق تنش پسماند 0/78 و 0/59 میلی‌متر خواهد بود. در اجراهای 3 و 4 دارای ماکزیمم تنش پسماند در حدود 70-230 مگا پاسکال و همچنین بیش‌ترین عمق تنش پسماند فشاری در حدود 0/66 و 0/56 میلی‌متر خواهد بود. این نمودار نشان دهنده آنست که تنش پسماند فشاری و همچنین عمق تنش پسماند فشاری در راستای مسیر افقی، بیشتر خواهد بود و دلیل آن بیشتر بودن تعداد پالس‌های ورودی در مسیر افقی در مقایسه با مسیر عمودی است. نکته‌ی دیگر اینکه با افزایش انرژی پالس لیزر، مقدار تنش پسماند و عمق تنش پسماند فشاری افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به اینکه ارتباط مستقیمی بین انرژی پالس لیزر در انجام تست‌های تجربی با فشار ورودی در شبیه‌سازی وجود دارد، بنابراین با افزایش انرژی، مقدار فشار ورودی در شبیه‌سازی افزایش پیدا می‌کند و با افزایش فشار ورودی، تنش پسماند فشاری حاصل نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

این مسئله است که تنش پسماند فشاری در ناحیه‌ی شوک‌دهی در مقایسه با ناحیه‌ی خارج از شوک‌دهی برای هر دو مسیر افزایش پیدا می‌کند. همچنین این شکل نشان دهنده‌ی این امر است که تنش پسماند در راستای مسیر افقی بیشتر از مسیر عمودی است و متوسط تنش پسماند به دلیل پالس‌های لیزر بیشتر دارای مقدار بیشتری خواهد بود. نوسانات نشان دهنده این امر است که هر چه درصد هم پوشانی کاهش پیدا کند، تغییرات نوسانی بیشتر خواهد شد. به عنوان مثال نوسانات اجرای 1 و 2 به طور متوسط بین 170-250 مگا پاسکال است که در مقایسه با اجرای 3 و 4 که در حدود 120-180 مگا پاسکال است از مقادیر بیشتری برخوردار خواهد بود.

شکل 10 نشان دهنده نمودار کانتور تنش پسماند در سطح و در راستای ضخامت است. این شکل نشان دهنده‌ی این مسئله است که تنش پسماند در راستای مسیر افقی در اجرای 1 و 3 در راستای ضخامت و سطح، از مقادیر بیشتری نسبت به حالت عمودی برخوردار است زیرا با توجه به اینکه ناحیه‌ی شوک‌دهی به مساحت 2x4 میلی‌متر است و درصد هم پوشانی نیز 50 درصد است و با توجه به اینکه نیمی از سوراخ به قطر 3 میلی‌متر در این ناحیه قرار دارد، بنابراین با محاسبه و همچنین کد نویسی در بخش سابروتین نرم‌افزار آباکوس، در مجموع تعداد پالس‌هایی که در مسیر افقی انجام می‌شود بیشتر از تعداد پالس‌ها در مسیر عمودی است و تنش پسماند بیشتری در مسیر افقی ایجاد خواهد شد. با توجه به شکل 10 و نمودار کانتور تنش‌ها، اگر مسیر انتخابی در حدود چند میلی‌متر پایین یا بالاتر از مسیر مشخص شده در موقعیت پایین سوراخ انتخاب شود، این نتایج دوباره حاصل خواهد شد زیرا با مقایسه‌ی رنگ‌ها نتیجه گیری می‌شود که مسیر افقی از رنگ تیره‌تری نسبت به

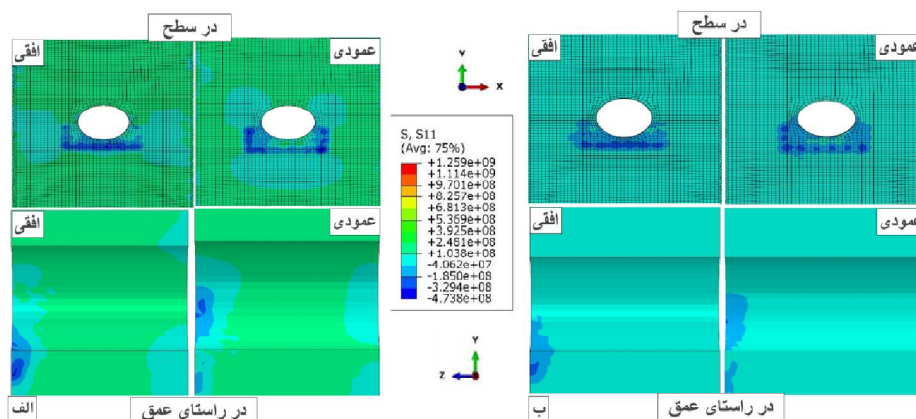


Fig. 10 Contour Plot of distribution of residual stress at surface and along thickness

شکل 10 نمودار کانتور تنش پسماند در سطح و در راستای ضخامت برای اجراهای (الف) 1 و 2، (ب) 3 و 4

روش‌های دیگر افزایش پیدامی‌کند.

- عمق تنش پسماند فشاری در مسیر افقی در مقایسه با مسیر عمودی افزایش پیدا می‌کند.
- افزایش انرژی سبب افزایش عمق تنش پسماند فشاری خواهد شد.

- انرژی پالس بالا سبب زبری سطح و ناهمواری سطح خواهد شد و انرژی پالس کم نیز تأثیری در تنش پسماند فشاری نخواهد داشت. بنابراین در انجام فرایند شوک‌دهی باید به جنس قطعه و تنش تسلیم آن و همچنین محدوده انرژی توجه کرد.

### 5- مراجع

- [1] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, Residual stress part 1 - Measurement techniques. Mater. Sci. Technol. 17:355–365, (2001).
- [2] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, Residual stress part 2 - Nature and origins. Mater. Sci. Technol. 17:366–375, (2001).
- [3] X. C. Zhang, Y. K. Zhang, J. Z. Lu, F. Z. Xuan, Z. D. Wang, and S. T. Tu, Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening. Mater Sci Eng A, Materials Science and Engineering: A, (2010).
- [4] [O. Hatamleh, P. M. Singh, and H. Garmestani, Garmestani H Corrosion susceptibility of peened friction stir welded 7075 aluminum alloy joints. Corros Sci, Corrosion Science , (2009).
- [5] U. Sánchez-Santana et al., Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing. Wear, (2006)
- [6] N. C. Anderholm, Laser - Generated Stress Waves. Appl Phys Lett 16:113–111 , (1970).
- [7] P. Peyre, I. Chaieb, and C. Braham, FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels. IOPScienc, Model Simul Mater Sci Eng 15:205–221, (2007).
- [8] Y. Fang, Y. Li, W. He, Y. Lu, and P. Li, Numerical simulation of residual stresses fields of DD6 blade during laser shock processing, Materials & Design, Mater Des 43:170–176, (2013).
- [9] M. Ghaffarpour, H.n Moslemi Naeni, D. Akbari, Numerical and experimental investigation of the joint type effect on the heat created in weld metal in the pipe welded by high frequency induction welding, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 9, pp. 10- 24, 2020 (in Persian).
- [10] Y. Mirzaloo, P. Saraeian, E. Shakouri, M. Najafi, Experimental investigation on the effect of thickness, heating time and extrude direction on thermal shrinkage and thickness variations ABS sheet in vacuum forming process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 1- 9, 2020 (in Persian).
- [11] M.R. Karamooz, H. Rahmani, H. Khosravi, An

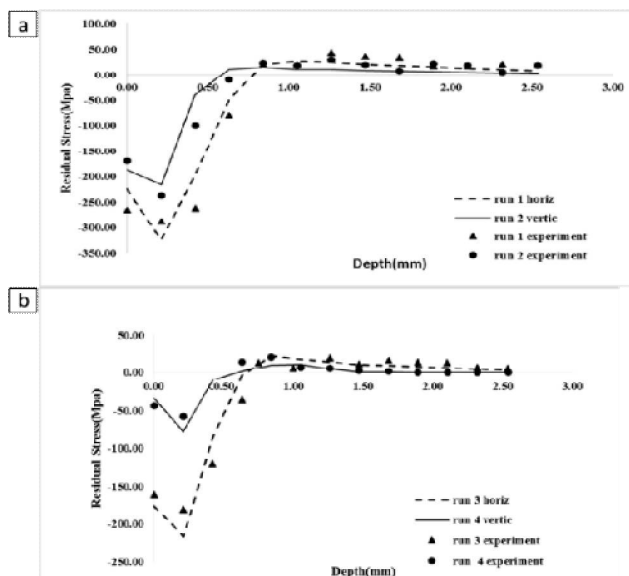


Fig. 11 Distribution of residual stresses along thickness resulted from FEA and Experiment a. for the run 1,2. b. for run 3,4

شکل 11 توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت اندازه‌گیری شده توسط دو روش عملی و شبیه‌سازی اجراهای a. او 2و 3. b و 4

بنابراین فرایند شوک‌دهی لیزری با انرژی 2 ژول و مسیر افقی دارای بیش‌ترین تنش پسماند فشاری و دارای بیش‌ترین عمق تنش پسماند فشاری است.

### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر پارامترهایی مانند انرژی و الگوی مسیر پالس لیزر بر تنش پسماند در فرایند شوک‌دهی لیزری به صورت عملی و شبیه‌سازی بررسی شد. این فرایند دارای مزیت‌هایی از جمله نفوذ در عمق بیشتر و همچنین دارای ناهمواری سطح کمتر، نسبت به روش‌های سنتی مانند ساچمه زنی است.

این نوع فرایند سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های نزدیک به سطح و تنش کششی در لایه‌های میانی خواهد شد. از روش شیارزنی برای محاسبه تنش پسماند استفاده شده است و نتایج روش شبیه‌سازی با روش عملی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل به صورت زیر می‌باشد:

- فرایند شوک‌دهی لیزری سبب ایجاد تنش پسماند فشاری می‌شود و همین مساله سبب افزایش عمر خستگی قطعه خواهد شد.
- ماکزیمم تنش پسماند فشاری در راستای ضخامت و در سطح در مسیر افقی در مقایسه با مسیر عمودی بیشتر است.
- افزایش انرژی سبب افزایش ماکزیمم تنش پسماند فشاری خواهد شد.
- عمق نفوذ در روش شوک‌دهی لیزری در مقایسه با



- Measurement Methods, (2013).
- [20] S. Golabi, M. R. Vakil, and B. Amirjalali, Multi-Objective Optimization of Residual Stress and Cost in Laser Shock Peening Process Using Finite Element Analysis and PSO Algorithm. *Lasers Manuf Mater Process.*, (2019).
- [21] A. Salimianrizi, E. Foroozmehr, M. Badrossamay, and H. Farrokhpour, Effect of Laser Shock Peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6. *Opt Lasers Eng* 77:112–117, (2016).
- [22] N. Hfaiedh, P. Peyre, H. Song, I. Popa, V. Ji, and V. Vignal, Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy. *Int J Fatigue* 70:480–489, (2015).
- [23] M. M. Shokrieh and S. Akbari R., Simulation of slitting method for calculation of compliance functions of laminated composites. *J Compos Mater* 46:1101–1109, (2012).
- [24] m. Beghini and I. Bertini, Residual stress modelling by experimental measurements and finite element analysis. *J Strain Anal Eng Des* 25:103–108, (1990)
- [25] D. Courapied, L. Berthe, P. Peyre, F. Coste, J.-P. Zou, and A.-M. Sautivet, Laser-delayed double shock-wave generation in water-confinement regime. *J Laser Appl* 27:S29101, (2015).
- [26] X. D. Ren et al., A finite element analysis of thermal relaxation of residual stress in laser shock processing Ni-based alloy GH4169. *Mater Des*, (2014).
- [27] J. Zhao, Y. Dong, and C. Ye, Laser shock peening induced residual stresses and the effect on crack propagation behavior. *Int J Fatigue* 100:407–417, (2017).
- [28] G. R. Johnson and W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *The 7th International Symposium on Ballistics. Proc. 7th Int. Symp. Ballist.*, (1983).
- experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of polymer matrix Kevlar-Basalt hybrid composites, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 6, pp. 44-55, 2020 (in Persian).
- [12] A. Mossayebi, E. Shakouri, B. Manafi, Numerical and Experimental Investigation of Performance of Styrene Butadiene Rubber, Polyurethane, and Polyvinyl chloride in Outsoles Fabrication, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 6, pp. 56- 64, 2020 (in Persian).
- [13] A. W. Warren, Y. B. Guo, and S. C. Chen, Massive parallel laser shock peening: Simulation, analysis, and validation, *International Journal of Fatigue* 30:188–197. (2008).
- [14] A. Vasu and R. V. Grandhi, Effects of curved geometry on residual stress in laser peening. *Surf Coatings Technol* 218:71–79. *surfcoat.*, (2013)
- [15] A. Vasu, Y. Hu, and R. V. Grandhi, Differences in plasticity due to curvature in laser peened components. *Surf Coatings Technol* 235:648–656. *surfcoat*, (2013).
- [16] I. Alinaghian, M. Honarpisheh, and S. Amini, The influence of bending mode ultrasonic-assisted friction stir welding of Al-6061-T6 alloy on residual stress, welding force and macrostructure. *Int J Adv Manuf Technol.*, (2018).
- [17] I. Alinaghian, S. Amini, and M. Honarpisheh, Honarpisheh M (2018) Residual stress, tensile strength, and macrostructure investigations on ultrasonic assisted friction stir welding of AA 6061-T6. *J Strain Anal Eng Des*, (2018).
- [18] M. Alinaghian, I. Alinaghian, and M. Honarpisheh, Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method. *Int J Light Mater Manuf* 2:131–139, (2019).
- [19] G. S. Schajer, Practical Residual Stress