



بررسی عددی و تجربی تنش های پسماند ایجاد شده در آلیاژ Ti-6Al-4V در فرآیند شوکدهی لیزری

مهدی امیری

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

رضا شجاع رضوی

استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

مرتضی ایلانلو

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

چکیده

یکی از پدیده های مضر در قطعات صنعتی ایجاد ترک های خستگی است. یکی از بهترین راه ها جهت جلوگیری از گسترش این ترک ها، ایجاد تنش پسماند فشاری^۱ در قطعات می باشد. فرآیند سنتی که برای این کار استفاده می شود فرآیند ساچمه زنی^۲ است که علاوه بر داشتن مزایای مناسب، دارای محدودیت هایی است. فرآیند رقیبی که جهت ایجاد تنش پسماند فشاری به کار می رود، فرآیندی جدید و نوآورانه به نام فرآیند شوکدهی لیزری^۳ می باشد. هدف از انجام این تحقیق شوکدهی لیزری آلیاژ Ti-6Al-4V و شبیه سازی المان محدود^۴ فرآیند به منظور دستیابی به تنش پسماند فشاری مطلوب با عمق مناسب است. لذا برای این منظور مطابق یک طراحی آزمایش تعداد 1 تا 3 مرتبه عملیات شوکدهی لیزری با همپوشانی ضربات 50٪، 60٪ و 70٪ بر روی 9 عدد نمونه از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V انجام شد. سپس برای آگاهی از میزان تنش پسماند سطحی ایجاد شده در نمونه ها از آزمون پراش پرتو ایکس^۵ و جهت تعیین عمق نفوذ آن از آزمون سوراخکاری مرکزی^۶ استفاده گردید. همچنین جهت تعیین دقیق خواص مادی مخصوص به آلیاژ Ti-6Al-4V در نرخ کرنش بالا، آزمون میله هاپکینسون فشاری^۷ به کار گرفته شد و ثوابت جانسون کوک به صورت تجربی استخراج گردید. در ادامه جهت مشاهده وضعیت نمونه های شوکدهی شده تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۸ صورت گرفت. نتایج بررسی های حاصل از تحلیل عددی و تجربی نشان داد که حداکثر تنش پسماند سطحی تا 710MPa- و عمق نفوذ آن تا 1mm- رسیده است و یکنواختی میدان تنش در درصد همپوشانی 60٪ نیز بیشتر از دو درصد دیگر بود.

واژگان کلیدی: فرآیند شوکدهی لیزری، المان محدود، آزمون میله هاپکینسون، جانسون کوک.

1 Compressive Residual Stress

2 Shot Peening

3 Laser Shock Peening (LSP)

4 Finite Element Method (FEM)

5 XRD

6 Hole Drilling

7 Hopkinson Compression Rod

8 Scanning Electron Microscope (SEM)



1- مقدمه

یکی از راه‌های افزایش استحکام قطعات در برابر آسیب‌های خستگی، استفاده از تنش‌های پسماند فشاری است. این تنش‌های فشاری با تنش‌های کششی ناشی از اعمال بار به تعادل رسیده و باعث کاهش اثرات آنها شده که در نهایت باعث افزایش عمر قطعات می‌شود. در میان روش‌هایی که باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در سازه می‌گردد، فرآیند شوک‌دهی لیزری از مطلوب‌ترین روش‌ها جهت مقابله با پدیده‌های مرتبط با خستگی است. در این روش از پالس‌های لیزر با شدت بالا و مدت زمان کم جهت ایجاد شوک‌های فشاری با قدرت زیاد به عنوان بار اعمالی به قطعه فلزی استفاده می‌شود (Ding and Ye, 2006).

مطالعه در مورد فرآیند شوک‌دهی لیزری از دهه 1960 آغاز شد، اما تاریخچه شوک‌دهی لیزری آلیاژهای تیتانیوم از جمله آلیاژ Ti-6Al-4V به دهه 1970 باز می‌گردد. دکتر کلایر (Clauer, 1960) یکی از مخترعین اصلی تکنیک شوک‌دهی در دهه 1970 در آزمایشگاه باتل کلمبوس^۱ در ایالت متحده آمریکا بود. اولین مستندات در مورد اثرات مفید این فرآیند در سال 1972 منتشر گردید و پس از آن اولین ثبت اختراع در مورد شوک‌دهی لیزری در سال 1974 اعطاء شد و پس از آن مطالعاتی در مورد اثرات شوک‌دهی بر خواص ریزساختاری، مکانیکی و خستگی آلیاژهای تیتانیوم انجام شد.

بسیاری از محققان فرآیند شوک‌دهی لیزری آلیاژهای تیتانیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. برایستد و بروکمن (Braisted and Brockman, 1998) و همچنین ویو و همکارانش (Wu et al, 2010) یک شبیه سازی دوبعدی از فرآیند شوک‌دهی لیزری انجام دادند. هیو و همکارانش (Hu et al, 2008) استفاده از نقاط همپوشانی را مورد توجه قرار دادند. در پژوهش ژانگ و همکارانش (Zhang et al, 2015) میدان تنش پسماند در شوک‌دهی دوطرفه ورق آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفت. سخوادز و همکارانش (Sakhvadze et al, 2016) همگنی میدان تنش پسماند در اثر افزایش میزان درصد همپوشانی را مورد مطالعه قرار دادند. کومار و همکارانش (Kumar et al, 2020) در یک شبیه سازی شوک‌دهی چند مقیاسی با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف به توزیع تنش پسماند و تغییر شکل سطح پرداختند. در پژوهش سان و همکارانش (Sun et al, 2020) نیز بررسی عددی و تجربی فرآیند در به تأخیر انداختن رشد ترک خستگی و نقش تنش پسماند ایجاد شده در افزایش طول عمر خستگی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد توجه قرار گرفت. همچنین ژو و همکارانش (Zhou et al, 2022) در یک فرآیند ترکیبی شوک‌دهی لیزری و ساچمه زنی اثر تقویتی دو فرآیند را در یکپارچگی سطح و عمق تنش پسماند فشاری مورد بررسی قرار دادند.

نیاز به سیستم‌های گران قیمت با توان بالا برای دسترسی به یک تنش پسماند فشاری مؤثر از جمله مهمترین چالش‌های موجود در پژوهش‌های پیشین بود که در این مقاله با مرجع قرار دادن پژوهش‌های پیشین در بررسی تنش‌های پسماند در فرآیند شوک‌دهی لیزری؛ سعی شد با استفاده از یک لیزر با توان پایین و با بهره گیری از دو عامل مهم و تأثیرگذار درصدهای همپوشانی مناسب ضربات لیزر و دفعات شوک‌دهی بالاتر، نیاز به یک سیستم لیزری با توان بالا مرتفع گردد و به یک تنش پسماند قابل قبول و با عمق مناسب دست یابیم.

هدف از انجام پژوهش حاضر تحلیل عددی به وسیله نرم افزار آباکوس و همچنین بررسی تجربی تنش‌های پسماند ایجاد شده در آلیاژ پرکاربرد Ti-6Al-4V در فرآیند شوک‌دهی لیزری می‌باشد.

2- روش تحقیق

این مقاله شامل دو بخش تحلیل عددی و آزمایشات تجربی است. در قسمت تحلیل عددی هندسه قطعه، خواص ماده، تحلیل-های دینامیکی انجام گرفته در نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی فرآیند شوک‌دهی لیزری و مدل سازی تنش‌های پسماند، بارگذاری انجام گرفته، امان بندی و شرایط مرزی قطعه بررسی می‌گردد. در قسمت مربوط به آزمایشات تجربی نیز مواد اولیه،



تجهیزات و روند آزمایش‌های تجربی، طراحی آزمایش صورت گرفته و آزمون‌های ارزیابی و مشخصه یابی بعد از انجام فرآیند شوک‌دهی لیزری توضیح داده خواهد شد.

2-1- تحلیل عددی

1-1-2 هندسه مدل

به عنوان نخستین مرحله در شبیه‌سازی ابعاد هندسه مدل با در نظر گرفتن شرایط واقعی آزمایش و با توجه به محدودیت ابعاد قابل اندازه‌گیری به روش پراش پرتو ایکس $17 \times 17 \times 6$ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

2-1-2 خواص ماده

در فرآیند شوک‌دهی لیزری یک نیروی بسیار زیاد (چندین گیگاپاسکال) در یک زمان بسیار کوتاه (چندین نانوثانیه) بر جسم اعمال می‌شود و در نتیجه پاسخ بسیار سریع ماده منجر به نرخ کرنش بسیار بالا در حدود 10^6 s^{-1} در این واکنش می‌گردد. بنابراین یکی از نکات بسیار مهم در شبیه‌سازی مدل کردن دقیق رفتار ماده با در نظر گرفتن نرخ کرنش است. مدل جانسون کوک یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در مدل‌سازی پدیده‌های دارای نرخ کرنش بالا مانند برخورد و ضربه است. در این مدل جریان تنش به صورت حاصل ضرب سه ترم مشخص می‌شود که به ترتیب توصیف کننده کرنش سختی، وابستگی به نرخ کرنش و وابستگی دما می‌باشند. در معادله (1) مدل جانسون-کوک مشاهده می‌شود:

$$\sigma = [A + B\dot{\epsilon}^n][1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}][1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

در این معادله $\dot{\epsilon}$ و $\dot{\epsilon}_0$ کرنش پلاستیک و نرخ کرنش واکنش، T_r دمای محیط، T_m دمای ذوب جسم و A ، B ، n ، C ، $\dot{\epsilon}_0$ ثوابتی هستند که به صورت تجربی از طریق آزمون میله هاپکینسون برای نرخ کرنش‌های بالای 10^4 s^{-1} به دست می‌آیند. پارامتر A تنش تسلیم اولیه در دمای اتاق و B مدول کرنش سختی می‌باشد. پارامتر n توان کرنش سختی، پارامتر C حساسیت به نرخ کرنش و پارامتر m نرم شوندگی حرارتی را لحاظ می‌کنند. جهت مدل کردن خواص ماده در نرم افزار نیاز به وارد کردن خواص الاستیک و پلاستیک ماده است. لازم به ذکر است که این خواص به صورت تجربی و مخصوص آلیاژ Ti-6Al-4V مورد استفاده در این پژوهش و از طریق آزمون هاپکینسون فشاری استخراج شده است.

الف) خواص الاستیک

خواص الاستیک آلیاژ Ti-6Al-4V شامل چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1 خواص الاستیک ماده

چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
4500	105	0.342

ب) خواص پلاستیک

مطالعات مختلف نشان داده است که ترم حرارتی مدل جانسون-کوک در واکنش شوک‌دهی لیزری قابل چشم‌پوشی است (Hu et al, 2008). سایر ضرایب این واکنش، با استفاده از نتایج آزمون میله هاپکینسون فشاری برای نمونه‌های مورد استفاده در تست، به صورت تجربی استخراج شده و در جدول ۲ بیان شده است. با توجه به اینکه مقادیر این ضرایب برای یک جنس خاص در مقالات مختلف، متفاوت از یکدیگر است. لذا استخراج تجربی این ضرایب برای نمونه‌های استفاده شده در آزمون، یکی از نقاط قوت این پژوهش محسوب شده و سبب افزایش دقت نتایج می‌گردد.

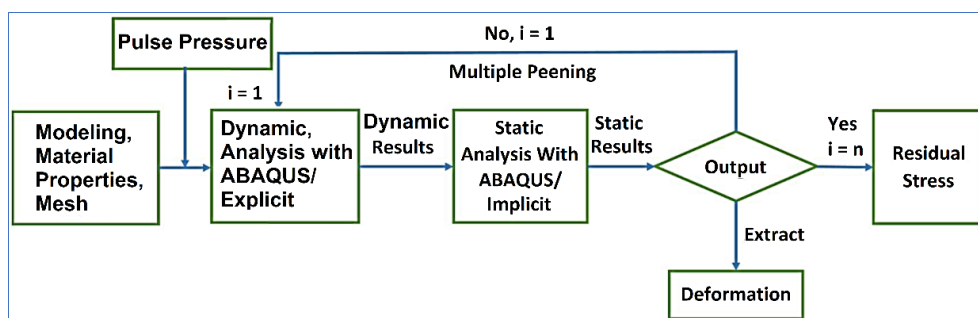


جدول 2 خواص پلاستیک ماده

A(Mpa)	B(MPa)	n	m	T ₀ (K)	T _m (K)	C	ε ₀
937	595	0.82	1.1	298	1870	0.0198	1

3-1-2 تحلیل دینامیکی

همان گونه که اشاره شد فرآیند شوک دهی لیزری دارای دو مرحله متفاوت است. در مرحله اول یک فشار بسیار زیاد در مدت زمان بسیار کم به قطعه اعمال می شود و ماده در آن منطقه وارد ناحیه پلاستیک می شود. در مرحله دوم که مدت زمان بیشتری طول می کشد، بایستی به قطعه زمان داده شود تا تعادل تنش ها درون آن ایجاد شود و تنش پسماند درون قطعه باقی بماند. جهت مدل سازی مرحله اول با توجه به زمان بسیار کوتاه آن از تحلیل دینامیک اکسپلیسیت در نرم افزار آباکوس استفاده می شود. اما در مرحله دوم با توجه به زمان بسیار بیشتر، الگوریتم اکسپلیسیت یک مقدار زمانبر است و مدت زمان زیادی طول می کشد تا تنش ها به تعادل برسند. به همین دلیل از یکی از الگوریتم های آباکوس استاندارد یا الگوریتم ایمپلیسیت (ضمنی) برای مرحله دوم استفاده می شود. الگوریتم مربوط به تحلیل های دینامیکی صورت گرفته در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل (1) الگوریتم اکسپلیسیت-ایمپلیسیت برای محاسبه تنش پسماند

بعد از مرحله اول یعنی تحلیل اکسپلیسیت، نتایج حاصل به صورت تنش اولیه و میدان از پیش تعریف شده¹ وارد مرحله دوم یعنی آباکوس استاندارد یا تحلیل ایمپلیسیت شده و با استفاده از تحلیل استاتیک یا شبه استاتیک، تنش پسماند درون ماده مشخص می شود که استفاده از الگوریتم شبه استاتیک ایمپلیسیت انطباق پذیری بیشتری با نتایج تحلیل مرحله اول داشته و در این پژوهش نیز از الگوریتم ایمپلیسیت برای مرحله دوم استفاده شده است.

4-1-2 بارگذاری

الف) توزیع زمانی بارگذاری

نکته بسیار مهم توزیع زمانی و مکانی بارگذاری است که یک عامل مؤثر جهت شبیه سازی است. در روش تحلیلی از مدل یک بعدی فابرو و همکارانش (Fabbro et al, 1990)، جهت تعیین فشار اوج مطابق رابطه 2 استفاده می شود:

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \times \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \times \sqrt{Z(\text{g/cm}^2\text{s}^2)} \times \sqrt{I_0(\text{GW/cm}^2)} = 5.32 \text{ GPa} \quad (2)$$

در رابطه بالا I_0 چگالی توان لیزر، Z امپدانس شوک بین ماده تحت برخورد لیزر و لایه شفاف و α بازده واکنش است و عموماً مقداری بین 0.1 تا 0.4 دارد و برای آلیاژ Ti6Al4V مقدار آن 0.25 می باشد.

**ب) توزیع مکانی بارگذاری**

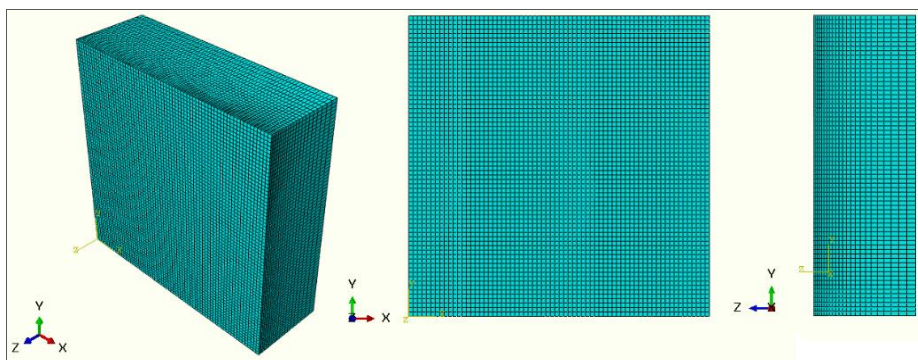
یکی دیگر از نکات مهم در تخمین بار فشاری، تعیین توزیع مکانی بارگذاری زیر سطح لیزر است. زیرا فشار عمدتاً به صورت یکنواخت در زیر لکه لیزر توزیع نمی‌شود. تابعی که عمدتاً برای تخمین توزیع زمانی و مکانی فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت رابطه 3 می‌باشد و به رابطه گوسی فشار مشهور است (Hu and Grandhi, 2012).

$$P(r, t) = P(t) \exp \frac{-r^2}{2R^2} \quad (3)$$

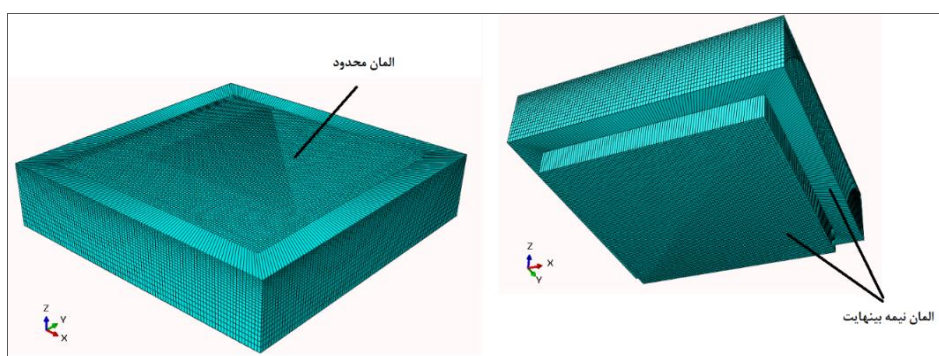
جهت اعمال بار فشاری در ناحیه شوک‌دهی شونده از سابروتین VDLOAD استفاده می‌شود. این سابروتین مختص اعمال بار متغیر نسبت به زمان و مکان در تحلیل دینامیک اکسپلیسیت است. لازم به ذکر است که برای این سابروتین نویسی نیاز به لینک کردن سه نرم افزار آباکوس، ویژوال استدیو و فورترن می‌باشد که باید نسخه های این سه نرم افزار نیز با هم سازگار باشند. لذا در این پژوهش جهت تحلیل عددی و استفاده از سابروتین VDLOAD نسخه های Abaqus 2021 و Visual Studio 2019 و Intel Parallel Studio 2020 با یکدیگر لینک شدند.

5-1-2 المان بندی و شرایط مرزی

در برخی از تحلیل‌های عددی اطراف قطعه کار توسط المان‌های نیمه بینهایت پوشانده می‌شود این المان‌ها از بازتاب امواج منتشر شده از لبه های قطعه کار جلوگیری می‌کنند، برخی تحلیل‌ها نیز فقط از المان‌های محدود در کل مدل استفاده می‌کنند. برای درک اینکه کدام شبیه سازی مطلوب‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است و همگنی میدان تنش در کدام تحلیل بیشتر است در این مقاله شبیه سازی به هر دو صورت مدل بدون المان‌های نیمه بینهایت (مدل الف) و مدل دارای المان‌های نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار (مدل ب) صورت گرفته است و نتایج هر دو مدل الف و ب جهت مقایسه در کنار یکدیگر قرار داده شده است.



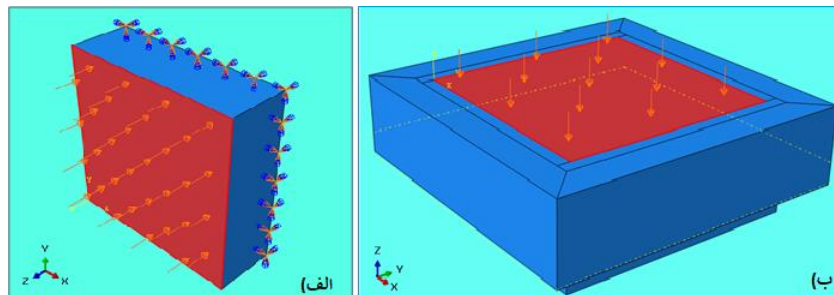
شکل (2) شماتیک المان بندی مدل الف



شکل (3) المان بندی مدل ب (مدل مطلوب)



شرایط مرزی در فرآیند شوک‌دهی لیزری برای مدل (الف) به این صورت است که سطح زیر قطعه کار ثابت در نظر گرفته می‌شود و بقیه صفحات به صورت آزاد در نظر گرفته شده و قیدی به آنها اعمال نمی‌شود. همچنین بارگذاری فشاری بر سطح رویی قطعه کار اعمال می‌شود. این در حالی است که برای مدل ب به دلیل استفاده از المان نیمه بینهایت در پشت قطعه کار، نیازی به ثابت کردن پشت مدل نیست. همچنین همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، بارگذاری به ناحیه محدود وسط مدل اعمال می‌شود.



شکل (4) بارگذاری و شرایط مرزی در دو مدل الف و ب

2-2- آزمایشات و اعتبارسنجی تجربی

2-2-1 مواد اولیه

در این پژوهش قطعه کار از جنس Ti-6Al-4V، با ترکیب آلیاژی وانادیوم و آلومینیوم انتخاب شد. دلیل انتخاب این ماده این است که این ماده به علت داشتن مقاومت مکانیکی بالا و وزن کم، پرکاربردترین رده آلیاژی تیتانیوم در صنایع مختلف می‌باشد، همچنین در صنایع هوافضا کارایی بسیاری دارد و شوک‌دهی لیزری این آلیاژ پرکاربرد می‌تواند بر خواص مکانیکی و قابلیت‌های ممتاز آن بیفزاید. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 3 ترکیب درصد شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V

Titanium Grade 5 (Ti-6Al-4V)							
Ti%	H%	Fe%	C%	N%	O%	Al%	V%
Balance	0.01 max	0.25 max	0.10 max	0.05 max	0.20 max	6 max	4 max

2-2-2 تجهیزات و روند آزمایش‌های شوک‌دهی لیزری

الف) آماده سازی نمونه ها

ابتدا نمونه ها در واحد وایرکات به ابعاد $17 \times 17 \times 6$ برش کاری شد و سپس جهت اطمینان از عدم وجود هر گونه تنش پسماند در آنها، نمونه ها جهت تنش زدایی ارسال و مطابق سیکل تنش زدایی مخصوص آلیاژ Ti-6Al-4V در کوره خلأ و در دمای 650 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 ساعت در مجاورت گاز آرگون قرار گرفت و سپس به آرامی در کوره سرد گردید.

ب) انتخاب پوشش جاذب و لایه شفاف

در این آزمون از نوارچسب پلیمری به عنوان پوشش جاذب جهت محافظت سطح از پلاسما و جذب بهتر پرتو لیزر استفاده شد. این نوع پوشش که بیشتر از جنس PVC می‌باشد به خوبی روی سطح نشسته و چون نقطه ذوب و تبخیر کمی دارند و آلودگی کمی ایجاد می‌کنند پوشش بسیار مناسبی به شمار می‌روند. همچنین جهت محدود کردن پلاسمای ایجاد شده و افزایش دامنه فشار آن از یک لایه آب جاری به ضخامت تقریبی 2 میلی‌متر بر روی نمونه ها حین شوک‌دهی لیزری استفاده گردید.

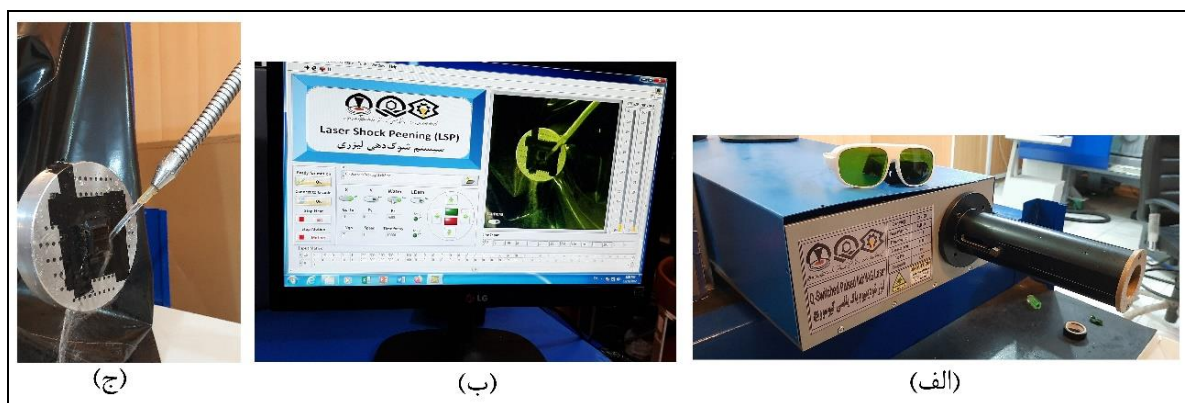


ج) دستگاه شوک‌دهی لیزری

در شکل (5) لیزر مورد استفاده در دانشگاه مالک اشتر تهران به همراه اجزای آن جهت عملیات شوک‌دهی لیزری نشان داده شده است. لیزر مذکور عبارت است از یک لیزر نئودیمیم یوگ پالسی کیوسوویچ با طول موج 1064 nm و توان 1 J و عرض پالس 10 ns و مجهز به اسکنر هد قابل کنترل توسط کامپیوتر، که مشخصات این لیزر در جدول 4 آمده است.

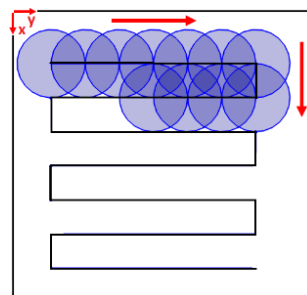
جدول 4 مشخصات لیزر استفاده شده در فرآیند شوک‌دهی لیزری

عرض پالس	فرکانس پالس	توان دستگاه	قطر پرتو
10 ns	1 Hz	1 J	1 mm



شکل (5) الف) لیزر نئودیمیم یوگ پالسی کیوسوویچ ب) سیستم کامپیوتری (نرم افزار آزمایشگاهی) فرآیند شوک‌دهی لیزری ج) سیستم نگهدارنده قطعه کار به همراه قطعه نصب شده روی آن و آب به عنوان لایه شفاف

مراحل انجام آزمایش شوک‌دهی لیزری بدین صورت است که ابتدا قطعه ای که بر روی آن پوشش جاذب قرار داده شده است روی سیستم نگهدارنده دستگاه نصب می‌شود، سپس توسط یک تراز سطح بالایی آن تراز می‌گردد. سپس نقطه پرتو لیزر را در محل شروع شوک‌دهی لیزری در گوشه بالا و سمت چپ قطعه کار تنظیم کرده و با در نظر گرفتن درصد همپوشانی مورد نظر و با توجه به قطر پرتو لیزر، مسیر اسکن حرکت لیزر را در نرم افزار آزمایشگاهی شوک‌دهی لیزری مطابق شکل شماره (6) برنامه ریزی می‌کنیم. در ادامه با اجرای فرمان شروع در نرم افزار، کار شوک‌دهی لیزری طبق مسیر اسکن شروع شده و سیستم آبرسانی نیز فعال می‌گردد. در اتمام کار مشاهده می‌شود که پوشش جاذب بر اثر ضربات لیزر آسیب دیده و سطح نمونه‌ها را از آسیب محافظت کرده است.



شکل (6) مسیر اسکن زیگزاگ جهت حرکت لیزر

**(د) طراحی آزمایشات تجربی**

در آزمایشات صورت گرفته دو پارامتر درصد همپوشانی و تعداد تکرار ضربه (تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری) قابل کنترل بوده و سایر پارامترهای انرژی پالس، عرض پالس و قطر پرتو لیزر همه در مقادیر حدی خود قرار دارند و استفاده از این پارامترهای تنظیم شده دستگاه باعث می‌شود تا امکان ایجاد پلاسمای فشار بالا و ایجاد تنش پسماند فشاری وجود داشته باشد.

جدول 5 طراحی آزمایش صورت گرفته برای فرآیند شوک‌دهی لیزری

شماره	قطر لکه لیزر	عرض پالس لیزر	انرژی پالس	درصد همپوشانی ضربات لیزر	تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری
1	1 mm	10 ns	1 j	50%	1
2	1 mm	10 ns	1 j	60%	1
3	1 mm	10 ns	1 j	70%	1
4	1 mm	10 ns	1 j	50%	2
5	1 mm	10 ns	1 j	60%	2
6	1 mm	10 ns	1 j	70%	2
7	1 mm	10 ns	1 j	50%	3
8	1 mm	10 ns	1 j	60%	3
9	1 mm	10 ns	1 j	70%	3

با توجه به اطلاعاتی که در جدول 5 داده شده است جهت بررسی تأثیر پارامترهای همپوشانی ضربات لیزر و تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری، سه مقدار همپوشانی 50%، 60% و 70% و تعداد دفعات 1، 2 و 3 مرتبه شوک‌دهی لیزری در نظر گرفته شد و مطابق این طراحی آزمایش، 9 نمونه آلیاژ Ti-6Al-4V به ترتیب تحت عملیات شوک‌دهی لیزری قرار گرفتند.

2-2-3 آزمون‌های ارزیابی و مشخصه یابی**الف) اندازه‌گیری تنش پسماند**

اندازه‌گیری تنش پسماند روش‌های گوناگونی دارد. روش‌هایی مانند اندازه‌گیری توسط سوراخکاری مرکزی یا اندازه‌گیری به روش پراش پرتو ایکس، مهم‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری اند. در این تحقیق از روش پراش پرتو ایکس که یک روش غیر مخرب است برای اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح و از روش سوراخکاری مرکزی که روشی نیمه مخرب است برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق نمونه‌ها استفاده گردید.

ب) تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

بعد از شوک‌دهی لیزری نمونه‌ها جهت تشخیص عیوب احتمالی در راستای سطح و عمق، ابتدا نمونه‌ها از وسط برش خورده و در راستای برش مطابق شکل 7 در مانت قرار گرفتند. سپس سطح آن‌ها توسط سنباده‌های نرم (1000 و 2000) به خوبی پرداخت شد و سپس سطح مانت با پوشش طلا لایه نشانی گردید. در نهایت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری با بزرگنمایی 200X، 1000X و 2000X از مقطع نمونه‌ها در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران تهیه گردید.

**شکل (7) مقاطع مانت شده و پولیش خورده جهت آزمون میکروسختی****ج) آزمون میله‌ها پکینسون فشاری**



جهت به دست آوردن منحنی تنش-کرنش دینامیکی آلیاژ Ti-6Al-4V در نرخ کرنش بالا و همچنین استخراج ثوابت مادی جانسون کوک از آزمون میله هاپکینسون فشاری متعلق به آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی سینای همدان استفاده شد.



شکل (8) نمایی از دستگاه میله هاپکینسون فشاری

3- نتایج و بحث

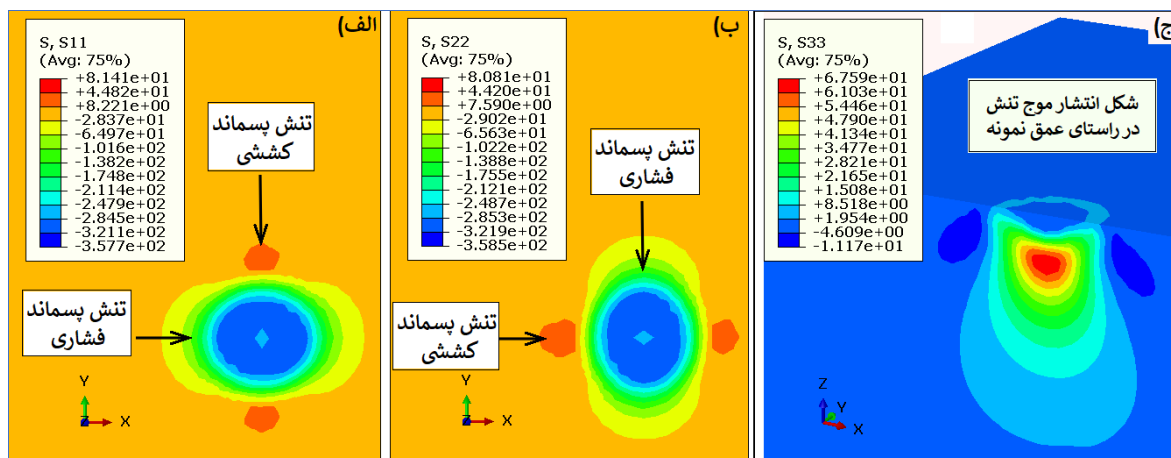
3-1- بررسی عددی تنش پسماند و مقایسه با نتایج تجربی

3-1-1- بررسی تک شات و تأثیر شات‌های مجاور لیزر

در این مقاله برای تخمین بارگذاری فشاری از یک بارگذاری مثلثی با زمان فشار 4 برابر زمان لیزر یعنی 40ns و بیشینه فشار 5.32 Gpa استفاده شد. همچنین حداقل فاصله زمانی بین ضربات متوالی در تحلیل صریح دینامیکی 10^{-5} ثانیه انتخاب گردید که اساس بدست آوردن این زمان به صفر نزدیک شدن انرژی تغییر شکل الاستیک و همچنین ثابت ماندن انرژی تغییر شکل پلاستیک بود. پس نتیجه گرفته شد که این زمان برای افتادن تمامی کرنش‌های الاستیک و پلاستیک کافی می‌باشد و به ما امکان شبیه‌سازی ضربات متوالی تثبیت شده را می‌دهد.

الف) بررسی تک شات لیزر

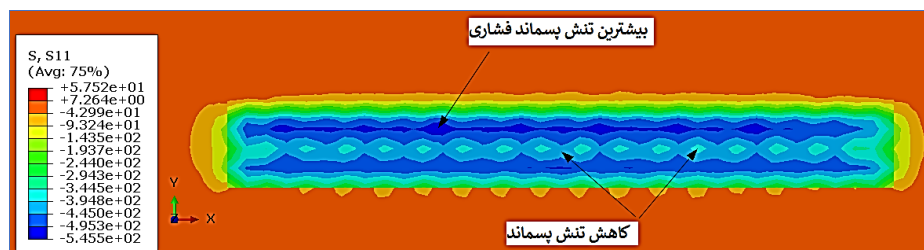
در شکل 9 کانتور تنش پسماند برای تک شات لیزر در سه راستای X، Y و Z نشان داده شده است. همانگونه که در قسمت الف مشخص است، بعد از برخورد پالس لیزر، درون ناحیه برخورد یک تنش فشاری متقارن (S11) ایجاد می‌شود که بیشترین مقدار آن حدوداً 357- مگاپاسکال است. اما نکته حائز اهمیت اطراف ناحیه لیزرخورده است. در اطراف ناحیه لیزرخورده دو نوع تنش مختلف قابل مشاهده است. در سمت چپ و راست لیزر یا به نوعی در راستای X تنش پسماند فشاری حدودی 100- مگاپاسکال ایجاد شده است که مفید است. اما در ناحیه بالا و پایین لیزر یا در راستای محور Y یک ناحیه با تنش پسماند کششی به اندازه حدوداً 81+ مگاپاسکال ایجاد شده است که مضر می‌باشد. شرایط مشابهی در قسمت ب برای S22 در راستای Y نیز مشاهده می‌شود همچنین در قسمت ج نیز انتشار موج تنش پسماند در راستای عمق نمونه نشان داده شده است.



شکل (9) کانتور تنش پسماند برای تک شات لیزر در سه راستای X، Y و Z

(ب) بررسی چند شات کنار هم در دو سطر

اگر جهت حرکت لیزر در راستای محور X بوده و شات اول در گوشه پایین ناحیه شوک‌دهی لیزری برخورد کند و شات بعدی بدون همپوشانی با شات اول و در کنار آن برخورد کند، با توجه به این که طول این ناحیه 17 میلی‌متر و قطر هر شات 1 میلی‌متر است نهایتاً 17 شات در یک سطر ایجاد می‌شود. حال اگر مطابق شکل 10 یک سطر لیزر به دو سطر افزایش یابد و سطر دوم در بالای سطر اول و بدون همپوشانی با سطر قبل برخورد کند تنش‌های کششی موجود در پایین پالس‌های سطر دوم منجر به تضعیف تنش‌های پسماند فشاری در سطر اول می‌شود. بنابراین افزودن سطرهای جدید می‌تواند کمی منجر به تضعیف تنش پسماند فشاری در سطرهای قبلی شود و به همین دلیل در سطوح گسترده مشاهده می‌شود که یک سمت قطعه تنش بیشتری از سمت دیگر آن دارد و تنش در کل سطح یکنواخت نیست.



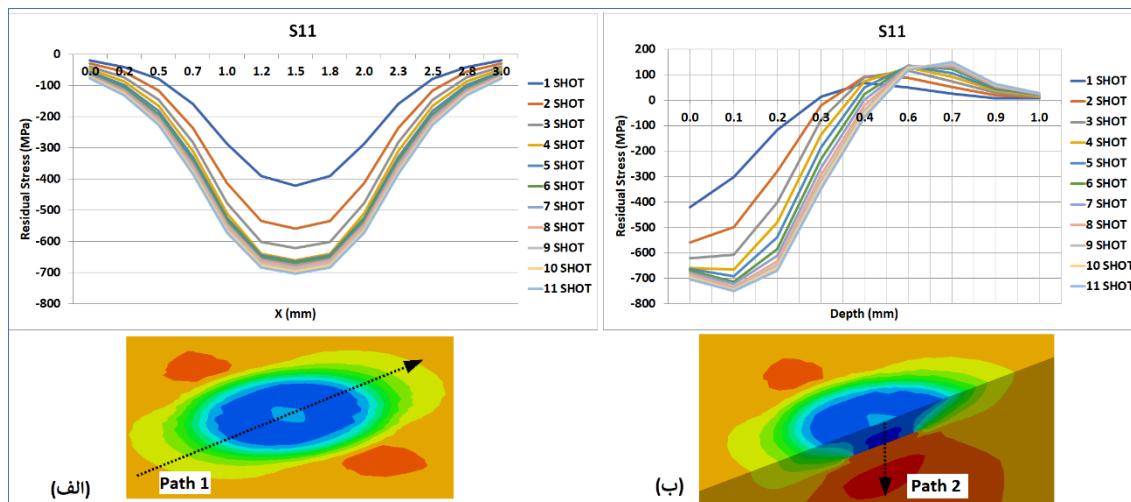
شکل (10) کانتور تنش پسماند S11 بعد از دو سطر شوک‌دهی لیزری

(د) بررسی تعداد دفعات شوک‌دهی برای تک شات لیزر

جهت دسترسی به تنش‌های پسماند با عمق بیشتر نیاز به بیش از یکبار استفاده از عملیات شوک‌دهی لیزری می‌باشد. لذا همان‌گونه که در شکل 11 مشاهده می‌شود شبیه سازی تک شات لیزر برای تعداد یک تا یازده مرتبه شوک‌دهی لیزری در یک نقطه انجام و نمودار تنش پسماند در سطح نمونه برای هر یک مطابق (شکل الف) و برای عمق تنش مطابق (شکل ب) رسم گردید. این بررسی نشان داد که افزایش تنش پسماند سطحی تا 4 مرتبه شوک‌دهی قابل ملاحظه بوده و بعد از آن، مقدار افزایش بسیار ناچیز می‌باشد. همچنین بعد از تکرار 4 مرتبه عملیات شوک‌دهی، عمق نفوذ تنش پسماند فشاری به 0.37 میلی‌متر رسید و در تعداد مراتب بالاتر این مقدار اندک بوده و نهایتاً بعد از 11 مرتبه شوک‌دهی عمق نفوذ به 0.48 میلی‌متر رسید.



در نتیجه به طور کلی ضربات متوالی در یک نقطه سبب افزایش مقدار و عمق تنش پسماند می شود، همچنین افزایش تعداد شات ها سبب افزایش سختی به دلیل سخت شدن چرخه ای می گردد ولی بیش از تعداد مشخصی تکرار فرآیند شوک دهی لیزری به صرفه نبوده و زیاد تأثیرگذار نیست.

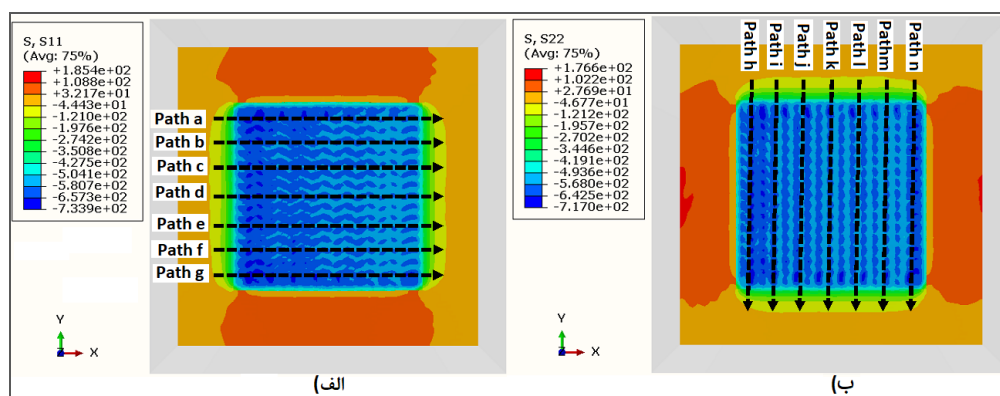


شکل (11) نمودار تنش پسماند سطحی و عمقی برای تک شات لیزر

3-1-2 نتایج شبیه سازی پالس های همپوشانی شده

(الف) نتایج شبیه سازی تنش پسماند سطحی و درصد نوسان میدان تنش پسماند

همان طور که در شکل 12 نشان داده شده مسیرهای رسم تنش پسماند در جهت X (a تا g) و Y (h تا n) نشان داده شده است. با توجه به اینکه در تست های تجربی انجام گرفته در این پژوهش، تنش های پسماند با روش سوراخکاری مرکزی و همچنین پراش پرتو ایکس اندازه گیری شده اند و از آنجا که می بایست نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه گردد، لذا بدست آوردن میانگین میدان تنش پسماند سطحی برای مقایسه با نتایج تجربی پراش پرتو ایکس و تنش پسماند موضعی در مرکز قطعه کار جهت مقایسه با نتایج تجربی سوراخکاری مرکزی ضروری است.

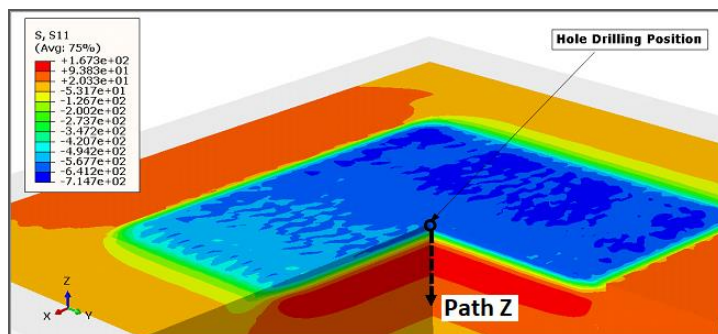


شکل (12) شبیه سازی المان محدود تنش پسماند سطحی ناشی از ضربات لیزر با قطر 1 میلی متر در فشار 5.32 گیگاپاسکال (الف) S11 در راستای محور X (Path a ~ g) (ب) S22 در راستای محور Y (Path h ~ n)

لذا به ترتیب با توجه به درصدهای همپوشانی 50٪، 60٪ و 70٪ و تعداد عملیات شوک دهی لیزری (یک، دو و سه مرتبه)

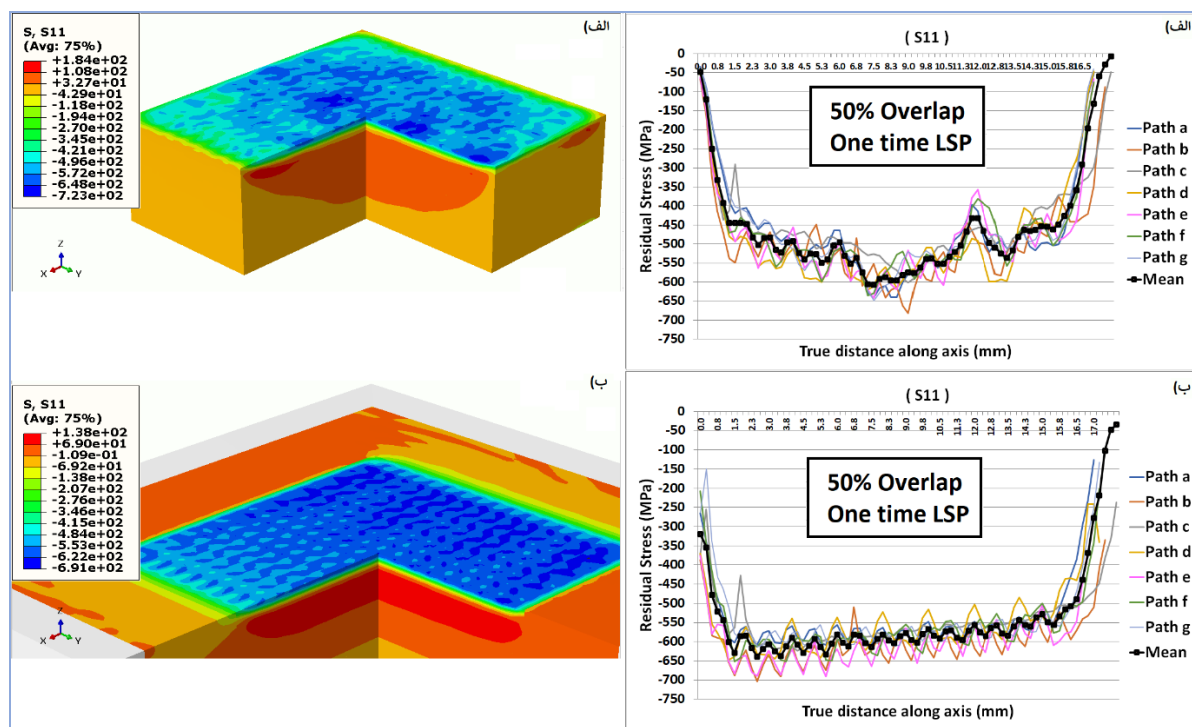


تنش‌های پسماند در شبیه‌سازی محاسبه شدند و نمودار تنش‌های پسماند سطحی در راستای مسیرهای مشخص شده در شکل 12 رسم شده و میانگین آن‌ها با نتایج پراش پرتو ایکس مقایسه گردید. همچنین برای بدست آوردن تنش پسماند در عمق قطعه کار و با توجه به اینکه موقعیت اندازه‌گیری تنش پسماند در روش سوراخکاری مرکزی در مرکز قطعه کار بوده لذا مسیری در راستای عمق قطعه کار مطابق شکل 13 در نظر گرفته شد تا تغییرات تنش پسماند در راستای عمق و همچنین حداکثر عمق نفوذ تنش پسماند فشاری نشان داده شود.



شکل (13) شبیه‌سازی المان محدود تنش پسماند در عمق در راستای محور Z (Path Z)

برای اینکه مشخص شود کدام مدل شبیه‌سازی (مدل الف: بدون مرز نیمه بینهایت در اطراف و مدل ب: دارای مرز نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار) مناسب‌تر است و یکنواختی تنش پسماند در سطح قطعه کار در کدام مدل بیشتر است، نتایج برای هر دو مدل در کنار یکدیگر آورده شده است تا در نهایت بتوان از این نتایج برای مقایسه با نتایج تجربی پراش پرتو ایکس استفاده کرد. کانتورهای تنش پسماند سطحی S_{11} برای دو مدل الف و ب و همچنین نمودارهای مربوطه در راستای سطح قطعه کار در شکل 14 نشان داده شده است.



شکل (14) کانتور تنش پسماند سطحی برای درصد همپوشانی 50٪ و یکبار شوک‌دهی لیزری در مدل الف و مدل ب



لازم به ذکر است که کانتورهای تنش پسماند S₂₂ رسم نگردیده ولی نتایج آن در جدول 6 آورده شده است. مقایسه کانتورها و نمودارهای تنش پسماند سطحی برای درصد همپوشانی 50٪ با یکبار شوک‌دهی لیزری در مدل الف و ب به‌خوبی نشان می‌دهد که هنگامی که در شبیه سازی از المان‌های نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار استفاده شود میدان تنش پسماند سطحی بسیار یکنواخت‌تر از حالتی است که این المان‌ها به کار گرفته نمی‌شوند. نکته دیگر اینکه به علت تأثیر نواحی اطراف سطرهای مجاور مقدار تنش پسماند در یک سمت قطعه کار کمی بیشتر از سمت دیگر آن است. به همین دلیل می‌بایست میانگین تنش پسماند در سطح محاسبه گردد و مقدار میانگین این تنش‌ها با مقدار به دست آمده از نتایج پراش پرتو ایکس مقایسه گردد.

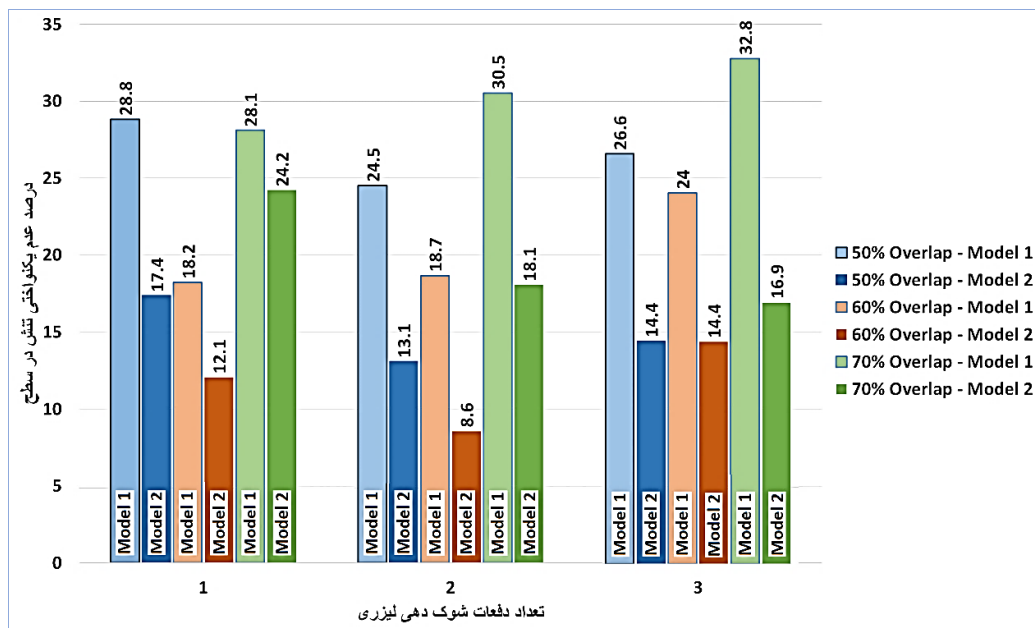
در جدول شماره 6 درصد نوسان (عدم یکنواختی) تنش پسماند سطحی برای هر دو مدل الف و ب برای درصدهای همپوشانی 50٪، 60٪ و 70٪ با یک، دو و سه بار شوک‌دهی لیزری بیان شده است. همچنین نمودار ستونی منطبق با این جدول در شکل 15 رسم گردیده است. با مقایسه نمودارهای مربوط به دو مدل الف و ب کاملاً مشهود است که یکنواختی میدان تنش پسماند در سطح قطعه کار در مدل (ب) بیشتر از مدل (الف) است در نتیجه از آنجا که یکی از اهداف شبیه سازی کمینه کردن درصد عدم یکنواختی است در نتیجه شبیه سازی به سبک مدل (ب) مطلوب‌تر می‌باشد و در ادامه نتیجه گیری‌هایی که می‌شود در خصوص مدل ب می‌باشد. همچنین با توجه به جدول شماره 6 مشاهده می‌شود که مقادیر درصد نوسان برای همپوشانی 60٪ کمتر از دو درصد دیگر است لذا نتیجه می‌شود که یکنواختی میدان تنش پسماند در همپوشانی 60٪ بیشتر است.

جدول 6 مقدار درصد نوسان تنش پسماند سطحی برای دو مدل الف و ب

الف) مدل بدون مرز نیمه بینهایت									
درصد همپوشانی	50٪			60٪			70٪		
تعداد دفعات شوک دهی	1	2	3	1	2	3	1	2	3
تنش پسماند سطحی	درصد عدم یکنواختی (نوسان) تنش پسماند سطحی								
S ₁₁	28.8	24.5	26.6	18.2	18.7	24	28.1	30.5	32.8
S ₂₂	22.9	30.5	32.5	24.9	20	24	33.9	29.3	31.2
ب) مدل دارای مرز نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار									
درصد همپوشانی	50٪			60٪			70٪		
تعداد دفعات شوک دهی	1	2	3	1	2	3	1	2	3
تنش پسماند سطحی	درصد عدم یکنواختی (نوسان) تنش پسماند سطحی								
S ₁₁	17.4	13.1	14.4	12.1	8.6	14.4	24.2	18.1	16.9
S ₂₂	7.1	6.7	10.1	11.8	12.5	13.8	16.2	11.0	6.9

لازم به ذکر است همان‌گونه که در رابطه 4 بیان شده است درصد عدم یکنواختی به صورت اختلاف بین قدر مطلق بیشترین تنش پسماند فشاری و کمترین تنش پسماند فشاری در المان‌های روی سطح به دست می‌آید.

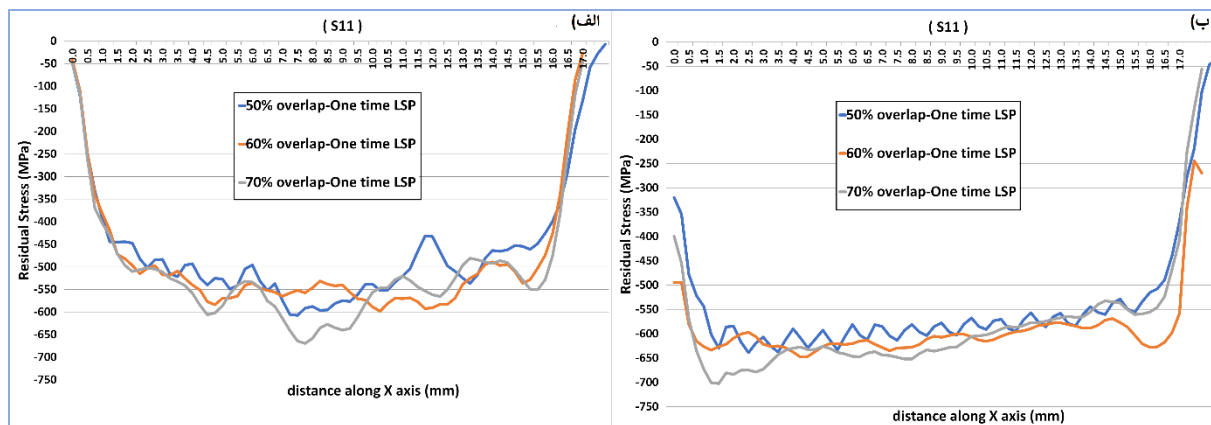
$$\Delta R = \frac{|S_{max}| - |S_{min}|}{|S_{max}|} * 100$$



شکل (15) نمودار مقایسه ای درصد عدم یکنواختی تنش پسماند سطحی برای دو مدل الف و ب



ب) تأثیر درصد همپوشانی بر تنش پسماند سطحی

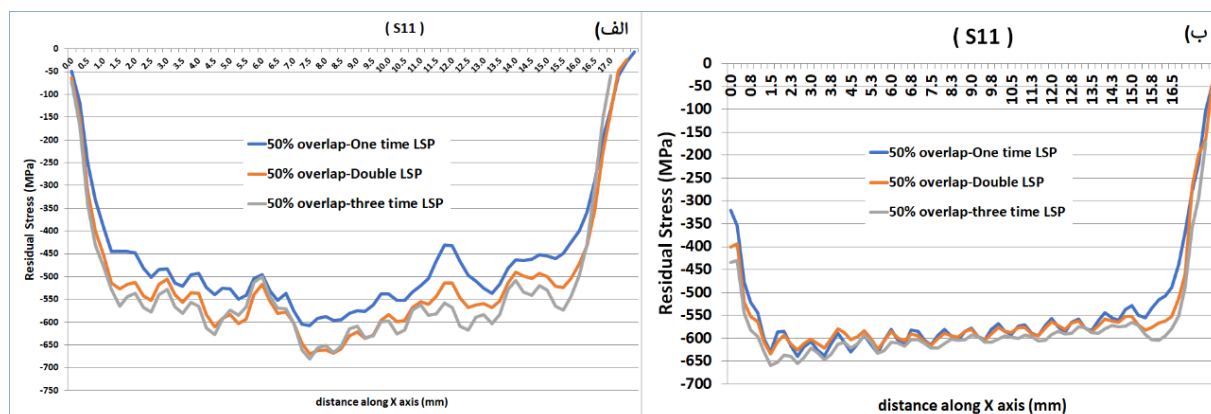


شکل (16) مقایسه نمودارهای میانگین برای همپوشانی 50، 60 و 70 درصد بعد از یکبار شوک‌دهی در حالت الف) مدل 1 ب) مدل 2

مقایسه بین درصدهای همپوشانی 50٪، 60٪ و 70٪ در نمودار ب شکل 16 نشان می‌دهد که با افزایش درصد همپوشانی، مقدار تنش پسماند سطحی پس از یکبار شوک‌دهی افزایش می‌یابد. این نتیجه در پژوهش لئو و همکاران (Luo et al, 2013) که با در نظر گرفتن همپوشانی‌های 30٪، 50٪ و 70٪ به توزیع تنش پسماند بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V پرداخته بودند نیز حاصل شده بود.

همچنین با مراجعه به جدول 6 و در مدل (ب) ملاحظه می‌گردد درصد عدم یکنواختی تنش پسماند برای همپوشانی 50٪ برابر 17.4 و برای 60٪ برابر 12.1 و برای 70٪ برابر 24.2 بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش درصد همپوشانی از 50٪ به 60٪ میدان تنش پسماند یکنواخت تر شده ولی با افزایش درصد همپوشانی به 70٪ مقدار نوسان بیشتر و میدان تنش ناهمگن‌تر می‌گردد.

ج) تأثیر تعداد دفعات شوک‌دهی بر تنش پسماند سطحی



شکل (17) مقایسه نمودارهای میانگین برای همپوشانی 50٪ با یک، دو و سه بار شوک‌دهی لیزری در حالت الف) مدل 1 ب) مدل 2

مقایسه بین تعداد دفعات 1، 2 و 3 بار شوک‌دهی برای همپوشانی 50٪ در نمودارهای شکل 17 نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی، مقدار تنش پسماند سطحی برای هر سه مورد تقریباً ثابت و به میزان خیلی کمی افزایش داشته است. در حالت کلی آنچه مسلم است این است که افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری در افزایش تنش پسماند سطحی نقش مهمی ندارد و همان‌طور که در ادامه مشاهده می‌شود باید نقش تعداد دفعات شوک‌دهی را در افزایش عمق تنش پسماند موثر



دانست.

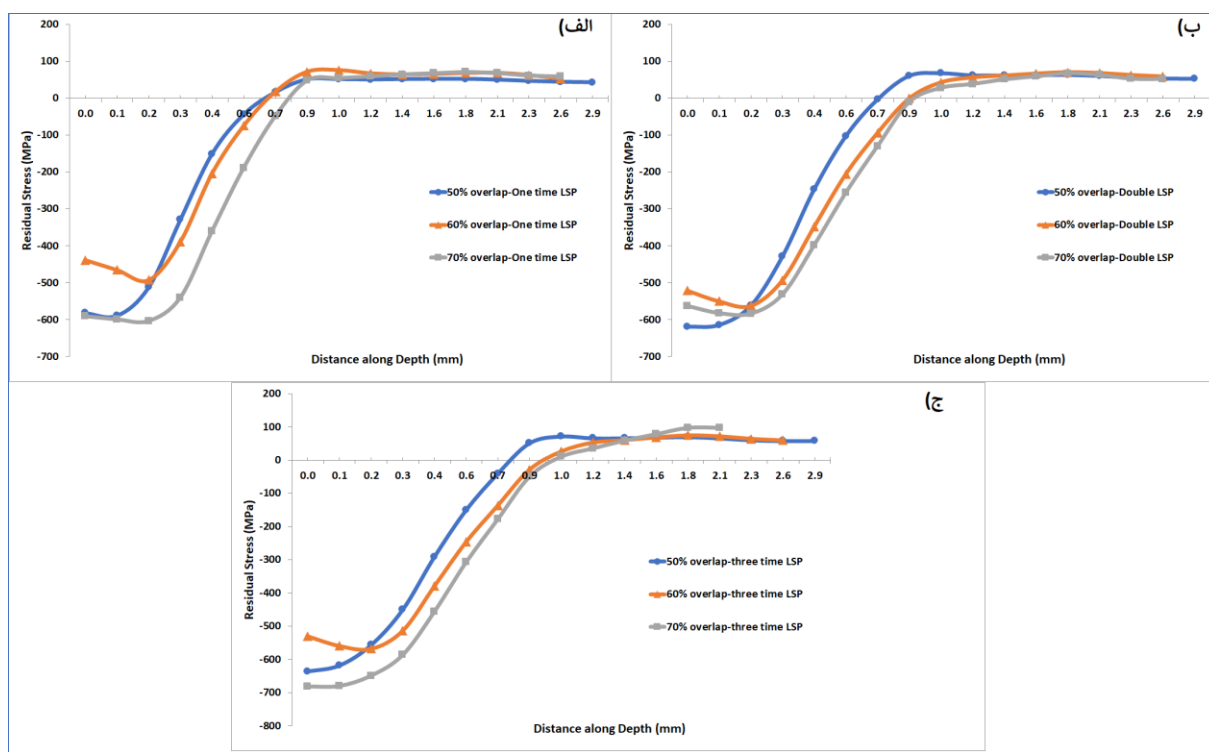
جدول 7 مقایسه نتایج تنش پسماند سطحی حاصل از تحلیل عددی برای دو مدل الف و ب و نتایج تجربی حاصل از آزمون XRD

Model 1	الف) مدل بدون مرز نیمه بینهایت								
درصد همپوشانی	۵۰٪			۶۰٪			۷۰٪		
تعداد دفعات شوک دهی	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
تنش پسماند سطحی	بیشترین تنش پسماند سطحی								
S ₁₁	-۶۰۷	-۶۶۹	-۶۸۱	-۵۹۸	-۶۲۷	-۶۶۶	-۶۶۹	-۶۰۶	-۶۴۷
S ₂₂	-۵۹۸	-۶۶۲	-۷۱۰	-۶۲۶	-۶۳۹	-۶۹۵	-۶۱۰	-۶۵۹	-۶۹۸
XRD	-۶۲۹	-۵۸۷	+۸۱۲	-۶۵۰	-۶۹۱	-۶۱۳	+۹۰۴	-۲۴۵	-۷۱۰
درصد اختلاف نتایج شبیه سازی و تجربی	۳.۵۶	۱۳	غیر عادی	۸.۳	۹.۷	۸.۳	غیر عادی	غیر عادی	۹.۳
Model 2	ب) مدل دارای مرز نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار								
درصد همپوشانی	۵۰٪			۶۰٪			۷۰٪		
تعداد دفعات شوک دهی	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
تنش پسماند سطحی	بیشترین تنش پسماند سطحی								
S ₁₁	-۶۳۹	-۶۳۴	-۶۵۹	-۶۴۷	-۶۳۱	-۶۵۵	-۷۰۲	-۶۷۵	-۶۶۲
S ₂₂	-۶۲۳	-۶۳۹	-۶۵۱	-۶۲۳	-۶۳۵	-۶۶۰	-۶۸۰	-۶۱۴	-۶۲۸
XRD	-۶۲۹	-۵۸۷	+۸۱۲	-۶۵۰	-۶۹۱	-۶۱۳	+۹۰۴	-۲۴۵	-۷۱۰
درصد اختلاف نتایج شبیه سازی و تجربی	۱.۵۸	۷.۷	غیر عادی	۰.۴۶	۹	۶.۶۲	غیر عادی	غیر عادی	۷

در جدول شماره 7 مقادیر تنش پسماند سطحی در دو راستای X و Y آورده شده و با نتایج تجربی پراش پرتو ایکس مقایسه شده است و درصد اختلاف تحلیل عددی و تجربی نیز بیان شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد انطباق مناسبی میان نتایج عددی و تجربی دیده می شود و بیشترین درصد اختلاف بین این نتایج در مدل (ب) که مدل مطلوب شبیه سازی است کمتر از 10 درصد می باشد.



د) تأثیر درصد همپوشانی بر عمق تنش پسماند



شکل (18) نمودار مقایسه ای عمق تنش پسماند برای همپوشانی 50٪، 60٪ و 70٪ با (الف) یک (ب) دو (ج) سه بار شوک‌دهی لیزری

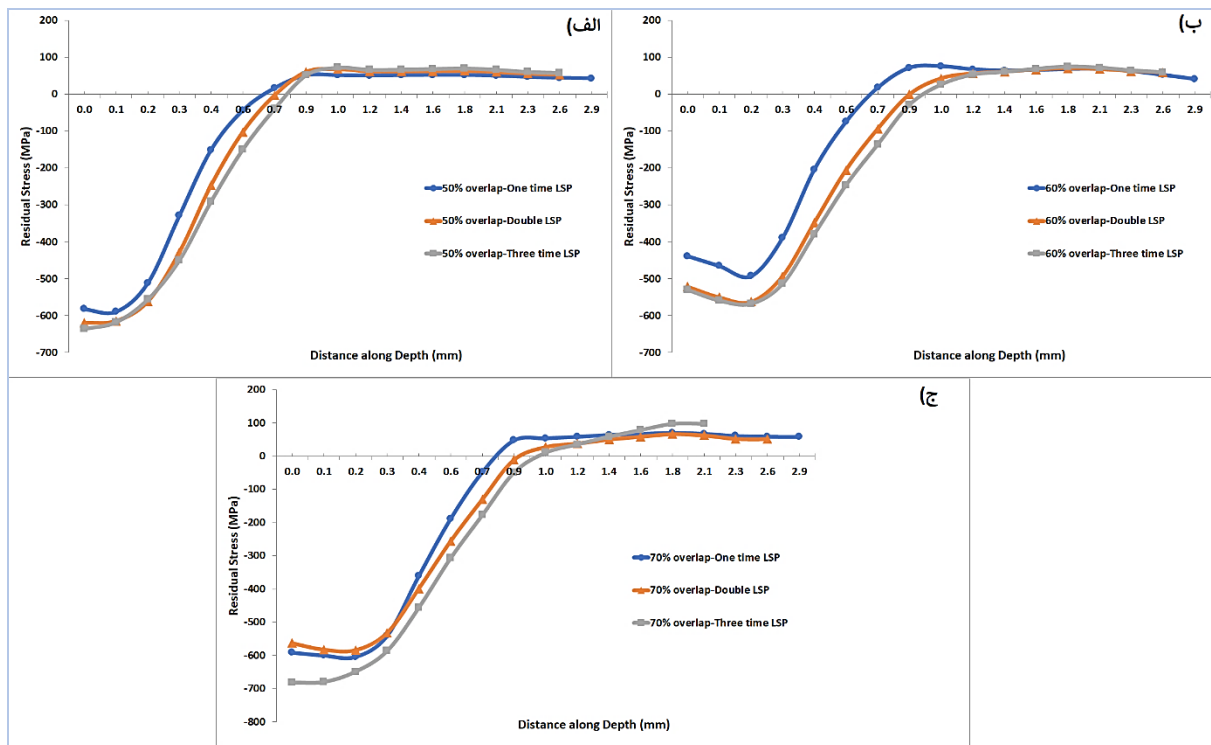
در شکل 18 قسمت الف و در یک بار شوک‌دهی عمق تنش در همپوشانی 50٪ و 60٪ تقریباً برابر است، در قسمت ب و در دوبار شوک‌دهی و همچنین قسمت ج و در سه بار شوک‌دهی عمق تنش در همپوشانی 60٪ و 70٪ تقریباً برابر است لذا می‌توان نتیجه گرفت درصد همپوشانی در افزایش عمق تنش پسماند نقش مهمی ندارد و نقش آن کم‌رنگ است. اما در شکل 19 قسمت الف و ب و ج مشاهده می‌شود که بعد از افزایش تعداد مراتب شوک‌دهی لیزری عمق تنش نیز افزایش داشته است در نتیجه می‌توان گفت نقش تعداد دفعات شوک‌دهی لیزری در افزایش عمق تنش پسماند پررنگ‌تر از درصد همپوشانی است.

در نمودار ستونی شکل 20 قسمت (الف) تغییرات عمق تنش پسماند برای همه نمونه‌ها نشان داده شده است در نتیجه با مقایسه این نمودار با نتایج حاصل از آزمون تجربی سوراخکاری مرکزی که در قسمت (ب) نشان داده شده است می‌توان به وضوح تأثیر افزایش تعداد دفعات شوک‌دهی در افزایش عمق تنش پسماند را مشاهده کرد. همان‌طور که در نمودار ستونی شکل 20 نشان داده شده است در همپوشانی 50٪ بعد از یکبار شوک‌دهی عمق تنش پسماند 0.65 میلی‌متر می‌باشد اما بعد از دوبار شوک‌دهی عمق تنش پسماند به 0.7 میلی‌متر رسیده است و در سه بار شوک‌دهی نیز این عمق به 0.8 میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. این بررسی برای درصد همپوشانی 60٪ نیز تأثیر افزایش عمق تنش پسماند را بعد از افزایش تعداد دفعات به 2 و 3 را نشان می‌دهد به طوریکه در یکبار شوک‌دهی عمق تنش پسماند به 0.67 میلی‌متر بوده و در دوبار شوک‌دهی این عمق به 0.9 میلی‌متر رسیده و در سه بار شوک‌دهی نیز عمق تنش پسماند به 0.95 میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. با بررسی درصد همپوشانی 70٪ نیز دیده می‌شود که بعد از یکبار شوک‌دهی عمق تنش پسماند به 0.8 میلی‌متر بوده و در دوبار شوک‌دهی این عمق به 0.92 میلی‌متر رسیده و در نهایت بعد از سه بار شوک‌دهی عمق تنش پسماند به 1 میلی‌متر افزایش پیدا کرده است. این نتیجه در پژوهش نای و همکاران (Nie et al, 2021) در بررسی عمر خستگی تیغه از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V نیز دیده شده بود. آن‌ها با در نظر گرفتن همپوشانی لکه‌های لیزر و همچنین تعداد 3 مرتبه شوک‌دهی لیزری به

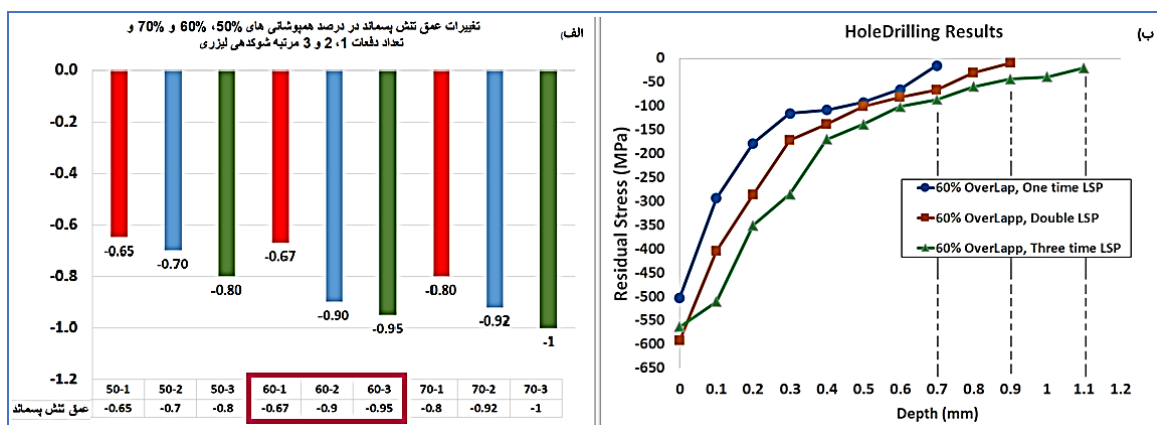


بیشترین تنش پسماند و بیشترین عمق مؤثر بر روی تیغه آلیاژی شوک‌دهی شده دست یافتند. مقایسه مقادیر عمق تنش پسماند برای درصد همپوشانی 60٪ در شکل 20 قسمت الف و مقایسه آن با عمق تنش در قسمت ب مشاهده می‌شود انطباق مناسبی بین حل عددی و روش تجربی سوراخکاری مرکزی مشاهده می‌شود.

(ه) تأثیر تعداد دفعات شوک‌دهی بر عمق تنش پسماند



شکل (19) نمودار مقایسه ای عمق تنش پسماند برای همپوشانی (الف) 50٪، (ب) 60٪، (ج) 70٪ با یک، دو و سه بار شوک‌دهی لیزری

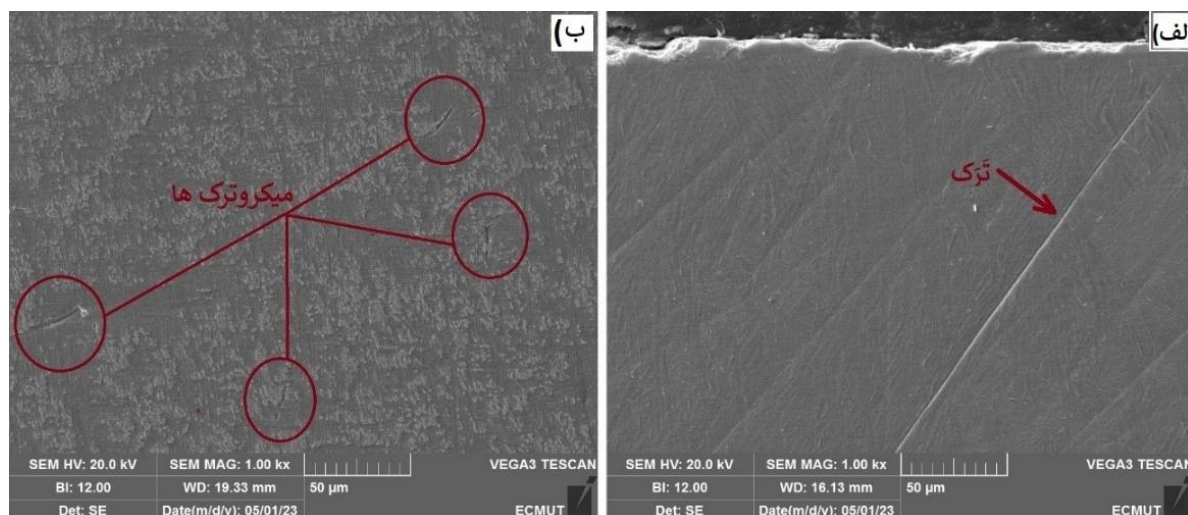


شکل (20) مقایسه تغییرات عمق تنش پسماند در (الف) شبیه سازی (ب) آزمون سوراخکاری مرکزی

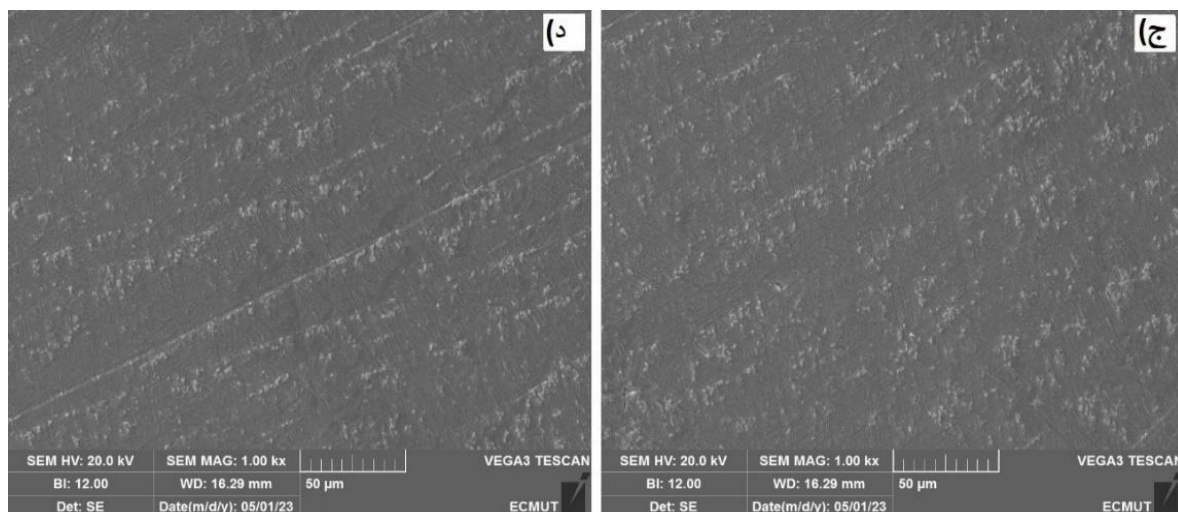
با مراجعه به جدول شماره 6 مشاهده می‌شود که نتایج سه نمونه در جدول غیرعادی شده است به طوریکه در دو نمونه 3 و 7 مقدار تنش پسماند به جای فشاری، کششی شده است و در نمونه شماره 6 نیز مقدار تنش پسماند فشاری در مقایسه دیگر نمونه ها بسیار کمتر شده است برای یافتن دلیل آن از مقطع برش نمونه ها تصویربرداری (SEM) صورت گرفت همانطور که



در شکل 21 مشاهده می‌شود در سطح نمونه شماره 7 ترک ادامه داری دیده می‌شود و در سطح نمونه شماره 3 نیز چندین میکروترک مشاهده می‌گردد که این ترک‌ها می‌تواند منشأ کاهش تنش پسماند فشاری و همچنین کششی شدن آن باشد. همچنین در سطح نمونه شماره 6 در شکل 22 عیب خاصی قابل مشاهده نیست ولی ممکن است با توجه به درصد همپوشانی بالا برای این نمونه و تعداد 2 بار شوک‌دهی لیزری پوشش جاذب آسیب دیده و برخورد مستقیم پرتو لیزر با سطح سبب افت تنش پسماند فشاری در آن شده است.



شکل (21) الف) تصویر SEM مربوط به نمونه شماره 7 با همپوشانی 50٪ و سه بار شوک‌دهی لیزری، ب) تصویر SEM مربوط به نمونه شماره 3 با همپوشانی 70٪ و یکبار شوک‌دهی لیزری



شکل (22) ج) تصویر SEM مربوط به نمونه شماره 8 با همپوشانی 60٪ و سه بار شوک‌دهی لیزری، د) تصویر SEM مربوط به نمونه شماره 6 با همپوشانی 70٪ و دو بار شوک‌دهی لیزری



نتیجه گیری

- الف) افزایش درصد همپوشانی سبب افزایش تنش پسماند در سطح قطعه کار می شود.
- ب) افزایش همپوشانی ضربات لیزر تا یک درصد مشخص سبب افزایش همگنی میدان تنش پسماند در سطح قطعه کار می شود.
- ج) افزایش تعداد دفعات شوک دهی سبب افزایش عمق تنش پسماند و عمق تغییر شکل پلاستیک در قطعه کار می شود.
- د) افزایش تعداد دفعات شوک دهی سبب افزایش سختی در قطعه کار می گردد.
- ه) استفاده از پوشش جاذب سبب حفاظت از سطح قطعه کار در برابر اثرات حرارتی لیزر می گردد.
- و) در شبیه سازی شوک دهی لیزری، استفاده از المان های نیمه بینهایت در اطراف و زیر قطعه کار سبب یکنواختی میدان تنش پسماند می شود.



منابع

- K. Ding, L. Ye, "Laser Shock Peening Performance and Process Simulation," 2006.
- A.H. Clauer et al, "Quantitative assessment of laser-induced stress waves generated at confined surfaces," vol. 25, no. 8, pp. 431–433, 1974.
- M. Braisted, R. Brockman, "Finite element simulation of laser shock peening," vol. 21, no. 7, pp. 719–724, 1998.
- B. Wu, S. Tao, S. Lei, "Numerical modeling of laser shock peening with femtosecond laser pulses and comparisons to experiments," Appl. Surf. Sci., vol. 256, no. 13, pp. 4376–4382, 2010.
- Y. X. Hu, Z. Q. Yao, "Fem simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots," vol. 21, no. 2, pp. 125–132, 2008.
- X. Zhang et al, "Surface & Coatings Technology Modeling of residual stress field induced in Ti – 6Al – 4V alloy plate by two sided laser shock processing," Surf. Coat. Technol., vol. 280, pp. 163–173, 2015.
- G. Sakhvadze, A. Shokhin, and O. Kikvidze, "Residual stresses distribution in Ti-6Al-4V titanium alloys during laser shock processing," vol. 8, pp. 422–427, 2016.
- G. R. Kumar, G. Rajyalakshmi, "FE simulation for stress distribution and surface deformation in Ti-6Al-4V induced by interaction of multi scale laser shock peening parameters," vol. 206, pp. 719–724, 2020.
- R. Sun et al, "Experimental-numerical study of laser-shock-peening-induced retardation of fatigue crack propagation in Ti-17 titanium alloy," vol. 145, Int. J. Fatigue, p. 106081, 2020.
- L. Zhou, et al, "Research on surface integrity of Ti-6Al-4V alloy with compound treatment of laser shock peening and shot peening," vol. 196, no. November 2020, p. 110717, 2022.
- R. Fabbro, et al, "Physical Study of Laser-Produced Plasma in Confined Geometry," Journal of Applied Physics, vol. 68, pp. 775-84, 1990.
- Y. Hu, R.V. Grandhi, "Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology," Surface and Coatings Technology, vol. 206, no. 15, pp. 3374-3385, 2012.
- K. Y. Luo, et al, "Applied Surface Science Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters," vol. 285, pp. 607–615, 2013.
- X. Nie, et al, "Materials Science & Engineering A Experimental study and fatigue life prediction on high cycle fatigue performance of laser-peened TC4 titanium alloy," vol. 822, no. June, p. 141658, 2021.



Numerical and experimental investigation of residual stresses created in Ti-6Al-4V alloy in laser shock peening

Mahdi Amiri

Master's student in Mechanical Engineering, Academic Complex of Materials and Manufacturing Technologies, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Reza Shoja Razavi

Assistant Professor, Academic Complex of Construction Materials and Technologies, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Morteza Ilanlou

Instructor, Academic Complex of Construction Materials and Technologies, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

One of the harmful phenomena in industrial parts is the formation of fatigue cracks. One of the best ways to prevent these cracks from spreading is to create compressive residual stress in the parts. The traditional process that is used for this work is the shot peening process, which in addition to having suitable advantages, has some limitations. The competing process that is used to create compressive residual stress is a new and innovative process called laser shock peening. The purpose of this research is laser shock treatment of Ti-6Al-4V alloy and finite element simulation of the process in order to achieve the desired compressive residual stress with appropriate depth. Therefore for this purpose, according to an experimental design, 1 to 3 laser shock operations were performed with 50%, 60%, and 70% overlap of 9 samples of Ti-6Al-4V alloy. Then, X-ray diffraction test was used to know the amount of surface residual stress created in the samples, and Hole drilling test was used to determine its penetration depth. Also, in order to accurately determine the material properties specific to Ti-6Al-4V alloy at high strain rate, the Hopkinson compression bar test was used and the Johnson-Cook constants were extracted experimentally. Next, in order to observe the state of the shocked samples, SEM imaging was done. The results of numerical and experimental analysis showed that the maximum surface residual stress has reached -710 MPa and its penetration depth has reached -1 mm, and the uniformity of the stress field in the overlapping percentage of 60% was more than the other two percentages.

Keywords: Laser shock peening, finite element, Hopkinson rod test, Johnson Cook.