

# بهینه‌سازی توزیع تنش و تغییر شکل سطح آلیاژ Ti-6Al-4V در فرایند

## شوکه‌دهی سطحی لیزری به روش المان محدود و تحلیل آماری

مرتضی ایلانلو، رضا شجاع‌رضوی، پویا پیرعلی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲)

### چکیده

فرایند شوکه‌دهی سطحی لیزری، پدیده‌ای پیچیده از اندرکنش پارامترهای گسترده در بازه زمانی نانو ثانیه برای ایجاد تنش پسماند در سطح می‌باشد. در این تحقیق به بررسی توزیع تنش پسماند و تغییر شکل سطح ماده پس از فرایند شوکه‌دهی سطحی لیزری، با استفاده از مدل المان محدود و تحلیل آماری پرداخته شده است. به منظور شبیه‌سازی فرایند، از حل صریح دینامیکی المان محدود آباکوس به همراه مدل ماده جانسون کوک برای تحلیل غیر خطی رفتار آلیاژ Ti-6Al-4V استفاده شد. نتایج با داده‌های تجربی مقالات مقایسه شد. از طراحی آزمایش برای بررسی حالت‌های مختلف فرایند با کمک شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل اثر پارامترها بر توزیع تنش پسماند و تغییر شکل سطح استفاده شده است. پارامترهای مذکور عبارتند از اندازه لکه لیزر، میزان همپوشانی لکه لیزر، چگالی توان لیزر، تعداد پاس‌های لیزر و عرض پالس لیزر. برای بدست آوردن رابطه میان پارامترها و خروجی‌های فرایند که میزان تنش پسماند و تغییر شکل سطح است، از رگرسیون خطی استفاده شد. برای بهینه‌سازی و بدست آوردن نتایج دقیق‌تر، روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با تعریف متغیر ترکیبی برای پارامترهای مؤثر لیزر و اعمال الگوریتم ژنتیک، خطی سازی با دقت بالای ۹۳ درصد برای پیش‌بینی تغییر شکل سطح و دقت بالای ۹۴ درصد برای پیش‌بینی میزان تنش پسماند حاصل شد. همبستگی خوبی برای مدل شبیه‌سازی شده با نتایج مقالات در شرایط خاص شوکه‌دهی مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میزان تنش پسماند فشاری و همچنین میزان تغییر شکل سطح با افزایش توان، عرض پالس، میزان همپوشانی و تعداد تکرار افزایش یافتند. و در مقابل با افزایش قطر لکه، از مقادیر آن‌ها کاسته شد. واژه‌های کلیدی: شوکه‌دهی سطحی لیزری، مدل‌سازی المان محدود، مدل‌سازی آماری، تنش پسماند، تغییر شکل سطح.

## Optimization of stress distribution and surface deformation of Ti-6Al-4V alloy in laser surface shock peening by Finite element method and statistical analysis

Morteza Ilanlou, Reza Shoja Razavi, Pouya Pirali

Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran, Tehran

(Received 5 January 2022, accepted 11 April 2022)

### Abstract

Laser shock peening process is a complex phenomenon of interactions among various parameters in a nanosecond time frame with the goal of generating residual stress in the surface. In this research, the distribution of residual stress and surface deformations after the laser shock peening process has been investigated via finite element method (FEM) and statistical analysis. To simulate the process, ABAQUS explicit dynamic finite element method coupled with Johnson-Cook model to analyze the nonlinear behavior of Ti-6Al-4V alloy and the results were compared with experimental data from other articles. The design of experiment was used to investigate various process sates with the aid of simulation and analyzing the effect of process parameters on the distribution of residual stress and surface deformation. The aforementioned process parameters are laser spot size, laser spot overlap, laser power density, number of laser passes and laser pulse width. To achieve the correlation between the parameters and the process outcomes namely, the distribution of residual stress and surface deformation, linear regression was incorporated. Additionally, genetic algorithm was used to optimize the process and achieve more accurate results. Defining the compound variable for effective laser parameters and implementing the genetic algorithm resulted in linear regression with 93% accuracy for predicting the surface deformation and 94% accuracy for the prediction of the distribution of residual stress. A good correlation between the simulated model and other articles regarding shock peening in specific conditions was observed. The simulation results indicated that the value of compressive residual stress and surface deformation increase when power, pulse width, overlapping and the number of repetitions are increased. On the other hand, an increment in laser spot size has an opposite effect on the aforementioned parameters.

**Keywords:** Surface laser shock peening, Finite element analysis, Design of Experiments (DoE), Residual stress, Surface Deformation.

**E-mail of Corresponding author:** [morteza\\_ilanlou@mut.ac.ir](mailto:morteza_ilanlou@mut.ac.ir).

## مقدمه

ایجاد تنش پسماند فشاری بر روی سطح فلزات می‌تواند عمر مفید مواد را با حداقل هزینه افزایش دهد. تکامل این فرایندهای سطحی دهه‌ها پیش با ساچمه زنی آغاز شد و با لیزر ادامه یافت. اصل اساسی در تمام این فرایندها، تولید لایه تغییر شکل یافته پلاستیکی بر روی سطح است. در این روش از تغییر شکل پلاستیک روی سطح به منظور ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی و زیر سطحی مواد استفاده می‌شود. تنش پسماند فشاری القایی به عنوان مانعی در برابر گسترش ترک خستگی، سایش و خوردگی مواد عمل می‌کند [۱]. تغییر شکل پلاستیک، اندازه و عمق نفوذ تنش پسماند فشاری در عملیات‌های مختلف سطح ممکن است متفاوت باشد. از آنجا که تغییر شکل پلاستیک با تغییرات ریزساختار همراه است، به افزایش خواص مکانیکی سطح ماده کمک می‌کند [۲].

امروزه یافتن عملیاتی که منجر به ایجاد تنش پسماند بهینه، بهبود دانه‌بندی و همزمان کاهش تغییر شکل در آلیاژهای تیتانیوم و نیکل شود، از اهمیت بالایی برخوردار است [۳]. شوک‌دهی سطحی لیزری (SLSP) یکی از روش‌های اصلاح سطح است که کنترل گسترده‌ای بر پارامترهای موثر بر ایجاد تنش پسماند فشاری به همراه سطح عمیق تغییر شکل پلاستیک، فراهم می‌کند. شوک‌دهی سطحی لیزری می‌تواند با منابع لیزر گوناگون به همراه طول موج‌های مختلف بر سطح اعمال شود. در میان تمام لیزرهای در دسترس، لیزر پالسی Nd-YAG می‌تواند با دقت بالا از انرژی‌های کم تا انرژی‌های بالا بر حسب  $\text{GW/cm}^2$  فراهم کند.

فرایند شوک‌دهی را می‌توان با افزودن لایه‌های محافظ و پوشش‌های روی سطح ماده هدف اعمال کرد. لایه پوششی که بر روی سطح قرار می‌گیرد و با عنوان پوشش جاذب شناخته می‌شود، به تبدیل انرژی لیزر به پلازما با فشار بالا کمک می‌کند و باعث ایجاد موج شوک در سطح ماده

می‌شود. سیال محصور کننده، که معمولاً آب است، به عنوان محیط شفاف پلازما را محصور می‌کند و موج شوک را جهت تولید تغییر شکل پلاستیک به سطح ماده هدایت می‌کند. زمانی که موج شوک القایی، تنشی بالاتر از حد الاستیک هوگونوت (HEL) <sup>۲</sup> ماده هدف ایجاد کند، تغییر شکل پلاستیک در مدت زمان کوتاه در سطح ماده ایجاد می‌شود و سطوح پیچیده را به راحتی می‌تواند شوک‌دهی لیزری کند [۴-۶].

در سال ۱۹۶۰ در آزمایشگاه‌های باتل مستقر در کلمبوس <sup>۳</sup> آمریکا یک سری آزمایش‌ها برای القای انرژی لیزر به صورت موج ضربه‌ای به ماده با ایجاد تغییر شکل پلاستیک انجام شد. این آزمایش‌ها با توسعه تنش در لایه‌های سطحی و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی همراه شد. سپس این فرایند طی یک دهه توسعه یافت و به عنوان شوک‌دهی سطحی لیزری سطحی نامگذاری شد [۷].

فرایند SLSP را از لحاظ فیزیکی می‌توان این‌گونه توصیف کرد که زمانی که پرتو یک منبع لیزر پراورزی با لایه جاذب (لایه محافظ سطحی که معمولاً رنگ سیاه دارد) روی ماده مورد نظر برخورد می‌کند، لایه جاذب تبخیر شده و پلازما با فشار بالا تشکیل می‌شود. در پوشش شفاف (معمولاً آب) پلازما محصور شده به موج فشاری در مدت کوتاه با فشار بالا تبدیل و به ماده القا می‌شود. تحت این شرایط، لایه‌های سطحی ماده تغییر شکل الاستیک را تجربه می‌کنند و هنگامی که فشار شوک از حد الاستیک (HEL) ماده عبور کند، تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌شود. معمولاً نرخ کرنش در فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری  $10^6/S$  است [۸].

تجزیه و تحلیل المان محدود فرایند SLSP نشان داد که عمق تنش فشاری و کرنش پلاستیک ناشی از پالس‌های لیزر را می‌توان با تغییر در اندازه لکه لیزر و درصد

2 Hugoniot Elastic Limit

3 Columbus based Battelle Laboratories

1 Surface laser shockpeening

پسماند سطحی، بر روی قطعاتی از جنس Ti-6Al-4V تحقیقات خود را ارائه دادند. در این بررسی، نمونه‌های کاملاً مشابه از همین جنس تحت عملیات ساچمه‌زنی و شوک‌دهی سطحی لیزری قرار می‌گرفتند و سپس از نمونه‌ها آزمون خستگی کشش-کشش به عمل آمد. نتایج نشان دادند که تنش پسماند نزدیک به سطح در نمونه‌های تحت ساچمه‌زنی و تحت شوک‌دهی سطحی لیزری مشابه بود. لایه تنش پسماند فشاری در نمونه‌های تحت فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری بسیار عمیق‌تر از نمونه‌های ساچمه‌زنی شده بود و در نتیجه، تنش پسماند کششی زیرسطحی در نمونه‌های تحت فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های ساچمه‌زنی شده بود. نمونه‌های تحت ساچمه‌زنی سطح ناهموارتر و بیشترین حجم سایش ناشی از خراش را داشتند. نمونه‌های تحت فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری، سطح موجی و حجم کمی از سایش را در قله‌های موج را دارا بودند. نمونه‌های ساچمه‌زنی شده با پیشرفت قابل توجهی نسبت به نمونه‌های ماشین‌کاری، بیشترین طول عمر خستگی را داشتند.

زابین ثریا و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۵ تحقیق بر تاثیر شوک‌دهی سطحی لیزری بر روی رشد ترک خستگی انجام دادند که دستاورد آن بررسی رشد ترک خستگی در آلیاژ Ti-6Al-4V است. آن‌ها ابتدا نمونه مورد آزمایش را تحت فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری قرار دادند و پس از آن به تحلیل مسیر ترک خستگی پرداختند. سپس نمونه بدون شوک‌دهی سطحی لیزری را با نمونه شوک‌دهی سطحی لیزری مقایسه کردند. همچنین اندازه‌گیری تنش پسماند را با استفاده از روش پرتو X مورد بررسی قرار دادند.

نتایج نشان داد که میدان تنش پسماند محلی حتی برای رشد ترک‌های نسبتاً طولانی بسیار پایدار است.

تحقیق در زمینه تاثیر شوک‌دهی سطحی لیزری بر خواص سطحی و تنش پسماند سطحی در آلیاژ Al6061-T6 در سال ۲۰۱۶ با استفاده از لیزری با انرژی 1200 میلی‌ژول و

همپوشانی لکه‌های لیزر تغییر داد. برای ایجاد تنش فشاری یکنواخت در سطح ماده، حداقل ۶۲/۵ درصد همپوشانی برای لکه لیزر لازم است [۸-۱۱]. از آن‌جا که پارامترهای لیزر و سطوح هر پارامتر، تعداد زیادی ترکیب حالات را برای تجزیه و تحلیل روند ایجاد می‌کند. در چنین حالتی روش طراحی آزمایش<sup>۱</sup> (DoE) به کاهش تعداد آزمایش‌ها و در عین حال در نظر گرفتن تمام ترکیبات ممکن از پارامترها و تاثیر هر یک در نتیجه فرایند به صورت بهینه کمک می‌کند.

تأثیر فرایند SLSP به پارامترهای موثر لیزر و سطوح بستگی دارد. تغییر در هر پارامتر یا دامنه آن تأثیر قابل توجهی بر مواد مختلف با توجه به خصوصیات آن ماده خواهد داشت. کیفیت خروجی فرایند نیاز به تجزیه و تحلیل پیشرفته و سیستم‌های نظارت آنلاین دارد که کمی گران است [۱۲ و ۱۳]. در چنین شرایطی برای تجزیه و تحلیل خروجی‌ها برای مجموعه‌ای از پارامترهای فرایند برای یک نوع ماده خاص، بهینه‌سازی پارامتر فرایند و شبیه‌سازی فرایند نیاز است. شبیه‌سازی SLSP توسط بسیاری از محققان با مدل‌سازی دقیق رفتار ماده مورد آزمایش در فرایند SLSP برای کسب دانش بهتر از تأثیر پارامترهای لیزر بر روی پروفیل‌های تنش پسماند انجام شده است.

یونگشیانگ هو و همکارانش [۱۴ و ۱۵] در نتایج تحقیقات خود نشان دادند که افزایش اندازه لکه لیزر به کاهش میرایی انرژی و همپوشانی لکه‌های لیزر به توزیع یکنواخت تنش منجر می‌شود. این ترکیب پارامترها در دستیابی به تنش پسماند مطلوب با حداقل اعوجاج سطح نقش مهمی دارد. یک مجموعه واحد از ترکیب پارامترهای لیزر نمی‌تواند برای همه مواد موجود تأثیر یکسانی ایجاد کند. در چنین شرایطی بررسی مناسب پارامترهای ترکیبی لیزر برای هر ماده به صورت خاص مورد نیاز است.

مایکل هیل و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۹ در زمینه مقایسه اثرات این فرایند با روش‌های متداول ایجاد تنش

<sup>1</sup> Design of Experiments

عامل شاریدگی لیزر<sup>۲</sup>، عرض پالس، تعداد ضربات پالس لیزر و ضخامت نمونه‌ها در دو سطح برای هر عامل طراحی شد. خروجی‌های فرآیند از قبیل عمق ضربات، زبری سطح بهبود یافته، سختی ماده که خود با سختی و پهنای پراش اشعه X نشان داده می‌شود، تنش‌های پسماند نمونه و مقدار انحنای نمونه در نظر گرفته شد. در این آزمایش مشخص شد که تمام پارامترها بر تنش‌های پسماند تأثیرگذارند و شوکدهی هیچ تأثیری در زبری نداشته و تأثیر کمی بر کارسختی دارد. البته در این آزمایش مشخص شد که در نمونه‌های نازک به دلیل خود تعادلی، تنش‌های پسماند کشتی در سطح ایجاد شده است.

فنگ<sup>۳</sup> و همکاران [۲۱] به توصیف مشخصات انتشار امواج تنش و تجزیه و تحلیل اثرات پارامترهای مختلف شوکدهی در میدان‌های تنش پسماند در یک تیغه آلیاژی Ti-6Al-4V توسط فرآیند شوکدهی لیزری پرداختند. آزمایش‌های SLSP برای مقایسه با نتایج شبیه سازی شده توسط روش المان محدود به منظور اعتبار سنجی استراتژی مدل‌سازی و شبیه سازی در تیغه اجرا شد و روش اندازه‌گیری فشار اوج و همپوشانی نقطه‌ای نیز مورد بحث قرار گرفت. علاوه بر این تحلیل المان محدود برای شبیه سازی انتشار امواج تنش و میدان‌های تنش پسماند در تیغه TC4 توسط فرآیند SLSP یک طرفه از جمله اندازه لکه‌های مختلف لیزر و عرض پالس و SLSP دو طرفه و ویژگی‌های انتشار امواج تنش و قوانین توزیع میدان تنش پسماند در تیغه شرح داده شد. نتایج نشان داد که استراتژی مدل‌سازی و شبیه سازی برای شبیه سازی عددی مناسب است. به عنوان نتیجه، تنش‌های پسماند فشاری در امتداد جهت سطح تیغه با افزایش شعاع اندازه لکه و عرض پالس لیزر توسط SLSP یک طرفه بسیار افزایش یافت. بدیهی است که با توزیع موثر

چگالی توان 5.6 GW/cm با عرض پالس 8 ns نمونه تحت شوکدهی سطحی لیزری قرار گرفته و سپس بررسی نمونه موردنظر از لحاظ تنش‌های پسماند و سختی سطحی انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از SLSP تنش پسماند فشاری می‌تواند به طور موثری بر روی سطح ماده القا شود. همچنین مشخص شد که عمق سخت شده ماده، تا حداکثر ۱۸۷۵ میکرومتر قابل دستیابی است. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های زبری سطح نشان داد که SLSP می‌تواند کیفیت سطح را بسته به پارامترهای SLSP کاهش دهد [۱۸].

تفاوت بین آزمایش‌های فوق علاوه بر جنس آلیاژ به کار رفته در شیوه از اندازه‌گیری نیز می‌باشد. به این شکل که در خصوص آلیاژ Al6061-T6، از روش سوراخ‌کاری به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شده است، در حالی که روش پرتو اشعه ایکس روی آلیاژ Ti-6Al-4V به کار گرفته شد.

در تحقیقی توسط کریس سیل و همکارانش [۱۹]، سطح نمونه‌ای از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از لیزر فرابنفش تحت عملیات شوکدهی سطحی لیزری قرار گرفت و اثر این عملیات بر روی ریزساختار و دوقلوبی شدن‌های محل اعمال لیزر بررسی شد. نتیجه شد که بیرونی‌ترین لایه تحت یک فرآیند کوئنچ سریع قرار گرفت که منجر به تشکیل فاز مارتنزیتی آلفای نرم با مقداری فاز بتا شد. در حالی که داخلی‌ترین ناحیه نزدیک به ماده اصلی عمدتاً به دلیل ترکیبی از موج شوک لیزری و افزایش دمای موضعی، به روشی مشابه با فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا، تحت دوقلوبی فشاری غیرمعمول قرار گرفت.

کلارد<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰] تأثیر پارامترهای فرآیند شوکدهی لیزری را بر روی نمونه آلیاژهای هوانوردی تیتانیوم (Ti-17) بررسی کردند. یک طراحی آزمایش با چهار

<sup>2</sup> Laser fluence

<sup>3</sup> Y.W. Fang

<sup>1</sup> C.Cellard

### طراحی آزمایش

از آن‌جا که این تحقیق برای بررسی تأثیر ترکیب پارامترها بر نتیجه شوک‌دهی روی آلیاژ Ti-6Al-4V در نظر گرفته شده است، انتخاب مجموعه پارامترها با سطوح مختلف با استفاده از روش طراحی آزمایش DoE صورت می‌پذیرد. پارامترهای لیزر و سطوح در نظر گرفته شده برای این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. از آن‌جا که در مقالات به طور متوسط، درصد همپوشانی، قطر لکه لیزر و شدت توان لیزر به ترتیب ۶۲/۵ درصد، ۲ میلی‌متر و  $6 \text{ GW/cm}^2$  در نظر گرفته شده است [۸-۱۱]، میزان همپوشانی ۶۰ درصد به همراه ۱۰ درصد بیشتر و ۱۰ درصد کمتر، قطر لکه ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر، شدت توان ۳، ۶ و ۹  $\text{GW/cm}^2$ ، به منظور بررسی تأثیر تغییرات، در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها براساس عوامل و سطوح با استفاده از روش تاگوچی نشان داده شده در جدول ۲ طراحی شده است. از آن‌جا که آزمایش‌ها با طراحی فاکتوریل کسری<sup>۴</sup> طراحی

شده‌اند، تمام پارامترها برای هر مجموعه متفاوت خواهند بود. با مشاهده ۲۷ مجموعه پارامتر، بر اساس قطر لکه لیزر مجموعه به سه گروه ۱-۹، ۱۰-۱۸ و ۱۹-۲۷ با قطرهای ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر تقسیم شدند. نتایج به این ترتیب برای درک بهتر تأثیر هر پارامتر در این تحقیق مورد بحث قرار گرفت. برای گروه اول یعنی ۱-۹ مجموعه آزمایش‌ها، قطر لکه لیزر ۱ میلی‌متر و ثابت بود. با قطر لکه ثابت، میزان همپوشانی لکه‌های لیزر، چگالی توان لیزر و تعداد پاس‌ها با هم ترکیب می‌شوند و در سه سطح پایین، متوسط بالا تنظیم شده و برای سه عرض پالس لیزر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه‌ها به گونه‌ای کدگذاری شده‌اند که معرف پارامترهای آن‌ها باشند. برای مثال، نمونه d1o50p3n1t8 از چپ به راست بیانگر قطر پرتو ۱ میلی‌متر، همپوشانی ۵۰ درصد، شدت توان ۳  $\text{GW/cm}^2$ ، تعداد تکرار برابر ۱ و عرض پالس ۸ نانو ثانیه می‌باشد.

میدان‌های تنش پسماند فشاری و حفره‌های شوک‌دهی شده بیشتر توسط SLSP همزمان دو طرفه، بهبود خواص مکانیکی مربوطه از یک طرفه قابل توجه‌تر خواهد بود.

لیو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲] توزیع تنش پسماند آلیاژ Ti-6Al-4V را تحت پارامترهای مختلف فرآیند SLSP بررسی کردند. یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی اثرات میزان همپوشانی، قطر لکه لیزر و چگالی توان لیزر بر تنش پسماند آلیاژ Ti-6Al-4V در سطح و در جهت عمق با استفاده از نرم افزار ABQUAS در نظر گرفته شد و میدان تنش پسماند شبیه سازی شده آنالیز گردید و با داده‌های تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که نسبت نوسان تنش پسماند سطح با افزایش میزان همپوشانی به تدریج کاهش می‌یابد. افزایش چگالی توان لیزر می‌تواند عمق متأثر از تنش پسماند را افزایش دهد و مقادیر بالاتر تنش پسماند سطح را می‌توان با افزایش قطر لکه لیزر در هنگام تغییر چگالی توان لیزر به دست آورد. مقالات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی فرایند شوک‌دهی سطحی لیزری، به خصوص بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V، به منظور بررسی توزیع تنش پسماند و میزان تغییر شکل سطح ماده صورت پذیرفته است ولی ارائه یک مدل کلی برای نشان دادن تأثیر پارامترهای فرایندی به صورت پارامتر ترکیبی، مشاهده نشده است.

در تحقیق حاضر پس از شبیه‌سازی فرایند با در نظر گرفتن اثر اندازه لکه لیزر، میزان همپوشانی لکه لیزر، چگالی توان لیزر، تعداد تکرار پاس و عرض زمانی پالس لیزر بر میزان حداکثر تنش پسماند و تغییر شکل سطح ماده، برای اولین بار با کمک رگرسیون خطی<sup>۲</sup>، رابطه خطی میان پارامترها و خروجی‌های فرایند برقرار شده و دستیابی به مدل بهینه برای بدست آوردن پارامتر ترکیبی، متشکل از پنج متغیر طراحی، از طریق الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> امکان‌پذیر شده است.

### شبیه‌سازی شوک‌دهی سطحی لیزری

<sup>1</sup> K.Y. Luo

<sup>2</sup> Linear regression

<sup>3</sup> Genetic algorithm

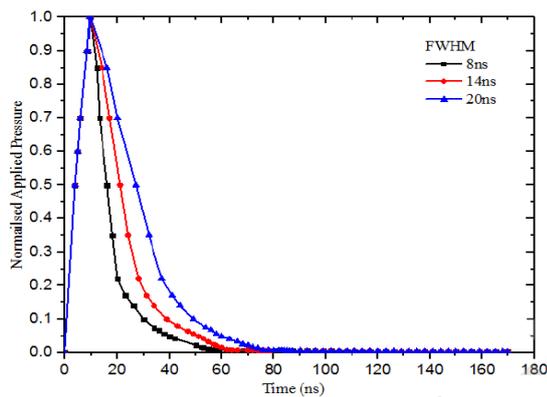
<sup>4</sup> Fractional factorial design

جدول ۱. پارامترهای شوک‌دهی سطحی لیزری به همراه سطوح

پارامترهای فرایند	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
قطر لکه لیزر	Mm	۱	۲	۳
میزان همپوشانی پالس‌ها	%	۵۰	۶۰	۷۰
شدت توان لیزر	GW/cm <sup>2</sup>	۳	۶	۹
تعداد تکرار پالس‌ها	-	۱	۲	۳
زمان پالس لیزر	Ns	۸	۱۴	۲۰

جدول ۲. آزمایش‌ها براساس ترکیب پارامترها و تعیین سطوح به روش تاگوچی

نمونه	قطر لکه لیزر d (mm)	همپوشانی o (%)	شدت توان لیزر p (GW/cm <sup>2</sup> )	تعداد تکرار n	زمان پالس t (ns)
d1o50p3n1t8	۱	۵۰	۳	۱	۸
d1o50p3n1t14	۱	۵۰	۳	۱	۱۴
d1o50p3n1t20	۱	۵۰	۳	۱	۲۰
d1o60p6n2t8	۱	۶۰	۶	۲	۸
d1o60p6n2t14	۱	۶۰	۶	۲	۱۴
d1o60p6n2t20	۱	۶۰	۶	۲	۲۰
d1o70p9n3t8	۱	۷۰	۹	۳	۸
d1o70p9n3t14	۱	۷۰	۹	۳	۱۴
d1o70p9n3t20	۱	۷۰	۹	۳	۲۰
d2o50p6n3t8	۲	۵۰	۶	۳	۸
d2o50p6n3t14	۲	۵۰	۶	۳	۱۴
d2o50p6n3t20	۲	۵۰	۶	۳	۲۰
d2o60p9n1t8	۲	۶۰	۹	۱	۸
d2o60p9n1t14	۲	۶۰	۹	۱	۱۴
d2o60p9n1t20	۲	۶۰	۹	۱	۲۰
d2o70p3n2t8	۲	۷۰	۳	۲	۸
d2o70p3n2t14	۲	۷۰	۳	۲	۱۴
d2o70p3n2t20	۲	۷۰	۳	۲	۲۰
d3o50p9n2t8	۳	۵۰	۹	۲	۸
d3o50p9n2t14	۳	۵۰	۹	۲	۱۴
d3o50p9n2t20	۳	۵۰	۹	۲	۲۰
d3o60p3n3t8	۳	۶۰	۳	۳	۸
d3o60p3n3t14	۳	۶۰	۳	۳	۱۴
d3o60p3n3t20	۳	۶۰	۳	۳	۲۰
d3o70p6n1t8	۳	۷۰	۶	۱	۸
d3o70p6n1t14	۳	۷۰	۶	۱	۱۴
d3o70p6n1t20	۳	۷۰	۶	۱	۲۰



شکل ۱. نمودار توزیع گاوسی فشار پلاسمای لیزر نسبت به زمان [۲۷] از آن‌جا که SLSP از لحاظ حرارتی فرایندی ایزوله در نظر گرفته می‌شود، ترم‌های حرارتی در مدل مواد JC نادیده گرفته شد. با فرض چگالی توان یکنواخت  $I_0$  در لایه جاذب و آب به عنوان محیط شفاف، حداکثر فشار P در رابطه (۲) و (۳) آمده است [۲۷]:

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (2)$$

$$\frac{Z}{Z} = \frac{1}{z_{\text{water}}} + \frac{1}{z_{\text{material}}} \quad (3)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $z_{\text{water}}$ ،  $z_{\text{material}}$  و  $I_0$  به ترتیب کسر انرژی داخلی به انرژی گرمایی (برای طول موج ۱۰۶۴ nm تقریباً برابر ۰/۲۵ است)، امپدانس شوک محیط شفاف، امپدانس شوک ماده هدف ( $\text{gcm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )، چگالی توان لیزر ( $\text{GWcm}^{-2}$ ) می‌باشند. حداکثر فشار تولید شده با منبع لیزر باید ۲ الی ۳ برابر بیشتر از حد الاستیک هوگونیوت (HEL) ماده مورد هدف باشد تا از تغییر شکل پلاستیک معکوس جلوگیری شود. رابطه (۴) حد الاستیک هوگونیوت ماده را نشان می‌دهد.

$$HEL = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \sigma_{dy} \quad (4)$$

HEL ماده را می‌توان با ضریب پواسون  $\nu$  و استحکام تسلیم دینامیک آن ماده محاسبه کرد.

شناسایی توزیع فضایی فشار تولید شده توسط هر پالس در محدوده اعمال، با تابعی بر حسب متغیرهای مکانی X و Y و زمان t به صورت  $P=f(x,y,t)$  تعریف می‌شود. تابع توزیع فضایی فشار که در تعریف بخش نوع بارگذاری در شبیه‌سازی لحاظ شده، در رابطه (۵) آمده است [۷]:

## مدل ماده و شرایط بارگذاری

استفاده از یک مدل ماده برای پاسخگویی به نرخ کرنش بالا که در آن هم نرم شدن حرارتی و هم سخت شدن کرنشی ماده و پاسخ آن‌ها به بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا را در نظر گیرد، دارای اهمیت زیادی است. بسیاری از مدل‌های ماده با نتایج عملکرد زمان واقعی ساخته و مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل جانسون کوک<sup>۱</sup> (JC) [۲۳]، کوپر سیموندز<sup>۲</sup> [۲۴]، مدل خان هوانگ لیانگ<sup>۳</sup> (KHL) [۲۵] و زریلی آرمسترانگ<sup>۴</sup> (ZA) [۲۶] اشاره کرد. در میان تمام مدل‌های موجود مدل ماده جانسون کوک برای تغییر شکل پلاستیک بسیار مناسب است و در این تحقیق به کار گرفته شده است. جریان تنش در مدل JC در رابطه (۱) آورده شده است [۲۳]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[ 1 - \left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right) \right] \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma$ ،  $\varepsilon_p$ ،  $\varepsilon'_0$ ،  $\varepsilon'_0$  و  $T_m$  به ترتیب جریان تنش، کرنش پلاستیک موثر، نرخ کرنش پلاستیک موثر، نرخ کرنش پلاستیک مرجع، دمای اتاق و دمای ذوب هستند. A، B، C، m و n ثابت‌هایی هستند که به طور تجربی تعیین می‌شوند. خصوصیات ماده و ثابت‌های JC برای آلیاژ Ti-6Al-4V در جدول ۳ و ۴ ذکر شده است.

موج فشار ناشی از شوک لیزر سه برابر اندازه عرض پالس لیزر دوام خواهد داشت. شکل ۱ نمودار توزیع گاوسی فشار پلاسمای لیزر نسبت به زمان را نشان می‌دهد.

پروفیل فشار به کار گرفته در این تحقیق همانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است. موج شوک تولید شده توسط پالس لیزر، ترکیبی از فشار و گرما است.

1 Johnson-Cook model

2 Cowper Symonds

3 Khan Huang Liang

4 Zerilli Armstrong

هشت گره سه بعدی با المان پیوسته جابجایی-تنش است. در مرزها به جز سطح، المان نامحدود CIN3D8 برای شرایط مرزی و جلوگیری از بازتاب موج شوک استفاده شدند [۲۷]. مش بندی مدل سه بعدی ۲۰۰ میکرومتر در ۲۰۰ میکرومتر در جهت X و Y و در جهت Z برای ایجاد تراکم زیاد المان‌ها در سطح، از سطح پایین به بالا ابعاد المان‌ها از ۴۰۰ میکرومتر تا ۴۰ میکرومتر در نزدیک سطح هدف انجام شد.

مدل مشبک از ۲۵۱۲۲۰ عنصر C3D8R با ۲۶۸۰۰۲ گره تشکیل شد. در مدل JC شرایط حرارتی نادیده گرفته می‌شود بنابراین بارگذاری نهایی از نظر فشار با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد. یک بارگذاری فشاری متقارن محوری سه بعدی با توزیع بار یکنواخت اعمال شد. برای بارگذاری (شکل ۱) از یک پالس فشاری با شکل گاوسی استفاده شد. در این نوع پالس فشاری، فشار برای چند نانوثانیه سریع افزایش می‌یابد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد.

## نتایج و بحث

### صحت‌سنجی مدل

مجموعه‌های d1o50p3n1t8، d1o50p3n1t14 و d1o50p3n1t20 (جدول ۲) با عرض پالس لیزر ۸، ۱۴ و ۲۰ نانوثانیه تجزیه و تحلیل شدند. در ترکیب ۱ حداکثر تنش پسماند را در جهت S11 -۴۵۰ مگاپاسکال و تغییر شکل سطح در جهت X، ۰/۹۸ میکرون بود. این نتایج توسط راجالاکشمی و همکارانش در شرایط مشابه بدست آمده است که به منظور صحت‌سنجی، با نتایج شبیه‌سازی این تحقیق با شرایط مشابه نمونه d1o50p3n1t8 مورد مقایسه قرار گرفت [۲۷]. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، حداکثر تنش پسماند در جهت عمق قطعه برابر ۴۵۹- مگاپاسکال و تغییر شکل سطح برابر ۰/۸۵ میکرون بدست‌آمد که هماهنگی خوبی با نتایج مقاله مرجع نشان می‌دهد [۲۷].

$$P(x, y, t) = P_0(t) \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x^2 + y^2}{r^2} \right)} \quad (5)$$

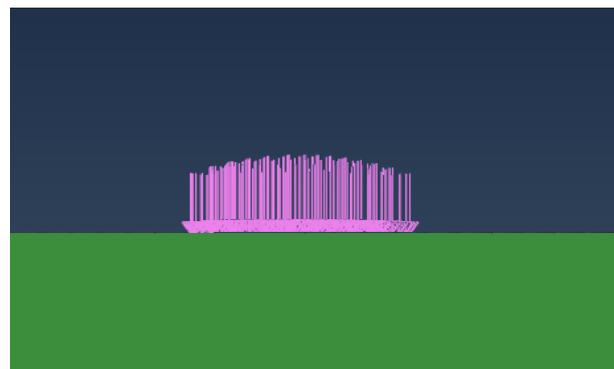
مقطع توزیع فشار روی سطح ماده پس از اعمال رابطه ۵ در نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> به صورت شکل ۲ بدست آمده است.

جدول ۳. مشخصات الاستیک ماده [۲۷]

مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
۱۱۰۰۰۰	۰/۳۴۲	۴/۵

جدول ۴. ویژگی‌های پلاستیک ماده در مدل جانسون کوک [۲۷]

A (MPa)	B (MPa)	N	M	T <sub>0</sub> (K)	T <sub>m</sub> (K)	C	ε <sub>o</sub> Ref [s <sup>-1</sup> ]
۱۰۹۸	۱۰۹۲	۰/۹	۱/۱	۲۹۸	۱۸۷۰	۰/۰۱۴	۱

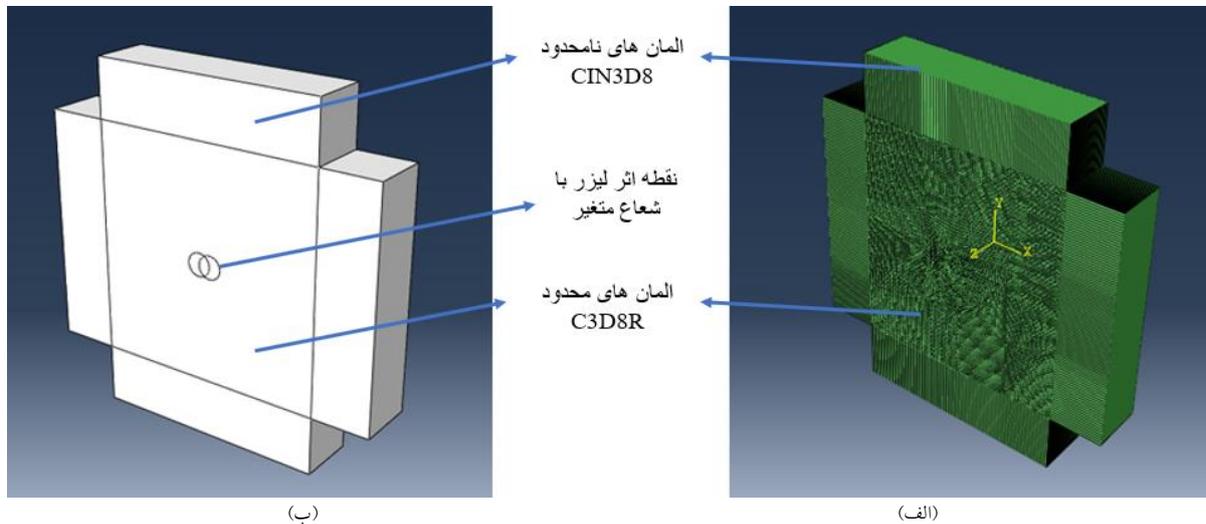


شکل ۲. مقطع توزیع فشار روی سطح بدست آمده از رابطه ۵

### هندسه مدل شوک‌دهی سطحی لیزری

در این تحقیق شبیه‌سازی SLSP با استفاده از نرم افزار آنالیز المان محدود ABAQUS نسخه ۲۰۱۹ انجام شد. شکل ۳ مدل بکار گرفته شده با المان‌های محدود C3D8R در مکعب مرکزی، به همراه المان‌های نامحدود<sup>۲</sup> CIN3D8 در لبه‌ها پس از اعمال شرایط در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. مدل سه بعدی با ابعاد ۲۰×۲۰×۵ میلی متر مربع ایجاد شده است. از المان‌های یکپارچه سه بعدی مکعبی با ۸ گره، C3D8R، برای مش‌زنی مدل استفاده شده است.

1 Abaqus  
2 Infinite element

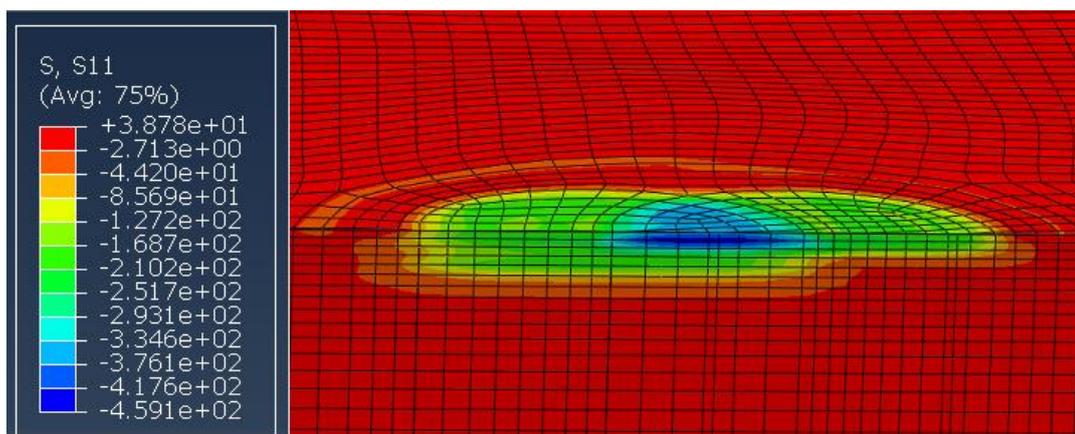


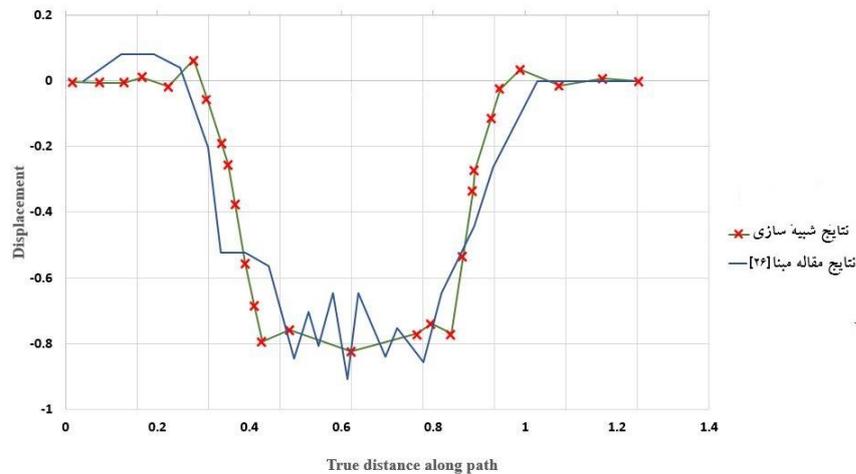
شکل ۳. مدل بکار گرفته شده با المان‌های محدود C3D8R در مکعب مرکزی به همراه المان‌های نامحدود CIN3D8 در لبه‌ها، مدل بعد از

اعمال مش (ب) مدل قبل از اعمال مش

تعداد تکرار و  $T$  عرض پالس لیزر در نظر گرفته شد.  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  به ترتیب توان‌های پارامترها در نظر گرفته شد. خطی سازی فرایند با تخمین دقیق‌تر ضرایب  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  و  $\theta$  امکان‌پذیر است. از الگوریتم ژنتیک برای تخمین ضرایب (به جای سعی و خطا) و بهینه‌سازی رگرسیون خطی استفاده شده است.

در جدول ۵ نتایج شبیه سازی به منظور بدست آوردن تنش پسماند و میزان تغییر شکل سطح، آورده شده است. از نرم افزار متلب برای اعمال روش رگرسیون خطی به منظور پیش‌بینی پارامترهای خروجی شوک‌دهی سطحی لیزری استفاده شد.  $S^{\alpha} O^{\beta} P^{\gamma} N^{\delta} T^{\theta}$  به عنوان متغیر ترکیبی در معادله خطی  $Y = aX + b$  شرکت می‌کند. که در آن  $S$  قطر لکه لیزر،  $O$  میزان همپوشانی،  $P$  چگالی توان،  $N$  لیزر





شکل ۴. نتایج شبیه سازی برای میدان تنش و تغییر شکل بر اساس ترکیب  $d1o50p3n1t8$

جدول ۵. میزان تنش پسماند فشاری و تغییر شکل سطح برای ۲۷ نمونه آزمایش

نمونه	تغییر شکل سطح	حداکثر تنش پسماند	نمونه	تغییر شکل سطح	حداکثر تنش پسماند	نمونه	تغییر شکل سطح	حداکثر تنش پسماند
$d1o50p3n1t8$	۰/۹۸ میکرون	-۴۵۰ مگاپاسکال	$d2o50p6n3t8$	۵۶ میکرون	-۵۳۷ مگاپاسکال	$d3o50p9n2t8$	۴۲ میکرون	-۹۲۲ مگاپاسکال
$d1o50p3n1t14$	۱/۱ میکرون	-۴۸۱ مگاپاسکال	$d2o50p6n3t14$	۵۹ میکرون	-۷۶۰ مگاپاسکال	$d3o50p9n2t14$	۵۱ میکرون	-۹۰۹ مگاپاسکال
$d1o50p3n1t20$	۲/۲ میکرون	-۵۶۸ مگاپاسکال	$d2o50p6n3t20$	۱۵۲ میکرون	-۱۰۲۲ مگاپاسکال	$d3o50p9n2t20$	۱۱۵ میکرون	-۹۸۴ مگاپاسکال
$d1o60p6n2t8$	۲۵ میکرون	-۹۴۲ مگاپاسکال	$d2o60p9n1t8$	۱۵ میکرون	-۹۰۲ مگاپاسکال	$d3o60p3n3t8$	۲۸ میکرون	-۸۹۹ مگاپاسکال
$d1o60p6n2t14$	۲۸ میکرون	-۱۰۰۶ مگاپاسکال	$d2o60p9n1t14$	۱۴ میکرون	-۹۲۶ مگاپاسکال	$d3o60p3n3t14$	۳۶ میکرون	-۹۵۱ مگاپاسکال
$d1o60p6n2t20$	۵۷ میکرون	-۱۰۴۹ مگاپاسکال	$d2o60p9n1t20$	۳۷ میکرون	-۱۰۰۱ مگاپاسکال	$d3o60p3n3t20$	۸۱ میکرون	-۹۶۸ مگاپاسکال
$d1o70p9n3t8$	۷۹ میکرون	-۹۴۵ مگاپاسکال	$d2o70p3n2t8$	۱۵ میکرون	-۹۲۳ مگاپاسکال	$d3o70p6n1t8$	۱۶ میکرون	-۶۲۹ مگاپاسکال
$d1o70p9n3t14$	۹۸ میکرون	-۹۶۵ مگاپاسکال	$d2o70p3n2t14$	۱۶ میکرون	-۹۷۰ مگاپاسکال	$d3o70p6n1t14$	۱۸ میکرون	-۶۱۹ مگاپاسکال
$d1o70p9n3t20$	۲۱۸ میکرون	-۱۰۱۱ مگاپاسکال	$d2o70p3n2t20$	۳۶ میکرون	-۱۰۱۹ مگاپاسکال	$d3o70p6n1t20$	۴۱ میکرون	-۹۰۵ مگاپاسکال

هر تکرار الگوریتم، رگرسیون خطی اعمال شد و میزان  $R^2$

محاسبه شده به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. با تکرار الگوریتم و اعمال عملگرهای الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی تا بدست آوردن بهترین تخمین از

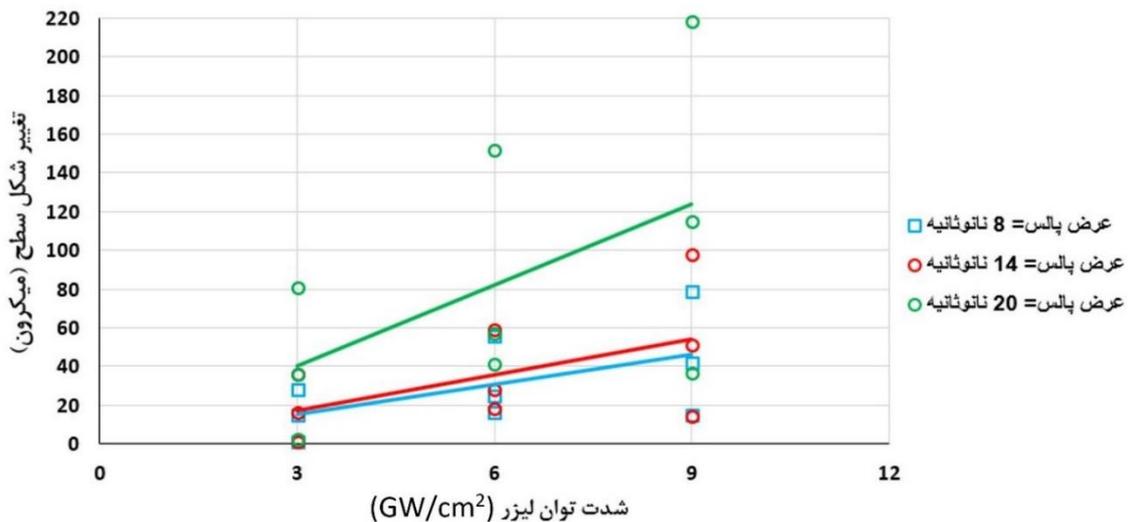
در الگوریتم، ابتدا مقادیری به صورت تصادفی برای ضرایب در نظر گرفته شد. سپس با تشکیل مجموعه جواب‌های متغیر ترکیبی به همراه خروجی مورد نظر، در

پالس با شدت توان لیزر ثابت، میزان تغییر شکل سطح به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. شکل ۶ حداکثر تغییر شکل سطح ماده را بر حسب میزان همپوشانی برای سه قطر لکه لیزر نشان می‌دهد. از نمودار شکل ۶ می‌توان دریافت که افزایش میزان همپوشانی به میزان قابل توجهی موجب افزایش تغییر شکل سطح می‌شود. بر عکس موارد فوق، افزایش قطر لکه موجب کاهش میزان تغییر شکل سطح می‌شود.

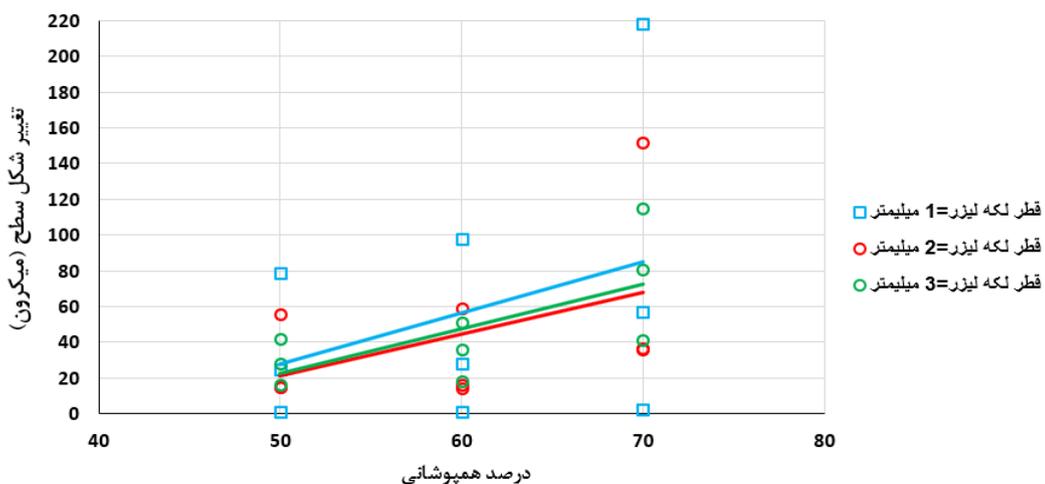
ضرایب و کمینه‌سازی  $R^2$  به عنوان تابع هدف، ادامه پیدا کرد.

### تغییر شکل سطح

شکل ۵ حداکثر تغییر شکل سطح ماده را بر حسب شدت توان لیزر برای سه عرض پالس ۸، ۱۴ و ۲۰ نانوثانیه نشان می‌دهد. بررسی شکل نشان می‌دهد که در نتیجه افزایش شدت توان لیزر با عرض پالس ثابت، میزان تغییر شکل سطح افزایش می‌یابد. همچنین در نتیجه افزایش عرض

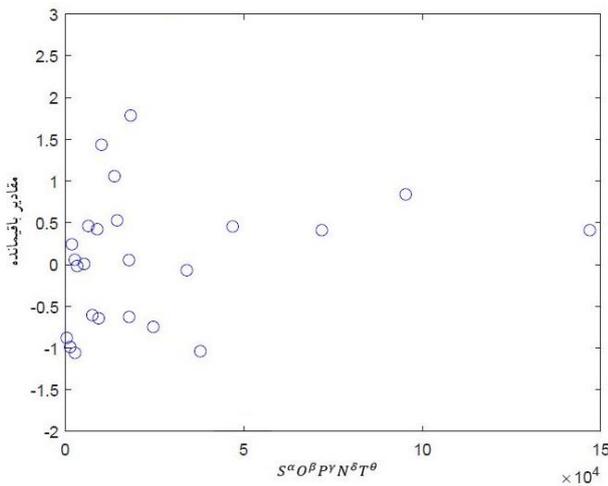


شکل ۵. نمودار نشان دهنده میزان تغییر شکل سطح بر حسب دو پارامتر کلیدی شدت توان لیزر و عرض پالس لیزر.



شکل ۶. نمودار نشان دهنده میزان تغییر شکل سطح بر حسب دو پارامتر کلیدی درصد همپوشانی و قطر لکه لیزر

رگرسیون خطی  $R^2 = 0.93$  با پارامتر ترکیبی برابر  $S^{1.9639}O^{2.2858}P^{1.3353}N^{0.0452}T^{0.0981}$  است. معادله خطی  $Y = Ax + B$  با بدست آوردن ضرایب به صورت زیر بدست می آید:

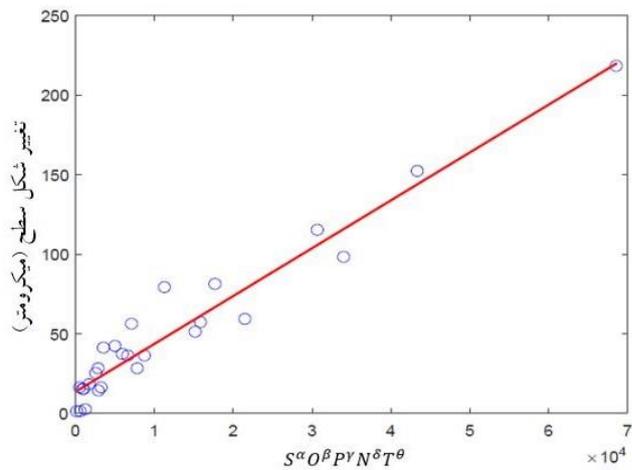
$$Y = 0.003(S^{1.9639}O^{2.2858}P^{1.3353}N^{0.0452}T^{0.0981}) + 13.611$$


(ب)

مقادیر باقیمانده.  $S^{1.9639}O^{2.2858}P^{1.3353}N^{0.0452}T^{0.0981}$  (ب)

پارامتر ترکیبی بدست آمده برای میزان تغییر شکل سطح برابر  $S^{1.9639}O^{2.2858}P^{1.3353}N^{0.0452}T^{0.0981}$  است.

شکل ۷ وابستگی آماری تغییر شکل سطح به پارامتر ترکیبی حاصل از قطر لکه لیزر، میزان همپوشانی، چگالی توان لیزر تعداد تکرار و عرض پالس لیزر را نشان می دهد. مطابق این شکل، تغییر شکل سطح دارای رابطه خطی با ضریب



(الف)

شکل ۷. (الف) وابستگی میزان تغییر شکل سطح به پارامتر ترکیبی

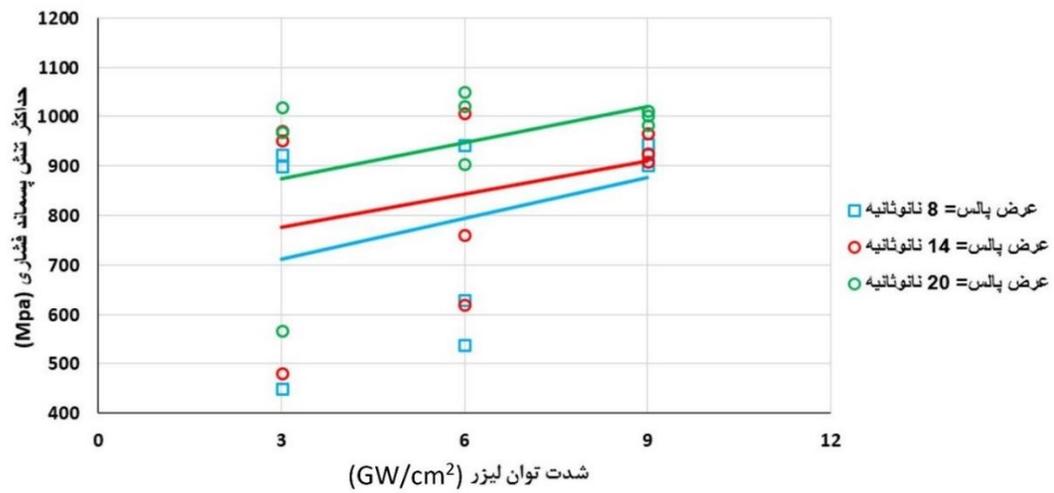
پارامتر ترکیبی بدست آمده برای میزان حداکثر تنش پسماند فشاری برابر  $S^{2.0987}O^{3.3483}P^{1.8138}N^{1.0163}T^{0.8931}$  است. شکل ۱۰ وابستگی آماری حداکثر تنش پسماند فشاری به پارامتر ترکیبی حاصل از قطر لکه لیزر، میزان همپوشانی، چگالی توان لیزر تعداد تکرار و عرض پالس لیزر را نشان می دهد. مطابق این شکل، حداکثر تنش پسماند فشاری دارای رابطه خطی با ضریب رگرسیون خطی  $R^2 = 0.9447$  با پارامتر ترکیبی  $S^{2.0987}O^{3.3483}P^{1.8138}N^{1.0163}T^{0.8931}$  است. معادله خطی  $Y = Ax + B$  با بدست آوردن ضرایب به صورت زیر بدست می آید:

$$Y = 4.428e-04 (S^{2.0987}O^{3.3483}P^{1.8138}N^{1.0163}T^{0.8931}) + 799.561$$

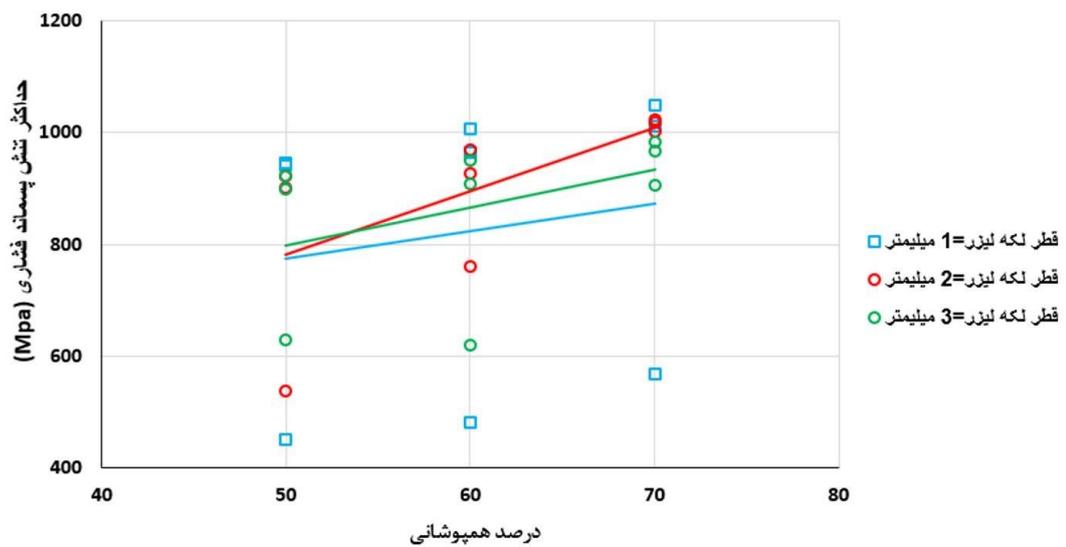
### تنش پسماند

شکل ۸ حداکثر تنش پسماند فشاری در ماده را بر حسب شدت توان لیزر برای سه عرض پالس ۸، ۱۴ و ۲۰ نانواتیه نشان می دهد. بررسی شکل ۸ نشان می دهد که در نتیجه افزایش شدت توان لیزر با عرض پالس ثابت، میزان تنش پسماند فشاری افزایش می یابد. همچنین در نتیجه افزایش عرض پالس با شدت توان لیزر ثابت، میزان تنش پسماند فشاری به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. شکل ۹ حداکثر تنش پسماند فشاری در ماده را بر حسب میزان همپوشانی برای سه قطر لکه لیزر نشان می دهد. از نمودار شکل ۹ می توان دریافت که افزایش میزان همپوشانی به میزان قابل توجهی موجب افزایش تنش پسماند فشاری می شود. بر عکس موارد فوق افزایش قطر لکه موجب کاهش تنش پسماند فشاری می شود.

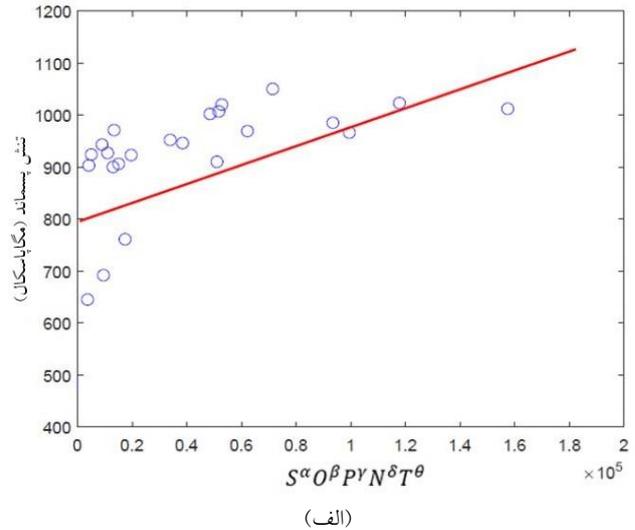
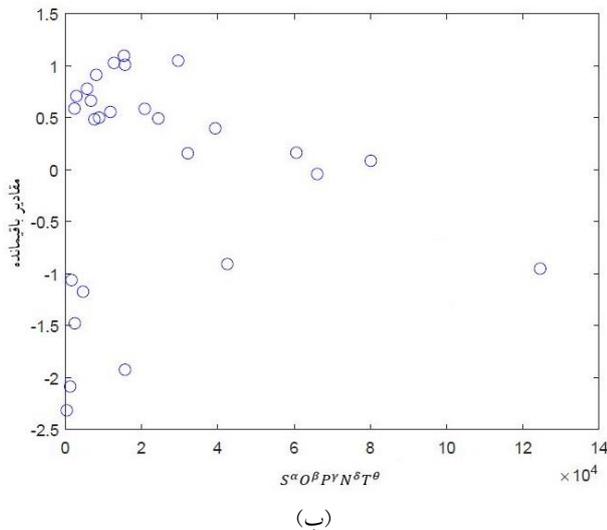
ایلاتلو و همکاران، بهینه‌سازی توزیع تنش و تغییر شکل سطح آلیاژ  $4V - Al - Ti$  در فرایند، علوم و مهندسی سطح ۵۰(۱۴۰۰)۱۳



شکل ۸. نمودار نشان دهنده میزان حداکثر تنش پسماند فشاری بر حسب دو پارامتر کلیدی شدت توان لیزر و عرض پالس لیزر.



شکل ۹. نمودار نشان دهنده میزان حداکثر تنش پسماند فشاری بر حسب دو پارامتر کلیدی درصد همپوشانی و قطر لکه لیزر.



شکل ۱۰. الف) وابستگی حداکثر تنش پسماند فشاری به پارامتر ترکیبی (الف) و ابستگی حداکثر تنش پسماند فشاری به پارامتر ترکیبی (ب) مقادیر باقیمانده.

موجب افزایش تغییر شکل سطح شده است. عکس موارد فوق افزایش قطر لکه موجب کاهش میزان تغییر شکل سطح شده است.

- با تعریف متغیر ترکیبی برای پارامترهای مؤثر لیزر و اعمال الگوریتم ژنتیک، خطی سازی با دقت بالا ۹۳ درصد برای پیش بینی تغییر شکل سطح و دقت بالای ۹۴ درصد برای پیش بینی میزان تنش پسماند حاصل شد. معادله خطی  $Y=Ax+B$  بدست آمده برای محاسبه تغییر شکل سطح بر حسب پارامترهای لیزر به صورت

$$Y=0.003(S^{1.9639}O^{2.2858}P^{1.3353}N^{-0.0452}T^{0.0981})+13.611$$

و برای محاسبه تنش پسماند بر حسب پارامترهای

لیزر به صورت

$$Y= 4.43e-04 (S^{2.099}O^{3.3483} P^{1.813} N^{1.013} T^{0.894})+ 799.561$$

حاصل شد.

#### منابع

1. Y. Hao, Z. Jibin, and W. Tianran, *Research on a different method to reach the saturate limit of titanium aluminide alloy surface mechanical and fatigue properties by laser shock process*, Optik (Stuttg)., 193(2019).
2. G. Lohmann, K. Erfurth, R. Turner, *Analysis of Microstructural Evolution Properties Based*

#### نتیجه گیری

این مقاله تاثیر پارامترهای SLSP در سطوح متفاوت بر میزان تنش پسماند ایجاد شده و تغییر شکل سطح در نمونه را به کمک تجزیه و تحلیل المان محدود بررسی می کند. همچنین یک مدل بهینه خطی برای پیش بینی خروجی های فرایند ارائه می دهد.

- با افزایش شدت توان لیزر با عرض پالس ثابت، میزان تنش پسماند فشاری افزایش می یابد. همچنین در نتیجه افزایش عرض پالس با شدت توان لیزر ثابت، میزان تنش پسماند فشاری به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش میزان همپوشانی به میزان قابل توجهی موجب افزایش تنش پسماند فشاری می شود. عکس موارد فوق افزایش قطر لکه موجب کاهش تنش پسماند فشاری می شود.
- بررسی ها نشان داد که در نتیجه افزایش شدت توان لیزر با عرض پالس ثابت، میزان تغییر شکل سطح افزایش می یابد. همچنین در نتیجه افزایش عرض پالس با شدت توان لیزر ثابت، میزان تغییر شکل سطح به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش میزان همپوشانی به میزان قابل توجهی

14. Y. Hu, R. Yang, D. Wang, and Z. Yao, *Geometry distortion and residual stress of alternate double-sided laser peening of thin section component*, J. Mater. Process. Technol., 251(2018) 197-204.
15. A. W. Warren, Y. B. Guo, and S. C. Chen, *Massive parallel laser shock peening: Simulation, analysis, and validation*, Int. J. Fatigue, 30(2008) 188-197.
16. K. K. Liu and M. R. Hill, *The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons*, Tribol. Int., vol. 42(2009) 1250-1262.
17. S. Zabeen, M. Preuss, and P. J. Withers, *Evolution of a laser shock peened residual stress field locally with foreign object damage and subsequent fatigue crack growth*, Acta Mater., 83(2015) 216-226.
18. 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(2016) 112-117.
19. D. Framil Carpeño, T. Ohmura, L. Zhang, M. Dickinson, C. Seal, and M. Hyland, *Softening and compressive twinning in nanosecond ultraviolet pulsed laser-treated Ti-6Al-4V*, Scr. Mater., 113(2016) 139-144.
20. C. Cellard, D. Reirant, M. François, E. Rouhaud, and D. Le Saunier, *Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: Influence of process parameters*, Mater. Sci. Eng. A, 532(2012).
21. Y. W. Fang, Y. H. Li, W. F. He, and P. Y. Li, *Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade* Mater. Sci. Eng. A, 559(2013).
22. K. Y. Luo, J. Z. Lu, Q. W. Wang, M. Luo, H. Qi, and J. Z. Zhou, *Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters*, Appl. Surf. Sci., 285( 2013).
23. 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*, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, vol. 547(1983)541-547.
24. M. Di Sciuva, C. Frola, and S. Salvano, *Low and high velocity impact on Inconel 718 casting plates: Ballistic limit and numerical on Laser Shock Peening*, Optik (Stuttg)., 179, (2018) 361-366.
3. S. Amini, M. Dadkhah, R. Teimouri, *Study on laser shock penning of Incoloy 800 super alloy*, Optik (Stuttg)., 140(2017) 308-316, 2017.
4. H Qiao, B Sun, J Zhao, Y Lu, Z Cao, *Numerical modeling of residual stress field for linear polarized laser oblique shock peening*, Optik (Stuttg)., 186(2019) 52-62.
5. Y. X. Hu and Z. Q. Yao, *Fem simulation of residual stresses induced by laser shock with overlapping laser spots*, Acta Metall. Sin. (English Lett), 21(2008) 125-132, 2008.
6. H. R. Karbalaian, A. Yousefi-Koma, M. Karimpour, and S. S. Mohtasebi, *Investigation on the Effect of Overlapping Laser Pulses in Laser Shock Peening with Finite Element Method*, Procedia Mater. Sci., 11(2015) 454-458.
7. 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(2015) 480-489.
8. W. Zhou, X. Ren, Y. Yang, Z. Tong, and E. Asuako Larson, *Finite element analysis of laser shock peening induced near-surface deformation in engineering metals*, Opt. Laser Technol., 119(2019).
9. K. Ding and L. Ye, *Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy*, J. Mater. Process. Technol., 178(2006) 162-169.
10. F. Dai, J. Zhou, J. Lu, and X. Luo, *A technique to decrease surface roughness in overlapping laser shock peening*, Appl. Surf. Sci., 370(2016)501-507.
11. J. Wu, J. Zhao, H. Qiao, Y. Zhang, X. Hu, and Y. Yu, *Evaluating methods for quality of laser shock processing*, Optik (Stuttg)., 200, (2020).
12. J. Wu, X. Liu, J. Zhao, H. Qiao, Y. Zhang, and H. Zhang, *The online monitoring method research of laser shock processing based on plasma acoustic wave signal energy*, Optik (Stuttg)., 183(2019) 1151-1159.
13. G. Ranjith Kumar, G. Rajyalakshmi, and S. Swaroop, *A critical appraisal of laser peening and its impact on hydrogen embrittlement of titanium alloys*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 233, (2019) 2371-2398.

*correlation*, Int. J. Impact Eng., 28(2003) 849-876.

25. A. S. Khan, Y. S. Suh, and R. Kazmi, *Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys*, Int. J. Plast., 20(2004) 2233-2248.

26. F. J. Zerilli and R. W. Armstrong, *Dislocation mechanics based constitutive equation incorporating dynamic recovery and applied to thermomechanical shear instability*, (2008)215–218.

27. R. K. G and R. G, *FE simulation for stress distribution and surface deformation in Ti-6Al-4V induced by interaction of multi scale laser shock peening parameters*, Optik (Stuttg)., 206 (2020).