



Multi-Objective Optimization of Laser Peening Process Parameters Using Taguchi Orthogonal Array and Gray Relational Analysis

R. Bikdeloo¹, A. Kiani², H. Salavati^{3*}

¹Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Garmsar, Iran.

³ Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Review History:

Received: 26 Apr. 2019

Revised: 13 Sep. 2019

Accepted: 22 Sep. 2019

Available Online: 2 Oct. 2019

Keywords:

Laser peening

Finite element method

Multi-objective optimization

Gray relation analysis

ABSTRACT: Laser peening is a life-enhancing process. Radiation of laser pulse with sufficient energy at a very short time on the surface of the material results in the penetration of shock waves into the material and the formation of compressive residual stresses inside it. The purpose of this research is the multi-objective optimization of the laser peening process parameters. The finite element method is used for modeling, Taguchi orthogonal array for design of experiment and the gray relational analysis for multi-objective optimization. The diameter, pressure, time, and overlap rate between two adjacent laser pulses are considered as design factors that change in 4 levels and the Taguchi L16 orthogonal array is used for the experiment layout. The average residual stress at the surface of first pulse, minimum and maximum residual stress and the average of the residual stress depth in the center of two laser pulses were considered as optimization target functions. By performing gray relational analysis, the gray relational grade for each experiment was calculated and the optimal level of each parameter was obtained. The results indicate that the optimal state of each parameter of diameter, pressure, time and the overlap rate are at the fourth, fourth, first and fourth levels, respectively which are 8 mm, 4 GPa, 30 ns, and 75%.

1. Introduction

Laser peening is one of the life-improvement processes in which a laser beam is irradiated on a metal surface in a very short time (several nanoseconds) [1]. On the metal surface, an absorbent coating is painted to protect it and a transparent overlay like water flows over it. As the laser is radiated, it passes through the transparent overlay and encounters the absorbent coating and evaporates it and plasma forms. The plasma is trapped between the metal and the transparent overlay and its expansion delayed so the pressure increases to several Gigapascal. As a result, shock waves are generated and penetrated into the material [2]. Shock waves result in the deformation of the subsurface material and the stresses exceed the Hugoniot elastic limit of material (the compressive strength of the material under shock conditions) and eventually, the compressive residual stress will remain in the material [3]. Despite various studies on laser peening modeling, few studies have been performed to optimize this process. Amarchinta et al. [4] modeled residual stresses generated by the laser peening by inverse optimization of material models for the two materials Inconel718 and Ti-6Al-4V. Wang et al. [5] optimized laser parameters by multi-island genetic algorithm. Hamar et al. [6] also optimized the laser parameters to improve the flexural fatigue properties of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy.

The purpose of this study is to apply Taguchi orthogonal

array and gray relational analysis for multi-objective optimization of laser peening parameters.

2. Methodology

2.1. Simulation

Ding et al report [7] is used for modeling and verification. They used a two-dimensional model in their study, but it is not possible to investigate effects of overlap rate on surface stresses by two-dimensional model. In this study, for simulation of the laser pulse, a three-dimensional model developed which is shown in Fig 1. In laser peening simulation, the model is divided into two zones: a finite area where laser peening is performed in this area and an infinite

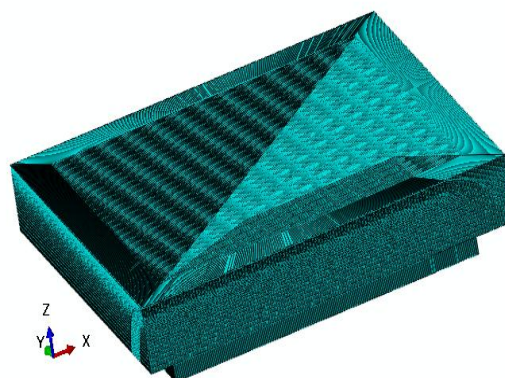


Fig. 1. 3-D Model developed in this study

*Corresponding author's email: hadi_salavati@uk.ac.ir



area around it that is used to damp the stress waves. The finite area has a rectangular shape with elastic and plastic properties, while infinite elements are used around and below the finite area, and only have elastic properties to damp stress waves. C3D8R square elements were used to mesh the finite area and CIN3D8 elements were used for infinite area. ABAQUS explicit is used to analyze the wave propagation and residual stresses. Also a triangular estimation was applied for loading where the laser pressure increased linearly at half of the time to reach the peak and then decreased linearly to zero for the rest of the time.

2.2. Design of Experiments

The traditional design of experiment methods are very complex, costly and time-consuming, and when the number of parameters increases, a lot of experiments must be performed. To solve this problem, Taguchi method greatly reduced the number of experiments using orthogonal arrays. These arrays are selected with specific features from the total number of experiments in the full factorial method. As shown in Table 1 the controllable factors include laser diameter, laser pressure, laser time, and overlap rate between two adjacent laser pulses that each varying in 4 levels. Accordingly, from the proposed Taguchi tables, the L16 experiment is selected, which provides 16 different experiments. Also, average residual stress under the surface of first pulse, maximum residual stress, minimum residual stress and average depth of residual stress at the center of two laser pulses were selected as optimization outputs.

Table 1 . Laser peening parameters and their levels

Parameter	unit	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Diameter	Mm	2	4	6	8
Pressure	GPa	2.5	3	3.5	4
Time	ns	30	50	70	90
Overlap rate	%	0	25	50	75

2.3. Grey Relational Analysis

In the gray relational analysis, three steps must be taken. A) Data preprocessing: which is a computational method for normalizing raw data to be comparative. B) Gray relational coefficient: After data preprocessing, gray relational coefficients must be calculated to obtain the relationship between the normalized and the ideal data. C) Gray relational grade: After obtaining gray relational coefficients, by averaging gray relational coefficients, the gray relational grade is calculated.

3. Discussion and Results

The results of calculating the gray relational coefficients

Table 2. Response table for the grey relational grade

factors	Diameter	Pressure	Time	Overlap rate
1	0.5239	0.5392	0.6926	0.5631
2	0.5798	0.5926	0.5900	0.5594
3	0.6064	0.5857	0.5248	0.5853
4	0.6244	0.6171	0.5271	0.6268
Delta	0.1005	0.0779	0.1678	0.0674
Rank	2	3	1	4

and gray relational grades for various experiments are shown in Table 1. Based on these results, experiments 6 and 16, that gray relational grade for them is larger than the other experiments, are near-optimal.

In order to determine the optimized level of each factor, the average gray relational grade for each factor at each level must be calculated. The results are shown in Table 2. According to Table 2, the optimum levels of diameter, pressure, time, and overlap rate are at the fourth, fourth, first and fourth levels, respectively. Therefore, when the laser diameter is 8 mm, the laser pressure is 4 GPa, the laser time is 30 ns and the overlap is 75%, each factor is optimized and the best result is obtained. Also, the higher delta for a factor means the greater effect of that factor. As shown in this table, the difference between the highest and lowest values for the time is 0.1678. So, this factor has the greatest effect on the results. After that, the diameter, pressure, and overlap rate are effective on the results respectively.

4. Conclusions

In this study, the multi-objective optimization of laser

Table 3. Grey relational coefficients and grey relational grade for each experiment

Exp. Num	Average residual stress	Minimum stress	Maximum stress	Depth of residual stress	Grey relational grade
1	0.4978	0.3576	1.0000	0.3333	0.5472
2	0.4606	0.4500	0.7058	0.3917	0.5020
3	0.3788	0.5176	0.4996	0.5403	0.4839
4	0.3333	0.5838	0.3333	1.0000	0.5626
5	0.5541	0.3624	0.8917	0.4399	0.5621
6	1.0000	0.8307	0.7909	0.4019	0.7559
7	0.3451	0.5243	0.4590	0.6391	0.4919
8	0.3859	0.5373	0.4759	0.6391	0.5096
9	0.5294	0.3333	0.6705	0.5998	0.5332
10	0.4178	0.4887	0.5116	0.7404	0.5396
11	0.8469	0.8059	0.7851	0.3917	0.7119
12	0.4670	1.0000	0.5819	0.5139	0.6407
13	0.4580	0.3365	0.6818	0.5807	0.5143
14	0.4890	0.5902	0.6310	0.5807	0.5727
15	0.6542	0.6585	0.5626	0.7457	0.6553
16	0.8473	0.9558	0.7120	0.5067	0.7555

peening parameters was performed by gray relational analysis. The optimization results showed that the optimum state of diameter, pressure, time and overlap rate were in the fourth, fourth, first and fourth levels, respectively, which were 8 mm, 4 GPa, 30 nanoseconds, and 75%, respectively.

References

- [1] J.-E. Masse, G. Barreau, Laser generation of stress waves in metal, *Surface and Coatings Technology*, 70(2-3) (1995) 231-234.
- [2] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. Lieurade, Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour, *Materials Science and Engineering: A*, 210(1-2) (1996) 102-113.
- [3] J.-M. Yang, Y. Her, N. Han, A. Clauer, Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes, *Materials Science and Engineering: A*, 298(1) (2001) 296-299.
- [4] H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, A.H. Clauer, K. Langer, D.S. Stargel, Simulation of residual stress induced by a laser peening process through inverse optimization of material models, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14) (2010) 1997-2006.
- [5] W. Wang, J.Z. Zhou, S. Huang, Y.J. Fan, C. Wang, J. Fan, Parameters Optimization of Laser Shot Peening Based on Multi-Island Genetic Algorithm, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2011, pp. 387-390.
- [6] S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S.R. Mannava, K. Langer, V.K. Vasudevan, D. Qian, Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy, *Surface and Coatings Technology*, 232 (2013) 464-474.
- [7] K. Ding, L. Ye, Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3) (2006) 162-169.



بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرآیند لیزر کوبی با استفاده از آرایه‌های متعامد تاگوچی و روش تحلیل رابطه‌ای خاکستری

رسول بیکدلو^۱، علی کیانی^۲، هادی صلواتی^{۳*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، گرمسار، ایران.

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

کلمات کلیدی:

لیزر کوبی

مدل‌سازی اجزاء محدود

بهینه‌سازی

تحلیل رابطه‌ای خاکستری

تحلیل واریانس

خلاصه: لیزر کوبی یکی از فرآیندهای بهبود عمر است که با تابش پالس لیزر با انرژی کافی در زمان بسیار کوتاه بر سطح فلز منجر به نفوذ امواج شوک درون ماده و ایجاد تنش پسماند فشاری درون آن می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای موثر در فرآیند لیزر کوبی است. از روش اجزاء محدود جهت مدل‌سازی، آرایه‌های متعامد تاگوچی جهت طراحی آزمایش و تحلیل رابطه‌ای خاکستری جهت بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است. قطر، فشار، زمان و میزان هم‌پوشانی بین دو پالس مجاور لیزر به عنوان فاکتورهای طراحی که در ۴ سطح تغییر می‌کنند در نظر گرفته شده و از آرایه متعامد ال ۱۶ تاگوچی به عنوان چیدمان آزمایش‌ها استفاده شده است. میانگین تنش پسماند در سطح پالس اول، کمترین و بیشترین تنش پسماند و میانگین عمق تنش پسماند در مراکز دو پالس لیزر به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. با انجام تحلیل رابطه‌ای خاکستری، امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر آزمایش محاسبه شده و حالت بهینه هر یک از پارامترها به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده این است که حالت بهینه هر یک از پارامترهای قطر، فشار، زمان و میزان هم‌پوشانی بین دو پالس به ترتیب در سطوح چهارم، اول و چهارم می‌باشد که به ترتیب برابر ۸ میلی‌متر، ۴ گیگاپاسکال، ۳۰ نانوثانیه و ۷۵ درصد می‌باشند. همچنین تحلیل واریانس بر روی نتایج صورت گرفت تا تاثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی مشخص شود که زمان لیزر با ۵۸/۸۷ درصد، تاثیرگذارترین پارامتر بر روی نتایج است.

۱- مقدمه

آب نیز جریان دارد. زمانی که لیزر تابیده می‌شود از لایه شفاف عبور کرده و به لایه جاذب برخورد می‌کند و موجب تبخیر و یونیزه شدن آن و تشکیل پلازما می‌شود. پلاسمای تولید شده بین فلز و لایه شفاف، گیر افتاده و انبساط آن به تاخیر می‌افتد و فشار آن تا چندین گیگاپاسکال افزایش می‌یابد. در نتیجه، امواج شوک تولید شده و به درون جسم نفوذ می‌کنند [۵]. امواج شوک منجر به تغییر شکل مواد زیر سطح شده تا جایی که تنش ماده از حد الاستیک هوگونیوت^۴ (استحکام تسلیم فشاری ماده تحت شرایط شوک) تجاوز می‌کند و نهایتاً تنش پسماند فشاری مطلوب درون ماده ایجاد می‌شود [۶].

عوامل مختلفی بر روی میزان و عمق تنش پسماند ایجاد شده تاثیرگذار هستند که می‌توان به قطر لیزر، فشار لیزر، زمان تابش لیزر و ... اشاره نمود. به دلیل وجود پارامترهای مختلف تاثیرگذار در این فرآیند، مدل‌سازی می‌تواند نقش مهمی در شناسایی تاثیر این پارامترها در توزیع تنش پسماند درون قطعه داشته باشد.

خستگی یکی از دلایل عمده از کار افتادگی قطعات در صنعت می‌باشد که علت اصلی آن، ایجاد و رشد ترک و رسیدن آن به میزان بحرانی است که کنترل آن را غیرممکن نموده و موجب شکست قطعات می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده است که فرآیندهای بهبود عمر مانند ساچمه‌زنی^۱، واترجت پینینگ^۲، اولتراسونیک پینینگ^۳ و ... با ایجاد تنش پسماند فشاری مطلوب می‌توانند رشد ترک را به تاخیر انداخته و عمر خستگی فلزات را افزایش دهند [۱-۳].

لیزر کوبی یکی از فرآیندهای بهبود عمر است که اساس کار آن تابش یک پرتو لیزر در یک زمان بسیار کوتاه (چندین نانوثانیه) بر سطح یک فلز می‌باشد [۴]. شماتیک این فرآیند در شکل ۱ نمایش داده شده است. روی سطح فلز یک روکش جاذب مانند رنگ کشیده می‌شود تا از آن محافظت نماید و بر روی آن یک لایه شفاف مانند

- 1 Shot Peening
- 2 Waterjet Peening
- 3 Ultrasonic Peening

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hadi_salavati@uk.ac.ir

4 Plasma

5 ^۱ Hugoniot Elastic Limit (HEL)



عمق تنش پسماند فشاری ایجاد شده تاثیرگذار هستند که دارای اهمیت می‌باشند و بایستی بهینه شوند. بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند تاثیر به‌سزایی بر روی بهبود این فرآیند داشته باشد.

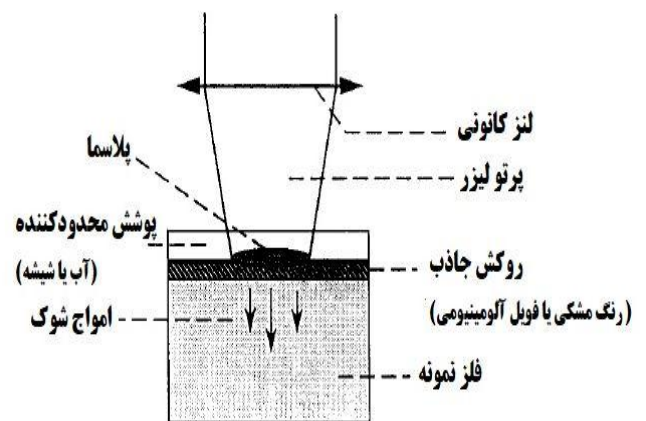
تحلیل رابطه‌ای خاکستری^۳ یک روش ساده و موثر در بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌ها می‌باشد. از این روش استفاده‌های گوناگونی در بهینه‌سازی چند هدفه فرآیندهای مختلف شده است. فو و همکاران [۱۴] به استفاده از تحلیل رابطه‌ای خاکستری در بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای محیطی موثر بر خوردگی لوله‌های انتقال نفت پرداختند. لین و لین [۱۵] به استفاده از آرایه‌های متعامد تاگوچی و تحلیل رابطه‌ای خاکستری در بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی پرداختند. پن و همکاران [۱۶] پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری لیزری آلیاژ تیتانیومی را با استفاده از تحلیل رابطه‌ای خاکستری بهینه‌سازی نمودند و رینیواسولو و رینیواسارو [۱۷] به بهینه‌سازی پارامترهای دریل‌کاری آلیاژ آلومینیومی ۶۰۶۱ با استفاده از این روش پرداختند. اما تا کنون از این روش در بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای موثر در فرآیند لیزرکوبی استفاده نشده است.

هدف از انجام این مطالعه، به کارگیری آرایه‌های متعامد تاگوچی و تحلیل رابطه‌ای خاکستری در بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای موثر در فرآیند لیزرکوبی می‌باشد. بدین جهت ابتدا مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی یک پالس لیزر استخراج شده و نتایج حاصل با گزارش دینگ و یه [۸] صحت‌سنجی خواهد شد. سپس با استفاده از آرایه‌های متعامد تاگوچی طراحی آزمایش صورت می‌گیرد. فاکتورهای کنترلی شامل قطر لیزر، فشار لیزر، زمان لیزر و میزان هم‌پوشانی بین دو پالس مجاور لیزر می‌باشد که هر یک از این ۴ پارامتر در ۴ سطح تغییر می‌کنند. با استفاده از آرایه‌های متعامد تاگوچی، ۱۶ شبیه‌سازی مختلف بایستی انجام گیرد. در هر یک از شبیه‌سازی‌ها، برخورد دو پالس لیزر در کنار هم مدل می‌شود که اولین پالس در مختصات (۰، ۰-۱۲، -۱۲) برخورد می‌کند که از هر وجه قطعه سه میلی‌متر فاصله دارد و پالس بعدی با توجه به میزان هم‌پوشانی در کنار پالس اول برخورد می‌کند. میانگین تنش پسماند در زیر پالس اول، بیشترین تنش پسماند، کمترین تنش پسماند و میانگین عمق تنش پسماند

نخستین بار در سال ۱۹۹۹ بریست و بروکمن [۷] به مدل‌سازی فرآیند لیزرکوبی پرداختند که اساس کار دیگر محققین قرار گرفت. دینگ و یه [۸] در سال ۲۰۰۶ به مدل‌سازی دوبعدی ضربات مجدد لیزر در آلیاژ فولادی ۳۵CD۴ پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش ضربات، عمق تنش پسماند افزایش می‌یابد. چائو و همکاران [۹] به مطالعه پارامتری برخورد یک پالس لیزر و چند پالس لیزر به روش تجربی و شبیه‌سازی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش چگالی پالس لیزر منجر به افزایش میزان و عمق تنش پسماند شده و افزایش میزان هم‌پوشانی پالس‌های لیزر منجر به افزایش میزان تنش پسماند می‌شود اما بر روی عمق تنش پسماند تاثیری ندارد. دای و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر قطر لیزر بر روی میدان تنش پسماند آلومینیوم خالص پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش قطر لیزر، عمق تغییر شکل پلاستیک یافته، افزایش می‌یابد.

با وجود مطالعات مختلف در زمینه مدل‌سازی فرآیند لیزرکوبی، مطالعات کمی در زمینه بهینه‌سازی این فرآیند شده است. آمارچینتا و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی تنش پسماند تولید شده در فرآیند لیزرکوبی از طریق بهینه‌سازی معکوس مدل‌های مواد برای دو ماده اینکونل ۷۱۸^۱ و Ti-۶Al-۴V پرداختند. وانگ و همکاران [۱۲] به بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای لیزرکوبی به روش الگوریتم ژنتیک چندجزیره‌ای^۲ پرداختند. هامار و همکاران [۱۳] نیز بهینه‌سازی پارامترهای لیزرکوبی را با هدف بهبود خواص خستگی خمشی آلیاژ Ti-۶Al-۲Sn-۴Zr-۲Mo انجام دادند.

در فرآیند لیزرکوبی پارامترهای مختلفی بر روی میزان و



شکل ۱. شماتیک فرآیند لیزرکوبی [۴]

Fig. 1. Schematic of the laser peening process [4]

- 1 Inconel718
- 2 Multi-Island Genetic Algorithm

تعدادل برسند. به همین دلیل عموماً از الگوریتم آباکوس استاندارد برای مرحله دوم استفاده می‌شود. در این روش بعد از مرحله اول نتایج حاصل به صورت تنش اولیه وارد آباکوس استاندارد شده و با استفاده از تحلیل استاندارد، تنش پسماند درون ماده مشخص می‌شود. به همین ترتیب دینگ و یه نیز از آباکوس اکسپلیسیت^۴ برای تحلیل مرحله اول و آباکوس استاندارد^۵ برای مرحله دوم استفاده نمودند اما در این روش بعد از برخورد هر پالس بایستی نتایج بین آباکوس استاندارد و آباکوس اکسپلیسیت منتقل شوند که زمان بر است. بنابراین در این پژوهش از آباکوس اکسپلیسیت برای تحلیل هر دو مرحله استفاده شده است که زمان مرحله اول ۴۰۰ نانوثانیه و زمان مرحله دوم ۳۰۰۰۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین گام زمانی برای مرحله اول 10^{-1} ثانیه در نظر گرفته شده تا بارگذاری به خوبی به قطعه اعمال شود اما گام زمانی مرحله دوم 2×10^{-9} ثانیه در نظر گرفته شده تا زمان حل کاهش پیدا کند.

توزیع زمانی و مکانی بارگذاری یک عامل بسیار مهم جهت مدل‌سازی است. دینگ و یه از تخمین مثلثی جهت اعمال بارگذاری استفاده نمودند که در آن فشار لیزر به صورت خطی در مدت زمان ۵۰ نانوثانیه افزایش می‌یابد تا به $2/8$ گیگاپاسکال برسد و سپس به صورت خطی کاهش می‌یابد تا بعد از ۵۰ نانوثانیه به صفر برسد. همچنین به دست آوردن توزیع مکانی لیزر بسیار پیچیده است و نیازمند آزمایش‌های دقیق می‌باشد. به همین دلیل توزیع فشار در زیر پالس لیزر به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مسئله نیز به این صورت است که زیر قطعه ثابت در نظر گرفته می‌شود و از حرکت آن در همه جهات جلوگیری می‌شود. اما بقیه نواحی قطعه به صورت آزاد در نظر گرفته می‌شوند و قیدی به آن‌ها اعمال نمی‌شود.

با توجه به ماهیت فرآیند لیزرکوبی که شامل نفوذ امواج شوک درون ماده است، نکته مهم در شبیه‌سازی، میرا کردن امواج شوک و جلوگیری از انعکاس این امواج از لبه‌های جسم است. جهت این کار بایستی از المان نیمه‌بی‌نهایت استفاده نمود. المان نیمه‌بی‌نهایت از یک طرف به ناحیه لیزرکوبی متصل می‌شود و گرهمایی که در سمت دیگر این المان‌ها وجود دارد در بی‌نهایت فرض می‌شود و بنابراین هیچ‌گونه جابه‌جائی این گرهمان نخواهند داشت، در نتیجه موجب میرا

در مرکز دو پالس لیزر به عنوان خروجی‌های مد نظر مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت با انجام تحلیل رابطه‌ای خاکستری بر روی نتایج و به دست آوردن امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر آزمایش، بهینه‌سازی صورت گرفت و حالت بهینه هر یک از پارامترهای ورودی به دست آمد.

۲- الگوسازی نظری

۲-۱- مدل‌سازی لیزرکوبی

جهت مدل‌سازی لیزرکوبی و صحت‌سنجی آن از گزارش دینگ و یه [۸] استفاده می‌شود. در این گزارش از مدل دوبعدی جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. به دلیل آن‌که در مدل دوبعدی تاثیرات پالس‌های مجاور و تغییرات تنش موجود در سطح قابل مشاهده نیست در این پژوهش از مدل سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی استفاده شده است که شماتیک آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. در مدل‌سازی لیزرکوبی، جسم به دو ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه محدود^۱ که لیزرکوبی در این ناحیه انجام می‌شود و یک ناحیه نامحدود^۲ در اطراف آن که جهت میرا نمودن امواج تنش استفاده می‌شود. ناحیه محدود دارای ابعاد $25 \times 25 \times 4$ میلی‌متر می‌باشد که المان‌های این ناحیه دارای خواص الاستیک و پلاستیک می‌باشند که از مدل الاستیک-کاملاً-پلاستیک برای مدل‌سازی خواص پلاستیک ماده استفاده شده است. در اطراف و زیر ناحیه محدود از المان‌های نیمه‌بی‌نهایت^۳ استفاده شده است که تنها دارای خواص الاستیک بوده و موجب میرا شدن امواج تنش می‌شوند.

فرآیند لیزرکوبی دارای دو مرحله متفاوت است. در مرحله اول یک فشار بسیار زیاد در مدت زمان بسیار کم به قطعه اعمال می‌شود و ماده در آن منطقه وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. در مرحله دوم که مدت زمان بیشتری طول می‌کشد بایستی به قطعه زمان داده شود تا تعادل تنش‌ها درون آن ایجاد شود و تنش پسماند درون قطعه باقی بماند. جهت مدل‌سازی مرحله اول با توجه به زمان بسیار کوتاه آن از تحلیل دینامیک اکسپلیسیت در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. اما در مرحله دوم به دلیل زمان بیشتر، الگوریتم اکسپلیسیت یک مقدار زمان بر است و مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا تنش‌ها به

4 Abaqus Explicit

5 Abaqus Standard

1 Finite

2 Infinite

3 Infinite Elements

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد [۸] ۳۵CD۴
Table 1. Mechanical properties of 35CD4 stainless steel [8]

پارامتر	چگالی	ضریب پواسون	مدول الاستیک	حد الاستیک هوگونیت (HEL)
واحد	kg.m ⁻³	-	GPa	GPa
مقدار	۷۸۰۰	۰/۲۹	۲۱۰	۱/۴۷

شدن امواج تنش خواهند شد. از المان مربعی هشت گره C³D⁸R جهت المان بندی ناحیه محدود و همچنین در اطراف و زیر این ناحیه نیز از المان C¹N³D⁸ جهت المان بندی ناحیه نیمه بی نهایت استفاده شده است. در شکل ۲ نحوه المان بندی مدل نمایش داده شده است.

زیادی بایستی انجام شود [۱۸]. برای حل این مشکل، تاگوچی با استفاده از آرایه های متعامد^۱ تعداد آزمایش ها را بسیار کاهش داد. این آرایه ها با ویژگی های خاصی از بین تعداد کل آزمایش ها در روش فاکتوریل کامل انتخاب می شوند. در آرایه های متعامد تاگوچی برای هر یک از فاکتورها در هر سطح، مابقی فاکتورها در تمام سطوح خود حداقل یک بار بایستی تکرار شوند. همچنین تعداد تکرار سطوح هر فاکتور در کلیه ستون ها یکسان می باشد، بین هر دو ستون انتخابی خاصیت تقارن بین اعداد وجود دارد و نیز جابجایی در سطرها و ستون ها بر خاصیت تعامد آرایه متعامد تأثیری نمی گذارد. انتخاب آرایه متعامد برای انجام آزمایش بستگی به چند مورد دارد: (۱) تعداد فاکتورها و اثر متقابل بین آن ها (۲) تعداد سطوحی که هر یک از فاکتورها تغییر می کنند (۳) دقت آزمایش مطلوب و محدودیت های هزینه [۱۵]. در روش تاگوچی فاکتورهای قابل کنترل به پارامترهایی گفته می شود که در حین طراحی در نظر گرفته شده و با تغییر در مقدار آن ها می توان خواص کیفی محصول را تغییر داد و با تنظیم میزان آن ها می توان خواص کیفی مطلوب را در محصول به دست آورد. سطوح فاکتورها نیز مقادیر و یا حالاتی هستند که برای یک فاکتور تعریف می شوند [۱۹].

فاکتورهای قابل کنترل در این پژوهش شامل قطر لیزر، فشار لیزر، زمان لیزر و میزان هم پوشانی بین دو پالس لیزر می باشد که در جدول

شکل ۲. مدل سه بعدی ارائه شده در این پژوهش
Fig. 2. 3D Model developed in this study



جنس ماده مورد استفاده، فولاد ۳۵CD۴ است که خواص مکانیکی آن در جدول ۱ گزارش شده است [۸].

۲-۲- طراحی آزمایش

روش های سنتی طراحی آزمایش بسیار پیچیده، پرهزینه و زمان بر هستند و زمانی که تعداد پارامترها افزایش می یابد، آزمایش های بسیار

جدول ۲. پارامترهای لیزرکوبی و سطوح آن ها
Table 2. Laser peening parameters and their levels

پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
قطر لیزر	میلی متر	۲	۴	۶	۸
فشار لیزر	گیگاپاسکال	۲/۵	۳	۳/۵	۴
زمان لیزر	نانوثانیه	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰
میزان هم پوشانی	درصد	۰	۲۵	۵۰	۷۵

فشاری افزایش یابد عمر خستگی افزایش می‌یابد. بنابراین در این پژوهش چهار خروجی زیر جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند.

• **میانگین تنش پسماند در سطح در زیر پالس اول**

یکی از عوامل موثر در رشد ترک خستگی، تنش پسماند فشاری مطلوب ایجاد شده در سطح قطعه است. هر چه میانگین تنش پسماند موجود در سطح، فشاری تر باشد عمر خستگی قطعه افزایش می‌یابد. جهت این که بتوان مقایسه منطقی بین آزمایش‌های مختلف انجام داد، میانگین تنش پسماند در زیر پالس اول در آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و در این ناحیه محاسبه می‌شود. زیرا افزایش تنش پسماند در این ناحیه نشان‌دهنده این است که پارامترهای لیزر و میزان هم‌پوشانی به‌درستی انتخاب شده‌اند. این تنش تنها در زیر پالس اول محاسبه می‌شود تا بتوان تاثیر میزان هم‌پوشانی را نیز در نظر گرفت تا بتوان نتیجه‌گیری نمود که پالس دوم در چه فاصله‌ای نسبت به پالس اول بایستی کوبیده شود تا بیشترین تنش در این ناحیه ایجاد شود.

• **کمترین تنش پسماند**

خروجی دیگر، کمترین تنش پسماند (بیشترین تنش فشاری) ایجاد شده درون قطعه است که در هر جایی از قطعه می‌تواند ایجاد شود. هدف لیزرکوبی این است که تنش پسماند فشاری تا حد ممکن افزایش یابد. بنابراین کمترین تنش پسماند به عنوان معیاری از تنش پسماند ایجاد شده در قطعه استفاده می‌شود و افزایش این مقدار نشان از افزایش تنش پسماند فشاری در نواحی مختلف است.

• **بیشترین تنش پسماند**

یک عامل بسیار مهم و تاثیرگذار بر روی عمر رشد ترک و خستگی قطعات، تنش پسماند کششی ایجاد شده درون آن‌هاست که به دلیل ایجاد تعادل درون قطعه ایجاد می‌شود. بدیهی است که هر چه تنش پسماند کششی ایجاد شده بیشتر باشد، زیان‌آورتر است و بایستی سعی شود تا در حد امکان تنش پسماند کششی ایجاد شده کمتر باشد. در برخی موارد، تنش پسماند فشاری، به خوبی در مناطق مختلف قطعه ایجاد می‌شود اما به علت وجود تمرکز تنش کششی در یک ناحیه کوچک، زمانی که قطعه تحت بارگذاری واقعی قرار می‌گیرد خیلی زودتر از زمان مورد انتظار شکسته می‌شود. بنابراین بیشترین تنش کششی ایجاد شده نیز بایستی مد نظر قرار گیرد و تا حد امکان کوچک باشد.

۲ فاکتورهای کنترلی و سطوح آن‌ها نمایش داده شده است.

میزان هم‌پوشانی بین دو پالس مجاور لیزر با استفاده از رابطه (۱)

تعریف می‌شود:

$$(1) \quad \text{میزان همپوشانی} = \frac{\text{فاصله بین مرکز دو پالس لیزر} - \text{قطر لیزر}}{\text{قطر لیزر}} \times 100$$

انتخاب آرایه متعامد مناسب به درجه آزادی آزمایش بستگی دارد. درجه آزادی آزمایش از مجموع درجات آزادی فاکتورها به دست می‌آید. درجه آزادی هر فاکتور نیز برابر سطح آن فاکتور منهای یک است. در این پژوهش چهار فاکتور وجود دارد که هر یک در چهار سطح تغییر می‌کنند پس درجه آزادی هر فاکتور برابر ۳ است و درجه آزادی کل آزمایش نیز برابر ۱۲ می‌باشد. برای انتخاب آرایه متعامد مناسب، درجه آزادی آرایه متعامد بایستی از درجه آزادی کل آزمایش، بزرگ‌تر بوده یا مساوی آن باشد. بر این اساس از بین جداول پیشنهادی تاگوچی، آزمایش ال ۱۶^۱ انتخاب می‌شود که شامل ۱۶ آزمایش مختلف است. در جدول ۳ آزمایش‌های ال ۱۶ تاگوچی نمایش داده شده است.

جهت افزایش عمر خستگی فلزات بایستی تنش پسماند فشاری مطلوب درون قطعه ایجاد شود. هرچه میزان و عمق تنش پسماند

جدول ۳. چیدمان آزمایش‌ها با استفاده از آرایه متعامد ال ۱۶ تاگوچی
Table 3. Experiments layout using Taguchi L16 orthogonal array

شماره آزمایش	سطح پارامترها		
	همپوشانی	زمان	فشار
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۲
۳	۳	۳	۳
۴	۴	۴	۴
۵	۲	۱	۲
۶	۲	۲	۱
۷	۲	۳	۲
۸	۲	۴	۳
۹	۳	۱	۴
۱۰	۳	۲	۱
۱۱	۳	۳	۲
۱۲	۳	۴	۳
۱۳	۴	۱	۲
۱۴	۴	۲	۳
۱۵	۴	۳	۴
۱۶	۴	۴	۱

1 L16

• **عمق تنش پسماند**

یکی دیگر از عوامل مهم در افزایش عمر خستگی فلزات، عمق نفوذ تنش پسماند فشاری است. هر چه عمق نفوذ تنش پسماند فشاری بیشتر باشد عمر خستگی فلزات نیز افزایش می‌یابد. عمق نفوذ تنش پسماند در کل ناحیه لیزرخورده به سادگی قابل محاسبه نیست. اما پیشروی تنش پسماند فشاری درون قطعه به صورت تقریباً یکنواخت اتفاق می‌افتد. پس اگر در یک یا دو ناحیه، عمق تنش پسماند افزایش داشته باشد حاکی از افزایش عمق تنش پسماند در نواحی دیگر نیز می‌باشد. بنابراین عمق تنش پسماند در راستای دو خط که از مراکز دو پالس لیزر در راستای عمق قطعه نفوذ می‌کنند، محاسبه شده و در نهایت میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد یعنی عمق تنش پسماند در زیر پالس اول و دوم، افزایش یافته است. علی‌رغم مزایای بسیاری که روش تاگوچی دارد، این روش تنها برای بهینه‌سازی مسائل تک‌هدفه قابلیت کاربرد دارد. در مسائل چندهدفه، بایستی از روش‌های دیگری جهت بهینه‌سازی استفاده نمود. یکی از پرکاربردترین روش‌ها در بهینه‌سازی چندهدفه مسائل پیچیده، تحلیل رابطه‌ای خاکستری می‌باشد.

۲-۳- تحلیل رابطه‌ای خاکستری

تئوری سیستم خاکستری برای اولین بار در سال ۱۹۸۲ توسط دنگ ارائه شد [۲۰]. اگر اطلاعات واضح و شفاف یک سیستم را با رنگ سفید و اطلاعات کاملاً ناشناخته یک سیستم را با رنگ سیاه نمایش دهیم، در این صورت اطلاعات مربوط به بیشتر سیستم‌های موجود در طبیعت، اطلاعات سفید (کاملاً شناخته) و یا سیاه (کاملاً ناشناخته) نیستند، بلکه مخلوطی از آن دو یعنی به رنگ خاکستری هستند. این‌گونه سیستم‌ها را سیستم‌های خاکستری می‌نامند که اصلی‌ترین مشخصه آن‌ها، کامل نبودن اطلاعات مربوط به آن سیستم است [۲۱]. در تحلیل رابطه‌ای خاکستری ۳ مرحله بایستی انجام شود.

۲-۳-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

در تحلیل رابطه‌ای خاکستری زمانی که بازه تغییرات یک دنباله زیاد باشد و یا واحد اندازه‌گیری دنباله‌ها یکسان نباشد و یا پراکندگی داده‌ها زیاد باشد نیاز به پیش‌پردازش داده‌ها است. پیش‌پردازش

داده‌ها یک روش برای تغییر دنباله‌های عددی اصلی به دنباله‌های عددی قابل مقایسه است. بنابراین داده‌ها بایستی نرمال‌سازی شده و مقیاس‌بندی شوند تا قابلیت مقایسه بین دنباله‌ها وجود داشته باشد. به‌همین منظور، داده‌ها بایستی بین صفر و یک نرمال‌سازی شوند که این عمل تولید رابطه‌ای خاکستری^۲ نامیده می‌شود. این نرمال‌سازی با سه رویکرد متفاوت می‌تواند انجام شود:

• **بزرگ‌تر بهتر است**

زمانی که هدف نهایی یک دنباله نامعلوم بوده و هرچه داده‌ها بزرگ‌تر شوند نتایج بهتری به دست می‌آید، از این نرمال‌سازی استفاده می‌شود که در رابطه (۲) نمایش داده شده است:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i^0(k) - \min X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (2)$$

• **کوچک‌تر بهتر است**

زمانی که هدف نهایی این باشد که داده‌ها کوچک شوند و هرچه کوچک‌تر شوند بهتر است، از رابطه (۳) جهت نرمال‌سازی استفاده می‌شود:

• **نزدیک بهینه بهتر است**

$$X_i^*(k) = \frac{\max X_i^0(k) - X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (3)$$

اگر هدف نهایی این باشد که داده‌ها به یک مقدار مشخص نزدیک شوند، می‌توان از رابطه (۴) جهت نرمال‌سازی استفاده نمود:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i^0(k) - X_i^0|}{\max X_i^0(k) - X_i^0(k)} \quad (4)$$

که در روابط بالا $X_i^0(k)$ داده‌ی اصلی (خام)، $X_i^*(k)$ داده بعد از تولید رابطه‌ای خاکستری (پیش‌پردازش داده‌ها)، $\max X_i^0(k)$ و $\min X_i^0(k)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار $X_i^0(k)$ و مقدار بهینه مد نظر است [۱۷].

۲-۳-۲- ضریب رابطه‌ای خاکستری^۲

پس از پیش‌پردازش داده‌ها بایستی ضرایب رابطه‌ای خاکستری

2 Grey Relational Generation
3 Grey Relational Coefficient

1 Data Pre-Processing

۳-۳- تحلیل واریانس

از تحلیل واریانس استفاده می‌شود تا مشخص شود که هر فاکتور چه میزان بر روی خروجی تاثیرگذار است. تحلیل واریانس بر روی امتیاز رابطه‌ای خاکستری انجام می‌گیرد. جهت انجام این کار بایستی مجموع تغییرات امتیاز رابطه‌ای خاکستری که از انحراف مربعات هر آزمایش از میانگین کل آزمایش‌ها به دست می‌آید را به میزان مشارکت هر پارامتر و خطا اختصاص داد. بنابراین ابتدا بایستی مجموع کل مربع انحرافات SS_T مطابق رابطه (۷) محاسبه شود:

$$SS_T = \sum_{j=1}^n (\gamma_j - \gamma_m)^2 \quad (7)$$

که در این رابطه، n تعداد آزمایش‌ها در آرایه‌های متعامد، γ_j میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای زمین آزمایش و γ_m میانگین کل امتیازات رابطه‌ای خاکستری است.

مجموع کل مربع انحرافات به دو بخش قابل تجزیه است: مربع انحرافات ناشی از پارامترها و انحراف ناشی از خطا. از طریق رابطه (۸) می‌توان مربع انحرافات ناشی از هر فاکتور را محاسبه نمود:

$$SS_f = \sum_{f=1}^4 (\gamma_f - \gamma_m)^2 \quad (8)$$

که در رابطه بالا γ_f میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری هر فاکتور در هر سطح می‌باشد. پس از به دست آمدن مربع انحرافات هر فاکتور، طبق رابطه (۹) اختلاف مجموع مربعات فاکتورها از SS_T مربع انحرافات خطا را نشان می‌دهد.

$$SS_e = SS_T - \sum_{j=1}^4 SS_f \quad (9)$$

از تقسیم مربع انحراف هر فاکتور بر درجه آزادی آن فاکتور، میانگین مربع انحراف هر فاکتور و از تقسیم مربع انحرافات خطا بر درجه آزادی خطا میانگین مربع انحراف خطا به دست می‌آید. همچنین از تقسیم میانگین مربع انحراف هر فاکتور بر میانگین مربع انحراف خطا، نسبت واریانس (مقدار F) برای آن فاکتور به دست می‌آید.

میزان تاثیر هر فاکتور نیز مطابق رابطه (۱۰) از تقسیم مربع انحرافات ناشی از آن فاکتور بر مجموع مربع انحرافات به دست می‌آید.

محاسبه شود تا ارتباط بین داده‌های نرمال‌سازی شده و ایده‌آل به دست آید. ضرایب رابطه‌ای خاکستری به وسیله رابطه (۵) محاسبه

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} - \xi_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi_{\max}} x_i^0(k) - x_i^0 \quad (5)$$

می‌شوند:

که در این رابطه $\Delta_{0i}(k)$ ، قدر مطلق اختلاف بین دنباله مرجع $x_i^0(k)$ و دنباله مقایسه‌ای^۲ مد نظر $x_i^*(k)$ است و Δ_{\min} و Δ_{\max} به ترتیب بیشترین مقدار و کمترین مقدار به دست آمده برای $\Delta_{0i}(k)$ می‌باشند. همچنین، ξ_i ضریب تمایز^۳ است که مقداری بین صفر و یک دارد و عموماً برابر 0.5 فرض می‌شود. با روابط ریاضی ثابت می‌شود که تغییر ξ_i تنها مقادیر ضرایب رابطه‌ای خاکستری را تغییر می‌دهد و تاثیری بر روی رتبه‌بندی امتیاز رابطه‌ای خاکستری ندارد [۲۲].

۳-۳-۲- امتیاز رابطه‌ای خاکستری^۴

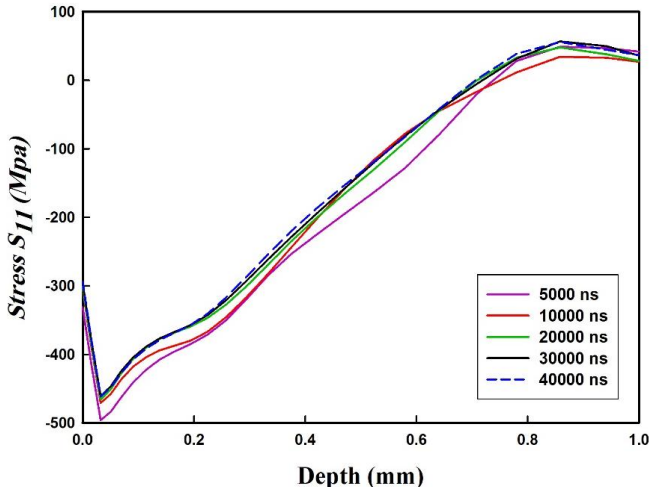
پس از به دست آوردن ضرایب رابطه‌ای خاکستری، با میانگین‌گیری ضرایب رابطه‌ای خاکستری مطابق رابطه (۶)، امتیاز رابطه‌ای خاکستری محاسبه می‌شود:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W_k \xi_i(k), \sum_{k=1}^n W_k = 1 \quad (6)$$

که در آن W_k مقدار وزنی نرمال شده برای هر فاکتور است.

در تحلیل رابطه‌ای خاکستری، اگر دو دنباله مساوی باشند امتیاز رابطه‌ای خاکستری آن‌ها برابر می‌شود. امتیاز رابطه‌ای خاکستری همچنین نشان‌دهنده میزان تاثیری است که دنباله مقایسه‌ای می‌تواند بر دنباله مرجع اعمال کند. بنابراین اگر یک دنباله مقایسه‌ای نسبت به دیگری بر روی دنباله مرجع تاثیر بیشتری داشته باشد، امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای آن دنباله بزرگ‌تر است. منظور از دنباله مرجع بهترین حالت ممکن برای یک دنباله است که با فرض آن که داده‌ها ما بین صفر و یک تغییر می‌کنند، دنباله مرجع را می‌توان دنباله‌ای در نظر گرفت که تمام اعضای آن مقدار یک را به خود اختصاص داده‌اند.

-
- 1 Reference Sequence
 - 2 Comparability Sequence
 - 3 Distinguishing Coefficient
 - 4 Gray Relational Grade



شکل ۴. تنش های پسماند S_{11} در راستای عمق قطعه از فاصله ۵/۳ میلی‌متری مرکز لیزر در زمان‌های مختلف
Fig. 4. Residual stresses of S_{11} in the depth direction from 3.5 mm of laser center at different times

رسیده است. بنابراین می‌توان زمان ۳۰۰۰۰ نانوثانیه را برای مرحله دوم جهت دستیابی به تنش‌های پسماند، در نظر گرفت.

۲-۲-۳- صحت‌سنجی مدل

ابتدا برخورد یک پالس لیزر در مرکز قطعه مدل می‌شود و نتایج حاصل با گزارش آقایان دینگ و یه [۸] مقایسه می‌شود تا از مدل سه‌بعدی ارائه شده اطمینان حاصل شود. پس از بررسی‌های گسترده در زمینه همگرایی مش در نهایت جهت المان‌بندی در ناحیه محدود از دو و نیم میلیون المان مربعی هشت‌گه C^3D^8 استفاده شد. به دلیل آن‌که تنش پسماند فشاری ایجاد شده عمدتاً در حدود ۱ میلی‌متری نزدیک سطح تشکیل می‌شود، در این ناحیه تعداد المان‌ها بیشتر بوده و سایز کوچک‌ترین المان مورد استفاده در نزدیک سطح به حدود $100 \times 100 \times 16$ میکرومتر می‌رسد. همچنین در اطراف و زیر ناحیه محدود از 102500 المان نیمه‌بی‌نهایت CIN^3DA استفاده شده است.

در شکل ۵ تنش پسماند S_{11} در راستای عمق نمونه که از فاصله ۳/۵ میلی‌متری مرکز لیزر استخراج شده، نمایش داده شده است. همان‌گونه که قابل ملاحظه است، نتایج شبیه‌سازی به‌خوبی توانسته نتایج تجربی را پیش‌بینی نماید و حتی از نتایج مدل‌سازی [۸] نیز به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

در شکل ۶ نیز تنش پسماند S_{11} در سطح قطعه در راستای خط عبور داده شده از مرکز لیزر نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در سطح قطعه نیز شبیه‌سازی این پژوهش به‌خوبی

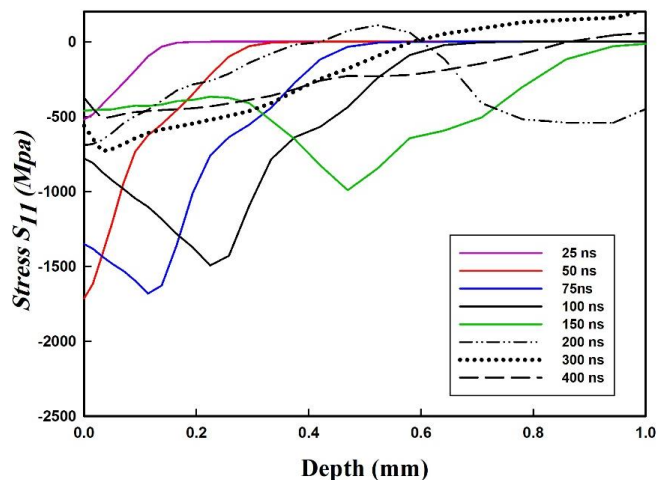
$$C_f = \frac{SS_f}{SS_T} \times 100 \quad (10)$$

هر چه میزان مشارکت یک فاکتور بیشتر باشد، آن فاکتور تاثیر بیشتری بر روی خروجی دارد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی تنش‌های گذرا و پسماند

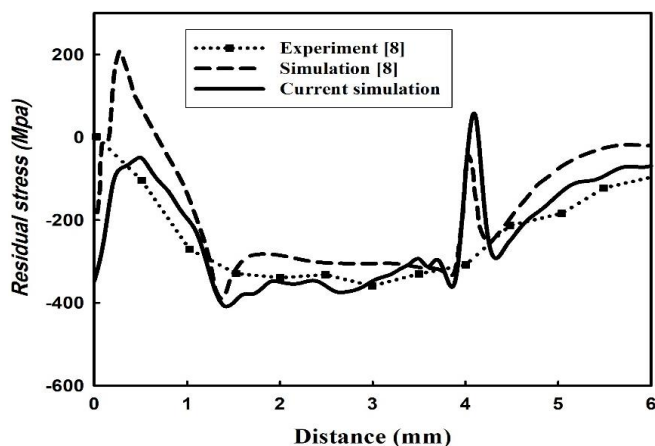
در شکل ۳ نتایج تنش‌های گذرا در راستای عمق نمونه در زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است امواج تنش به مرور زمان داخل جسم نفوذ می‌کنند و در زمان‌های کمتر از ۱۰۰ نانوثانیه که بار فشاری به جسم اعمال می‌شود میزان این تنش‌ها از حد الاستیک هوگونیوت ماده فراتر رفته و منجر به تغییر شکل پلاستیک ماده می‌شوند. اما به مرور زمان و پس از گذشتن از ۱۰۰ نانوثانیه به مرور میزان و عمق این تنش‌ها کاهش می‌یابد و تبدیل به تنش‌های الاستیک می‌شوند. بنابراین در نظر گرفتن زمان ۴۰۰ نانوثانیه برای مرحله اول تحلیل منطقی به نظر می‌آید زیرا در این زمان هیچ تغییر شکل پلاستیکی درون ماده رخ نمی‌دهد.



شکل ۳. پیشروی تنش های گذرا S_{11} در راستای عمق قطعه از فاصله ۳/۵ میلی‌متری مرکز لیزر

Fig. 3. Propagation of dynamic stress waves of S_{11} residual stress in the depth direction from 3.5 mm of laser center

همچنین در شکل ۴ نمودار تنش‌های پسماند در راستای عمق قطعه که از فاصله ۳/۵ میلی‌متری مرکز لیزر استخراج شده‌اند، نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش زمان میزان تغییرات تنش به مرور زمان کاهش می‌یابد و بعد از ۳۰۰۰۰ نانوثانیه تغییرات تنش به شدت کاهش یافته و تنش به حالت پایدار خود

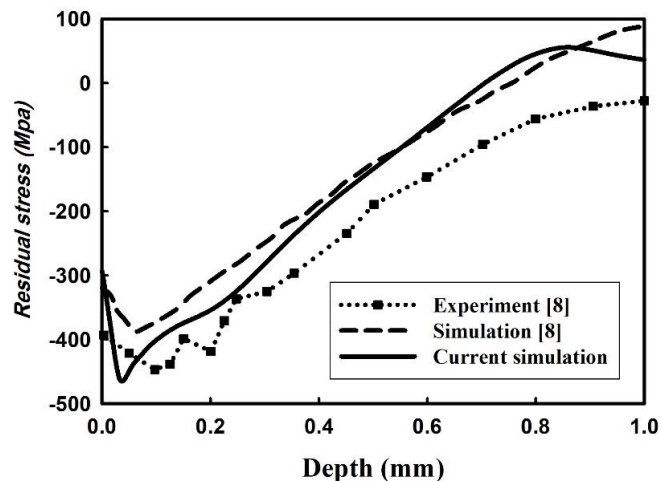


شکل ۶. مقایسه تنش پسماند S11 در سطح قطعه با نتایج شبیه‌سازی و تجربی مقاله [۸]

Fig. 6. Comparison of residual stress S11 at the surface with simulation and experimental results of article [8]

آزمایش‌های ال ۱۶ تاگوچی انجام گرفت. در مجموع ۱۶ شبیه‌سازی مختلف انجام شد که به‌عنوان مثال در آزمایش شماره ۵ هر یک از فاکتورهای ورودی شامل قطر، فشار، زمان و میزان همپوشانی به‌ترتیب برابر ۴ میلی‌متر، ۳/۵ گیگاپاسکال، ۵۰ نانوثانیه و ۵۰ درصد قرار داده شدند. در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف ارائه شده است.

در شکل ۷ نیز کانتور تنش پسماند S_{۱۱} برای آزمایش یازدهم که نمایانگر آزمایش ۳۳۱۲ می‌باشد ارائه شده است. در این آزمایش قطر لیزر برابر ۶ میلی‌متر، فشار لیزر برابر ۳/۵ گیگاپاسکال، زمان



شکل ۵. مقایسه تنش پسماند S11 در راستای عمق از فاصله ۵/۳ میلی‌متری مرکز لیزر با نتایج شبیه‌سازی و تجربی مقاله [۸]

Fig. 5. Comparison of S11 residual stress in the depth direction from 3.5 mm of laser center with simulation and experimental results of article [8]

توانسته نتایج تجربی را پیش‌بینی نماید و از نتایج شبیه‌سازی [۸] به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

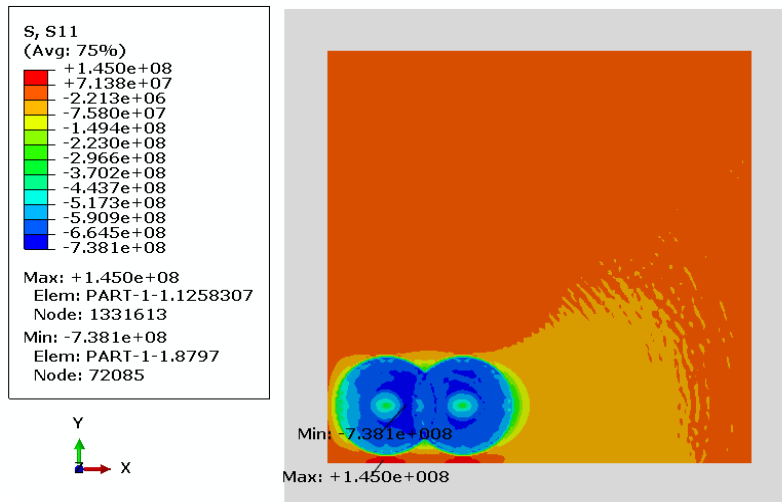
بنابراین مدل سه‌بعدی ارائه شده به‌خوبی می‌تواند تنش پسماند ناشی از لیزر کوبی را درون قطعه پیش‌بینی نماید. حال با اعمال شرایط مدل‌سازی‌های مختلف، نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۳- نتایج مدل‌سازی‌های مختلف

پس از صحت‌سنجی نتایج و اطمینان از مدل ارائه شده،

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی‌ها
Table 4. Simulations results

عمق تنش پسماند (میلی‌متر)	بیشترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	کمترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	میانگین تنش پسماند (مگاپاسکال)	شماره آزمایش
۰/۲۴۱۲	۵۷	-۵۷۰	-۳۵۷	۱
۰/۳۹۷۸	۱۹۱	-۶۳۲	-۳۳۰	۲
۰/۶۴۴۰	۳۷۹	-۶۶۳	-۲۵۲	۳
۰/۹۴۲۲	۷۰۰	-۶۸۷	-۱۹۲	۴
۰/۴۹۶۱	۹۶	-۵۷۴	-۳۹۱	۵
۰/۴۲۰۵	۱۴۲	-۷۴۲	-۵۲۵	۶
۰/۷۴۴۳	۴۲۶	-۶۶۶	-۲۰۹	۷
۰/۷۴۴۳	۴۱۱	-۶۷۱	-۲۶۰	۸
۰/۷۰۸۳	۲۱۵	-۵۴۸	-۳۷۷	۹
۰/۸۱۹۳	۳۶۴	-۶۵۱	-۲۹۳	۱۰
۰/۳۹۷۸	۱۴۵	-۷۳۸	-۴۹۹	۱۱
۰/۶۱۰۷	۲۸۸	-۷۶۴	-۳۳۵	۱۲
۰/۶۸۹۱	۲۰۷	-۵۵۱	-۳۲۸	۱۳
۰/۶۸۹۱	۲۴۵	-۶۸۹	-۳۵۱	۱۴
۰/۸۲۲۷	۳۰۷	-۷۰۸	-۴۳۷	۱۵
۰/۶۰۱۰	۱۸۷	-۷۵۹	-۴۹۵	۱۶



شکل ۷. کانتور تنش پسماند S11 در قطعه در آزمایش ۳۳۱۲
Fig. 7. Contour of S11 stress for 3312 experiment

داده‌هاست که جهت این کار برای میانگین تنش پسماند از رویکرد هر چه کمتر بهتر استفاده می‌شود. زیرا هر چه این عدد کوچک‌تر (منفی‌تر) باشد نشان‌دهنده این است که تنش پسماند ایجاد شده در سطح فشاری‌تر است و بهتر است. کمترین تنش پسماند نیز هر چه کمتر (منفی‌تر) و بیشترین تنش پسماند نیز هر چه کمتر باشند بهتر است و جهت نرمال‌سازی این خروجی‌ها از رابطه (۳) استفاده می‌شود. اما عمق تنش پسماند هر چه بیشتر باشد بهتر است و جهت نرمال‌سازی آن از رابطه (۲) استفاده می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است.

لیزر ۳۰ نانوثانیه و میزان هم‌پوشانی ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشخص است در ناحیه لیزر خورده تنش پسماند فشاری، ایجاد شده اما در سایر نواحی تنش پسماند کششی ایجاد شده است تا تعادل تنش‌ها درون قطعه ایجاد شود. کمترین تنش پسماند ایجاد شده برابر ۷۳۸- مگاپاسکال و بیشترین تنش پسماند برابر ۱۴۵ مگاپاسکال می‌باشد.

۳-۴- نتایج بهینه‌سازی

۳-۴-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

اولین مرحله جهت تحلیل رابطه‌ای خاکستری پیش‌پردازش

جدول ۵- پیش‌پردازش داده‌ها

Table 5. Data preprocessing

شماره آزمایش	میانگین تنش پسماند (مگاپاسکال)	کمترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	بیشترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	عمق تنش پسماند (میلی‌متر)
۱	۰/۴۹۵۵	۰/۱۰۱۹	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۲	۰/۴۱۴۴	۰/۳۸۸۹	۰/۷۹۱۶	۰/۲۲۳۴
۳	۰/۱۸۰۲	۰/۵۳۲۴	۰/۴۹۹۲	۰/۵۷۴۶
۴	۰/۰۰۰۰	۰/۶۴۳۵	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
۵	۰/۵۹۷۶	۰/۱۲۰۴	۰/۹۳۹۳	۰/۳۶۳۵
۶	۱/۰۰۰۰	۰/۸۹۸۱	۰/۸۶۷۸	۰/۲۵۵۸
۷	۰/۰۵۱۱	۰/۵۴۶۳	۰/۴۱۰۶	۰/۷۱۷۷
۸	۰/۲۰۴۲	۰/۵۶۹۴	۰/۴۴۹۴	۰/۷۱۷۷
۹	۰/۵۵۵۶	۰/۰۰۰۰	۰/۷۵۴۳	۰/۶۶۶۳
۱۰	۰/۳۰۳۳	۰/۴۷۶۹	۰/۵۲۲۶	۰/۸۲۴۷
۱۱	۰/۹۲۱۹	۰/۸۷۹۶	۰/۸۶۳۱	۰/۲۲۳۳
۱۲	۰/۴۲۹۴	۱/۰۰۰۰	۰/۶۴۰۷	۰/۵۲۷۱
۱۳	۰/۴۰۸۴	۰/۰۱۳۹	۰/۷۶۶۷	۰/۶۳۸۹
۱۴	۰/۴۷۷۵	۰/۶۵۲۸	۰/۷۰۷۶	۰/۶۳۸۹
۱۵	۰/۷۳۵۷	۰/۷۴۰۷	۰/۶۱۱۲	۰/۸۲۹۵
۱۶	۰/۹۰۹۹	۰/۹۷۶۹	۰/۷۹۷۸	۰/۵۱۳۳

جدول ۶. ضرایب رابطه‌ای خاکستری و امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر آزمایش
Table 6. Grey relational coefficients and grey relational grade for each experiment

شماره آزمایش	میانگین تنش پسماند (مگاپاسکال)	کمترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	بیشترین تنش پسماند (مگاپاسکال)	عمق تنش پسماند (مگاپاسکال)	امتیاز رابطه‌ای خاکستری
۱	۰/۴۹۷۸	۰/۳۵۷۶	۱/۰۰۰۰	۰/۳۳۳۳	۰/۵۴۷۲
۲	۰/۴۶۰۶	۰/۴۵۰۰	۰/۷۰۵۸	۰/۳۹۱۷	۰/۵۰۲۰
۳	۰/۳۷۸۸	۰/۵۱۶۷	۰/۴۹۹۶	۰/۵۴۰۳	۰/۴۸۳۹
۴	۰/۳۳۳۳	۰/۵۸۳۸	۰/۳۳۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۵۶۲۶
۵	۰/۵۵۴۱	۰/۳۶۲۴	۰/۸۹۱۷	۰/۴۳۹۹	۰/۵۶۲۱
۶	۱/۰۰۰۰	۰/۸۳۰۷	۰/۷۹۰۹	۰/۴۰۱۹	۰/۷۵۵۹
۷	۰/۳۴۵۱	۰/۵۲۴۳	۰/۴۵۹۰	۰/۶۳۹۱	۰/۴۹۱۹
۸	۰/۳۸۵۹	۰/۵۳۷۳	۰/۴۷۵۹	۰/۶۳۹۱	۰/۵۰۹۶
۹	۰/۵۲۹۴	۰/۳۳۳۳	۰/۶۷۰۵	۰/۵۹۹۸	۰/۵۳۳۲
۱۰	۰/۴۱۷۸	۰/۴۸۸۷	۰/۵۱۱۶	۰/۷۴۰۴	۰/۵۳۹۶
۱۱	۰/۸۴۶۹	۰/۸۰۵۹	۰/۷۸۵۱	۰/۳۹۱۷	۰/۷۱۱۹
۱۲	۰/۴۶۷۰	۱/۰۰۰۰	۰/۵۸۱۹	۰/۵۱۳۹	۰/۶۴۰۷
۱۳	۰/۴۵۸۰	۰/۳۳۶۵	۰/۶۸۱۸	۰/۵۸۰۷	۰/۵۱۴۳
۱۴	۰/۴۸۹۰	۰/۵۹۰۲	۰/۶۳۱۰	۰/۵۸۰۷	۰/۵۷۲۷
۱۵	۰/۶۵۴۲	۰/۶۵۸۵	۰/۵۶۲۶	۰/۷۴۵۷	۰/۶۵۵۳
۱۶	۰/۸۴۷۳	۰/۹۵۵۸	۰/۷۱۲۰	۰/۵۰۶۷	۰/۷۵۵۵

میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر فاکتور در هر سطح محاسبه شود. یعنی به‌عنوان مثال قطر در ۴ آزمایش اول در سطح یک قرار دارد که میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای این ۴ آزمایش بایستی محاسبه شود (رابطه (۱۱)):

$$\gamma_1(\text{قطر}) = \frac{0.5472 + 0.5020 + 0.4839 + 0.5626}{4} = 0.5239 \quad (11)$$

سپس همین محاسبات برای قطر در سطح دوم، سوم و چهارم و همچنین بقیه فاکتورها بایستی محاسبه شود. نتایج حاصل در جدول ۷ نمایش داده شده است. منظور از دلتا در این جدول، اختلاف بین بیشترین و کمترین امتیاز رابطه‌ای خاکستری در سطوح مختلف هر فاکتور است. هر چه دلتا برای یک فاکتور بیشتر باشد آن فاکتور تاثیر بیشتری بر روی خروجی دارد. همان‌گونه که در این جدول مشخص است اختلاف بیشترین و کمترین امتیاز برای فاکتور زمان در سطح

۳-۴-۲- ضرایب رابطه‌ای خاکستری و امتیاز رابطه‌ای خاکستری

پس از پیش‌پردازش و نرمال‌سازی داده‌ها بایستی ضرایب رابطه‌ای خاکستری مطابق رابطه (۵) محاسبه شوند. در رابطه (۵)، ξ برابر ۰/۵ فرض می‌شود. نتایج به‌دست آمده در جدول ۶ نمایش داده شده است. همچنین پس از محاسبه ضرایب رابطه‌ای خاکستری، بایستی امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر آزمایش محاسبه شود. وزن همه خروجی‌ها یکسان فرض می‌شود و از رابطه (۶) جهت محاسبه امتیاز رابطه‌ای خاکستری استفاده می‌شود. نتایج حاصل در جدول ۶ نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج، آزمایش‌های شماره ۶ و ۱۶ که امتیاز رابطه‌ای خاکستری آن‌ها از سایر آزمایش‌ها بزرگ‌تر است، به حالت بهینه نزدیک‌تر می‌باشند.

۳-۴-۳- حالت بهینه هر فاکتور

جهت مشخص شدن حالت بهینه هر یک از فاکتورها، بایستی

جدول ۷. جدول پاسخ برای امتیاز رابطه‌ای خاکستری
Table 7. Response table for the grey relational grade

سطح پارامتر	قطر	فشار	زمان	همپوشانی
۱	۰/۵۲۳۹	۰/۵۳۹۲	۰/۶۹۲۶	۰/۵۶۳۱
۲	۰/۵۷۹۸	۰/۵۹۲۶	۰/۵۹۰۰	۰/۵۵۹۴
۳	۰/۶۰۶۴	۰/۵۸۵۷	۰/۵۲۴۸	۰/۵۸۵۳
۴	۰/۶۲۴۴	۰/۶۱۷۱	۰/۵۲۷۱	۰/۶۲۶۸
دلتا	۰/۱۰۰۵	۰/۰۷۷۹	۰/۱۶۷۸	۰/۰۶۷۴
رتبه	۲	۳	۱	۴

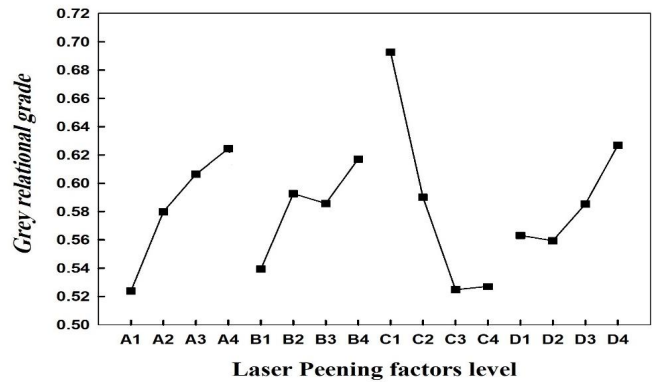
۳-۴-۴- نتایج تحلیل واریانس

تحلیل واریانس بر روی نتایج انجام گرفت تا مشخص شود که هر فاکتور چه میزان بر روی نتایج تاثیرگذار است. در جدول ۸ نتایج تحلیل واریانس بر روی امتیاز رابطه‌ای خاکستری ارائه شده است. طبق این نتایج، بیشترین تاثیر را زمان لیزر بر روی نتایج دارد که حدود ۵۸/۸۷ درصد تاثیرگذار است. قطر و فشار لیزر و میزان هم‌پوشانی نیز به ترتیب ۱۸/۳۰، ۱۰/۰۶ و ۹/۱۱ درصد بر روی نتایج تاثیرگذار هستند و خطا حدود ۳/۶۴ درصد تاثیرگذار می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای لیزرکوبی انجام گرفت. از روش اجزاء محدود جهت مدل‌سازی استفاده شد. از مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک برای مدل‌سازی خواص پلاستیک ماده و از تحلیل دینامیک-اکسپلیسیت برای تحلیل هر دو مرحله برخورد لیزر و تعادل تنش‌ها درون قطعه استفاده شد. آرایه‌های متعام تاگوچی جهت طراحی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. قطر، فشار، زمان و میزان هم‌پوشانی بین دو پالس مجاور لیزر به‌عنوان فاکتورهای کنترلی که در ۴ سطح تغییر می‌کنند انتخاب شدند و از آزمایش ۱۶ تاگوچی جهت طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. میانگین تنش پسماند در زیر پالس اول، بیشترین تنش پسماند، کمترین تنش پسماند و میانگین عمق تنش پسماند در مرکز دو پالس به‌عنوان خروجی‌های بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند و با انجام تحلیل رابطه‌ای خاکستری، بهینه‌سازی پارامترها انجام گرفت.

نتایج بهینه‌سازی نشان‌دهنده این بود که حالت بهینه هر یک از پارامترهای قطر، فشار، زمان و میزان هم‌پوشانی به ترتیب در سطوح



شکل ۸: گراف امتیاز رابطه‌ای خاکستری
Fig. 8. Response graph for mean Grey relational grade

یک و سه برابر ۰/۱۶۷۸ می‌باشد، پس این فاکتور بیشترین تاثیر را بر روی نتایج دارد. پس از زمان، به ترتیب قطر، فشار و میزان هم‌پوشانی بر روی نتایج تاثیرگذار هستند، اما میزان تاثیر هر فاکتور بر روی نتایج مشخص نیست و بایستی از تحلیل واریانس استفاده نمود تا میزان تاثیر هر فاکتور بر روی نتایج مشخص شود.

در شکل ۸ میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری هر فاکتور در هر سطح نمایش داده شده است. قطر لیزر با A، فشار لیزر با B، زمان لیزر با C و میزان هم‌پوشانی با D نمایش داده شده‌اند. سطحی که در آن میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای J مین آزمایش در حالت بهینه قرار دارد، حالت بهینه آن فاکتور است. با توجه به شکل ۶ و جدول ۶ حالت بهینه هر یک از فاکتورهای قطر، فشار، زمان و میزان هم‌پوشانی به ترتیب در سطوح چهارم، چهارم، اول و چهارم می‌باشد. بنابراین زمانی که قطر لیزر برابر ۸ میلی‌متر، فشار لیزر برابر ۴ گیگاپاسکال، زمان لیزر برابر ۳۰ نانوثانیه و میزان هم‌پوشانی برابر ۷۵ درصد باشند، هر یک از فاکتورها در حالت بهینه قرار دارند و بهترین نتیجه به دست می‌آید.

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس بر روی امتیاز رابطه‌ای خاکستری
Table 8. ANOVA results on grey relational grade

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	نسبت F	میزان مشارکت (%)
قطر	۳	۰/۰۲۳۱	۰/۰۰۷۷	۵/۱۳۳۳	۱۸/۳۰۴۳
فشار	۳	۰/۰۱۲۷	۰/۰۰۴۲	۲/۸۰۰۰	۱۰/۰۶۳۴
زمان	۳	۰/۰۷۴۳	۰/۰۲۴۸	۱۶/۵۳۳۳	۵۸/۸۷۴۸
هم‌پوشانی	۳	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۳۸	۲/۵۳۳۳	۹/۱۱۲۵
خطا	۳	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۱۵	۳/۶۴۵۰	
کل	۱۵	۰/۱۲۶۲		۱۰۰	

- [3] M. Srivastava, R. Tripathi, S. Hloch, S. Chattopadhyaya, A.R. Dixit, Potential of using water jet peening as a surface treatment process for welded joints, *Procedia Engineering*, 149 (2016) 472-480.
- [4] J.-E. Masse, G. Barreau, Laser generation of stress waves in metal, *Surface and Coatings Technology*, 70(2-3) (1995) 231-234.
- [5] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. Lieurade, Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour, *Materials Science and Engineering: A*, 210(1-2) (1996) 102-113.
- [6] J.-M. Yang, Y. Her, N. Han, A. Clauer, Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes, *Materials Science and Engineering: A*, 298(1) (2001) 296-299.
- [7] W. Braisted, R. Brockman, Finite element simulation of laser shock peening, *International Journal of Fatigue*, 21(7) (1999) 719-724.
- [8] K. Ding, L. Ye, Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 178(1-3) (2006) 162-169.
- [9] Y. Cao, Y.C. Shin, B. Wu, Parametric study on single shot and overlapping laser shock peening on various metals via modeling and experiments, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(6) (2010) 061010.
- [10] F. Dai, J. Lu, Y. Zhang, D. Wen, X. Ren, J. Zhou, Effect of laser spot size on the residual stress field of pure Al treated by laser shock processing: Simulations, *Applied Surface Science*, 316 (2014) 477-483.
- [11] H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, A.H. Clauer, K. Langer, D.S. Stargel, Simulation of residual stress induced by a laser peening process through inverse optimization of material models, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14) (2010) 1997-2006.
- [12] W. Wang, J.Z. Zhou, S. Huang, Y.J. Fan, C. Wang, J. Fan, Parameters Optimization of Laser Shot Peening Based on Multi-Island Genetic Algorithm, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2011, pp. 387-390.

چهارم، چهارم، اول و چهارم می‌باشد که به ترتیب برابر ۸ میلی‌متر، ۴ گیگاپاسکال، ۳۰ نانوثانیه و ۷۵ درصد می‌باشند.
همچنین تحلیل واریانس بر روی نتایج صورت گرفت تا تاثیر هر یک از پارامترها بر روی خروجی مشخص شود که زمان لیزر با ۵۸/۸۷ درصد، تاثیرگذارترین پارامتر بر روی نتایج است.

فهرست علائم

$X_i^0(k)$	داده اصلی (خام)
$X_i^*(k)$	داده بعد از پیش‌پردازش داده‌ها
SS_T	مجموع کل مربع انحرافات
γ_j	میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای j مین
γ_m	میانگین کل امتیازات رابطه‌ای خاکستری
γ_f	میانگین امتیاز رابطه‌ای خاکستری هر فاکتور
SS_f	مربع انحرافات ناشی از فاکتورها
MS	میانگین مربع انحرافات
df	درجه آزادی
F	نسبت واریانس
C	درصد مشارکت
علائم	
ξ	ضریب رابطه‌ای خاکستری
ζ	ضریب تمایز
زیرنویس‌ها	
f	فاکتور
e	خطا

مراجع

- [1] Y. Al-Obaid, Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis, *Mechanics of Materials*, 19(2-3) (1995) 251-260.
- [2] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, G. Prokopenko, V. Knysh, L. Gimbrede, Effect of Ultrasonic Peening on microhardness and residual stress in materials and welded elements, in: *SEM International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. Costa Mesa, California, USA, June 7-10, 2004.(on CD), 2004.

- roundness error in drilling of Al 6061 alloy, International journal of lean thinking, 3(2) (2012) 67-78.
- [18] M. Kowalczyk, Application of Taguchi and Anova methods in selection of process parameters for surface roughness in precision turning of titanium, Advances in Manufacturing Science and Technology, 38(2) (2014).
- [19] G. Taguchi, A.P. Organization, Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes, The Organization, 1986.
- [20] D. Julong, Introduction to grey system theory, The Journal of grey system, 1(1) (1989) 1-24.
- [21] A. Mohammadi, N. Molaei, Applying a Multi Criteria Decision Making Model Based On Grey Theory In Performance Evaluation Of Firms, journal of Industrial management 2(4) (2010).In Persian)
- [22] B.C. Jiang, S.-L. Tasi, C.-C. Wang, Machine vision-based gray relational theory applied to IC marking inspection, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 15(4) (2002) 531-539.
- [13] S. Bhamare, G. Ramakrishnan, S.R. Mannava, K. Langer, V.K. Vasudevan, D. Qian, Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy, Surface and Coatings Technology, 232 (2013) 464-474.
- [14] C. Fu, J. Zheng, J. Zhao, W. Xu, Application of grey relational analysis for corrosion failure of oil tubes, Corrosion Science, 43(5) (2001) 881-889.
- [15] J. Lin, C. Lin, The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(2) (2002) 237-244.
- [16] L.K. Pan, C.C. Wang, S.L. Wei, H.F. Sher, Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based Grey analysis, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 107-116.
- [17] R. Sreenivasulu, C. Rao, Application of gray relational analysis for surface roughness and